



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA

EM REDE NACIONAL - PROFQUI



**“LOUIS DE BROGLIE E A DUALIDADE ONDA PARTÍCULA
NOS LIVROS DIDÁTICOS DE QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO”**

LUCIANO DA NÓBREGA AZEVEDO

**RECIFE/PE
2024**

LUCIANO DA NÓBREGA AZEVEDO

**“LOUIS DE BROGLIE E A DUALIDADE ONDA PARTÍCULA NOS LIVROS
DIDÁTICOS DE QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO”**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto.

Recife/PE
2024

LUCIANO DA NÓBREGA AZEVEDO

**“LOUIS DE BROGLIE E A DUALIDADE ONDA PARTÍCULA
NOS LIVROS DIDÁTICOS DE QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO”**

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI/UFRPE-Recife), como requisito necessário à obtenção do título de Mestre em Química.

Orientador: Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto.

Data de aprovação: 23/08/2024

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto – Orientador.

Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Profª. Dra. Suely Alves da Silva – Membro externo.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dr. Joacy Vicente Ferreira – Membro interno

Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

A9941 Azevedo, Luciano da Nóbrega.
Louis de Broglie e a dualidade onda partícula nos livros didáticos de química do ensino médio / Luciano da Nóbrega Azevedo. - Recife, 2024.
158 f.; il.

Orientador(a): Luciano de Azevedo Soares Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Mestrado Profissional em Química (PROFQUI), Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Química (Ensino médio) - Estudo e ensino . 2. Livros didáticos. 3. Broglie, Louis de, 1892-. I. Soares Neto, Luciano de Azevedo, orient. II. Título

CDD 540

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus por me permitir concluir mais uma etapa em minha vida e por sempre ter estado comigo ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto, por todas as orientações, pela dedicação e predisposição em sempre me ouvir, assim como pela paciência e pelos conselhos que foram fundamentais para a moldagem do meu trabalho dissertativo.

Agradeço à minha esposa, Maria Suelly Costa da Câmara, que sempre me acompanha nos momentos da minha vida e é minha fonte de inspiração.

Agradeço à minha amada filha, Yasmim Câmara Nóbrega de Azevedo, que sempre me dá força e por quem dedico todas as minhas buscas educacionais e profissionais.

Agradeço aos meus pais, José Dário de Azevedo e Maria Luceny da Nóbrega Azevedo (in memoriam), que sempre se dedicaram e lutaram para deixar a educação como fonte de sobrevivência.

Agradeço aos meus irmãos, Alex Sandro Mirtis Nóbrega de Azevedo, Fredson Nóbrega de Azevedo e Lady Dayana da Nóbrega Azevedo, que sempre me apoiaram nas minhas decisões.

Agradeço aos meus amigos, os antigos e os atuais, pois cada um deles faz parte de uma página da minha vida.

Agradeço a todos os professores que me moldaram e contribuíram para a minha formação, tanto os da Educação Básica quanto os do Mestrado Profissional em Química (PROFQUI).

Agradeço aos meus colegas da Escola Estadual de Referência em Ensino Médio Solidônio Leite, em especial à gestora Girlene Maria Pereira de Carvalho Alves, pelo apoio e por ter permitido a realização deste projeto.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fazem parte da minha vida e acreditam na minha capacidade de ir adiante sempre com sucesso.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar como a dualidade onda partícula, proposta por Louis de Broglie é abordada nas quatro coleções de livros de Ciências da Natureza do Novo Ensino Médio aprovados pelo Plano Nacional do Livro didático (PNLD) para o triênio 2021- 2023. A metodologia aplicada utilizou critérios de avaliação tomando como base: conceitos e conhecimentos científicos; recursos visuais e atividades propostas para a verificação dos conteúdos em questão. Os resultados deste estudo mostram que nem todos os livros analisados apresentam a teoria de Louis de Broglie, e quando apresenta associam o tema a outros pesquisadores, cada livro analisado apresenta essa temática de forma diferente, alguns contextualizam de forma mais objetiva, enquanto outros se limitam a apenas descrever o assunto. Finalmente, esperamos que esta pesquisa estimule a reflexão e incentive novas investigações que contribuam para o aprimoramento do ensino de química, assim como auxiliem os educadores na escolha de materiais didáticos que favoreçam o progresso e a aprendizagem científica.

Palavras-chave: Ensino de Química. Livro Didático. PNLD. Teoria de Louis de Broglie.

ABSTRACT

This work aims to analyze how the wave-particle duality, proposed by Louis de Broglie, is addressed in the four collections of Natural Science books for New High School approved by the National Textbook Plan (PNLD) for the triennium 2021- 2023. applied methodology used evaluation criteria based on: scientific concepts and knowledge; visual resources and proposed activities to verify the content in question. The results of this study show that not all books analyzed present Louis de Broglie's theory, and when they do, they associate the topic with other researchers. Each book analyzed presents this topic in a different way, some contextualize it in a more objective way, while others limit themselves to just describing the subject. Finally, we hope that this research stimulates reflection and encourages new investigations that contribute to the improvement of chemistry teaching, as well as helping educators in choosing teaching materials that promote progress and scientific learning.

Keywords: Teaching Chemistry. Textbook. PNLD. Louis de Broglie theory.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 Objetivo geral | 15 |
| 2.2 Objetivos específicos | 15 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 3.1 A Importância do Livro Didático | 16 |
| 3.2 O Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM) | 18 |
| 3.3 Vida e Obra de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie | 20 |
| 3.3.1 Família Broglie | 20 |
| 3.3.2 Nascimento de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie | 21 |
| 3.3.3 O Irmão Mais Velho – Maurice de Broglie | 25 |
| 3.3.4 A Construção Educacional de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie | 29 |
| 3.3.5 O Primeiro Conselho de Solvay de Física de 1911 | 31 |
| 3.3.6 Os De Broglie e a Guerra | 33 |
| 3.3.7 A Contribuição de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie para o Desenvolvimento Conceitual da Teoria Dos Quanta e a sua Tese de Doutorado | 34 |
| 3.3.8 O Prêmio Nobel de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie | 39 |
| 3.3.9 O Quinto Conselho de Solvay de 1927 | 40 |
| 3.3.10 Louis Victor Pierre Raymond de Broglie Pós defesa da sua Tese de Doutorado | 47 |
| 3.3.11 A Continuação do Legado de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie | 50 |
| 3.4 O Ensino da Dualidade Onda-Partícula de Louis De Broglie | 51 |
| 3.5 A importância da Experimentação no Ensino de Química | 53 |
| 4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO | 56 |

| | |
|---|------------|
| 4.1 Análise do conteúdo sobre a dualidade onda-partícula de Louis de Broglie nos Livros Didáticos de Química aprovados pelo PNLD para o triênio de 2021 a 2023 | 56 |
| 5. ANÁLISE DO CONTEÚDO DIDÁTICO | 60 |
| 5.1 Conceito e Conhecimento Científico | 60 |
| 5.1.1 Apresentação do Conteúdo | 61 |
| 5.1.2 Abordagem geral da dualidade onda-partícula | 62 |
| 5.1.3 Contextualização com a dualidade onda-partícula | 67 |
| 5.2 Recursos Visuais | 70 |
| 5.2.1 Qualidade da ilustração | 72 |
| 5.2.2 Grau de relação com as informações | 72 |
| 5.2.3 Veracidade contida na ilustração | 80 |
| 5.3 Atividade Proposta e Prática | 81 |
| 6. PROPOSTA DE ATIVIDADE EXPERIMENTAL | 84 |
| 6.1 Explicação do Experimento | 91 |
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 95 |
| REFERÊNCIAS | 97 |
| ANEXO | 104 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - Entrada na rue La Bote, 48, no oitavo arrondissement de Paris, local do hotel da família adquirido pelo pai em 1822 e vendido pelos de Broglies em 1902. | 21 |
| FIGURA 2 - Louis Victor Pierre Raymond de Broglie. | 22 |
| FIGURA 3 - Rua Le Boulevard em Dieppe na França. | 23 |
| FIGURA 4 - Maurice de Broglie (irmão de Louis de Broglie). | 23 |
| FIGURA 5 - Pauline de Broglie (irmã de Louis de Broglie). | 24 |
| FIGURA 6 - Biblioteca e sala de trabalho de Maurice de Broglie em sua residência particular na rue Chateaubriand, em 1925. Da esquerda para a direita: Jean Thibaud, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Alexandre Dauvillier e Jean-Jacques Trillat. (Cortesia de Archives de l'Académie des Sciences, Paris). | 28 |
| FIGURA 7 - Escola Lycée Janson de Silly. | 30 |
| FIGURA 8 - Os 24 Cientistas que participaram da 1ª Conferencia de Solvay. | 32 |
| FIGURA 9 – Sequência dos cientistas na foto. | 46 |
| FIGURA 10 - Cientistas na Quinta Conferência de Solvay em 1927. | 46 |
| FIGURA 11 - Organizador curricular de Química 4º Bimestre do 3º Ano Médio do estado de Pernambuco. | 52 |
| FIGURA 12 - Representação da teoria da dualidade onda-partícula. | 63 |
| FIGURA 13 - Representação da teoria da dualidade onda-partícula. | 64 |
| FIGURA 14 - Representação da natureza dual da luz. | 65 |
| FIGURA 15 - Coleção dos livros da Conexões. | 66 |
| FIGURA 16 - Situações de experimentos sobre a dualidade onda-partícula. | 67 |
| FIGURA 17 - Sequencias de representações dos experimentos sobre a dualidade onda-partícula. | 68 |
| FIGURA 18 - Representação do experimento da dupla fenda de Thomas Young. | 69 |
| FIGURA 19 - Representação do experimento sobre a dupla fenda realizada com feixes de elétrons. | 70 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 20 - Representação do experimento sobre a interferência de uma onda eletromagnética. | 74 |
| FIGURA 21 - Representação sobre o experimento de padrões de distribuição esferas lançadas em experimentos de dupla fenda. | 75 |
| FIGURA 22 - Representação do experimento sobre padrões de interferência de um feixe de elétrons. | 76 |
| FIGURA 23 - Representação do experimento sobre a dupla fenda utilizando fonte de luz. | 77 |
| FIGURA 24 - Representação do experimento sobre padrão de interferência da luz vermelha em fendas duplas. | 77 |
| FIGURA 25 - Representação sobre o experimento padrão de interferência da fenda dupla utilizando elétrons. | 78 |
| FIGURA 26 - Representação a interferências construtivas e destrutivas de ondas. | 78 |
| FIGURA 27 - Representação sobre o experimento da dupla fenda de Thomas Young. | 79 |
| FIGURA 28 - Representação sobre o experimento da dupla fenda utilizando elétrons. | 79 |
| FIGURA 29 - Vista frontal da Caixa que será realizada os experimentos para demonstrar a dualidade onda-partícula. | 86 |
| FIGURA 30 - Vista lateral da Caixa que será realizada os experimentos para demonstrar a dualidade onda-partícula. | 86 |
| FIGURA 31 - Vista da Caixa aberta com sua Luz Negra conectada e um Becker de 100 ml. | 87 |
| FIGURA 32 - Vista da Caixa aberta com sua Luz Negra conectada e acesa com um Becker de 100 ml demonstrando como ocorre o experimento. | 87 |
| FIGURA 33 - Balão volumétrico com a solução alaranjada é a solução de nitrato de ferro nona hidratado. Balão volumétrico com a solução amarelo é a solução em mistura do ácido oxálico com o ferricianeto de potássio. | 88 |
| FIGURA 34 - No Becker de 50 ml encontra a mistura das duas soluções resultando nessa coloração. | 89 |
| FIGURA 35 - Vista da solução já misturada dentro da caixa com a lâmpada negra acesa. | 89 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 36 - Vista do início da precipitação e formação do Azul da Prússia. | 90 |
| FIGURA 37 - Vista do final da precipitação com a formação total do Azul da Prússia. | 90 |
| FIGURA 38 - Comprovação efetiva do experimento, utilizando a caixa. | 91 |
| FIGURA 39 - Moldes dos estêncis cortados e colocados sobre papel filtra qualitativo de 12,5 cm. | 92 |
| FIGURA 40 - Aplicação das soluções no molde estêncil com as imagens de um balão de fundo chato, um tubo de ensaio e um frasco reagente. | 93 |
| FIGURA 41 - Resultado da Aplicação das soluções no molde estêncil com as imagens de um balão de fundo chato, um tubo de ensaio e um frasco reagente. Toda parte em azul corresponde ao precipitado Azul da Prússia. | 93 |
| FIGURA 42 - Aplicação das soluções no molde estêncil com a imagem de um erlenmeyer. | 94 |
| FIGURA 43 - Resultado da Aplicação das soluções no molde estêncil com a imagem de um erlenmeyer. Toda parte em azul corresponde ao precipitado Azul da Prússia. | 94 |

LISTAS DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1: Relação dos Livros Didáticos de Química – Ensino Médio | 57 |
| TABELA 2: Escala Semântica de compreensão qualitativa sobre os critérios | 59 |
| TABELA 3: Critérios para análise dos conceitos e conhecimentos científicos | 61 |
| TABELA 4: Parâmetros de investigações para os recursos visuais | 71 |

1. INTRODUÇÃO

Em 1998, o governo federal estabeleceu os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), que são diretrizes para a educação básica no Brasil. Eles desenvolvem os objetivos, o conteúdo e os critérios para avaliar o ensino. Os PCN foram criados para padronizar e melhorar a qualidade da educação em todo o país. Eles são aplicáveis a todas as escolas públicas e privadas e são atualizados regularmente para acompanhar as mudanças sociais e tecnológicas.

Dando suporte aos PCNs, o Governo Federal instaura O Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) que tem como objetivo fornecer livros didáticos gratuitos para alunos da educação básica. O PNLD é realizado anualmente, através de editais, pelo qual as editoras escrevem suas obras e as mesmas são avaliadas pedagogicamente para assegurar a qualidade das obras distribuídas às escolas públicas do ensino fundamental. Após a seleção os livros são distribuídos nas escolas públicas de todo o país. O programa visa melhorar a qualidade da educação no Brasil e garantir o acesso a materiais educacionais de qualidade para todos os alunos, corroborando com Freitas e Rodrigues (2008), os livros didáticos sofreram evolução em termos de finalidade e estética.

O livro didático é usado como material principal de ensino em muitas escolas. Ele é projetado para ajudar os professores a transmitir informações e ensinar habilidades aos alunos. Por mais que a tecnologia tenha avançada, os livros podem ainda ser considerados uma ferramenta tecnológica porque fornecem informações e conhecimento de maneira acessível e perene. A tecnologia também permitiu a digitalização de livros, tornando-o disponíveis em dispositivos eletrônicos, como smartphones e tablets, aumentando a sua portabilidade e acessibilidade. Além disso, a tecnologia também permite a criação de livros interativos com imagens, som e recursos interativos, tornando a leitura uma experiência mais enriquecedora. Isso corrobora com Szychta (2015), que diz que, o LD é fundamental para o desenvolvimento da prática escolar, uma vez que ele estabelece o elo entre a aprendizagem, o cotidiano e a vida profissional.

O livro didático tem um grande impacto na educação. Muitos professores dependem desse recurso recontando inteiramente com este recurso tanto na preparação de aulas como no desenvolvimento de programas escolares. Com essa dependência, podemos sugerir uma estreita ligação entre o que é discutido no livro didático e em sala de aula.

A respeito dessa discussão sempre é bom apresentar para os alunos o fator histórico do conteúdo que está trabalhando, pois, torna-se uma ferramenta fundamental para enriquecer o ensino de ciências, fornecendo aos alunos uma visão mais ampla e contextualizada do desenvolvimento científico ao longo do tempo. Compreender como as teorias e descobertas científicas foram construídas e os desafios enfrentados pelos cientistas do passado pode estimular o interesse dos estudantes e promover uma maior conexão com o conteúdo, tornando a aprendizagem mais significativa e relevante para suas vidas.

