



TÓPICOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Ageu Pereira de Almeida

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

Orientadora:

Dra. Regina Lélis de Sousa

Araguaína, TO
Março de 2018

TÓPICOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Ageu Pereira de Almeida

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

Aprovada por:

Dra. Regina Lélis de Sousa

Dra. Sheyse Martins de Carvalho

Dra. Glaura Caroená Azevedo de Oliveira

Dr. Luís Antonio Cabral

Araguaína, TO
05 de Março de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A447t Almeida, Ageu Pereira de .
TÓPICOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO
UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS. / Ageu Pereira de
Almeida. – Araguaína, TO, 2018.
198 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do
Tocantins – Câmpus Universitário de Araguaína - Curso de Pós-
Graduação (Mestrado) Profissional Nacional em Ensino de Física,
2018.
Orientador: Regina Lélis de Sousa

1. Física Quântica. 2. Simulações Computacionais. 3.
Aprendizagem Significativa. 4. Tópicos de Física Quântica na
Educação Básica. I. Título

CDD 530

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde
que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica
da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa Karla Almeida, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, pela paciência e por compreender as correrias que passamos a cada semestre.

Agradeço aos meus filhos Luca Felipe e Alícia Almeida. Embora vocês não tivessem conhecimento disto, me iluminaram de maneira especial. As pausas entre um parágrafo e outro de produção contribuíram para surgimentos de novas ideias, porque através de gestos e palavras vocês me ajudaram a superar todas as dificuldades.

Agradeço a minha professora orientadora Dra. Regina Lélis, que com toda sua dedicação e paciência foi fundamental para conclusão deste trabalho. Seus ensinamentos foram primordial para aprofundamento dos meus conhecimentos. Nossas conversas, mesmo quando não foram sobre conteúdos de física, valeram a pena para minha formação docente. Obrigado por tudo.

Agradeço aos meus pais e irmãos. Mesmo longe, vocês continuam presentes em minha vida. Sou quem sou porque procurei me espelhar em vocês, e eu só tenho motivos para agradecer.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro.

Agradeço, aos meus colegas de mestrado. Com vocês, os finais de semana estudando na UFT, se tornaram divertidos e proveitosos. As experiências compartilhadas com vocês foram essenciais para minha formação acadêmica.

Agradeço aos meus alunos do ensino médio que são a razão para que eu continue buscando novos conhecimentos na minha prática docente.

À minha esposa Karla Almeida e aos meus filhos Luca Felipe e Alícia que, com muito carinho e apoio, me ajudaram a chegar até esta etapa de minha vida.

“Como o comportamento atômico é tão diferente da experiência ordinária, é muito difícil adquirir familiaridade com o mesmo, ele parece peculiar e misterioso para todos – tanto para o novato quanto para o físico experiente. Mesmo os especialistas não a entendem do modo como gostariam de entendê-la, e é perfeitamente razoável que isso aconteça porque toda a experiência, ou a intuição, humana direta se aplica a objetos em grande escala”.

FEYNMAN

Resumo

TÓPICOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Ageu Pereira de Almeida

Orientador: Dra. Regina Lélis de Sousa

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

Nos dias atuais tem surgido inúmeras novidades tecnológicas. Diante disto, enxergamos possíveis oportunidades pedagógicas relacionadas ao uso de recursos visuais, em sua maioria disponíveis na internet, para o processo de ensino e aprendizagem. Neste trabalho, apresentamos um livro contendo textos didáticos de caráter teórico que pode ser utilizado para introduzir tópicos de Física Quântica no ensino médio. Os textos inseridos no livro são acompanhados de simulações computacionais disponíveis gratuitamente e foram concebidos para uso em ambientes instrucionais por alunos e professores. Os assuntos abordados no produto educacional contemplam desde a quantização da energia, proposta por Planck para explicar a radiação de corpos aquecidos, até o modelo atômico da mecânica quântica. Aplicações tecnológicas dos conceitos abordados também foram introduzidas. O produto educacional desenvolvido foi aplicado por nós no ensino médio e, após análise dos resultados de algumas atividades propostas, concluímos que o uso de simulações computacionais podem contribuir de maneira decisiva para o processo de ensino e aprendizagem, propiciando um ambiente motivador, estimulando a participação dos alunos e promovendo uma aprendizagem significativa de conceitos. Como resultado relevante do trabalho desenvolvido destacamos nossa experiência de sucesso em introduzir conceitos de Física Moderna para turmas regulares de ensino médio com uma abordagem que permitiu participação ativa dos estudantes.

Palavras-chave: Ensino de Física, Física Quântica, Objetos Virtuais de Aprendizagem, Simulações Computacionais, Aprendizagem Significativa.

Abstract

TOPICS OF QUANTUM PHYSICS IN HIGH SCHOOL USING COMPUTATIONAL SIMULATIONS

Ageu Pereira de Almeida

Supervisor: Dr. Regina Lélis de Sousa

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

Nowadays, it has been observed numerous technological innovations. In view of this, we have identified possible pedagogical opportunities related to the use of visual resources, which are mostly accessible on the internet and that can be very useful for the teaching and learning process. Here, we present a textbook which contains didactic texts designed to be used in introductory classes of Quantum Physics topics in high school. The texts are composed of theory and computer simulations available free of charge and are designed for use in the classroom by students and teachers. The topics covered in the educational product include from the quantization of the energy proposed by Planck to explain the black body radiation to the quantum mechanics atomic. Technological applications of physical concepts were also introduced. Our educational product was applied in high school classes and the analysis of the results of some proposed activities allowed us to conclude that the use of computer simulations can decisively contribute to the teaching and learning process, providing a motivating environment, stimulating the participation of students and promoting a meaningful learning of concepts. As a relevant result of the activities developed we emphasize that our successful experience in introducing concepts of Modern Physics to regular high school class with new teaching initiatives that allowed more active participation of students.

Keywords: Physics Education, Quantum Physics, Digital Learning Objects, Computer simulation, Meaningful Learning Theory.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tela inicial do simulador computacional “Radiação de Corpo Negro”. . .	48
Figura 2 – Simulação de ondas na água utilizado o simulador computacional da plataforma Phet.	49
Figura 3 – Simulação do experimento da dupla fenda com partículas. Fonte < http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html >	50
Figura 4 – Simulação da dupla fenda sem observador.	51
Figura 5 – Simulação de um arranjo experimental para investigação do efeito fotoelétrico.	52
Figura 6 – Simulação da dupla fenda utilizando fótons e sem detector	53
Figura 7 – Imagem da tela principal do simulador computacional para o átomo de hidrogênio.	54
Figura 8 – Simulação para o átomo de hidrogênio empregando o modelo de Bohr.	55
Figura 9 – Resultado do fenômeno de interferência parcialmente construtiva para ondas de mesma amplitude, mesma frequência e comprimento de onda, mas que se propagam em sentidos opostos em uma corda com ambas as extremidades fixas. A onda estacionária resultante e seus elementos também são mostrados na figura.	56
Figura 10 – Simulação para o átomo de Hidrogênio, mas com o modelo de Schrödinger ou modelo da Mecânica Quântica.	56
Figura 11 – Ilustração das densidades de probabilidades ou orbitais para o átomo de H. Fonte < https://pt.wikipedia.org/wiki/Número_quântico >.	57
Figura 12 – Experimento de Stern-Gerlach - fonte (GOMES; PIETROCOLA et al., 2011)	57
Figura 13 – Simulação de lasers.	58
Figura 14 – Quantitativo de alunos que já ouviram falar em Física Quântica (pré-teste).	59
Figura 15 – Quantitativo de alunos que já ouviram falar em Física Quântica (pós-teste).	60
Figura 16 – Assuntos que os alunos já ouviram falar (pré-teste)	61
Figura 17 – Assuntos que os alunos já ouviram falar (pós-teste)	61
Figura 18 – Respostas dos alunos sobre o que é uma partícula (pré-teste)	62
Figura 19 – Respostas dos alunos sobre o que é uma partícula (pós-teste)	63
Figura 20 – Respostas dos alunos sobre o que é uma onda (pré-teste)	63
Figura 21 – Respostas dos alunos sobre o que é uma onda (pós-teste)	64
Figura 22 – Respostas dos alunos sobre a natureza do elétron (pré-teste)	64
Figura 23 – Respostas dos alunos sobre a natureza do elétron (pós-teste)	65
Figura 24 – Respostas dos alunos sobre quantização (pré-teste)	65

Figura 25 – Respostas dos alunos sobre quantização (pós-teste)	66
Figura 26 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pré-teste)	67
Figura 27 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pós-teste)	67
Figura 28 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pré-teste)	68
Figura 29 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pós-teste)	68
Figura 30 – Respostas dos alunos sobre o modelo atômico de Bohr (pré-teste) . . .	69
Figura 31 – Respostas dos alunos sobre o modelo atômico de Bohr (pós-teste) . . .	69
Figura 32 – Questionamento sobre quais partículas compõem o átomo (pré-teste) .	70
Figura 33 – Questionamento sobre quais partículas compõem o átomo (pós-teste) .	70
Figura 34 – Aparelhos que os alunos consideram importantes e sabem como funcio- nam (pré-teste)	71
Figura 35 – Aparelhos que os alunos consideram importantes e sabem como funcio- nam (pós-teste)	71
Figura 36 – Aparelhos que os alunos gostariam de saber como funcionam (pré-teste)	72
Figura 37 – Aparelhos que os alunos gostariam de saber como funcionam (pós-teste)	73
Figura 38 – Questão sobre a natureza corpuscular da luz no efeito fotoelétrico. . . .	74
Figura 39 – Questão sobre a emissão de elétrons no efeito fotoelétrico.	74
Figura 40 – Questão sobre a emissão de elétrons no efeito fotoelétrico.	75
Figura 41 – Questão sobre a quantização da Energia.	76
Figura 42 – Questão sobre a natureza dual da luz.	77
Figura 43 – Questão sobre difração e interferência.	78
Figura 44 – Dupla Fenda	78
Figura 45 – Questão sobre dupla fenda para fótons.	79
Figura 46 – Questão sobre dupla fenda para feixe de elétrons.	80
Figura 47 – Questão sobre o princípio da incerteza.	81
Figura 48 – Questão sobre o modelo atômico de Bohr.	82
Figura 49 – Questão sobre o uso de recursos computacionais.	83
Figura 50 – Questão sobre a importância de estudar Física Quântica no Ensino Médio.	83
Figura 51 – Questão sobre uso de recursos didáticos.	85
Figura 52 – Dupla Fenda	197

Sumário

	Introdução	19
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.1	Física Quântica no Ensino Médio - O Que dizem as Pesquisas . . .	21
1.2	Uso de Modelagem Computacional no Ensino da Quântica	24
1.3	A Quântica nos Livros didáticos	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1	Aprendizagem Significativa de Ausubel	35
3	METODOLOGIA	41
3.1	Etapas realizadas para a pesquisa	41
3.2	Resumo das Aulas ministradas	42
4	O PRODUTO EDUCACIONAL	47
5	DISCUSSÕES E RESULTADOS	59
5.1	Pré-teste e Pós-teste	59
5.2	Segundo Questionário	72
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICES	93
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	95
	APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL	99
	APÊNDICE C – SEGUNDO QUESTIONÁRIO	195

Introdução

A sociedade atual vive um momento em que as tecnologias de última geração estão cada vez mais presentes no dia a dia. Estas tecnologias podem ser encontradas nas áreas da Tecnologia da Informação e Comunicação (celulares, smartphones, câmeras fotográficas, filmadoras, computadores, etc); na medicina (medicina nuclear – ressonância nuclear magnética, cirurgia a laser); nos dispositivos ópticos (câmeras de segurança, portas eletrônicas e lasers) e em outras aplicações como a nanotecnologia, em que apresentam aplicações de conhecimentos relacionados à Física Quântica. Mesmo diante da importância da Física Quântica nos dias atuais, o que predomina nos currículos do ensino médio é a Física Clássica, ou seja, o ensino de física se restringe ao que foi construído até o final do século XIX, deixando mais de 100 anos em descobertas científicas fora das grades curriculares (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; MORAIS, 2015). Nessa perspectiva, propusemos elaborar um produto educacional voltado para o ensino médio, para que fosse possível inserir tópicos de Física Quântica, tais como: radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, princípio da incerteza, difração de elétrons, átomo de Bohr, modelo atômico da mecânica quântica, etc.

A motivação para produzir este material surgiu após vivenciar durante seis anos, ministrando aula, a realidade do ensino de física no sistema de educação básica. As tentativas de inserir tópicos de Física Quântica muitas das vezes foram frustrantes por falta de materiais adequados ou métodos que motivassem os alunos durante as aulas. Visto que, a maioria dos livros didáticos adotados pela rede pública, tais como Guimarães, Piqueira e Carron (2010), Beatriz (2010), Gualter, Newton e Helou (2010) trazem a Física Quântica de forma confusa, incompleta e fora do contexto histórico. Portanto, a ideia inicial de nossa pesquisa surgiu a partir da necessidade de introduzir tópicos da Física Quântica no ensino básico de educação, pois cada vez mais deparamos com novos aparelhos eletrônicos e opto-eletrônicos, sistema de controle, novos lasers para aplicações em medicina ou em meios de comunicação. Neste contexto é fundamental que o estudante do ensino médio conheça os princípios básicos da tecnologia atual, já que ela está presente em seu cotidiano e, muito provavelmente, definirá o seu futuro profissional (OSTERMANN; MOREIRA, 2001; VALADARES; MOREIRA, 1998; TERRAZZAN, 1992).

O produto educacional é constituído por textos didáticos contendo exposição teórica de tópicos de Física Quântica. A discussão dos tópicos se fará por meio de simulações computacionais oriundas de plataformas de acesso público. Assim sendo, este material tem por objetivo construir uma sequência didática que permita a introdução de alguns conceitos básicos de Física Quântica, tornando a abordagem inovadora o suficiente para tentar minimizar os problemas enfrentados pelos professores da Educação Básica. As

atividades são concebidas para que, após trabalhar com este material, os alunos possam compreender e discutir os novos conceitos e utilizá-los para lidar com o embasamento teórico dos fenômenos tecnológicos cotidianos. Nesse sentido, consideramos que o produto educacional é um material didático diferenciado, pois as modelagens propostas possuem ligação direta com o cotidiano dos alunos e explicam os princípios de funcionamento de diversos aparelhos tecnológicos contemporâneos. Dessa forma, a pesquisa cujos resultados foram apresentados e discutidos neste trabalho, propõe incluir conteúdos de Física Quântica no ensino médio, tendo em vista a elaboração de alternativas pedagógicas para o ensino. Com isso, pretendemos contribuir para que alcancemos uma educação de qualidade e que proporcione estímulos cognitivos dos estudantes, oportunizando o desenvolvimento de habilidades que permitam entender o mundo que os cercam e as tecnologias que utilizam cotidianamente.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo fizemos um levantamento bibliográfico sobre a inserção de tópicos de Física Quântica no ensino médio, o uso de modelagem computacional no Ensino de Quântica e como os livros didáticos abordam os assuntos relacionados a Física Quântica. No segundo capítulo, abordamos a fundamentação teórica que fornece subsídio a este trabalho, destacando a aprendizagem significativa de Ausubel. O terceiro capítulo traz a metodologia trabalhada, o detalhamento das etapas realizadas durante a pesquisa e um resumo das aulas nas quais aplicamos o produto educacional. No capítulo quatro fazemos uma breve descrição de cada tópico abordado no produto educacional, assim como os objetivos que esperamos alcançar após sua aplicação. No quinto capítulo estão as análises dos dados obtidos através de questionários e as discussões dos resultados. E, finalizamos com o sexto capítulo, fazendo algumas considerações sobre a importância de utilizar materiais didáticos, como o produto educacional desenvolvido durante esta pesquisa, no ensino de Física.

1 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, faremos um levantamento bibliográfico sobre a introdução dos principais tópicos de Física Quântica no ensino médio. Inicialmente, apresentaremos trabalhos publicados em artigos acadêmicos, procurando destacar aqueles que resultaram em aprendizagem significativa. Faremos também um levantamento sobre a forma que os livros didáticos utilizados nas escolas de ensino médio abordam o estudo da Física Quântica, analisando como os assuntos são apresentados, assim como, as ordens de apresentação e a distinção entre Física Clássica e Física Quântica.

1.1 Física Quântica no Ensino Médio - O Que dizem as Pesquisas

A física predominante nos currículos do ensino médio é a Física Clássica. Entende-se por Física Clássica toda física descoberta antes de 1900. A Física Clássica consegue explicar a maioria dos fenômenos presentes no nosso cotidiano tais como eventos relacionados à eletricidade, ao movimento dos corpos macroscópicos e à óptica. No entanto, na segunda metade do século XIX, a Física Clássica foi mal sucedida na explicação de dados observacionais relacionados a alguns fenômenos, tais como emissão de corpos aquecidos, difração de elétrons, efeito fotoelétrico e modelos atômicos. Na tentativa de explicar os fenômenos onde a Física Clássica falhara, foram necessárias mudanças profundas e o desenvolvimento de novos conceitos físicos. Neste contexto nascia uma “nova física” a qual é conhecida como Física Moderna. Dentro dessa nova física, surgida a partir do ano de 1900, está a Física Quântica, cujo foco é estudar sistemas físicos que possuem dimensões próximas ou abaixo da escala atômica, ou seja, estudar os fenômenos relacionados às moléculas, átomos e partículas subatômicas. Embora resultados da Teoria Quântica para limites de grandes números quânticos se reduzam àqueles da Mecânica Clássica, é na explicação dos fenômenos microscópios com grande precisão que reside seu grande sucesso e, não nos custa lembrar, em uma escala na qual a teoria clássica falha totalmente.

A Física Quântica está presente em muitos dispositivos eletrônicos, tais como transistor (presentes em televisores, computadores e aparelhos celulares), lasers, diodos, telas de cristal líquido, leitores ópticos, dispositivos automáticos (portas e torneiras automáticas) e até em aparelhos aplicados à medicina. Não é exagero afirmar que é a base das tecnologias que nos cercam. Nesse sentido é preciso reformular o ensino de Física que é oferecido por nossas escolas, ofertando conteúdos contemporâneos para que os alunos possam compreender fenômenos e tecnologias associadas ao nosso dia a dia. Para [Oliveira, Vianna e Gerbassi \(2007\)](#)

É preocupante como o ensino de ciências, particularmente a física no ensino médio, não tem acompanhado esse desenvolvimento e cada vez mais se distancia das necessidades dos alunos no que diz respeito ao estudo de conhecimentos científicos mais atuais. Um dos fatores que contribuem para esse quadro é a defasagem em termos de conteúdo do atual currículo de física e aquilo que o aluno é informado, pela mídia escrita e falada, sobre os avanços e descobertas científicas no campo da física no Brasil e no mundo.

Segundo [Pinto e Zanetic \(1999\)](#), é necessário que os currículos escolares contemplem o desenvolvimento da Física Moderna, não apenas como curiosidade, mas como uma física capaz de explicar fenômenos onde a Física Clássica falha. Uma física capaz de explicar as tecnologias que surgem a cada dia e que faz parte do cotidiano dos alunos, tornando-se cada vez mais básica para a sociedade atual. [Machado e Nardi \(2007\)](#), também defendem a inserção de temas da Física Quântica nas escolas. Para eles é necessário atualizar o currículo “tendo em vista a formação de cidadãos capazes de compreender as bases de inúmeras tecnologias presentes no dia-a-dia, tais como os computadores, o laser e os sistemas de posicionamento global por satélite (GPS), dentre inúmeros outros”. Seguindo a mesma linha de pensamento, [Moreira \(2007\)](#) diz:

“Na verdade, não tem sentido que, em pleno século XXI, a física que se ensina nas escolas se restrinja à física (clássica) que vai apenas até o século XIX. É urgente que o currículo de física na educação básica seja atualizado de modo a incluir tópicos de física moderna e contemporânea” ([MOREIRA, 2007](#))

Em um trabalho sobre revisão bibliográfica para a inserção de física moderna e contemporânea no ensino médio, [Ostermann e Moreira \(2000\)](#) destacou algumas razões para introdução de tópicos de física contemporânea, entre elas:

- “despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próxima a eles;
- os estudantes não têm contato com o excitante mundo da pesquisa atual em Física, pois não veem nenhuma Física além de 1900. Esta situação é inaceitável em um século no qual ideias revolucionárias mudaram a ciência totalmente;
- é do maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física;
- é mais divertido para o professor ensinar tópicos que são novos. O entusiasmo pelo ensino deriva do entusiasmo que se tem em relação ao material didático utilizado e de mudanças estimulantes no conteúdo do curso. É importante não desprezar os efeitos que o entusiasmo tem sobre o bom ensino;

- Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata; mas, resultados de pesquisa em ensino de Física têm mostrado que, além da Física Clássica ser também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreendê-la.”

Sendo assim, não faz sentido ficarmos ensinando uma Física apenas através de memorização e repetição de cálculos matemáticos, em que os conteúdos são expostos como finalizados, inquestionáveis e descobertos pela genialidade de pessoas isoladas como Galileu e Newton. A necessidade de uma mudança na maneira como a disciplina de Física é vista, também é defendida nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), no qual se afirma que o ensino de física deve:

“construir uma visão da Física que esteja voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. Nesse sentido, mesmo os jovens que, após a conclusão do ensino médio não venham a ter mais qualquer contato escolar com o conhecimento em Física, em outras instâncias profissionais ou universitárias, ainda assim terão adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem” (PCN, 1998).

Fundamentando na necessidade de atualização curricular no ensino de física, e pelo fato de documentos oficiais da educação brasileira (Lei de Diretrizes e Bases e Parâmetros Curriculares Nacionais) recomendarem um ensino mais contextualizado, ligado ao desenvolvimento tecnológico e humano, muitos pesquisadores têm procurado metodologias para inserção de tópicos de Física Contemporânea (SILVA; ALMEIDA, 2011). Siqueira e Pietrocola (2006) fazem uso da Transposição Didática aplicada à Física Contemporânea para levar a Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio. A Transposição Didática é vista como uma metodologia na qual o conhecimento científico é adaptado para o conhecimento escolar, isto é, o saber científico é selecionado, analisado e adequado às reais capacidades cognitivas dos alunos (SIQUEIRA; PIETROCOLA, 2006). Valadares e Moreira (1998) enfatiza a importância de tópicos de Física Moderna no ensino básico e através de experiências propõe o estudo dos tópicos: lasers, efeito fotoelétrico e a emissão do corpo negro.

Apesar dos esforços de muitos pesquisadores em ensino de Física, poucos materiais didáticos voltado para o estudo de tópicos de Física Quântica chegam aos professores do ensino médio para ser trabalhado em sala de aula. Em um artigo sobre conceitos quânticos na formação de professores, Ostermann e Ricci (2005) concluíram que são escassas as propostas de introdução de Física Quântica no ensino médio e em cursos para formação de professores e que há um número muito pequeno de pesquisas sobre concepções de alunos e professores em Física Quântica. Fica claro o quão vasto é o assunto e o quanto ainda pode ser investigado no campo da pesquisa científica e na elaboração de material educacional

no intuito de melhorar a qualidade no ensino de Física Quântica nas escolas de ensino médio, e assim contribuir na formação de alunos que possam compreender os fenômenos e tecnologias que os cercam.

1.2 Uso de Modelagem Computacional no Ensino da Quântica

A experimentação no ensino de Física é fundamental para que o aluno possa compreender os fenômenos estudados, assim como manusear, levantar hipóteses e fazer questionamentos, assegurando uma aprendizagem significativa e garantindo a construção do seu conhecimento. De acordo com os PCN:

“É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável” (PCN, 1998).

Devido a falta de investimento e escassez de recursos financeiros enfrentados, as escolas da rede pública geralmente não têm laboratórios equipados adequadamente e disponíveis para a prática do ensino de física. Somado a isto, os fenômenos quânticos envolvem escala muito pequena (tamanhos atômicos ou até subatômicos), introduzindo dificuldades adicionais à montagem de experimentos de baixo custo em sala de aula. Considere-se ainda o fato de que os equipamentos direcionados para a prática experimental de quântica terem custos elevadíssimos e, em alguns casos, exigirem um especialista para manuseio (CÓRDOVA et al., 1992) e teremos um cenário complicado para o ensino. No intuito de preencher esta lacuna, nos últimos anos pesquisadores têm desenvolvido alguns experimentos de baixo custo para este fim. Em sua dissertação de mestrado, [Morais \(2015\)](#), desenvolveu um guia, baseado em materiais de baixo custo, para discutir conceitos de Física Quântica, utilizando experimentos sem a necessidade específica de um laboratório. Mas ainda assim nossas escolas estão aquém das condições financeiras e estruturais para implementar um projeto deste tipo.

Dadas essas dificuldades, as simulações computacionais podem ser utilizadas como ferramenta para viabilizar a discussão de fenômenos quânticos que envolvem conceitos novos, diferentes daqueles rotineiramente discutidos nas aulas de Mecânica Clássica e que utilizam uma modelagem matemática que desmotiva os estudantes do Ensino Médio. Segundo [Medeiros e Medeiros \(2002\)](#) as modelagens computacionais “podem ser bastante úteis, particularmente quando a experiência original for impossível de ser reproduzida pelos estudantes. Outro fator favorável a utilização de recursos computacionais é que a maioria das escolas públicas possuem laboratórios de informática, tornando viável a

troca de experimentos físicos por experimentos virtuais (HEIDEMANN; ARAUJO; VEIT, 2012). Simulações computacionais também permitem ao estudante mudar os parâmetros e os valores das variáveis, possibilitando coletas e análise de dados mais rapidamente se comparado às realizações de experimentos físicos (MEDEIROS; MEDEIROS, 2002). Não podemos esquecer de mencionar os diversos recursos disponíveis na internet, muitas das vezes gratuitamente, que são direcionados para o estudo da Física Quântica (simuladores, programas, vídeos, sites, etc). Cavalcante e Tavolaro (2001), por exemplo, fizeram uma oficina com uso de simuladores para inserir tópicos de Física Moderna no ensino médio, principalmente o efeito fotoelétrico. O objetivo principal da oficina foi mostrar o nascimento da Mecânica Quântica e entender a diferença entre comportamento ondulatório e corpuscular e a sua importância na mudança de concepção de mundo e de postura diante da vida do homem moderno (CAVALCANTE; TAVOLARO, 2001).

De acordo com Córdova et al. (1992), a computação oferece alternativas, que através de simulações de experimentos, permite melhorar parcialmente a situação da falta de atividades práticas no ensino de física. Para Córdova et al. (1992) “construir um experimento em um computador é mais barato, você não corre o risco de destruição de equipamentos e pode repetir o experimento quantas vezes for necessário”. Em seu trabalho eles disponibilizam um conjunto de três softwares que podem ser utilizados para determinar a constante de Planck, calcular a relação entre a carga do elétron e sua massa e determinar a capacidade de um capacitor.

Em um trabalho sobre as possibilidades e limitações das simulações computacionais Medeiros e Medeiros (2002) apontam alguns benefícios trazidos pelas modelagens para o ensino de ciências, tais como:

- reduzir o ‘ruído’ cognitivo de modo que os estudantes possam concentrar-se nos conceitos envolvidos nos experimentos;
- fornecer um feedback para aperfeiçoar a compreensão dos conceitos;
- permitir aos estudantes coletarem uma grande quantidade de dados rapidamente;
- permitir aos estudantes gerarem e testarem hipóteses;
- engajar os estudantes em tarefas com alto nível de interatividade;
- envolver os estudantes em atividades que explicitem a natureza da pesquisa científica;
- apresentar uma versão simplificada da realidade pela destilação de conceitos abstratos em seus mais importantes elementos;
- tornar conceitos abstratos mais concretos;

- reduzir a ambiguidade e ajudar a identificar relações de causas e efeitos em sistemas complexos;
- servir como uma preparação inicial para ajudar na compreensão do papel de um laboratório;
- desenvolver habilidades de resolução de problemas;
- promover habilidades de raciocínio crítico;
- fomentar uma compreensão mais profunda dos fenômenos físicos;
- auxiliar os estudantes a aprenderem sobre o mundo natural, vendo e interagindo com os modelos científicos subjacentes que não poderiam ser inferidos através da observação direta e
- acentuar a formação dos conceitos e promover a mudança conceitual.

As técnicas e linguagens atuais utilizadas na computação, têm permitido que as representações visuais de modelagens de sistemas físicos se tornem fáceis de serem manipuladas e ao mesmo tempo extraordinárias (MEDEIROS; MEDEIROS, 2002). Porém, deve-se ter o cuidado ao utiliza-las em sala de aula, pois juntamente com as modelagens computacionais, faz-se necessário relacionar o uso desses recursos no ensino de Física com uma teoria de aprendizagem para que o processo teoria e prática tenha fundamentação pedagógica e a aprendizagem seja significativa para os alunos (ALVARENGA, 2008; MEDEIROS; MEDEIROS, 2002; FIOLHAIS; TRINDADE, 2003). Segundo Veit e Teodoro (2002) a introdução de modelagem no processo ensino/aprendizagem contribui para o desenvolvimento cognitivo, pois as modelagens favorecem a aprendizagem construtivista e ainda podem:

- elevar o nível do processo cognitivo, exigindo que os estudantes pensem num nível mais elevado, generalizando conceitos e relações;
- exigir que os estudantes definam suas ideias mais precisamente;
- propiciar oportunidades para que os estudantes testem seus próprios modelos cognitivos, detectem e corrijam inconsistências.

Com estas considerações, parece-nos que as simulações computacionais tornam viável a introdução dos revolucionários princípios quânticos e que serão úteis para que os estudantes possam entender os motivos que culminaram com o início dessa nova física e ainda permitirão discutir as aplicabilidades das novas ideias nas tecnologias atuais.

1.3 A Quântica nos Livros didáticos

A Quântica surgiu no início do século XX, porém só a pouco tempo (últimas décadas) que o seu ensino começou a ser acrescentado nas grades curriculares das escolas de nível médio do Brasil (OSTERMANN; MOREIRA, 2000). Atualmente, a maioria dos livros didáticos abordam temas de Física Quântica (efeito fotoelétrico, laser, raios-x, raios-gama, fibras ópticas), porém esses temas são apresentados de forma descontextualizadas e, em muitos casos, como leituras complementares de finais de capítulos ou em seções de tópicos especiais. Dessa forma, os temas que abordam quântica ficam classificados pelos professores como temas menos importantes ou apenas complementares. Com algumas raras exceções, podemos citar o GREF (1996), o enfoque é histórico e se limita a discutir o que atualmente denomina-se “Velha Mecânica Quântica”.

Neste tópico, faremos uma análise de como os livros didáticos de Física para o ensino médio abordam Tópicos de Física Quântica. A maioria dos livros analisados são direcionado para a rede pública e, portanto, fazem parte do PNLD (Programa Nacional do Livro Didático). Nosso propósito não é criticar, mas apenas relatar a maneira como a Física Quântica é abordada nesses livros. Faremos também uma abordagem das Habilidades e Competências dos PCN, em que expõem temas relacionados com tecnologias atuais.

PCN - Ensino Médio

O PCN (Parâmetros Curriculares Nacionais) é composto por orientações educacionais direcionadas ao professor, coordenador, dirigente escolar ou aos responsáveis pelas redes de educação básica e pela formação profissional permanente dos professores. Os PCN têm como objetivo:

“Discutir a condução do aprendizado nos diferentes contextos e condições de trabalho das escolas brasileiras, de forma a responder às transformações sociais e culturais da sociedade contemporânea, levando em conta as leis e diretrizes que redirecionam a educação básica. Procura estabelecer um diálogo direto com professores e demais educadores que atuam na escola, reconhecendo seu papel central e insubstituível na condução e no aperfeiçoamento da educação básica” (PCN, 1998).

As competências em Física foram organizadas nos Parâmetros Curriculares Nacionais, dentro da área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. O PCN apresenta três competências gerais, sendo elas:

- I. Investigação e Compreensão dos Fenômenos Físicos;
- II. Utilização da Linguagem Física e de sua Comunicação;
- III. Contextualização Histórico e Social.

Dentre as competências abordadas no PCN, somente a “*Contextualização Histórico e Social*” está relacionada com a física contemporânea. Dessa forma, será feito um levantamento apenas da última competência.

III.1 - Ciência e Tecnologia na História

Compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social.

Habilidades em Física:

- Compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época. Compreender, por exemplo, a transformação da visão de mundo geocêntrica para a heliocêntrica, relacionando-a às transformações sociais que lhe são contemporâneas, identificando as resistências, dificuldades e repercussões que acompanharam essa mudança.
- Compreender o desenvolvimento histórico dos modelos físicos para dimensionar corretamente os modelos atuais, sem dogmatismo ou certezas definitivas.
- Compreender o desenvolvimento histórico da tecnologia, nos mais diversos campos, e suas consequências para o cotidiano e as relações sociais de cada época, identificando como seus avanços foram modificando as condições de vida e criando novas necessidades. Esses conhecimentos são essenciais para dimensionar corretamente o desenvolvimento tecnológico atual, através tanto de suas vantagens como de seus condicionantes. Reconhecer, por exemplo, o desenvolvimento de formas de transporte, a partir da descoberta da roda e da tração animal, ao desenvolvimento de motores, ao domínio da aerodinâmica e à conquista do espaço, identificando a evolução que vem permitindo ao ser humano deslocar-se de um ponto ao outro do globo terrestre em intervalos de tempo cada vez mais curtos e identificando também os problemas decorrentes dessa evolução.
- Perceber o papel desempenhado pelo conhecimento físico no desenvolvimento da tecnologia e a complexa relação entre ciência e tecnologia ao longo da história. Muitas vezes a tecnologia foi precedida pelo desenvolvimento da Física, como no caso da fabricação de lasers, ou, em outras, foi a tecnologia que antecedeu o conhecimento científico, como no caso das máquinas térmicas.

III.2 - Ciência e Tecnologia na Cultura Contemporânea

Compreender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea.

Habilidades em Física:

- Compreender a Física como parte integrante da cultura contemporânea, identificando sua presença em diferentes âmbitos e setores, como, por exemplo, nas manifestações artísticas ou literárias, em peças de teatro, letras de músicas etc., estando atento à contribuição da ciência para a cultura humana.
- Promover e interagir com meios culturais e de difusão científica, através de visitas a museus científicos ou tecnológicos, planetários, exposições etc., para incluir a devida dimensão da Física e da Ciência na apropriação dos espaços de expressão contemporâneos.
- Compreender formas pelas quais a Física e a tecnologia influenciam nossa interpretação do mundo atual, condicionando formas de pensar e interagir. Por exemplo, como a relatividade ou as ideias quânticas povoam o imaginário e a cultura contemporânea, conduzindo à extrapolação de seus conceitos para diversas áreas, como para a Economia ou Biologia.

III.3 - Ciência e Tecnologia na Atualidade

Reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, suas relações com as ciências, seu papel na vida humana, sua presença no mundo cotidiano e seus impactos na vida social.

Habilidades em Física:

- Acompanhar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, por exemplo, tomando contato com os avanços das novas tecnologias na medicina, através de tomografias ou diferentes formas de diagnóstico; na agricultura, através das novas formas de conservação de alimentos com o uso das radiações; ou ainda, na área de comunicações, com os microcomputadores, CDs, DVDs, telefonia celular, TV a cabo.

III.4 - Ciência e Tecnologia, Ética e Cidadania

Reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e tecnológico e utilizar esses conhecimentos no exercício da cidadania.

Habilidades em Física:

- Compreender a responsabilidade social que decorre da aquisição de conhecimento, sentindo-se mobilizado para diferentes ações, seja na defesa da qualidade de vida, na qualidade das infraestruturas coletivas, ou na defesa de seus direitos como consumidor.
- Promover situações que contribuam para a melhoria das condições de vida da cidade onde vive ou da preservação responsável do ambiente, conhecendo estruturas abastecimento de água e eletricidade de sua comunidade e dos problemas delas decorrentes, sabendo posicionar-se, argumentar e emitir juízos de valor.

- Reconhecer que, se de um lado a tecnologia melhora a qualidade de vida do homem, do outro ela pode trazer efeitos que precisam ser ponderados para um posicionamento responsável. Por exemplo, o uso de radiações ionizantes apresenta tanto benefícios quanto riscos para a vida humana.
- Reconhecer, em situações concretas, a relação entre física e ética, seja na definição de procedimentos para a melhoria das condições de vida, seja em questões como do desarmamento nuclear ou em mobilizações pela paz mundial.
- Reconhecer que a utilização dos produtos da ciência e da tecnologia nem sempre é democrática, tomando consciência das desigualdades e da necessidade de soluções de baixo custo, como por exemplo, para ampliar o acesso à eletricidade.

Física Para o Ensino Médio - Kazuhito e Fuke. 3ª Ed., V.3. Editora Saraiva, 2013

No capítulo 18 deste volume, intitulado Teoria Quântica, os autores dão início ao estudo de tópicos de Física Quântica e discute-se a motivação e os fatos que conduziram ao nascimento desta nova Física. No decorrer do capítulo é proposta uma atividade prática (“Como construir um espectroscópio”), uma dica de site para o experimento do efeito fotoelétrico, uma dica de filme (Copenhagem) e uma dica de livro (Alice no País do Quantum). O último tópico apresentado no capítulo é sobre o Princípio da Incerteza de Heisenberg. Em 14 páginas os autores trabalham os seguintes tópicos:

- Introdução a Teoria Quântica;
- A radiação do corpo negro;
- O efeito fotoelétrico;
- A dualidade da luz e da matéria;
- O Princípio da complementaridade;
- O modelo atômico de Bohr;
- O Princípio da incerteza de Heisenberg.

Física 3 - Gualter, Newton e Helou. 2ª Ed., V.3, Editora Saraiva, 2013

Tópicos de Mecânica Quântica são abordados no capítulo 12 deste livro, intitulado “Noções de Física Quântica”. Opta-se por uma abordagem conceitual e resumida. O último tópico apresentado no capítulo faz uma análise espectral a partir do modelo atômico de Bohr. Em 19 páginas os autores trabalham os seguintes tópicos:

- Noções de Física Quântica;
- Modelo ondulatório para as radiações eletromagnéticas;
- A radiação térmica e o corpo negro;
- Modelo quântico para as radiações eletromagnéticas;
- O efeito fotoelétrico;
- A dualidade da luz;
- O átomo de Bohr e as transições eletrônicas;
- Análise espectral.

Compreendendo a Física - Alberto Gaspar. 2ª Ed., V.3, Editora Ática, 2014

Neste volume, são dois capítulos dedicados à Física Quântica. O capítulo 13 com título “As Origens da Física Quântica” e o capítulo 14 intitulado “A nova Física”. O primeiro capítulo possui enfoque histórico no qual é destacado a transição da Física Clássica para Quântica. O segundo capítulo procura enfatizar conceitos relacionados com a Mecânica Quântica e também Física Contemporânea. Identifica-se discussão resumida na qual se misturam conceitos de Física Nuclear, Física de Partículas e Mecânica Quântica. Em 52 páginas os autores trabalham os seguintes tópicos:

- Origens da Física Quântica;
- Descargas em tubos com gases rarefeitos e espectroscopia;
- Raios catódicos, raios beta e elétron;
- Radiação térmica;
- O enigma do espectro da radiação térmica;
- As hipóteses de Wien e Rayleigh-Jeans;
- O quantum de ação;
- Os raios e a radioatividade;
- O átomo de Rutherford;
- O espectro do átomo de hidrogênio;
- O átomo de Bohr;
- O spin do Elétron;

- Pauli e o princípio da exclusão;
- As ondas de matéria;
- A Mecânica ondulatória;
- O Princípio da Incerteza;
- O nêutron e o pósitron;
- O neutrino e a conservação da energia;
- O núcleo atômico e a energia nuclear;
- Um novo tipo de partícula;
- A física de partículas.

Universo da Física - Sampaio e Calçada. 2ª Ed., V.3, Atual Editora, 2005

No capítulo 19 (último do livro) e em apenas oito páginas, os autores abordam temas de quântica de maneira resumida e sem enfoque histórico. O capítulo não faz referências entre Física Quântica e aplicações tecnológicas e nem contextualiza os tópicos abordados. Os assuntos discutidos pelos autores são:

- A radiação do corpo negro;
- O fóton;
- O efeito fotoelétrico;
- Dualidade onda-partícula;
- O átomo de Bohr;
- A mecânica Quântica.

GRF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. 5ª Ed, V.2 e 3, Editora EDUSP, 2012

Neste livro, os autores procuram inserir a física de maneira que contemple as tecnologias atuais que estão no cotidiano dos estudantes. Portanto, os tópicos são contextualizados e trazem aplicações práticas interligando a física com a tecnologia e a sociedade. Também incluiu-se uma narrativa de eventos com enfoque histórico e os assuntos de Física Quântica são abordados com muitas ilustrações e sem o uso de equações matemáticas. Os assuntos de Física Quântica se encontram nos volumes 2 e 3, não havendo um capítulo específico sobre estes tópicos:

- Discussão sobre a Natureza da Luz;
- Modelo da Matéria baseada na Mecânica Quântica;
- Fontes de Laser;
- Modelo Atômico de Bohr;
- A Interação Elétrica no Átomo e na Matéria;
- Semicondutores;
- Noções Básicas de Mecânica Quântica.

Apesar dos esforços dos autores de livros didáticos, em inserir conteúdos da quântica no ensino médio, fica claro que os textos propostos ainda estão muito aquém das orientações educacionais fornecidas pelo PCN. Poucos livros trazem relações entre os tópicos de Física Quântica e as aplicações tecnológicas no cotidiano dos alunos. Neste ponto, a única exceção é a abordagem do GREEF, no que deve ser elogiado. Comparativamente, esta obra é a mais completa e a que mais se aproxima das orientações oficiais. Dentre os poucos materiais didáticos analisados fica evidente que a quase totalidade deles ignora por completo a Mecânica Quântica e a discussão termina com fatos históricos e tópicos da velha Mecânica Quântica. É surpreendente a constatação de que na maioria das obras didáticas, a exposição dos capítulos que deveriam abordar Mecânica Quântica terminem na discussão do modelo atômico de Bohr. Considerando que este também é o modelo atômico discutido nas aulas de Química, conclui-se que os alunos são levados a crer na visão atomística de Bohr, o que os conduz a interpretações incorretas de fenômenos físicos. Certamente uma situação desconcertante.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo apresentaremos a fundamentação teórica utilizada na concepção e aplicação da sequência didática concebida para discussão de Física Quântica no Ensino Médio. Ao elaborar materiais educacionais, devemos considerar o que se deseja alcançar, os objetivos da proposta e como ocorre o processo de aprendizagem. Partindo desse pressuposto, nosso propósito é relacionar as simulações computacionais com os ideais da aprendizagem significativa, pois de acordo com [Ausubel, Novak e Hanesian \(1980\)](#), uma teoria da aprendizagem “pode nos oferecer pontos de partida mais viáveis para a descoberta de princípios gerais no ensino que podem ser formulados tanto em termos de processos psicológicos intervenientes como em termos de relações de causa e efeito” ([AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980](#)).

2.1 Aprendizagem Significativa de Ausubel

A teoria da aprendizagem significativa foi proposta por David Paul Ausubel (psicólogo da educação estadunidense). Para o desenvolvimento do seu modelo de aprendizagem e a estruturação das suas ideias ele fundamentou-se na corrente cognitivista da aprendizagem. Em 1963, no livro “The Psychology of Meaning Verbal Learning”, Ausubel apresentou a sua Teoria da Aprendizagem Significativa e, posteriormente, desenvolveu as suas ideias no livro “Educational Psychology: A Cognitive View”, publicado em 1968 ([PRAIA, 2000](#)).

De acordo com [Praia \(2000\)](#):

“A teoria de Ausubel tem o seu enfoque, principalmente, na aprendizagem cognitiva, segundo a qual as informações são armazenadas de um modo organizado, na mente do indivíduo que aprende, sendo esse complexo organizado-a estrutura cognitiva. A base da sua teoria é que a aprendizagem deve ser significativa, isto é, o sujeito aprende e está aberto a aprender quando integra a nova informação nos conhecimentos previamente adquiridos”.

Ausubel faz distinção entre aprendizagem mecânica e significativa, processos pelos quais o aprendiz adquire informações. Na aprendizagem mecânica as novas informações tem pouco ou nenhuma interação com conceitos importantes preexistentes na estrutura cognitiva ([MOREIRA, 1999](#)). Nesse tipo de aprendizagem a informação é armazenada de forma aleatória não havendo interação entre a nova e as já existentes. Memorização de conceitos, leis e fórmulas são exemplos de aprendizagem mecânica. Enquanto a aprendizagem significativa ocorre quando uma nova informação (ideia, conceito, formulação) adquire significado para o aluno por meio de sua estrutura cognitiva de conhecimentos preexistente,

fazendo com que o aprendiz adquira um novo conhecimento através da interação das novas informações com seus conhecimentos prévios, com certo grau de compreensão, estabilidade e distinção (MOREIRA, 1982). De acordo com Moreira (1999), Ausubel não coloca a aprendizagem mecânica e significativa como opostas, mas como um processo contínuo em que a mecânica pode tornar-se significativa.

Os conceitos preexistente e relevantes na estrutura cognitiva do indivíduo são chamados por Ausubel de subsunçores e são utilizados como âncoras para que as novas informações passem a ser aprendizagem significativa. Portanto, subsunçor é um conhecimento já estabelecido na estrutura cognitiva do aprendiz e que possibilita, através de interações, dar significado a outros conhecimentos (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; MOREIRA, 2013). O subsunçor pode ser um conceito, um modelo, uma proposição, uma ideia, ou seja, um conhecimento preexistente e significativo para aquisição de novos conhecimentos. Conforme as novas informações vão adquirindo significados ancorada nos conhecimentos prévios, estes também se modificam, isto é, os subsunçores adquirem novos significados, tornando-se mais sólidos. Novos subsunçores se formam e interagem entre si, fazendo com que a estrutura cognitiva fique constantemente se reorganizando no decorrer da aprendizagem significativa e, dessa forma, o conhecimento vai sendo construído (AUSUBEL et al., 1983; MOREIRA, 1982).

Quando o aprendiz não possui subsunçores em determinada área de conhecimento, por ser completamente nova para ele, Ausubel destaca a importância da aprendizagem mecânica, para que essa venha a se tornar significativa. Nas palavras de Moreira (1999)

“a aprendizagem mecânica é sempre necessária quando um indivíduo adquire informações em uma área de conhecimento completamente nova para ele, isto é, a aprendizagem mecânica ocorre até que alguns elementos de conhecimento, relevantes a novas informações na mesma área, existam na estrutura cognitiva e possam servir de subsunçores, ainda que pouco elaborados. À medida que a aprendizagem começa a ser significativa, esses subsunçores vão ficando cada vez mais elaborados e mais capazes de ancorar novas informações” (MOREIRA, 1999).

No decorrer da aprendizagem significativa, os conhecimentos existentes que interagem com as novas informações e que servem de apoio para a aquisição de novos significados também se modificam e, dessa forma, eles adquirem novos significados e gradativamente vão se diferenciando. Por exemplo, quando o aluno aprende, significativamente, o que é quantização de carga elétrica e posteriormente recebe informações sobre quantização de energia e quantização do momento, o subsunçor “quantização” se torna mais diferenciado e mais apto a servir de âncora para dar significados a novas informações. Segundo Moreira (1982) “este processo característico da dinâmica da estrutura cognitiva chama-se diferenciação progressiva”.

Na aprendizagem significativa também pode ocorrer relações entre subsunçores,

ou seja, relação entre saberes já bem estabelecidos na estrutura cognitiva. Como exemplo podemos citar o estudo do lançamento de objetos. Quando o estudante compreende, com certo grau de clareza em sua estrutura cognitiva, o lançamento horizontal e também o lançamento vertical, ele percebe que esses dois conceitos estão relacionados e reorganiza seus significados de tal maneira que consegue identificar um conceito mais abrangente, o conceito de lançamento oblíquo, estando o último diretamente relacionado com os outros dois. Dessa forma o aluno foi capaz de relacionar significados existentes na estrutura cognitiva que já estavam devidamente estabilizados e diferenciados. De acordo com [Moreira \(1982\)](#) “essa recombinação de elementos, essa reorganização cognitiva, esse tipo de relação significativa, é referido como reconciliação integrativa”.

[Ausubel, Novak e Hanesian \(1980\)](#), distingue três tipos de aprendizagem significativa: representacional, conceitual e proposicional.

- A aprendizagem representacional ocorre quando são estabelecidos significados entre símbolos e seus referentes (objetos, conceitos, exemplos), passando a ter, para o aprendiz, o mesmo significado. São exemplos de aprendizagem representacional: nomear e dar significado a objetos.
- A aprendizagem conceitual ocorre quando os conceitos podem ser representados por símbolos individuais e arbitrários, isto é, quando o estudante identifica regularidades em eventos ou objetos, e passa a representá-los por determinados símbolos sem depender do seu referente para dar significados. Nesse tipo de aprendizagem o conceito é representado por uma palavra específica, existindo uma equivalência entre a palavra que representa o conceito e o próprio conceito.
- A aprendizagem proposicional pode ser subordinativa quando uma proposição significativa de determinado conteúdo é relacionada significativamente a outras proposições já bem estruturadas no processo cognitivo do aprendiz. Também pode ser superordenada se uma nova proposição for relacionada a determinadas ideias subordinadas na estrutura cognitiva existente e que esteja associada a um conjunto amplo de ideias relevantes que podem ser subordinadas a elas. A aprendizagem proposicional pode ser também combinatória para as situações em que uma proposição potencialmente significativa seja relacionável a um conjunto de conteúdos relevantes na estrutura cognitiva do estudante, porém não pode ser relacionada com as ideias superordenadas e nem às subordinativas.

De acordo com Ausubel, para que ocorra a aprendizagem significativa é necessário que o aluno tenha predisposição para aprender e que o material seja potencialmente significativo ([MOREIRA, 1999](#)). Nesse sentido, Ausubel destaca que:

“independentemente do quanto de uma determinada proposição é potencialmente significativo: se a intenção do aluno é memorizá-la arbitrariamente e literalmente (como uma série de palavras arbitrariamente relacionadas), tanto o processo de aprendizagem como o produto da aprendizagem serão automáticos. E inversamente, não importa se a disposição do aluno está dirigida para a aprendizagem significativa, pois nem o processo nem o produto da aprendizagem serão significativos se a tarefa da aprendizagem não for potencialmente significativa - ou seja, se não puder ser incorporada à estrutura cognitiva através de uma relação não arbitrariamente substantiva.” (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980).

Sendo assim, para que ocorra a aprendizagem significativa é necessário que o aluno apresente uma predisposição para aprender, ou seja, tenha entusiasmo para relacionar, de maneira não arbitrariamente e substantiva, um novo material com a sua estrutura cognitiva e que esse material seja potencialmente significativo. Materiais potencialmente significativos são aqueles que podem ser relacionados com a estrutura cognitiva do aluno. Um material potencialmente significativo tem como principal atribuição extrair conceitos prévios do estudante a fim de criar novas condições de aprendizagem. São exemplos de materiais potencialmente significativos: figura, filme, conceito, simulação computacional, experimento, etc. Portanto, para que possa desempenhar a função de relacionar novas informações com os subsunçores do aluno, o material potencialmente significativo não precisa ser um material complexo e carregado de tecnologia (MOREIRA, 2013), mas, segundo Moreira (2013), deve satisfazer alguns quesitos dentro os quais destacamos:

- o professor deve estabelecer quais serão os tópicos e os conceitos fundamentais que o aluno deve aprender;
- o professor deve proporcionar oportunidades, através de discussões, indagação, questionários, para que o aluno possa manifestar seu conhecimento preexistente;
- as orientações e propostas do professor devem ser apresentadas em nível crescente de complexidade, levando em consideração o conhecimento prévio do aluno, estimulando-os para o que se pretende ensinar;
- após trabalhar as situações iniciais, o professor deve apresentar o conteúdo a ser ensinado, dando uma visão inicial do todo e das partes mais importante do conteúdo;
- o professor deve retomar os aspectos importantes do conteúdo a ser ensinado, em uma nova apresentação, porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação;
- concluindo o conteúdo, o professor deve dar continuidade ao processo de diferenciação progressiva, retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora, isto é, buscando a reconciliação integrativa e

- a avaliação da aprendizagem deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando todas as evidências de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado; também deve haver uma avaliação somativa individual, em que evidenciem a compreensão de significados no decorrer da efetivação da aprendizagem.