Para Porto (2010) e Martins (2006), as abordagens ao conteúdo histórico dos fatos científicos encontrados nos livros didáticos nem sempre são consistentes com as recomendações atuais para o ensino de ciências, porque há uma série de desinformação não intencional sobre essas informações, resultando em erro, que possibilita a uma construção simplista e inadequada da própria ciência.

A inclusão da história da ciência nos livros didáticos é justificada pela importância de contextualizar o conhecimento científico, permitindo aos estudantes compreenderem a natureza da ciência de forma mais abrangente. Além disso, ao conhecerem a trajetória e os erros dos cientistas do passado, os alunos podem desenvolver um pensamento crítico mais aguçado, questionando as informações apresentadas e compreendendo melhor o método científico.

O foco dessa dissertação é fazer um levantamento sobre a teoria de Louis de Broglie, teoria essa que consta no currículo de química do estado de Pernambuco, nos livros de Ciências da Natureza e sua Tecnologia do Novo Ensino Médio do PNLD 2021.

A Teoria de Louis De Broglie afirma que todos os objetos possuem uma onda associada. Isso significa que os objetos podem ser descritos como pacotes de ondas (comprimento de onda) e também como partículas individuais (massa e carga). O comprimento de onda associado a um objeto é diretamente proporcional à sua energia cinética. A proposta de Louis de Broglie foi publicada em 1924 e foi uma das bases para a teoria quântica (Rosa, 2014).

O ensino de química é o processo de aprendizagem e compreensão dos conceitos e princípios da química, incluindo a natureza da matéria e suas reações, bem como aplicações práticas da química na sociedade e no mundo natural. Por isso, queremos fornecer aos estudantes uma compreensão sólida dos conceitos da química quântica com habilidades para aplicá-los em contextos reais. Dessa forma, a importância de analisar os livros de química do Novo Ensino Médio do PNLD 2021, verificando os temas, a clareza

e a linguagem, os recursos visuais, atualização dos conteúdos e a interatividade sobre a teoria de Louis De Broglie. Pois, o ensino de química quântica só aborda geralmente conceitos como o modelo atômico de Bohr, a teoria do spin quântico, o princípio de exclusão de Pauli, forças químicas, teoria dos orbitais moleculares, faltando outros conceitos fundamentais para compreender a natureza quântica da matéria e sua influência nas propriedades químicas.

Ministrar a disciplina Química para o Novo Ensino Médio depende de vários fatores. Dentre eles, está a organização do conhecimento de maneira contextualizada e interdisciplinar, usando as situações reais da escola e dos alunos. Pois, o avanço dessa ciência vem trazendo novas transformações no modo de viver e de pensar dos cidadãos, proporcionando-os a uma busca contínua por informações e atualizações que possam conceder-lhes uma formação de senso crítico, capaz de facilitar participações mais ativas nas decisões do meio onde vivem. Todo esse decurso se justifica, pois, um dos grandes desafios no ensino de Química é buscar diferentes métodos para que os educandos adquiram as competências e habilidades necessárias para a sua formação, num contexto em que ele esteja inserido. Nesse aspecto, um bom livro didático, bem organizado, com uma boa linguagem de leitura podem ser úteis às necessidades de melhoria no processo de ensino-aprendizagem.

A motivação por essa pesquisa está literalmente ligada à minha experiência profissional como professor de uma Escola de Referência em Ensino Médio no interior do estado de Pernambuco, na cidade de Serra Talhada. Pois, nas minhas aulas, o livro sempre foi utilizado como material de apoio, de consulta e para planejar as aulas. Apesar de fazer uso de outras fontes de materiais, tais como: revistas, textos extraídos da internet e jornais, mais, o foco maior é sempre o uso do livro didático adotado na escola. Além da minha motivação, surgiu a minha problematização que busca analisar a dualidade onda-partícula de Louis de Broglie apresentada nos livros didáticos de química do ensino médio aprovados pelo PNL D para triênio 2021-2023.

Desse modo, propomos o desenvolvimento de um material didático que tem como objetivo proporcionar um guia completo e estruturado para auxiliar no processo de ensino e aprendizagem teórico e prático sobre a teoria da dualidade onda-partícula de Luis de Broglie. Através de uma abordagem clara e concisa, que facilite a compreensão dos conteúdos apresentados, tornando o processo do conhecimento mais dinâmico e eficaz.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Diante do contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo analisar como a teoria da dualidade onda-partícula de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie é abordada nos livros didáticos de Química aprovados pelo PNLD para o triênio 2021-2023.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar como estão apresentados os conceitos teóricos da química quântica, especificamente a teoria da dualidade onda-partícula de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie comparando com os diferentes livros didáticos do triênio 2021-2023;
- Analisar nos livros didáticos a qualidade dos recursos visuais, conceitos e conhecimento científico, e atividades propostas (teórica e prática) referentes ao conteúdo “dualidade onda-partícula”;
- Identificar a presença de atividades propostas e de instrumentos adicionais nos diferentes livros didáticos;
- Elaborar material de apoio teórico e prático para o docente de Química sobre a Dualidade Onda Partícula, a vida de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie e com uma atividade experimental sobre o tema.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A importância do Livro Didático

Em nossas vivências como professor em Escolas de Referências no interior de Pernambuco, percebemos que o livro didático é importante porque é uma das principais fontes de ensino para os estudantes. Ele fornece informações e conteúdo que servem como base para a aprendizagem. Além disso, ajuda a orientar e estruturar as aulas, e permite que os professores acompanhem o progresso dos alunos. Assim como, pode ser uma ferramenta valiosa para os pais e alunos em sua jornada de aprendizagem. Tudo isso corrobora com, Ribeiro (2003), que diz - “O livro didático é um instrumento de grande valor educacional que está presente no contexto histórico do Brasil desde o período colonial”.

Os livros devem satisfazer a todos, ser atraentes para os alunos e facilitar o aprendizado, assim como, ajudar o professor com sua prática.

Para Choppin (2004), os livros didáticos têm quatro funções importantes. Uma instalação de referência, também conhecida como currículo ou programa, onde o livro é um apoiar o conteúdo educacional e função instrumental como um método de aprendizagem que facilita a retenção do conhecimento e aquisição de habilidades. Uma função ideológica e cultural como meio de construção de identidade e, finalmente, uma função documental que pode fornecer uma série de documentos textuais, cujas observações ou conflitos podem desenvolver a mente crítica do aluno.

Segundo (Mori e Curvelo, 2014), os livros didáticos foram implementados na década 30 no Brasil, sendo considerados, até ao presente, um dos importantes recursos pedagógicos utilizados pelos professores do ensino fundamental ao superior. Para (Wille et al., 2009; Ferreira et al., 2017), os livros didáticos, sendo a principal ferramenta de ensino, dão uma contribuição importante para o ensino e aprendizagem dos alunos, mas por si só não são material didático suficiente para o ensino do complexo processo de ensino dos alunos, especialmente dos alunos da educação básica, em ciências da natureza como a química, física e biologia. Neste nível educacional é desejável que os alunos compreendem o que é ensinado, receba uma educação abrangente e contextualizada e sejam capazes de aplicar os conhecimentos adquiridos na escola a diferentes situações da vida diária, e sejam críticos e atenciosos com a sociedade.

Para Pontushka (2007), quando se refere ao uso do livro didático como recurso em sala de aula, divide-se os docentes em dois grupos. O primeiro, é composto por professores com uma boa formação que exploram bem o material e utilizam outros recursos de ensino em parcerias com as outras disciplinas, não apenas este material. O segundo grupo é formado por professores que têm acesso aos livros didáticos e os utilizam como único recurso didático. Mas é a partir desta informação que podemos nos perguntar se uma boa formação é suficiente para que um professor consiga transmitir todos os conhecimentos necessários aos seus alunos.

Contudo, o livro didático é visto como parte do sistema de ensino desde os anos iniciais até os finais, atuando como um suporte de apoio para os professores na organização das aulas, assim como, apoio para todos os que compõem o sistema educacional (Bezerra; Martins, 2015). Nesse contexto, ter o livro didático como ponto de apoio facilita evitar lacunas na apresentação do conteúdo e o professor ganha mais liberdade para traçar as estratégias de ensino.

O apoio do livro didático facilita a criação de um plano pedagógico, fornecendo recursos de pesquisa e sugestões de exercícios dentro do próprio trabalho. Isto economiza tempo e energia de planejamento, permitindo que o professor se concentre menos em “o que ensinar” e mais em “como ensinar”. Priorizar o “como” é uma forma de explorar novos métodos e envolver cada vez mais os alunos.

Por seu caráter pedagógico, o livro didático completa a bibliografia clássica de cada disciplina. Considerando instituições de baixo orçamento com bibliotecas, acervos digitais e conteúdos diversificados, o livro didático assume um papel ainda mais central no ensino e na aprendizagem. A linguagem dialógica utilizada nos livros didáticos também se diferencia dos demais materiais didáticos, o que permite ao aluno se comunicar e participar do conteúdo apresentado.

Os livros didáticos também devem ser atualizados regularmente, devido ao avanço contínuo do conhecimento científico. Novas descobertas e pesquisas podem levar a uma mudança nos conceitos e teorias anteriormente aceitos, e os livros devem refletir essas atualizações para fornecer informações precisas e atualizadas aos alunos.

Segundo SPÓSITO (2006), é importante lembrar que a importância do livro didático não se limita ao aspecto pedagógico. Juntamente com os diversos processos da sociedade, este recurso também aparece como uma ferramenta importante em termos de benefícios econômicos (ao desenvolver mercados em sua volta) e às questões políticas,

porque afeta diretamente a sociedade e a sua visão da ciência, da história e dos processos de conhecimento o que influi nos seus valores políticos e culturais.

Em resumo, o livro didático é uma ferramenta completa e organizada para o ensino. Ele abrange desde os conceitos básicos até os tópicos mais avançados, oferecendo atividades práticas e recursos adicionais para aprofundamento. Acredito que por meio do livro, os alunos terão a oportunidade de adquirir um conhecimento sólido e desenvolver habilidades importantes para sua formação acadêmica.

3.2 O Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM)

O Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) é um programa que pertence ao Ministério da Educação do Brasil, que foi implantado através do decreto nº 91.542 de 19/08/1985. Tendo como objetivo, avaliar e distribuir livros didáticos, pedagógicos e literários, de forma universal e gratuita, às escolas públicas das redes de ensino básico e também às instituições de educação infantil sem fins lucrativos e conveniadas com o Poder Público Médio (Brasil, 2023).

Para Cassiano (2007), o programa nasceu de uma proposta educacional do governo para garantir a qualidade da educação e o combate ao analfabetismo. A consecução desses objetivos exige urgentemente medidas que beneficiem prioritariamente os alunos carentes da educação básica. Isso inclui programas do livro didático e da merenda escolar.

No início, o programa priorizava-se apenas o atendimento para os alunos da 1ª à 8ª série do Ensino do Primeiro Grau das escolas públicas do Norte e do Nordeste que se contemplavam com componentes básicos de comunicação, expressão e matemática. Em seguida, outras disciplinas foram incorporadas ao currículo escolar.

Em 2003, foi publicada a Resolução CD FNDE nº. 38, de 15/10/2003, que institui o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM).

O atendimento do Ensino Médio foi sendo instituído progressivamente. Em 2004, seu primeiro ano de execução do (PNLEM), foram adquiridos livros de matemática e português para os alunos do 1º ano do Norte e do Nordeste. No (PNLEM) 2006, houve a distribuição e reposição dos livros de matemática e português para Ensino Médio para todos os anos e regiões do país, assim como, compra integral dos livros de biologia. Em

2007, foi ampliado o (PNLEM) com a aquisição de livros de história e de química, e a cada ano que se passava o (PNLEM) era atualizado com as reposições e implementações de outras disciplinas (FNDE, 2023).

Para Earp e Kornis (2005) consolida o governo brasileiro como um dos maiores compradores de livro didático do país, proporcionando um mercado rentável para as editoras e autores desses livros didáticos.

Em 2022 inicia as novas reformas para Ensino Médio. Essas alterações previstas na Lei nº 13.415/2017 transformaram as Diretrizes Nacionais da Educação e a Lei de Bases e definiram uma nova estrutura para o novo Ensino Médio, modificando rapidamente grande parte da organização do sistema educacional atual.

As principais mudanças incluem o aumento da carga horária de 2.400 horas para 3.000 horas, das quais 1.200 horas são destinadas à formação técnica, que antes não estava disponível, bem como a reorganização da grade curricular nas disciplinas básicas que sofreram perda de carga horária, principalmente nas Ciências Exatas. Com isso, essa reforma modificou o sistema escolar sobretudo o material pedagógico básico que é direcionado para as instituições escolares, como por exemplo, os livros didáticos.

Junto com essas mudanças, o processo de seleção dos livros didáticos para uso nas escolas também mudou. Para cada uma das 4 áreas de conhecimento, é realizado a escolha de livros didáticos que possam ser estudados em conjunto dentro dos temas abordados naquela área, por exemplo, a Área de Conhecimento Técnico de Ciências Exatas e Suas Aplicações abrange disciplinas como Química, Física e Biologia.

Portanto, os materiais didáticos disponibilizados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) foram reformulados pelas editoras a fim de poder ser utilizado interdisciplinarmente. Quanto ao método de utilização, os professores de cada disciplina se organizam coletivamente para estipular a forma de divisão do aproveitamento de cada disciplina e dos três anos do Ensino Médio.

Essas mudanças na organização das disciplinas, da matéria trabalhada e da redução da carga horária das disciplinas básicas, são pautas de discussões entre especialistas da área da educação por representarem em diversos aspectos um esvaziamento da educação no Ensino Médio, pois, pela necessidade de serem trabalhados em duas ou mais disciplinas simultaneamente, muitos conteúdos foram adaptados ou “enxugados”, causando uma defasagem dos temas. Assim como, faz se necessário investigar como os conteúdos de Química estão sendo organizados nesses materiais

didáticos, se estão em concordância com o currículo de Pernambuco e sobre qual a concepção de ensino esses novos documentos foram planejados.

3.3 Vida e obra de Louis Victor Pierre Raymond De Broglie

3.3.1 Família De Broglie

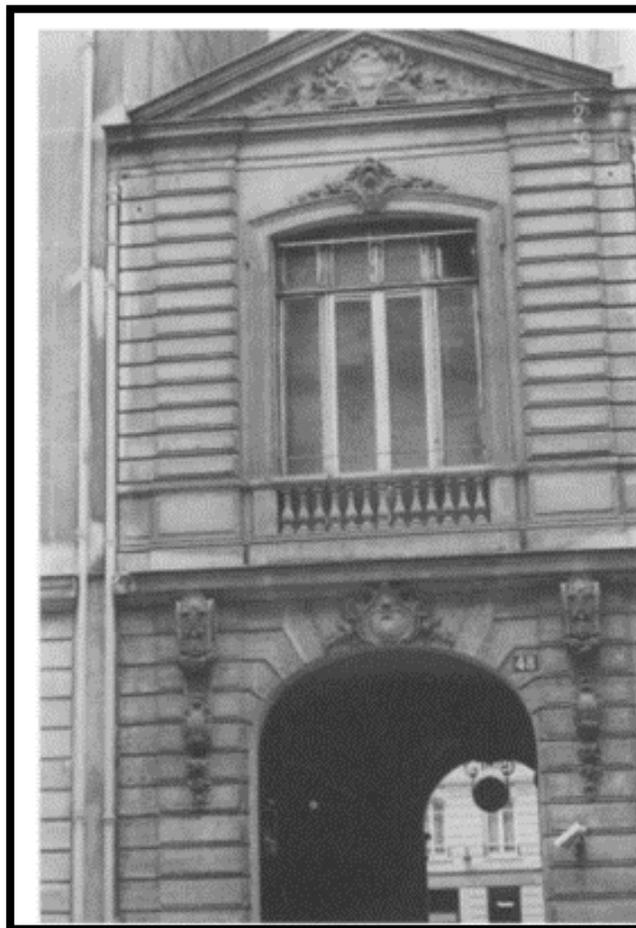
A família Broglie é uma família nobre francesa que remonta ao século XII. O nome da família deriva do castelo de Broglie, localizado na Normandia, norte da França. Acredita-se que a família tenha se estabelecido na região por volta do século XI. Como era de costumes, as rotinas familiares incluíam visitas dos pais à Inglaterra durante a época de caça e a estadia da família numa villa em Dieppe, no Château Saint-Amadour em Anjou, a maior e mais antiga propriedade da aldeia chamada Broglie (pronuncia-se brog-lee) a cerca de 150 quilômetros de distância de Paris. A história do castelo normando remonta ao primeiro duque de Broglie. No início de 1900, a sua biblioteca de mais de 40.000 volumes era considerada a segunda maior biblioteca privada da França e continha todos os livros de Madame de Staël (Ney, 1997, p. 403).