Para facilitar a aprendizagem significativa, Ausubel propõe a utilização de organizadores prévios. Neste caso, deve-se aplicar materiais introdutórios antes da apresentação do material de aprendizagem, para que este venha a ser potencialmente significativo. A principal função do organizador prévio é servir de conexão entre os conhecimentos preexistente do aluno e o que ele deveria saber, com a finalidade de que o novo conteúdo possa ser aprendido significativamente (MOREIRA, 2013). Os organizadores prévios devem ser introduzidos em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade do que o próprio material de aprendizagem e, por isso, sumários e introduções não podem ser classificados como organizadores prévios, pois apenas destacam alguns pontos principais e estão no mesmo nível de abstração, generalidade e inclusividade do conteúdo estudado (MOREIRA; SOUSA; SILVEIRA, 2013). Podemos citar como exemplo de organizador prévio, para um aluno que irá estudar as emissões do átomo de hidrogênio um material que revise os conceitos de ondulatória, mais especificamente, um material sobre todas as propriedades das ondas eletromagnéticas. Portanto, organizadores prévios não são simples comparações introdutórias. Moreira (2013) destaca que os organizadores devem:

- apontar os conceitos relevantes na estrutura cognitiva e informar qual a sua importância para a aprendizagem do novo conteúdo;
- fornecer, em nível mais alto de abstração, uma visão geral do material a ser aprendido e
- promover situações ideais que possam ser usadas para assimilar significativamente novas informações.

Moreira (2013) destaca que além dos organizadores prévios, as atividades colaborativas em pequenos grupos também têm grande potencial para facilitar a aprendizagem significativa porque possibilitam as trocas de informações, compartilhamento de interpretações e colocam o professor na posição de mediador (MOREIRA, 2013). A aprendizagem colaborativa requer que os estudantes discutam e compartilhem ideias com seus colegas, aumentando o interesse pelo conteúdo, uma vez que, os subsunçores tornam-se mais estruturados. Participar de debates também faz com que o aluno se comprometa na busca pelo seu próprio conhecimento, desenvolvendo o raciocínio crítico e relacionando conhecimentos prévios com os novos. Desse modo, os alunos tendem a gostar mais das aulas e, além disso, criam-se condições de adquirir uma aprendizagem significativa.

O atual processo de ensino aprendizagem que ocorre na maioria das escolas brasileiras, principalmente no ensino de Física, vai de oposição as ideias de Ausubel. Normalmente, os professores apenas reproduzem os exercícios dos livros didáticos e as questões das atividades avaliativas são praticamente idênticas às aquelas expostas nas aulas expositivas. As questões/problemas não são contextualizadas (geralmente são de vestibulares de muito anos atrás) e, muitas das vezes, não são apresentadas em nível crescente de complexidade. Dessa forma, os alunos não se sentem motivados para apreender e, portanto, os conteúdos não são potencialmente significativos.

Para auxiliar os alunos na superação das dificuldades relacionadas a tópicos de Física Quântica, consideramos que o uso de simulações computacionais possam proporcionar os elementos (visuais, dinâmicos, interativos) necessários para o entendimento de conceitos tão abstratos que estão intrinsecamente relacionados a este conteúdo assim como motivá-los na realização das atividades propostas. Dessa forma, criamos um material potencialmente significativo que tem por objetivo despertar o comprometimento dos alunos na busca de seu próprio aprendizado, de modo que relacione o novo conhecimento de forma não-arbitrária e não-literal em sua estrutura cognitiva para que possam alcançar a aprendizagem significativa (MOREIRA, 1999). Acreditamos que seja possível explicar fenômenos físicos a partir de atividades com simulações computacionais atreladas a fundamentos teóricos contemporâneos e com desenvolvimento de textos de apoio baseados nas ideias de Ausubel. Isto é, partindo dos casos mais gerais, no nosso caso dos fenômenos quânticos e, gradualmente, diferenciando os conceitos e destacando seus aspectos mais importantes. Com isso, esperamos que o uso desta ferramenta (a simulação computacional) no processo de ensino da física promova uma reflexão sobre as atividades realizadas, vinculado à abordagem didática aqui apresentada, de modo a facilitar consideravelmente as estratégias de ensino e alcançar a tão almejada aprendizagem significativa.

É nessa direção que este trabalho se desenvolverá. Nos próximos capítulos apresentaremos e discutiremos nosso produto educacional, o qual consiste de um material didático para se trabalhar tópicos de Mecânica Quântica utilizando simulações computacionais disponíveis gratuitamente na internet. O material é composto de um livro explicando os principais tópicos que culminaram no desenvolvimento da Quântica, tais como: radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, modelos atômicos, etc. Os assuntos discutidos em nosso material são considerados importantes para serem trabalhados no ensino médio, uma vez que, são os princípios fundamentais nos quais se baseiam aplicações tecnológicas que permeiam a vida do estudante. A partir do estudo do material apresentado, cremos que os estudantes estarão aptos a compreender alguns fenômenos por trás de diversos dispositivos tecnológicos do cotidiano. Para verificar se houve aprendizagem significativa relacionada aos conteúdos abordados, foi registrado e analisado no decorrer da implementação do produto didático, através de observações e questionários, as evidências de ocorrências que levassem a esse tipo de aprendizagem .

3 Metodologia

Neste capítulo descreveremos todas as etapas e procedimentos realizados no decorrer da confecção de uma sequência didática para introdução de conceitos de Física Quântica em turmas da educação básica. Faremos uma análise qualitativa da experiência com a descrição detalhada de cada uma das etapas inclusive da sondagem da aprendizagem dos alunos quanto aos novos conceitos introduzidos.

A aplicação do produto educacional foi realizada em uma escola de ensino médio da rede publica estadual, localizada na cidade de Araguaína, Tocantins. O autor escolheu este local por ser a escola em que leciona. A aplicação do material ocorreu nas aulas da disciplina de Física para uma turma do terceiro ano do Ensino Médio.

3.1 Etapas realizadas para a pesquisa

As etapas metodológicas deste trabalho foram:

1ª Etapa: revisão bibliográfica referente à utilização de modelagens computacionais no ensino de Física e a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. Também foi feito um levantamento de como os livros didáticos abordam tópicos da Física Quântica. Ainda nessa etapa, discutimos sobre o uso de simulações no processo de ensino aprendizagem e como poderíamos aplicar as ideias ausubelianas no decorrer da aplicação do produto educacional.

2ª Etapa: aplicamos um questionário no intuito de identificarmos os conhecimentos prévios dos alunos, pois de acordo com a teoria de aprendizagem de Ausubel, os conhecimentos preexistentes na estrutura cognitiva do indivíduo são utilizados como âncoras para aquisição de novas informações. O questionário, que se encontra no Apêndice A, procura evidenciar os conhecimentos preexistes dos alunos sobre o conceitos de ondas eletromagnéticas, energia, modelos atômicos e Física Quântica. Este questionário foi respondido individualmente e sem consulta. Nele não buscamos resposta corretas, apenas foi aplicado na intenção de detectar os conhecimentos adquiridos em anos anteriores ou na vivência de cada um dos alunos.

3ª Etapa: seleção dos tópicos de Física Quântica que seriam abordados no decorrer da pesquisa e das respectivas simulações computacionais relativas a cada um dos tópicos previamente selecionados. Limitamos nosso interesse nas simulações de domínio público e que estivessem disponíveis gratuitamente na internet.

4ª Etapa: dedicada à elaboração do produto didático. Confeccionamos textos nos quais foram descritos a utilização das simulações computacionais em conjunto com os fundamentos teóricos que seriam discutidos para abordar os seguintes tópicos: introdução à Física Quântica, radiação de corpo negro, experimento da dupla fenda, efeito fotoelétrico, princípio da incerteza de Heisenberg, o átomo de Bohr, ondas de matéria (ou de De Broglie), o modelo atômico da mecânica quântica, o experimento de Stern-Gerlach e o spin, lasers e suas aplicações. Detalhes sobre o produto educacional serão discutidos no próximo capítulo e o material completo encontra-se no Apêndice B.

5ª Etapa: aplicação do produto educacional. Foram ministradas 11 horas-aula, com utilização de simulações computacionais, vídeos e projetor multimídia (data-show). Os detalhes das aulas serão discutidos posteriormente (ver seção 3.2).

6ª Etapa: reaplicação do mesmo questionário utilizado na segunda etapa para identificar os conhecimentos prévios dos alunos. O objetivo da aplicação desse questionário foi analisar as possíveis mudanças nas respostas dos estudantes referente aos tópicos de Física Quântica abordados na aplicação do produto. Nesta etapa, também foi aplicado um segundo questionário (disponível no Apêndice C), em que foram abordados conteúdos de Física Quântica em um nível de complexidade superior ao questionário aplicado no pré e pós-teste. Nesse último questionário também abordamos perguntas referente as aulas ministradas para aplicação do produto educacional.

7ª Etapa: análises dos dados que serão devidamente apresentadas e discutidas no capítulo 5. O foco foi verificar ocorrências de aprendizagem significativa, bem como evidências que nos permitam avaliar a classificação do nosso material didático como potencialmente significativo.

3.2 Resumo das Aulas ministradas

Nessa seção, faremos um resumo das aulas ministradas. Cada aula teve duração de 50 minutos e todas foram ministradas pelo autor do trabalho. A turma escolhida para trabalhar possui 29 alunos e cursam o terceiro ano do ensino médio.

1ª Aula: Apresentamos a nossa proposta para turma e foi esclarecido que o objetivo da pesquisa seria trabalhar assuntos de Física Quântica. Aplicou-se o questionário pré-teste para identificarmos os conhecimentos prévios.

2ª Aula: Ministrou-se uma aula de revisão sobre ondas eletromagnéticas, visto que esse é um assunto do segundo ano do ensino médio e os conhecimentos eram necessários

para discussões posteriores. Para essa aula foi utilizado o data-show e trabalhamos os conceitos básicos de ondulatória e alguns fenômenos de natureza ondulatória, dando enfoque para a difração das ondas. Utilizamos infográficos animados ou imagens dinâmicas (conhecidas popularmente como gifs animados). Notou-se que o uso desta ferramenta tecnológica aumentou sensivelmente o interesse dos alunos (impressão do professor que tem experiência de trabalho na turma). Nesta aula também apresentou-se um resumo das aplicabilidades cotidianas das ondas eletromagnéticas (comunicação, raios X, micro-ondas, visão, etc).

3ª Aula: Começamos a aula apresentando algumas tecnologias que utilizam princípios da Física Quântica e ressaltamos a importância desta área de conhecimento para nosso cotidiano. Procurou-se por exemplos de aplicações tecnológicas nas áreas de medicina e comunicação, evidenciando que os conceitos novos que seriam apresentados eram muito importantes para que os estudantes pudessem entender o mundo no qual estavam inseridos. Falamos sobre a transformação ocorrida na Física no início do século XX bem como da necessidade de uma nova teoria. As falhas da Física Clássica em explicar alguns fenômenos que seriam discutidos nos próximos encontros foi também um tópico abordado.

4ª Aula: O objetivo desta aula foi apresentar e discutir a Física da radiação de corpos aquecidos e falar sobre a quantização de energia proposta por Planck. Iniciamos essa aula com uma breve introdução à radiação de corpos aquecidos através de lâminas (slides) confeccionados pelo professor. Posteriormente, dividimos a turma em pequenos grupos (dois ou três alunos) e cada grupo teve acesso a um computador para manusear a simulação computacional “*Radiação de Corpo Negro*” sob a orientação do professor. Os alunos foram orientados sobre o manuseio da simulação, seguindo os passos propostos. Ao final da aula, com a simulação projetada no equipamento multimídia, o professor fez algumas considerações e também permitiu que os alunos fizessem colocações e discussões que julgassem pertinentes. Observamos, no decorrer da atividade, que os grupos interagem entre si: havia colaboração entre estudantes de grupos distintos em cada uma das etapas propostas pelo professor.

5ª Aula: O tema da aula foi o experimento da dupla fenda para radiação eletromagnética e para objetos quânticos (elétrons, prótons, nêutrons e átomos). Para esta aula foram utilizadas duas simulações: “*Interferência de Ondas*” e “*Interferência Quântica*”. Inicialmente, foi projetada (pelo professor) a simulação sobre interferência de ondas e os conceitos físicos importantes nos fenômenos de interferência e difração da luz. Após trabalhar com a primeira simulação, fez-se algumas indagações sobre os resultados que se obteriam caso a luz fosse substituída por um feixe de elétrons. O foco da discussão foi sobre a possibilidade de observação dos fenômenos de interferência e difração para

elétrons. A maioria dos alunos argumentaram que o elétron sendo uma partícula não exibiria tais comportamentos característicos de ondas se repetíssemos o experimento da dupla fenda. Após estes questionamentos, utilizamos a segunda simulação, “*Interferência Quântica*” para demonstrar o que ocorre com os elétrons quando realizamos o experimento da dupla fenda (com e sem observador). Novamente indagamos sobre a natureza do elétron e todos responderam que o elétron poderia ter comportamento de partícula ou de onda, dependendo da situação. Esta foi a estratégia utilizada para introduzimos o conceito de que a *natureza tem comportamento dual*.

6ª Aula: Os tópicos abordados nesta aula foram o efeito fotoelétrico e o princípio da incerteza de Heisenberg. Para estudo do efeito fotoelétrico, a turma foi dividida em pequenos grupos compostos por dois ou três alunos com acesso a um computador no qual pudessem interagir com a simulação do “*Efeito Fotoelétrico*” sob a orientação do professor. Ao final da atividade em grupo, os alunos foram convidados a exporem suas observações e hipóteses e o professor finalizou com considerações relativas ao tópico abordado. Algumas aplicações tecnológicas do efeito fotoelétrico (sensores para portas automáticas e iluminação, sensores em câmeras fotográficas, ...) foram apresentadas pelo professor por meio de slides. Também foi utilizada a simulação de “*Interferência Quântica*” para apresentação e discussão do Princípio da Incerteza de Heisenberg e sua importância para a Física Quântica.

7ª Aula: Foco principal foi a apresentação e discussão do modelo atômico desenvolvido por Bohr. Empregamos a simulação sobre os “*Modelos do Átomo de Hidrogênio*”. Inicialmente, o professor fez um resumo sobre modelos atômicos de Dalton, Thomson e Rutherford e os alunos foram orientados a trabalharem com estes modelos na simulação computacional. O objetivo era extrair as características destes modelos clássicos. Na sequência abordamos o modelo atômico proposto por Bohr e os respectivos postulados que o fundamentam, sempre destacando que esse modelo atômico é semi-clássico. As simulações proporcionaram aos alunos a possibilidade de descobrir/discutir as ideias propostas por Bohr. Esta ferramenta foi fundamental para explicar o conceito de salto quântico. Nessa aula apresentamos também o espectro experimental do átomo de hidrogênio e o porquê das diversas cores observadas na queima de fogos de artifícios.

8ª Aula: Iniciamos o estudo da nova Mecânica Quântica através de uma apresentação de slides abordando tópicos sobre ondas de matéria e o modelo atômico da Mecânica Quântica. Fez-se a introdução dos números quânticos e a conexão com as aulas da disciplina de Química. Introduziu-se o conceito de interpretação probabilística e a conexão desta nova teoria com regiões prováveis de se encontrar elétrons.

9ª Aula: Esta aula foi uma continuação da anterior e deu-se continuidade à apresentação

dos conceitos da nova Mecânica Quântica. Os alunos utilizaram a simulação sobre os “*Modelos do Átomo de Hidrogênio*” e o modelo de *Schrödinger* foi explorado. A simulação computacional permitiu visualização das densidades de probabilidades para o elétron (orbital), as transições eletrônicas possíveis e as variações de números quânticos associados e a obtenção do espectro atômico de absorção. Ainda nessa aula, a partir do experimento de Stern-Gerlach, falamos da necessidade de introduzir o momento intrínseco do spin do elétron ao conjunto de números quânticos já discutidos.

10ª Aula: Este encontro foi dedicado às aplicações tecnológicas dos conceitos estudados no decorrer dos encontros anteriores. O laser foi discutido em detalhes porque este dispositivo está presente em diversas áreas tecnológicas que estão inseridas no cotidiano dos estudantes. Finalizamos a aula fazendo uma revisão dos aspectos mais importantes de todo o conteúdo estudado.

11ª Aula: Em nossa última aula foi aplicado o mesmo questionário do pré-teste. O objetivo foi obter dados para uma análise nos padrões de respostas dos alunos após a aplicação do produto educacional. Nesta mesma aula também foi aplicado outro teste (disponível no Apêndice C), em um nível de complexidade maior que o pré-teste, no intuito de avaliá-los na disciplina de Física. Os resultados dos testes são analisados no capítulo 5.

4 O produto Educacional

O produto educacional, conforme destacado anteriormente, é constituído por textos didáticos contendo exposição teórica baseada em simulações computacionais sobre conteúdos de Física Quântica. O diferencial da nossa proposta é a utilização de simuladores para apresentar os conteúdos, estratégia que difere daquela adotada tradicionalmente nos livros didáticos. O produto também contempla tópicos da Física Quântica que a maioria dos livros didáticos do ensino médio omitem (ver seção 1.3) como, por exemplo, o modelo atômico da Mecânica Quântica. Consideramos ser esta uma falha grave e acreditamos que a omissão do que comumente denominamos “Nova Mecânica Quântica” não deve ocorrer. Em nossa opinião, discutir sobre fatos históricos que culminaram na formulação da Mecânica Quântica não é útil para que o estudante possa compreender a “Física como parte integrante da cultura contemporânea” (PCN, 1998) e também não permite que se formem cidadãos com formação adequada para compreender a tecnologia envolvida em suas atividades cotidianas. Portanto, o material produzido visa propiciar ao estudante de ensino médio formação que possibilite o entendimento dos princípios da Física Quântica e tenha a habilidade de relacionar os conteúdos estudados com as tecnologias do seu dia a dia. Na sequência faremos uma breve descrição de cada capítulo que constitui o produto educacional.

Capítulo 1 - A Física Quântica: inicialmente discutimos sobre a Física Clássica, destacando o seu domínio nos atuais currículos do ensino médio e o seu êxito em explicar os fenômenos de natureza macroscópica. O próximo passo foi apresentar alguns fenômenos para os quais esta teoria não tinha sucesso em explicar e a necessidade de se introduzir uma nova formulação física. Nascia, assim, a Física Moderna. Como parte integrante desta nova física, surgida a partir do ano de 1900, está a Física Quântica, cujo foco é estudar sistemas físicos que possuem dimensões próximas ou abaixo da escala atômica. Ou seja, estamos interessados em estudar os fenômenos relacionados às moléculas, aos átomos e às partículas subatômicas. Abordamos a importância do estudo na Física Quântica, desde o ensino médio, pois são temas que estão presente em muitas aplicações tecnológicas cotidianas do estudante (em celulares, na informática, nos lasers, em instrumentos da medicina, etc). Portanto, conforme descrito no produto educacional, entender os conceitos de quântica é primordial para que o estudante compreenda os avanços tecnológicos e seja um agente transformador do seu meio social.

Capítulo 2 - Radiação de Corpo Negro: apresentamos a inusitada e maravilhosa hipótese da quantização de energia. Planck discutia a modelagem teórica clássica do

espectro de emissão de um corpo negro e, na tentativa de obter os resultados experimentais de Lummer e Pringsheim e também de Rubens e Kurlbaum (STUDART, 2000), aplicou sua solução revolucionária que mais tarde se tornou um dos fundamentos da Mecânica Quântica. Para explicarmos a radiação dos corpos aquecidos, partimos da ideia que todos os corpos em uma dada temperatura, T , emitem radiação térmica para o meio onde estão e também podem absorver a radiação térmica do meio. Ou, em outras palavras, a emissão ou absorção de radiação está associada à temperatura. O espectro emitido, em geral, tem pouca dependência com a composição do corpo, mas há dependência elevada com a temperatura. Esta dependência é tal que pode-se estimar a temperatura do corpo por meio da medida do espectro emitido, ou seja, aumentando a temperatura, observa-se o aumento da quantidade de radiação emitida. O espectro também incluirá a radiação visível. Para ilustração e melhor entendimento das características básicas do espectro de radiação de um corpo negro, propomos a utilização de uma simulação da plataforma Phet (Physics Interactive Simulations - Universidade do Colorado) (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002; MCKAGAN et al., 2008) e que está disponível para obtenção no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/blackbody-spectrum>. A figura 1 mostra a tela inicial da simulação. Todos os detalhes estão descritos no produto educacional (ver B). Ao final desse capítulo esperamos que o estudante seja capaz de:

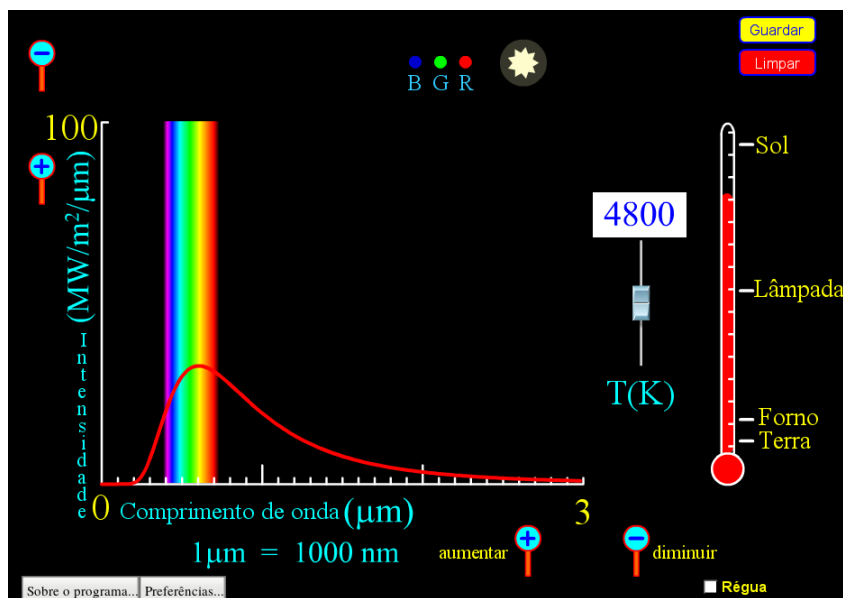


Figura 1 – Tela inicial do simulador computacional “Radiação de Corpo Negro”.

- entender o que é o modelo denominado corpo negro e como utilizá-lo para descrever objetos reais;
- saber onde a Física Clássica falhou na tentativa de explicar os resultados experimentais de radiação de corpos aquecidos;

- entender a proposta de Planck para a quantização de energia e
- entender o significado do termo “catástrofe do ultravioleta”.

Capítulo 3 - *Dupla Fenda de Young*: focamos no estudo dos fenômenos de interferência e difração, cujas características foram exploradas com o uso de duas modelagens computacionais que nos permitiram simular o experimento da dupla fenda proposto por Thomas Young em 1801. Iniciamos o texto com uma diferenciação entre os conceitos de partícula e onda para a Física. Partícula é um ente que possui massa e cuja posição e velocidade podem ser matematicamente definidos pelos vetores posição $\vec{r}$ e momento $\vec{p}$. Se a partícula está em movimento, as Leis da Mecânica Clássica nos permitem determinar sua trajetória. Se estamos pensando em onda, imaginamos entes que transportam energia e informação pelo espaço, mas sem transporte de matéria. Pensamos em algo deslocalizado espacialmente e cuja descrição nos lembrará de comprimento de onda (λ) e período (T). Não pensamos em trajetória como pensaríamos para uma bola de futebol em movimento. Ondas e partículas não se confundem: sabemos que ondas podem ocupar simultaneamente o mesmo espaço e, imediatamente, nos lembramos de dois fenômenos: interferência e difração. Para evidenciar que os fenômenos de interferência e difração são, exclusivamente, de natureza ondulatória foi utilizado a simulação *Interferência de Ondas*, disponível nos arquivos do projeto Phet e que pode ser obtida no link phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002) (ver figura 2). No decorrer das discussões

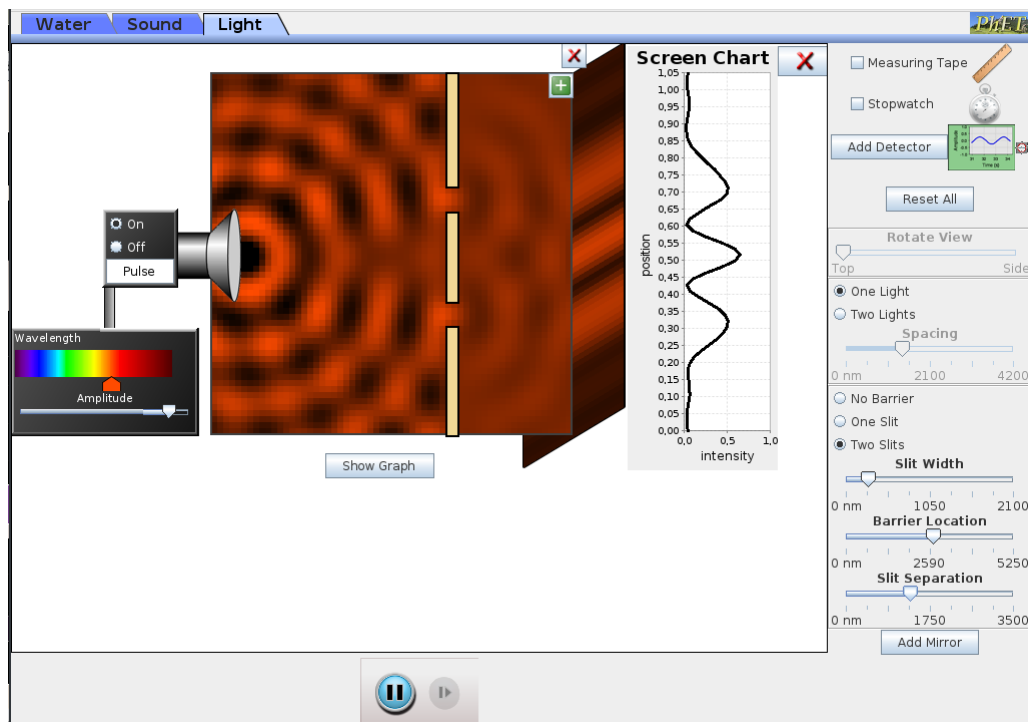


Figura 2 – Simulação de ondas na água utilizado o simulador computacional da plataforma Phet.

dos fenômenos de interferência e difração propusemos aos estudantes a análise da seguinte

situação: uma metralhadora que possa lançar partículas em um obstáculo que possui duas fendas, nas quais as partículas possam passar e atingir um anteparo que possui um detector que nos possibilite contar o número de partículas que o atingiram (ver figura 3). O resultado para este experimento é totalmente diferente daquele encontrado para ondas incidindo na região em que se encontram as duas fendas (ver figura 2). Portanto, neste caso, as partículas emitidas pela metralhadora não apresentam fenômenos de difração e interferência. Neste ponto, estamos preparados para a introdução de um novo conceito: a

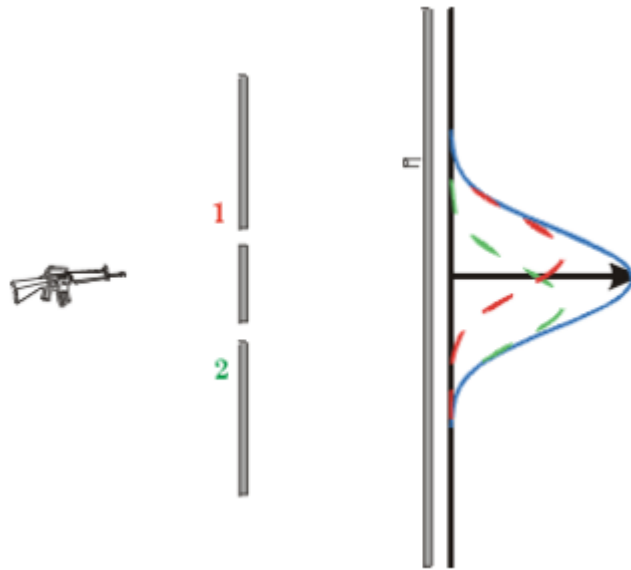


Figura 3 – Simulação do experimento da dupla fenda com partículas. Fonte <<http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>>

dualidade da natureza. A Física Clássica previa que os objetos atômicos (elétrons, prótons, nêutrons e até mesmo átomos) se comportassem sempre como partículas. Contudo alguns experimentos mostraram que o que denominávamos como partículas atômicas poderiam exibir comportamentos tipicamente ondulatórios tais como, a difração e a interferência (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013a; EISBERG; RESNICK, 1979). Para analisarmos as características de interferência de objetos quânticos, usamos a simulação “*Interferência Quântica*”, disponível nos arquivos do projeto Phet e que pode ser obtida no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference> (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002). A figura 4 mostra a simulação para a difração de elétrons e fica evidente que os elétrons também podem ter comportamento ondulatório. A simulação também foi útil para discutirmos um comportamento tipicamente quântico e inesperado classicamente: o ato de observar (“medir”) nos fenômenos quânticos. Com o texto produzido e as atividades desenvolvidas, nossos objetivos eram possibilitar aos alunos compreenderem:

- os fenômenos de interferência e difração;

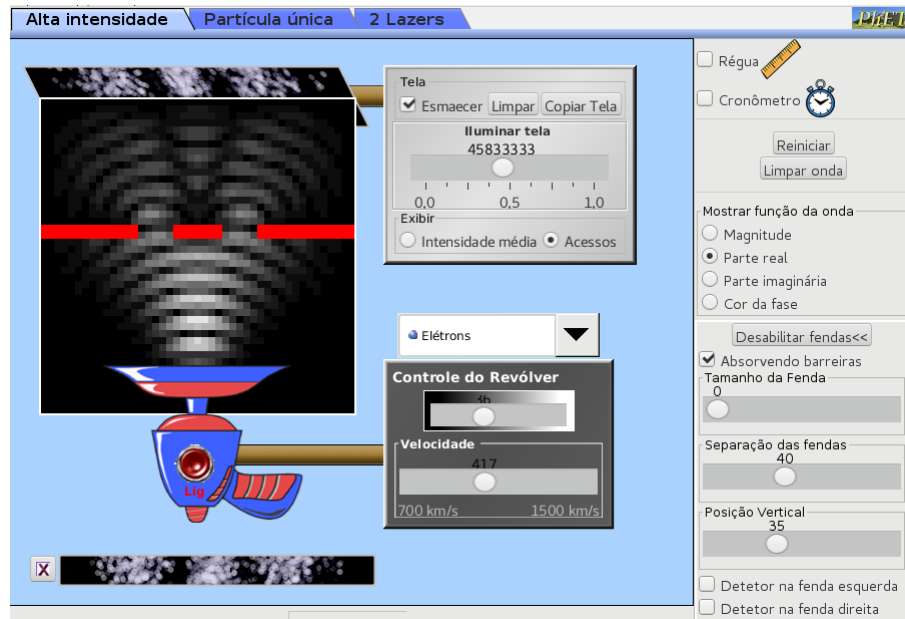


Figura 4 – Simulação da dupla fenda sem observador.

- as propriedades ondulatória e corpuscular para partículas quânticas e
- a importância do observador em fenômenos quânticos.

Capítulo 4 - Efeito Fotoelétrico: apresentou-se a definição de efeito fotoelétrico: fenômeno que consiste na emissão de elétrons de metais após incidência de radiação eletromagnética sobre sua superfície e explicou-se que parte da energia da radiação é transformada em energia cinética dos elétrons emitidos. O fenômeno, observado experimentalmente pela primeira vez em 1887 por Heinrich Hertz (EISBERG; RESNICK, 1979), só foi entendido em 1905 pioneiramente por Albert Einstein, o que lhe rendeu o prêmio Nobel de Física de 1921. Einstein partiu da ideia que a luz fosse quantizada em pacotes de energia, inspirado pela proposta de Planck. Admitiu-se por hipótese que as radiações eletromagnéticas podem se comportar não apenas como ondas contínuas, mas também como feixes discretos de energia chamados de fótons. Para discussão deste fenômeno utilizamos a simulação “Efeito Fotoelétrico” também de autoria do grupo Phet e disponível no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric> (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002) (ver figura 5). O fóton age como uma partícula e, ao atingir um elétron no átomo, atua como uma “bola de bilhar” colidindo e arremessando os elétrons para fora do metal. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a probabilidade de colisão entre fótons e elétrons, fazendo com que aumente-se o número de elétrons ejetados. Nesse sentido, podemos dizer que a luz pode se comportar como partícula. Assim como elétrons têm comportamento dual, o que se pode evidenciar através do experimento da dupla fenda, a luz também pode ter esse comportamento. Neste capítulo apresentamos alguns exemplos de tecnologias nas quais o efeito fotoelétrico está

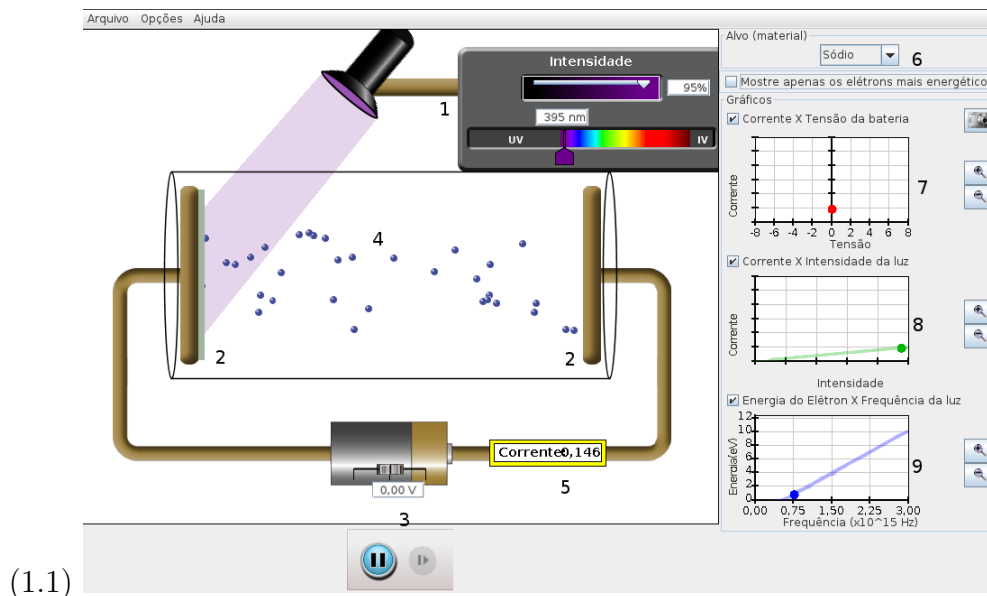


Figura 5 – Simulação de um arranjo experimental para investigação do efeito fotoelétrico.

presente, tais como: as células fotoelétricas (utilizadas nas portas dos elevadores para fechar e abrir automaticamente) e fotômetros (medidores de luminosidade que fotógrafos usam para decidir em que condições a fotografia deve ser tirada). Ao final do estudo deste capítulo esperamos que o estudante seja capaz de compreender:

- o que é o efeito fotoelétrico;
- o comportamento dual para a luz;
- a relação entre frequência da radiação e emissão de elétrons e
- a relação entre a frequência da radiação e a possibilidade de ocorrência ou não do efeito fotoelétrico.

Capítulo 5 - Princípio da Incerteza de Heisenberg: iniciamos as discussões apresentando o “Princípio da Incerteza de Heisenberg” que foi formulado em 1927 por Werner Heisenberg. Em linhas gerais, propõe-se que quanto maior for a precisão na medida da posição de uma partícula, maior será a incerteza de seu momento linear e vice-versa (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013b). De acordo com esse princípio é impossível detectar as características ondulatórias e corpusculares no mesmo experimento para uma partícula quântica. Dessa forma, se é possível em um experimento evidenciar o comportamento ondulatório, neste mesmo experimento não se poderá detectar o comportamento corpuscular. Ou, em outras palavras, é impossível observar em um mesmo experimento a natureza dual de objetos quânticos. Para discutir o princípio da incerteza, empregamos a simulação “Interferência Quântica” também da plataforma Phet e disponível

em (https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference) (ver figura 6). Esperamos que o estudante, ao final desse capítulo, compreenda:

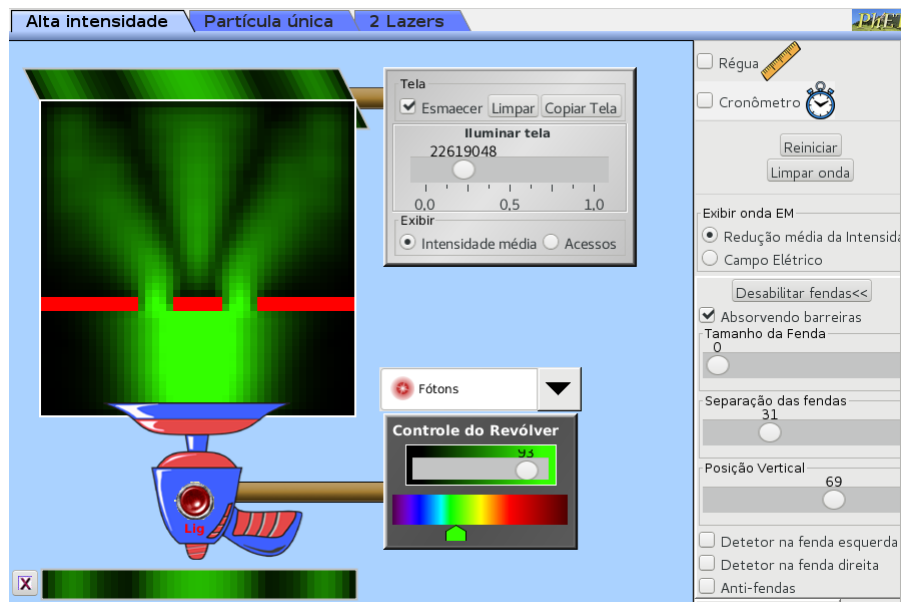


Figura 6 – Simulação da dupla fenda utilizando fótons e sem detector

- o conteúdo do princípio da incerteza de Heisenberg;
- a impossibilidade de detectar o comportamento dual no mesmo experimento e
- a importância desse princípio nos fenômenos quânticos.

Capítulo 6 - O Átomo de Bohr: a introdução deste capítulo foi dedicada à exploração histórica e conceitual dos modelos atômicos anteriores: modelo de Thomson e modelo de Rutherford. Thomson, responsável pela descoberta do elétron, propôs um modelo composto de uma esfera positivamente carregada e incrustada por elétrons. O modelo tinha problemas graves: impossibilidade de explicar a ionização de um átomo, a formação de moléculas e, muito especialmente, não podíamos explicar a sua estabilidade (esta configuração não estaria em equilíbrio se não atuassem outras forças além das eletrostáticas). Rutherford propôs um modelo atômico semelhante ao sistema planetário no qual os elétrons orbitam o núcleo através de uma força eletrostática do mesmo modo que os planetas orbitam o sol devido à ação da força gravitacional. Este modelo também tem graves problemas. De acordo com a Mecânica Clássica, os elétrons acelerados, sendo aqueles em órbitas circulares, deveriam emitir radiação eletromagnética enquanto orbitavam o núcleo. Portanto, o elétron perderia energia e teria uma trajetória espiral, colapsando sobre o núcleo em um intervalo de tempo muito pequeno. Este modelo atômico é catastrófico, pois prevê que todos os átomos são instáveis. Para explorar algumas características e também a previsão clássica desses modelos utilizamos o simulador computacional “*Modelos do Átomo de Hidrogênio*” do Phet

e disponível em <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom> (ver figura 7). Na sequência utilizamos o mesmo simulador para explicar o modelo atômico

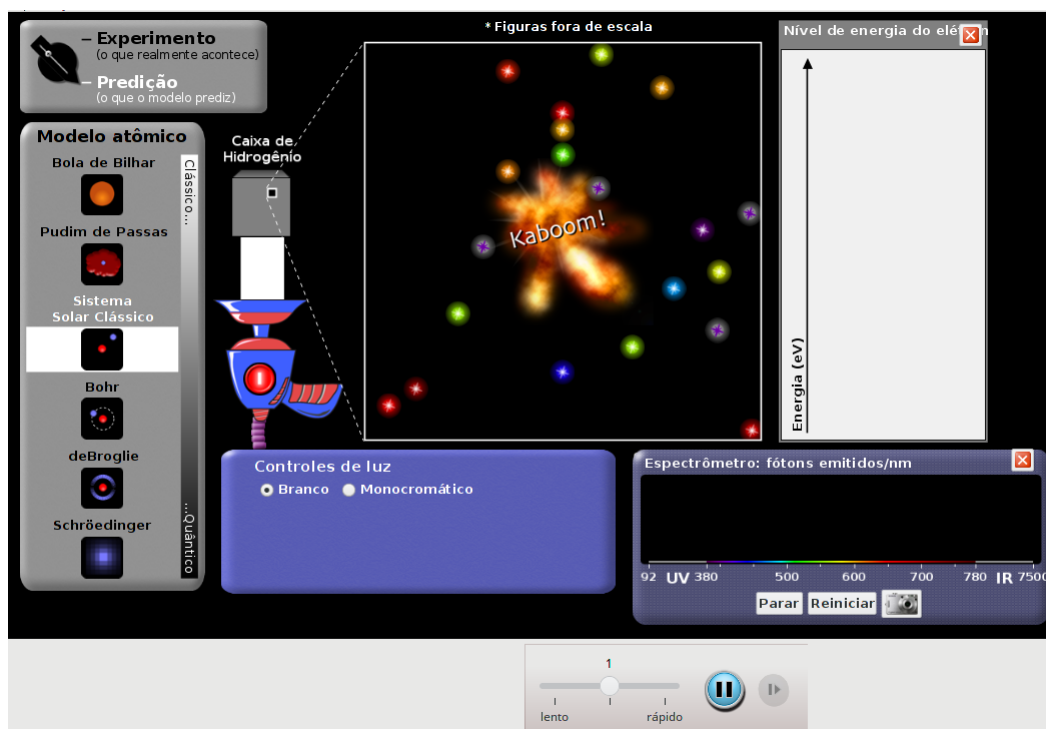


Figura 7 – Imagem da tela principal do simulador computacional para o átomo de hidrogênio.

de Bohr e os quatro postulados nos quais está baseado (ver sequência didática no apêndice B). Dentre as características do modelo, destacamos:

- Elétrons movem-se em trajetórias circulares ao redor do núcleo sob a ação da força de Coulomb para cargas puntiformes de sinais opostos;
- O raio da trajetória do elétron não pode ter qualquer valor;
- Nas órbitas permitidas o elétron é estável e não emite ou absorve radiação;
- O elétron pode transitar entre as órbitas permitidas (estados estacionários) por meio de processos de emissão/absorção de radiação. Se o elétron for de uma órbita mais interna para outra mais externa, absorve radiação. Caso o processo envolva mudança de uma órbita mais externa para outra mais interna, envolve emissão de radiação.

Apesar de não justificar seus postulados e não encontrar motivos para eles, os resultados previstos pela teoria de Bohr aproximavam-se de forma surpreendente dos dados experimentais para o espectro atômico do átomo de hidrogênio. Para aprofundar no estudo do átomo de Bohr, utilizamos novamente a simulação *Modelos do Átomo de Hidrogênio*. No simulador é possível visualizar as órbitas permitidas e o espectro para o átomo de

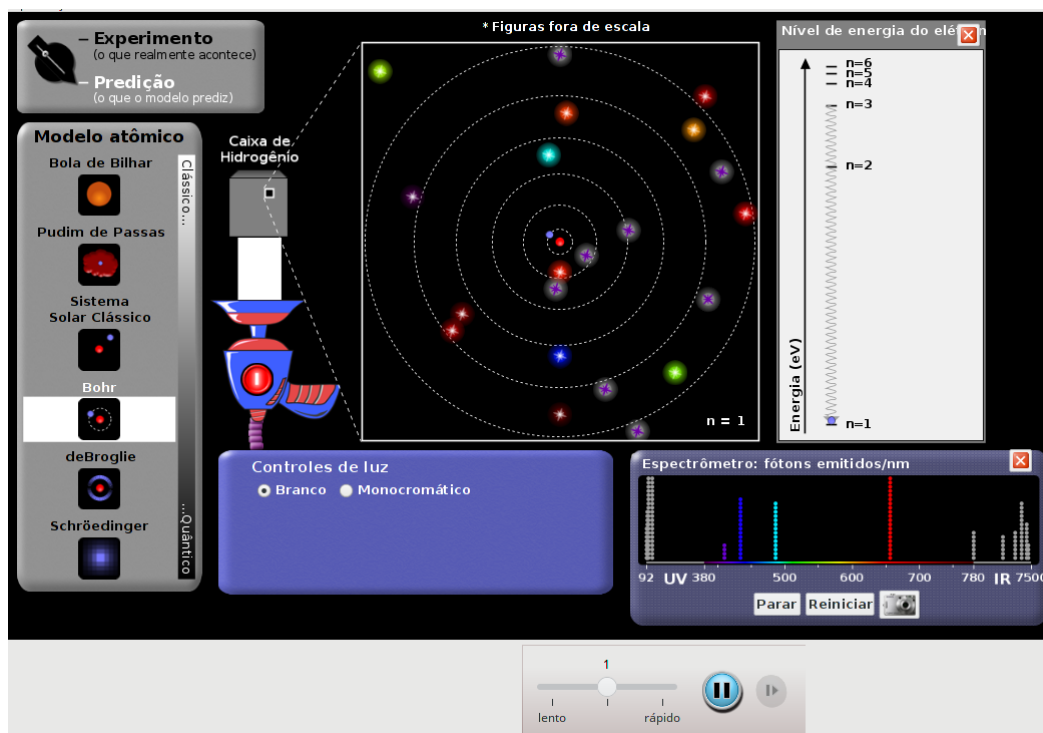


Figura 8 – Simulação para o átomo de hidrogênio empregando o modelo de Bohr.

hidrogênio (ver figura 8). Nosso objetivo ao escrever este capítulo foi propiciar material para que o estudante compreenda:

- os fundamentos do modelo atômico proposto por Bohr;
- os postulados de Bohr;
- o espectro do átomo de hidrogênio e
- os processos de transição do elétron nas órbitas permitidas do átomo de Bohr.

Capítulo 7 - O Átomo da Mecânica Quântica: abordou-se os seguintes tópicos: ondas de matéria de De Broglie; associação entre ondas mecânicas e ondas de matéria; a nova Mecânica Quântica; o modelo atômico da Mecânica Quântica e ainda o experimento de Stern-Gerlach e o Spin do Elétron. Na primeira seção foi discutido a hipótese de Louis Victor De Broglie de que aquilo que denominamos matéria também poderia ter comportamento ondulatório (ROSA, 2004). Para discutir sobre as ondas de matéria de De Broglie, utilizamos fenômenos já conhecidos pelos estudantes para ondas mecânicas. Na discussão usamos a simulação disponível em <<http://www.anglosj.com.br/fisica/estacionarias/estacionarias.html>> (ver figura 9). A sequência didática seguiu apresentado as ideias de Schrödinger que permitiram determinar a função de onda que descreve o estado quântico de um sistema. A função de onda permite obter todas as informações sobre um determinado sistema físico, contemplando o princípio da incerteza e a dualidade

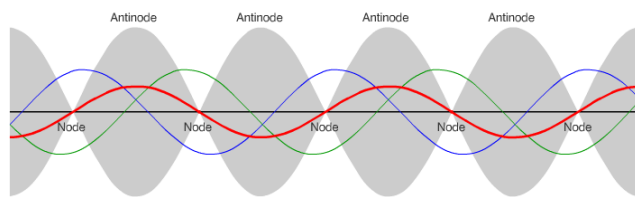


Figura 9 – Resultado do fenômeno de interferência parcialmente construtiva para ondas de mesma amplitude, mesma frequência e comprimento de onda, mas que se propagam em sentidos opostos em uma corda com ambas as extremidades fixas. A onda estacionária resultante e seus elementos também são mostrados na figura.

onda-partícula. No produto educacional, não detalhamos a resolução da equação de Schrödinger, focamos apenas em sua interpretação. O comportamento estatístico (não mais determinístico, como na Mecânica Clássica) foi discutido. Apresentou-se uma das principais consequências desta interpretação usual da Mecânica Quântica e a perda do conceito clássico de trajetória. Assim sendo, não discutimos sobre a trajetória circular para o elétron como proposta por Bohr, mas sim sobre a probabilidade de encontrar o elétron em determinada região nas proximidades do núcleo. Fez-se a conexão com o conceito de *orbital* que estudantes já tinham tido contato nas aulas de Química. Durante as aulas esclareceu-se o surgimento do que eles já conheciam como números quânticos: n (número quântico principal); l (número quântico orbital secundário ou azimutal) e m_l (número quântico magnético). Os discentes oportunamente visualizaram os orbitais na simulação intitulada “Modelos do Átomo de Hidrogênio” (ver figura 10). Na figura 11,

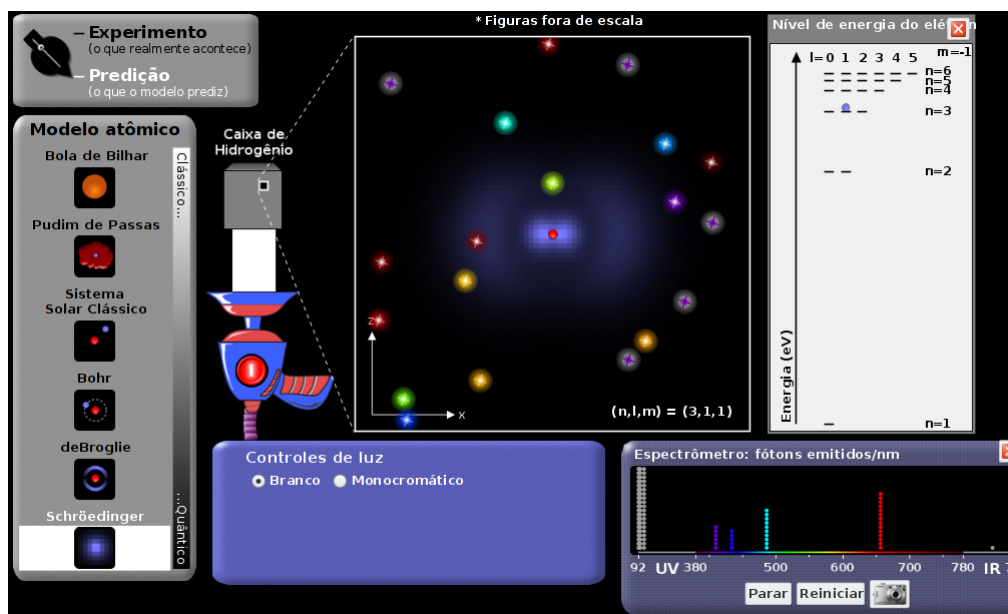


Figura 10 – Simulação para o átomo de Hidrogênio, mas com o modelo de Schrödinger ou modelo da Mecânica Quântica.

retirada da fonte <https://pt.wikipedia.org/wiki/Número_quântico>, compilamos os

orbitais do átomo de hidrogênio para os sete primeiros números quânticos principais (n). O capítulo foi finalizado com uma discussão sobre a necessidade de introduzir momento

Nível (n)	Subnível (l)			
	$l=s=0$	$l=p=1$	$l=d=2$	$l=f=3$
$n=K=1$	 $m=0$			
$n=L=2$	 $m=0$	 $m=-1$ $m=0$ $m=1$		
$n=M=3$	 $m=0$	 $m=-1$ $m=0$ $m=1$	 $m=-2$ $m=-1$ $m=0$ $m=1$ $m=2$	
$n=N=4$	 $m=0$	 $m=-1$ $m=0$ $m=1$	 $m=-2$ $m=-1$ $m=0$ $m=1$ $m=2$	 $m=-3$ $m=-2$ $m=-1$ $m=0$ $m=1$ $m=2$ $m=3$
$n=O=5$	 $m=0$	 $m=-1$ $m=0$ $m=1$	 $m=-2$ $m=-1$ $m=0$ $m=1$ $m=2$	...
$n=P=6$	 $m=0$	 $m=-1$ $m=0$ $m=1$	...	...
$n=Q=7$	 $m=0$	...	...	...

Figura 11 – Ilustração das densidades de probabilidades ou orbitais para o átomo de H.
Fonte <https://pt.wikipedia.org/wiki/Número_quântico>.

intrínseco do spin do elétron nos números quânticos. Para isso, discutimos os resultados do experimento de Stern-Gerlach (ver figura 12). Ao final deste capítulo do nosso produto

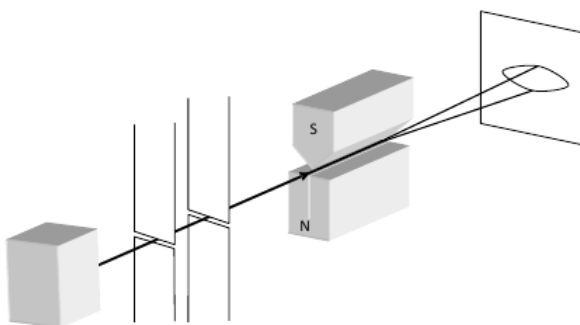


Figura 12 – Experimento de Stern-Gerlach - fonte (GOMES; PIETROCOLA et al., 2011)

educacional, esperamos que estudante compreenda:

- os princípios básicos da Mecânica Quântica;
- o modelo atômico da Mecânica Quântica;
- a interpretação probabilística da natureza, sua conexão com a função de onda e suas consequências;

- o surgimento natural dos números quânticos na teoria de Schrödinger e
- a necessidade de introduzir o spin ao conjunto dos números quânticos.

Capítulo 8 - Lasers: dedicamos à discussão da aplicação dos conceitos quânticos abordados nos capítulos anteriores a uma aplicação tecnológica de extrema importância cotidiana: lasers. A palavra LASER deriva da expressão inglesa **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Amplificação por emissão estimulada de radiação). A explicação de seu funcionamento está relacionado com o modelo atômico quântico e com nossas ideias de quantização. O raio de um laser é formado pela emissão contínua de um feixe de fótons (partículas de luz). Para explicar as propriedades e o funcionamento de um laser, utilizamos a simulação “*Laser*” do Phet, disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/lasers (ver figura 13). Consideramos que este seja um

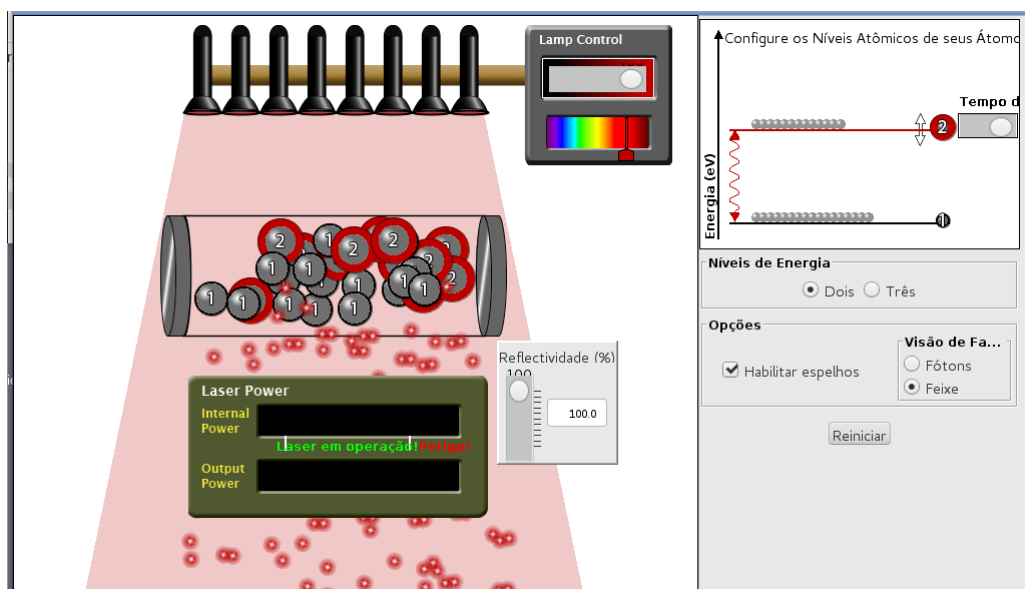


Figura 13 – Simulação de lasers.

capítulo fascinante para o estudante e que permita a compreensão do funcionamento do laser, a sua relevância tecnológica além da importância social. Alcançaremos sucesso se o estudante, ao final da aplicação do nosso produto educacional, compreender a importância desta nova Física como ciência básica e também como ciência aplicada aos eventos que ocorrem à sua volta.

5 Discussões e Resultados

Neste capítulo analisaremos dados relativos à aplicação da sequência didática que consta do Apêndice B e discutida no capítulo 4. Apresentaremos e discutiremos as respostas dos estudantes ao questionário aplicado antes e depois das aulas ministradas (pré-teste e pós-teste). Já relatamos no capítulo que questionário (disponível no Apêndice A) foi aplicado em uma turma de 29 alunos de forma individual e sem consulta. Em adição, também analisaremos os resultados referentes a um segundo questionário (Apêndice C) aplicado após ministrarmos as aulas e no intuito de avaliarmos o desempenho dos estudantes após o contato com o produto educacional.

Esta pesquisa é de caráter qualitativo. No decorrer de sua implementação, fizemos uma análise descritiva da elaboração de um produto didático e da sua aplicação através de questionários e observações em sala de aula. Analisamos as evoluções conceituais dos alunos na compreensão de tópicos e fenômenos da física quântica. Os questionários utilizados são um misto de perguntas abertas e fechadas. Esse tipo de questionário foi utilizado por dois motivos. Primeiro que, alguns tópicos de física quântica são complexos para os alunos formularem respostas, e portanto, perguntas fechadas é mais conveniente para esses tópicos, assim como, facilitam a análise dos resultados. O segundo motivo é que foi elaborado perguntas para que o aluno avaliasse o produto e as ferramentas utilizada em sua aplicação e para isso utilizamos perguntas de formato aberto em que foi possível o estudante expor sua opinião.

5.1 Pré-teste e Pós-teste

Sondou-se a quantidade de alunos que já ouviram falar em Física Quântica. Os gráficos 14 e 15 mostram, respectivamente, os resultados do pré-teste e pós-teste. No

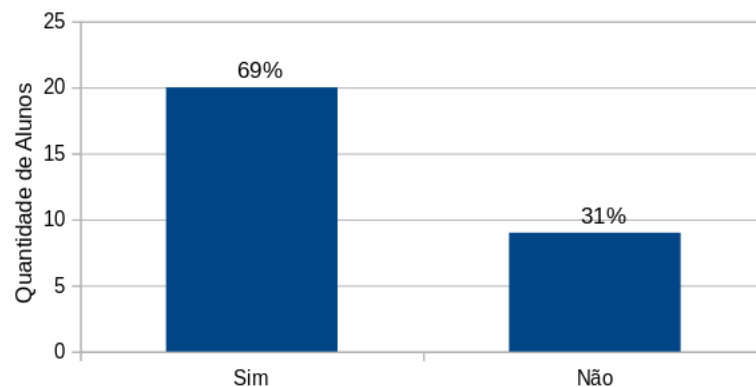


Figura 14 – Quantitativo de alunos que já ouviram falar em Física Quântica (pré-teste).

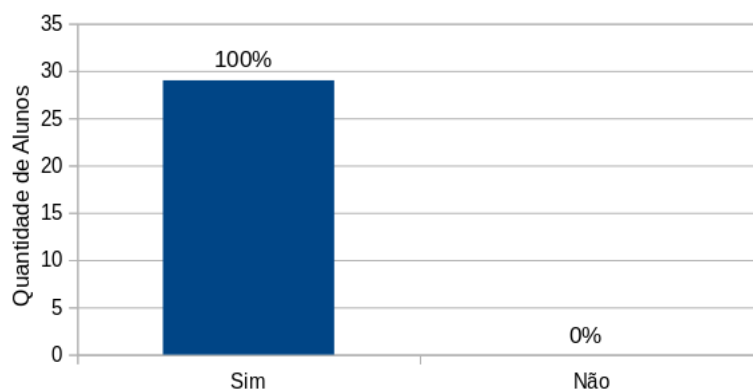


Figura 15 – Quantitativo de alunos que já ouviram falar em Física Quântica (pós-teste).

pré-teste aproximadamente 69% dos alunos afirmaram que já tinha ouvido algo sobre este tema, enquanto era um tópico completamente desconhecido para 31% dos estudantes. Na aplicação pós-teste, todos os alunos afirmaram que já tinham ouvido falar sobre Física Quântica, o que era obviamente o resultado esperado após a aplicação do produto educacional durante as 11 aulas ministradas. Considerando a resposta no pré-teste, resta evidente que é necessário uma atualização curricular, porque ainda é grande o número de alunos que desconhecem a Física Moderna e que tem enorme aplicabilidade cotidiana. Um ponto interessante para ser investigado e que não foi feito por nós seria a fonte de conhecimento sobre Física Quântica daqueles 69% que declaram ter conhecimento deste tema. Muito provavelmente, a fonte das informações foram mídias não especializadas e sem qualquer enfoque científico. Assim sendo, é provável que o percentual daqueles que ouviram algo de fonte científica sobre Quântica ou Física Moderna se reduza drasticamente. Machado e Nardi (2007) pontuam que os atuais currículos escolares não contemplam o desenvolvimento da Física Contemporânea. Seguindo a mesma linha, Moreira (2007) afirma que em pleno século XXI, não faz sentido que as escolas se restrinjam a ensinar apenas a Física Clássica e é urgente que os currículos escolares sejam atualizados de forma a contemplar tópicos de Física Quântica.

Continuando com nossa análise da coleta de dados, nos gráficos 16 e 17 quantificamos o número de estudantes que já tinham ouvido ou conheciam sobre cada um dos dez tópicos relacionados à Quântica. Os alunos foram instruídos a marcarem todos aqueles que tinham conhecimento e em caso de desconhecerem todos os tópicos listados poderiam informar marcando a opção “nunca ouvi falar desses assuntos”. No pré-teste, os tópicos *Átomo de Hidrogênio* (citado 17 vezes) e *Fótons* (citado 12 vezes) foram os assuntos que os alunos mais reconheceram. Enquanto que, os temas *Raios do Espectro de Hidrogênio* (nenhuma citação), *Radiação de Corpo Negro* (citado 1 vez), *Princípio da Incerteza de Heisenberg* (citado 1 vez) e *Dualidade Onda Partícula* (citado 3 vezes) foram poucos vezes reconhecidos pelos alunos. Um dos motivos de grande parte dos alunos terem ouvido falar em fótons e átomo de hidrogênio é por serem temas estudado na disciplina de Química. Outro fator que

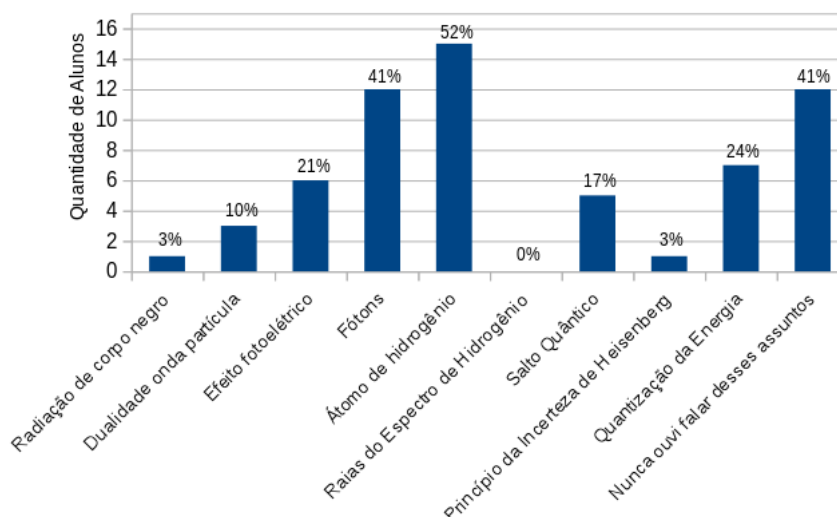


Figura 16 – Assuntos que os alunos já ouviram falar (pré-teste)

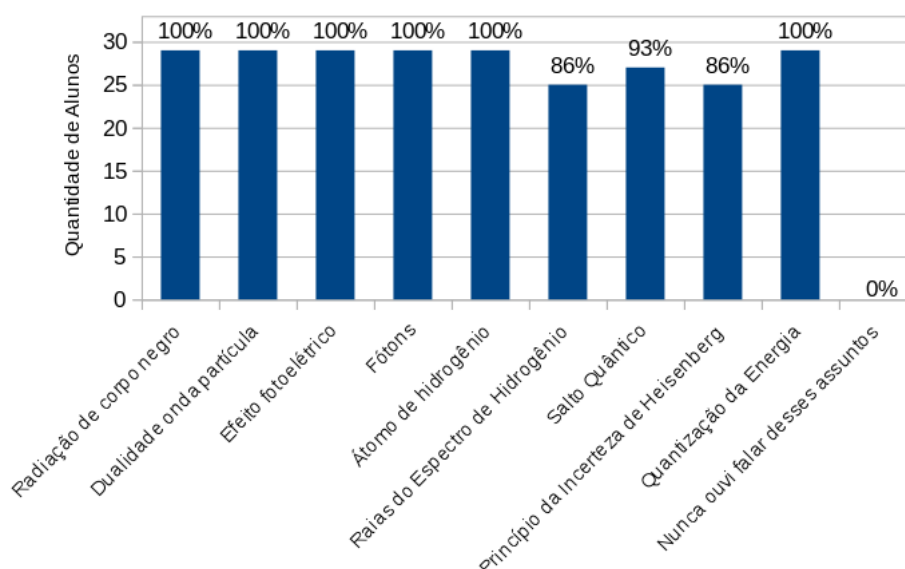


Figura 17 – Assuntos que os alunos já ouviram falar (pós-teste)

destaca no pré-teste é a quantidade de alunos (41%) que marcaram a opção “Nunca ouvi falar desses assuntos”. Assim como foi destacado na primeira pergunta, em que 31% dos alunos nunca ouviram falar em Física Quântica, fica evidente que os currículos escolares não dão prioridades para assuntos relacionados a física contemporânea. No pós-teste, todos os temas foram massivamente reconhecidos. Novamente frisamos que o surpreendente seria termos resultado diferente, uma vez que todos esses tópicos foram abordados no produto educacional e discutidos no decorrer das aulas.

A pergunta de número três (questão em formato aberto) referia-se ao conhecimento de partícula. Na cinemática, de acordo [Ramalho, Ferraro e Soares \(2007a\)](#) partícula é todo objeto onde as dimensões (tamanho) são desprezíveis quando comparadas com o movimento estudado. Nesse sentido, podemos tratar a terra como partícula se estamos

estudando o movimento em torno do sol, mas não podemos fazer esta aproximação se estamos estudando o movimento de rotação da terra com período de 24 horas. No produto educacional foi dada uma definição para partícula, ligeiramente mais abrangente, porém optamos em analisar as resposta dos alunos pela definição dada na cinemática, pois até então os alunos só tiveram acesso a essa definição. Dessa forma, as resposta que se aproximavam da definição de [Ramalho, Ferraro e Soares \(2007a\)](#) foram consideradas corretas. Enquanto que, as respostas do tipo “é tudo que é pequeno”, “pequeno fragmento de matéria” e “minúsculos pedaço de matéria” foram consideradas parcialmente corretas. E as respostas em que os alunos não faziam associação entre partícula e corpos com dimensões desprezíveis em relação ao movimento estudado foram consideradas incorretas. Os gráficos 18 e 19 correspondem, respectivamente, as respostas do pré-teste e pós-teste para essa questão.

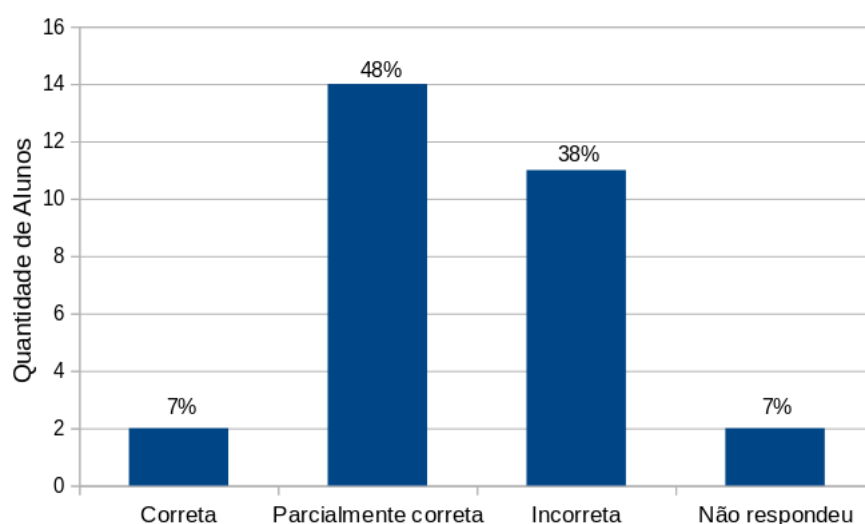


Figura 18 – Respostas dos alunos sobre o que é uma partícula (pré-teste)

No pré-teste, a quantidade de respostas corretas somada com a quantidade daquelas que estavam parcialmente corretas correspondem a aproximadamente 55% do total. Para o pós-teste, totalizamos 72%. 28% dos alunos não responderam ou forneceram resposta incorreta, sendo que antes de aplicarmos a sequência didática este quantitativo era de 45%. Portanto, houve melhora significativa nas respostas dos alunos, o que pode ser creditado à discussão realizada na aula cujo tópico era o experimento da fenda dupla. Esta questão nos mostra a importância de testes diagnósticos que possibilitam detectar os conhecimentos prévios dos alunos e preparar atividades que permitam sanar dificuldades com pre-requisitos antes de se iniciar discussões de tópicos novos.

A quarta pergunta foi utilizada para sondagem sobre o conceito de onda e também estava em formato aberto. De acordo com [Ramalho, Ferraro e Soares \(2007b\)](#), denomina-se onda uma perturbação que se propaga transferindo energia de um ponto a outro sem o transporte de matéria. Agrupamos as respostas dos alunos com rótulos “correta”,

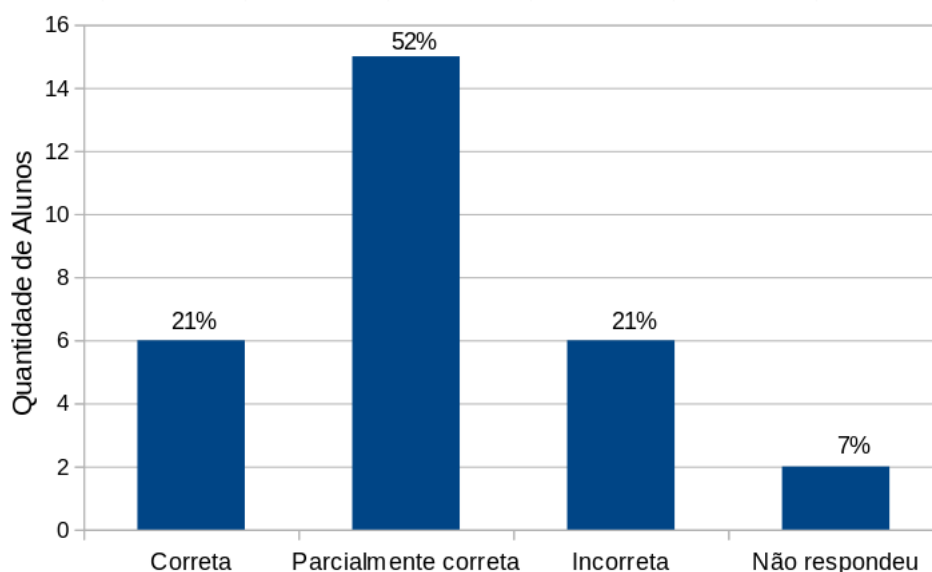


Figura 19 – Respostas dos alunos sobre o que é uma partícula (pós-teste)

“parcialmente correta”, “incorreta” e “não respondeu”. O quantitativo de cada um dos grupos estão nos gráficos 20 e 21 e referem-se aos dados coletados para o pré-teste e pós-teste, respectivamente. Na fase pré-teste, obtivemos 62% de respostas que foram

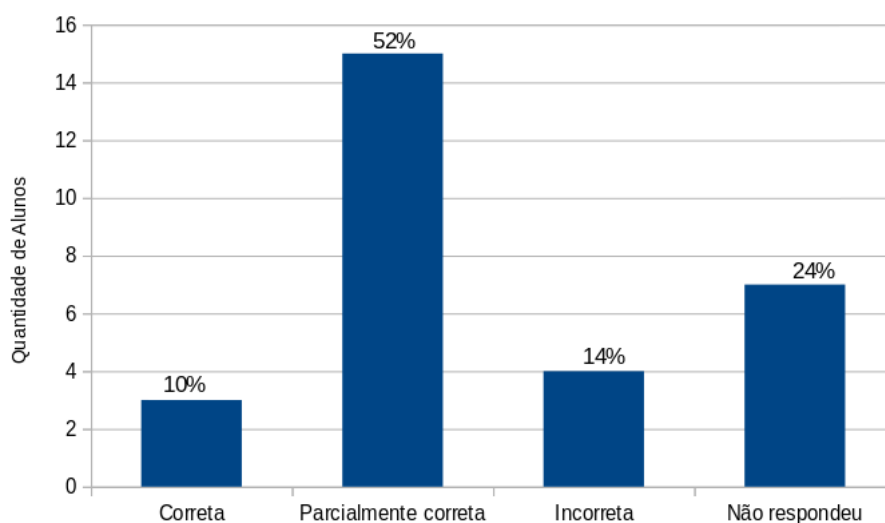


Figura 20 – Respostas dos alunos sobre o que é uma onda (pré-teste)

classificadas como “correta” ou “parcialmente correta”. O percentual da fase pós-teste subiu para, aproximadamente, 76%. Já a quantidade de alunos que não souberam responder ou responderam incorretamente corresponde a 38% no pré-teste e caiu para 24% no pós-teste. O desempenho foi ligeiramente melhor que aquele obtido para o conceito de partícula. Entretanto, esclarecemos que todos os estudantes da turma já tinham tido contato com o conteúdo de ondulatória no segundo ano e que as aulas que ministramos sobre este tema eram apenas aulas de revisão.

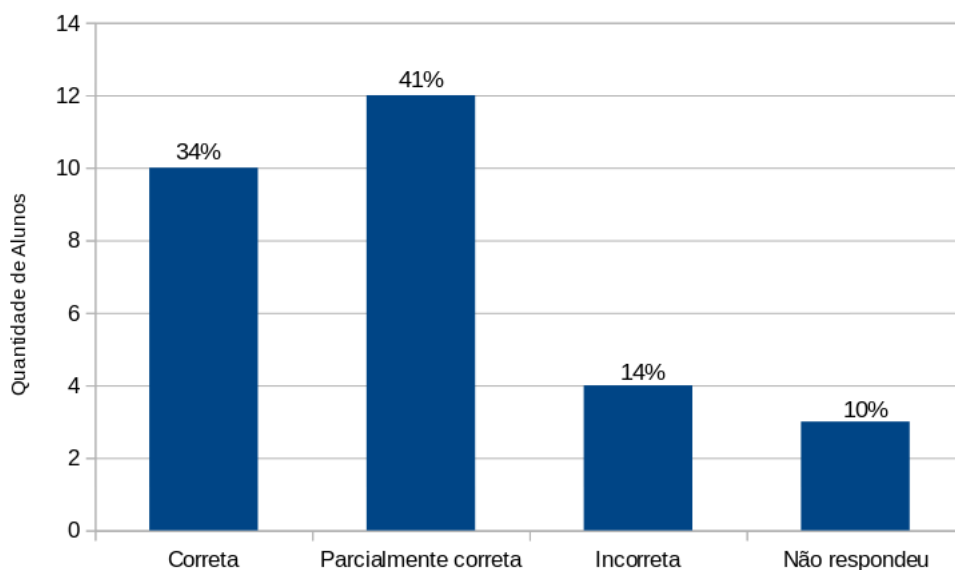


Figura 21 – Respostas dos alunos sobre o que é uma onda (pós-teste)

Dando sequência à coleta de dados, apresentamos nos gráficos 22 e 23 o resultado obtido para a sondagem sobre a natureza do elétron. O tema foi a quinta pergunta apresentada para os estudantes e eles deveriam escolher entre as seguintes opções: “ondulatória”; “corpuscular (partícula)”; “dual, pois apresenta ambos os comportamentos”, “ondulatório e corpuscular” e “não sei responder”. No pré-teste 14 alunos (48%) marcaram a opção

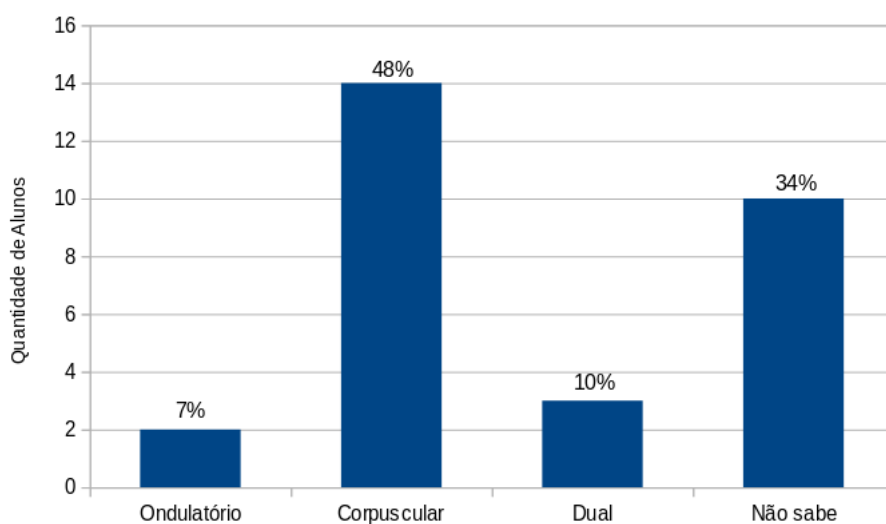


Figura 22 – Respostas dos alunos sobre a natureza do elétron (pré-teste)

“natureza corpuscular”, 10 alunos não sabiam responder (34%) e apenas 3 alunos escolheram a opção “natureza dual”. O conceito de dualidade foi discutido com auxílio da simulação para o experimento da dupla fenda (ver 4) e, nesta ocasião, foi apresentado aos alunos o comportamento tanto ondulatório quanto corpuscular de objetos quânticos, ou seja, o elétron poderia em determinadas situações exibir comportamento ondulatório ao passo que em outras circunstâncias se observaria comportamento característico do que

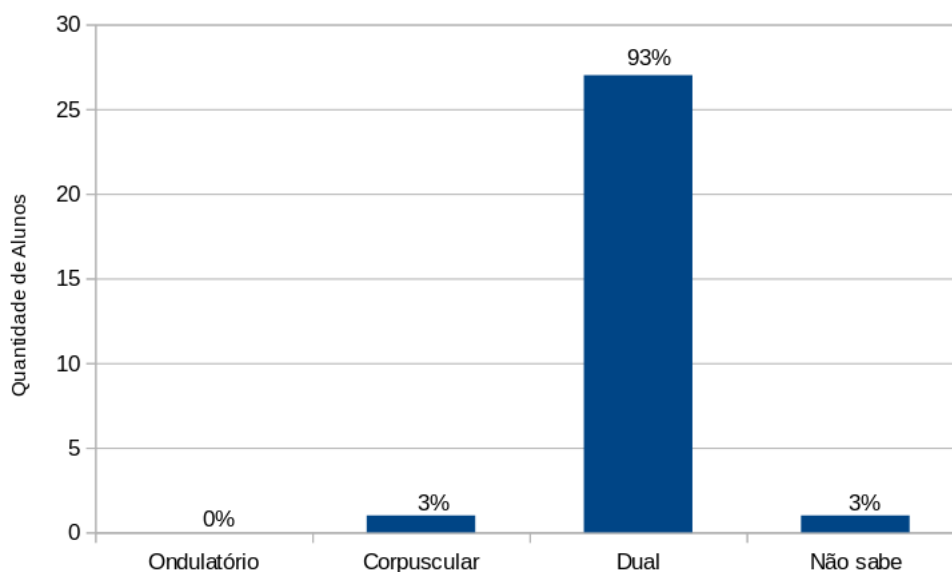


Figura 23 – Respostas dos alunos sobre a natureza do elétron (pós-teste)

associamos à natureza corpuscular. Assim sendo, a natureza tem comportamento dual (dualidade onda partícula). Podemos observar no gráfico 23 que no pós-teste 27 alunos (93%) responderam que o elétron tem natureza dual, evidenciando, portanto, mudança de postura dos estudantes quanto ao entendimento do conceito de dualidade.

Na sexta questão sondamos sobre a definição dos estudantes para “quantização” e sobre o significado da expressão “a energia é quantizada”. Por ser uma questão de formato aberto, agrupamos as respostas dos alunos nos seguintes grupos: “correta”, “parcialmente correta”, “incorreta” e “não respondeu”. As respostas para o pré-teste e pós-teste estão representadas, respectivamente, nos gráficos 24 e 25. Não se obteve nenhuma resposta que

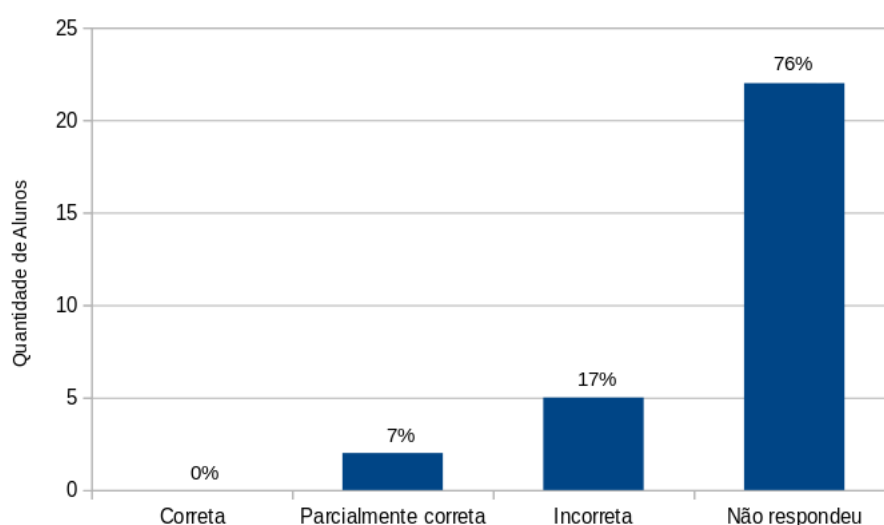


Figura 24 – Respostas dos alunos sobre quantização (pré-teste)

integrasse o grupo “correta” na fase de pré-teste. Com o início da aplicação do produto

educacional, o conceito de quantização foi discutido em detalhes durante as aulas sobre “radiação de corpo negro”, “efeito fotoelétrico”, “átomo de Bohr” e “átomo de Schrödinger”. A construção deste novo conceito ocorreu de forma progressiva e utilizando-se de simulações computacionais. Os eventos históricos relevantes sempre foram abordados. Comparando os gráficos 24 e 25, concluímos que nossa estratégia foi eficiente porque antes das aulas tínhamos apenas 2 (7%) respostas “parcialmente corretas”, 5 (17%) respostas “incorretas”, nenhuma resposta “correta” e 22 (76%) estudantes não tinham respondido a esta questão. Na fase pós-teste, estes números foram, respectivamente: 10 (34%), 5 (7%), 12 (41%), e apenas 2 (7%) alunos não responderam à questão. Certamente temos um excelente resultado com a estratégia adotada.

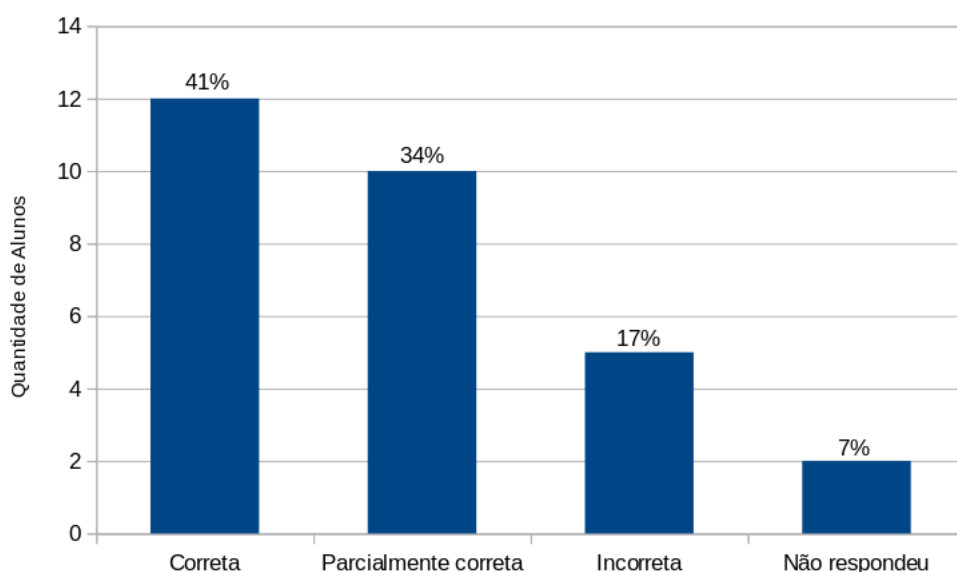


Figura 25 – Respostas dos alunos sobre quantização (pós-teste)

Na sétima, oitava e nona questões os alunos foram convidados a refletir sobre o conhecimento de modelos atômicos anteriores ao modelo da Mecânica Quântica discutido na aula 9. Na questão 7 o estudante deveria identificar as características dos modelos atômicos de Dalton, Thomson, Rutherford e Bohr. Erros e acertos no pré-teste e no pós-teste são resumidos, respectivamente, nos gráficos 26 e 27. Observe que houve uma inversão entre a quantidade de erros e acerto (ver 26 e 27) para os modelos atômicos de Rutherford e Bohr: os modelos atômicos de Rutherford e Bohr foram os que tiveram a maior porcentagem de erros no pré-teste e a maior porcentagem de acertos no pós-teste. Este resultado é coerente com o fato de que estes modelos foram discutidos com maior detalhe durante as aulas teóricas. Como consequência, após a aplicação da nossa sequência didática, alguns alunos ainda confundiram os modelos atômicos de Dalton de Thomson. Sob a luz destes resultados, não mudaríamos nossa estratégia porque consideramos que os modelos de Rutherford e Bohr sejam cruciais para o entendimento da discussão posterior sobre modelos atômicos.

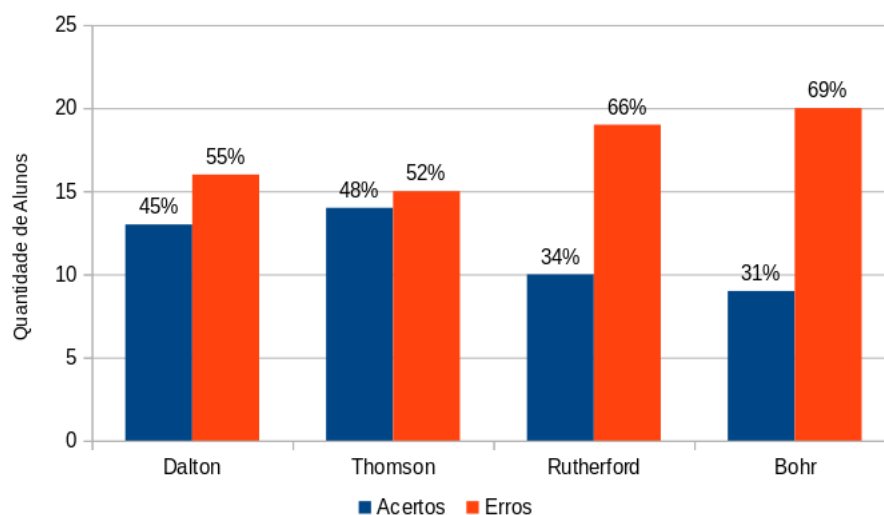


Figura 26 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pré-teste)

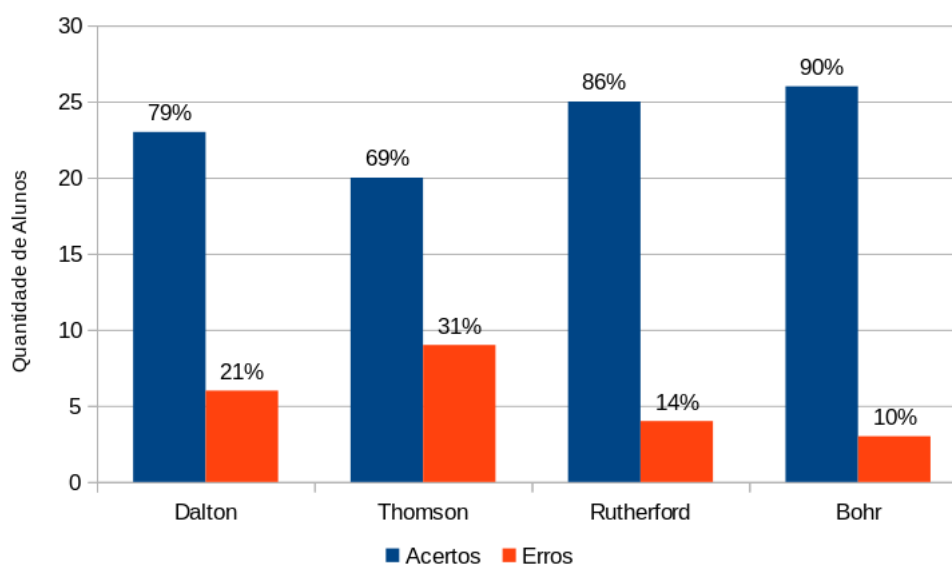


Figura 27 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pós-teste)

A pergunta oito estava relacionada especificamente com os modelos de Thomson e Rutherford. Tratava-se de uma questão de múltipla escolha e a resposta correta era a letra “d” (ver apêndice A). Nos gráficos 28 (dados para o pré-teste) e 29 (dados para o pós-teste) apresentamos o quantitativo de estudantes associados a cada uma das alternativas apresentadas. Os dados corroboram o resultado obtido para a questão anterior: o aprendizado referente aos modelos de Rutherford e Bohr foi satisfatório. No pré-teste 13 alunos acertaram a questão, enquanto para o pós-teste o número de acertos subiu para 24. Creditamos o sucesso alcançado na fase pós-teste ao uso do simulador computacional para os diferentes modelos atômicos. Na simulação do modelo de Rutherford era evidente que os elétrons estavam girando ao redor do núcleo e, classicamente, era esperado que os elétrons perderiam energia colidindo com o núcleo.

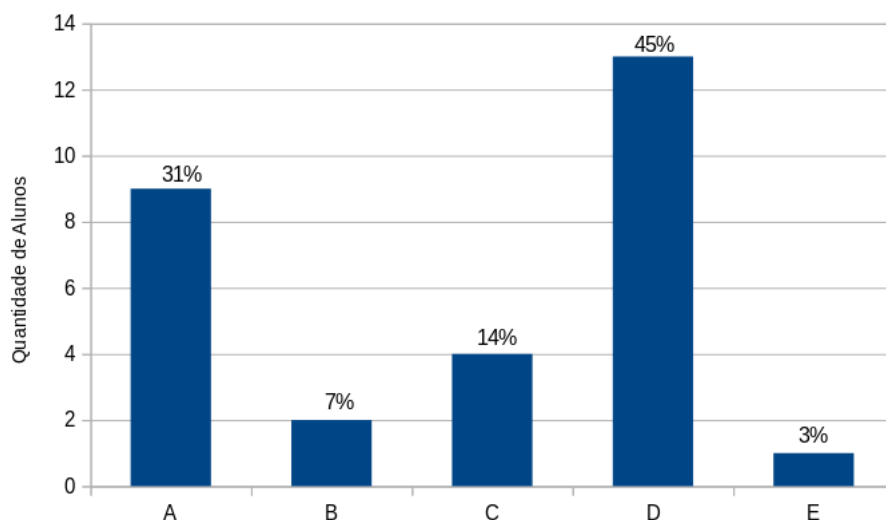


Figura 28 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pré-teste)

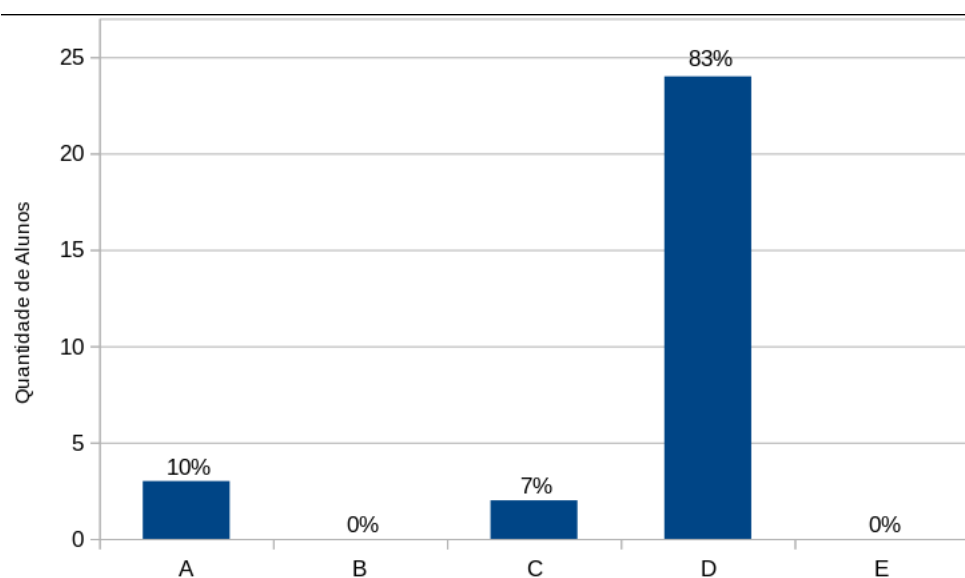


Figura 29 – Respostas dos alunos sobre modelos atômicos (pós-teste)

A nona questão continha múltiplas escolhas sobre características do modelo atômico de Bohr. Especificamente, referia-se à energia do elétron neste modelo. A resposta esperada seria aquela da letra “d” (ver apêndice A). As respostas dos alunos foram agrupadas nos gráficos 30 (dados para o pré-teste) e 31 (dados para o pós-teste). Identificamos, no pré-teste, que 10 alunos (34%) acertaram a questão. Para o pós-teste (ver gráfico 31), 25 alunos (86%) marcaram a alternativa correta. Também aqui identifica-se a compreensão dos alunos quanto ao estudo do modelo atômico de Bohr. Nossa estratégia consistiu em apresentar e discutir os postulados nos quais o modelo se baseia e, posteriormente, os alunos iniciaram as simulações computacionais que permitiam visualizar as transições (saltos quânticos) e as demais previsões deste modelo. Ao final das atividades abordou-se situações nas quais o modelo atômico de Bohr poderia fornecer interpretação de fenômenos

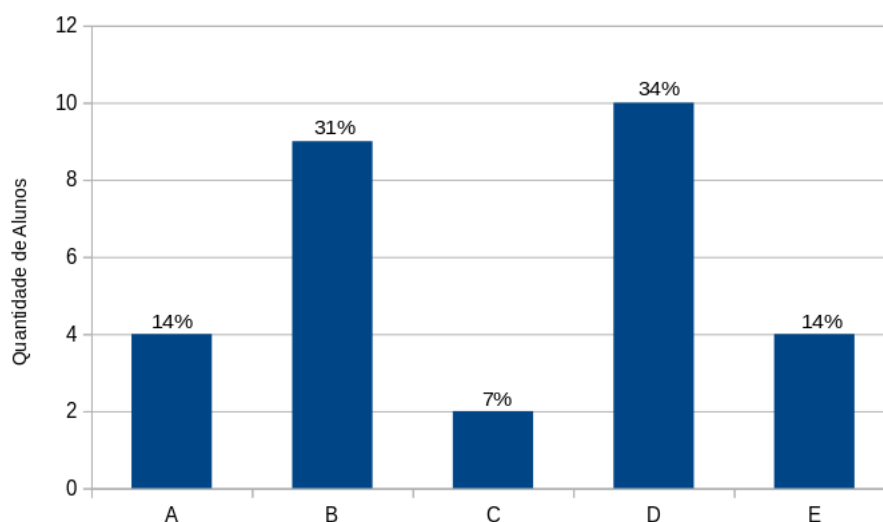


Figura 30 – Respostas dos alunos sobre o modelo atômico de Bohr (pré-teste)

físicos observados. Um exemplo foi a descrição das transições eletrônicas responsáveis pelas diversas cores liberadas na queima de fogos de artifícios.

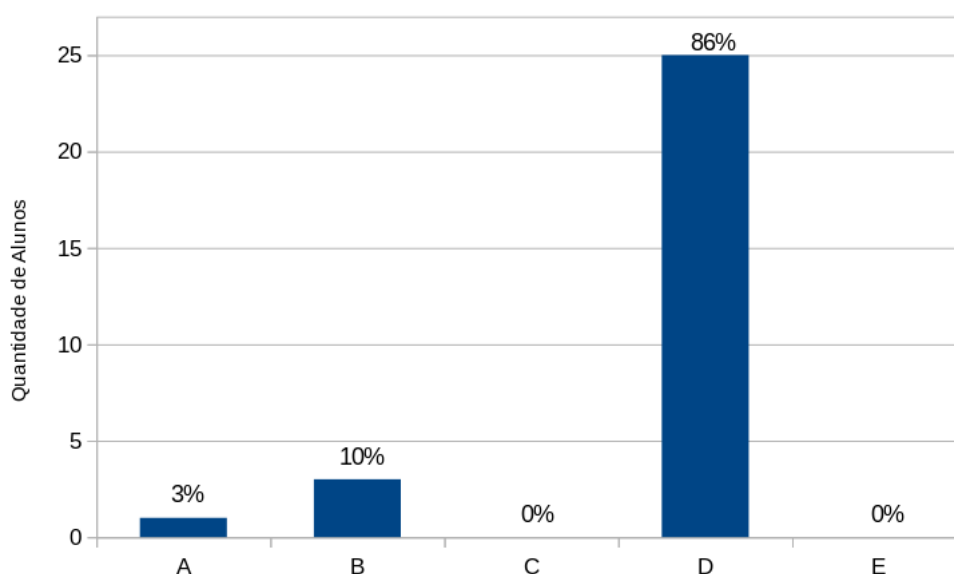


Figura 31 – Respostas dos alunos sobre o modelo atômico de Bohr (pós-teste)

Ao serem questionados sobre quais partículas o átomo era composto e onde elas se localizavam, tema da décima questão, a maioria dos alunos mostraram ter conhecimento razoável já no pré-teste, conforme evidenciado no gráfico 32. Mas, conforme já comentamos anteriormente, os modelos atômicos são estudado na disciplina de Química, isto fez com que apenas 6 alunos não soubessem responder ou respondessem de forma incorreta à questão. No pós-teste, a quantidade de alunos que não souberam responder ou responderam errado diminuiu para apenas 3 (ver gráfico 33). Comparando os gráficos 32 e 33, fica evidente a significativa melhora no padrão de respostas obtidos que consideramos ser um indicativo

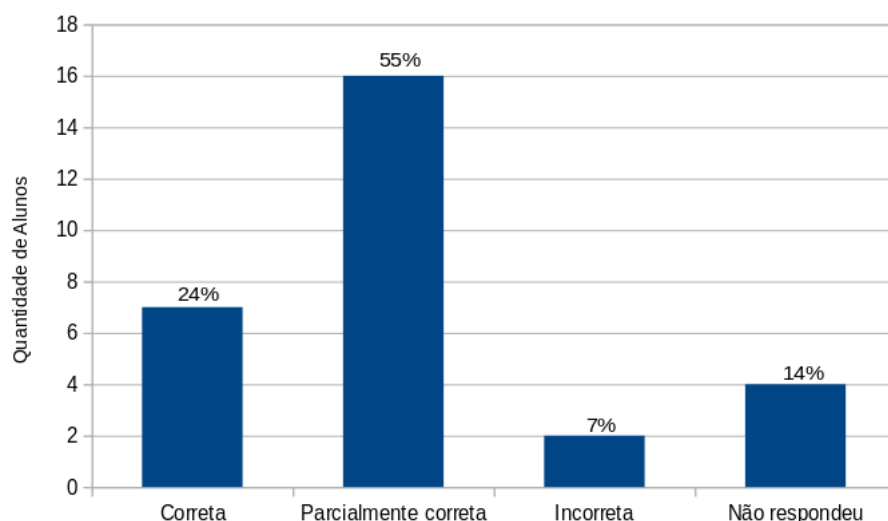


Figura 32 – Questionamento sobre quais partículas compõem o átomo (pré-teste)

claro da eficiência da metodologia empregada por nós. Conseguimos obter no pós-teste 18 respostas corretas, contrastando com apenas 7 acertos no pré-teste.

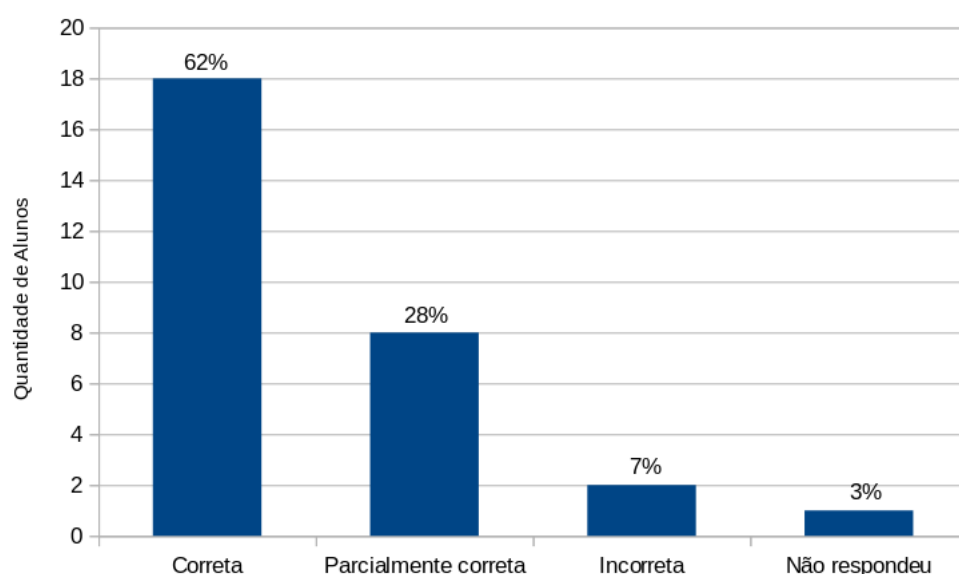


Figura 33 – Questionamento sobre quais partículas compõem o átomo (pós-teste)

Na questão onze, apresentou-se uma lista com seis aparelhos tecnológicos e o aluno poderia marcar as opções “considero importante para o dia a dia” e “sei como funciona”. Compilamos os resultados do pré-teste no gráfico 34. A TV Led foi considerada importante para 97% dos estudantes e as porcentagens para Touch Screen e Lasers foram de, respectivamente, 69% e 21%. A porcentagem de importância para o cotidiano atribuída aos lasers é menor que aquelas atribuídas para as portas eletrônicas, sensores e computador quântico. Evidenciamos no pré-teste que poucos alunos conseguem explicar o funcionamento dos aparelhos tecnológicos. Isso vai de encontro ao que relatamos na

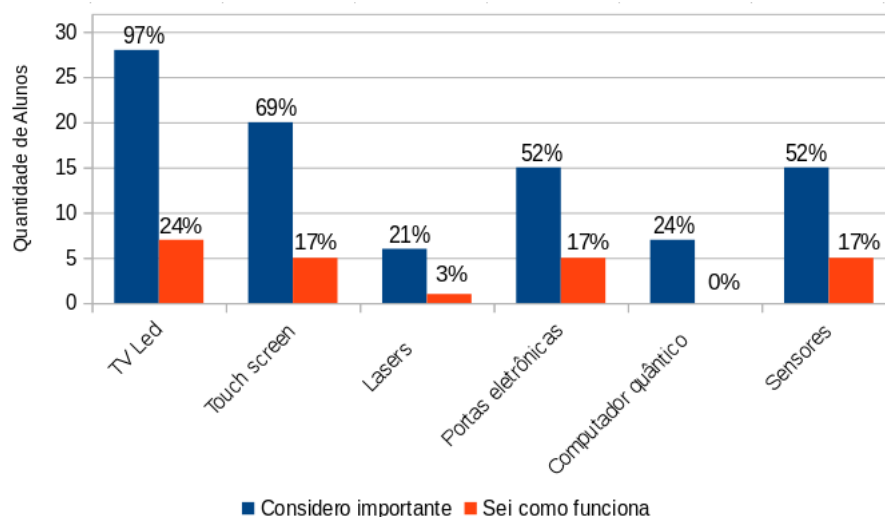


Figura 34 – Aparelhos que os alunos consideram importantes e sabem como funcionam (pré-teste)

revisão bibliográfica sobre a física no ensino médio não acompanhar o progresso científico e estar cada vez mais distante das necessidades dos estudantes no que diz respeito ao estudo de aplicações tecnológicas (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007). Considerando este

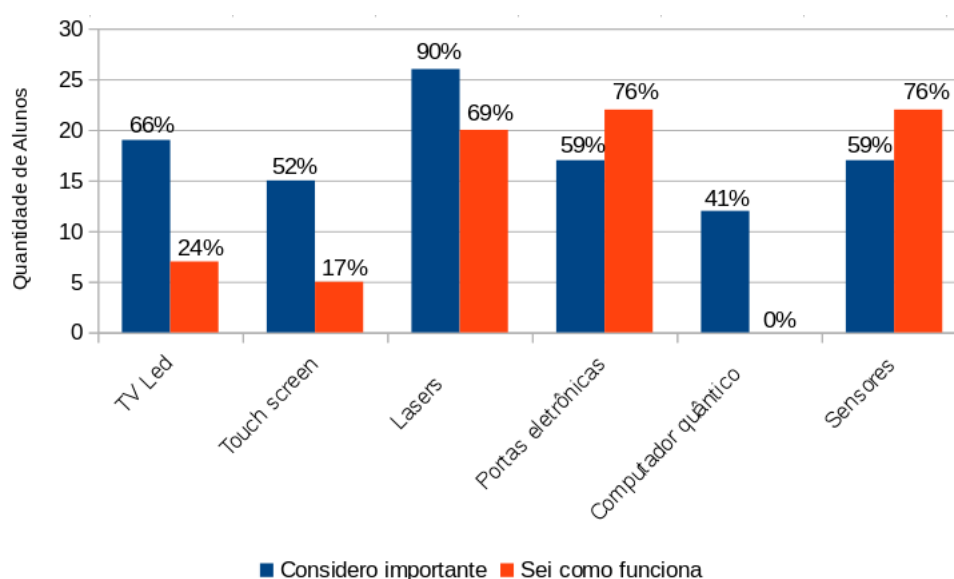


Figura 35 – Aparelhos que os alunos consideram importantes e sabem como funcionam (pós-teste)

cenário, no decorrer das nossas aulas apresentamos algumas aplicações tecnológicas que tinham relação com os tópicos de Física Quântica abordados. Por exemplo, as portas eletrônicas e sensores foram discutidos na aula sobre o efeito fotoelétrico enquanto a discussão sobre o funcionamento de lasers e suas aplicações (principalmente na medicina) foram fundamentos explorados após o estudo do modelo atômico da mecânica quântica. Dedicamos um capítulo do produto educacional ao estudo dos fundamentos do laser.