Devido ao hábito de viajar entre os nobres, era costume contratar um tutor para que a educação dos filhos não fosse interrompida quando a família se mudasse de um local para outro. Do final do século XVIII a meados do século XX, a presença de funcionários britânicos era comum nas famílias francesas de classe alta, especialmente nas de Paris, e a família de Broglie empregava babás britânicas, bem como governantas do clero (Ney, 1997, p. 403).

Para a família de Broglie, como para outras famílias antigas, o castelo e a casa da família continuam a ser o local de arquivos e propriedades extremamente importantes: mapas, escrituras de venda, testamentos, textos autobiográficos, cartas, livros, brasões, pinturas e retratos. Móveis, talheres, tudo em uso, são objetos que conectam literalmente o presente e o passado. Vender a propriedade da família seria uma traição não só à tradição familiar, mas também à própria França. Como disse um aristocrata nascido em 1925: “Quando uma propriedade é vendida, uma página da história se perde e a biblioteca é queimada”. Em 1902, a família de Broglie vendeu o Grande Hotel de Paris e mudou-se para um hotel menor (Ney, 1997, p. 403).

Ao longo dos séculos, os membros da família Broglie têm desempenhado papéis importantes na política, na aristocracia e nas forças armadas. Vários membros da família ocuparam cargos de destaque no governo francês, servindo como diplomatas, ministros e conselheiros reais.

Figura 1: Entrada na rue La Bote, 48, no oitavo arrondissement de Paris, local do hotel da família adquirido pelo pai em 1822 e vendido pelos de Broglies em 1902.



Fonte: (Ney, 1997, p. 402) ([Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: Nye, Mary Jo \(studylib.net\)](#))

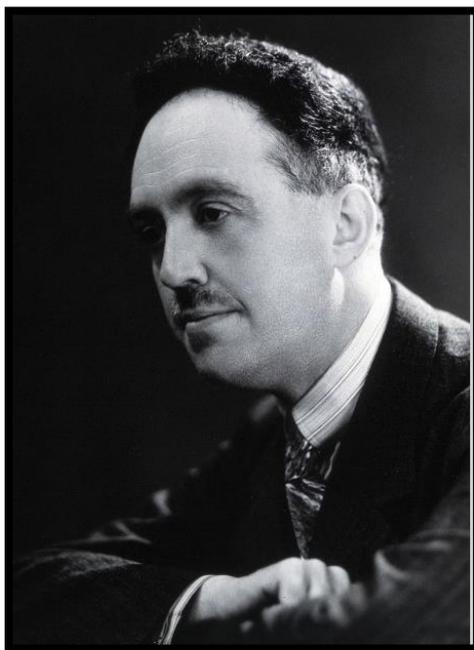
3.3.2 Nascimento de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Louis Victor Pierre Raymond de Broglie nasceu no dia 15 de agosto de 1892, fruto do casal Louis Alphonse Victor de Broglie e de Pauline de La Forest d'Armaillé, na cidade francesa Dieppe, na rua Le Boulevard Aguado número 62. Dieppe é uma cidade marítima,

que faz parte da região da Normandia. Na figura 2 temos a fotografia de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, e na figura 3 temos a foto da rua Le Boulevard (Abragam, 1987, p.26).

Louis de Broglie (1892-1987) teve 4 irmãos. Sua irmã mais velha se chamava Albertine (1872-1946). Louis não teve muito contato com essa irmã, pois a mesma ao se casar com o marquês Pirre de Luppe saiu da casa dos seus pais antes mesmo do nascimento de Louis. Seu irmão mais velho se chamava Maurice (1875-1960), que ficou responsável pela sua educação, assim como, recebeu o título de sexto duque após a morte de seu pai em 1906. O outro irmão se chamava Philippe (1881-1890), mas Louis não chegou a conhecer, pois o mesmo faleceu ainda criança. Sua outra irmã chamava-se Pauline (1888-1972), foi a que mais conviveu com Louis de Broglie (Ney, 1997, pp. 400-401). Ele viveu em um período de grandes transformações sociais e científicas. Seu ambiente familiar e social certamente tiveram um impacto significativo em sua formação e nas escolhas que fez ao longo de sua vida. Nas figuras 4 e 5, observa-se Maurice e Pauline de Broglie.

FIGURA 2: Louis Victor Pierre Raymond de Broglie.



Fonte: futura-sciences (2023, <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-louis-broglie-258/>)

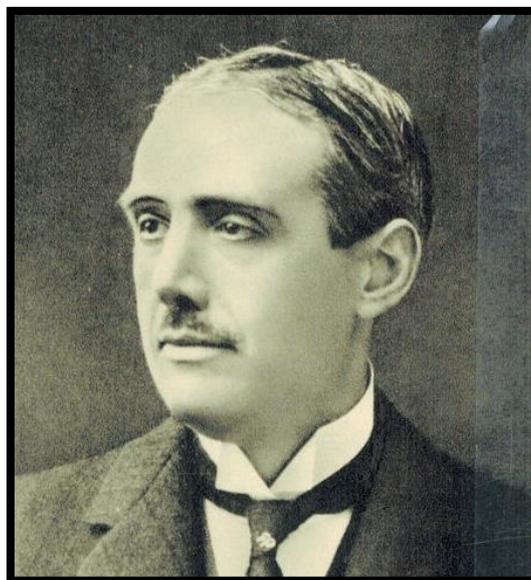
Figura 3: Rua Le Boulevard em Dieppe na França.



Fonte: Commons (1890,

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le boulevard des Italiens et le café Riche.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le_boulevard_des_Italiens_et_le_caf%C3%A9_Riche.jpg))

Figura 4: Maurice de Broglie (irmão de Louis de Broglie).



Fonte: philatelie-pour-tous.fr (1970, <https://philatelie-pour-tous.fr/maurice-de-broglie-physicien/>)

Figura 5: Pauline de Broglie (irmã de Louis de Broglie).



Fonte: (Ney, 1997, p. 407) ([Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: Nye, Mary Jo](#) (studylib.net))

Louis Victor Pierre Raymond de Broglie era uma criança amável, inteligente e com uma memória invejável, isso tudo foi descrito pela sua irmã Paulina, A Condessa de Pange, sendo quatro anos mais velha que ele. Ela escreveu em sua memória:

“... o irmão mais novo tornou-se uma criança encantadora, esbelta, com um rostinho risonho, olhos brilhantes de malícia. Sentado na grande mesa, vestia à noite um traje de veludo, com calções, meias pretas e sapatos com fivelas, que ele parece um pequeno príncipe de um conto de fadas. Sua alegria encheu a casa. Ele conversava o tempo todo, mesmo à mesa de jantar, onde as mais severas injunções de silêncio não podiam fazê-lo segurar a língua, tão irresistível era suas observações. Criado em relativa solidão, lia muito e vivera num mundo real. Ele tinha uma memória prodigiosa e sabia de cor cenas inteiras do teatro clássico que ele recitava com verve inesgotável. Ele parecia ter um gosto particular pela história, em particular pela história política. Ouvindo nossos pais discutirem política, ele improvisava discursos inspirados nos relatos dos jornais e podia recitar listas infalivelmente completas dos Ministros da Terceira República, que mudaram tantas vezes. Um grande futuro como um estadista foi previsto para Louis” (Abragam, 1987, p.26).

Pauline optou por não seguir o exemplo de sua irmã mais velha, Albertine, que se casou e levou uma vida privada conforme o esperado. Em 1902, aos quatorze anos,

Pauline desenvolveu interesse por geologia e arqueologia. Anos mais tarde, vivendo com a família de sua irmã em Beaurepaire, ela escreveu um conto sobre escavações neolíticas e o enviou para a revista *L'Homme Préhistorique* (Ney, 1997, p. 404).

Em resumo, os três irmãos de Louis de Broglie escolheram caminhos diferentes. Albertine, a mais velha, assumiu um papel tradicional e privado no casamento e na família. Desapareceu dos registros públicos. A irmã mais nova, Pauline, desistiu de seu amor original pela arqueologia para construir uma vida pública importante e bem-sucedida como romancista e estudiosa literária. Maurício, o segundo e mais velho filho, cumpriu as obrigações familiares para com ele, nunca deixando que a sua paixão científica comprometesse os seus deveres de príncipe e duque. Sua vida científica não é um “trabalho”. Ele vive principalmente dentro dos limites de sua residência privada. Tal como as casas de campo de Lords Charverre, Raleigh e Salisbury, os laboratórios De Broglie estavam equipados com o mais recente equipamento científico (Ney, 1997, p. 418).

É razoável afirmar que os três filhos mais novos do Quinto Duque de Broglie adotaram o papel tradicional reservado aos filhos da aristocracia, porém com adaptações do século XX e avanços científicos. Pauline, com seu profundo interesse em pesquisa e dedicação ao campo das intelectuais, seguiu a tradição de escrever sobre ciências sociais, história e literatura. Maurice, equilibrando as obrigações familiares e sua carreira científica, agiu conforme esperado de um oficial da Marinha, gerenciando tanto os negócios familiares quanto seu laboratório, expandindo o conhecimento técnico e educando jovens. Em seus trabalhos filosóficos, Louis mesclou o chamado da Igreja para uma vida de pesquisa e reflexão com os interesses científicos. Embora a classe social e a cultura aristocrática tenham distanciado os De Broglie da esfera pública científica na França, a colaboração dentro de suas famílias imediatas permitiu-lhes atingir notáveis patamares intelectuais na comunidade científica (Ney, 1997, p. 421).

3.3.3 O Irmão mais velho – Maurice de Broglie

Maurice concluiu os estudos no College Stanislas, uma escola secundária católica de elite, onde teve uma boa educação em matemática e ciências. Como era de costumes para os De Broglie, ele matricula-se na École Navale entrando para Marinha como oficial em 1897. Indicado para um navio no Mar Mediterrâneo, aproveitou e cursou física,

química e astronomia na Faculdade de Ciências de Marselha, nesta época os raios X estavam em evidências, assim como, os raios de urânio e a partícula negativa da matéria o elétron. Ele levou 4 anos para ter sua graduação em ciências físicas que ocorreu no ano de 1901 (Ney, 1997, p. 404).

Fascinado com a sua graduação em ciências físicas, comunica a família que deixaria o serviço militar. Seu avô, que tinha sido embaixador em Londres e ministro do gabinete no início da Terceira Republica não gostou da sua decisão, pois esperava que ele se tornasse o sexto duque dos De Broglie. A baixo o relato de seu avô.

[...] "Você está sempre pensando sobre estudos científicos e encerrar a carreira militar. A ciência é uma velha que se pode cortejar mais tarde e que não teme as homenagens dos velhos não fazem a felicidade" (Ney, 1997, p. 404).

Em 1904, Maurice solicita licença a marinha e chega a um entendimento com sua família após a morte de seu avô em 1901. Ele concordou com o casamento arranjado por sua família com a filha de uma família abastada da época, Camille de Rochetaillé, em troca da liberdade para continuar sua carreira científica e do benefício da fortuna de seus sogros para estabelecer um laboratório particular em um hotel adquirido por sua sogra, na 27 rue Chateaubriand, no 8º distrito. Em 1908, Maurice preparava uma tese de física no Collège de France com Paul Langevin sobre centros eletrificados de baixa mobilidade em gases.

Em 1906, Maurice uniu-se a Paul Langevin e instalou equipamentos em seu laboratório para estudar o movimento browniano das partículas de vapor ionizadas. Ele conseguiu medir a corrente elétrica usando um ultramicroscópio acoplado a uma chama elétrica. Esse é o projeto no qual Robert Millikan trabalhava na Universidade de Chicago. Em 1908, Pauline, Albertine, Camille e Louis reuniram-se para acompanhar a defesa da tese de Maurice diante do corpo docente da Sorbonne. Nesse mesmo ano, Maurice da baixa na marinha a passa a dedica-se aos seus estudos. Nessa mesma residencia, ele sempre recebia a visita de seus dois irmãos mais novos, Pauline e Louis que sempre adoravam ir ao seu laboratorio (Ney, 1997, p. 405).

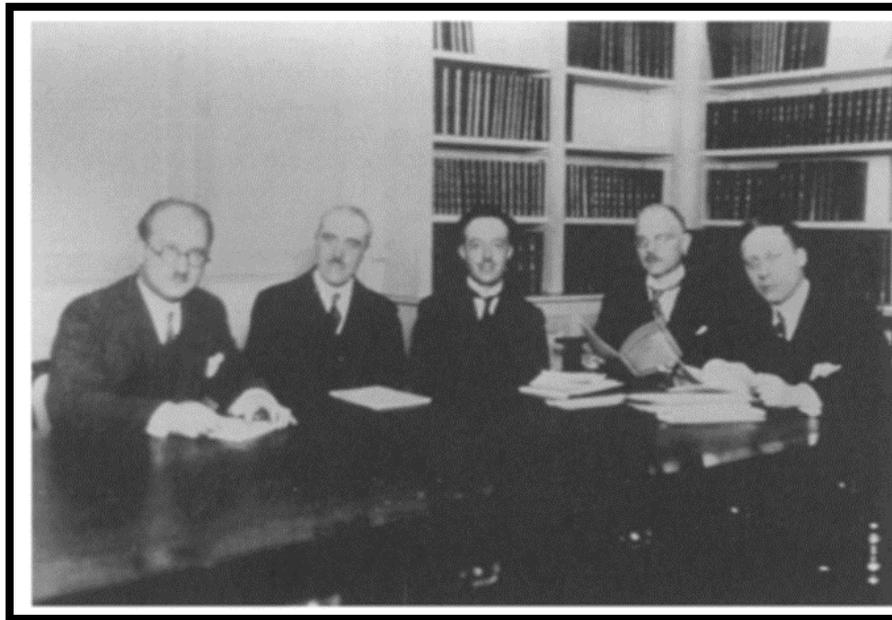
Em 1921, Maurice de Broglie foi agraciado com um doutorado honorário pela Universidade de Oxford, onde seu amigo Lindemann era o diretor do Laboratório Clarendon. Maurice candidatou-se à Academia de Ciências no final dos anos 1920 e foi eleito em 1924. O historiador Maurice Crosland afirmou: "Sua carreira excedeu a dos

profissionais comuns." O departamento "Académiciens libres" foi criado em 1816 para a nobreza. Henri Deslandres, apoiando a candidatura de de Broglie à academia em 1920, mencionou que o trabalho de Maurice de Broglie era o único estudo sobre raios X apresentado na França e poderia ser considerado o único trabalho que a França não tinha realizado. Isso está além do escopo deste estudo. De acordo com Deslandres, Maurice de Broglie alcançou isso em primeiro lugar como um "voluntário" científico em seu laboratório, independente de qualquer instituição educacional (Ney, 1997, p. 409).

O físico Paul Janet, entre outros, referiu-se a Maurice de Broglie como o líder de uma escola de pensamento. Os pesquisadores do laboratório de Broglie nas décadas de 1920 e início de 1930 incluíram Jean-Jacques Trillat (1899), diretor do laboratório CNRS em Bellevue, especialista em raios X e difração de elétrons; Jean Thibaud (1901-1960), fundador do Instituto de Física Atômica em Lyon, que investigou níveis extremos de radiação, do ultravioleta aos raios X; René Lucas (1898–1990), diretor da École de Physique et de Chimie de Paris de 1947 a 1969 e professor de física geral na Universidade de Paris de 1956 a 1968; Louis Cartan, um espectroscopista que ensinava em Poitiers e foi morto pelos alemães durante o regime de Vichy; e Louis Leprince-Ringuet (1901), que se tornou professor na École Polytechnique em 1936 e professor de física nuclear no Collège de France em 1959, especializado no estudo de energias altas, incluindo raios cósmicos. Leprince-Ringuet fez sua primeira visita ao laboratório em 1929 para ver seu primo Trillat. Maurice de Broglie contratou Leprince-Ringuet como assistente de pesquisa, aproveitando sua experiência como engenheiro elétrico no PTT (Serviço Nacional de Correios e Telecomunicações) para o desenvolvimento de dispositivos de detecção e medição de partículas radioativa (Ney, 1997, p. 410).

Figura 6: Biblioteca e sala de trabalho de Maurice de Broglie em sua residência particular na rue Chateaubriand, em 1925. Da esquerda para a direita: Jean Thibaud, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Alexandre Dauvillier e Jean-Jacques Trillat.

(Cortesia de Archives de l'Académie des Sciences, Paris).



Fonte: (Ney, 1997, p. 410)

Uma significativa celebração de jubileu foi realizada na Sorbonne em honra a Maurice, que se retirou da atividade científica em 1946. Durante sua carreira, Maurice de Broglie desempenhou deveres sociais e civis associados ao seu papel, além de suas contribuições científicas. Entre suas responsabilidades, Broglie gerenciou a propriedade de Saint-Amadour e atuou como representante oficial da família. Por exemplo, em 1931, ele viajou para os Estados Unidos com Pauline para celebrar o 150º aniversário da vitória em Yorktown, onde um antepassado dos Broglie lutou ao lado de Lafayette.

Após a prisão de Paul Langevin, sua aposentadoria forçada em 1941 e subsequente vigilância domiciliar em Troyes pela Gestapo durante quatro anos devido a suas atividades antifascistas, Maurice teve uma breve passagem pelo corpo docente do Collège de France de 1942 a 1944, após convite de Frederic Joliot. A aula inaugural de De Broglie, realizada sob a observação de oficiais, homenageou as pesquisas de Langevin.

O gabinete científico de Maurice de Broglie funcionava como seu laboratório privado, e ele mantinha um horário de atendimento na Academia de Ciências. Seus estudantes e colaboradores de laboratório recordam-no como uma pessoa conscienciosa, respeitosa e sensível para com aqueles que o rodeavam. O físico britânico William Wilson

louvou-o por orientar "muitos jovens talentosos". Leprince-Ringuet recorda que "era extremamente humano, nada arrogante, e fazia com que todos se sentissem confortáveis ao falar com ele: alguém que emanava uma vigilância constante, a humildade genuína de um verdadeiro cientista e um julgamento equilibrado dos eventos e personagens". Ele era engraçado e por vezes cáustico. Maurice de Broglie faleceu aos 85 anos, e seu funeral teve a presença de representantes da Academia, do governo francês e da Igreja Católica, incluindo o Bispo de Evreux. O obituário do *Le Figaro* mencionou a presença de membros destacados da família, mas omitiu Luís, agora o sétimo duque de Broglie (Ney, 1997, p. 417-418).

3.3.4 A Construção Educacional de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Em 26 de agosto de 1906 Louis Alphonse Victor de Broglie, pai de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, aos 59 anos de idade veio a óbito, deixando os dois filhos mais novos na companhia de sua esposa e mãe.

Após a morte de Louis Alphonse, Maurice torna-se o sexto duque de Broglie, título que seu avô tanto desejava. Maurice, 31 anos, agora chefe da família de Broglie, buscou uma boa educação para Louis de Broglie, que tinha na época 14 anos de idade. Seu irmão então decidiu mandá-lo para o *College Stanislas*, mas para uma escola estadual, o *Lycee Janson de Sailly*, acompanhado pelo seu mentor, Padre Chanet. Essa decisão foi tomada, depois que Maurice soube que seu ex-professor de física em Marselha, Leopold Brizard, lecionava no Liceu (Ney, 1997, p. 405). Lá, ele passa três anos estudando e se graduando aos 17 anos em Bacharelado de filosofia e de matemática (Abragam, 1987, p.27). Na figura 7 é apresentado uma fotografia da Universidade *Lycée Janson-de-Sailly*. Esse relato ficou comprovado pelo depoimento de seu irmão Maurice de Broglie.

“... Tendo experimentado a mim mesmo o inconveniente de uma pressão exercida sobre os estudos de um jovem, abstive-me de dar uma direção rígida aos estudos de meu irmão, embora às vezes suas vacilações me preocupassem. Ele foi bom em francês, história, física, filosofia, e não em matemática, química e geografia, pobre em desenho e línguas estrangeiras” (Abragam, 1987, p.27).

Figura 7: Escola Lycée Janson de Silly.



Fonte: Les Jansoniens (1829, Alexandre Janson. Fondateur du lycée Janson de Sailly).

A concretização de sua vocação científica ainda levou um tempo para acontecer. Destinado pelas tradições familiares a seguir uma carreira em literatura, história ou política, ele se graduou em história política aos 19 anos e estava prestes a começar uma tese sobre a história medieval. Contudo, desencantou-se com a disciplina e temporariamente redirecionou-se para o direito. Paralelamente, desenvolveu conhecimento e uma paixão pelas obras de Henri Poincaré: 'Ciência e Hipótese' e 'O Valor da Ciência'. Esse foi o momento decisivo para sua futura dedicação à ciência, Abragam (1988).

Examinando criticamente os fundamentos do raciocínio matemático de Henri Poincaré, ele hesita e está longe de acreditar em si mesmo. Soma-se a isso o fato de ele ter sido reprovado no exame geral de física (que trata de todos os fenômenos periódicos). Nada parece promissor, ele se tornará um fracasso apesar de seu trabalho duro? Foi-se a alegria e o bom humor de sua juventude! A fala brilhante de sua infância foi sufocada pela profundidade de sua contemplação. Segundo o relato, esse episódio marcou a vida de Broglie, pois a criança feliz e amável descrita por sua irmã havia se tornado um jovem reservado.

Segundo a sua bibliografia, “Louis de Broglie não encontrou ali o que procurava”. Um curso de matemática fez com que, ele se encontrasse nas áreas das ciências exatas

que foi o seu lugar de grande sucesso (Rosa, 2015). Essa mudança que Louis de Broglie fez em relação a sua formação acadêmica foi relatada pela sua irmã Pauline.

Pauline recordou-se de ter encontrado Louis escondido numa pequena sala repleta de livros de matemática. Ela não tinha certeza se gostara do que vira: "Belíssimo e encantador príncipe, percebi que a minha infância havia desaparecido para sempre. Um mero estudioso que levava uma vida religiosa (Ney, 1997, p. 406)".

Não foi uma tarefa simples. Apesar de Louis ter realizado cursos de matemática para se preparar para o diploma em ciências, ele não obteve sucesso no exame de física geral que tratava de fenômenos periódicos (ondas sonoras e luminosas). Contudo, aplicou seu conhecimento recém-adquirido em Física Teórica para ser aprovado em todos os exames, conquistando seu diploma em 1913 (Ney, 1997, p. 406).

3.3.5 O Primeiro Conselho de Solvay de Física de 1911

Em 1911, após concluir o bacharelado e os estudos universitários em filosofia, matemática e ciências, Louis de Broglie recebeu uma nova inspiração. Pois nesse mesmo ano ocorreu o primeiro congresso de Solvay em Bruxelas no outono de 30 de outubro a 3 de novembro de 1911, Langevin propôs Maurice de Broglie como secretário e coeditor de artigos publicados e atas de discussões. Maurice mostrou para Louis páginas dessas atas dos trabalhos dos 24 físicos que participaram desse conselho. Louis leu minuciosamente as atas que reuniu as mentes mais brilhantes da época para debater a "Radiação e o Quanta" (Ney, 1997, p. 406). Os físicos que participaram dessa conferencia foram: Walther Nernst, Robert Goldschmidt, Max Planck, Marcel Brillouin, Heinrich Rubens, Ernest Solvay, Arnold Sommerfeld, Hendrik Lorentz (presidente), Frederick Leindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Emil Warburg, Jean Baptiste Perrin, Friedrich Hasenohrl, George Hostelet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Wilhelm Wien, Ernest Rutherford, Marie Curi, Henri Poincaré, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein, Paul Langevin. Todos estão na figura 8 abaixo.

Figura 8: Os 24 Cientistas que participaram da 1ª Conferencia de Solvay.



Fonte: [S1911.jpg \(640×410\) \(physika.info\)](#)

Após a conferência, Louis de Broglie sob forte influência do seu irmão Maurice, que foi um dos secretários do Conselho de Solvay de 1911 (conselho que foi dedicado à questão dos quanta), passa a acompanhar de perto o trabalho desenvolvido pelo seu irmão e seus colaboradores. No laboratório, eles trabalhavam nos problemas fundamentais da física dos quanta. Isso chamou a atenção de Louis que passou a pesquisar e publicar alguns resultados na mesma área de pesquisa de seu irmão.

Os cursos de Paul Langevin eram vanguardistas em comparação com tudo o que era feito na França naquela época: neles, ensinavam-se teorias estatísticas das propriedades da matéria, além da relatividade e da física quântica. Contudo, o domínio das teorias estatísticas e da relatividade foi decisivo para os trabalhos iniciais de Luis de Broglie.

A contribuição de Louis de Broglie no laboratório de seu irmão foi primordialmente a interpretação teórica dos dados experimentais coletados por seu irmão e colaboradores. Segundo Lochak, Louis trabalhava isoladamente no laboratório do irmão, intervindo apenas quando consultado sobre aspectos teóricos. Jean-Jacques Trillat, membro do laboratório, relatou a Lochak que Louis cumprimentava todos ao chegar pela

manhã e depois se isolava em seu escritório para se dedicar ao trabalho teórico, o qual realizava sem a presença de ninguém, inclusive de seu irmão, e cujo conteúdo era desconhecido (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 49).

Este isolamento não é completo. Apesar de ter desenvolvido sozinho as ideias que levarão à sua tese, ele ainda participa do trabalho intelectual do laboratório, como demonstram os artigos publicados em colaboração com seu irmão ou Alexandre Dauvillier (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 49).

3.3.6 Os de Broglie e a Guerra

Em agosto de 1914, inicia-se a guerra. Com seu marido na frente, Pauline se voluntariou para angariar fundos e suprimentos em apoio a um serviço de ambulâncias. A mulher, que antes do casamento nunca havia saído de casa sozinha, adotou estratégias e realizou treze viagens de trem a frente da guerra durante os dezoito meses seguintes (Ney, 1997, p. 406).

Atuando como telegrafista na Marinha, Maurice voltou à estação de rádio em Bordeaux antes de ser transferido para o Ministério da Exploração em Paris, em 1915. Louis de Broglie juntou-se ao esforço de guerra como engenheiro e foi designado para o Serviço de Comunicações Sem Fio em Paris. Durante o conflito, ele viveu com sua mãe e avó. Ele trabalhava no subsolo refrigerado da Torre Eiffel (Ney, 1997, p. 406). Há cerca de cinco anos, que ele trabalhou com aparelhos que geram, emitem e recebem ondas eletromagnéticas, o que o familiarizou com os conceitos de trens de ondas, modulação, sintonia e batidas, que foram posteriormente utilizados, em sua Mecânica das Ondas (Rosa, 2014).

A avó deles, Celestine de Segur, faleceu logo após a guerra. Pauline e seu marido se mudaram para Estrasburgo em 1920, quando a Alsácia-Lorena foi reincorporada à França. Por seis anos, eles organizaram atividades de apoio à universidade francesa recém-restaurada em Estrasburgo. Uma conferência em sua villa fomentou a reconciliação franco-alemã, contando com palestrantes do calibre de Thomas Mann e Maurice Barres (Ney, 1997, p. 406).

Após a Primeira Guerra Mundial, Louis de Broglie pôde retornar à pesquisa que despertou seu interesse pela física. Em 1920, dedicou-se a experimentos de raios X no laboratório particular de seu irmão Maurice. Tamanho era seu interesse pelo assunto que

assistiu como ouvinte a alguns dos cursos ministrados no *Collège de France* por Paul Langevin, que já havia dado palestras a seus alunos sobre o postulado de Einstein sobre o quantum de luz. Além disso, participou do *Emil Porel*. Ele também estudou as obras de Bohr, Sommerfeld, Einstein e outros. "Com base nesses estudos, De Broglie estava convencido da necessidade de elaborar uma teoria capaz de descrever tanto as propriedades ondulatórias quanto as partículas da radiação (Rosa, 2014).

3.3.7 A contribuição de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie para o Desenvolvimento Conceitual da Teoria dos Quanta e a sua Tese de Doutorado

Após a primeira conferência, que ocorreu em 1911, Louis de Broglie sob forte influência do seu irmão Maurice, que foi um dos secretários do Conselho de Solvay (conselho que foi dedicado à questão dos quanta), passa a acompanhar de perto o trabalho desenvolvido pelo seu irmão e seus colaboradores. No laboratório, eles trabalhavam nos problemas fundamentais da física dos quanta. Isso chamou a atenção de Louis que passou a pesquisar e publicar alguns resultados na mesma área de pesquisa de seu irmão. Mais, Louis de Broglie faz suas primeiras publicações científicas em 1920, logo após de ser dispensado do exército francês.

A primeira publicação surgiu nos Relatórios da Academia de Ciências em 8 de março de 1920, abordando modificações nas fórmulas do átomo de Bohr, especialmente considerando a presença de múltiplos elétrons, e sua comparação com experimentos. Seguiram-se uma série de artigos, escritos individualmente ou em colaboração com Dauvillier, focados principalmente na interpretação teórica dos espectros de absorção de raios X, na estrutura eletrônica dos átomos e no espectro de emissão de elétrons atômicos durante a ionização. Este trabalho destacou-se, em particular, pela sua proximidade com os dados experimentais, pois as especulações são restritas, e de Broglie utiliza principalmente teorias, e não somente fórmulas já existentes, para comparar os valores calculados diretamente com os experimentos (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 51).

A contribuição de Louis de Broglie para o desenvolvimento conceitual da teoria dos quanta pode ser vista como uma síntese que combina aspectos de ondas e partículas, tanto para a luz quanto para partículas como o elétron. Este trabalho que começou em 1922, com artigos sobre a teoria quântica. Neste ano, ele publicou dois artigos sobre quanta de luz, quando se concentrou em analisá-los como partículas relativísticas, tentando conectar fenômenos ondulatórios a tais modelos. Com base em sua familiaridade

com a espectroscopia de raios X e após discussões com seu irmão Maurice de Broglie, ele se convenceu da natureza dual dos raios X, exibindo características semelhantes a ondas em certos experimentos, sofrendo interferência e difração, enquanto em outros experimentos partículas propriedades podem ser alcançadas extraindo elétrons de superfícies metálicas, mesmo em baixas intensidades.

Em 1923, de Broglie decidiu estender a dualidade onda-partícula à matéria, especialmente para os elétrons. Esta conjectura é baseada em duas observações importantes: a primeira está relacionada às condições de quantização dos orbitais do elétron no modelo atômico de Bohr-Sommerfeld. Louis de Broglie fez relatos da sua descoberta sobre as ondas de matéria em três notas. Em suas primeiras observações, ele estabeleceu a relação entre o movimento de partículas livres e sua propagação de ondas, e relacionou a estabilidade quântica com o movimento dos elétrons nos átomos. Uma segunda observação nos leva a teorias de interferência e difração que são consistentes com a existência de fótons. Em uma nota final, ou melhor, a terceira nota de Broglie usa a lei da radiação de corpo negro de Planck para mostrar a relação entre o princípio da mecânica analítica de Maupertuis e o princípio da propagação de ondas de Fermat. Uma das observações tornadas claras nas referências de Broglie é que a data da descoberta da mecânica ondulatória é 1923, o que pode ser visto nas três notas que ele relatou. Muitos afirmam que remonta a 1924, quando Luis de Broglie publicou uma versão mais extensa de sua dissertação de doutorado (Rosa, 2014). Em seu discurso na cerimônia de aceitação do Prêmio Nobel, de Broglie declarou:

[...] a determinação dos movimentos estáveis dos elétrons no átomo envolve números inteiros, e até agora os únicos fenômenos que envolvem números inteiros em física foram aqueles de interferência e de auto vibrações. Isso sugeriu a ideia para mim que elétrons não poderiam ser representados como simples corpúsculos, mas também deveria haver uma periodicidade relacionada com eles. Eu, então, cheguei à seguinte conclusão que guiaram meus estudos: para ambos, matéria e radiação, luz em particular, é necessário introduzir o conceito corpuscular e o conceito ondulatório ao mesmo tempo. Em outras palavras, a existência de corpúsculos acompanhados por ondas tem de ser considerada em todos os casos. (De Broglie, 1929, p.4)

Ele ampliou essa síntese e a apresentou com muito mais detalhes em sua tese de doutorado defendida em 25 novembro de 1924 em Sorbonne sob o título “*Recherches sur la théorie des quanta*” (De Broglie, 2004). Esta uma das teses mais importantes da

história da física é resultado de pelo menos três anos de pesquisas teóricas, que foram precedidas de testes experimentais com radiação, mais precisamente com os raios X. Antes da defesa De Broglie redigiu notas adicionais e com mais detalhes no *Comptes Rendus* e no *Journal de Physique et le Radium*.