No pós-teste, o laser foi considerado importante por aproximadamente 90% da turma. Mas, o resultado mais importante quando comparamos os gráficos 34 e 35 é o aumento considerável da porcentagem de estudantes que marcaram a opção “sei como funciona” para lasers, portas eletrônicas e sensores, temas abordados nas aulas com auxílio de simulações computacionais.

Na última questão do teste, a décima segunda, foi solicitado aos alunos que listassem tecnologias que eles gostariam de entender o funcionamento. Nos gráficos 36 e 37, agrupamos as tecnologias / dispositivos citados pelos alunos, assim como a quantidade de vezes que ocorreu a citação para o pré-teste e o pós-teste. Os estudantes estão cercados

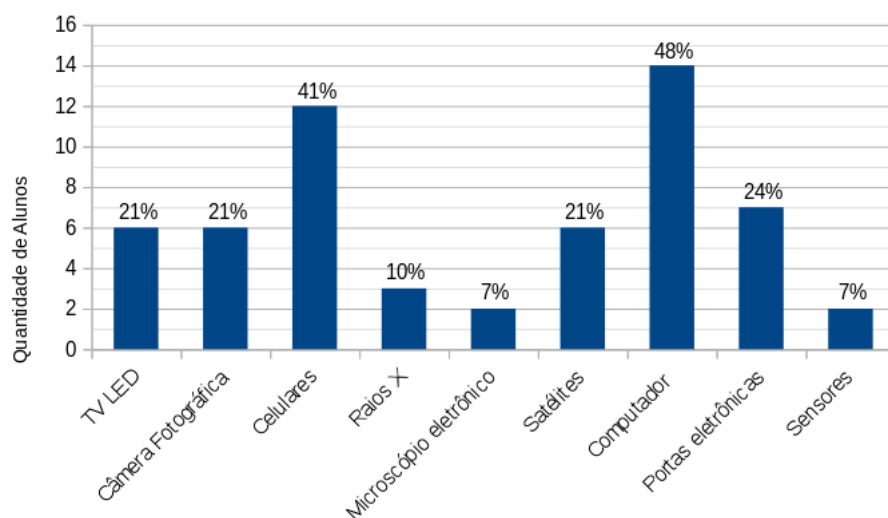


Figura 36 – Aparelhos que os alunos gostariam de saber como funcionam (pré-teste)

de aparelhos tecnológicos que envolvem diversos conceitos científicos que deveriam ser abordados nas aulas de Física. Os dados que compilamos na última questão (ver gráficos 36 e 37) mostram que muitos estudantes gostariam de entender os princípios de funcionamento destes aparelhos, porém, estes conceitos não são discutidos na Física ensinada na maioria das escolas brasileiras. É lamentável tal constatação porque as aplicações tecnológicas estão presentes no cotidiano do aluno. Não faz sentido ensinarmos uma Física apenas através de memorização e repetição de cálculos matemáticos sem conexão com a realidade dos estudantes. É necessário e urgente que a conexão da sala de aula com a realidade se estabeleça porque senão os jovens concluintes do ensino médio não adquirirão a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem.

5.2 Segundo Questionário

Esta seção é dedicada à descrição de testes aplicados após o término da série de 11 aulas com nosso produto educacional. Teve-se como objetivo analisar a aprendizagem e por isso foram elaboradas questões com nível de complexidade superior ao questionário aplicado

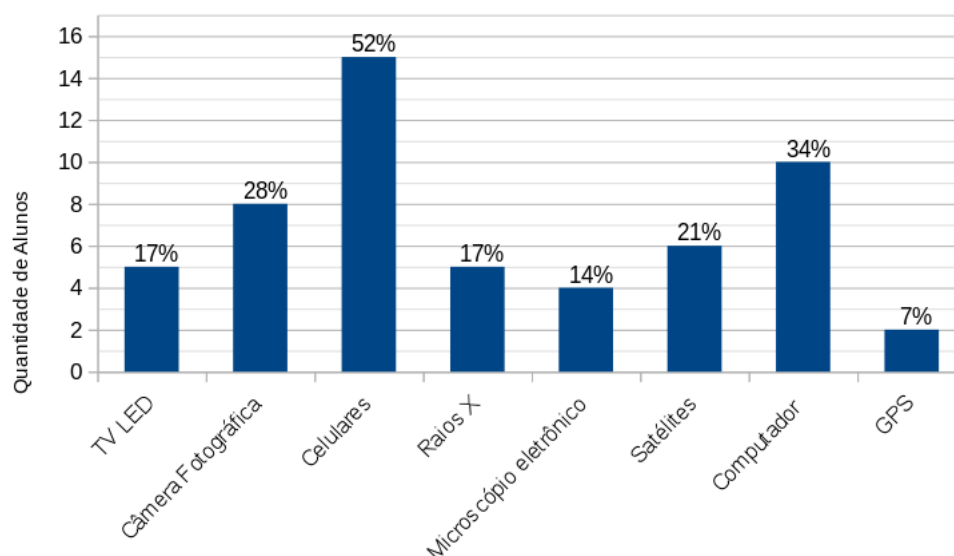


Figura 37 – Aparelhos que os alunos gostariam de saber como funcionam (pós-teste)

no pré e pós-teste. Incluiu-se ainda algumas questões para avaliação das aulas ministradas e o estudante teve a oportunidade de expressar opiniões sobre o uso de diferentes recursos didáticos durante as aulas e sobre a relevância que ele atribuiria aos tópicos abordados em nossa sequência didática. Todas as 15 questões estão listadas no apêndice C, mas também foram reproduzidas aqui para facilitar as discussões.

As 3 primeiras questões tinham como tema o efeito fotoelétrico.

Questão 1: (ALVARENGA, 2008) O Efeito Fotoelétrico trouxe a tona o caráter corpuscular da luz, bem como uma série de aplicações tecnológicas usadas no nosso dia a dia. Este efeito consiste em:

- (A) Elétrons são arrancados de certas superfícies metálicas quando há incidência de luz, de determinada frequência, sobre elas.
- (B) Elétrons são absorvidos do ar e inseridos numa placa metálica quando há incidência de luz sobre elas.
- (C) Prótons são arrancados pela luz incidente numa placa metálica.
- (D) Fótons são espalhados ao colidirem com elétrons do material no qual se incide luz de determinada frequência.

Esperávamos que os alunos entendessem que neste fenômeno físico era evidente o caráter corpuscular da luz. Apenas a alternativa “A” está correta e, aproximadamente, 86% dos alunos (ver gráfico 38) acertaram a questão.

Questão 2: (ALVARENGA, 2008) Incide-se luz num material fotoelétrico e não se observa emissão de elétrons. Para que haja a emissão de elétrons do material devemos aumentar:

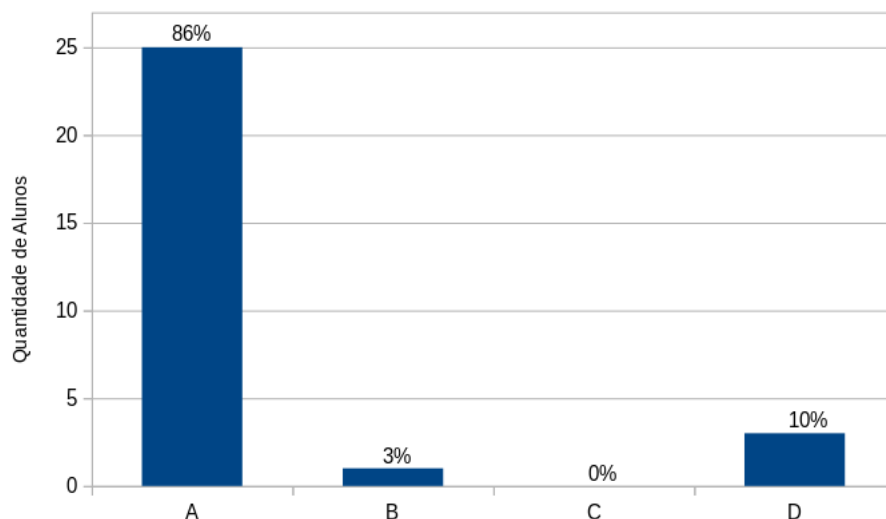


Figura 38 – Questão sobre a natureza corpuscular da luz no efeito fotoelétrico.

- (A) a intensidade da luz.
- (B) a frequência da luz.
- (C) o comprimento de onda da luz.
- (D) a amplitude da luz.

Com esta questão, sondamos sobre o entendimento do conceito de *frequência mínima ou frequência de corte* e sobre a energia dos fótons incidentes. A alternativa “B” é a correta e, como podemos ver no gráfico 39, o índice de acerto foi de 76%.

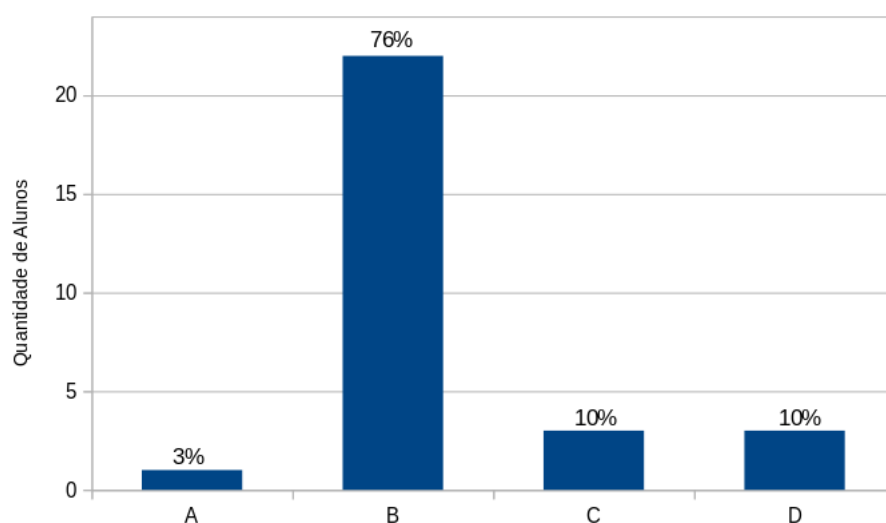


Figura 39 – Questão sobre a emissão de elétrons no efeito fotoelétrico.

Questão 3: (ALVARENGA, 2008) Qual é a condição básica para que haja a emissão de fotoelétrons por um determinado metal?

- (A) A luz incidente tenha uma frequência maior que um determinado valor limite.
- (B) A luz incidente tenha uma frequência menor que um determinado valor limite.
- (C) A luz incidente tenha um comprimento de onda superior a um determinado valor limite.
- (D) A luz incidente tenha intensidade superior a um determinado valor limite.

A terceira questão explorava o mesmo conteúdo da segunda. A alternativa correta, “A”, foi identificada por 79% dos estudantes, comprovando mais uma vez a compreensão desse tópico pela maioria dos alunos.

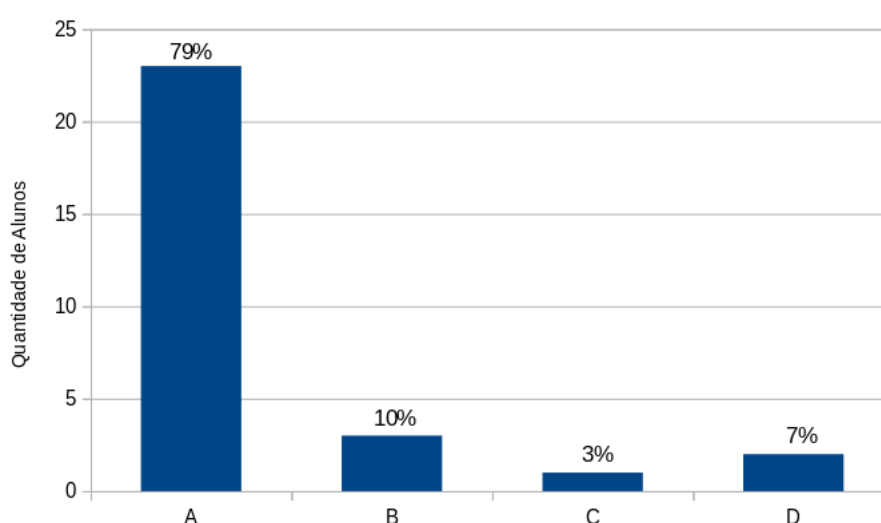


Figura 40 – Questão sobre a emissão de elétrons no efeito fotoelétrico.

Considerando que as ideias pioneiras utilizada por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico tinham suas raízes na admissão, por Planck, que a energia fosse *quantizada* para explicar o comportamento de corpos aquecidos, a quarta questão foi dedicada à hipótese da existência do que foi denominado de *quantum*.

Questão 4: (ALVARENGA, 2008) No ano de 1900, o físico alemão Max Planck deu a conhecer sua interpretação sobre a natureza da radiação emitida por um corpo aquecido, interpretação esta que causou uma verdadeira revolução na Física. Cinco anos mais tarde, outro físico alemão, Albert Einstein, utiliza a mesma ideia de Planck para interpretar o Efeito Fotoelétrico. Tal ideia, hoje amplamente conhecida, baseia-se na:

- (A) conservação da Energia.
- (B) quantização da Energia.
- (C) conversão da Energia.

(D) propagação da Energia.

Parcela significativa da turma (quase 35%) confundiu quantização de energia com conservação de energia. Uma hipótese plausível para esta confusão seja a quantidade de vezes em que trabalhamos a conservação de energia na Física Clássica. Apenas 41% dos estudantes reconheceu “quantização da energia” (alternativa “B”) como a sendo a proposta de Planck (ver gráfico 41).

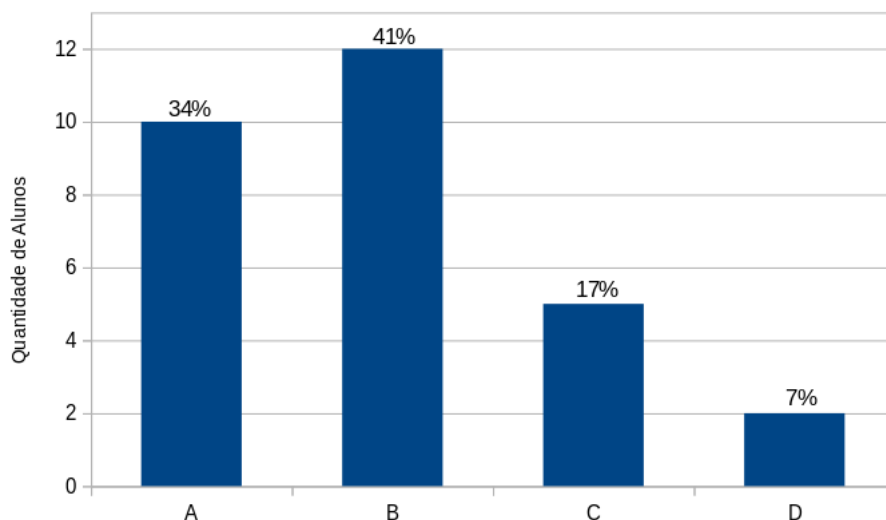


Figura 41 – Questão sobre a quantização da Energia.

Durante a aplicação do produto educacional, discutimos os fundamentos teóricos para o experimento da dupla fenda proposto por Young e os fenômenos típicos de comportamento ondulatório para a luz, tais como a difração e a interferência. Como explicitado anteriormente, o comportamento corpuscular da luz também foi explorado por meio do efeito fotoelétrico. O conceito de comportamento dual foi introduzido e as questões 5, 6, 7 e 8 foram concebidas para averiguar o entendimento dos estudantes sobre a dualidade.

Questão 5: (ALVARENGA, 2008) Qual é a natureza da luz, segundo a Mecânica Quântica?

- (A) natureza corpuscular.
- (B) natureza ondulatória.
- (C) natureza “dual”, ou seja, apresenta ambos os comportamentos, ondulatório e corpuscular.
- (D) natureza “dual”, ou seja, não é onda nem partícula.

Aproximadamente 79% dos alunos (ver gráfico 42) identificaram a alternativa correta (“C”).

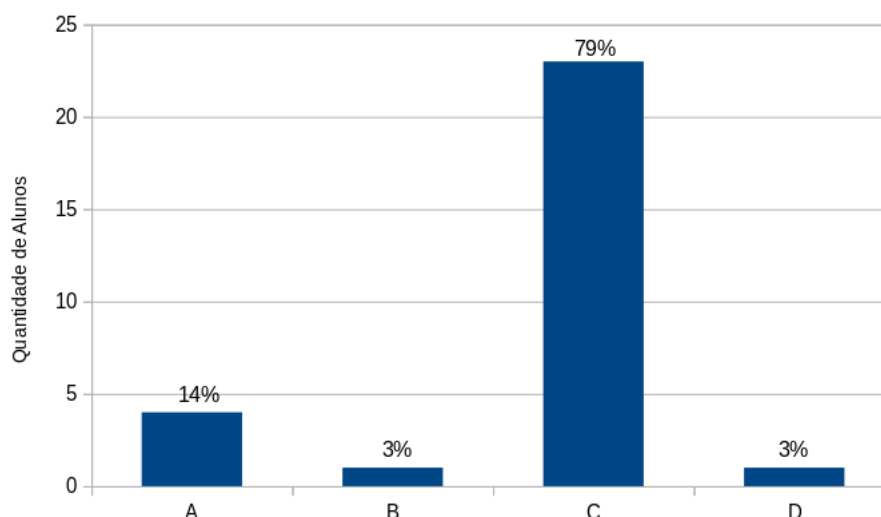


Figura 42 – Questão sobre a natureza dual da luz.

Na tentativa de sondar se a resposta para a questão 5 de fato demonstrava o entendimento da natureza dual e sua importância na Quântica, os estudantes deveriam responder à seguinte pergunta:

Questão 6: (ALVARENGA, 2008) Os fenômenos físicos difração e interferência podem ocorrer com:

- (A) ondas.
- (B) partículas.
- (C) ondas e partículas.
- (D) não ocorrem nem com ondas e nem com partículas.

Apenas 41% dos alunos identificaram corretamente que os fenômenos físicos de *difração* e de *interferência* eram fenômenos típicos de comportamento ondulatório, não podendo ocorrer com partículas. Na aula sobre dupla fenda procuramos enfatizar a natureza ondulatória das partículas quânticas e deixamos claro que a natureza apresentava comportamento dual. Parece-nos agora que este ponto não foi muito bem entendido por muitos estudantes porque, aproximadamente, 52% deles não foram capazes de identificar a resposta correta e atribuíram estes fenômenos tanto a ondas como partículas. Certamente foi decepcionante e evidencia necessidade de outras atividades complementares àquelas já propostas durante as aulas.

Questão 7: (ALVARENGA, 2008) A figura 44 mostra uma fenda dupla com aberturas de mesma dimensão e, logo atrás, um filme sensível a luz. Incidindo-se luz (fótons) de

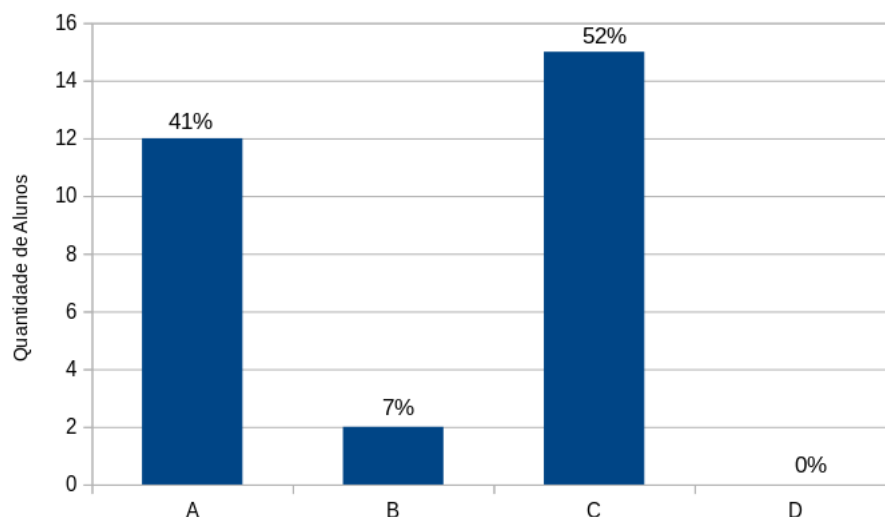


Figura 43 – Questão sobre difração e interferência.

determinada frequência e, passando pelas fendas, o que se observará, depois de certo tempo, registrado no filme?

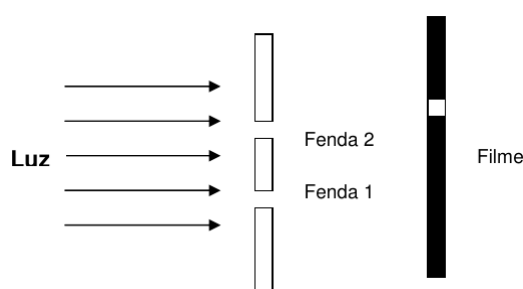


Figura 44 – Dupla Fenda

- (A) um padrão de interferência com regiões claras e escuras.
- (B) um borrão claro no filme.
- (C) pontos escuros e claros sem padrão de interferência.
- (D) não se observa nada no filme.

A porcentagem de estudantes que responderam corretamente a esta questão pode ser averiguada no gráfico 45 e a alternativa correta, “A”, foi identificada por quase 60% da turma. Apesar de grande parcela dos alunos terem demonstrado um entendimento incorreto do conceito de dualidade, eles não têm dificuldade para associar corretamente a luz com fenômenos ondulatórios. Estes dados corroboram com a hipótese de que ainda não se teve uma compreensão clara de que os físicos estavam parcialmente corretos quando acreditavam que poderiam separar entidades em classes distintas e rotulá-las por “onda”

e “partícula”. É necessário que mais atividades sejam propostas para que estas sutilezas possam ser assimiladas corretamente.

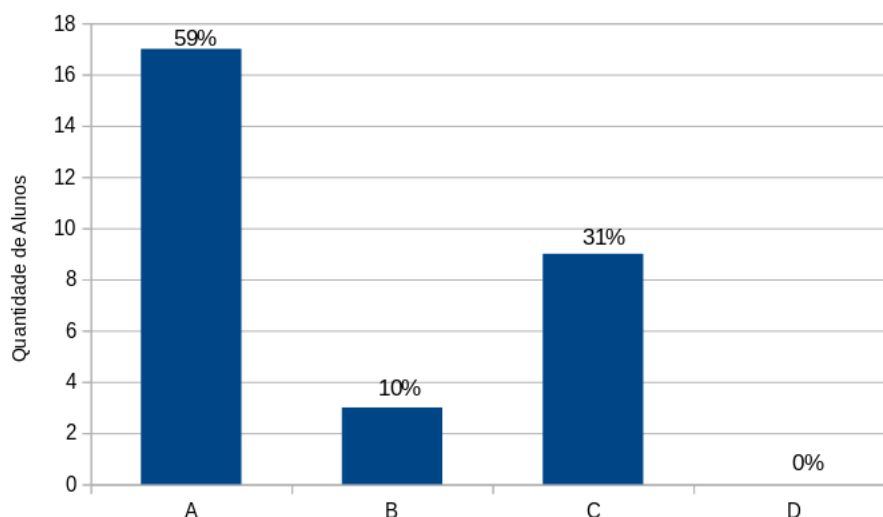


Figura 45 – Questão sobre dupla fenda para fótons.

Questão 8: (ALVARENGA, 2008) Caso realizássemos a Experiência da Fenda Dupla com um feixe de elétrons, o que seria observado no filme, sendo este sensível ao impacto de elétrons?

- (A) seriam observados duas manchas sobre o filme, pois os elétrons se propagam em linha reta.
- (B) não observaríamos nenhum padrão de interferência.
- (C) seria observado um padrão de interferência com zonas claras (sensibilizadas pelos elétrons) e zonas escuras.
- (D) não se observa nada no filme.

Para responder a esta questão, os estudantes deveriam se lembrar das atividades com o simulador computacional no qual o padrão de interferência com regiões claras e escuras podia ser obtido para elétrons. Aproximadamente 79% dos alunos acertaram a questão marcando a alternativa “C”, conforme pode ser visto no gráfico 46. Novamente obtivemos dados que corroboram nossa hipótese de que é necessário trabalhar as sutilezas do conceito de dualidade. A quantidade de acertos nesta questão evidenciam que apesar de ignorarem que interferência e difração são comportamentos exclusivos de ondas, eles conseguem identificar corretamente que partículas podem, em determinadas circunstâncias, exibirem comportamento ondulatório. Ou, em outras palavras, falta ainda a compreensão de que

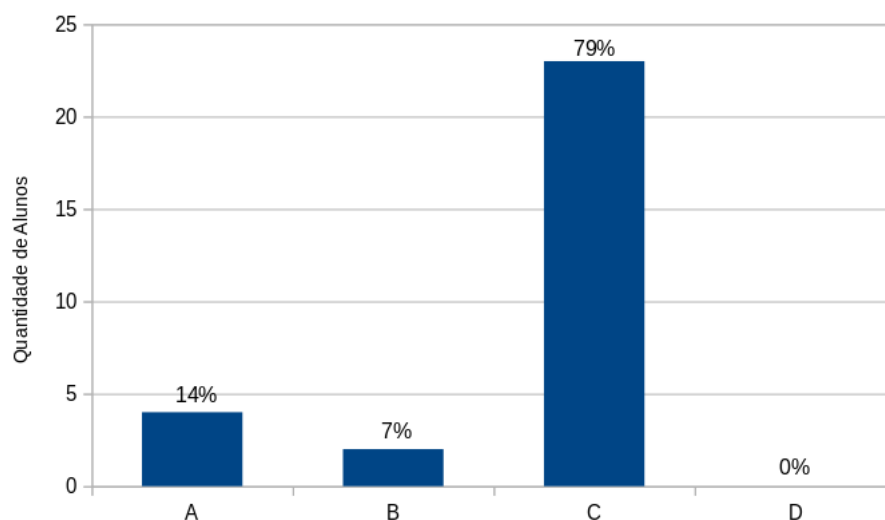


Figura 46 – Questão sobre dupla fenda para feixe de elétrons.

os objetos quânticos que normalmente classificávamos como partículas podem ter um comportamento ondulatório.

Também se discutiu durante as aulas outro conceito fundamental, o Princípio da Incerteza, e a nona questão o tinha como tema. Para identificarem a resposta correta, os estudantes deveriam ter entendimento das relações de incerteza entre grandezas conjugadas e também de que é um fato que experimentos que evidenciam o caráter ondulatório de um objeto quântico não evidenciarão o caráter corpuscular.

Questão 9: (ALVARENGA, 2008) O Princípio da Incerteza é um dos alicerces da Mecânica Quântica. Segundo este Princípio:

- (A) nada é incerto na natureza.
- (B) é impossível medir simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula.
- (C) é possível medir qualquer grandeza física relacionada a uma partícula.
- (D) é impossível fazer qualquer medida de uma partícula.

A alternativa “B” era a resposta correta e foi identificada por, aproximadamente, 62% dos alunos. Pouco mais de 35% da turma (soma das porcentagens de estudantes que marcaram as alternativas “A” e “C”) ainda mantêm uma visão clássica da descrição de fenômenos.

A décima questão, última questão teórica, referia-se aos modelos atômicos, especificamente modelo atômico semi-clássico proposto por Bohr cujos 4 postulados fundamentais e as características foram discutidas e objeto de simulações durante as aulas.

Questão 10: (CEFET -PR) Um dos grandes mistérios que a natureza propiciava à

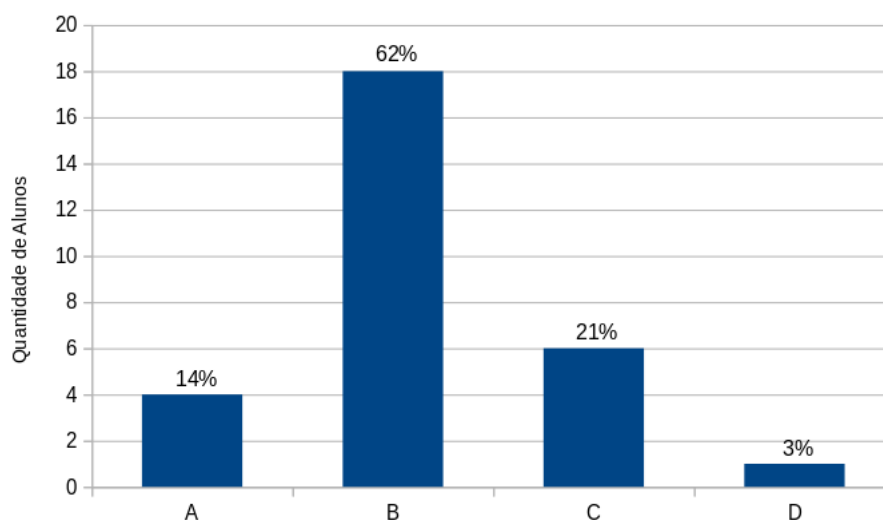


Figura 47 – Questão sobre o princípio da incerteza.

espécie humana era a luz. Durante dezenas de milhares de anos a nossa espécie só pôde contar com este ente misterioso por meio de fogueiras, queima de óleo em lamparinas, gordura animal, algumas resinas vegetais etc. Somente a partir da revolução industrial é que se pôde contar com produtos como querosene, terebintina e outras substâncias. Mas, mesmo assim, a natureza da luz permanecia um grande mistério, ou seja, qual fenômeno físico ou químico gera luz. Somente a partir das primeiras décadas do século XX é que Niels Bohr propôs uma explicação razoável sobre a emissão luminosa. Com base no texto, qual alternativa expõe o postulado de Bohr que esclarece a emissão luminosa?

- (A) Os elétrons movem-se em níveis bem definidos de energia, que são denominados níveis estacionários.
- (B) Ao receber uma quantidade bem definida de energia, um elétron “salta” de um nível mais externo para um nível mais interno.
- (C) Um elétron que ocupa um nível mais externo “pula” para um nível mais interno, liberando uma quantidade bem definida de energia.
- (D) Quanto mais próximo do núcleo estiver um elétron, mais energia ele pode emitir na forma de luz; quanto mais distante do núcleo estiver um elétron, menos energia ele pode emitir.

Para responder à questão proposta, estudantes deveriam ter em mente as discussões sobre “salto quântico” e níveis de energia quantizados. Neste contexto, a alternativa “C” está correta e foi identificada por 59% dos alunos, como mostrado no gráfico 48. Não obtivemos porcentagem expressiva de acertos porque possivelmente houve algum erro de interpretação. Dentre as alternativas possíveis, algumas continham afirmações corretas sobre o modelo de

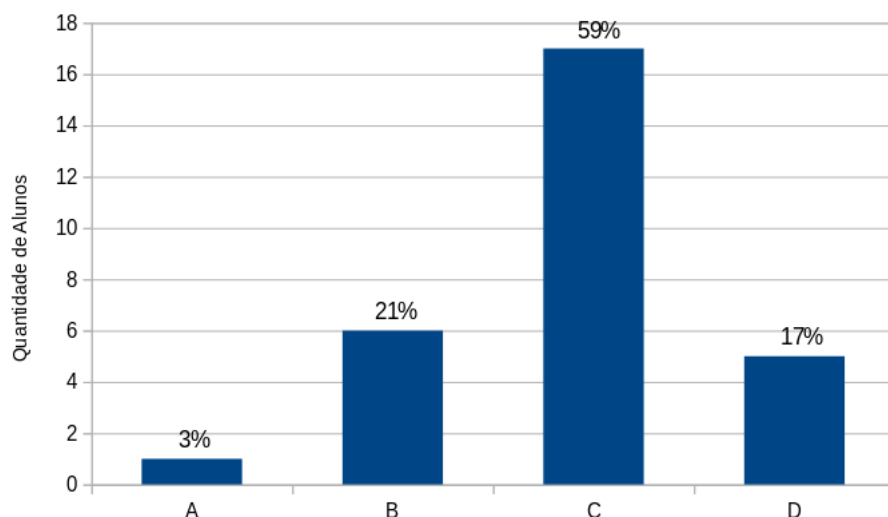


Figura 48 – Questão sobre o modelo atômico de Bohr.

Bohr, porém, o estudante deveria atentar-se ao fato de que a pergunta era especificamente sobre a emissão luminosa. É provável que muitos tenham marcado outras sentenças que estavam correta, mas que não respondiam à questão formulada.

As últimas 5 questões que compunham nosso instrumento avaliativo foram concebidas para fornecer aos estudantes a possibilidade de opinarem sobre a experiência desenvolvida por nós para discussão de tópicos de Mecânica Quântica.

Questão 11: Você acha que o uso de recursos computacionais (como simulação) contribui para sua aprendizagem?

(A) sim.

(B) não.

(C) não sei responder

Esta questão refere-se especificamente aos recursos utilizado durante as aulas para aplicação do produto, principalmente às simulações computacionais. Baseados nas respostas obtidas (ver gráfico 49), nota-se que todos os alunos concordaram que os recursos utilizados contribuem positivamente para a aprendizagem. Para nós fica claro a importância de materiais como o nosso produto educacional e corrobora as afirmações de [Medeiros e Medeiros \(2002\)](#) sobre as modelagens computacionais serem úteis e importantes no ensino de Física. Atualmente, considerando-se a existência de diversos simuladores, a maioria gratuita e acessível na internet, esta estratégia deveria ser amplamente utilizada.

Questão 12: Você acha importante estudar Física Quântica no Ensino Médio?

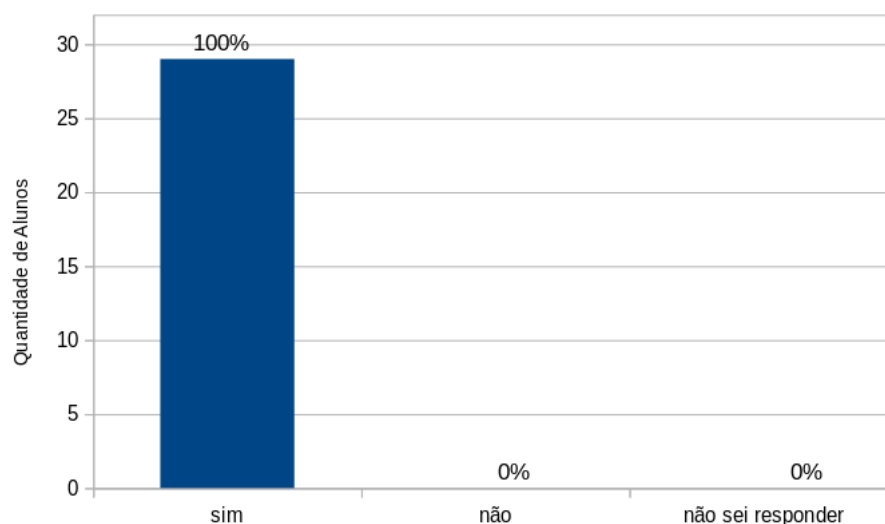


Figura 49 – Questão sobre o uso de recursos computacionais.

(A) Sim

(B) Não

Normalmente, a Física não é uma disciplina “querida” dos alunos. Uma das causas dessa repulsa, em muitos casos, está relacionada à forma de abordagem dos conteúdos no nível médio (com muito formalismo matemático e poucas associações com tecnologias). Nota-se pelos dados apresentados no gráfico 50 que após a aplicação do produto educacional todos os alunos reconheceram que é importante o estudo da Física Quântica no ensino médio.

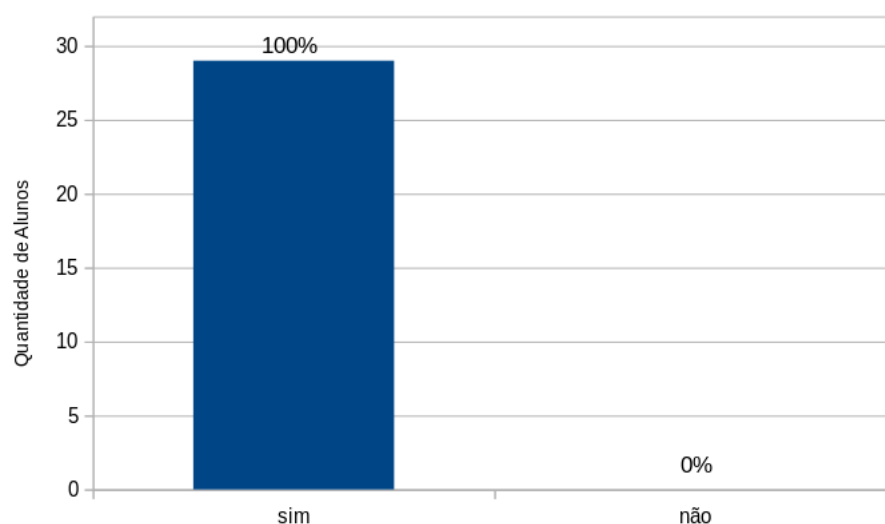


Figura 50 – Questão sobre a importância de estudar Física Quântica no Ensino Médio.

Estávamos interessados em saber o motivo de atribuir importância a esta sub-área e a questão 13 foi concebida como um complemento à questão anterior.

Questão 13: Porque você acha importante estudar Física Quântica no Ensino Médio? Alguns estudantes não responderam a esta questão, mas entre as respostas algumas interessantes foram listadas:

- *“Porque ela faz parte do nosso dia dia, e precisamos saber”*
- *“Alavancou a ciência Física, ou como muitos físicos costumam dizer: a Física Quântica provocou uma segunda revolução industrial”*
- *“Porque a física esta no nosso dia a dia”*
- *“Para estimular os estudantes a serem físicos e assim ajudar no desenvolvimento da Física Quântica.”*
- *“Porque é importante para meu aprendizado e poder entender os conceitos da Física Quântica.”*
- *“A física é importante pois está presente no nosso dia a dia”*
- *“Porque está associado a tecnologias”*

Na aplicação do produto utilizamos recursos tecnológicos (genericamente denominados de TIC - Tecnologia de Informação e Comunicação) tais como simulações e infográficos animados. Estas ferramentas despertaram maior interesse dos alunos quando comparávamos a participação durante as aulas tradicionais. Os estudantes interagiam mais durante as atividades envolvendo às simulações e, aparentemente, se sentem mais motivados para participar de todo o processo de aprendizagem. Na tentativa de sondá-los sobre a importância das novas ferramentas nas aulas, foram formuladas duas questões sobre este tema.

Questão 14: (MORAIS, 2015) Na sua opinião, os recursos didáticos utilizados no desenvolvimento do conteúdo de Física Quântica nas aulas de Física:

- (A) Agradaram completamente.
- (B) Agradaram mais ou menos.
- (C) Não agradaram.

Para esta questão, as respostas foram organizadas no gráfico 51 e corroboram nossas observações durante a aplicação do produto educacional. Por fim, formulamos uma última questão em formato aberto para complementar a questão 14. Propusemos que os estudantes indicassem os pontos positivos e negativos quanto à utilização dos recursos tecnológicos.

Questão 15: (MORAIS, 2015) Informe os fatores positivos e os fatores negativos da

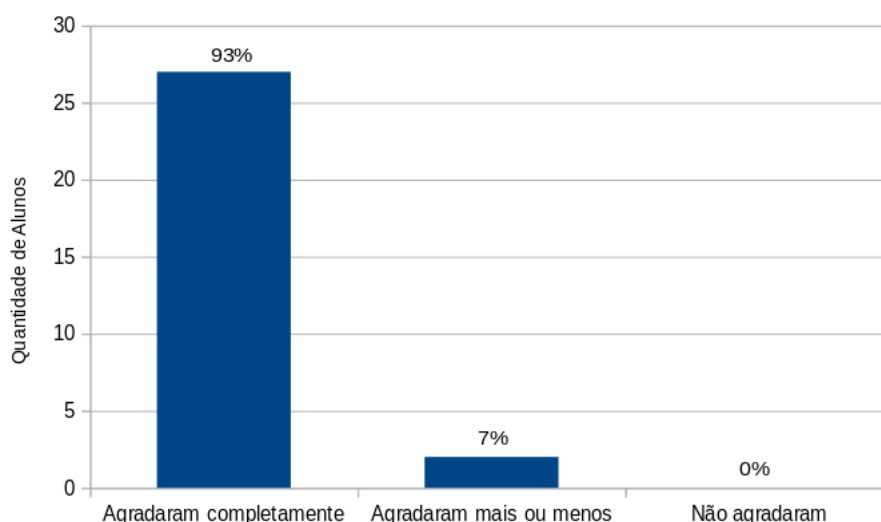


Figura 51 – Questão sobre uso de recursos didáticos.

utilização desses recursos nas aulas ministradas.

Selecionamos algumas respostas obtidas na turma:

- *“As ilustrações em slyde e os simuladores”*
- *“A utilização de slides , para entendemos de uma forma melhor como acontecia cada processo da Física Quântica, e os métodos utilizados para aula no qual o professor usou para explicar”*
- *“a aula fica mais dinâmica e interessante”*
- *“ponto positivo a facilidade de aprender com esse método. Ponto negativo a falta de recursos da escola”*
- *“A utilização de computadores e sites apropriado para o conteúdo.”*
- *“os métodos diferentes que utilizaram para aulas, isso chama atenção e o aprendizado é mais rápido e fácil. E o fator negativo foi por ter sido dado muito tarde isso prejudicou um pouco, mais de qualquer forma foi muito importante para o conhecimento de cada um.”*
- *“simulações e imagens projetas pelo data-show”*
- *“A utilização de slides, nos proporcionou entender de uma forma rápida e prática todos os modelos da Física Quântica, os métodos usados pelo professor são rápidos e fáceis para compreensão de todos. Um ponto negativo seria eu ter começado estudar a Física Quântica um pouco tarde do que se esperava, mas as aulas permitiu que eu tivesse um conhecimento geral daquilo que até então não era conhecido por mim.”*
- *“Explicação, e imagens mostrando como funciona cada coisa.”*

- *“Foi bem legal a forma que se utilizou para dar aula, então ficou bem fácil de aprender, então não tem muito o que reclamar.”*

Os resultados e depoimentos coletados nos deixaram otimistas. Se conseguimos fazê-los se divertir com as aulas sobre algo totalmente novo e durante aulas de Física, consideramos que obtivemos sucesso com a sequência didática concebida.

6 Considerações Finais

Neste trabalho, apresentamos um produto educacional por nós produzido como resultado do Mestrado Profissional em Ensino de Física. O material constitui-se de um livro contendo textos didáticos de caráter teórico e apoiado em simulações computacionais sobre conteúdos de Física Quântica. As modelagens computacionais inseridas no produto abrangem os conteúdos de forma contextualizada e com forte relação com as tecnologias cotidianas dos alunos. O produto educacional foi aplicado em uma turma do terceiro ano do ensino médio e procuramos por indícios de aprendizagem significativa dos tópicos abordados por meio do uso de questionários que foram respondidos pelos participantes antes e depois das aulas ministradas.

Conforme foi exposto na Revisão Bibliográfica, a Física necessita de uma atualização curricular, pois, infelizmente, constata-se que o que ensinamos nas escolas é, majoritariamente, voltado para um treinamento para o vestibular (MOREIRA, 2000). Acreditamos que as simulações computacionais podem contribuir para que nosso ensino passe por mudanças e que os estudantes possam se deparar com uma Física, no sentido sugerido por Moreira (2000), “não dogmática, construtivista, para a cidadania, ênfase em modelos, situações reais, elementos próximos, práticos e vivenciais do aluno, do concreto para o abstrato, atualização de conteúdos, Física Contemporânea”. Evidentemente, não se trata de substituir o laboratório físico pelas simulações e nem de investir apenas nas modelagens computacionais, mas na visão de (VEIT; TEODORO, 2002):

Trata-se de agregar uma nova tecnologia que facilita o processo de aprendizagem, que contribui para o desenvolvimento cognitivo e propicia uma melhor compreensão da ciência e da tecnologia, também pelo estudante que não prosseguirá seus estudos.

Conforme discutimos no capítulo 5, alcançamos bons resultados com a aplicação do produto educacional, pois através das análises dos dados obtidos nos questionários, foi possível concluir que os alunos desenvolveram habilidades relacionadas aos conceitos de Física Quântica contemplados nas simulações computacionais. Além do mais, os estudantes relataram, nas questões que envolviam avaliação do produto educacional, que as simulações computacionais utilizadas tornaram possível aprender de maneira mais atraente e prática os tópicos abordados. Nossa experiência evidencia que é possível a aplicação de uma sequência didática como esta no Ensino Médio. Houve indícios de aprendizagem significativa da maioria dos alunos envolvendo tópicos de Física Quântica como efeito fotoelétrico, princípio da Incerteza e modelos atômicos. Todos tópicos muito distantes daqueles discutidos nas aulas de Física Clássica, mas presente no cotidiano destes indivíduos. Portanto, a metodologia utilizada no decorrer da pesquisa, converge para as

ideias de [Medeiros e Medeiros \(2002\)](#) em que o uso de recursos computacionais promovem habilidades de resolução de problemas, potencializa uma compreensão mais profunda dos fenômenos físicos e contribui de modo que os estudantes possam concentrar-se nos conceitos envolvidos nos experimentos.

Ressaltamos ainda que o produto educacional viabiliza elaboração de metodologias alternativas com ênfase no estudo da Física Quântica, pois conteúdos relacionados à Física Contemporânea praticamente não são explorados no ensino médio e, quando são, geralmente, é apenas como mera curiosidade. [Pinto e Zanetic \(1999\)](#) ressaltam que é necessário que o ensino contemple a Física Quântica, pois esta consegue explicar fenômenos que a Física Clássica não explica, propiciando uma nova visão de mundo e tornando cada vez mais básica para a sociedade contemporânea. Os mesmos autores destacam várias dificuldades que são enfrentadas na introdução da Física Quântica no ensino médio: do formalismo matemático para descrever a mecânica quântica; as novidades conceituais que distanciam a Física Quântica da Física Clássica e do senso comum; e as dificuldades experimentais relativas aos experimentos com temas quânticos ([PINTO; ZANETIC, 1999](#)). Sendo assim, é necessário buscar formas alternativas de metodologias para inserir tópicos da Física Quântica neste nível de ensino. Nesse sentido, acreditamos que o nosso produto educacional possa desempenhar um papel relevante no atual contexto do ensino, visto que com sua aplicação foi capaz de proporcionar um aprendizado eficiente e agradável de conteúdos que geralmente são excluídos do ensino médio.

Referências

- ALVARENGA, L. L. *Introdução à física moderna no ensino médio através da discussão do dualismo onda-partícula*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física, Porto Alegre, 2008. Citado 11 vezes nas páginas 26, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 195, 196 e 197.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Psicologia educacional*. [S.l.]: Interamericana, 1980. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 38.
- AUSUBEL, D. P. et al. *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. [S.l.]: Trillas México, 1983. v. 2. Citado na página 36.
- BEATRIZ, A. M. A. *Curso de Física*. [S.l.]: São Paulo: Saraiva, 2010. v. 1,2. Citado na página 19.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 18, n. 3, p. 298–316, 2001. Citado na página 25.
- CÓRDOVA, R. S. et al. Simulación computacional de experiencias de física moderna. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 9, n. 2, p. 147–151, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. 22. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics*. [S.l.]: Basic books, 2013. v. 3. Citado na página 50.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics*. [S.l.]: Basic books, 2013. v. 1. Citado na página 52.
- FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. Física no computador: o computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das ciências físicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 25, n. 3, p. 259–272, 2003. Citado na página 26.
- GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. et al. O experimento de stern-gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 33, n. 2, p. 1–11, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 57.
- GREF, G. d. R. d. E. d. F. I. d. F. d. U. *Física 2: Física Térmica; Óptica*. [S.l.: s.n.], 1996. Citado na página 27.
- GUALTER; NEWTON; HELOU. *Física*. [S.l.]: São Paulo: Saraiva, 2010. v. 1,2. Citado na página 19.
- GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. *Física*. [S.l.]: São Paulo: Ática, 2010. v. 1,2. Citado na página 19.

- HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Ciclos de modelagem: uma proposta para integrar atividades baseadas em simulações computacionais e atividades experimentais no ensino de física. *Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 29, nesp 2 (out. 2012), p. 965-1007*, 2012. Citado na página [25](#).
- MACHADO, D. I.; NARDI, R. Construção e validação de um sistema hipermídia para o ensino de física moderna. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 6, n. 1, p. 90–116, 2007. Citado 2 vezes nas páginas [22](#) e [60](#).
- MCKAGAN, S. et al. Developing and researching phet simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, AAPT, v. 76, n. 4, p. 406–417, 2008. Citado na página [48](#).
- MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. d. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 24, n. 2, p. 77–86, 2002. Citado 5 vezes nas páginas [24](#), [25](#), [26](#), [82](#) e [88](#).
- MORAIS, L. C. S. *O Ensino de Conceitos de Física Quântica no Ensino Médio Utilizando Experimentos de Baixo Custo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Citado 4 vezes nas páginas [19](#), [24](#), [84](#) e [198](#).
- MOREIRA, M. *O que é afinal Aprendizagem Significativa? Currículum, La Laguna, Espanha, 2012*. 2013. Citado na página [38](#).
- MOREIRA, M. A. Mapas conceituais e aprendizagem significativa1 (concept maps and meaningful learning). *Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas ve unidades de ensino potencialmente significativas1*, p. 41, 1982. Citado 2 vezes nas páginas [36](#) e [37](#).
- MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. [S.l.]: Editora pedagógica e universitária São Paulo, 1999. Citado 4 vezes nas páginas [35](#), [36](#), [37](#) e [40](#).
- MOREIRA, M. A. Ensino de física no brasil: retrospectiva e perspectivas. *Revista brasileira de ensino de física. São Paulo. Vol. 22, n. 1 (mar. 2000), p. 94-99*, 2000. Citado na página [87](#).
- MOREIRA, M. A. Quark physics and epistemology. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 29, n. 2, p. 161–173, 2007. Citado 2 vezes nas páginas [22](#) e [60](#).
- MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas v e unidades de ensino potencialmente significativas, material de apoio para o curso aprendizagem significativa no ensino superior: teorias e estratégias facilitadoras. *Pontifícia Univerddidade Católica do Paraná*, 2013. Citado 3 vezes nas páginas [36](#), [38](#) e [39](#).
- MOREIRA, M. A.; SOUSA, C. M. de; SILVEIRA, F. L. da. Organizadores prévios como estratégia para facilitar a aprendizagem significativa. *Cadernos de pesquisa*, n. 40, p. 41–53, 2013. Citado na página [39](#).
- OLIVEIRA, F. F. de; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 29, n. 3, p. 447–454, 2007. Citado 3 vezes nas páginas [19](#), [21](#) e [71](#).

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. Vol. 5, n. 1 (jan./abr. 2000), p. 23-48*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo desta problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. *Caderno catarinense de ensino de física. Florianópolis. Vol. 18, n. 2 (ago. 2001), p. 135-151*, 2001. Citado na página 19.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. d. S. F. Conceitos de física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, p. 9-35, 2005. Citado na página 23.

PCN, E. M. *Parâmetros Curriculares Nacionais—Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. [S.l.]: Física, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 27 e 47.

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS. *Simulações Interativas em Ciências e Matemática*. University of Colorado Boulder, 2002. Disponível em: <<https://phet.colorado.edu/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2017. Citado 4 vezes nas páginas 48, 49, 50 e 51.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 88.