De certa forma, De Broglie dar início as suas pesquisas observando e estudando trabalho de Einstein sobre o quantum na radiação (luz), e nas suas primeira notas correspondente ao o assunto (1921-1922), ele aborda a radiação do corpo negro como sendo considerada como um gás formado por átomos leves, o que mostra que se está radiação for processada pela mecânica estatística, a lei de distribuição de Wien pode ser obtida, mas se o conceito de moléculas leves for introduzido, é possível obter a distribuição de Planck (Rosa, 2014).

Segundo os relatos de Broglie a luz existe um aspecto de partícula e de onda, energia = h vezes a frequência, onde h é a constante de Planck, é natural supor que a matéria tenha um aspecto de partícula e de onda, este último desconhecido até agora. Esses dois aspectos devem ser combinados pela formulação geral da qual emerge a constante de Planck, e aquelas relações que se aplicam à luz devem ser incluídas como casos especiais (De Broglie, 1960, p. 3).

Na segunda obra, Louis Victor Pierre Raymond de Broglie tentou conciliar a hipótese quântica de luz com os fenômenos de interferência e difração, e pela primeira vez propôs a ideia de que era necessário associar algum tipo de periodicidade a esses quanta, sem, no entanto, afirmar explicitamente como os átomos leves estão relacionados com as ondas. A exploração da relação entre as ondas e as partículas de luz foi o guia de seu trabalho, e as ideias básicas de sua teoria surgiram no final do verão de 1923. Suas observações, que resultaram no conceito para as ondas de fase foram aprimoradas com a publicação de três artigos que se tornaram o artigo de referência na mecânica ondulatória. Nessas publicações, de Broglie afirma para o movimento, pelo qual qualquer porção da matéria, estando com sua massa em repouso, m_0 , estaria associado a um fenômeno periódico proporcionando uma frequência igual a $\nu_0 = m_0c^2/h$, comprovando que pode relacionar essa energia de repouso m_0c^2 com a equação de Planck ($E = h\nu$). Essa observação, de Broglie associou a todas as partículas estudadas através da mecânica relativística. Com tudo isso, surge um problema sobre a frequência associada a um quantum quando o observador não está em repouso em relação ao próprio quantum. De Broglie conclui associando a uma onda toda energia envolvida. Isso, faz com que, de Broglie parta para o desenvolvimento de sua teoria. Em seguida, investigando a relação

entre propriedades corpusculares e ondulatórias, fez uma analogia com dois princípios: Maupertuis (a dinâmica dos pontos na matéria) e Fermat (o efeito mínimo da óptica geométrica). Então ele conseguiu combinar física de ondas e física de partículas (Rosa, 2014).

Luis de Broglie compreendendo a estrutura da relatividade, o aspecto dual de onda e a partícula do fóton, inerente à teoria do efeito fotoelétrico dada por Einstein, faz com que, ele venha ter a ideia da dupla onda-partícula natureza do elétron. Pois, como Louis de Broglie teve contato diário com o efeito fotoelétrico, através do laboratório de seu irmão, ficou impressionado para a busca da solução deste enigma. No qual, a toda descoberta poderia ser resumida na seguinte frase: “Porque o fóton, que, como todos sabem, é uma onda, também é uma partícula, por que o elétron (ou qualquer partícula material) não deveria ser também uma onda?” difícil superestimar a ousadia extraordinária e o alcance das consequências desta simples hipótese (Rosa, 2014).

Em 1924 de Broglie envia sua tese para a banca composta por quatro cientistas ilustres, sendo três professores da Sorbonne: Jean Baptiste Perrin que receberia o prêmio Nobel em 1926 pelo seu trabalho sobre a “estrutura descontínua da matéria e especialmente pela descoberta do equilíbrio da sedimentação”, Charles-Victor Mauguin mineralogista e Élie Joseph Cartan matemático, especialista em geometria riemanniana e teoria dos grupos contínuos. Porém, esses três grandes cientistas não tinham embasamento ideal para compreender a grande descoberta de Broglie. O quarto professor que participou da banca foi Paul Langevin professor da College de France, no qual, o único que tinha conhecimento sobre a teoria quântica e da relatividade. No entanto, mesmo Langevin, a quem de Broglie recebeu uma cópia de seu manuscrito para uma avaliação, encontrando-se com o filósofo Leon Brunschvicg enquanto carregava debaixo do braço o precioso manuscrito, disse-lhe: ‘Estou levando comigo a tese do irmão de Maurice de Broglie com quem Langevin foi grande amigo. Lendo a tese, Langevin percebe que outro cientista tinha que ler a grande descoberta de Broglie e Einstein seria o cientista a altura para julgar este trabalho, com isso, ele instruiu de Broglie a enviar para Berlim uma cópia da sua tese. Chegando em Berlin e após a leitura Einstein compreende a ideia da escrita e imediatamente escreve uma carta para Langevin relatando a importância do trabalho de Broglie. Com o parecer de Einstein a banca aprovou com notável maestria a tese de Louis de Broglie (Abragam, 1987).

Louis de Broglie inicia sua tese com uma breve visão geral do desenvolvimento da física. Os séculos XVI e XX, destacando o sucesso da mecânica newtoniana em

descrever os mais diversos fenômenos naturais, seu formalismo foi refinado ao longo dos séculos XVIII e XIX até ganhar espaço com base no princípio de ação mínima de Maupertuis e ação estática hamiltoniana. Ele segue citando a termodinâmica desenvolvida por Clausius, Boltzmann, Gibbs, Carnot, etc., rapidamente explicada em termos mecanicistas, para o surgimento da mecânica estatística (Abragam, 1987).

De Broglie chamou a atenção para o desenvolvimento da óptica, que atraiu a atenção de muitos pesquisadores a partir do século XVII. Para explicar o fenômeno óptico observado, esses pesquisadores foram capazes de formular duas teorias completamente diferentes. Por um lado, Huygens defendeu o modelo de onda de luz, enquanto Newton defendia o modelo de partícula. No início de 1800, no entanto, o trabalho de Young e Fresnel estabeleceu que a luz possuía propriedades dual (Abragam, 1987).

Louis então apresenta as principais contribuições para o desenvolvimento da teoria quântica, citando Einstein, Bohr, Sommerfeld, Compton, Maurice de Broglie, Zeeman, Stark e outros. Para de Broglie, esses trabalhos forneceram evidências claras de que a natureza exibe aspectos de onda e partícula, e havia a necessidade de desenvolver uma teoria que pudesse unificar esses dois lados opostos e revelar a natureza fundamental do quantum. Alguns desses trabalhos já foram concluídos por ele em anos anteriores, e o objetivo da tese de doutorado é apresentar e discutir esses resultados obtido com sucesso, e as possíveis deficiências de sua proposta.

Importante frisar que tese de Louis de Broglie foi escrita em sete capítulos, nos quais ele pretendeu apresentar as suas ideias sobre a natureza dual da matéria e da radiação luminosa, cujo principal objetivo foi encontrar uma síntese entre as propriedades das ondas e das partículas.

Dentre os presentes na defesa, R.J. Van de Graaff (1901-1967) foi um que estudou na Sorbonne. "Isso não aconteceu com muitos", ele comentou posteriormente. Em um ano, Paul Dirac solicitou a Louis de Broglie uma cópia de sua palestra. Van de Graaff também estudou com Arnold Sommerfeld em Munique e com Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan em Göttingen. Em março de 1926, Erwin Schrödinger escreveu para de Broglie, aplicando as ideias deste à sua nova teoria (Ney, 1997, p. 414).

Um fato bastante interessante sobre a tese de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie ocorreu quando Einstein, publica em 1925 sobre a teoria quântica dos gases ideais, Einstein argumentou que a variação associada à nova estatística de Bose-Einstein contém dois termos distintos que podem ser interpretados como contribuições de onda e partícula. Ele argumentou que a contribuição poderia ser interpretada como uma onda de

matéria pelo termo onda, citando o artigo de Broglie. Através do artigo de Einstein, o artigo de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie tornou-se conhecido fora da França e influenciou o desenvolvimento da mecânica ondulatória de Schrödinger (Bacciagalupi; Valentini, 2006, p.57; Darrigol, 2003, p.346).

3.3.8 O Prêmio Nobel de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Três anos mais tarde, em 1925, Louis de Broglie e Maurice de Broglie foram indicados para o Prêmio Nobel de Física pelo físico de Leningrado Orest Khvol'son (nascido em 1852) por suas pesquisas sobre raios X. Em 1926, o filho de Khvol voltou a mencionar os irmãos. Em 1928, ele atribuiu sua pesquisa a Louis. No mesmo ano, Maurice foi nomeado por Hjalmar Tallqvist e Jarl A. Wasastjerna de Helsinque por suas contribuições para a emissão e detecção de raios X, assim como pela radiação beta secundária. Em 1929, Louis de Broglie foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física, tendo recebido doze indicações distintas, enquanto Maurice não recebeu nenhuma (Ney, 1997, p. 414).

Na correspondência sobre a concessão do Prêmio Nobel a Louis de Broglie em 1929, Jean Perrin incluiu um pôster com fotografias eletrônicas feitas por Maurice Ponte em Paris, destacando que o trabalho de Louis de Broglie havia sido comprovado cientificamente. Louis de Broglie, esperando validação no laboratório de seu irmão, solicitou a Dauvillier que realizasse um experimento. Após o insucesso, Dauvillier abandonou o projeto. Se os resultados tivessem emergido do laboratório de Maurice de Broglie, o Prêmio Nobel poderia ter sido compartilhado entre os irmãos.

A expectativa da família Broglie era que os irmãos fossem agraciados com um prêmio, e mais tarde, membros da comunidade científica francesa manifestaram surpresa pelo fato de o Prêmio Nobel não ter reconhecido as pesquisas de Maurice e Louis. Historicamente, já houve prêmios Nobel concedidos a familiares: o Nobel de Física de 1903 foi para o casal Marie e Pierre Curie (junto com Henri Becquerel), e o Nobel de Física de 1915 foi entregue a William Henry Bragg e seu filho, William Lawrence Bragg.

Podem existir incertezas quanto à contínua confiabilidade da pesquisa conduzida no laboratório de Maurice de Broglie. Se for o caso, elas podem ter origem nas discussões dos anos 1920 entre a equipe de Copenhague, formada por Dirk Coster e George Hevesy, e os colegas de Paris, Georges Urbain e Alexandre Dauvillier. O cerne do problema

residia nas linhas observadas no laboratório de Broglie, que foram fundamentais para a descoberta do elemento químico número 72. Somente Bohr e Rutherford sugeriram que a pesquisa de Dauvillier poderia ser o resultado de um erro, uma difamação enraizada no campo de feixe N. Isso prejudicou a reputação da ciência francesa no início do século XX.

Portanto, mesmo que Dauvillier pudesse confirmar as declarações de Louis de Broglie sobre a difração eletrônica, é possível que isso não fosse muito convincente para a comunidade científica em geral, especialmente para o grupo de Copenhague, que já possuía preconceitos contra a França e seu potencial na física quântica. Em uma carta à Academia Sueca de Ciências, recomendando Davisson e Louis de Broglie para o Prêmio Nobel em 1929, James Franck avaliou especificamente o trabalho de Schrödinger, Heisenberg e Born, colocando-os acima de Broglie.

Em dezembro de 1929, Pauline e Maurice acompanharam Louis a Estocolmo para a cerimônia do Prêmio Nobel. O amigo de Pauline, Thomas Mann, também foi agraciado com o Nobel. Posteriormente, Pauline mencionou em uma carta a Lindemann que estava se dedicando a palestras e livros, aspirando um dia receber o Nobel. Acrescentou que acreditava que seu irmão Maurice logo faria uma descoberta digna do prêmio, e seria notável ter três laureados na família (Ney, 1997, p. 415).

É uma pena que o Prêmio Nobel não tenha sido concedido um ano antes. A mãe de Louis, com quem ele ainda morava, faleceu em 1928. Pauline lamentou que levou para o túmulo a imagem de Louis como um "malfeitor" que nunca lhe proporcionaria o herdeiro tão desejado. Maurice perdeu sua filha única com apenas sete anos de idade. Broglie não deixou descendentes. Após a morte de sua mãe, Louis de Broglie vendeu sua residência em Paris e se mudou para o elegante subúrbio de Neuilly. Ele foi nomeado professor da Universidade de Paris no mesmo ano e começou a lecionar em 1931. Quando foi nomeado para a Sorbonne, um de seus amigos íntimos disse: "Então, você se tornou um funcionário público" (Ney, 1997, p. 416).

3.3.9 O Quinto Conselho de Solvay de Física de 1927

No dia 25 de outubro de 1927, Louis de Broglie participou do renomado congresso de Solvay, um dos mais significativos na história da física moderna. Sua teoria inovadora sobre a natureza da matéria foi um marco no avanço da mecânica quântica. Durante a

Quinta Conferência Internacional de Solvay, ele apresentou um artigo chamado "*La nouvelle dynamique des quanta*" (De Broglie, 1927B). O objetivo principal desse artigo era oferecer uma perspectiva teórica que pudesse restabelecer o significado de fenômenos específicos, como a equação de Schrödinger. O estudo é dividido em três partes, sendo que no primeiro capítulo, De Broglie expõe as ideias fundamentais de seus trabalhos anteriores que conduziram à interpretação da fórmula de ondas estacionárias de Bohr-Sommerfeld e ao desenvolvimento da mecânica ondulatória de Schrödinger.

Até o momento, o impacto das previsões experimentais da onda de eventos foi confirmado. Fotografias de hibridização de elétrons foram obtidas por Clinton J. Davisson e Lester H. Germer nos Bell Laboratories em Nova Jersey, e por George P. Thomson, filho de J. J. Thomson, em Aberdeen. Os resultados foram apresentados nessa Conferência, enquanto um artigo de 1925 de Walter Elsasser, discípulo de James Franck, já indicava que físicos como Davisson e C.H. Kunsman haviam observado propriedades similares em feixes de elétrons entre 1921-1923. Outra evidência para a verificação do fenômeno é a transparência observada no movimento lento de elétrons finos, conhecido como efeito Ramsauer (Ney, 1997, p. 414).

Para Schrödinger, em relação a nova Mecânica, as ondas devem ser representadas por funções cujas amplitudes são contínuas e descritivas

$$\Psi = a \cos \frac{2\pi}{h} \varphi \quad (1.1)$$

sendo que a representa uma função contínua e φ é a solução da equação jacobiana na primeira aproximação.

Uma partícula seria representada por um conjunto de ondas de frequência muito próxima se propagando dentro de um cone muito estreito, então a partícula não estaria realmente no tempo, ela ocuparia uma região do espaço pelo menos uma ordem de grandeza do tamanho de seu comprimento de onda. Para de Broglie, a ideia encontrou dificuldades.

Nos fenômenos subatômicos, a região onde ocorre o movimento têm dimensões da ordem dos comprimentos de onda, então a partícula não seria definida como um todo: para Schrödinger, os elétrons no átomo estavam espalhados de tal forma que não poderíamos falar sobre sua posição ou velocidade. Essa maneira de conceber pontos substantivos parece criar muitas dificuldades. Por exemplo, se um quantum de luz

ultravioleta ocupa um volume da mesma ordem que seu comprimento de onda, é difícil imaginar que esse quantum pode ser absorvido por átomos mil vezes menores (De Broglie, 1927).

Outra dificuldade que de Broglie levantou com a mecânica ondulatória de Schrödinger está relacionada à dinâmica de sistemas de muitos corpos, pois neste caso a equação de onda descreve a propagação de uma onda no espaço de configuração, que é um espaço abstrato com dimensões $3N$, onde N é o número de partículas no sistema considerado. Embora reconheça o sucesso desse método, ele diz:

Parece-me um tanto paradoxal construir um espaço de configuração a partir das coordenadas de pontos inexistentes. Além disso, embora a propagação de uma onda no espaço tenha um significado físico claro, não é o mesmo que a propagação de uma onda em um espaço de configuração abstrata com algumas dimensões. é determinado pelo número de graus de liberdade do sistema (De Broglie, 1927).

Sobre a prova de correspondência entre a mecânica ondulatória de Schrödinger e a mecânica quântica de Heisenberg, de Broglie a chamou de "uma transformação de criatividade admirável". No entanto, como a equação de Schrödinger não era relativista, de Broglie argumentou que, no caso de um simples ponto material, a teoria geral da relatividade deveria ser aceita exatamente como a equação de Klein-Gordo.

Numa admirável mudança de criatividade, Schrödinger mostrou que a mecânica quântica inventada por Heisenberg e desenvolvida por Born, Jordan, Pauli et al., pode ser traduzida para a linguagem da mecânica ondulatória (De Broglie, 1927).

Dando continuidade a quinta Conferência Internacional de Solvay de 1927, De Broglie relata que, para cada onda Ψ define uma classe de movimento, todos esses movimentos são controlados por uma fórmula de controle se soubermos a posição inicial da partícula. Se essa posição inicial for ignorada, a expressão relativista

$$K\alpha^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} - eV \right) d\tau \quad (1.2)$$

onde K é uma constante e α é a amplitude, indica a probabilidade de uma partícula ocorrer em um elemento de volume $d\tau$ em um dado tempo t . Dada a aproximação que temos de Newton,

$$\text{constante} \times a^2 d\tau \quad (1.3)$$

Com isso, refere-se à interpretação probabilística de Born.

Para De Broglie não havia razão para recusar o determinismo dos fenômenos físicos individuais, uma vez que o movimento das partículas pode ser inteiramente determinado por uma fórmula mestre. Pois, a onda Ψ teria duas funções: seria uma onda piloto responsável por controlar o movimento das partículas, assim como, uma onda de probabilidade.

Segundo de Broglie, a nova Mecânica permitiu uma interpretação dos fenômenos de interferência chegando ao mesmo resultado que a óptica de ondulatória. Considerando a propagação da luz em uma região pontilhada por obstáculos fixos, a propagação da onda depende do tipo e posição dos obstáculos, mas sua frequência é constante. A equação (3.0) pode descrever os riscos claros e escuros que aparecem nesse tipo de experimento. Nesse caso, a probabilidade de encontrar um fóton em regiões escuras é zero e diferente de zero em regiões claras.

Louis de Broglie retoma sua discussão sobre a dinâmica dos sistemas de muitas partículas. Referindo-se à crítica que ele fez na Parte 1, sobre o formalismo de Schrödinger lembrando do problema das "coordenadas de pontos inexistentes", que pode ser resolvido assumindo que os pontos de massa sempre têm posições bem definidas. E para o significado físico das ondas que se propagam no espaço abstrato ainda existem certas dificuldades.

Quando de Broglie analisou o significado das ondas nos sistemas atômicos, foi possível atribuir velocidades e posições bem definidas aos elétrons de um átomo em um determinado ponto no tempo para dar significado às variáveis de configuração.

Um átomo de hidrogênio em um estado estável deve ser descrito pela função,

$$\Psi_n = F(r, \theta) \cos \frac{2\pi}{h} \left(W_n - \frac{mh}{2\pi} \alpha \right) \quad (1.4)$$

para as coordenadas esféricas, temos m como inteiro e $W_n = m_0c^2 - \frac{2\pi^2 m_0 e^4}{n^2 h^2}$. Desta forma, o elétron se moverá em um círculo com a velocidade dada pela fórmula orientadora,

$$v = \frac{1}{m_0 r} \frac{mh}{2\pi}. \quad (1.5)$$

A mecânica ondulatória de Schrödinger e o formalismo matricial de Heisenberg não são possíveis para descrever o que acontece com os elétrons durante sua transição entre dois estados estacionários. De Broglie argumentou que se uma posição inicial da partícula é assumida, a velocidade do elétron durante a transição pode ser determinada por uma fórmula orientadora, permitindo uma possível representação visual da transição. Na conclusão da segunda parte, De Broglie admite que as ideias consideradas nesta troca constituem apenas visões provisórias e que o momento angular intrínseco do elétron (spin) proposto por Uhlenbeck e Goldschmidt não pode ser usado na mecânica ondulatória.

Até agora consideramos o movimento da partícula como o movimento "externo" da onda ψ , seu movimento é determinado apenas pela propagação da onda. Aquilo é, Sem dúvida uma visão provisória: uma teoria estrutural real em nossa opinião, a estrutura atômica da matéria e da radiação deve ser incorporada nos fenômenos de onda considerando soluções singulares para a equação de onda. Então devemos provar que existe uma correspondência entre a onda de singularidade e a onda ψ (De Broglie, 1927). Na Parte III de sua publicação, de Broglie apresenta alguns experimentos que, segundo ele, confirmaram a nova dinâmica dos elétrons.

Após a comunicação houve uma discussão sobre as ideias apresentadas por de Broglie, e perguntas e comentários foram feitos por Lorentz, Born, Brillouin, Pauli, Schrödinger, Kramers e Ehrenfest. Einstein não comentou imediatamente após a apresentação de Louis de Broglie, mas durante a discussão geral ele disse: "Acho que de Broglie está certo".

A análise das discussões mostra que a teoria da onda piloto foi amplamente discutida por grande parte dos presentes. Mas a maioria dos congressistas não apoiou a

teoria de Louis de Broglie, nem mesmo aqueles que discordavam do cálculo da probabilidade.

No Congresso Solvay, alguns da "velha guarda" (Lorentz, Einstein, Langevin, Schrödinger) insistiram que uma interpretação causal da Mecânica das Ondas deveria ser encontrada - sem, contudo, colaborar comigo. Esforços - Bohr e Born, juntamente com seus jovens discípulos (Heisenberg, Dirac, etc.) certamente apoiaram a nova interpretação puramente probabilística que desenvolveram e não contestaram minha posição. Pauli foi o único que se opôs à minha teoria, e o fez estudando o caso de colisão partícula-rotor que Fermi acabara de estudar (De Broglie, 1960).

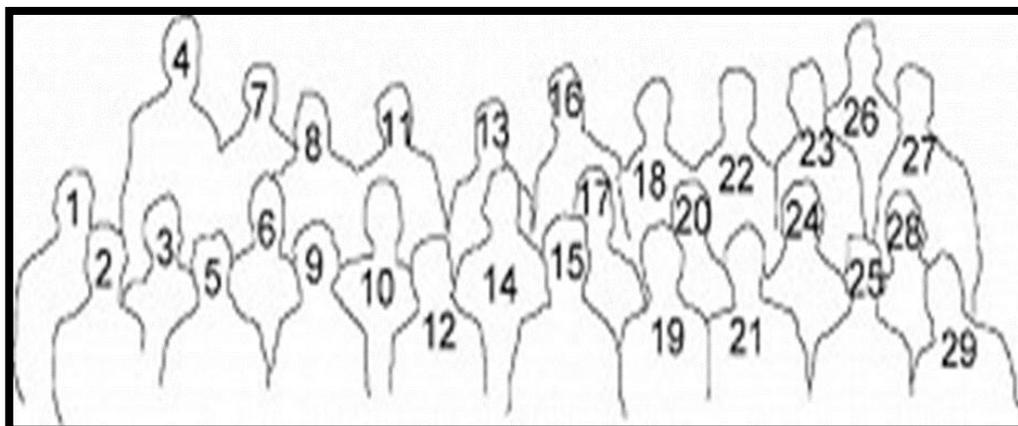
Embora de Broglie afirme que "o único defensor da interpretação probabilística em sua oposição foi Pauli", o registro do Congresso contém a crítica de Born. O físico alemão criticou a definição de Louis de Broglie da trajetória de uma partícula porque criaria dificuldades para analisar a colisão entre um elétron e um átomo. Brillouin veio para a defesa de Broglie argumentou que Born poderia até duvidar da existência de órbitas e afirmar que elas nunca poderiam ser observadas, mas ele não poderia provar que elas não existiam. Além disso, Brillouin observou que as fórmulas obtidas por Broglie eram compatíveis com as de outros autores, como Walter Gordon, que eram bem aceitas pelos físicos da época.

O comentário de Paul também se referiu ao conceito de partículas se movendo ao longo de trajetórias bem definidas e argumentou que esse conceito é baseado no princípio da conservação de carga, o que implica a possibilidade de introduzir um vetor de velocidade dependente do espaço, do tempo e da partículas movendo-se ao longo de linhas corrente deste vetor. Isso é algo que Slater já havia sugerido anteriormente em óptica, observando uma quantidade de luz movendo-se ao longo da linha do vetor de Poynting. Porém, segundo Pauli, essa atividade não poderia ser desenvolvida de forma satisfatória (De Broglie, 1927).

Durante a discussão geral, Pauli continuou a criticar as ideias apresentadas por de Broglie, mas inicialmente concordou que as ideias do físico francês eram compatíveis com a teoria de Born apenas no caso de colisões elásticas, e que os fenômenos de colisão inelástica não haviam sido descritos. Paul usou o rotor Fermi como exemplo. Pauli mostrou que se as ideias de Louis de Broglie fossem levadas em conta, ou seja, se os fenômenos individuais pudessem ser descritos objetivamente pela cinemática comum, então, após a colisão, a velocidade angular do rotor não deveria ser constante, ao contrário do requisito da teoria quântica de que o rotor deveria estar em estado estacionário antes

e após a colisão. Mas, segundo Paul, os resultados obtidos no estudo de espalhamento de partículas seriam totalmente consistentes com a teoria de Born (Bacciagalupi; Valentini, 2006).

Figura 9: Sequência dos cientistas na foto.



Fonte: Oficina da Net (2017, <https://www.oficinadanet.com.br/post/19178-a-fotografia-mais-inteligente-do-mundo>)

Figura 10: Cientistas na Quinta Conferência de Solvay em 1927.



Fonte: Oficina da Net (2017, <https://www.oficinadanet.com.br/post/19178-a-fotografia-mais-inteligente-do-mundo>)

Na quinta conferência, 32 cientistas participaram, mas somente 29 foram fotografados e 17 possuíam láurea do Prêmio Nobel. Seguem os nomes e a ordem dos participantes da famosa fotografia conhecida como a mais inteligente: Peter Debye, Irving Langmuir, Martin Knudsen, Auguste Piccard, Max Planck, William Lawrence Bragg, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Marie Curie, Hendrik Anthony Kramers, Edouard Herzen, Hendrik Antoon Lorentz (presidente), Théophile de Donder, Paul Dirac, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Arthur Holly Compton, Jules-Émile Verschaffelt, Paul Langevin, Louis-Victor de Broglie, Charles-Eugène Guye, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Max Born, Charles Thomson Rees Wilson, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Niels Bohr, Owen Willans Richardson, William Henry Bragg (ausente na foto), Henri-Alexandre Deslandres (ausente na foto), Edmond van Aubel (ausente na foto).

3.3.10 Louis Victor Pierre Raymond de Broglie Pós Defesa da sua Tese de Doutorado

Em 1931, Louis de Broglie organizou um seminário. Participaram Claude Marnat, Andre George e Jean-Louis Destouches. Nos anos 1950, aproximadamente cinquenta indivíduos participaram do seminário, que ocorreu semanalmente por quarenta anos, sempre às terças-feiras às 15h. Entre os convidados estavam Max Born, George Darwin, Paul Dirac, Albert Einstein e Enrico Fermi.

Os cursos ministrados por Broglie no Institut Poincare da universidade eram extensos e cerimoniais. A plateia respeitosa levantou-se quando ele entrou na sala e ouviu em silêncio enquanto ele lia em voz alta e monótona um texto escrito à mão em um monte de folhas grandes. Se alguém quisesse fazer uma pergunta, Anatole Abragam, físico nuclear, lembrou que era necessário solicitar uma consulta, mas "com o tempo, em vez de assistir às palestras, preferia estudar seus livros maravilhosamente escritos". Michel Eberhardt percebeu que Louis de Broglie era "por natureza... um homem solitário, quase à margem, mais preocupado em dar palestras do que em criar uma escola".

Sobre os estudantes de Louis de Broglie, ou o que poderia ser chamado de "grupo" de Louis de Broglie, Abragam criticou severamente que, com algumas exceções, eles eram "seguidores" "que não eram do mais alto nível intelectual e talvez nem sempre da mais alta integridade" intelectual. A atmosfera era de elogios, afirmou; "mecânica ondulatória", em vez de "mecânica quântica", era o tema preferido. A "mecânica ondulatória", a descoberta de Louis de Broglie, foi considerada por este público francês

como altamente abstrata e conceitualmente desafiadora, em contraste com a prática no exterior da mecânica quântica como uma "ferramenta diária do físico comum". A aceitação da mecânica quântica realista de Louis de Broglie pelos comunistas franceses na década de 1950 criou uma situação peculiar em que o trabalho de Louis de Broglie foi elogiado pela ideologia soviética, enquanto a mecânica quântica predominante - por exemplo, sua aplicação na química por Linus Pauling e outros químicos teóricos - foi criticada. A aceitação de um aristocrata francês pelos seguidores de Marx e Lênin constituiu uma estranha aliança, como afirmou Wolfgang Pauli, entre o preto e o vermelho (Ney, 1997, p. 416-417).

O príncipe solteiro Louis de Broglie tornou-se funcionário público ao solicitar e aceitar uma nomeação para o corpo docente da Universidade de Paris, uma instituição estatal cujos certificados eram muito menos prestigiados do que os da Academia Naval, da École Polytechnique ou do École Polytechnique. Academia Francesa. Ao contrário de seu irmão Maurice, ele tinha um emprego. Ele se distanciou dos estudantes que encontravam inspiração em suas palestras escritas, mas também ganhou considerável poder dentro do sistema acadêmico francês (Ney, 1997, p. 417).

Louis de Broglie viajou pouco, embora tenha participado das Conferências Solvay em Bruxelas em 1927 e 1933, tenha ido a Estocolmo em 1929 e feito pelo menos uma viagem à Inglaterra. O emigrado russo George Gamow contou uma história agora conhecida sobre um encontro com de Broglie no final da década de 1920, no qual Gamow, que trabalhava com Rutherford na época, providenciou para que de Broglie o conhecesse por meio de cartas. Visitando-o em sua casa em Neuilly durante as férias de Natal: Broglie, vestindo um casaco de seda, me encontrou em seu escritório luxuosamente mobiliado e começamos a conversar sobre física. Ele não falava inglês; meu francês era ruim. Mas de alguma forma, meio usando meu francês quebrado e meio escrevendo fórmulas no papel, consegui transmitir a ele o que queria dizer e entender seus comentários. Menos de um ano depois, de Broglie veio a Londres para dar uma palestra na Royal Society e, claro, eu estava na plateia. Ele fez um discurso maravilhoso em um inglês perfeito com um leve sotaque francês (Ney, 1997, p. 417).