PRAIA, J. F. Aprendizagem significativa em d. ausubel: contributos para uma adequada visão da sua teoria e incidências no ensino. *Teoria da aprendizagem significativa. Peniche, Portugal*, p. 121-134, 2000. Citado na página 35.

RAMALHO, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. d. T. *Os fundamentos da física*. 9. ed. [S.l.]: São Paulo: Moderna, 2007. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.

RAMALHO, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. d. T. *Os fundamentos da física*. 9. ed. [S.l.]: São Paulo: Moderna, 2007. v. 2. Citado na página 62.

ROSA, P. S. *Louis de Broglie e as ondas de matéria*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas - SP, 2004. Citado na página 55.

SILVA, A. C. da; ALMEIDA, M. J. P. M. de. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, p. 624-652, 2011. Citado na página 23.

SIQUEIRA, M.; PIETROCOLA, M. A transposição didática aplicada a teoria contemporânea: A física de partículas elementares no ensino médio. *X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina*, 2006. Citado na página 23.

STUDART, N. A invenção do conceito de quantum de energia segundo planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 4, p. 523, 2000. Citado na página 48.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 9, n. 3, p. 209–214, 1992. Citado na página 19.

VALADARES, E. de C.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, p. 121–135, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. M. N. D. Modelagem no ensino/aprendizagem de física e os novos parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio. *Revista brasileira de ensino de física*. São Paulo. Vol. 24, n. 2 (jun. 2002), p. 87-96, SciELO Brasil, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 87.

Apêndices

APÊNDICE A – Questionário

1. Já ouviu falar sobre Física Quântica?
 - ☐ sim
 - ☐ não
2. Abaixo têm alguns temas estudado na Física Quântica, quais deles você já ouviu falar?
 - ☐ Radiação de corpo negro
 - ☐ Dualidade onda partícula
 - ☐ Efeito fotoelétrico
 - ☐ Fótons
 - ☐ Átomo de hidrogênio
 - ☐ Raias do Espectro de Hidrogênio
 - ☐ Salto Quântico
 - ☐ Princípio da Incerteza de Heisenberg
 - ☐ Quantização da Energia
 - ☐ Nunca ouvi falar desses assuntos
3. Com base no que você estudou no primeiro ano, o que é uma partícula?
4. Com base no que você estudou no segundo ano, o que é uma onda?
5. O elétron apresenta natureza:
 - a) ondulatória
 - b) corpuscular (partícula)
 - c) “dual”, pois apresenta ambos os comportamentos, ondulatório e corpuscular.
 - d) não sei responder
6. Qual o significado da palavra “Quantização”? O que significa dizer que a “Energia é quantizada”?
7. (IFES) Ao longo dos anos, as características atômicas foram sendo desvendadas pelos cientistas. Foi um processo de descoberta no qual as opiniões anteriores não poderiam ser desprezadas, ou seja, apesar de serem ideias ultrapassadas, fizeram parte do

histórico de descoberta das características atômicas. Vários foram os colaboradores para o modelo atômico atual, dentre eles Dalton, Thomson, Rutherford e Bohr. Abaixo você tem a relação de algumas características atômicas, especifique o cientista responsável por cada uma destas teorias:

- I. Dalton
- II. Thomson
- III. Rutherford
- IV. Bohr.

() O átomo é comparado a uma bola de bilhar: uma esfera maciça, homogênea, indivisível, indestrutível e eletricamente neutra

() O átomo é comparado a um pudim de ameixas: uma esfera carregada positivamente e que elétrons de carga negativa ficam incrustados nela.

() Átomo que apresenta um núcleo carregado positivamente e ao seu redor gira elétrons com carga negativa.

() Átomo em que os elétrons se organizam na forma de camadas ao redor do núcleo.

8. (UFC-CE) No início do século XX, novas teorias provocaram uma surpreendente revolução conceitual na Física. Um exemplo interessante dessas novas ideias está associado às teorias sobre a estrutura da matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos nos primeiros anos do século XX foram o de Thomson e o de Rutherford. Sobre esses modelos, assinale a alternativa correta.

- a) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo, e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
- b) No modelo de Rutherford, os elétrons são localizados em uma pequena região central do átomo e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
- c) No modelo de Thomson, a carga positiva do átomo encontra-se uniformemente distribuída em um volume esférico, ao passo que os elétrons estão localizados na superfície da esfera de carga positiva.
- d) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em torno da carga positiva, que está localizada em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo.
- e) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford consideram a quantização da energia.

-
9. (UFMG-MG) No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio neutro, a energia do elétron:
- a) pode ter qualquer valor.
 - b) independe da órbita do elétron.
 - c) tem um único valor fixo.
 - d) tem alguns valores possíveis.
 - e) depende da temperatura do átomo.
10. O átomo é composto por quais partículas? Em qual região do átomo que essas partículas se encontram?
11. Considerando as tecnologias mencionada abaixo, marque as opções nas quais você considera importante para o dia a dia e sabe como ocorre o funcionamento.

	Considero importante	Sei como funciona
TV Led	()	()
Touch screen	()	()
Lasers	()	()
Portas eletrônicas	()	()
Computador quântico	()	()
Sensores	()	()

12. Cite Tecnologias nas quais você gostaria de entender como ocorre o funcionamento.

APÊNDICE B – Produto Educacional



Ageu Pereira de Almeida

*SEQUENCIA DIDÁTICA PARA ENSINO
DE QUÂNTICA*

Universidade Federal do Tocantins

Agradecimentos

Este trabalho é um produto educacional que integra a dissertação de mestrado. Ele não seria real se não fosse pela dedicação da minha orientadora Dra. Regina Lélis de Sousa a quem agradeço por todas as contribuições.

Sumário

Introdução	5
1 A Física Quântica	7
2 Radiação de Corpo Negro	9
3 Dupla Fenda de Young	19
4 Efeito Fotoelétrico	33
4.1 O efeito fotoelétrico nas portas automáticas	38
5 Principio da incerteza de Heisenberg	41
6 O Átomo de Bohr	45
6.1 O espectro do hidrogênio	52
6.2 Transição Eletrônica nos fogos de Artifício	55
7 O Átomo da Mecânica Quântica	61
7.1 Ondas de matéria de De Broglie	62
7.2 Associação entre ondas mecânicas e Ondas de Matéria	64
7.3 A Nova Mecânica Quântica	68
7.4 O modelo atômico da mecânica quântica	70
7.5 O Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do Elétron	76
8 Lasers	81
8.1 Aplicações dos Lasers	86
8.1.1 Leitores de Código de Barras	86
8.1.2 Leitores de CD e DVD	87
8.1.3 Laser na medicina	88
Referências	91

Introdução

ESTE DOCUMENTO faz parte da dissertação de mestrado "Tópicos de Física Quântica no Ensino Médio Utilizando Simulações Computacionais" de autoria Ageu Pereira de Almeida sob orientação da Dra. Regina Lélis de Sousa e constitui um produto destinado a auxiliar professores do Terceiro Ano do Nível Médio no ensino de Física Quântica. Especificamente, propõe-se uma Sequência Didática para ensinar Mecânica Quântica com uso de simulações computacionais. A motivação para produzir este material surgiu após ministrar aulas de física durante seis anos na rede estadual do Tocantins. As tentativas de inserir tópicos de Física Quântica muitas das vezes foram frustrantes devido à falta de materiais adequados ou métodos que viessem a motivar os alunos durante as aulas. Somado a isto, constatamos que os livros didáticos adotados pela rede pública, tais como (GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2010; BEATRIZ, 2010; GUALTER; NEWTON; HELOU, 2010), trazem tópicos de Física Quântica de forma confusa, incompleta e fora do contexto histórico. Esse trabalho iniciou a partir dos esforços em introduzir tópicos da Física Quântica no ensino básico de educação e sua importância se justifica uma vez que cotidianamente nos deparamos com novos aparelhos eletrônicos e opto-eletrônicos, sistemas de controle e automação, novos lasers para aplicação em medicina, aplicações em meios de comunicações e tantos outros desenvolvimentos tecnológicos nos quais temos belíssimos exemplos de aplicações de conceitos de Física Moderna e Contemporânea. Nesse cenário, é fundamental que o estudante do ensino médio conheça os princípios básicos da tecnologia atual, já que ela está presente em seu cotidiano e, muito provavelmente, definirá o seu futuro profissional (OSTERMANN; MOREIRA, 2001; VALADARES;

MOREIRA, 1998; TERRAZZAN, 1992).

Na busca por qualidade na educação, que proporcione estímulos cognitivos e propicie alternativas para o ensino, as modelagens computacionais são recursos “que podem contribuir para a aprendizagem de conteúdos de Física e promover uma melhor concepção de Ciência por parte dos estudantes” (HEIDEMANN; ARAUJO; VEIT, 2012), propiciando aos alunos o desenvolvimento de habilidades que permitam entender o mundo que os cercam e as tecnologias que utilizam cotidianamente.

A discussão dos tópicos de Física Quântica nessa sequência de ensino se fará por meio de simulações computacionais oriundas de plataformas de acesso público. O que nos motiva a utilizar as simulações computacionais como ferramenta é a possibilidade de viabilizar a discussão de fenômenos quânticos que envolvem conceitos novos, diferentes daqueles rotineiramente discutidos nas aulas de Mecânica Clássica e que utilizam uma modelagem matemática ainda inacessível aos estudantes do Ensino Médio. O uso de experimentos não é uma estratégia viável por dois motivos básicos. Primeiramente, deve-se ter em conta que as escolas da rede pública geralmente não têm laboratórios equipados e disponíveis. Somado a isto, os fenômenos que queremos discutir dizem respeito principalmente à escala atômica, introduzindo dificuldades adicionais à montagem de experimentos de baixo custo em sala de aula. Deve-se notar que nos últimos anos, alguns pesquisadores têm desenvolvido alguns experimentos de baixo custo para este fim (MORAIS, 2015), mas ainda assim nossas escolas estão aquém das condições financeiras e estruturais para implementar um projeto deste tipo. Com estas considerações, parece-nos que as simulações computacionais tornarão viável a introdução dos revolucionários princípios quânticos, serão úteis para que os estudantes possam entender os motivos que culminaram com o início dessa nova física e ainda permitirão discutir as aplicabilidades das novas ideias às tecnologias atuais.

A Física Quântica

A física predominante nos currículos do ensino médio é a Física Clássica (FC). Entende-se por FC, toda física descoberta antes de 1900. A FC consegue explicar a maioria dos fenômenos presente no nosso cotidiano tais como eventos relacionados à eletricidade, ao movimento dos corpos macroscópicos e a óptica. No entanto, na segunda metade do século XIX, a FC foi mal sucedida na explicação de dados observacionais relacionados à emissão de corpos aquecidos, difração de elétrons, efeito fotoelétrico e modelos atômicos. Na tentativa de explicar os fenômenos onde a FC falhara, foram necessárias mudanças profundas e o desenvolvimento de novos conceitos físicos. Neste contexto nascia uma "nova física" a qual é conhecida como Física Moderna. Dentro dessa nova física, surgida a partir do ano de 1900, está a Física Quântica (FQ), cujo foco é estudar sistemas físicos que possuem dimensões próximas ou abaixo da escala atômica, ou seja, estudar os fenômenos relacionados às moléculas, átomos e partículas subatômicas. Embora resultados da Teoria Quântica para limites de grandes números quânticos se reduzam àqueles da Mecânica Clássica, é na explicação dos fenômenos microscópicos com grande precisão que reside seu grande sucesso e, não nos custa lembrar, em uma escala na qual a teoria clássica falha totalmente.

A FQ está presente em muitos dispositivos eletrônicos, tais como

transistor (presentes em televisores, computadores e aparelhos celulares), lasers, diodos, displays de cristal líquido, leitoras ópticas, dispositivos automáticos (portas e torneiras automáticas) e até em aparelhos aplicados à medicina. Não é exagero afirmar que é a base das tecnologias que nos cercam. A Quântica surgiu no início do século XX, porém só a pouco tempo (últimas décadas) que o seu ensino começou a ser acrescentado nas grades curriculares das escolas de nível médio do Brasil (OSTERMANN; MOREIRA, 2000). Hoje a maioria dos livros didáticos trazem o estudo da FQ, porém em grande parte destas obras os conteúdos são colocados de forma descontextualizada, estão incompletos e organizados de maneira que dificulta o aprendizado dos alunos. Com algumas raras exceções, podemos citar o GREEF, o enfoque é histórico e se limita a discutir o que atualmente denomina-se "Velha Mecânica Quântica". Assim sendo, este material tem por objetivo construir uma sequência didática que permita a introdução de alguns conceitos básicos de FQ, tornando a abordagem inovadora o suficiente para tentar minimizar os problemas enfrentados pelos professores da Educação Básica. As atividades são concebidas para que, após trabalhar com este material, os alunos possam compreender e discutir os novos conceitos e utilizá-los para lidar com o embasamento teórico dos fenômenos tecnológicos cotidianos.

Radiação de Corpo Negro

A partir do estudo teórico da radiação de corpos aquecidos, Max Planck apresentou a hipótese inusitada e maravilhosa de quantização de energia. No artigo publicado em dezembro de 1900 ([PLANCK, 1900](#)), Planck discutia a modelagem teórica clássica do espectro de emissão de um corpo negro e na tentativa de obter os resultados experimentais, de Lummer e Pringsheim e de Rubens e Kurlbaum ([STUDART, 2000](#)), aplicou sua solução revolucionária que mais tarde se tornou um dos fundamentos da Mecânica Quântica.

Todos os corpos em uma dada temperatura, T , emitem radiação térmica para o meio onde estão e também podem absorver a radiação térmica do meio. Ou, em outras palavras, a emissão ou absorção de radiação está associada à temperatura. O espectro emitido, em geral, tem pouca dependência com a composição do corpo, mas há dependência elevada com a temperatura. Esta dependência é tal que pode-se estimar a temperatura do corpo por meio da medida do espectro emitido. Estes resultados podem ser observados no cotidiano. Se tomarmos um pedaço de metal em temperatura ambiente e o colocarmos em contato com uma fogueira por alguns minutos e o retirarmos, notaremos que o corpo emite radiação não-visível (temos emissão na região do infravermelho). Aumentando o tempo de contato com o fogo, isto é,

aumentando a temperatura, observa-se o aumento da quantidade de radiação emitida e o espectro também incluirá a radiação visível. Continuando com o processo, veremos o metal adquirir coloração vermelha, amarela, branco-azulado, e assim sucessivamente (ver figura 1). Está claro que há dependência da quantidade de radiação emitida e também do espectro com a temperatura (EISBERG; RESNICK, 1979)



Figura 1 – Mudança de cor de um metal (corpo negro) em função da temperatura. Fonte da Imagem: <<https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/photomicrography/colortemperature/>>

Para estudar o comportamento do espectro emitido utiliza-se um objeto hipotético, denominado corpo negro. O modelo permite simplificar a modelagem teórica porque a natureza do emissor pode ser desprezada e, assim sendo, todos os corpos negros à uma temperatura T terão o mesmo espectro de radiação. O corpo negro não pode ser atravessado e também não reflete a luz, ou seja, absorve toda radiação eletromagnética incidente nele. Devido à ausência de reflexão, objetos com essas características, em teoria, não poderiam ser vistos, por isso são chamados de corpos negros. Apesar do nome, corpos negros podem emitir radiação e para ser um corpo negro ideal ele deve emitir radiação na mesma proporção que absorve. Na natureza não encontramos corpos negros perfeitos porque nenhum objeto absorve e/ou emite radiação de forma perfeita, porém estrelas e metais exibem um comportamento muito próximo deste modelo ideal.

Para ilustração e melhor entendimento das características básicas do espectro de radiação de um corpo negro, propomos a utilização de

uma simulação disponíveis no site Phet (Physics Interactive Simulations - Universidade do Colorado) (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002; MCKAGAN et al., 2008) que se encontra no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/blackbody-spectrum>. Para executar a simulação clique em play ou também pode baixar o arquivo da simulação clicando no botão copiar e em seguida executando o arquivo para que apareça a tela da figura 2. Na figura citada, tem-se um gráfico da

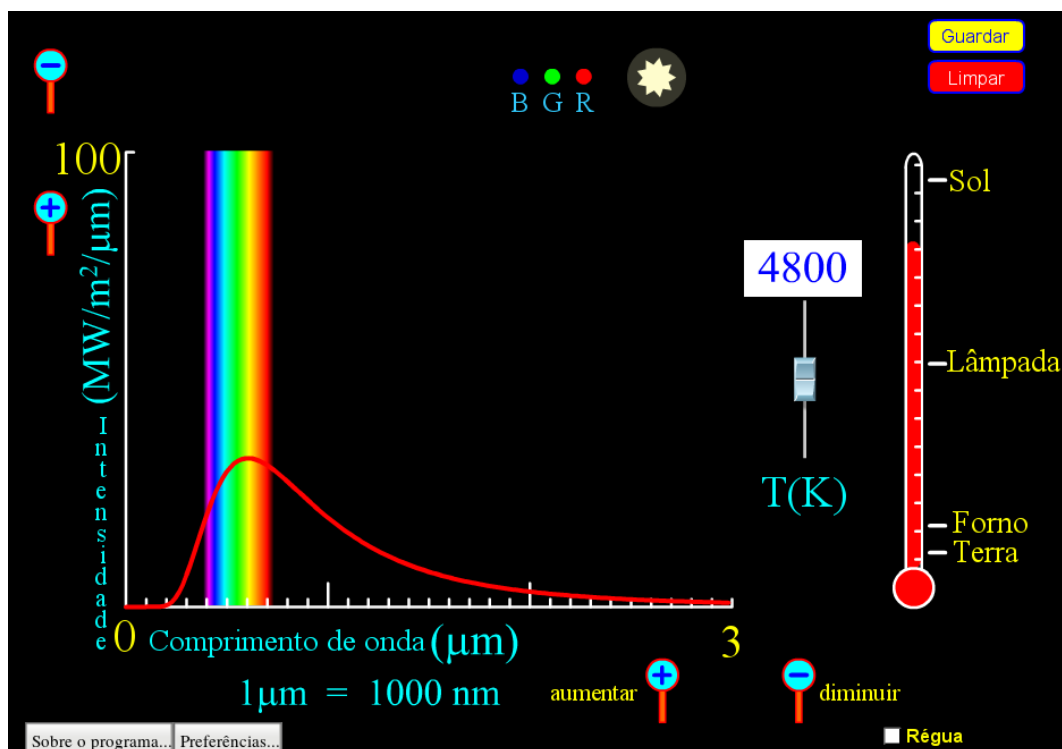


Figura 2 – Tela inicial da Simulação Radiação de Corpo Negro.

intensidade de radiação emitida pelo corpo versus o comprimento de onda. A faixa colorida, do violeta ao vermelho, representa a luz visível. Vê-se as características básicas esperada para gráficos de intensidade como função do comprimento de onda: para pequenos comprimentos de onda a intensidade é zero; têm-se um máximo de intensidade e a curva também tende a zero com o aumento dos valores de comprimentos de onda. Os sinais de + e -, no eixo da intensidade, têm a função de ampliar e reduzir o eixo vertical para melhor visualização do pico máximo da curva de radiação. No eixo comprimento de onda, os símbolos + e -, têm a função de ampliar e reduzir o eixo horizontal para melhor visualização do espectro de luz visível. O valor da temperatura do objeto

estudado pode ser mudado pelo botão de slider ou digitando o valor no retângulo branco (substituindo o valor de 4800 k que aparece na figura 2). Note-se que a associação entre a temperatura digitada e um objeto que poderia exibir o espectro de corpo negro está ilustrado na figura ao lado do slider de temperatura. O símbolo ☀ mostra a cor predominante emitida pelo objeto que emite a radiação.

Na figura 3 apresenta-se o resultado para uma lâmpada incandescente acesa que pode chegar a uma temperatura de 3000 K. Para obter

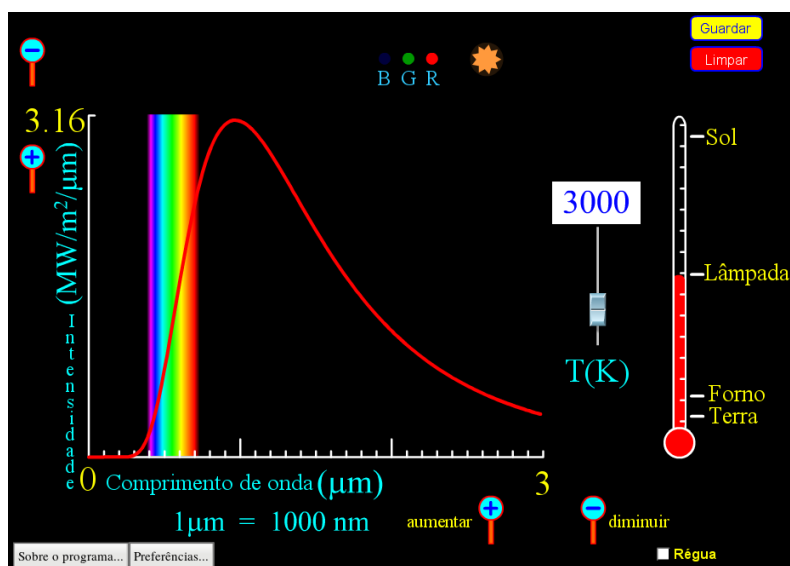


Figura 3 – Simulação para emissão de radiação por uma lâmpada incandescente.

o gráfico da figura 3, basta digitar a o valor da temperatura, neste caso, 3000 K e ampliar na vertical para melhorar a visualização do pico de máxima intensidade de radiação. Pode-se notar, pela figura 3, que a cor predominante na emissão de radiação para lâmpada incandescente é a laranja. Note-se ainda que λ_{maximo} (pico de máxima intensidade), pertence à região do infravermelho (motivo da lâmpada aquecer tanto).

Caso se queira comparar espectros emitidos em diferentes temperaturas, deve-se obter o primeiro espectro com a temperatura desejada, clicar no comando "guardar". O espectro ficará visível na cor amarela. Quando se escolher o novo valor de temperatura, ambos ficarão visíveis e pode-se proceder à comparação, como exemplificado na figura 4. Através da manipulação da simulação, pode-se observar que a radiação do corpo negro apresenta as seguintes características:

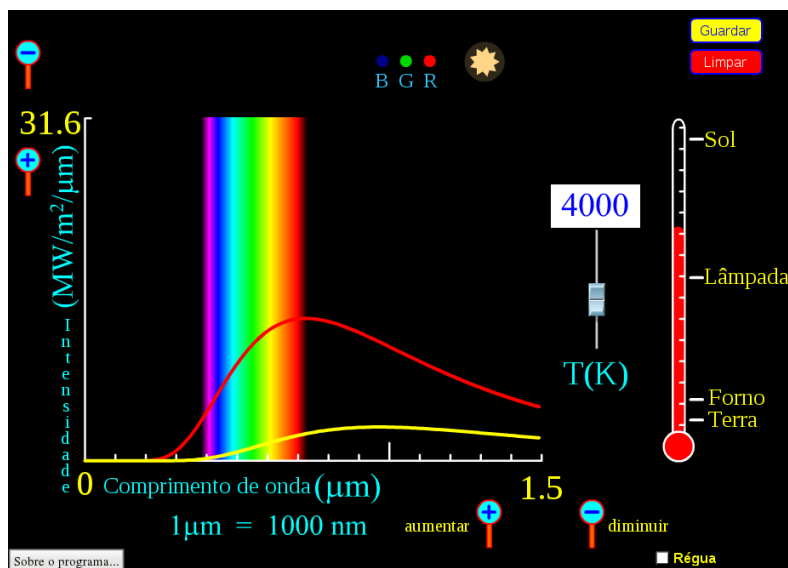


Figura 4 – Comparação dos espectros de corpo negro para temperaturas de 4000 K (linha vermelha) e 3000 K (linha amarela).

1. a intensidade da radiação tende a zero, para frequências muito grandes e para frequências muito pequenas;
2. cada temperatura possui um valor de λ_{maximo} ;
3. a intensidade de pico máximo cresce rapidamente com o aumento da temperatura do objeto em estudo (resultado empírico denominado Lei de Stefan (EISBERG; RESNICK, 1979) e
4. λ_{maximo} é inversamente proporcional à temperatura (ou: a frequência máxima é diretamente proporcional ao aumento da temperatura - resultado empírico denominado Lei do Deslocamento de Wien (EISBERG; RESNICK, 1979)

Tendo todas as informações obtidas experimentalmente, podemos utilizar a Mecânica Clássica para modelarmos o comportamento do corpo negro. A dedução das equações e os eventos históricos não fazem parte do escopo deste trabalho e não serão discutidos em detalhes. Há literatura disponível para estes tópicos (NUSSENZVEIG, 1998; EISBERG; RESNICK, 1979; STUART, 2000). Imaginemos a matéria composta por átomos e imaginemos (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013a) um elétron de um dos átomos em movimento. Podemos pensar em um oscilador carregado. Sabemos que o oscilador estará emitindo radiação

eletromagnética (cargas em movimento acelerado emitem radiação eletromagnética). Com estas informações e admitindo que temos uma cavidade de paredes metálicas e a uma temperatura T , inferimos que, devido à agitação térmica, haverá movimento de oscilação dos elétrons e, conseqüentemente, teremos emissão de radiação. A cavidade tem comportamento de corpo negro e podemos focar nas ondas eletromagnéticas geradas (ver figura 5).



Figura 5 – comportamento da radiação de corpo negro dentro de uma cavidade. Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm>

Utilizando a teoria eletromagnética, os físicos Lord Rayleigh e James Jeans provaram que as ondas eletromagnéticas dentro da cavidade se comportam como ondas estacionárias (EISBERG; RESNICK, 1979), cujos nós estão sobre as paredes da cavidade. Em analogia com as ondas estacionárias em uma corda vibrante, nos lembramos imediatamente que a amplitude de campo elétrico variará no espaço e que oscilará no tempo. Além disso, a exigência de nós nas paredes da cavidade levará a um conjunto de frequências (ou comprimentos de onda) possíveis.

De acordo com a física clássica, a energia para cada uma das ondas é $\bar{E} = kT$, sendo $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$. O gráfico previsto, segundo a teoria clássica, para radiância espectral é mostrado na figura 6.

Porém, de acordo com os dados experimentais obtidos para radiação de corpos aquecidos, a energia média dependia da frequência da radiação emitida e o gráfico obtido para os dados experimentais é mostrado na figura 7. Comparado os gráficos das figuras 6 e 7 é possível notar que para baixas frequências as previsões clássica coincidem com os dados obtidos experimentalmente, porém a medida que aumenta a frequência, a teoria clássica torna incapaz de reproduzir os dados observacionais.

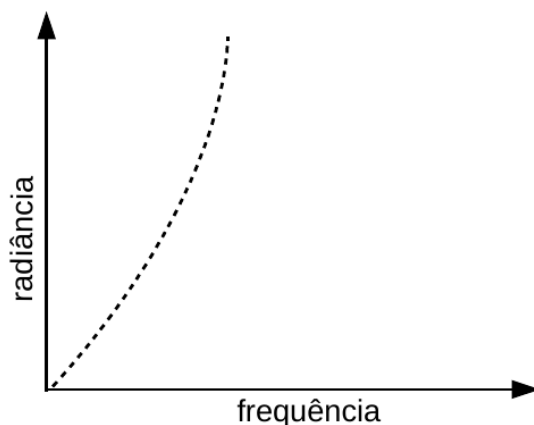


Figura 6 – Radiância espectral do corpo negro previsto pela teoria clássica.

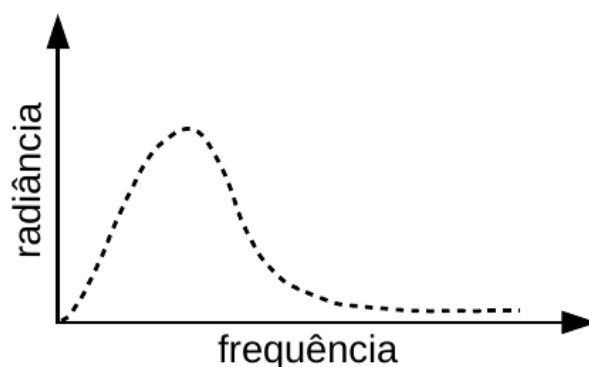


Figura 7 – Radiância espectral do corpo negro obtido experimentalmente.

Essa situação é conhecida como **catástrofe do ultravioleta**, em alusão a as altas frequência do espectro de radiação, na qual o problema se revela.

Considerando os resultados obtidos na física clássica e também o resultado experimental (figura 7), parece que classicamente o valor da energia média é diferente do que se tem experimentalmente (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013a). Ou, em outras palavras, havia necessidade de rever $\bar{E} = kT$.

Planck iniciou seus estudos da radiação de corpo negro em 1897 e já era professor. Ele conhecia os dados experimentais de Lummer e Pringsheim e de Rubens e Kurlbaum (STUDART, 2000) porque tinha con-

tato com estes pesquisadores e conseguiu ajustar a curva observada com uma função matemática. Mas, o trabalho foi além. Planck estudou os osciladores da cavidade metálica utilizando Teoria Eletromagnética, Termodinâmica (entropia) e também Mecânica Estatística (considerando que havia um grande número de osciladores na cavidade metálica). Especificamente, era necessário justificar teoricamente porque havia dependência entre energia e frequência dada por

$$\overline{E}_{\nu \rightarrow 0} \rightarrow kT \quad (2.1)$$

e

$$\overline{E}_{\nu \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (2.2)$$

Estas relações são aquelas que evitam a catástrofe do ultravioleta e, observando a figura 6, vemos que a relação 2.1 é satisfeita.

Novamente omitiremos os detalhes dos cálculos de Planck e da estratégia utilizada por nos parecer ser o caminho didaticamente mais viável. Também não faremos uma narrativa cujo foco seja coincidente com os fatos históricos. Somente mencionaremos que ele utilizou a Estatística de Boltzmann. Como já havia feito a derivação empírica, analisando a distribuição de Boltzmann, Planck percebeu que obteria o resultado necessário assumindo que os osciladores vibrando em frequências definidas e que classicamente poderiam ter qualquer valor de energia e amplitudes, tivessem comportamento distinto. A proposta de Planck era de que a energia total dos osciladores não fosse tratada de maneira contínua, mas de forma discreta. Resultados dos cálculos mostraram que ele obteria o resultado desejado assumindo que a energia total de cada um dos osciladores de frequência ν fosse dado por um múltiplo inteiro de

$$E = nh\nu \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.3)$$

sendo **h** uma constante física universal e que denominamos por **constante de Planck**. O valor numérico é $h \cong 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV.s} \cong 6,6261 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ e foi obtido pelo ajuste com os dados experimentais. Dessa forma, os osciladores poderiam emitir radiação fazendo transições entre diferentes níveis de energia igualmente distribuídos e a energia será sempre múltiplo inteiro de um quantum (de forma não contínua), ou seja,

$$\Delta E = h\nu \implies E_n = n\Delta E, \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2.4)$$

Classicamente esta hipótese não fazia sentido já que 2.4 mostra que não se pode ter qualquer perda de energia por parte dos osciladores.

Passemos aos resultados de Planck. Ele obteve que a energia média para uma onda na cavidade quando a temperatura fosse T seria dada por

$$\overline{E} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.5)$$

e bem diferente de 2. Observe $\overline{E}$ se aproxima de kT quando a frequência tende a zero ou a $T \rightarrow \infty$. De fato um resultado maravilhoso para o qual a comparação com os dados experimentais pode ser visualizada na figura 8 retirada da referência (GUIMARÃES, 1999).

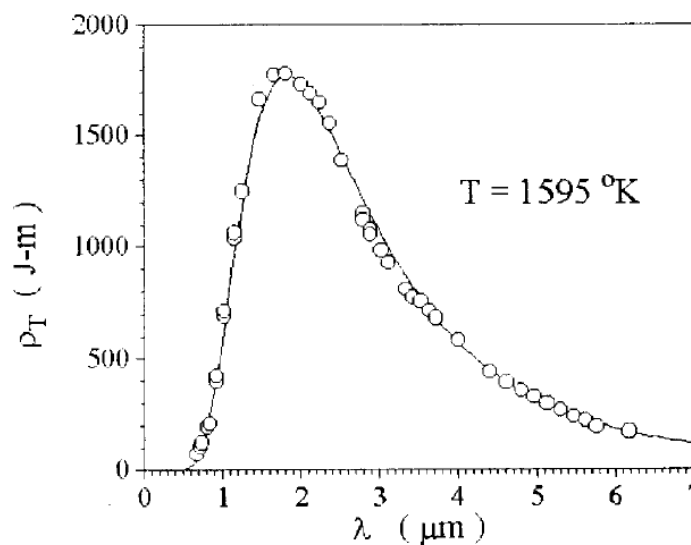


Figura 8 – Radiação espectral do corpo negro esperado pela teoria clássica.

De fato, a inteligência e imaginação de Planck foram sensacionais! Segundo ele, "após algumas semanas do mais extenuante trabalho da minha vida, a escuridão se desfez e uma inesperada vista começou a surgir" (STUDART, 2000). O próprio Plank admitiu que introduzir a constante h e tratar a energia como uma grandeza quantizada foi uma "tentativa desesperada", porém essa hipótese mostrou-se apropriada para descrever a radiação de corpos aquecidos, e além disso, foi fundamental para o início de uma nova física.

A figura 9 (retirada do Livro do Eisberg) mostra a representação das possíveis energia para um corpo emitindo radiação. A figura da

esquerda mostra a energia na visão clássica. Nota que, classicamente, é possível obter qualquer valor para a energia. Na figura da direita, temos a interpretação de Planck, em que só é permitido energia múltiplos de $h\nu$ e que teve concordância com os dados experimentais.

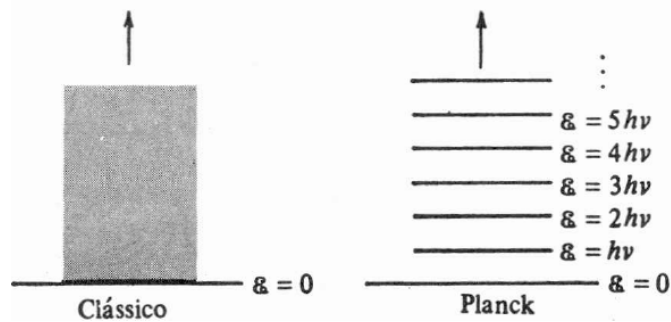


Figura 9 – Representação gráfica das energias possíveis classicamente (à esquerda) e aquelas previstas pelo Postulado de Planck (à direita).

Exercícios

1. O que é um corpo negro e quais são as características da radiação emitida por ele?
2. (UFRN-Modificada) As lâmpadas incandescentes são pouco eficientes no que diz respeito ao processo de iluminação. Com intuito de analisar o espectro de emissão de um filamento de uma lâmpada incandescente, vamos considerá-lo como sendo semelhante ao de um corpo negro (emissor ideal) que esteja à mesma temperatura do filamento (cerca de 3000 K). Qual o motivo da baixa eficiência das lâmpadas incandescente e por que elas esquentam tanto?
3. Qual a origem da catástrofe do ultravioleta? Como este efeito está relacionado à hipótese de Planck e ao surgimento da Física Quântica?
4. Qual significado da palavra quantum? O que levou Planck a quantizar a energia?

Dupla Fenda de Young

Na Física Clássica (Mecânica Clássica, Eletromagnetismo e Termodinâmica), o conceito de partícula e onda são bem definidos. Partícula é um ente que possui massa e cuja posição e velocidade podem ser matematicamente definidos pelos vetores posição $\vec{r}$ e momento $\vec{p}$. Se a partícula está em movimento, as Leis da Mecânica Clássica nos permitem determinar sua trajetória. Se estamos pensando em onda, imaginamos entes que transportam energia e informação pelo espaço, mas sem transporte de matéria. Pensamos em algo deslocalizado espacialmente e cuja descrição nos lembrará de comprimento de onda (λ) e período. Não pensamos em trajetória como pensaríamos para uma bola de futebol em movimento. Ondas e partículas não se confundem: sabemos que ondas podem ocupar simultaneamente o mesmo espaço e, imediatamente, nos lembramos de dois fenômenos: interferência e difração. Certamente nos lembraremos do conceito de campo eletromagnético, por exemplo. Uma comparação simples, nos permite distinguir, classicamente, os dois entes: imagine que queremos falar com um amigo. Podemos enviar nossa mensagem por meio de uma carta utilizando o serviço postal (correios) ou utilizarmos o telefone. No primeiro caso, houve transporte de matéria, mas no segundo caso, não (WEBBER, 2006; RICCI; OSTERMANN, 2000; RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 2009; TIPLER, 2009; NUSSENZVEIG,

1998). Este é o mundo clássico que nos é tão familiar!

Para relembrar alguns conceitos ondulatórios, vamos utilizar a simulação disponível nos arquivos do projeto Phet e que pode ser obtida no link phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002). Ao executar a modelagem terá a opção de simular ondas na água (water), sonora (sound) ou luz (light). Iniciando a simulação com a água, observa-se a propagação da onda pelo tanque. Observe que temos cristas e vale e também podemos determinar o λ e o período (ver figura 10). O mesmo resultado se obtém

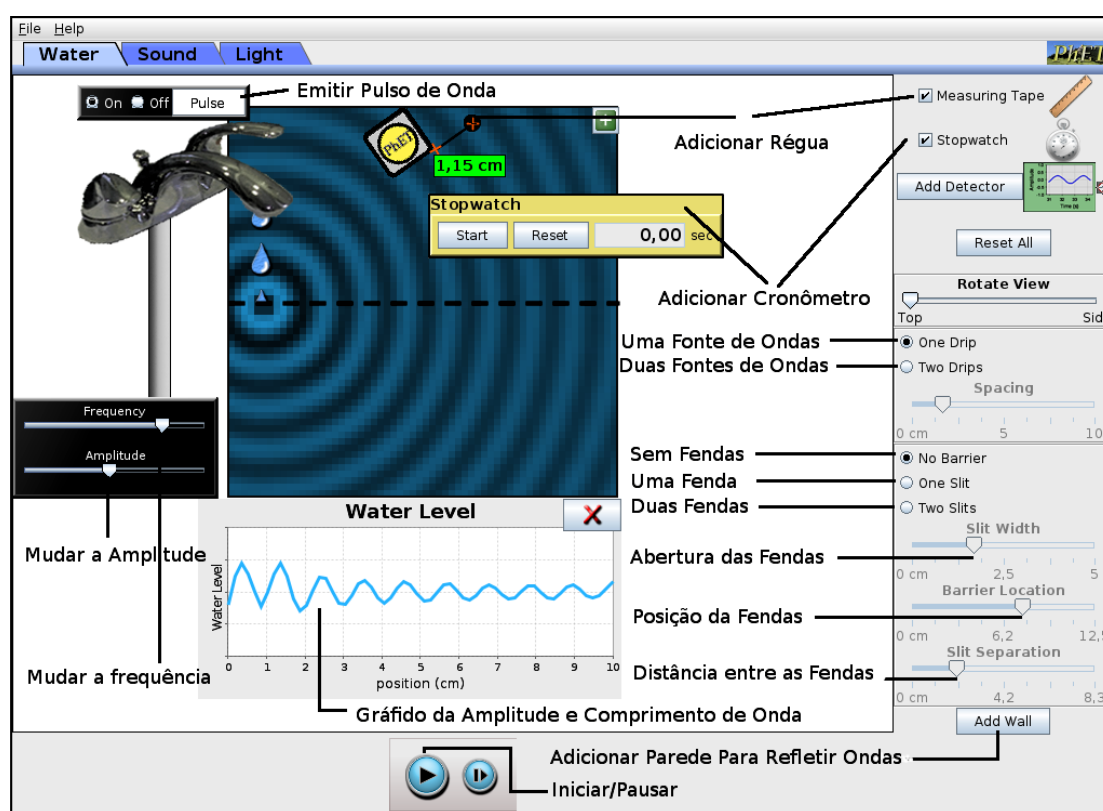


Figura 10 – Simulação de ondas na água.

para a luz. Com a régua e o cronômetro pode-se medir o período e o λ e consequentemente calcular a frequência da onda.

Exemplo:

Determinar a frequência da luz azul a partir da simulação Interferência de Ondas, sabendo que a velocidade de propagação da luz é aproxima-

damente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Resposta:

Fazendo uma simulação para luz e selecionando a frequência na cor azul, podemos medir (utilizando o recurso "régua") λ aproximadamente igual a $470 \text{ nm} = 470 \times 10^{-9} \text{ m}$ (ver figura 11).

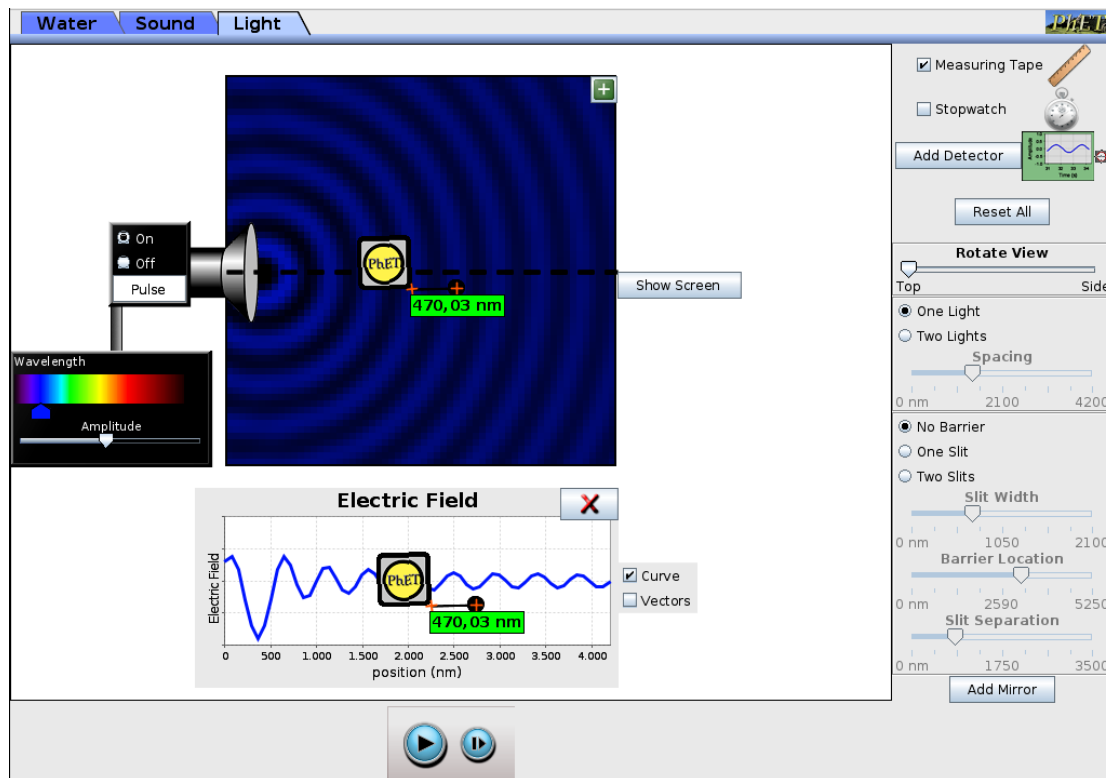


Figura 11 – Simulação de ondas.

Temos que:

$$v = \lambda f$$

$$3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 470 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot f$$

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 0,64 \cdot 10^{15} / \text{s}$$

$$f = 6,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

OBS. Nota que a frequência, calculada no exemplo, está dentro do esperado, visto que para a cor azul a frequência varia de $6,06 \times 10^{14} \text{ Hz}$ à $6,68 \times 10^{14} \text{ Hz}$

Prosseguindo, observe que ao adicionarmos uma fenda na região de propagação das ondas observaremos um efeito ligado às ondas: a difração (ver figura 12 retirada da fonte (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002)). Se a abertura da fenda tiver **dimensões que sejam comparáveis ao comprimento de onda**, observamos um alargamento da porção da onda que passa pela fenda. Na figura 12 a onda passa pelo detector 1 e, após passar pela fenda, sofre uma difração, fazendo com que ocorra uma diminuição em sua amplitude e um aumento no seu comprimento de onda, como pode ser visto no detector 2. A física clássica descreve a difração como um desvio ou espalhamento que ocorre quando uma onda contorna ou transpõe orifícios ou fendas, colocado a sua frente. A difração ocorre com todos os tipos de ondas, como raios-X, raios-gamas, luz visível, ondas sonoras e ondas de rádios. Observe que diminuindo a largura da fenda, aumentamos o efeito da difração. A largura, a localização e a distância entre as fendas pode ser alterada nos botões *slit width*, *barrier location* e *slit separation*, respectivamente.

Segundo o princípio da superposição, quando duas ou mais ondas se superpõem em uma região, o deslocamento resultante em um ponto e em um dado instante é obtido somando os deslocamentos que seriam produzidos no ponto se apenas uma delas (individualmente) estivesse presente. Este fenômeno é denominado de **interferência das ondas** e não ocorrem com partículas. Para observar este fenômeno, vamos utilizar novamente a simulação como mostrado na figura 13 retirada da simulação do Phet (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002).

Observe as regiões de interferência construtiva e destrutiva. Este fenômeno se observa para qualquer onda. De fato, os fenômenos de difração e interferência tiveram um papel relevante na História da Física e foram responsáveis por estabelecerem a natureza ondulatória da luz. Com a comunidade de físicos convencidos de que luz era onda, houve um grande desenvolvimento do tratamento matemático. O ápice deste ciclo ocorreu com o Eletromagnetismo quando J. C. Maxwell estabeleceu que a luz era uma onda eletromagnética.

O experimento da dupla fenda, proposto por Thomas Young em

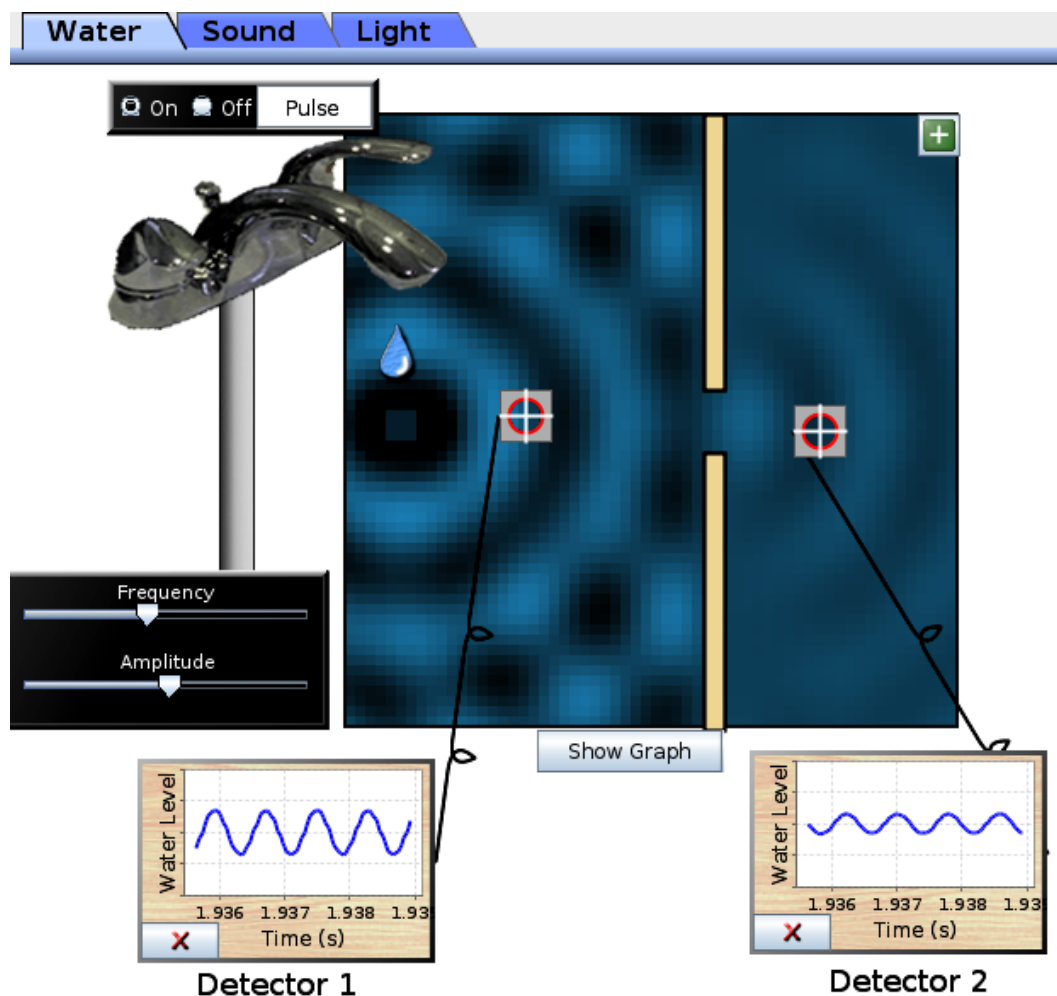


Figura 12 – Simulação de ondas difratada.

1801, foi um destes experimentos. Utilizaremos nosso simulador novamente para discutir os resultados de Young. Na figura 14, a simulação foi executada, para luz vermelha, com a presença de duas fendas. Temos luz coerente com λ definido incidindo sobre a dupla fenda com largura a . A difração ao atravessar as fendas está evidente na figura. Após passar pelas fendas e incidir em uma tela, a luz produz interferências construtivas (faixas vermelhas) e destrutivas (faixas escuras), o que pode ser comprovado pelo gráfico da intensidade mostrado na figura 15. Para mostrar a tela, onde as ondas incidem e o gráfico de interferência, basta clicar em *show screen* e *intensity graph*, respectivamente. Imagine um ponto no nosso anteparo. Da figura 14, percebe-se que este ponto poderia estar em uma região clara ou escura. Imagine que o ponto está

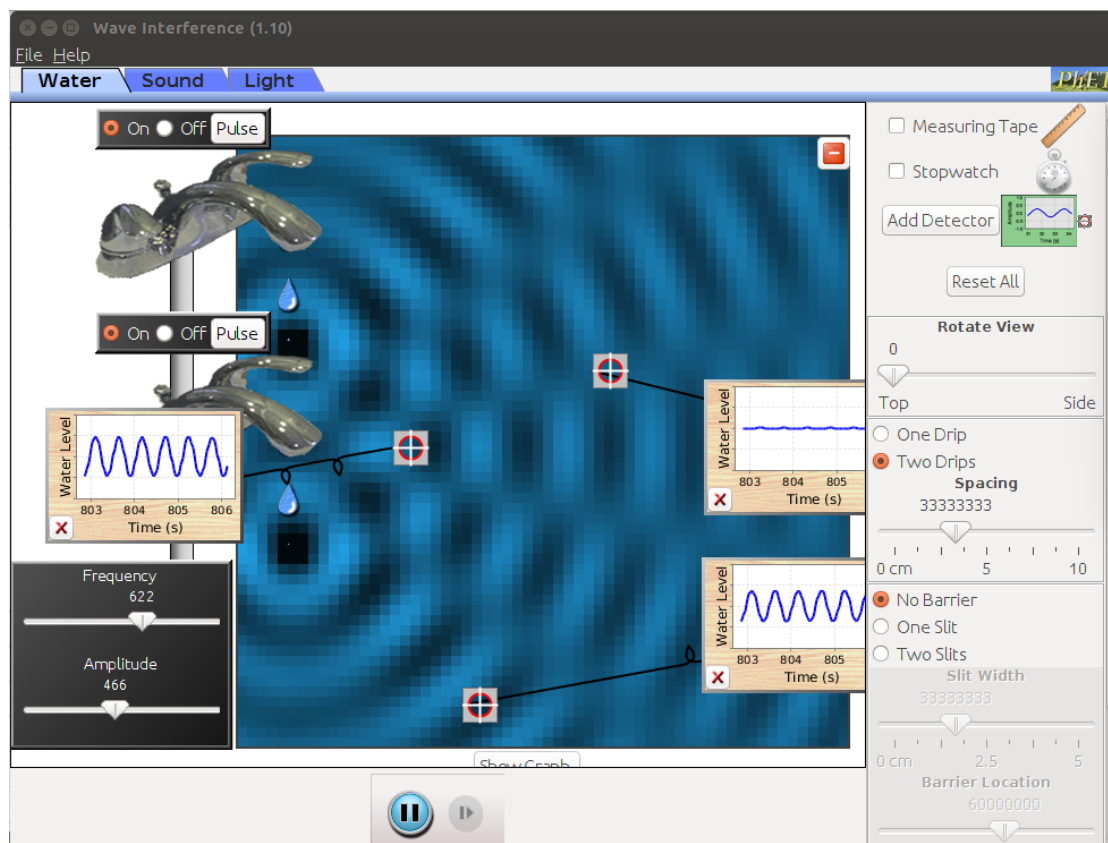


Figura 13 – Simulação de interferência construtiva e destrutiva para ondas na água.

em um região de interferência construtiva. Isto significa que as ondas que saíram das fontes em fase chegaram até este ponto percorrendo caminhos distintos e, em consequência, a diferença entre as distâncias percorridas é nula ou equivale a um número inteiro de λ . Assim sendo, teremos sobreposição de cristas com cristas e vales com vales, ou, em outras palavras, ondas em fase. Se este ponto estiver na região escura, teremos diferença entre as distâncias percorridas de $\lambda/2$, implicando em alinhamento de cristas e vales e, portanto, em interferência destrutiva. É possível calcular a localização das franjas claras e escuras e a intensidade obtida. Omitiremos os detalhes matemáticos porque este não é o foco da discussão.