Louis de Broglie renunciou à Universidade em 1962. Permaneceu ativo na comunidade científica até o outono de 1975, sendo sua última aparição pública em um simpósio da Fundação Louis de Broglie, que fundou em 1973 para a realização de pesquisas em microfísica. O castelo da família em Broglie e as obrigações cívicas

associadas à sua propriedade foram há muito transferidos para François de Broglie-Jean de Broglie, neto de Maurice e tio de Louis (Ney, 1997, p. 418).

O filho mais novo da família de Broglie acabou escolhendo uma vida de estudos sérios, mas também enfrentou preocupações de sua família de que estava se tornando muito ascético ou mesmo excêntrico. Boyle disse que Louis de Broglie não parecia bem, era magro e abatido, mas essa fragilidade era uma forma de delicadeza e até de força. A irmã de Louis, Pauline, temia que as descobertas de seu irmão na física teórica estivessem destruindo seu senso natural de humor e alegria. Ela percebeu que ele abandonou seu jeito infantil de se vestir durante as “buscas de roupas”. Paul Germain, secretário do colégio, recordou que os seus hábitos de vida eram extremamente regulares e quase monásticos (Ney, 1997, p. 419).

Contudo, de acordo com Guitton, seria incorreto classificar Louis de Broglie como tímido. Sua reserva não era sinal de vergonha, mas sim de um recato, uma espécie de "colocar um véu, de manter distância". Louis de Broglie, na visão de Guitton, distinguia-se pela beleza: a beleza de um comportamento quase feminino, a beleza de sua teoria. Era um homem de fé, "como reis e papas", guiado pela convicção de que se deve ser "servo dos servos" (Ney, 1997, p. 419).

Louis de Broglie foi um revolucionário relutante na história da mecânica quântica, mas não o único. Schrödinger, Einstein, Planck e Max von Laue também expressaram dúvidas sobre causalidade, indeterminação e complementaridade. No entanto, os cientistas de Berlim não foram marginalizados na história da nova física como De Broglie. Apesar de não ter contribuído para o desenvolvimento da Mecânica de Copenhague após 1927, De Broglie continuou a participar em debates públicos, discutindo suas pesquisas e suas implicações filosóficas. É notável que a personalidade e o estilo de vida de Louis de Broglie tenham influenciado a percepção de seu distanciamento com a comunidade científica (Ney, 1997, p. 420).

O fato de que a teoria de Broglie se mostrou menos radical que as ideias em constante evolução dos membros do grupo de Copenhague não o fazem um caso isolado entre os físicos, especialmente na sua geração. Heisenberg, Dirac e Pauli, mais jovens que Louis de Broglie, embora fossem radicais, buscaram a validação e o suporte de Niels Bohr e Max Born. Além disso, Paul Forman e outros historiadores sugeriram que as concepções similares de físicos alemães sobre causalidade e indeterminação refletiam preconceitos políticos da cultura pós-Weimar, que demandavam a rejeição de métodos tradicionais e do materialismo (Ney, 1997, p. 421).

3.3.11 A Continuação do Legado de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Louis de Broglie desempenhou um papel significativo na orientação de muitos físicos e químicos tanto na França, quanto em outros países, através de seu trabalho de divulgação científica que, que trabalharam no desenvolvimento e na aplicação de sua teoria, contribuindo para avanços significativos na física quântica e na compreensão do comportamento das partículas subatômicas. Isso fica claro em três exemplos citados por ele: E. Maurice Cotte, que completou uma tese sobre óptica eletrônica; Claude Magnan e sua equipe do laboratório de física do Collège de France, que "investigam problemas teóricos de óptica eletrônica em colaboração com o Instituto Henri Poincaré"; e, por fim, Raymond Daudel, "que atua no Instituto do Rádio e realizou extenso trabalho sobre a química de radioelementos artificiais, [e que] nos últimos dois ou três anos, esforços significativos foram feitos para avançar aqui as aplicações da mecânica ondulatória à química e atrair a atenção de jovens pesquisadores para essas questões" (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 197).

Raymond Daudel foi um químico teórico francês conhecido por suas contribuições significativas para a química quântica e teoria de ligação química. Em termos de conexão entre os dois, especialmente no contexto das ideias de Louis de Broglie, podemos destacar que suas contribuições teóricas fundamentais sobre a natureza ondulatória das partículas tiveram um impacto profundo não apenas na física, mas também em campos relacionados, como a química quântica. A teoria de de Broglie ajudou a estabelecer a base para entender como os elétrons se comportam não apenas como partículas discretas, mas também como ondas, o que é crucial para entender fenômenos como a estrutura eletrônica dos átomos e as ligações químicas.

Daudel, como químico teórico, teria estudado e aplicado essas ideias no contexto da química quântica, onde se explora como a teoria de de Broglie pode ser usada para entender a estrutura molecular, as interações entre átomos e as propriedades das substâncias. Portanto, enquanto Daudel não é amplamente conhecido por trabalhar diretamente com as ideias de de Broglie na física fundamental, sua área de pesquisa estava profundamente influenciada pelas implicações das teorias de de Broglie para a química teórica e a ligação química.

Raymond Daudel orientou e influenciou muitos pesquisadores ao longo de sua carreira, incluindo Milan Trsic, um físico teórico sérvio conhecido por seu trabalho em mecânica estatística e teoria quântica de campos. A orientação de Daudel a Trsic sugere

uma colaboração no campo da química quântica, onde ambos contribuíram significativamente para o avanço do conhecimento nessa área.

Milan Trsic foi um renomado professor da Universidade de São Paulo. Orientou 17 dissertações de mestrado e 13 teses de doutorado, além de quatro trabalhos de iniciação científica em Química e Física. Sua atuação se destacou na Química Teórica. Profissionalmente, colaborou em co-autorias de trabalhos científicos com 124 pesquisadores. Seu trabalho abrangeu Química Quântica, Estrutura Eletrônica, Estudos Químicos Quânticos, Estudos Teóricos, Coordenadas Geradoras, Compostos Canabinoides, Estrutura Cristalina, Hartree-Fock e Hartree-Fock-Slater. Entre seus orientados, está o Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto, que atualmente atua na UFRPE e continua a disseminar a teoria de Louis de Broglie para as novas gerações de químicos. A orientação desta dissertação, por exemplo, visa facilitar a implementação e a divulgação desta teoria no currículo do ensino médio.

Em 2024 completam-se 100 anos desde a formulação da teoria de Louis de Broglie. Louis de Broglie propôs a teoria da dualidade onda-partícula, que sugere que partículas subatômicas, como elétrons, podem exibir tanto propriedades de partículas quanto de ondas. Sua descoberta foi um marco fundamental na física quântica, lançando as bases para o desenvolvimento da mecânica quântica e influenciando profundamente nosso entendimento da natureza fundamental da matéria e da energia, assim como, abrindo caminho para a compreensão do comportamento das partículas subatômicas.

A teoria de Broglie foi essencial para o desenvolvimento dos microscópios eletrônicos, transformando a maneira como visualizamos estruturas microscópicas. Suas concepções sobre a dualidade onda-partícula da matéria foram cruciais para entender as ligações químicas. O legado de Broglie ainda é estudado e utilizado em pesquisas científicas contemporâneas.

3.4 A Dualidade Onda-Partícula no Ensino Médio nas Escolas de Pernambuco

O Guia Curricular por Bimestre de Pernambuco estabelece que, na Etapa Geral Básica e nas Competências Específicas das Disciplinas, o tema da dualidade onda-partícula deve ser abordado de forma prática no último bimestre do 3º Ano do Ensino Médio, conforme demonstrado no esquema da figura 11. A falta de recursos como estrutura adequada, material didático e formação docente torna inviável tratar esse

conteúdo essencial da maneira prescrita pelo Guia. Contudo, é viável utilizar uma metodologia alternativa para ensinar a Teoria de Louis de Broglie através dos Modelos Atômicos, concluindo o estudo sobre a composição da matéria e incentivando a experimentação.

Figura 11: Organizador curricular de Química 4º Bimestre do 3º Ano Médio do estado de Pernambuco.

| QUÍMICA | | |
|--|--|---|
| 3º ANO | | |
| 4º BIMESTRE | | |
| HABILIDADES DA ÁREA BNCC | HABILIDADES ESPECÍFICAS DOS COMPONENTES | OBJETOS DE CONHECIMENTO |
| (EM13CNT205) Interpretar resultados e realizar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas noções de probabilidade e incerteza, reconhecendo os limites explicativos das ciências. | (EM13CNT205QUI13PE) Desenvolver modelos experimentais para a observação e interpretação de fenômenos à luz da perspectiva probabilística da mecânica quântica e de suas intervenções no funcionamento e desenvolvimento reativo de superfluidos, supercondutores, blu-ray, GPS, QR code, entre outros. | Química Quântica. Noções de mecânica quântica. Princípio da incerteza. Dualidade onda-partícula . Algumas aplicações da teoria quântica: superfluidos, supercondutores, blu-ray, QR code, etc. |

Fonte: Organizador_Curricular_FBG_Quimica.pdf (educacao.pe.gov.br)

O ensino do modelo atômico quântico abrange conceitos da física moderna, especialmente a dualidade onda-partícula, que emergiu de experimentos e discussões teóricas do século XX, diferentemente dos conceitos da física clássica. Embora a tecnologia atual e o conhecimento científico tenham um impacto significativo em nosso cotidiano, é importante notar que apenas uma minoria da sociedade domina esse conhecimento, o que ressalta a importância de sua inclusão no currículo educacional de Pernambuco.

Compreender a importância do ensino dos Modelos Atômicos Quânticos, destacando a dualidade onda-partícula, é crucial para alunos do Ensino Médio. É essencial oferecer uma explicação tangível durante a formação de professores de Química para tornar o aprendizado mais acessível.

Segundo Silva e Cunha (2008), os Modelos Quânticos, como os átomos, são caracterizados por cinco aspectos cruciais para a sua compreensão:

1º Conceção a respeito do *quantum*.

2º A ideia de que matéria e energia apresentam comportamento dual. Em outras palavras, ambos exibem comportamento de partículas e ondas.

3º A trajetória de um sistema quântico é indefinida porque é impossível determinar sempre com precisão a posição e a velocidade de um sistema quântico (Princípio da Incerteza).

4º O estado de um sistema quântico é representado por uma função de onda (Ψ) obtida pela resolução da equação de Schrödinger.

5º Probabilidade de localização de um sistema quântico.

É essencial recordar que as observações teóricas de Planck, publicadas no início do século XX, constituíram o alicerce para o desenvolvimento da Teoria Quântica. Somente no final dos anos 1920 é que as equações fundamentais dessa teoria foram finalizadas. Durante esse período, diversos pesquisadores contribuíram para o avanço da Teoria Quântica e para a explicação de fenômenos experimentais. Um exemplo é a solução para o problema do corpo negro, que se fundamenta na premissa de que a energia deve ser quantizada para alcançar seu valor mínimo, conforme demonstrado pela equação: $\epsilon = h \cdot \nu$, elaborada por Planck em 1900; Albert Einstein ampliou a teoria de Planck em 1905 para sugerir que os quanta de luz exibem comportamento de partículas quando interagem com a matéria.; Modelo atômico de Bohr (1913) e descrição do espectro atômico; segundo a teoria de Louis de Broglie (1923) as partículas em movimento (por exemplo, elétrons) teriam um comportamento dual associado, dentre outros.

Portanto, torna-se claro que a compreensão da dualidade onda-partícula e dos conceitos de quantização foi essencial para o desenvolvimento do Modelo Atômico Quântico.

3.5 A Importância da Experimentação no Ensino de Química

Conforme Silva (2011) e Schnetzler (2002), a química é uma das matérias mais desafiadoras para estudantes do ensino fundamental e médio. Seu caráter abstrato e a necessidade de compreender fórmulas, propriedades e equações químicas tornam seu conteúdo complexo. Isso frequentemente resulta em um aprendizado mecânico, onde os

alunos não compreendem verdadeiramente a matéria. A experimentação pode tornar o aprendizado mais prazeroso e cativante para os estudantes.

Acreditamos que a combinação da prática experimental com a teoria pode ampliar o entendimento dos alunos sobre um conteúdo específico, estimulando sua curiosidade e interesse pelo aprendizado. Isso se deve ao fato de que a prática possibilita uma interação mais intensa dos alunos com o conteúdo, enriquecendo seu aprendizado.

Os experimentos representam uma ferramenta essencial que facilita a aprendizagem, especialmente nas ciências (Machado e Mol, 2007). Eles devem proporcionar aos estudantes a chance de expressar seus conceitos sobre fenômenos de maneira direta, através da experimentação, ou de forma indireta, por meio do registro de resultados. Machado e Mol são pesquisadores que contribuíram para essa área de estudo. Para esses dois pesquisadores:

[...] as atividades experimentais auxiliam na consolidação do conhecimento e no desenvolvimento cognitivo do aluno, trazendo benefícios no processo de ensino e aprendizagem de Química, pois a vivência de situações reais é de grande importância para a compreensão e correlação dos diversos temas, no entanto, é preciso ter alguns cuidados para que a experimentação seja uma ferramenta eficaz na formação cidadã dos alunos (Machado e Mol, 2007).

Conforme os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Novo Ensino Médio e o Guia Curricular do Ensino Médio (OCEM), experimentos são essenciais no ensino de química. Estes documentos oficiais realçam a importância dos experimentos como uma estratégia pedagógica em química. Eles também recomendam uma metodologia para tratar diversos temas científicos que permeiam o ambiente escolar, o cotidiano dos estudantes e o mundo ao redor.

Segundo Silva (2016), a experimentação é um recurso valioso para o ensino de química, pois engaja os alunos na sociedade contemporânea, proporcionando-lhes uma compreensão aprimorada e habilidades para discutir contextos específicos. Isso se deve ao fato de que a química, sendo uma disciplina abstrata, muitas vezes apresenta conteúdos de difícil compreensão. Contudo, é crucial recordar que a natureza desta ciência é fundamentalmente experimental.

Os cientistas consideram que os experimentos realizados em sala de aula podem constituir uma fundação sólida para debater a realidade da química, por meio da

exploração dos três níveis de entendimento da matéria (macroscópico, microscópico e representacional), contribuindo assim para o aprimoramento do aprendizado.

Oliveira (2010) destaca adicionais benefícios da experimentação como método de ensino em Química, além dos já mencionados. Estes incluem o incremento da motivação e atenção dos estudantes, o fomento ao trabalho em equipe, a criatividade, a iniciativa, a capacidade de tomar decisões, o aprimoramento das habilidades de observação e anotação, o desenvolvimento da competência analítica de dados e a formulação de hipóteses.

Consequentemente, o uso da experimentação contribui para alcançar diversos objetivos no ensino de Química. Santos e Schnetzler (1996) afirmam que as aulas práticas têm como objetivo ensinar os estudantes a tomar decisões, implicando a necessidade de integrar o conteúdo abordado ao contexto social dos alunos. Os autores defendem que:

“O objetivo básico do ensino de química para formar o cidadão compreende a abordagem de informações químicas fundamentais que permitam ao aluno participar ativamente na sociedade tomando decisões com consciência de suas consequências. Isso implica que o conhecimento químico aparece não com um fim em si mesmo, mas com objetivo maior de desenvolver as habilidades básicas que caracterizam o cidadão: participação e julgamento” (SANTOS & SCHNETZLER, 1996, p.29).

Portanto, é importante que atividades experimentais estejam presentes adequadamente em sala de aula, uma vez bem aplicadas, essas estratégias podem possibilitar que os alunos conectem conteúdos e conhecimentos aprendidos em sala de aula com os vivenciados na prática, e assim sejam estimulados a produzir, questionar, explorar durante essas atividades (Guimarães, 2009).

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Análise do conteúdo sobre a dualidade onda-partícula de Louis de Broglie nos livros didáticos de química aprovados pelo PNLD para o triênio de 2021 a 2023

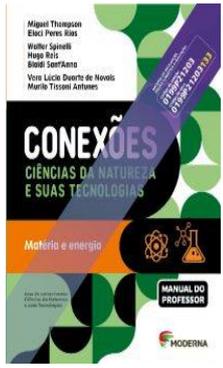
Neste estudo, foram analisados quatro livros didáticos aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) para o Novo Ensino Médio. A seleção desses livros foi realizada consultando a lista de coleções aprovadas pelo PNLD para os triênios de 2021 a 2023.