Na figura 16, você observa o que acontece quando temos apenas uma fenda. Você deve ter observado a complexidade da imagem obtida no anteparo. Aqui, temos uma figura de difração de uma única fenda.

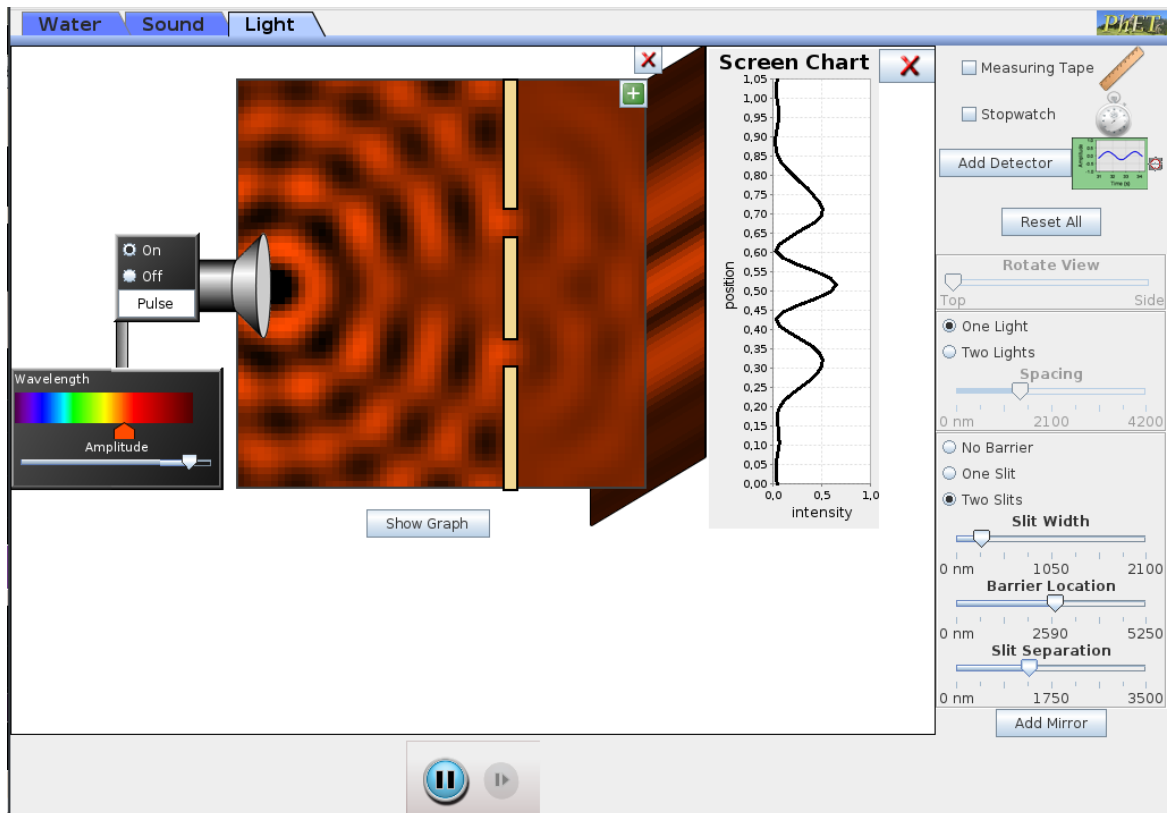


Figura 14 – Simulação Dupla Fenda.

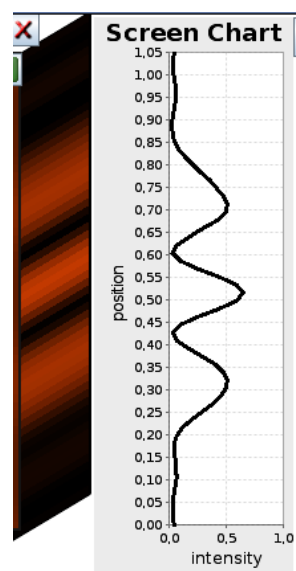


Figura 15 – Simulação Dupla Fenda.

Comentamos anteriormente que tínhamos tratado o fenômeno de forma simplificada. Aqui você tem oportunidade de observar o efeito com mais precisão. Observe o alargamento do pico principal se comparado à

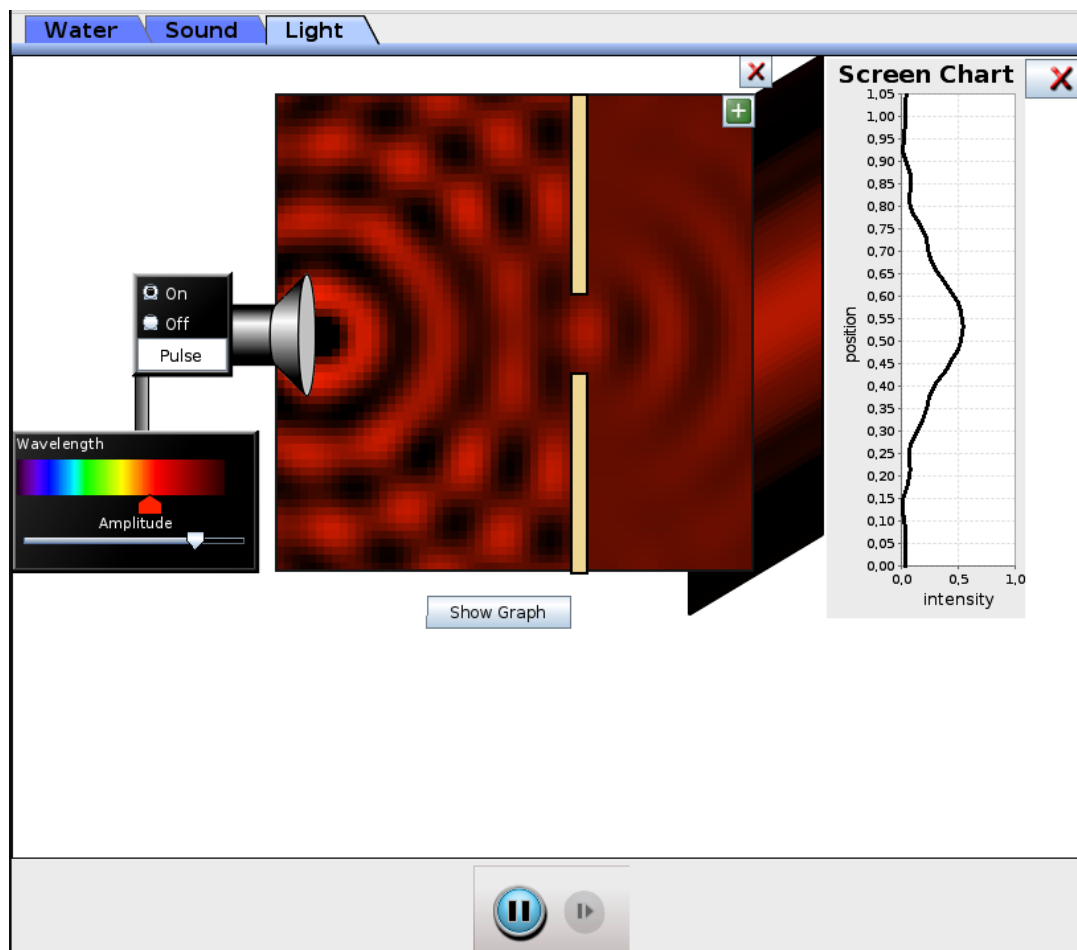


Figura 16 – Simulação com uma Fenda.

dimensão da fenda e observe a existência de máximos e mínimos. Aqui, devemos admitir que quando a onda passa pela fenda, há interferência entre as ondas provenientes de diferentes partes da fenda (onda interfere com ela mesma). De fato, na natureza, difração e interferência estão sempre presentes. Inclusive, em geral, estão presentes no experimento da dupla fenda. Novamente, não entraremos em detalhes porque nosso foco é outro. O importante aqui é comparar o gráfico de intensidade com aquele mostrado na figura 14.

Se o mesmo experimento fosse feito com objetos (como bolas de beisebol ou projétil de metralhadora), não seria possível obter, de acordo com a física clássica, as interferências ondulatórias. Imaginamos uma

metralhadora que possa lançar partículas em um obstáculo que possui duas fendas, nas quais as partículas podem passar e atingir um anteparo, que possui um detector que seja possível contar quantas partículas atingiram o anteparo. Com a fenda 2 fechada, a distribuição de partículas

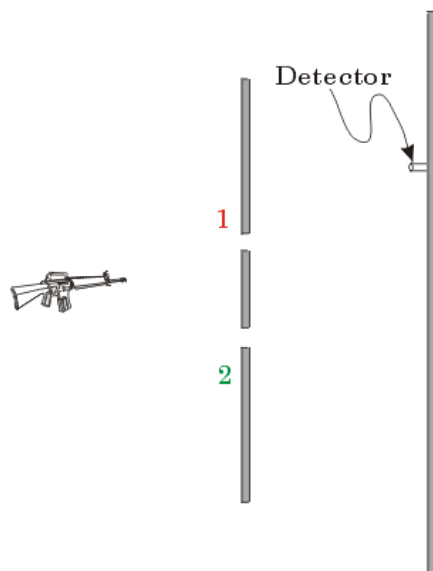


Figura 17 – Simulação de dupla fenda com partículas. Fonte <<http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>>

atingindo o anteparo terá o padrão mostrado a esquerda da figura 18, centrada em um ponto em frente a fenda 1. Com a fenda 1 fechada, a distribuição de partículas terá o mesmo padrão da anterior, porém centrada em um ponto em frente a fenda 2 (ver a direita da figura 18).

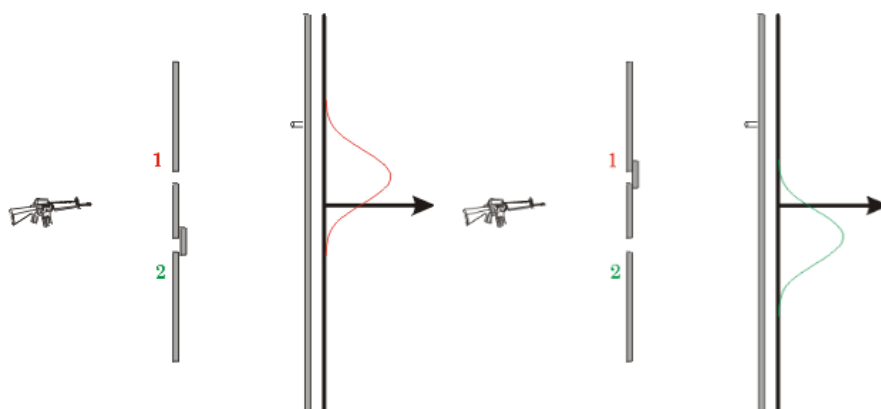


Figura 18 – Simulação de dupla fenda com partículas. Fonte <<http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>>

Quando as duas fendas estiverem abertas, a distribuição de partículas será a soma dos casos anteriores (ver figura 19). Nota que este resultado é totalmente diferente do encontrado para ondas ao passar por duas fendas (ver figura 15). Portanto, neste caso, as partículas emitidas pela metralhadora não apresentam fenômenos de difração e interferência.

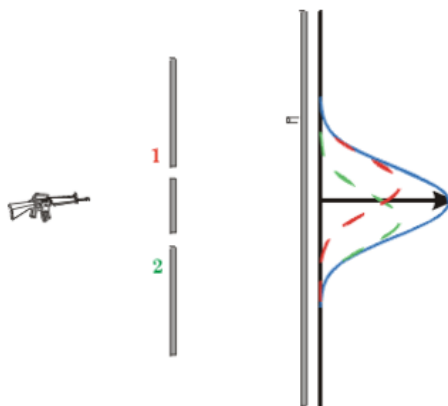


Figura 19 – Simulação de dupla fenda com partículas. Fonte <<http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>>

Mas, quando vamos para a escala atômica, um comportamento muito diferente é encontrado e nossa classificação não é adequada. A física clássica esperava que as partículas atômicas (elétrons, prótons, nêutrons e até mesmo átomos) comportasse sempre como partícula, contudo alguns experimentos mostraram que, os objetos atômicos podem experimentar fenômenos que são de características exclusivamente ondulatória, como a difração e a interferência (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013b; EISBERG; RESNICK, 1979).

Do mesmo modo que pensamos no nosso experimento de projétil, imaginamos agora, um canhão que possa emitir partículas em escalas atômicas, tais como elétrons. Os elétrons podem passar, pela fenda 1 e pela fenda 2, e atingir o anteparo como mostra na figura 20a. A distribuição de probabilidade, para os elétrons que passam pela fenda 1 e atinja o anteparo é representado por P_1 e para os elétrons que passam pela fenda 2 é representado por P_2 (ver figura 20b).

A figura 20c mostra a distribuição de probabilidade para os elétrons que passam pela fenda 1 e 2. Podemos notar, para os elétrons, o fenômeno de interferência, que classicamente está associado a ondas (ver

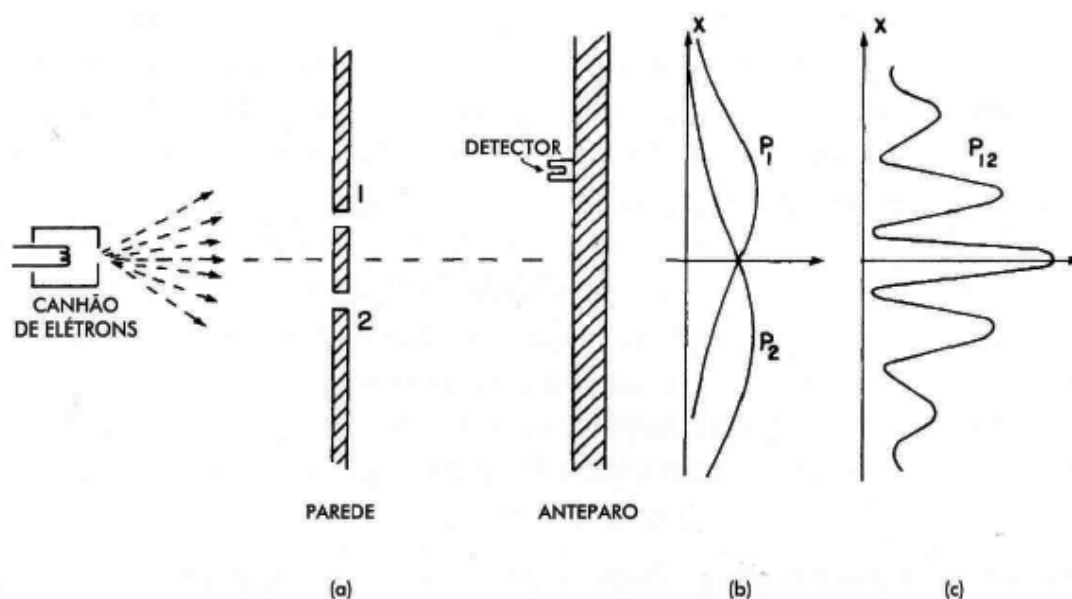


Figura 20 – Experimento de interferência com elétrons.

figura 15). Portanto, no experimento da dupla fenda, os elétrons não se comportam como partículas e pode passar por fenômenos que é exclusivamente de natureza ondulatória (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013b).

Para analisarmos as características de interferência de objetos quânticos, usaremos uma simulação disponível nos arquivos do projeto Phet e que pode ser baixada no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference> (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002).

Na figura 21, temos um revólver atirando elétrons (pode ser trocado por fótons, nêutrons ou átomos de hélio), o qual passam por uma dupla fenda antes de atingir uma tela. Clicando em *Copiar Tela*, aparecerá a tela que está localizada na parte inferior da figura. Nota-se que os elétrons sofrem interferência após passar pelas fendas, fazendo o mesmo padrão de interferência dos fenômenos ondulatórios (ver figura 15). Na figura 22 foi colocado um detector (observador) em uma das fendas. É importante observar, que ao colocar o detector, os elétrons não sofrem o fenômeno de interferência, passando a comportar como partícula. Na figura 23 temos uma comparação entre os dois resultados para o experimento da

dupla fenda com elétrons (na verdade com qualquer partícula quântica). A figura da parte superior foi obtida usando a simulação sem observador, enquanto na figura inferior foi colocado um detector para observar em qual fenda o elétron passava. O mesmo experimento pode ser feito, lançando um elétron de cada vez, basta ir na aba "Partícula única", chegando aos mesmo resultados discutidos anteriormente em que foi lançado vários elétrons ao mesmo tempo.

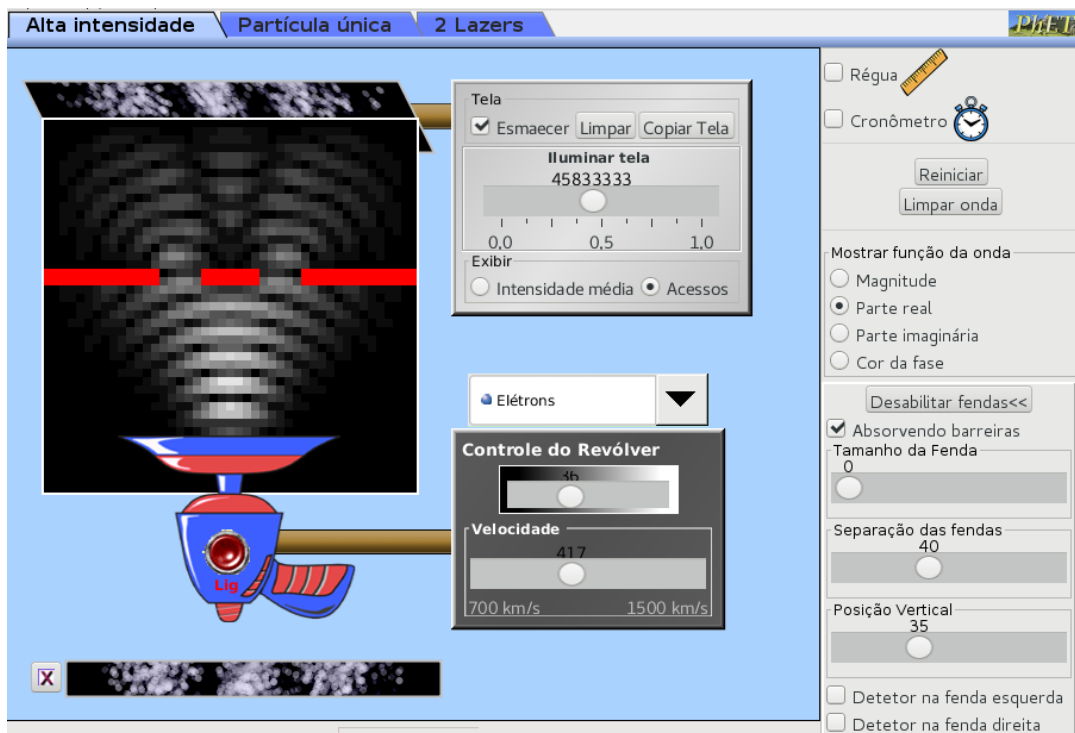


Figura 21 – Simulação da dupla fenda sem observador.

A partir das observações da simulação no experimento da dupla fenda para partículas quânticas, podemos destacar que:

- os elétrons chegam até a fenda como partículas (em mecânica quântica são representados por pacote de ondas), mas a probabilidade de chegada é distribuída como a distribuição de intensidade de uma onda. É, essencialmente, neste sentido que, nas palavras de Feynmann, "os elétrons se comportam algumas vezes como partícula e outras como onda" (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013b).

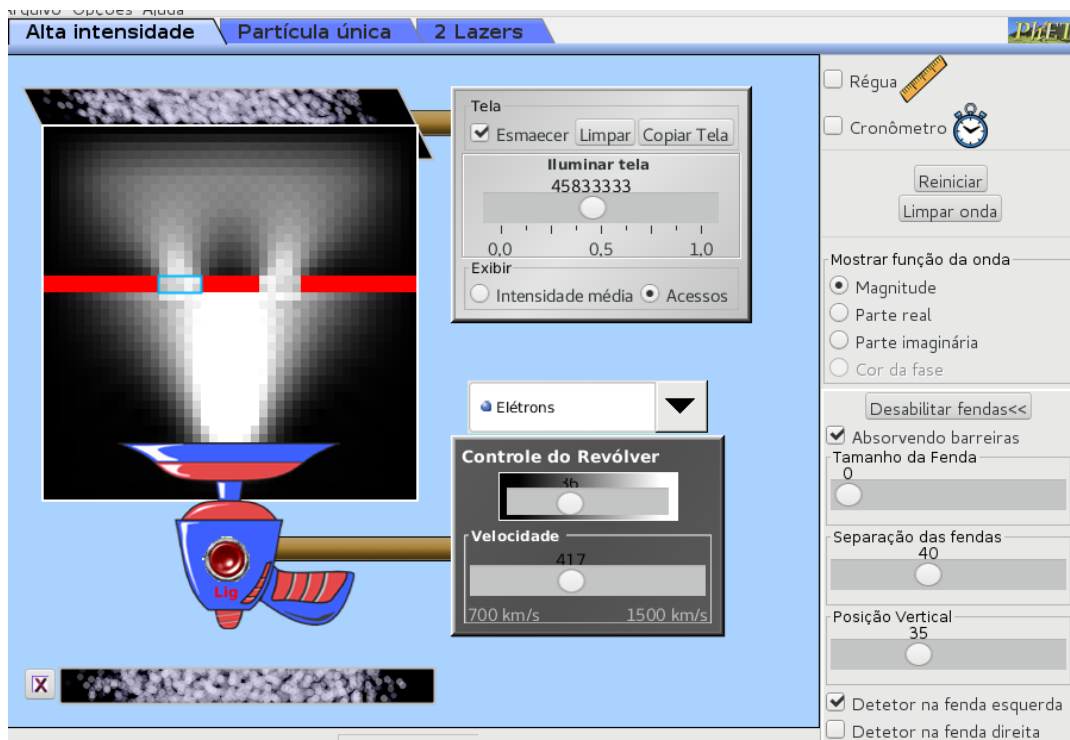


Figura 22 – Simulação da dupla fenda sem observador.

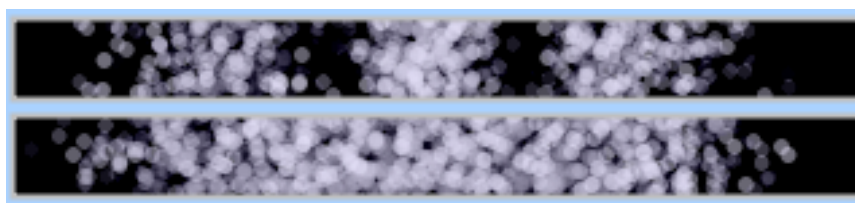


Figura 23 – Resultado da simulação da dupla fenda sem observador e com observador

- Podemos observar o padrão de interferência, que classicamente está associado a ondas, caso não esteja observando por qual das fendas o elétron está passando. Não se pode dizer por qual fenda o elétron passou.
- Se tentarmos descobrir por qual fenda o elétron passou, não detectaremos o padrão de interferência. Teremos sim o comportamento de partícula (como esperamos).
- Neste sentido (do item anterior), medir tem um efeito dramático em quântica. Seguindo Feynman, quando olhamos os elétrons, a

distribuição deles no anteparo é diferente da distribuição quando não olhamos (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013b).

Um pouco de história

- <https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/>
- The Nobel Prize in Physics 1937 $\Rightarrow$ laureados Clinton Joseph Davison e George Paget Thomson "for their experimental discovery of the diffraction of electrons by crystals"
- O experimento de Davison e Germer (ha um simulador PHET para estes experimento) foi realizado em 1927 $\Rightarrow$ eles conseguiram comprovar a natureza ondulatória dos eletrons utilizando cristais de níquel.
- O motivo do uso de cristais $\Rightarrow$ fenda que podia produzir o efeito.
- Outras medidas com eletrons $\Rightarrow$ C. Jonsson, Z. Phys. 161. 454 (1961); Am. J. Phys. 42. 4 (1974)
- Outras medidas com neutrons $\Rightarrow$ A. Zeilinger et al., Rev. Mod. Phys. 60. 1067 (1988)
- Outras medidas com atomos $\Rightarrow$ O. Carnal e J. Mlynek, Phys. Rev. Lett. 66. 2689, (1991)
- Outras medidas com fotons $\Rightarrow$ X. Y. Zou, L. J. Wang e L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 67. 318 (1991)
- Outras medidas com eletrons $\Rightarrow$ E. Burks et al, Nature 391. 871 (1998)

Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um fenômeno que consiste na emissão de elétrons de metais, após incidência de radiação eletromagnética sobre sua superfície. Parte da energia da radiação é transformada em energia cinética dos elétrons emitidos. Esse fenômeno foi observado experimentalmente, pela primeira vez em 1887, por Heinrich Hertz (EISBERG; RESNICK, 1979).

Usaremos a simulação, do Phet, para o efeito fotoelétrico baixado no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric> (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2002). Ao abrir a simulação é mostrada a figura 24. Faz-se vácuo através de um invólucro de vidro. Em (2) tem-se um metal, o qual pode ser modificado no botão (6). As opções são: sódio, zinco, cobre, platina, cálcio e magnésio. Em (1), temos uma fonte de radiação eletromagnética cuja frequência e intensidade são ajustáveis utilizando os controles tipo "sliders". Também é possível ajustar a diferença de potencial, V , entre os eletrodos (ver item 3, figura 24). Ao irradiar o metal, elétrons poderão ser emitidos (4) e, em algumas situações, produzirão corrente elétrica que pode ser detectada por um amperímetro colocado em (5).

Classicamente, era esperado para o efeito fotoelétrico que:

- o efeito deveria acontecer para qualquer frequência de radiação,

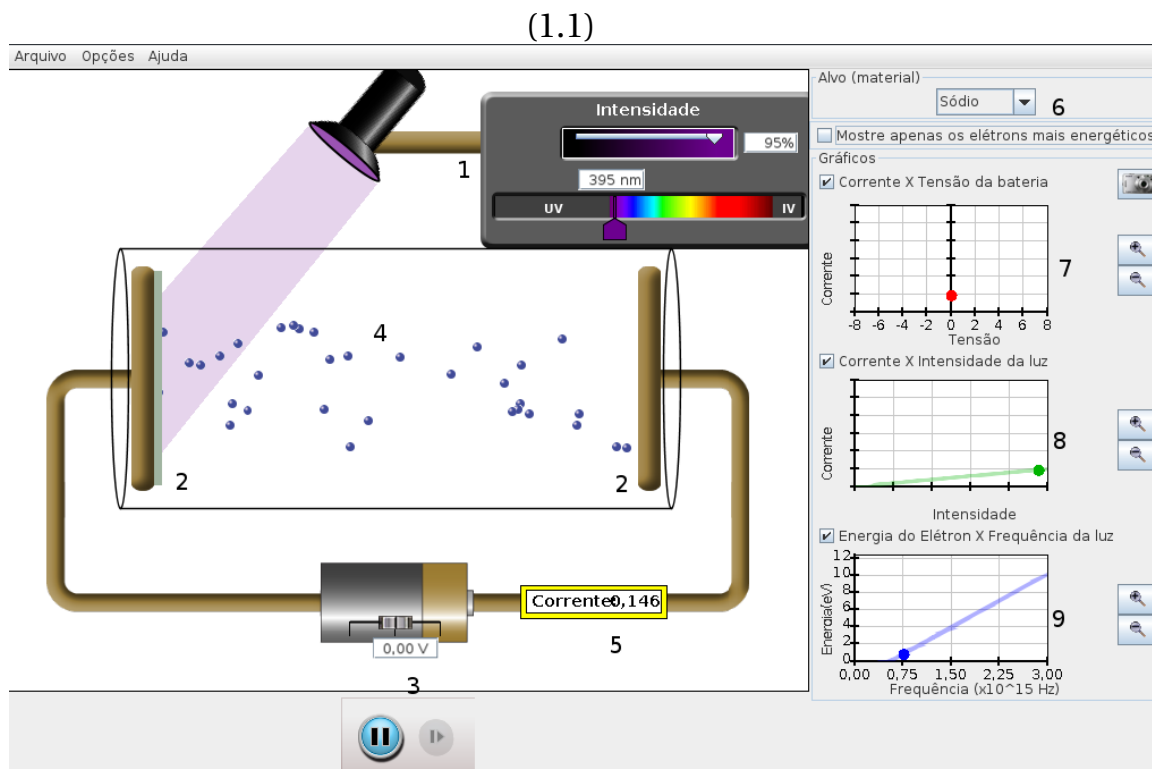


Figura 24 – Simulação de um arranjo experimental para investigação do efeito fotoelétrico.

pois, classicamente, as ondas eletromagnéticas transportam energia e a quantidade de energia transportada é diretamente proporcional à intensidade e independente da frequência (os elétrons são colocados em oscilação forçada sobre o efeito do $\vec{E}$ da onda incidente);

- radiação de qualquer frequência deveria ejetar elétrons de uma superfície metálica, desde que houvesse tempo suficiente para que o elétron absorvesse energia para ser ejetado;
- a energia cinética dos elétrons deveria aumentar com a intensidade da onda eletromagnética incidente;

A partir da manipulação da simulação do efeito fotoelétrico, alterando a intensidade e a frequência da radiação, a diferença de potencial e o tipo de metal que será irradiado, podemos chegar a alguns resultados que foram verificado experimentalmente(NUSSENZVEIG, 1998):

- para valores de frequência e intensidade de radiação definidos e para um dado material,
 - aumento da intensidade da radiação não modificava a energia dos elétrons emitidos;
 - o aumento da intensidade da radiação faz com que mais elétrons sejam emitidos, porém com a mesma energia cinética;
 - o aumento da intensidade da radiação faz com que a corrente elétrica também aumente (observe que intensidade de corrente e a intensidade da radiação eletromagnéticas são diretamente proporcionais - gráfico 8 da figura 24).
- para valores de frequência e intensidade de radiação definidos e para um dado material,
 - a atribuição de um valor negativo de voltagem produz diminuição na intensidade de corrente elétrica (freamos os elétrons);
 - há um valor de potencial negativo, **potencial de retardo**, para o qual a intensidade de corrente elétrica é nula;
- ao aumentar a frequência da radiação, a energia dos elétrons também sofrerá aumento (gráfico 9 da figura 24).
- observa-se que o **potencial de retardo** varia quando a frequência varia (o valor aumenta com o aumento da frequência);
- o efeito fotoelétrico não acontece para qualquer frequência de radiação;
- apenas a partir de certa frequência ocorre emissão de elétrons, não importando a intensidade da radiação;
- para aumentar a velocidade dos elétrons emitidos, é necessário irradiar a placa com radiações de frequências maiores e, consequentemente, energias mais elevadas e, finalmente,
- o **potencial de retardo** para uma dada frequência, varia se trocamos o material escolhido para observar o efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico foi explicado por Albert Einstein, em 1905, e por esse feito ele recebeu o prêmio Nobel de Física de 1921. Einstein partiu da ideia que a luz fosse quantizada em pacotes de energia e se inspirou na proposta de Plank. Com a ousadia que lhe era peculiar, propôs que a luz poderia ser modelada como formada por quanta ou "pacotes" cuja energia seria dada por:

$$E_{fóton} = h\nu \quad (4.1)$$

Em que $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ é a constante de Plank e ν é a frequência da radiação. Para Einstein, as radiações eletromagnéticas comportam, não apenas como ondas contínuas, mas também como feixes discretos de energia chamados de fótons e que respeitam a equação 4.1. Por exemplo, devido ter uma maior frequência, um fóton da luz azul possui mais energia do que um fóton da luz vermelha. O fóton age como uma partícula e, ao atingir um elétron do átomo, atua como uma "bola de bilhar" colidindo e arremessando os elétrons para fora do metal. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a probabilidade de colisão entre fótons e elétrons, fazendo com que aumente o número de elétrons ejetados. Nesse sentido, podemos dizer que a luz pode se comportar como partícula. Assim como elétrons têm comportamento dual, como no experimento da dupla fenda, a luz também pode ter esse comportamento. No experimento da dupla fenda a luz passa pelo fenômeno de interferência tendo propriedades ondulatórias. No efeito fotoelétrico a luz tem comportamento de partículas, atuando como "bola de bilhar" e arremessando elétrons para fora do átomo.

O elétron possui uma energia potencial elétrica de ligação com o núcleo, e para retirar um elétron do átomo é necessário fornecer uma energia maior do que a energia entre elétron-núcleo. A energia de ligação do elétron depende da distância dele ao núcleo, portanto para elemento químico, teremos energia de ligação diferente. A energia mínima para remover um elétron do metal, energia de corte, é chamada de função trabalho e dada por:

$$W = hf_0 \quad (4.2)$$

Em que f_0 é a frequência de corte, que depende do material que será irradiado. Portanto, a energia cinética de cada elétron emitido, é obtido pela equação:

$$E_{cinética} = E_{fóton} - W = hf - W \quad (4.3)$$

Exemplo:

Calcule a energia cinética de um elétron ejetado de uma superfície metálica composta por átomos de rubídio, quando a mesma é irradiada com luz de comprimento de onda igual a 300 nm. A energia mínima necessária para arrancar um elétron dessa superfície é 2,14 eV. Dados: Constante de planck $h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$ e velocidade da luz $v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Resolução:

A frequência da luz pode ser obtida pela equação $v = \lambda f$, em que v é a velocidade da onda, e λ é o comprimento de onda, portanto

$$v = \lambda f \implies 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \times 10^{-9} \text{ m} \times f$$

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{3 \times 10^{-7} \text{ m}}$$

$$f = 1 \times 10^{15} / \text{s}$$

A energia de um fóton é dada pela equação 4.1

$$E_{fóton} = hf \implies E_{fóton} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s} \times 1 \times 10^{15} / \text{s}$$

$$E_{fóton} = 4,14 \text{ eV}$$

Portanto, de acordo com a equação 4.3, a energia cinética de cada elétron emitido será:

$$E_{cinética} = E_{fóton} - W \implies E_{cinética} = 4,14 \text{ eV} - 2,14 \text{ eV}$$

$$E_{cinética} = 2,00 \text{ eV}$$

o efeito fotoelétrico está presente em diversas tecnologias atuais. Como por exemplo:

- nas células fotoelétricas utilizadas nas portas dos elevadores para fechar automaticamente.

- nos fotômetros - medidor de luminosidade que fotógrafos usam para decidir em que condições a fotografia deve ser tirada <<http://efisica.if.usp.br/optica/basico/fotons/cotidiano/>>.
- a partir do efeito fotoelétrico desenvolveu-se o cinema falado, assim como a transmissão de imagens animadas (televisão) <<https://dfte.ufrn.br/caio/index.html>>.
- aparelhos com funcionamento baseado no efeito fotoelétricos permitiu construir maquinaria capaz de produzir peças sem intervenção alguma do homem e acender e desligar automaticamente a iluminação de ruas, abrir e fechar portas de lojas, etc <<https://dfte.ufrn.br/caio/index.html>>.

4.1 O efeito fotoelétrico nas portas automáticas

Uma das diversas aplicações do efeito fotoelétrico é o funcionamento de sensores, presentes em portas automáticas e que têm como componente o que se denomina as células fotoelétricas. As células fotoelétricas são dispositivos capazes de transformar energia luminosa em energia elétrica, podendo ativar ou desativar circuitos elétricos. É composta por duas placas metálicas (cátodo e um ânodo) no interior de um vidro na qual se faz vácuo (ver figura 25). O cátodo é revestido de uma fina camada de um metal alcalino. Quando a radiação incide sobre o metal alcalino, elétrons são liberados (efeito fotoelétrico) e atraídos pelo ânodo no qual se fecha o circuito e o amperímetro (A) indica uma corrente. Ao parar de incidir radiação, o cátodo para de emitir elétrons e cessa a corrente no amperímetro, abrindo o circuito.

Dispositivos que utilizam células fotoelétricas, como portas eletrônicas e sensores de proximidades, emitem radiação infravermelho e, quando um objeto entra no alcance da radiação, o dispositivo mede os fótons que foram refletidos pelo objeto acionando o circuito elétrico e ativando o aparelho, ou seja, a radiação refletida pelo objeto que se encontra próximo ao dispositivo incide no cátodo, promovendo liberação dos elétrons e ativando o circuito.

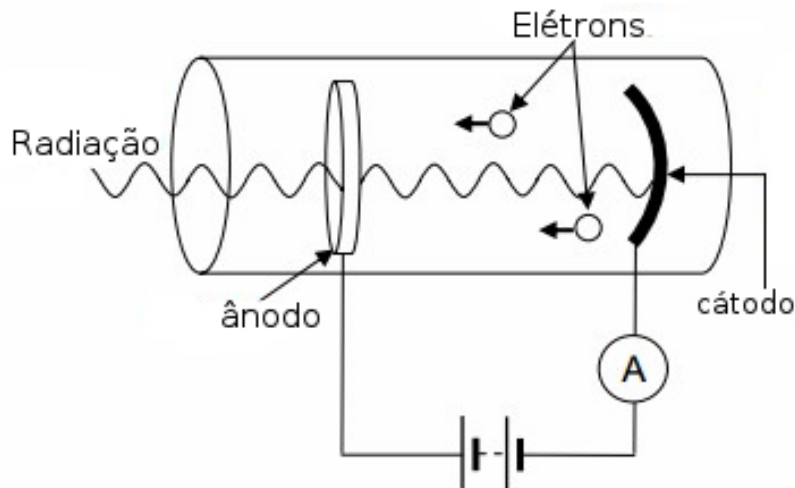


Figura 25 – Célula fotoelétricas. Imagem retirada e modificada de <http://www.smartlearner.mobi/science/VideoPastPapers/PhotoElectricEffect/PhotoElectricEffect.htm>

Exercícios

1. A energia necessária para que um elétron seja removido do sódio é de $2,3\text{ eV}$.
 - a) Qual o comprimento de onda de corte para a emissão fotoelétrica do sódio?
 - b) O sódio apresenta efeito fotoelétrico para a luz amarela, com $\lambda = 589\text{ nm}$?
2. Quais características experimentais do efeito fotoelétrico podem ser explicadas classicamente? Quais não podem?
3. Quais foram os argumentos de Einstein para introduzir o conceito de fótons e como ele explicava as falhas na teoria clássica?
4. O comprimento de onda limite para o potássio é de 558 nm . Qual é a função trabalho para o potássio? Qual é a energia cinética dos elétrons emitidos pelo potássio ao irradiá-lo com luz de comprimento de onda de 400 nm ?

Princípio da incerteza de Heisenberg

O princípio da incerteza, formulado em 1927 por Werner Heisenberg, constitui-se em um dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Heisenberg propõe que quanto maior for a precisão na medida da posição de uma partícula, menor será a incerteza de seu momento linear e vice-versa ([FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013a](#)).

Matematicamente falando:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2 \quad (5.1)$$

Em que x é posição da partícula, p o momento linear em um dado instante e $\hbar$ é a constante de Planck dividido por 2π . De acordo com o princípio, o produto das incertezas na posição e no momento linear em qualquer instante deve ser maior do que a constante do lado direito de [5.1](#). Esse princípio assegura um limite, não só na precisão da posição e momento linear, mas em outros pares de propriedades de uma dada partícula física (por exemplo energia e tempo), ou seja, quanto mais precisamente conhecemos um desses valores, menos sabemos exatamente o outro.

Para entendermos melhor o significado do foi expresso em 5.1, vamos retornar à simulação de interferência quântica utilizada para difração de elétrons no capítulo 3 (<https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference>). Porém agora, utilizaremos fótons. Devemos imaginar que há uma placa que nos permite observar o efeito fotoelétrico e que seria um anteparo para a luz. Quando analisamos a distribuição dos pontos de onde os fótons-elétrons são emitidos, o caráter ondulatório está evidente na tela da figura 26.

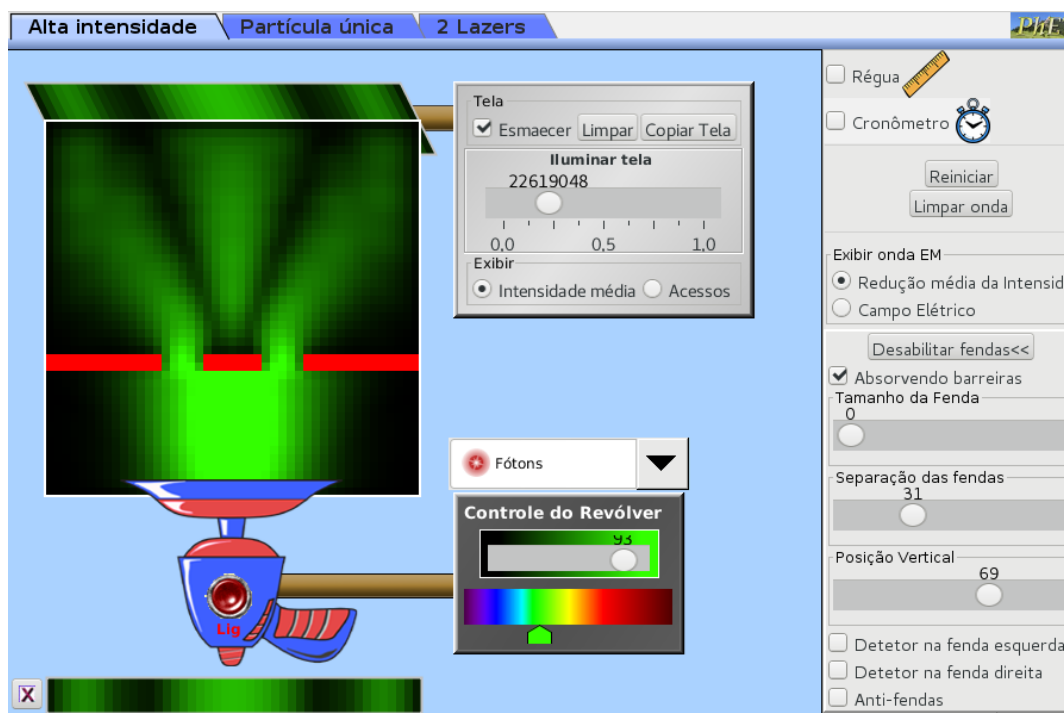


Figura 26 – Simulação da dupla fenda utilizando fótons e sem detector

Considerando que a radiação é quantizada, imagine que você tente detectar por qual das fendas os fótons passarão. Pode-se colocar um detector em cada uma das fendas. Tendo por base o Princípio da Incerteza, podemos afirmar que a interação entre fóton e o detector perturbará o momento do fóton (que podemos relacionar com o comprimento de onda) e destruiremos a figura de interferência. Ou seja, tentamos evidenciar o caráter corpuscular e não se pode observar o caráter ondulatório (ver figura 27).

Assim sendo, é possível em um experimento evidenciar o comportamento ondulatório, mas no mesmo experimento, se tentarmos evi-

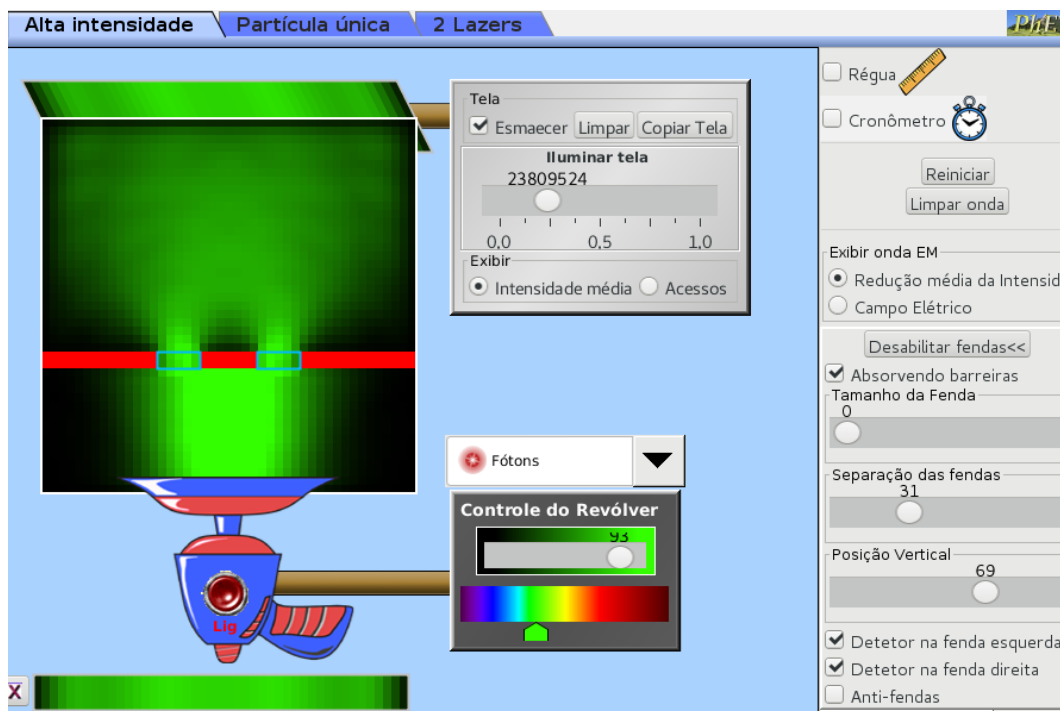


Figura 27 – Simulação da dupla fenda utilizando fótons e com detectores

denciar o comportamento corpuscular, o ondulatório irá desaparecer. É impossível, no mesmo experimento, observar a natureza dual por causa do Princípio da Incerteza. Se pensarmos na Mecânica Clássica, mas considerando o Princípio da Incerteza, podemos chegar a conclusões interessantes. Utilizando as Leis de Newton e conhecendo com exatidão a posição e o momento de uma partícula em instante de tempo, podemos prever o comportamento do sistema. Na Mecânica Quântica, não podemos conhecer a posição e o momento de uma partícula em instante de tempo com precisão por causa do Princípio da Incerteza. Como consequência, não podemos determinar o comportamento **provável**. Como ninguém encontrou uma forma de burlar o Princípio da Incerteza, até onde sabemos este princípio expressa o que entendemos ser uma característica da natureza. A partir destes experimentos, só falamos em probabilidade de diferentes eventos, não mais falamos em o que ocorrerá em uma dada circunstância. Tudo o que temos a fazer é calcular probabilidades. Parece que é assim que a natureza é! E, obviamente, uma mudança de paradigma em relação à Clássica! (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2013b; EISBERG; RESNICK, 1979).

O Átomo de Bohr

No início do século XX, conheciam-se três fatos importantes acerca dos átomos: eram formados por partículas carregadas negativamente (elétrons), eram eletricamente neutros, tinham dimensões microscópicas (estamos falando de dimensões da ordem de 10^{-10} m) e tinham massas muito maiores que a massa dos elétrons (NUSSENZVEIG, 1998). J. J. Thompson, responsável pela descoberta do elétron, propôs um modelo para o átomo: uma esfera que seria uma nuvem positivamente carregada e incrustada por elétrons. O modelo tinha problemas graves e podemos enumerar algumas dificuldades: como seria possível ionizar um átomo, como formar moléculas, como explicar a estabilidade do sistema (esta configuração não estaria em equilíbrio se não atuassem outras forças além das eletrostáticas) e, somado a isto, deve-se acrescentar algumas informações experimentais sobre um comportamento atômico curioso - o espectro atômico. Desde 1814, Joseph Ritter von Fraunhofer (Fraunhofer) e outros pesquisadores publicaram resultados de pesquisa que mostravam que o espectro solar obtido após fazer a luz do sol incidir sobre uma fenda e passar por um prisma não era contínuo, como esperado. O que se detectava era um espectro com linhas escuras (ver Figura 28) (imagem retirada de <<https://sunearthday.nasa.gov/2006/images/>>). Em 1859, Kirchhoff e Bunsen (NUSSENZVEIG, 1998) realizaram uma

série de experimentos e descobriram que poderiam identificar componentes de diferentes substâncias por meio do estudo do espectro de emissão deste (ver figura 29). Além disso, conseguiram explicar que as

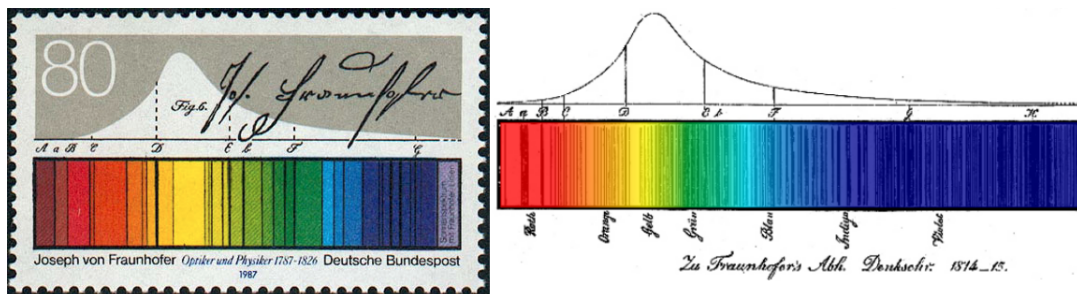


Figura 28 – Desenho do espectro solar feito por Fraunhöfer em 1814 e retirado dos endereços eletrônicos <<https://sunearthday.nasa.gov/2006/images/>> e <<http://faculty.virginia.edu/ASTR3130/lectures/spectroscopy/spec.html>>. Vê-se com clareza as linhas escuras identificadas nas diferentes regiões do espectro solar.

linhas escuras identificadas por Fraunhofer originavam da absorção da radiação por elementos presentes na atmosfera terrestre (NUSSENZ-VEIG, 1998). Para citar um exemplo, identificou-se nos experimentos as linhas denominadas D pertencia ao Na (ver figura 29). O que fica evidente dos experimentos é que elementos distintos têm espectro distinto. Assim, podemos associar o espectro atômico com a identidade dos elementos químicos da mesma forma que associamos indivíduos com a digital. Com estas informações, o modelo de Thompson, certamente não poderia explicar o espectro discreto atômico.

Para que tenhamos melhor compreensão da história, vamos tentar obter um espectro experimental com um simulador computacional, baixado do site do Phet no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom>, para o átomo de hidrogênio e cuja tela principal está na figura 30. Este simulador nos permitirá observar algumas características discutidas anteriormente e permite visualizar tanto resultados de experimentos quanto aqueles preditos pelos diferentes modelos atômicos. Após abrir a simulação, selecionando a aba "Experimento", teremos (ver figura 30) as seguintes opções:

1. caixa de hidrogênio;

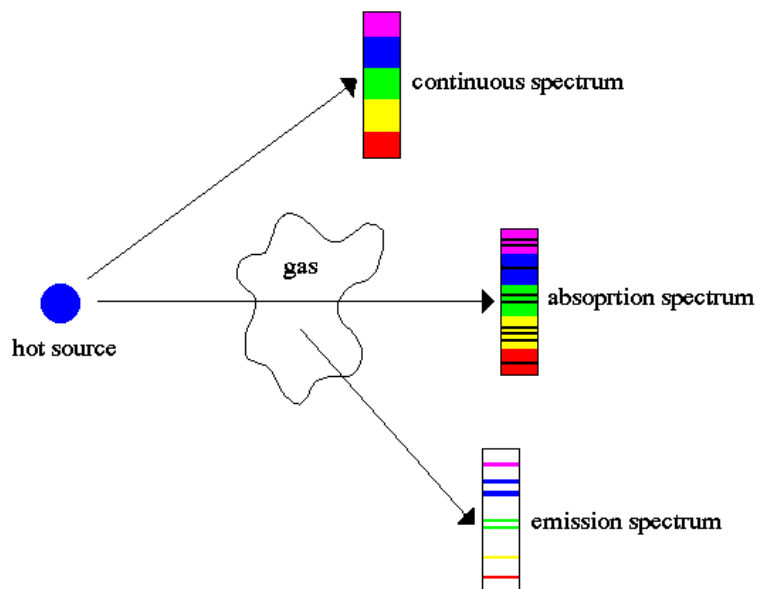


Figura 29 – Espectro para um gás e para um corpo (imagem retirada do endereço eletrônico <http://www.gb.nrao.edu/GBTopsdocs/primer/>).

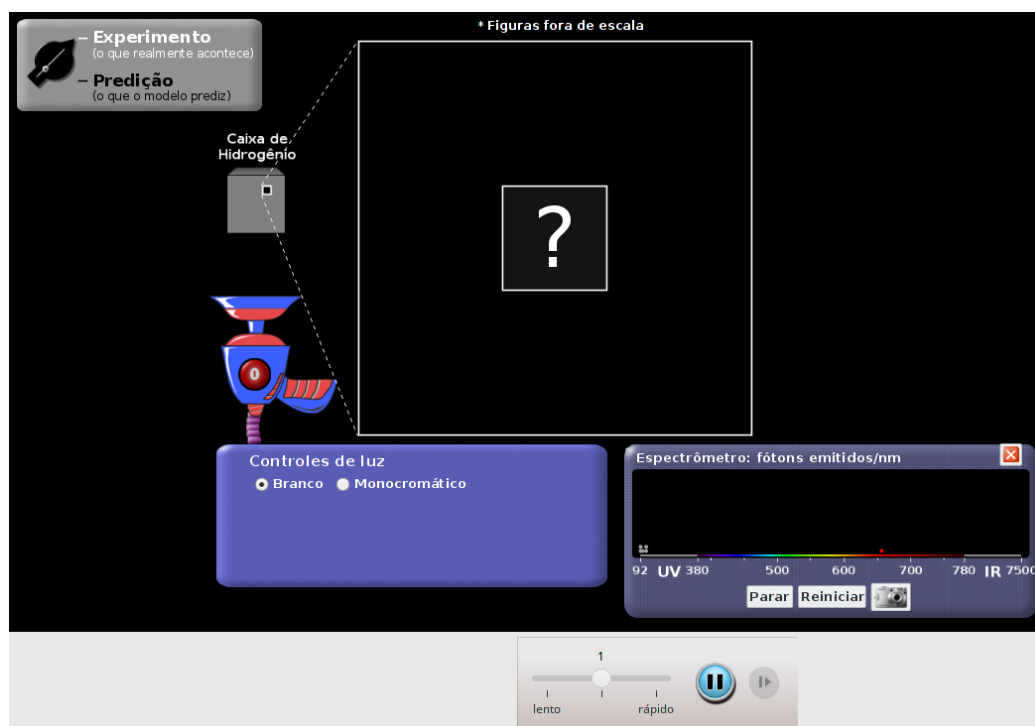


Figura 30 – Imagem da tela principal do simulador computacional para o átomo de hidrogênio.

2. caixa de hidrogênio ampliada;
3. controlador de luz, que permite fazer incidir radiação nos átomos de hidrogênio e
4. espectro atômico, no qual é possível identificar o comprimento de onda dos fótons associados às transições dos elétrons entre os estados estacionários permitidos.

Confira o resultado na figura 31 e compare com o esquema da figura 29. Note que, na janela de "espectrômetro" da figura 31, temos faixas, dos fótons emitidos, que se assemelham com o espectro de emissão (emission spectrum) da figura 29.

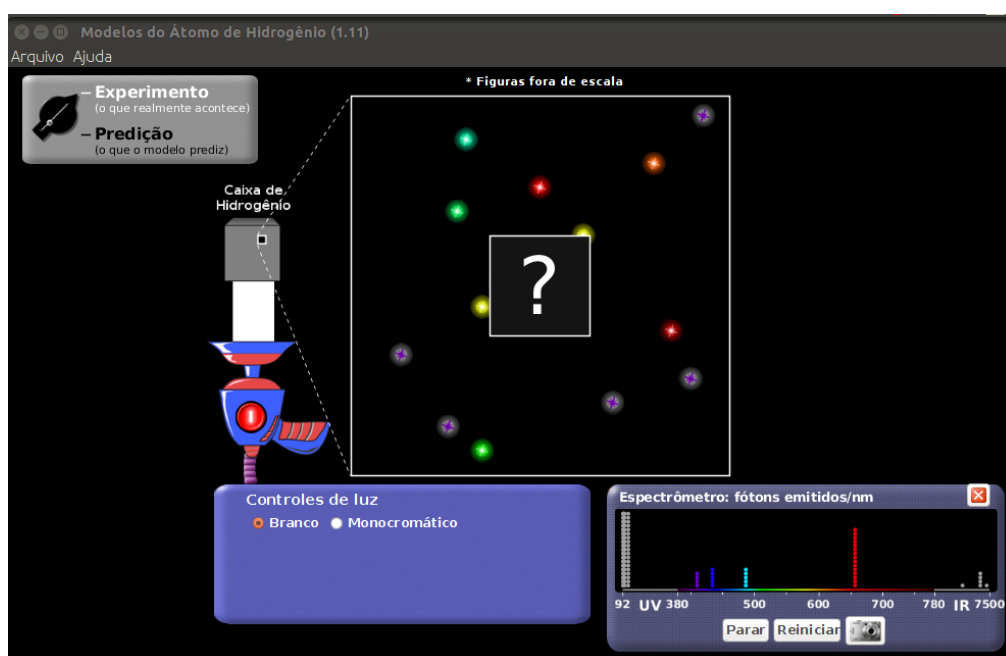


Figura 31 – Imagem da tela principal do simulador computacional com o espectro experimental para o átomo de hidrogênio.

Com este cenário, em 1909, Ernest Rutherford, através de experimentos utilizando um emissor de partículas alfas (composta por dois prótons e dois nêutrons - íons de He), um contador geiger e uma fina lâmina de ouro tentou detectar os ângulos de espalhamentos. Um esquema do equipamento e o resultado esperado pelo modelo de Thompson está esquematizado na figura 32. Para surpresa de todos, uma parcela extremamente pequena de partículas eram refletidas (retroespalhamento).

Analisando os resultados experimentais, Rutherford propôs que os átomos consistiam em uma nuvem de elétrons carregado negativamente que envolvia um pequeno núcleo, denso e com carga positiva.

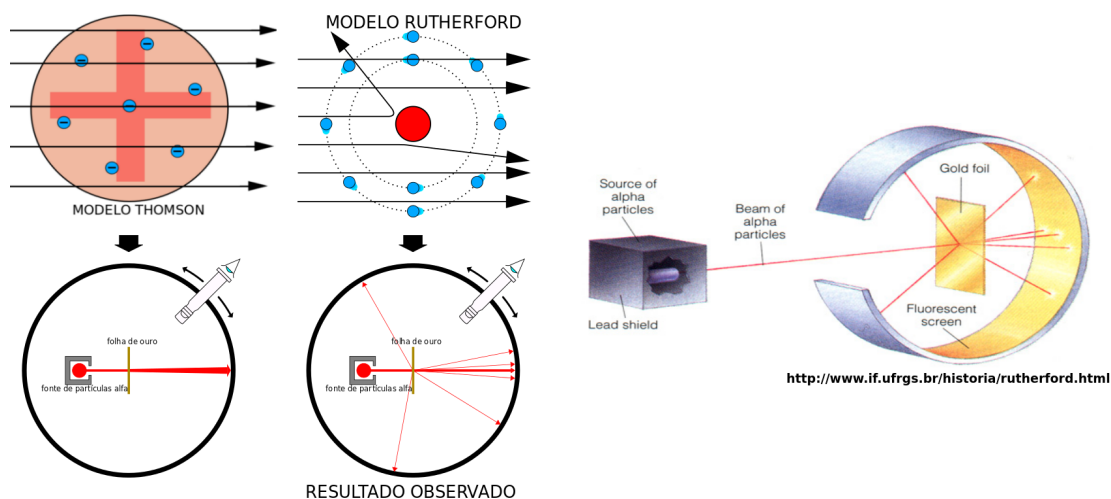


Figura 32 – Esquema do experimento de Rutherford com os respectivos resultados esperados no modelo de Thompson e o modelo concebido por Rutherford para explicar os dados experimentais (imagens adaptadas do endereço eletrônico <<https://en.wikipedia.org/wiki/>>).

Rutherford propôs um modelo atômico, semelhante ao sistema planetário e no qual os elétrons orbitam o núcleo através de uma força eletrostática do mesmo modo que os planetas orbitam o sol devido a força gravitacional. No entanto, o modelo atômico do sistema planetário tem graves problemas. De acordo com a mecânica clássica, os elétrons acelerados, sendo aqueles em órbitas circulares um exemplo, deveriam emitir radiação eletromagnética enquanto orbitavam o núcleo (ver figura ??). Portanto, o elétron perderia energia e teria uma trajetória espiral, colapsando sobre o núcleo em um intervalo de tempo muito pequeno. Este modelo atômico é catastrófico, pois prevê que todos os átomos são instáveis. Caso queira visualizar o que este modelo prever, retorne ao nosso simulador e selecione a aba "Predição" (ver figura 30). O resultado do espectro para o modelo de Rutherford (sistema solar clássico) foi colocado na figura 34 (o resultado é aquele do esquema mostrado na figura 33).

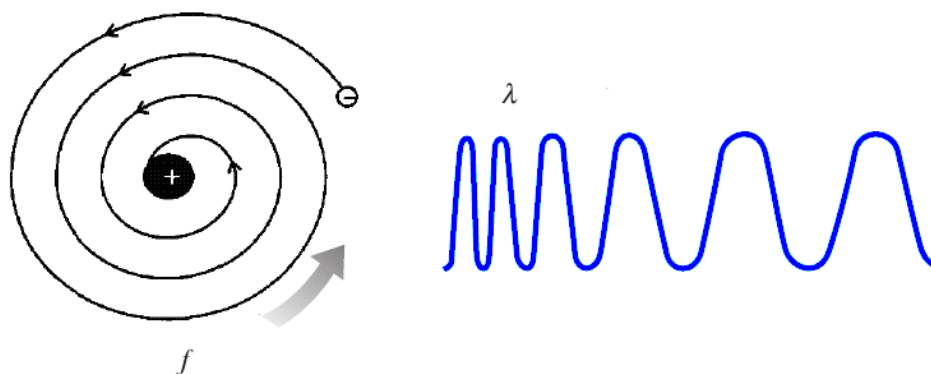


Figura 33 – Modelo planetário de Rutherford e a contínua emissão de radiação eletromagnética do elétron que fatalmente o levaria a colapsar sobre o núcleo atômico.

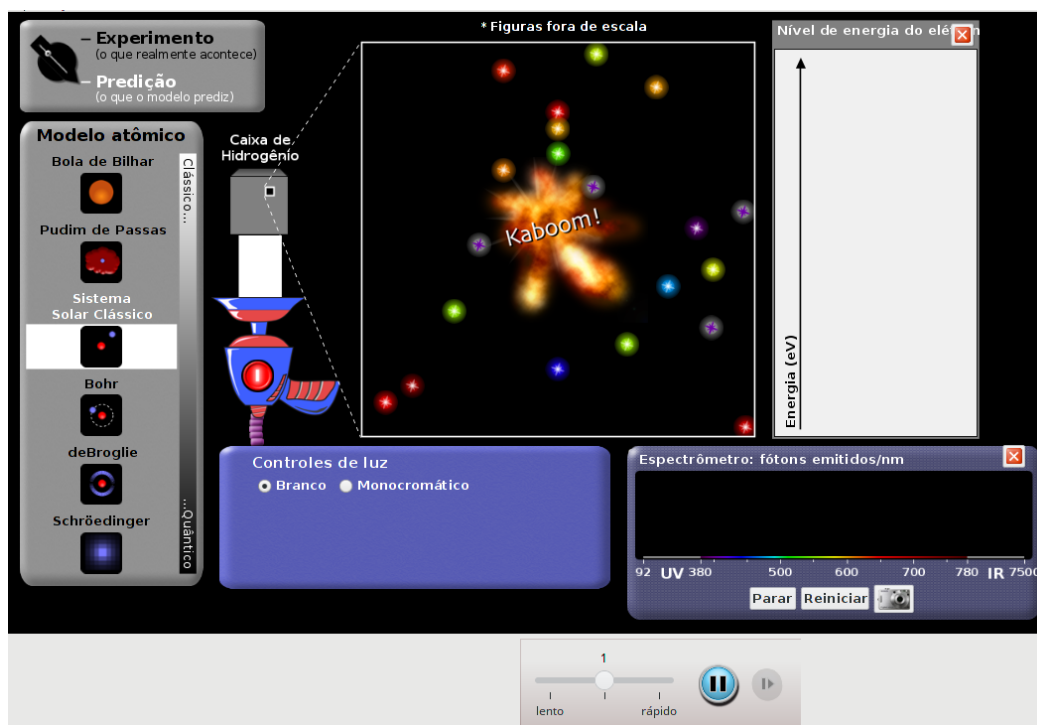


Figura 34 – Simulação para o átomo de hidrogênio.

Continuando suas investigações acerca dos modelos atômicos, teste o modelo de Thompson, discutido no início da seção. Ficará claro que neste modelo, apenas uma frequência de vibração é permitida. Os demais modelos serão discutidos posteriormente.

O físico dinamarquês Niels Bohr, em 1912, resolveu o problema do

átomo de Rutherford. Para explicar as órbitas dos elétrons em torno do núcleo, Bohr enunciou quatro postulados. Apesar de não justificar seus postulados e nem encontrar motivos para eles, os resultados previstos pela teoria de Bohr aproximavam de forma surpreendente dos dados experimentais para o espectro atômico do átomo de hidrogênio. Nas palavras de Bohr: "aqui estão algumas leis que parecem impossíveis, porém elas realmente correspondem ao modo como os sistemas atômicos parecem funcionar, de forma que vamos usá-las". Eis os Postulados de Bohr:

1. Elétrons movem-se em trajetórias circulares ao redor do núcleo sob a ação da força de Coulomb para cargas puntiformes de sinais opostos;
2. O raio da trajetória do elétron não pode ter qualquer valor. As órbitas permitidas, são aquelas nas quais

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (6.1)$$

sendo L o momento angular, h é a constante de Planck e n assume valores inteiros $n = 1, 2, 3, \dots$. Os raios das órbitas permitidas para o elétron são dados por

$$r_n = r_0 n^2 = (0,529177 \times 10^{-10} \text{ m}) n^2 \quad (6.2)$$

em que r_0 é uma constante conhecida como raio de Bohr e o número inteiro n identifica a órbita permitida. Portanto, só é possível encontrar o elétron em órbitas cujos raios são 1, 4, 9, 16, ... vezes o raio de Bohr.

3. Nas órbitas permitidas o elétron é estável e não emite e nem absorve radiação.
4. O elétron pode transitar entre órbitas permitidas (estados estacionários) por meio de processos de emissão/absorção de radiação. Se o elétron for de uma órbita mais interna para outra mais externa, absorve radiação. Caso o processo envolva mudança de uma órbita mais externa para outra mais interna, envolve emissão de radiação. O fóton emitido tem frequência definida por

$$f_{emitido} = \frac{E_i - E_f}{h}, \quad (6.3)$$

em que E é a equação de Planck (equação 4.1) para energia de um fóton e que foi utilizada por Einstein para o efeito fotoelétrico.

Na equação 6.2, introduzimos um valor numérico para o raio de Bohr. Não demonstraremos o cálculo do valor, mas, é possível mostrar, que só depende de constantes fundamentais. O cálculo do valor de r_0 pode ser feito utilizando a Segunda Lei de Newton, a Lei de Coulomb e a quantização do momento angular (equação 6.1). Também podemos utilizar nosso conhecimento sobre energia potencial e cinética para obter a energia para cada uma das órbitas permitidas.

Segundo Bohr, quando o único elétron do átomo de hidrogênio está localizado na órbita mais próxima do núcleo, ele possui o seu valor mínimo de energia ($n=1$, ver figura 35a retirada da fonte <<https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo>>). Nesse caso, o átomo encontra-se no seu estado fundamental. O elétron pode mudar para outra órbita mais afastada do núcleo se receber uma certa quantidade de energia de valor definida pela diferença entre os valores das energias da órbita final e inicial. A figura 35b, mostra os valores correspondentes as órbitas possíveis para o átomo de hidrogênio. Por exemplo, para o elétron ir da órbita $n=1$ para a órbita $n=2$ ele precisa receber uma quantidade de energia dada por $\Delta E = -3,4\text{eV} - (-13,6\text{eV}) = 10,2\text{eV}$. Quando isso ocorre, o átomo sai do seu estado fundamental e passa para o estado excitado. Ao receber energia suficiente para sair do estado fundamental para o excitado, o elétron retorna espontaneamente à sua órbita fundamental, emitindo a mesma quantidade de energia que absorveu para ir para o estado excitado. Quando ocorre essa mudança de órbita, dizemos que houve um salto quântico de energia.

Para ionizar o átomo de hidrogênio, isso é, separar o elétron do seu núcleo, é necessário fornecer energia suficiente para o elétron ir para uma órbita onde n tende ao infinito e cuja energia de ligação é igual a zero (ver figura 35b). Portanto, para ser ionizado o átomo precisa receber uma variação de energia igual a $\Delta E = 0 - (-13,6\text{eV}) = 13,6\text{eV}$.

6.1 O espectro do hidrogênio

Uma das grande contribuição do modelo atômico de Bohr foi a explicação das raia do espectro de hidrogênio, tópico que discutimos no início

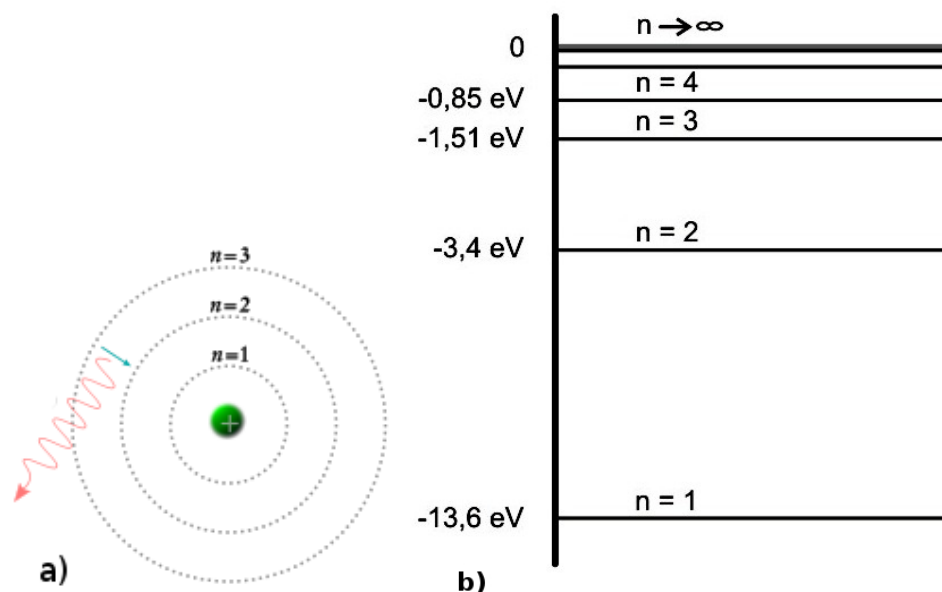


Figura 35 – Modelo atômico de Bohr para átomo de H e o espectro de energia

do capítulo (ver Figura 29). Além de ser o elemento mais leve, o hidrogênio é o que tem o espectro mais simples, possuindo apenas quatro raias que são **visíveis** aos nossos olhos (ver figura 36, retirada da fonte <<http://scottscience.weebly.com/unit-03---atomic-theory-and-structure.html>>, e compare com o resultado do nosso simulador operando no modo experimental, como mostrado na figura 31).



Figura 36 – Espectro de hidrogênio para a região do visível (compare com o resultado do nosso simulador operando no modo experimental, como mostrado na figura 31). Retirada da fonte <<http://scottscience.weebly.com/unit-03---atomic-theory-and-structure.html>>

Utilizando as equações do modelo de Bohr, a raia vermelha é obtida quando o elétron se encontra no estado excitado de órbita $n=3$ e passa

para o estado excitado de órbita $n=2$. Nesse salto quântico, a energia do átomo irá diminuir em um valor $\Delta E = -1,51\text{eV} - (-3,4\text{eV}) = 1,89\text{eV}$. O átomo irá emitir essa energia na forma de um fóton ou quantum de radiação. E, nesse caso, a frequência desse fóton, com essa energia, tem exatamente a mesma frequência da raia vermelha do espectro do hidrogênio. As outras raias visível são obtidas quando o elétron se encontra no níveis $n= 4, 5$ e 6 e vai para o nível $n=2$. As raias visíveis são conhecidas como série de Balmer (ver figura 37, retirada da fonte <<http://www.fq.pt/atomo/123-espectro-do-atomo-de-hidrogenio>>) por ter sido descoberta pelo físico suíço Johann Balmer. Além dessas raias, o hidrogênio possui outras que não estão dentro do espectro do visível. A figura 37 mostra, além da série de Balmer, as séries de Lyman e Paschen. A série de Lyman, se encontra na faixa do ultravioleta, corresponde aos

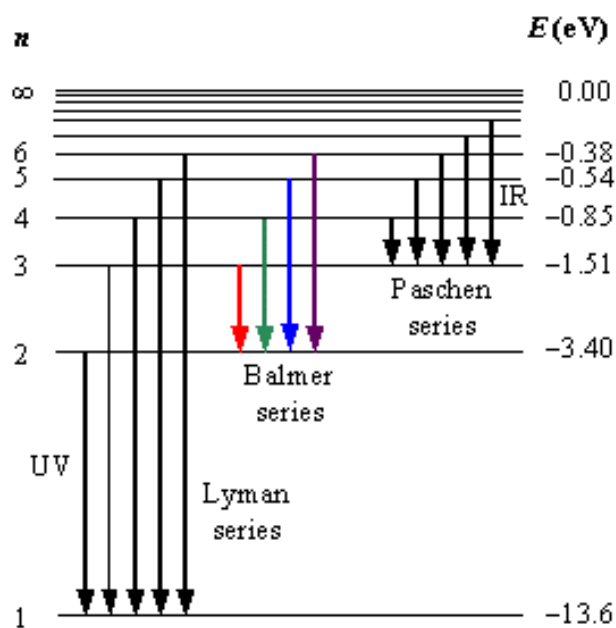


Figura 37 – Séries do átomo de hidrogênio. Retirada da <<http://www.fq.pt/atomo/123-espectro-do-atomo-de-hidrogenio>>

decaimentos de $n=2,3$, etc para $n=1$. A série de Paschen, que se encontra na faixa do infravermelho, corresponde aos saltos quânticos de $n= 4,5,6$, etc para $n=3$.

Retornando ao simulador computacional para o átomo de H, clique na aba "Predição" e selecione as opções "Bohr" e "diagrama de nível de

energia eletrônica". Inicie a simulação. Na figura 38, temos as previsões para o modelo de Bohr. De acordo com esse modelo, só algumas órbitas são permitidas e ao mudar de órbita o elétron pode absorver ou emitir fótons de radiação, o que pode ser observado no gráfico da direita. De acordo com Bohr, as linhas do espectrômetro, pode ser explicadas quando o elétron faz uma transição de um estado estacionário de maior energia para um estado estacionário de menor energia, liberando um fóton cujo frequência é dada na equação 6.3. As linhas espectrais são mostrada no gráfico inferior e correspondem as séries de Lyman (no ultravioleta), de Balmer (visível) e de Paschen (no infravermelho).

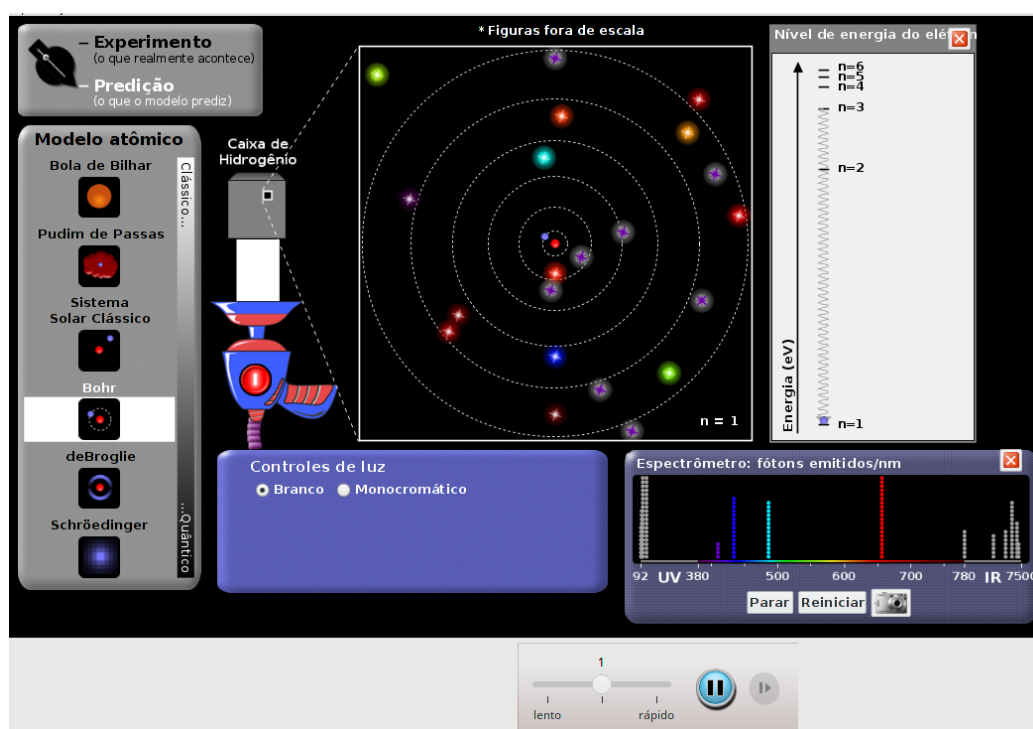


Figura 38 – Simulação para o átomo de hidrogênio.

6.2 Transição Eletrônica nos fogos de Artifício

Quando você vai a uma queima de fogos de artifício e admira explosões de diversas cores, na verdade o que você está admirando são elétrons saltando de níveis de energia (saltos quânticos). Por exemplo, a cor verde está associada ao elemento químico Bário e a cor vermelha ao Estrôncio. Ou seja, cada cor é resultado da transição eletrônica de um determinado elemento químico misturada à pólvora presente nos fogos

de artifício. No momento em que a pólvora sofre combustão, a temperatura aumenta e os elétrons dos átomos do elemento químico, misturado com a pólvora, ganham um fóton de energia fazendo com que ele vá do estado fundamental (nível mais interno de energia) para um estado excitado (nível mais externo). Ao voltar para o estado fundamental o elétron libera a mesma quantidade de energia (um fóton), que recebeu para ir para o estado excitado, em forma de radiação e com uma cor (frequência) característica. Para cada elemento químico teremos órbitas com níveis de energia de valores diferentes, por isso o fóton de energia emitido é diferente para cada elemento químico.



Figura 39 – Queima de fogos de artifícios. Imagem retirada de http://www.villaserbelloni.com/Bellagio/sv/magazineGHVS/82/un_capodanno_lungo_24.html

Abaixo temos alguns elementos químicos, bastantes utilizados em fogos de artifício, e as respectivas cores associadas às frequências da radiação liberadas nas transições eletrônicas desses elementos.

Bário: Verde

Cobre: Verde

Cálcio: Laranja

Sódio: Amarelo

Estrôncio: Vermelho

Zinco: Branco azulado

Alumínio, Titânio ou Magnésio: Prateado

Mistura de Estrôncio com Cobre ou Estrôncio com Potássio: Violeta

Mistura de Ferro e Carbono: Dourado

Exercícios

1. Escolha, dentre as alternativas, aquela que fornece as palavras corretas para preencher as lacunas vazias do enunciado relacionado ao modelo atômico estabelecido por Bohr.
 - Quando um elétron absorve certa quantidade de, salta para uma órbita mais Quando ele retorna à sua órbita original, a mesma quantidade de energia, na forma de
 - a) calor, energizada, libera, onda eletromagnética.
 - b) energia, energética, absorve, onda eletromagnética.
 - c) calor, energizada, absorve, luz.
 - d) energia, energética, libera, onda eletromagnética.
 - e) energia, externa, libera, luz.
2. (Cefet-PR) Um dos grandes mistérios que a natureza propiciava à espécie humana era a luz. Durante dezenas de milhares de anos a nossa espécie só pôde contar com este ente misterioso por meio de fogueiras, queima de óleo em lamparinas, gordura animal, algumas resinas vegetais etc. Somente a partir da revolução industrial é que se pôde contar com produtos como querosene, terebintina e outras substâncias. Mas, mesmo assim, a natureza da luz permanecia um grande mistério, ou seja, qual fenômeno físico ou químico gera luz. Somente a partir das primeiras décadas do século XX é que Niels Bohr propôs uma explicação razoável sobre a emissão luminosa. Com base no texto, qual alternativa expõe o postulado de Bohr que esclarece a emissão luminosa?
 - a) Os elétrons movem-se em níveis bem definidos de energia, que são denominados níveis estacionários.

- b) Ao receber uma quantidade bem definida de energia, um elétron “salta” de um nível mais externo para um nível mais interno.
 - c) Um elétron que ocupa um nível mais externo “pula” para um nível mais interno, liberando uma quantidade bem definida de energia.
 - d) Quanto mais próximo do núcleo estiver um elétron, mais energia ele pode emitir na forma de luz; quanto mais distante do núcleo estiver um elétron, menos energia ele pode emitir.
 - e) Ao se mover em um nível de energia definida, um elétron libera energia na forma de luz visível.
3. Considere as seguintes afirmações referentes aos postulados elaborados por Bohr ao conceber o seu modelo atômico:
- I. Em um átomo são permitidas somente algumas órbitas circulares ao elétron;
 - II. Cada uma dessas órbitas apresenta energia variável;
 - III. Um elétron só pode assumir determinados valores de energia, que correspondem às órbitas permitidas, tendo, assim, determinados níveis de energia ou camadas energéticas
 - IV. Um elétron pode absorver energia de uma fonte externa somente em unidades discretas, chamadas de quanta ou quantum no singular.

Indique a alternativa correta:

- a) todas estão corretas.
 - b) somente I e III estão corretas.
 - c) somente II e III estão corretas.
 - d) somente I, III e IV estão corretas.
 - e) somente I e IV estão corretas.
4. Qual das alternativas a seguir indica corretamente o modelo atômico de Niels Bohr?

- a) Descobriu o tamanho do átomo e seu tamanho relativo.
 - b) Os elétrons giram em torno do núcleo em determinadas órbitas.
 - c) Modelo semelhante a um “pudim de passas” com cargas positivas e negativas em igual número.
 - d) Modelo semelhante a um “sistema solar” em que o átomo possui um núcleo e uma eletrosfera.
 - e) Átomos esféricos, maciços e indivisíveis.
5. A figura abaixo mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Se inicialmente o elétron está no estado quântico fundamental (de menor energia), qual a sua energia cinética após o átomo ter sido ionizado por um fóton de energia 20 eV?



6. O comprimento de onda de uma certa linha da série de Balmer é 379.1 nm. A que transição corresponde essa linha?
7. Um astrônomo descobre uma nova linha de absorção com $\lambda = 164.1 \text{ nm}$ na região ultravioleta do espectro contínuo do Sol. Ele atribui a linha à série de Lyman do hidrogênio. A hipótese está correta? Justifique sua resposta.

O Átomo da Mecânica Quântica

Discutimos anteriormente o modelo atômico de Bohr e relatamos o sucesso em descrever o espectro atômico do H. Frisamos que o modelo é um misto de conceitos clássicos e novos postulados contraditórios à mecânica clássica. Você certamente observou que o modelo que apresentamos não inclui nenhuma descrição do que acontece quando um segundo elétron está presente e, como você já sabe, teríamos interação entre eles. Por isso, o modelo não pode explicar a estrutura da matéria, porque não funciona para átomos que contêm mais de um elétron envolvido em transições entre os estados estacionários (NUSSENZVEIG, 1998). O modelo também está em contradição com o Princípio da Incerteza que discutimos anteriormente e é um problema grave. Há outros problemas que descreveremos no decorrer de nossa discussão. Posto isto, está claro que é preciso se estabelecer os fundamentos sólidos do que se conhece por Mecânica Quântica. Este é o tema deste capítulo.

7.1 Ondas de matéria de De Broglie

Em 1923, o físico francês, Louis Victor de Broglie formulou uma hipótese, na qual afirmava que a matéria também poderia ter um comportamento ondulatório.

"Uma grande luz se fez então em meu espírito, de forma súbita. Eu fiquei convencido de que o dualismo das ondas e dos corpúsculos descoberto por Einstein em sua teoria dos quanta de luz era absolutamente geral e se estendia a toda a natureza física, e pareceu-me desde então certo que ao movimento de qualquer corpúsculo, seja ele fóton, elétron ou outro, está associada a propagação de uma onda" (ROSA, 2004).

De Broglie desenvolveu essa ideia a partir da explicação do efeito fotoelétrico, apresentado por Einstein, em que sugeriu a natureza corpuscular da luz, isto é, que a luz também poderia ter comportamento corpuscular. De Broglie questionou-se se poderia ocorrer com a matéria o que ocorre com a luz. Desse modo, De Broglie postulou que aquilo que denominamos matéria também poderia ter comportamento ondulatório (ROSA, 2004). E, assim sendo, propôs uma relação entre comprimento de onda da matéria e quantidade de movimento da partícula dada por

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad (7.1)$$

em que λ é o comprimento da onda associada à partícula de massa m que se move a uma velocidade v , e h é a constante de Planck. O produto mv é igual ao módulo da quantidade de momento da partícula, representado por p . Esta expressão contém a conexão entre grandezas associadas às partículas com grandezas características de ondas. O que conecta os dois modelos é a constante de Planck. Da equação 7.1, pode-se observar que o comprimento de onda associado à partícula é inversamente proporcional ao produto de sua massa e velocidade e esta equação de De Broglie pode ser aplicada a qualquer corpo material. Porém, para os corpos macroscópicos, isto é, dotados de altos valores de massa, o comprimento de onda associado ao corpo tem dimensões desprezíveis, sendo impossível observar suas características ondulatórias.

Exemplo

Calcular o comprimento de onda de De Broglie para:

- a) um elétron que está a uma velocidade de $2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, sabendo que sua massa vale $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

- Resolução:

O comprimento de onda de De Broglie é dado por:

$\lambda = \frac{h}{mv}$, em que $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, portanto:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}}{(9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(2 \cdot 10^6 \text{ m/s})}$$

$$\lambda = 0,36 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

- O comprimento, $3,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ está na mesma ordem de grandeza do diâmetro de um átomo de hidrogênio, aproximadamente $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Isso indica que, para esse comprimento de onda de De Broglie, se o elétron encontrar alguma coisa com um tamanho similar ao seu comprimento de onda, como por exemplo um nêutron ou um átomo, ele provavelmente terá comportamento ondulatório.
- b) para uma bola de baseball, cuja massa vale $0,2 \text{ Kg}$, e que está a 40 m/s .

- Resolução:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}}{(0,2 \text{ kg})(40 \text{ m/s})}$$

$$\lambda = 0,825 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

$$\lambda = 8,25 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

- Na natureza não encontramos partículas que tenha dimensões próximas ao comprimento de onda da bola de baseball, $8,25 \cdot 10^{-35} \text{ m}$. Para se ter uma ideia, o diâmetro de um próton é cerca de $8 \cdot 10^{-16} \text{ m}$. Portanto, devido ter um comprimento de onda de De Broglie muito pequeno, não veremos uma bola de baseball tendo comportamento ondulatório e nem apresentando fenômenos de exclusividades das ondas, como a difração.

7.2 Associação entre ondas mecânicas e Ondas de Matéria

Você deve estar intrigado sobre as ondas de matéria. Será que elas teriam comportamento parecido com algum fenômeno ondulatório que conhecemos? Neste momento, ainda estamos lidando com ideias estranhas, mas podemos usar o postulado de de Broglie para conectar os conceitos de órbitas de Bohr e o que conhecemos para o comportamento de ondas. Voltando ao nosso elétron na órbita circular de Bohr. Das nossas aulas de matemática, sabemos que uma circunferência de raio r , o perímetro é $P = 2\pi r$ e que de Broglie propõe que o momento e o comprimento da onda de matéria respeitem a relação da equação 7.1. Se estas ideias são razoáveis, a onda de matéria acompanha o elétron na órbita. Sabendo que o elétron está se movendo na órbita com velocidade constante, devemos ter uma onda resultante com intensidade diferente de zero, caso contrário, teríamos um problema com nossa abordagem e não seria possível associar uma onda de matéria a uma partícula em movimento. Vamos analisar o caso clássico que já conhecemos e depois retornamos para nossa discussão. Você já estudou o comportamento de ondas que estão confinadas em uma região do espaço e, certamente, se lembrará dos resultados. Vejamos o que ocorre.

Com a simulação, que se encontra no link, <http://www.anglosj.com.br/fisica/estacionarias/estacionarias.html>, faremos uma breve discussão a respeito das ondas estacionárias. Ao abrir o link da simulação, temos duas ondas, uma azul propagando para direita e outra verde propagando para a esquerda e gerando, através do fenômeno de interferência, a onda estacionária vermelha (ver figura 40). Use o botão de controle "**step**" para entender o significado de propagação. Para cada ponto da onda estacionária (vermelha), a amplitude (altura da onda) é obtida pela soma das amplitudes das ondas azul e verde, as quais estão viajando na mesma direção e em sentidos contrários. Na figura 41 as ondas azul e verde, estão em fase e uma sobrepõe a outra. Nestes casos, sabemos que está ocorrendo uma interferência construtiva. Já na figura 42 as ondas azul e verde têm fases opostas e ocorreu uma interferência destrutiva. Pela simulação, está claro porque usamos a palavra destrutiva: a amplitude (altura) da onda em vermelho é zero. É possível notar também que a onda vermelha não se propaga (verifique com o uso do

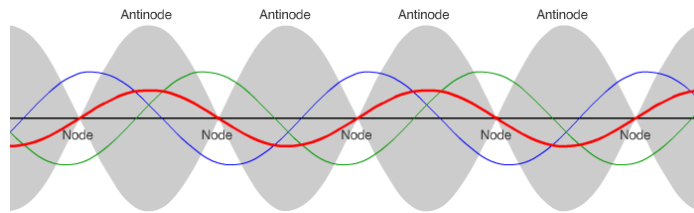


Figura 40 – Resultado do fenômeno de interferência parcialmente construtiva para ondas de mesma amplitude, mesma frequência e comprimento de ondas, mas que se propagam em sentidos opostos. A onda estacionária resultante e seus elementos também são mostrados na figura.

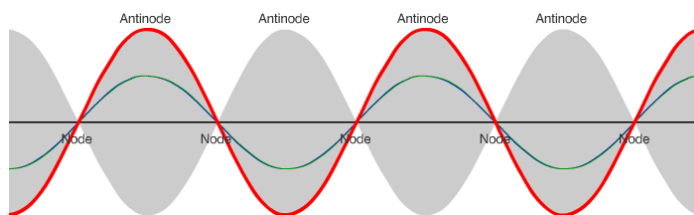


Figura 41 – Resultado do fenômeno de interferência totalmente construtiva para ondas de mesma amplitude, mesma frequência e comprimento de ondas, mas que se propagam em sentidos opostos. A onda estacionária resultante e seus elementos também são mostrados na figura.

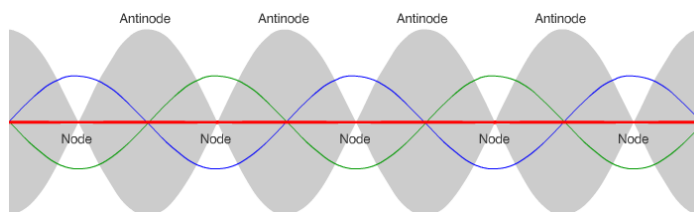


Figura 42 – Resultado do fenômeno de interferência destrutiva para ondas de mesma amplitude, mesma frequência e comprimento de ondas, mas que se propagam em sentidos opostos. A onda estacionária resultante e seus elementos também são mostrados na figura.

botão de controle "**step**") e é o motivo de receber o nome "estacionária". O que temos de interessante aqui é que sempre observamos pontos da corda que nunca se movem e pontos que sempre têm movimento. Os

pontos de interferência construtiva da onda estacionária (antinóde ou crista) estão oscilando com amplitude máxima possível ($= 2 \cdot$ a amplitude de cada uma das ondas), enquanto que os pontos de interferência destrutiva (nóde ou nó) ficam em repouso.

Caso você possa simular este experimento com uma corda na qual você prende as duas extremidades, você notará algo muito interessante e que está representado na figura 43, retirada da fonte <<https://def.fe.up.pt/fisica3/quantica1/index.html>>. Pode-se observar que a corda só oscilará apenas para algumas frequências: não observaremos movimento se movimentarmos a corda com qualquer frequência. A representação dos cinco primeiros harmônicos possíveis para uma corda de comprimento L e presa nas duas extremidades e os respectivos valores de comprimento de onda são aqueles mostrados da figura 43.

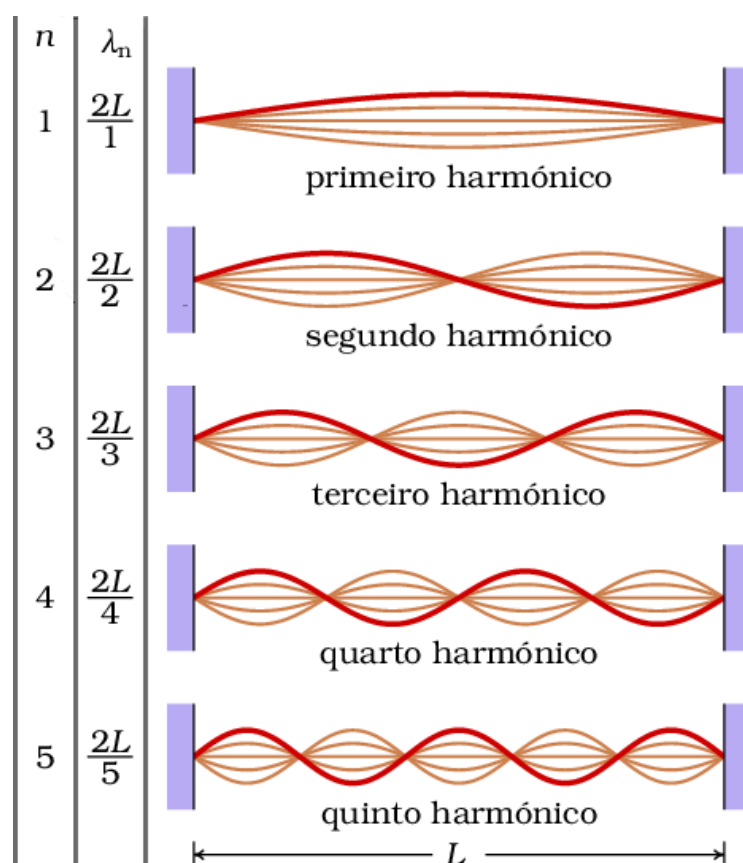


Figura 43 – Modos de vibração ou padrões de ondas estacionária em uma corda de comprimento L e com ambas as extremidades fixas. Retirada da fonte <<https://def.fe.up.pt/fisica3/quantica1/index.html>>

Fica evidente que os comprimentos de onda que nos fornecem as ondas mostradas dependem do tamanho da corda e dependem de um valor inteiro n . Quando $n = 1$, teremos $\lambda = 2L \implies L = \frac{\lambda}{2}$ e a corda está no seu estado fundamental de vibração (primeiro harmônico). Ou seja: na corda cabe apenas meio comprimento de onda (você percebe?). Quando $n = 2$, teremos $\lambda = L$ e a corda está no segundo harmônico, e assim por diante. Para esse caso, podemos dizer que as vibrações são **quantizadas** e, para cada n ($n = 1, 2, 3, \dots$), teremos um harmônico diferente correspondente. Assim, escrevemos que o comprimento de onda dos harmônicos dependem de n , ou seja: (λ_n) . Novamente, note-se que nos nós da onda estacionária, temos deslocamento nulo.

Estamos agora em condições de retornar ao nosso problema inicial: o elétron e a sua onda de matéria na órbita circular de Bohr tem perímetro $2\pi r$. Considerando o que discutimos para a nossa corda, estamos esperando a quantização associada às orbitas permitidas. Em outras palavras, as órbitas permitidas são apenas aquelas nas quais pode existir um número inteiro de comprimento de onda, caso contrário, estaríamos em uma situação na qual a onda de matéria teria uma intensidade praticamente nula e não poderíamos ter elétron nesta órbita. Retornando ao postulado de Bohr sobre a quantização do momento angular (equação 6.1) e às ideias de de Broglie (ver equação 7.1), teremos:

$$L = n \frac{h}{2\pi} \implies pr = n \frac{h}{2\pi} \implies \frac{h}{\lambda} r = n \frac{h}{2\pi} \implies 2\pi r = n\lambda, \quad (7.2)$$

como esperávamos. Em palavras: as órbitas permitidas no modelo de Bohr são aquelas nas quais a circunferência da órbita respeita a condição de existência de um número inteiro de comprimento de ondas. Como um exemplo, veja uma das órbitas permitidas na figura 44, retirado da fonte <<http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com.br/2009/08/ondas-de-materia.html>>.

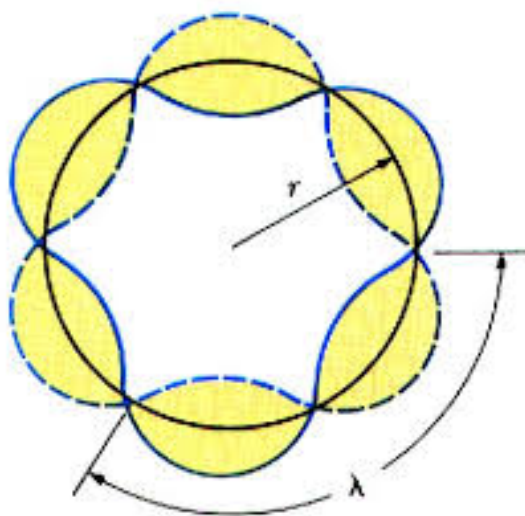


Figura 44 – Ilustração da visualização do elétron como uma onda estacionária de de Broglie em uma das órbitas permitidas do modelo de Bohr. Retirado da fonte <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com.br/2009/08/ondas-de-materia.html>

Por seus trabalhos no comportamento dual da matéria De Broglie recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1929. Na época em que propôs as ideias sintetizadas na equação 7.1, não se conheciam evidências do comportamento ondulatório da matéria. Os primeiros relatos são de 1927 e estavam em excelente acordo com as previsões de De Broglie. Em 1937, Thomson e Davisson compartilharam o prêmio Nobel por comprovarem experimentalmente as ideias de De Broglie por meio de difração de elétrons em um cristal.

7.3 A Nova Mecânica Quântica

Com a comprovação experimental da natureza ondulatória das partículas, o passo seguinte foi relacionar uma grandeza física às ondas de matéria. Durante as aulas de Física Clássica você foi apresentado a formalismos para descrever o estado de sistemas clássicos. Para citar um exemplo, se queremos descrever o estado mecânico de um sistema macroscópico de uma única partícula de massa m , utilizamos as coordenadas cartesianas e as componentes cartesianas do momento, isto

é: (x, y, z, p_x, p_y, p_z) (WEBBER, 2006; RICCI; OSTERMANN, 2000) ou, resumidamente, $(\vec{r}, \vec{p})$. Se soubermos as forças atuando no sistema e também conhecermos seu estado em um dado instante, a dinâmica é descrita, de forma determinística, pelas Leis de Newton. Podemos conhecer as variáveis com a precisão que o experimento nos permitir. Certamente, você deve se lembrar que para os sistemas microscópicos, a situação é muito diferente. Discutimos, anteriormente, o Princípio da Incerteza e compreendemos que o comportamento da luz e das partículas microscópicas eram distintos. A questão que se coloca é: como caracterizaremos o estado de um sistema microscópico (elétrons, prótons, moléculas e etc)? Mesmo pensando nos outros sistemas clássicos que sabemos descrever (tendo por base a física ondulatória, termodinâmica e eletromagnetismo), não conhecemos nenhuma grandeza física capaz de descrever o comportamento de ondas de matéria. Assim sendo, teremos que introduzi-la.

Para isso, a letra grega Ψ foi utilizada para representar a função de onda associada à matéria e que descreve o estado de um sistema quântico. Em 1926, o físico austríaco, Erwin Schrödinger determinou uma equação diferencial que nos permite descrever o estado quântico de um sistema. Com esta equação, a Equação de Schrödinger, podemos calcular a função de onda Ψ se conhecemos o campo de forças envolvido no problema e descrito por meio da função potencial em que a partícula está submetida. Esta equação pode ser escrita matematicamente assim como também escrevemos matematicamente a Segunda Lei de Newton. Entretanto, ela contém termos que você não conseguirá entender porque não tem conhecimentos matemáticos para tal. Estes conhecimentos só seriam adquiridos no ensino superior e na área de exatas. Se você for muito curioso, podemos lhe contar que uma das formas de escrevê-la sinteticamente seria

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi. \quad (7.3)$$

Resolver esta equação implica em obter Ψ , ou seja, permite obter todas as informações sobre nosso sistema físico. Vamos lembrá-lo que esta equação contempla os dois fatos mais importantes que discutimos até o momento: no mundo microscópico a natureza se comporta segundo o Princípio da Incerteza e a dualidade onda-partícula deve ser considerada. Ter a equação de onda é um primeiro passo, falta-nos agora saber como

interpretá-la. Aqui não entraremos nos detalhes da resolução da equação de Schrödinger.

Foi Max Born quem, em 1928, relacionou a função de onda com a probabilidade de encontrar a partícula em uma certa região do espaço. De acordo com Born, a função $|\Psi|^2$ é uma grandeza estatística que determina a **densidade de probabilidade**. Portanto, $|\Psi|^2$ dá a **probabilidade de encontrarmos a partícula**, que está associada a função de onda Ψ , em uma determinada posição. Com a descoberta do comportamento dual da matéria, a Física Quântica, evidência que a natureza possui comportamento **estatístico** (não mais determinístico, como na mecânica clássica), em que partículas como átomos, elétrons e prótons, podem ser descritos por uma função que representa a probabilidade se ser encontrados em determinada região do espaço. Portanto, não faz mais sentido, falar de uma trajetória circular para o elétron, e sim, de uma **probabilidade de encontrar o elétron em determinada região nas proximidades do núcleo**.

O fato de investigar a natureza de maneira probabilística incomodou e ainda incomoda muitos físicos. Albert Einstein, por exemplo, expressou sua insatisfação dizendo a famosa frase: "Deus não joga dados". Contudo, as concordâncias das previsões da Mecânica Quântica com os resultados experimentais, concede parecer favorável a formulação quântica. Aliás, é uma das teoria física de maior sucesso na Física até o momento!

7.4 O modelo atômico da mecânica quântica

O modelo atômico de Bohr trata os elétrons como partículas que existem em órbitas bem definidas e com momento bem definido. Estas ideias contradizem a nossa discussão sobre Princípio da Incerteza. Comentamos também que apesar de explicar satisfatoriamente o espectro do átomo de hidrogênio, ele não foi bem sucedido quando aplicado a átomos com mais de um elétron (EISBERG; RESNICK, 1979) e também faz algumas previsões incorretas para este átomo. O que faremos aqui é utilizar a equação fundamental da Mecânica Quântica desenvolvida por Schrödinger e outros físicos com o intuito de investigar quais os resultados que serão obtidos para o átomo de H. Neste caso, precisamos

determinar a função de onda Ψ a partir do potencial de ligação, entre o elétron e o núcleo atômico, que contém todas as informações sobre o sistema. Nos estudos da eletrostática, você provavelmente foi apresentando a este potencial, porque estamos falando de duas cargas, 1 próton e 1 elétron, pontuais a qual pode ser aplicado o potencial de Coulomb (ver figura 45). Nosso elétron estará "confinado" ao potencial.

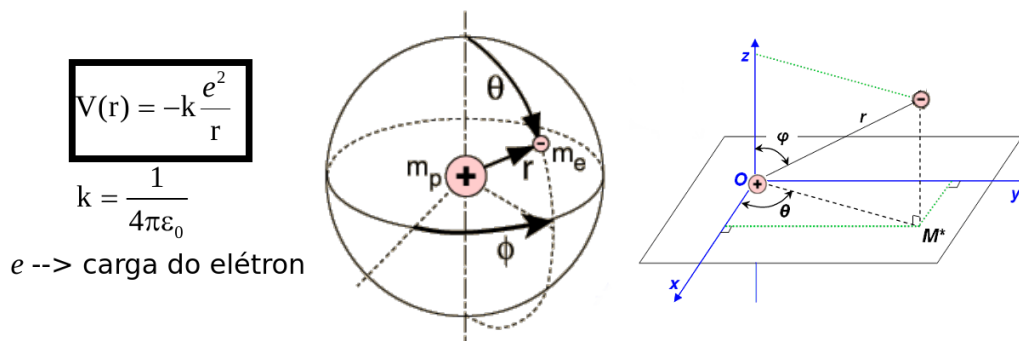


Figura 45 – Potencial colombiano para o átomo de hidrogênio.

Não temos condições matemáticas de escrever a equação 7.3 para este caso. Assim sendo, tentar solucioná-la é uma hipótese que sequer será cogitada. Por sorte, Schrodinger não só escreveu a equação, como também a resolveu. E, no nosso caso, vamos nos limitar a discutir as soluções que foram obtidas sem uso de postulados ou quaisquer artifícios como foi feito para o átomo de Bohr. Segundo a interpretação de Born para a Mecânica Quântica, nosso interesse está em obter Ψ^2 , que nos fornece a probabilidade de encontrar o elétron em uma determinada região. Ou, dito de outra forma, o que está proposto pela Mecânica Quântica é que obteremos Ψ e a teoria nos permitirá prevê as regiões onde é mais provável encontrar elétrons e essas regiões receberam o nome de "orbitais atômicos". Chamamos a sua atenção para que não confunda "orbitais" e órbita. Órbita é conceito clássico e foi utilizado no modelo de Bohr para indicar o movimento que observaríamos para o elétron. Orbital atômico se refere ao estado quântico, sendo assim, um conceito quântico.

Vamos examinar a figura 45 novamente. Você percebe que o nosso sistema, para o potencial elétrico, tem simetria esférica? Da figura, fica claro que podemos relacionar x, y, z (coordenadas cartesianas) e r, θ e ϕ (coordenadas esféricas). Portanto, podemos descrever Ψ na equação

7.3 em função de r , θ e ϕ . Quando tentamos calcular Ψ , as técnicas matemáticas nos conduzem a números quânticos (números inteiros) n , l e m que permitem obter Ψ . Se você é curioso, pode observar as expressões na figura 46.

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r) \Theta(\theta) \Phi(\phi)$$

n
 número
quântico
principal

 (Energia)

l
 número
quântico
orbital

m
 número
quântico
magnético

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} eV$$

Figura 46 – Equação 7.3 reescrita para o átomo de hidrogênio.

Se você compreendeu a figura 46 irá perceber que o número quântico n é obtido das dependências de r , l de θ e m de ϕ . Para compreender, mostraremos algo com o qual já está familiarizado. Retorne ao nosso simulador computacional, clique na aba "Predição" e selecione as opções "Schroedinger" e "diagrama de nível de energia eletrônica". Você notará que as órbitas de Bohr não existem neste modelo, mas os níveis de energia parecem distribuídos como mostrado na figura 38. Compare a expressão para os níveis de energia da figura 46 com o resultado de Bohr (ver figura 35b). Espero que tenha se convencido que as expressões são idênticas e concordam muito bem com os resultados experimentais. Para deixar ainda mais claro, o posicionamento dos níveis de energia são os mesmos e isto se deve ao potencial colombiano. As coincidências entre o modelo de Bohr e o modelo atômico da Mecânica Quântica param aí.

Neste ponto, a quantização não é mais uma surpresa para você. Ainda sobre a figura 46, vamos analisar os números quânticos obtidos. A nomenclatura empregada é a que se segue:

1. n é o **número quântico principal** e indica o nível de energia no qual o elétron se encontra (ver figura 46). n pode assumir valores inteiros positivos: $n = 1, 2, 3, \dots$
2. l é o número quântico **orbital, secundário ou azimutal**. Os valores de l são $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$.

3. m_l é o número quântico **magnético**. Seus valores podem variar de $-l$ a $+l$.

Estes números quânticos são utilizados para indicar o estado quântico, Ψ_{n,l,m_l} . Embora você imagine estar diante de algo novo, você já conhece esta nomenclatura. Por razões históricas, todos os estados Ψ_{n,l,m_l} que têm o mesmo valor de n formam uma camada. Além disso, temos o que se denomina notação espectroscópica, que atribui uma letra para os valores de l . Um resumo da notação está na tabela 1.

Tabela 1 – Notação espectroscópica para os números quânticos n e l .

n	camada	l	subcamada
1	K	0	s
2	L	1	p
3	M	2	d
4	N	3	f
5	O	4	g
6	P	5	h
7	Q	...	...
...	...	...	...

Se você compreendeu, saberá que a expressão "estado 1s" significa $\Psi_{n=1,l=0,m_l=0} \Rightarrow \Psi_{1,0,0}$. Retorne ao nosso simulador e identifique esta nomenclatura para os níveis de energia: localize o 3s e o 3p.

Mas, ainda temos muitas características interessantes para investigar. Uma delas é a densidade de probabilidade, que segundo nossa interpretação da Mecânica Quântica, é um dos aspectos fundamentais da teoria. No nosso simulador selecione a opção "Schrödinger" (ver figura 47). No item 1, da figura 47, temos a ampliação de um átomo de hidrogênio. No núcleo, temos o próton (item 1 - em vermelho) e em volta do núcleo temos uma região em azul e diferente do que encontrávamos no modelo de Bohr. Esta região representa a densidade de probabilidade, $|\Psi|^2$, associada ao estado fundamental do átomo de H, isto é: $|\Psi_{1,0,0}|^2$. A ilustração 3D nos mostra as regiões espaciais onde **provavelmente** localizaremos o elétron ("nuvem" azul no item 1). Perceba que **não** estamos falando em trajetória e órbita de circular de Bohr! Você também deve ter notado a simetria esférica. Caso queira deixar a nomenclatura familiar, se estivesse na aula de Química, estaria falando em elétron no nível um

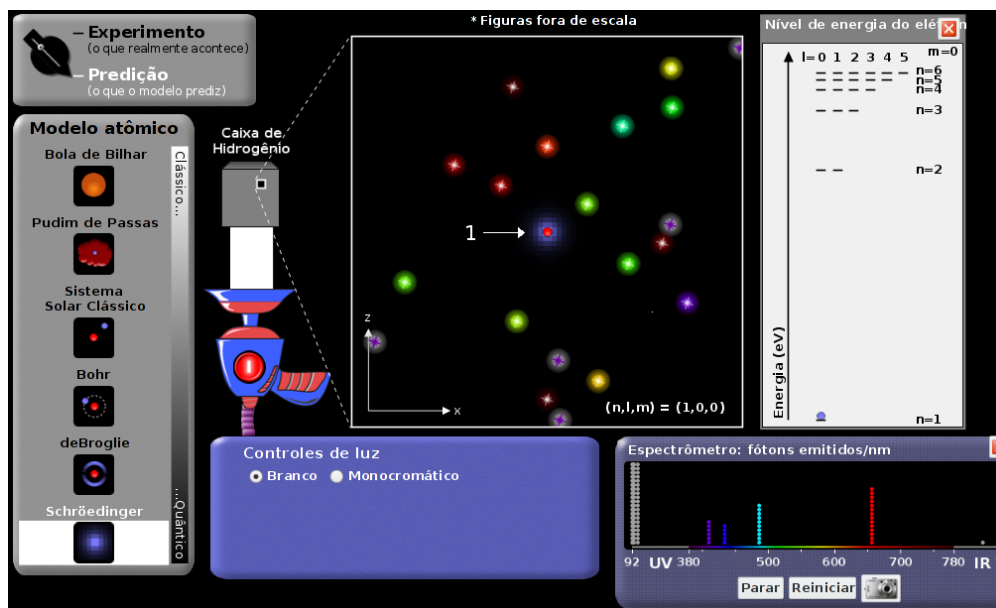


Figura 47 – Simulação para o átomo de Hidrogênio, mas com o modelo de Schrödinger ou modelo da Mecânica Quântica.

e subnível zero, como podemos notar no gráfico do nível de energia do elétron (a direita da figura 47).

Continuando com nossas descobertas, vejamos a imagem da figura 48. Comparando com a figura 47, constata-se que o elétron fez transição para outro estado quântico permitido, ou seja: $\Psi_{1,0,0} \rightarrow \Psi_{3,1,-1}$. Além disso, a densidade de probabilidade é completamente diferente (compare com a região item 1 da figura 47). Nos lembrando das aulas de Química novamente, dizemos que o elétron está agora em outro **orbital** ("nuvem" azul). Uma possível visualização das densidades de probabilidades (ou regiões prováveis de encontrar o elétron), isto é, os orbitais, para o átomo de H podem ser visualizadas na figura 49, retirada da fonte <https://pt.wikipedia.org/wiki/Número_quântico>. Nos limitamos a apresentar estes dados para os sete primeiros números principais (n). É interessante notarmos a dependência com os números quânticos, n, l e m.

Há algo interessante e que gostaríamos que você observasse. Compare novamente os níveis eletrônicos de Bohr (figura 38) com aqueles da figura 48. Está claro que tínhamos apenas um nível de energia associada a um **n** e no modelo atômico quântico, cada valor de n podemos ter diferentes estados com diferentes valores de l. O que acontecia com

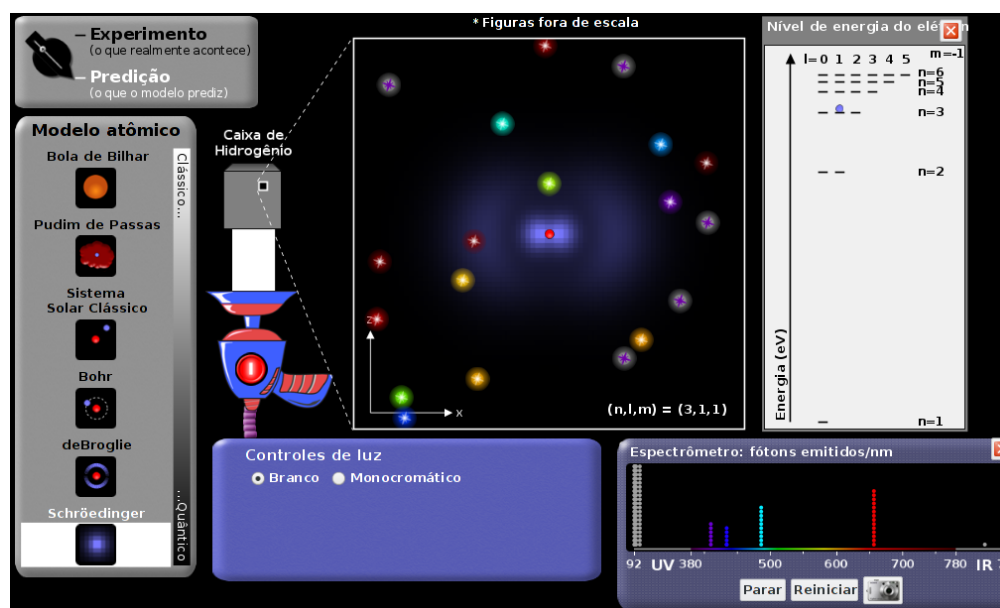


Figura 48 – Simulação para o átomo de Hidrogênio, mas com o modelo de Schrödinger ou modelo da Mecânica Quântica.

Nível (n)	Subnível (l)			
	$l=s=0$	$l=p=1$	$l=d=2$	$l=f=3$
$n=K=1$				
$n=L=2$				
$n=M=3$				
$n=N=4$				
$n=O=5$				...
$n=P=6$			...	...
$n=Q=7$		...	...	...

Figura 49 – Ilustração das densidades de probabilidades ou orbitais para o átomo de H. Fonte <https://pt.wikipedia.org/wiki/Número_quântico>.

o modelo de Bohr era resultado de haver apenas um único valor de momento angular para cada n .

7.5 O Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do Elétron

Esse tópico apresenta a discussão sobre o spin de acordo com a mecânica quântica. Recordando, até agora foram feitas discussões, na tentativa de diferenciar comportamentos clássicos e quânticos. Abordamos, por exemplo, as propriedades ondulatórias das partículas, corpuscular para a luz e, analisando o átomo de hidrogênio, discutimos o conceito de orbital, diretamente relacionado com o que denominamos de probabilidade de encontrar elétrons nas proximidades do núcleo atômico. O spin é uma propriedade exclusivamente quântica, isto é, não podemos entendê-lo fora do contexto da mecânica quântica. Portanto, não esperem que tenhamos uma imagem para que você possa interpretar o que é spin. Você não deve se frustrar. O spin deve ser tratado de maneira semelhante ao que fazemos com a massa e a carga do elétron. Simplesmente admitimos que é uma propriedade intrínseca das partículas e nunca nos perdemos em discussões filosóficas sobre o que são, o que significam e o porque de sua existência.

Há algo mais: percebemos que os números quânticos n , l e m_l foram obtidos resolvendo a equação de Schrödinger. Mas, não surgiu dali o spin. Um fato histórico importante: não tínhamos nenhum indicativo à época que nos fizesse pensar que aquela equação estava incompleta. Hoje sabemos que todas as características que vemos nos experimentos indicam que falta algo na equação de Schrödinger que resolvemos para o átomo de H (ver figura 46). Os espectros (como aqueles do nosso simulador) são muito mais complicados do que vimos até agora. Para tentar entender o surgimento do spin, faremos um retrocesso: **vamos discutir o modelo do elétron como sendo uma partícula em uma órbita e com velocidade constante. Pedimos que não pense no elétron como um sistema planetário. Só vamos utilizar esta analogia para que possamos chegar ao spin.**

O experimento de Stern-Gerlach foi realizado em 1922 pelos físicos alemães Otto Stern e Walther Gerlach e consistia em se fazer um feixe

de átomos de prata (Ag) passar por um campo magnético não-uniforme produzido por um ímã e observar as colisões desses átomos em um detector (ver figura 50) (GOMES; PIETROCOLA et al., 2011). Eles estavam

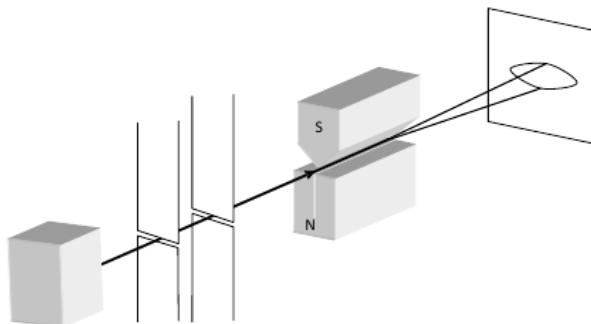


Figura 50 – Experimento de Stern-Gerlach - fonte (GOMES; PIETROCOLA et al., 2011)

interessados em uma grandeza física que denominamos de momento de dipolo magnético, mas especificamente, em uma das componentes desta grandeza. O que você precisa saber é que esta grandeza está relacionada com m_l (um dos nossos números quânticos). Neste ponto, retorne à seção 7.4 e reveja os valores possíveis de m_l para que você entenda nossa discussão. Feito isto, vamos lhe informar o momento de dipolo elétrico está relacionado com o momento angular e também com o valor de uma das componentes deste vetor. De fato, podemos provar que o momento de dipolo magnético para o átomo de H (o mais simples de todos os átomos) pode ser escrito como alguma constante (que você não precisa se preocupar em conhecer detalhadamente) multiplicada por $m_l \hbar$. Você entendeu que, baseado em nossos conhecimentos de Mecânica Quântica, esta grandeza deveria ser quantizada. Por outro lado, a Física Clássica não prediz qualquer imposição de valores sobre momento angular. Assim sendo, a previsão clássica era que observaríamos uma distribuição contínua do feixe defletido sobre o detector. Dito isto, informamos que o resultado do experimento de Stern-Gerlach observou uma figura semelhante a uma "boca de moça". Stern e Gerlach acreditavam que tinham tido sucesso e realmente comprovado a quantização dos momentos angulares e, de forma mais geral, a quantização espacial. Mas, precisamos refletir um pouco mais sobre estes resultados e suas implicações. Para facilitar a compreensão, pode-se fazer o experimento

com H no estado fundamental em que o momento angular orbital é nulo porque o valor de $l=0$. Em nossa notação, $\Psi_{n=1,l=0,m_l=0} \Rightarrow \Psi_{1,0,0}$. De fato, este experimento foi realizado em 1927. Pela teoria quântica, seria esperado que o feixe não fosse defletido: $l=0 \Rightarrow 2l+1 = 1$. Mas, surpreendentemente, o feixe foi separado em duas componentes (obteve-se novamente a figura tipo "boca de moça") quando sempre deveríamos obter um número ímpar de componentes do feixe defletido. Ressaltamos que utilizando tanto a Ag quanto o H não deveríamos esperar que houvesse deflexão no feixe porque a configuração eletrônica para a prata nos mostra que o elétron ocupando a camada externa pertence ao orbital $5s^1$, com $l = 0$. Esteja atento para a diferença entre a previsão utilizando a teoria de Schrodinger e o modelo de Bohr. O modelo de Bohr supõe que $L = 1$ e não zero (ver seção 6).

Quando se realizou o experimento de Stern-Gerlach supôs-se que o momento magnético do átomo seria proveniente do movimento orbital do elétron de valência, o que, nos anos seguintes, foi mostrado como um engano porque não havia concordância quantitativa entre teoria e experimento. Nesse sentido, o momento magnético medido no experimento de Stern-Gerlach era, na realidade, o momento angular de **spin do elétron**. Uma propriedade nova que ainda não estava prevista. Além disso, os resultados experimentais apontavam que o spin deveria ser quantizado e **semi-inteiro**, permitindo assim o número correto de deflexões do feixe de átomos. A luz desta nova interpretação muitos resultados experimentais puderam ser finalmente entendidos. Não entraremos em detalhes, mas, em física, os fenômenos novos que se explicaram eram conhecidos como estrutura fina das raias espectrais e já eram eventos identificados antes da realização do experimento com campo magnético.

O spin do elétron e os novos efeitos aqui discutidos são contemplados na equação de Dirac para os elétrons. Equação esta que seria uma modelo mais completo em relação à teoria de Schrödinger porque incluiria efeitos relativísticos. Na teoria de Dirac, o spin é encontrado naturalmente e não precisamos adicioná-lo a "força", como feito aqui. Esperamos que você tenha se convencido de que a única saída plausível seria admitir a existência de um novo número quântico. Se o momento de nossos dipolo magnético orbital era nulo, mas havia deflexão do feixe, parece-nos razoável a admitir a existência de uma propriedade intrín-

seca ao elétron, mais especificamente, algo capaz de interagir com o campo magnético, o **momento intrínseco do spin do elétron**.

Finalmente, os estados quânticos do nosso átomo de H serão caracterizados por quatro números quânticos Ψ_{n,l,m_l,m_s} . Para seguir o padrão de 46, podemos escrever: $\Psi(r, \theta, \phi) = C_{n,l,m_l,m_s} R_{nl} \Theta_{lm}(\theta) \Phi_m(\phi) S(s)$. Caso se lembre de suas aulas de Química, o número quântico de spin tem componente que assume valores possíveis de $\pm \frac{1}{2}$. Estes são os valores possíveis que nos permitem explicar a deflexão experimental do feixe de átomos de H ou Ag. Fechamos assim, a descrição do estado quântico do átomo mais simples possível.

CAPÍTULO 8

Lasers

Após nossas discussões sobre a estrutura dos átomos com base na Mecânica Quântica e na introdução das ideias de quantização, podemos entender muitos fenômenos que nos cercam. Iniciamos as discussões com uma das mais interessantes e conhecidas aplicações tecnológicas da Mecânica Quântica e que data da década de 1960: o laser. A explicação de seu funcionamento está relacionando com o modelo atômico quântico e com nossas ideias de quantização. A palavra LASER deriva da expressão inglesa **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (Amplificação por emissão estimulada de radiação). O raio de um laser é formado pela emissão contínua de um feixe de fótons (partículas de luz). Para que isso ocorra, é necessário estimular os elétrons de algum material a emitir fótons.

Para entender o que é um laser, imagine que tenhamos um recipiente no qual aprisionamos um gás formado por átomos que denominaremos de A. Para o átomo A, o espectro de níveis de energia dos elétrons é conhecido (ver figura 48). Imagine que nosso átomo A tenha absorvido um fóton de energia hf . Neste caso, há uma **absorção** e o átomo irá para um estado de energia maior (excitado) (ver figura 51). Decorrido um intervalo de tempo, espontaneamente, o átomo pode retornar ao estado com energia mais baixa, emitindo um fóton com a mesma ener-

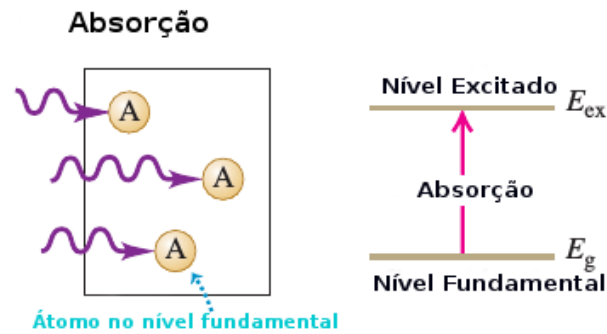


Figura 51 – Esquema de átomos absorvendo energia e o processo de transição entre um estado fundamental para um excitado (imagem retirada da referência (YOUNG; FREEDMAN FORD, 2004)).

gia hf . O tempo para que ocorra este processo depende dos estados excitados. Pode-se observar intervalos de tempo curtos ou longos. Agora, suponha que ocorra este processo com três dos nossos átomos (ver figura 52). A emissão é aleatória (YOUNG; FREEDMAN, 2003). Com os

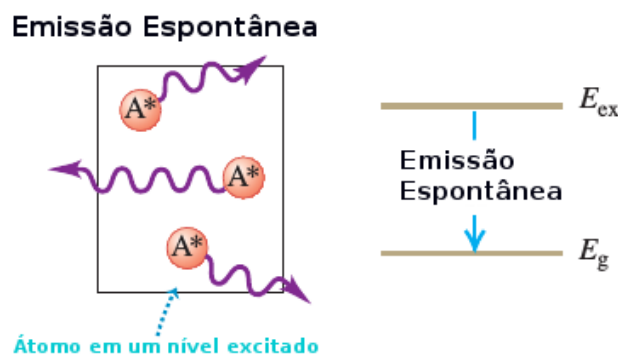


Figura 52 – Átomos que se encontra em um estado excitado, volta para o estado fundamental após emissão espontânea (imagem retirada da referência (YOUNG; FREEDMAN FORD, 2004)).

nossos três átomos excitado, façamos incidir sobre nosso sistema de três fótons de energia hf . Cada um dos átomos emitirá um fóton de mesma frequência, energia, fase, polarização e direção de propagação do fóton que fizemos incidir no recipiente (ver figura 53). Portanto, teremos seis fótons emitidos com estas características, ou seja, houve **amplificação**

Emissão Estimulada

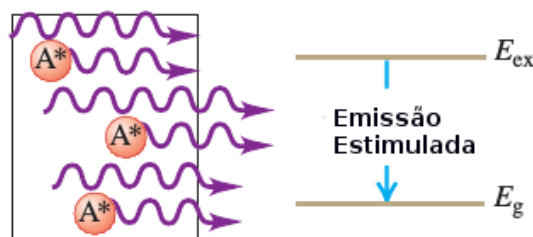


Figura 53 – Átomos, após receber radiação passa pelo processo de emissão estimulada (imagem retirada da referência (YOUNG; FREEDMAN FORD, 2004)).

da luz. Nesse processo descrito, também temos coerência porque os fótons possuem a mesma fase. Continuando com nosso processo, imagine que estamos com nosso recipiente a temperatura do ambiente T . Alguns átomos do nosso gás podem estar em um estado excitado e outros no estado fundamental. Se pudermos contar o número de átomos no estado excitado (de maior energia), encontraremos que apenas poucos átomos estão em um estado excitado. Assim sendo, mesmo para temperaturas elevadas, poucos átomos estarão em seus estados excitados. Se quisermos representar tal situação, teríamos algo como mostrado na figura 54. Nosso interesse para produzir o processo de amplificação é

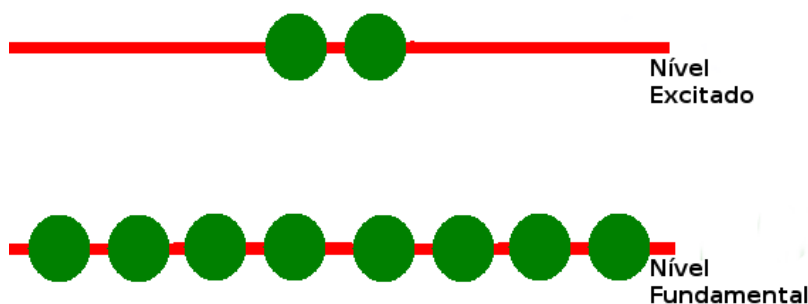


Figura 54 – Átomos no estado fundamental e excitado.

inverter a população, ou seja, levar nosso sistema para uma situação na qual teremos mais átomos no estado excitado e chegarmos à situação inversa daquela mostrada na figura 54. Se conseguirmos tal feito,

quando fizer-se incidir fótons de frequência hf no sistema, teremos o processo da emissão estimulada discutido anteriormente. Nesse caso, o processo de emissão estimulada superará o processo de absorção. Nesta situação teremos um laser!

O processo de inverter a população de átomos não ocorre naturalmente, para isso é necessário conceber algum plano. Por sorte há muitos planos que já foram descritos. Na figura 55, extraído da simulação para os lasers do Phet, que pode ser baixada no link <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/lasers> temos um laser de Hélio-Neônio. Os átomos em um laser podem ser excitados pela luz, como na simu-

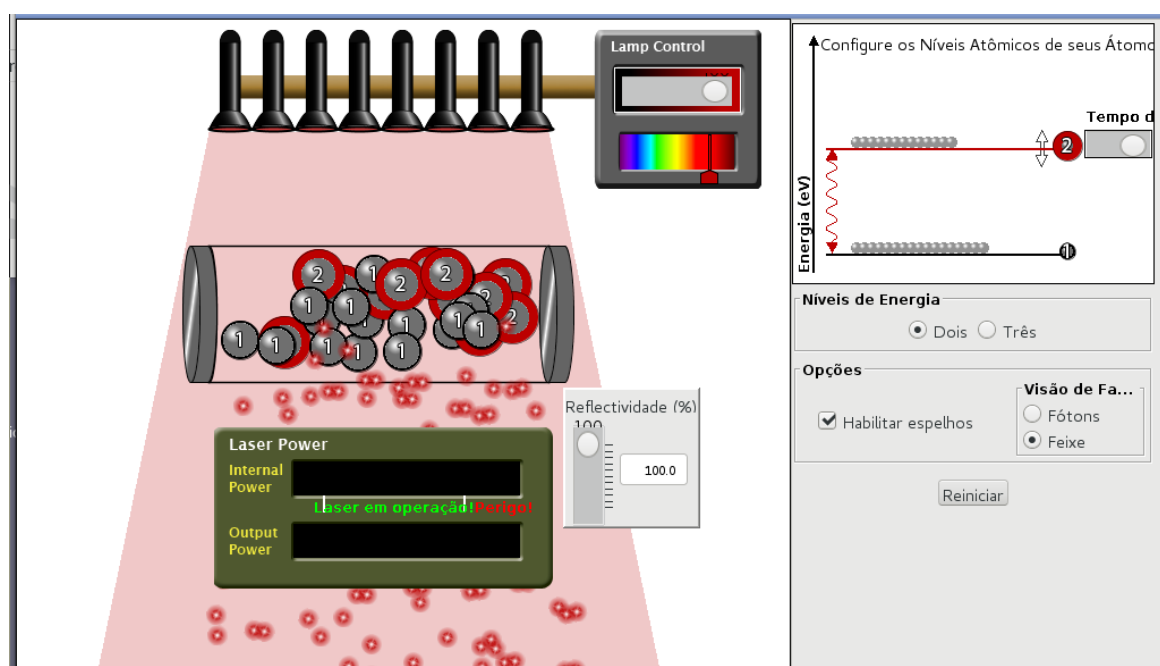


Figura 55 – Simulação de lasers.

lação (ver figura 55), por colisões com elétrons energéticos (como o que acontece em uma luz fluorescente) ou aplicando uma diferença de potencial elevada. No laser de Hélio-Neônio, por exemplo, temos elétrons energéticos produzidos por uma descarga elétrica através do gás. A descarga é produzida aplicando uma tensão entre as extremidades do tubo de gás através de uma bateria (ver figura 56). Uma mistura de 20% de He e 80% de Ne é colocada no tubo onde temos 02 eletrodos. Aplicando uma diferença de potencial elevada, teremos uma descarga elétrica e haverá colisão entre átomos ionizados e elétrons (da corrente

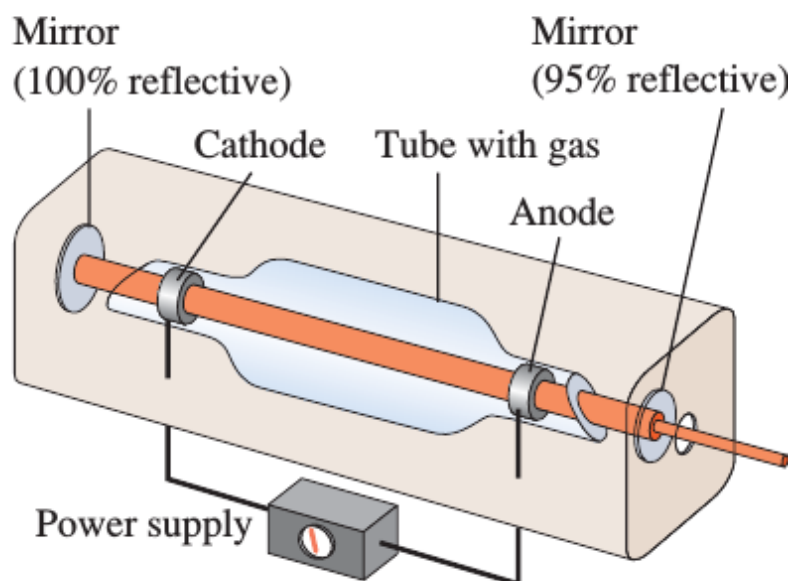


Figura 56 – Laser de neon - elétrons são excitado através de uma diferença de potencial (imagem retirada da referência (YOUNG; FREEDMAN FORD, 2004)).

da descarga) que excitam os átomos de He para o estado 2s - estado com tempo de vida bem longo (ver figura 57). Este elétron não pode voltar ao estado fundamental 1s emitindo um fóton de 20,61 eV de energia porque as regras de seleção dizem que aquelas permitidas devem ter $\Delta l = 1$. Como temos um estado de vida longa, teremos muitos átomos de He em 2s e que não decaem radiativamente. O Ne, por ser mais massivo, têm baixa probabilidade de serem excitados por colisões com elétrons. Quando o átomo excitado de He colide com um átomo de Ne (no estado fundamental) pode provocar uma excitação do Ne para o estado 5s e o átomo de He retorna ao estado fundamental. Portanto, teremos mais Ne no estado 5s se comparado ao 3p, produzimos assim a inversão de população (ver figura 57). Fazendo a emissão estimulada, 5s para 3p, teremos o laser em 632,8 nm. Os espelhos são colocados para fazer o feixe sofrer sucessivas reflexões dentro do tubo e aumentar a eficiência do nosso processo. O espelho semitransparente permite que o feixe de laser saia do tubo e possamos utilizá-la em várias aplicações. Depois do processo de emissão estimulada, os átomos de Ne saem do estado 3p por meio de processos intermediários para o estado fundamental. Há

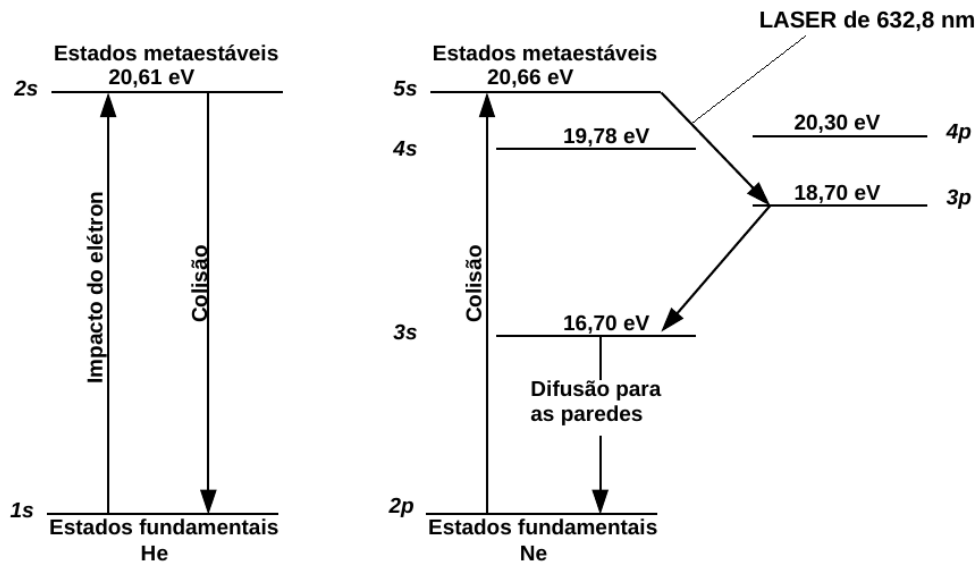


Figura 57 – Processos para o laser Hélio - Neônio (imagem adaptada da referência (YOUNG; FREEDMAN FORD, 2004))

vários tipos de laser com diferentes características e aplicações (GREF, 1996).

8.1 Aplicações dos Lasers

Atualmente, os lasers são equipamentos insubstituíveis e são utilizados em diversas aplicações tecnológicas. Dentre elas, destacamos aplicações nas telecomunicações, na medicina, em diversas áreas das indústrias, para entretenimento (por exemplo, shows musicais), etc. A seguir apresentamos destas aplicações. Fazemos notar que seu uso é primordial em muitas atividades cotidianas e este equipamento tem relevância para o desenvolvimento social e tecnológico.

8.1.1 Leitores de Código de Barras

Os leitores de código de barra são de uso corriqueiro em lojas, supermercados e bancos. Certamente você já os utilizou em inúmeras ocasiões. Para fazer a leitura do código e obter a informação que você busca sobre um determinado produto, pode-se, por exemplo, utilizar-se um laser de Hélio-Neônio que emite radiação de comprimento de onda aproximada-

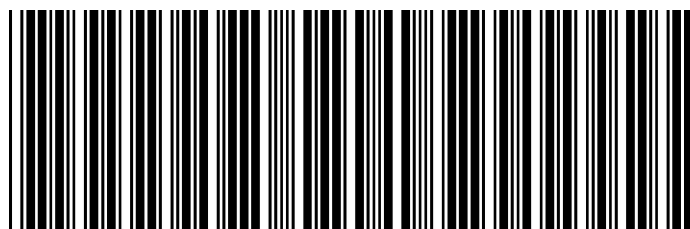


Figura 58 – Código de Barra

mente 635 nm ([PORTAL São FRANCISCO](#),). Esse tipo de laser tem baixa potência porque opera em uma frequência baixa (região do vermelho).

Praticamente todos os produtos possuem um código que, geralmente, apresenta-se em faixas alternando entre as cores branca e preta (ver figura 58). Ele serve para que seja possível identificar aquele produto e para isso é necessário que um dispositivo seja capaz de fazer a leitura do código e transformá-lo em informação. Uma das ferramentas utilizadas para fazer a leitura do código, conforme explicitado anteriormente, é o laser. O dispositivo empregado na leitura do código emite um feixe de luz que atinge as barras do código. Nas barras pretas a luz do laser é absorvida e nas barras brancas a luz é refletida, permitindo que o código seja transformado em uma sequência numérica e enviada ao computador. Assim, podemos localizar as informações associadas com aquele produto. Um exemplo de informação é identificar o preço do produto nos arquivos da loja onde estamos realizando uma compra. Acreditamos que você tenha desvendado o mistério do correto posicionamento do código para, por exemplo, obter a leitura do preço do produto em algum estabelecimento comercial.

8.1.2 Leitores de CD e DVD

Certamente você já operou vários aparelhos que "tocam" CD e DVD. Estes equipamentos usam lasers de diodo semicondutor para leitura das informações armazenadas nestas mídias. As informações digitais são gravadas no CD e/ou DVD através de pequenos furinhos (conhecidos como pits) enfileirados em formato circular ([PORTAL São FRANCISCO](#),). Os dispositivos leitores são equipados com lasers que geram ondas eletromagnéticas com comprimento de onda $\lambda = 785 \text{ nm}$ e que pertence à região do infravermelho do espectro ([PORTAL São FRANCISCO](#),).

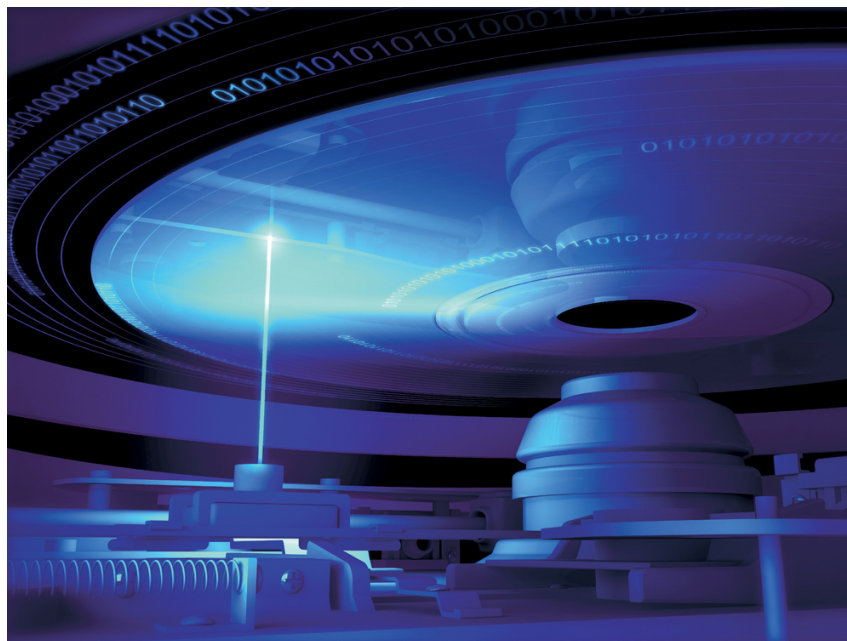


Figura 59 – Leitor de CD e DVD. Imagem disponível em <https://www.techadvisor.co.uk/how-to/photo-video/how-play-blu-ray-discs-on-your-pc-or-laptop-3529691/>

Ao incidir a radiação do laser sobre o disco, os fótons podem atingir os furinhos e serem espalhados ou podem atingir o espaço entre dois furinhos e serem refletidos para um detector de fótons. Dessa forma, enquanto o disco gira, o detector capta uma sequência de sinais (luz e ausência de luz) que é transformado e reproduzido em sinal sonoro (músicas) ou luminoso (imagens).

8.1.3 Laser na medicina

Entre as mais belas, importantes e úteis aplicações tecnológicas dos lasers, destacamos o uso na medicina. Devido à radiação do laser interagir facilmente com o tecido biológico, este equipamento pode ser empregado para diferentes finalidades, permitindo tratamentos e diagnósticos médicos que representam grandes avanços e melhoria na qualidade de vida da sociedade. Muito provavelmente cada um de nós saberia elencar muitos procedimentos médicos que utilizam lasers, principalmente procedimentos cirúrgicos. Muitos de nós conhecemos algum parente, familiar ou amigo que tenha se submetido a algum procedimento no

qual o laser foi empregado.

Na oftalmologia, o laser pode ser utilizado para avaliar possíveis alterações na retina e em cirurgias para corrigir defeitos no cristalino (DRUMMOND,) (ver figura 60). Na odontologia, é possível utilizá-lo

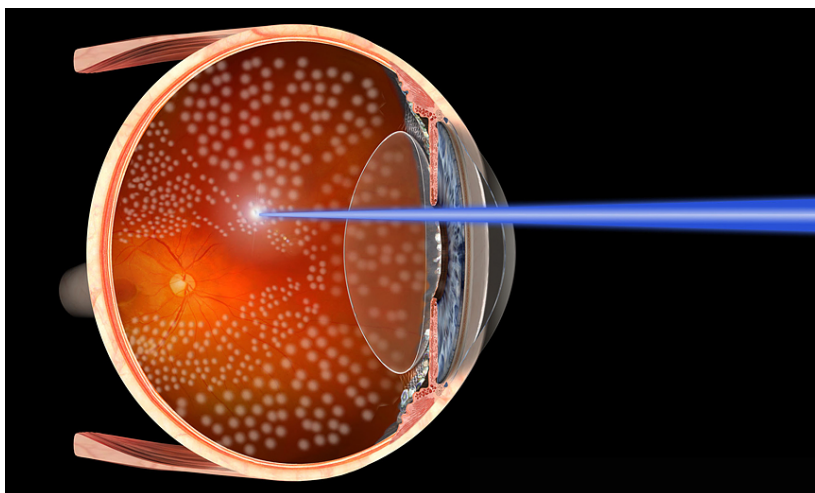


Figura 60 – Lasers na medicina

para diagnóstico e também para tratamento de cáries e clareamento dos dentes (DRUMMOND,). Os dermatologistas utilizam equipamentos de lasers para diversos procedimentos, nos quais podemos destacar: rejuvenescimento; depilação; remoção de manchas e cicatrizes; tratamento de flacidez e celulite, tratamento de câncer de pele (BAGNATO; PRATAVIEIRA, 2015), entre outros. Na urologia pode-se utilizar o lasers para quebrar pedras nos rins e para tratamento de obstrução da próstata. O laser também é utilizado para destruição de tumores cancerígenos e como bisturi em cirurgias. Uma das vantagens de utilizar o laser como bisturi reside no fato de que o calor liberado pela radiação cauteriza imediatamente o corte, evitando hemorragia e infecções e facilitando o processo de cicatrização (PORTAL SÃO FRANCISCO,). Ainda que sejam muitos os benefícios do laser aplicado à medicina, são grandes os riscos e a complexidade de manuseio dos lasers, por isso é necessária formação específica para garantir segurança nos tratamentos.

Está claro que não esgotamos todas as importantes funções do laser e também o impacto na sociedade atual. Apenas fornecemos alguns exemplos. Estamos certos de que cada um de vocês poderiam nos listar outras aplicações igualmente importantes destes dispositivos.

Referências

BAGNATO, V. S.; PRATAVIEIRA, S. Luz para o progresso do conhecimento e suporte da vida. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SBF, v. 37, n. 4, p. 4206, 2015. Citado na página [89](#).

BEATRIZ, A. M. A. *Curso de Física*. [S.l.]: São Paulo: Saraiva, 2010. Citado na página [5](#).

DRUMMOND, A. M. de C. Confiabilidade metrológica de equipamentos eletromédicos a laser e a luz intensa pulsada. Rio de Janeiro - RJ. Citado na página [89](#).

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. 22. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979. Citado 7 vezes nas páginas [10](#), [13](#), [14](#), [28](#), [33](#), [43](#) e [70](#).

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics*. [S.l.]: Basic books, 2013. Citado 3 vezes nas páginas [13](#), [15](#) e [41](#).

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics*. [S.l.]: Basic books, 2013. Citado 5 vezes nas páginas [28](#), [29](#), [30](#), [32](#) e [43](#).

GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. et al. O experimento de stern-gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 33, n. 2, p. 1–11, 2011. Citado na página [77](#).

GREF, G. d. R. d. E. d. F. I. d. F. d. U. *Física 2: Física Térmica; Óptica*. [S.l.: s.n.], 1996. Citado na página [86](#).

GUALTER; NEWTON; HELOU. *Física*. [S.l.]: São Paulo: Saraiva, 2010. Citado na página [5](#).

GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. *Física*. [S.l.]: São Paulo: Ática, 2010. Citado na página 5.

GUIMARÃES, P. S. Radiação de corpo negro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 21, n. 2, Junho 1999, p. pag. 291-297, 1999. Citado na página 17.

HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Ciclos de modelagem: uma proposta para integrar atividades baseadas em simulações computacionais e atividades experimentais no ensino de física. *Caderno brasileiro de ensino de física*. Florianópolis. Vol. 29, nesp 2 (out. 2012), p. 965-1007, 2012. Citado na página 6.

MCKAGAN, S. et al. Developing and researching phet simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, AAPT, v. 76, n. 4, p. 406–417, 2008. Citado na página 11.

MORAIS, L. C. S. *O Ensino de Conceitos de Física Quântica no Ensino Médio Utilizando Experimentos de Baixo Custo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Citado na página 6.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica-ótica, relatividade e física quântica. v 4. *São Paulo: Edgard Blucher.[Links]*, 1998. Citado 7 vezes nas páginas 13, 19, 20, 34, 45, 46 e 61.

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. Vol. 5, n. 1 (jan./abr. 2000), p. 23-48, 2000. Citado na página 8.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo desta problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. *Caderno catarinense de ensino de física*. Florianópolis. Vol. 18, n. 2 (ago. 2001), p. 135-151, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS. *Simulações Interativas em Ciências e Matemática*. University of Colorado Boulder, 2002. Disponível em: <<https://phet.colorado.edu/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2017. Citado 5 vezes nas páginas 11, 20, 22, 29 e 33.

PLANCK, M. K. E. L. Zur theorie des gesetzes der energieverteilung im normalspectrum. *Verhandl. Dtsc. Phys. Ges.*, v. 2, p. 237, 1900. Citado na página 9.

PORTAL SÃO FRANCISCO. *Raios Laser*. Portal São Francisco. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/fisica/raios-laser>>. Acesso em: 1 de janeiro de 2018. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 89.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; WALKER, J. *Fundamentos da Física*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

RICCI, T.; OSTERMANN, F. Uma introdução conceitual à mecânica quântica para professores do ensino médio, editado pelo instituto de física da ufrgs. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, n. 14, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 69.

ROSA, P. S. *Louis de Broglie e as ondas de matéria*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas - SP, 2004. Citado na página 62.

STUDART, N. A invenção do conceito de quantum de energia segundo planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 4, p. 523, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 9, 13, 15 e 17.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 9, n. 3, p. 209–214, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

TIPLER, P. A. *Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

VALADARES, E. de C.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, p. 121–135, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

WEBBER, M. C. M. Inserção de mecânica quântica no ensino médio: uma proposta para professores. 2006. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 69.

YOUNG, H.; FREEDMAN FORD, A. L. *University Physics with Modern Physics*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 4 vezes nas páginas 82, 83, 85 e 86.

YOUNG, H.; FREEDMAN, R. A. *Física IV: ótica e física moderna: Sears e Zemansky*. 12. ed. [S.l.]: São Paulo: Addison Wesley, 2003. Citado na página 82.

APÊNDICE C – Segundo Questionário

- Questionário sobre tópicos de Física Quântica
 - Nome (opcional):
1. (ALVARENGA, 2008) O Efeito Fotoelétrico trouxe a tona o caráter corpuscular da luz, bem como uma série de aplicações tecnológicas usadas no nosso dia a dia. Este efeito consiste em:
 - a) Elétrons são arrancados de certas superfícies metálicas quando há incidência de luz, de determinada frequência, sobre elas.
 - b) Elétrons são absorvidos do ar e inseridos numa placa metálica quando há incidência de luz sobre elas.
 - c) Prótons são arrancados pela luz incidente numa placa metálica.
 - d) Fótons são espalhados ao colidirem com elétrons do material no qual se incide luz de determinada frequência.
 2. (ALVARENGA, 2008) Incide-se luz num material fotoelétrico e não se observa emissão de elétrons. Para que haja a emissão de elétrons do material devemos aumentar:
 - a) a intensidade da luz.
 - b) a frequência da luz.
 - c) o comprimento de onda da luz.
 - d) a amplitude da luz.
 3. (ALVARENGA, 2008) Qual é a condição básica para que haja a emissão de fotoelétrons por um determinado metal?
 - a) A luz incidente tenha uma frequência maior que um determinado valor limite.
 - b) A luz incidente tenha uma frequência menor que um determinado valor limite.
 - c) A luz incidente tenha um comprimento de onda superior a um determinado valor limite.
 - d) A luz incidente tenha intensidade superior a um determinado valor limite.
 4. (ALVARENGA, 2008) No ano de 1900, o físico alemão Max Planck deu a conhecer sua interpretação sobre a natureza da radiação emitida por um corpo aquecido,

interpretação esta que causou uma verdadeira revolução na Física. Cinco anos mais tarde, outro físico alemão, Albert Einstein, utiliza a mesma ideia de Planck para interpretar o Efeito Fotoelétrico. Tal ideia, hoje amplamente conhecida, baseia-se na:

- a) conservação da Energia.
 - b) quantização da Energia.
 - c) conversão da Energia.
 - d) propagação da Energia.
5. (ALVARENGA, 2008) Qual é a natureza da luz, segundo a Mecânica Quântica?
- a) natureza corpuscular.
 - b) natureza ondulatória.
 - c) natureza “dual”, ou seja, apresenta ambos os comportamentos, ondulatório e corpuscular.
 - d) natureza “dual”, ou seja, não é onda nem partícula.
6. (ALVARENGA, 2008) Os fenômenos físicos difração e interferência podem ocorrer com:
- a) ondas.
 - b) partículas.
 - c) ondas e partículas.
 - d) não ocorrem nem com ondas e nem com partículas.
7. (ALVARENGA, 2008) A figura 52 mostra uma fenda dupla com aberturas de mesma dimensão e, logo atrás, um filme sensível a luz. Incidindo-se luz (fótons) de determinada frequência e, passando pelas fendas, o que se observará, depois de certo tempo, registrado no filme?
- a) um padrão de interferência com regiões claras e escuras.
 - b) um borrão claro no filme.
 - c) pontos escuros e claros sem padrão de interferência.
 - d) não se observa nada no filme.
8. (ALVARENGA, 2008) Caso realizássemos a Experiência da Fenda Dupla com um feixe de elétrons, o que seria observado no filme, sendo este sensível ao impacto de elétrons?
- a) seriam observados duas manchas sobre o filme, pois os elétrons se propagam em linha reta.

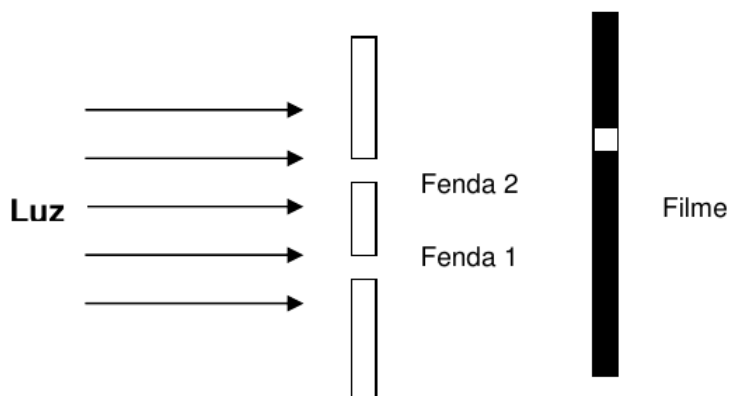


Figura 52 – Dupla Fenda

- b) não observaríamos nenhum padrão de interferência.
 - c) seria observado um padrão de interferência com zonas claras (sensibilizadas pelos elétrons) e zonas escuras.
 - d) não se observa nada no filme.
9. (ALVARENGA, 2008) O Princípio da Incerteza é um dos alicerces da Mecânica Quântica. Segundo este Princípio:
- a) nada é incerto na natureza.
 - b) é impossível medir simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula.
 - c) é possível medir qualquer grandeza física relacionada a uma partícula.
 - d) é impossível fazer qualquer medida de uma partícula.
10. (CEFET -PR) Um dos grandes mistérios que a natureza propiciava à espécie humana era a luz. Durante dezenas de milhares de anos a nossa espécie só pôde contar com este ente misterioso por meio de fogueiras, queima de óleo em lamparinas, gordura animal, algumas resinas vegetais etc. Somente a partir da revolução industrial é que se pôde contar com produtos como querosene, terebintina e outras substâncias. Mas, mesmo assim, a natureza da luz permanecia um grande mistério, ou seja, qual fenômeno físico ou químico gera luz. Somente a partir das primeiras décadas do século XX é que Niels Bohr propôs uma explicação razoável sobre a emissão luminosa. Com base no texto, qual alternativa expõe o postulado de Bohr que esclarece a emissão luminosa?
- a) Os elétrons movem-se em níveis bem definidos de energia, que são denominados níveis estacionários.
 - b) Ao receber uma quantidade bem definida de energia, um elétron “salta” de um nível mais externo para um nível mais interno.

- c) Um elétron que ocupa um nível mais externo “pula” para um nível mais interno, liberando uma quantidade bem definida de energia.
 - d) Quanto mais próximo do núcleo estiver um elétron, mais energia ele pode emitir na forma de luz; quanto mais distante do núcleo estiver um elétron, menos energia ele pode emitir.
11. Você acha que o uso de recursos computacionais (como simulação) contribui para sua aprendizagem?
- a) sim
 - b) não
 - c) não sei responder
12. Você acha importante estudar Física Quântica no Ensino Médio?
- a) sim
 - b) não
13. Porque você acha importante estudar Física Quântica no Ensino Médio?
14. (MORAIS, 2015) Na sua opinião, os recursos didáticos utilizados no desenvolvimento do conteúdo de Física Quântica nas aulas de Física :
- a) Agradaram completamente.
 - b) Agradaram mais ou menos.
 - c) Não agradaram.
15. (MORAIS, 2015) Informe os fatores positivos e os fatores negativos da utilização desses recursos nas aulas ministradas .