Entre as coleções separadas para as análises, foram selecionados os livros de ciências das naturezas e suas tecnologias “manual do professor”, para o PNLD/2021, tendo em vista que o conteúdo da dualidade onda-partícula em todos os livros é abordado na 1ª Série do Novo Ensino Médio.

De forma organizada, propomos os seguintes códigos: LD1, LD2, LD3, LD4, para diferenciar os livros ou mesmo a sua citação ao longo da análise.

Tabela 1 – Relação dos Livros Didáticos de Química – Ensino Médio

| LIVRO | | | AUTOR(ES) | EDITORA | ANO | PNLD |
|-------|---|---|--|-----------------------------------|------|------|
| LD1 | Ser Protagonista |  | Ana Fukui, Ana Luiza P. Nery, Elisa Garcia Carvalho, João Batista Aguiar e Vera Lucia Mitiko Aoki | Edições SM 1. ^a edição | 2020 | 2021 |
| LD2 | Matéria, Energia e Vida: Uma abordagem interdisciplinar |  | Alfredo Mateus, Andréa Horta, Arjuna Panzera, Danusa Munford, Eduardo Mortimer, Esdras Garcia, Luiz Franco, Marcos | Scipione 1. ^a edição | 2020 | 2021 |

| | | | | | | |
|-----|--|--|--|----------------------|------|------|
| | | | Pimenta e Santes Matos | | | |
| LD3 | Multiversos Ciências da Natureza: Ciência, Tecnologia e Cidadania |  | Leandro Godoy, Rosana Maria Dell' Agnolo e Wolney C. Melo | FTD 1ª edição | 2020 | 2021 |
| LD4 | Conexões Ciências da Natureza e suas Tecnologia: Matéria e energia |  | Blaidi Sant'Anna, Eloci Peres Rios, Hugo Reis, Miguel Thompson, Murilo Tissoni Antunes, Vera Lúcia Duarte de Novais e Walter Spinelli | Moderna 1ª edição | 2020 | 2021 |

Para a análise desses livros, utilizou-se a abordagem qualitativa da Análise de Conteúdo de Bardin (1997). Esse método é aplicado para investigar a escrita e a comunicação humana, permitindo que o leitor assimile o "conteúdo" integralmente.

A estruturação da análise de conteúdo foi realizada de maneira progressiva. Conforme Bardin (1997), a análise deve ser segmentada em três etapas: a inicial é a pré-análise, que organiza os dados para criar um corpus de pesquisa. Bardin (1977) define "corpus" como um conjunto de documentos submetidos a um processo analítico. A segunda fase, denominada Exploração do Material, consiste em detalhar o corpus para definir unidades de registro e de contexto. Isso envolveu uma pesquisa minuciosa nos LDs e a coleta de dados e categorias relevantes. Na etapa final, esses dados e categorias são examinados e interpretados, visando responder à questão de pesquisa proposta. Portanto seguiremos os seguintes critérios para a análises dos livros didáticos:

1º Conceitos e conhecimento científico:

- ✓ Apresentação do conteúdo;

- ✓ Abordagem gerais da dualidade onda-partícula;
- ✓ Contextualização do conceito químico; e
- ✓ Contextualização histórica.

2º Recursos Visuais:

- ✓ Qualidade da Ilustração;
- ✓ Grau de relação com as informações contidas no texto; e
- ✓ Veracidade contida na ilustração.

3º Atividade proposta:

- ✓ Indicação de questões ao longo de cada tema;
- ✓ Atividade prática com relação direta com o conteúdo trabalhado; e
- ✓ Texto complementar que traga discussões sobre o conhecimento científico.

Compreendido a questão da pesquisa e seus objetivos para este trabalho, empenha-se uma pesquisa qualitativa não experimental, por meio do recorte da pesquisa na análise dos Livros Didáticos.

Moreira (2009, p. 8) afirma que a pesquisa qualitativa é denominada naturalística por não envolver manipulação de variáveis ou tratamentos experimentais, sendo o estudo de fenômenos que ocorrem naturalmente. Bardini (2015, p. 26) salienta que a pesquisa qualitativa não se presta ao uso de técnicas estatísticas na análise de dados. Vergara (2005, p. 15) descreve a análise de conteúdo como uma técnica de processamento de dados que busca identificar o que está sendo comunicado sobre um tema específico.

Fracalanza (2006) sustenta que a análise de conteúdo é essencial para descrever e interpretar documentos e textos.

[...] considerar, como fontes mais adequadas, os estudos anteriores de análise de livros didáticos, as pesquisas acadêmicas sobre o tema e o conhecimento sistematizado em artigos e revistas científicas e divulgados em encontros técnico-científicos. Porém, de outro lado, é imprescindível levar em conta tanto as obras didáticas específicas quanto as propostas curriculares recentes [...] (Fracalanza, 2006, p. 199).

O PNLD/2021, disponibilizado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), serviu de referência para a seleção dos livros utilizados neste estudo.

Portanto, para efetuar a análise, estabeleceu-se um sistema de classificação baseado nos critérios previamente mencionados.

Utilizou-se uma escala semântica qualitativa para compreender os critérios como um indicador de avaliação das classificações. Conforme ilustrado no Quadro 1, a escala varia de 1 a 4, onde 1 significa "Totalmente Satisfatório" e 4, "Totalmente Insatisfatório".

Tabela 2 – Escala Semântica de compreensão qualitativa sobre os critérios

| Conceitos da Escala Semântica | Ponderações em cada conceito |
|-------------------------------|---|
| 1. Totalmente satisfatório | quando o livro didático apresenta o critério a contento, sem ressalvas. |
| 2. Satisfatório | quando o critério é abordado de maneira coerente, mas com pequenas ressalvas. |
| 3. Insatisfatório | quando o critério em questão não se apresenta de forma adequada, porém com ressalvas, é praticável. |
| 4. Totalmente insatisfatório | quando o critério abordado não está presente |

Fonte: Adaptado de Bandeira (2012)

5. ANÁLISES DO CONTEÚDO DIDÁTICO

5.1 Conceito e Conhecimento Científico

Os livros didáticos são uma fonte importante de conhecimento científico para os estudantes. Eles contêm informações baseadas em pesquisas e experimentos científicos que foram feitos para comprovar os conceitos apresentados. O conceito científico refere-se a uma ideia ou explicação que foi desenvolvida usando métodos científicos e é amplamente aceita pela comunidade científica como uma descrição precisa e confiável do mundo natural.

O conhecimento científico, por sua vez, é o resultado da coleta e interpretação de evidências provenientes de experimentos e observações. Ele inclui também teorias, leis e modelos que foram desenvolvidos com base em dados empíricos e informações obtidas através do método científico.

Nos livros didáticos, os conceitos científicos são apresentados de forma clara e organizada, utilizando uma linguagem adequada para o nível de entendimento dos alunos. Eles são acompanhados de exemplos, ilustrações e atividades que ajudam os estudantes a compreenderem e aplicarem o conhecimento científico em situações reais.

Em resumo, os livros didáticos desempenham um papel importante no ensino e aprendizagem do conhecimento científico. Eles apresentam os conceitos científicos de maneira clara e organizada, ajudando os alunos a adquirirem uma compreensão sólida do mundo natural com base em evidências e metodologia científica.

Para esse estudo iniciaremos nossa análise explorando os conceitos e informações introdutórias referentes ao conteúdo em questão. Avaliaremos a exposição do tema, a abordagem da dualidade onda-partícula, a contextualização do debate e o pano de fundo histórico.

Tabela 3 – Critérios para análise dos conceitos e conhecimentos científicos.

| Escala Semântica de compreensão qualitativa sobre os critérios | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|
| Conceito e Conhecimento | LD1 | LD2 | LD3 | LD4 |
| Apresentação do conteúdo | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Abordagem geral da dualidade onda-partícula | 3 | 2 | 3 | 4 |
| Contextualização com a dualidade onda-partícula | 3 | 2 | 3 | 4 |

Após uma visão geral, analisaremos cada livro didático a partir da perspectiva dos seus autores.

5.1.1 Apresentação do Conteúdo

Os livros didáticos deverão ser divididos em várias partes. A primeira parte do livro aborda os conceitos básicos da disciplina. Aqui, os alunos aprenderão os fundamentos e definições essenciais para a compreensão do assunto. Essa seção é muito importante para criar uma base sólida antes de avançar para os tópicos mais complexos.

Em seguida, temos os capítulos que exploram os tópicos principais da disciplina. Cada capítulo é organizado de forma a apresentar o conteúdo de maneira gradativa, começando pelos conceitos mais simples e avançando para os mais avançados. Além disso, há exemplos práticos e exercícios no final de cada capítulo para que os alunos possam aplicar o que aprenderam.

Outra parte importante do livro são os projetos e atividades práticas propostos ao longo dos capítulos. Essas atividades visam estimular a criatividade e a aplicação do conhecimento adquirido de forma mais concreta. Além disso, esses projetos ajudam a desenvolver habilidades de pesquisa, trabalho em equipe e solução de problemas.

Os livros didáticos LD1, LD2 e LD3, analisados para essa pesquisa de um total de quatro, trataram do tema da dualidade onda-partícula de Louis de Broglie. Contudo, a abordagem deste tópico variou em cada livro, refletindo a perspectiva individual de seus autores. O LD4, por sua vez, não menciona a questão da dualidade onda-partícula de

Louis de Broglie. Segundo Fernandez (2015), é nesse momento que os autores acreditam ser apropriado apresentar o conteúdo em que estão trabalhando.

O LD1, LD3 e LD4 não apresentam nenhuma imagem ou texto introdutório referente ao tema analisado para esse trabalho. O LD2, no capítulo 7 nas páginas 113 e 114, traz um texto que é citado o nome onda-partícula, mas não apresenta imagem sobre a dualidade da matéria.

5.1.2 Abordagem geral da dualidade onda-partícula

O conceito da dualidade onda-partícula de Louis de Broglie é um dos temas abordados tanto em Química Geral quanto em Física Quântica no Novo Ensino Médio. Este tópico engloba a evolução dos modelos atômicos na mecânica quântica. Normalmente, é introduzido nas turmas do primeiro ano do ensino médio e revisado na quarta unidade pelas turmas do terceiro ano.

De acordo com as obras analisadas, sentimos a falta desse conteúdo ser abordado dentro da disciplina Química, pois todos os livros didáticos analisados trazem a abordagem sobre a dualidade onda-partícula dentro da disciplina de Física. Para o nosso entendimento da forma que foram estruturados os Modelos Atômicos, principalmente para esse Novo Ensino Médio, provocam uma certa confusão aos discentes, já que, eles vêm uma parte dentro da disciplina de Química e a parte dual na disciplina de Física. Percebemos que há uma consequência do prejuízo em relação ao ensino e aprendizagem, pois a maioria dos professores, principalmente de escola públicas, tem no livro didático um referencial para a elaboração de suas estratégias de ensino.

No Capítulo 3, dedicado à física quântica, os autores do LD1 exploram a dualidade onda-partícula. Na página 44, eles discutem essa dualidade, apresentando uma equação para calcular o comprimento de onda de um elétron em movimento e um postulado relacionado à frequência da onda. Observa-se essa informação na figura 12 abaixo.

Figura 12: Representação da teoria da dualidade onda-partícula.

A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

O físico francês Louis de Broglie (1892-1987) contribuiu de maneira significativa para a elaboração da Física quântica, ao fazer proposições teóricas sobre o comportamento da matéria. Ele propôs que, se a luz, que era entendida como onda, podia apresentar também um comportamento de partícula, então o elétron, que era uma partícula, poderia também apresentar comportamento de onda. Em 1923, Broglie apresentou essa hipótese, na qual propunha a seguinte equação para calcular o comprimento de onda do elétron em movimento:

$$\lambda = \frac{h}{Q} = \frac{h}{m \cdot v}$$

Nessa equação, λ é o comprimento de onda do elétron em movimento, h é a constante de Planck, Q é a quantidade de movimento do elétron, m é sua massa e v sua velocidade.

Além disso, De Broglie postulou que a frequência f de cada onda de matéria pode ser calculada pela expressão $f = \frac{E}{h}$, em que E é a energia total e h é a constante de Planck.

Fonte: Ana Fukui et al. (2020), p. 44

Dentro do LD2 no capítulo 7, intitulado "Modelo Quântico para os Átomos e a Tabela Periódica Moderna", aborda a dualidade onda-partícula. Os autores estruturam o capítulo em várias seções, incluindo: efeitos quânticos no cotidiano; a dualidade onda-partícula; o modelo quântico dos átomos; a organização da tabela periódica moderna; e a distribuição eletrônica em níveis e subníveis.

Na abordagem referente a dualidade onda-partícula, que se encontram nas páginas 114 e 115, os autores trazem um tópico sobre a dualidade onda-partícula, tendo como explicação o modelo atômico de Bohr, assim como, um box com um pequeno texto de Louis de Broglie explicando a dualidade e finaliza com o experimento da fenda dupla com elétrons.

Figura 13: Representação da teoria da dualidade onda-partícula.



7.1 A dualidade onda-partícula

Na época em que Bôhr propôs seu modelo, já se admitia a natureza dual para a luz. Segundo essa ideia, a luz se comportaria tanto como onda como quanto partícula. Alguns fenômenos luminosos são mais bem descritos admitindo-se que a luz é uma onda e outros, que a luz é formada por partículas.

Com base nessa ideia, Louis de Broglie (1892-1987) propôs, no início da década de 1920, que os elétrons também teriam esse comportamento dual.

Por um lado, a teoria quântica da luz não pode ser considerada satisfatória, pois define a energia de um corpúsculo de luz por uma equação contendo a frequência $E = h \cdot f$. Mas uma teoria puramente corpuscular não contém nada que nos permita definir uma frequência; portanto é somente por essa razão que somos compelidos, no caso da luz, a introduzir simultaneamente a ideia de corpúsculo e a ideia da periodicidade.

Por outro lado, a determinação do movimento estável dos elétrons no átomo introduz números inteiros; e até esse ponto, os únicos fenômenos que envolvem números inteiros em Física são os da interferência e dos tons normais de vibração. Esse fato sugeriu-me a ideia de que os elétrons também não podiam ser considerados simplesmente como corpúsculos, mas que também a periodicidade lhes deve ser atribuída.

DE BROGLIE, Louis. *Les Prix Nobel en 1929*. In: SEGRÈ, Emilio. *Dos raios X aos quarks: físicos modernos e suas descobertas*. Brasília: Editora da UnB, 1980. p. 155.

114 Capítulo 7

Fonte: Eduardo Mortimer et al. (2020), p.114

Os autores do LD3 abordam a dualidade onda-partícula dentro do Tema “Tópicos de Física Moderna”, encontrado na página 142. Eles dividem esse tema nos seguintes tópicos: teoria dos quanta, efeito fotoelétrico, a natureza dual da luz, o princípio da incerteza, o experimento de Michelson-Morley e noções de relatividade.

Os escritores abordam a dualidade como “A Natureza Dual da Luz”, que se encontram nas páginas 145 e 146. Eles trazem a teoria de Broglie que explicava o comprimento de onda (λ) em função de sua quantidade de movimento ($Q = m \cdot v$).

Figura 14: Representação da natureza dual da luz.

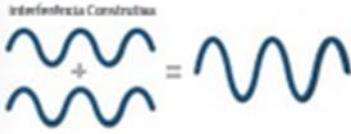
MATERIAL PARA DIVULGAÇÃO DA EDITORA FTD
REPRODUÇÃO PROIBIDA

A natureza dual da luz

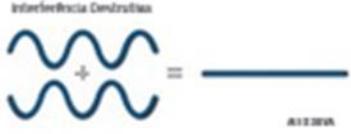
A teoria quântica da luz (fótons) explica de maneira adequada o efeito fotoelétrico, mas não os fenômenos ondulatórios que ocorrem com a luz, tais como a difração e a interferência luminosa.

Quando um feixe luminoso incide em um obstáculo (colimador) no qual há duas fendas paralelas (fenda dupla), observa-se comportamento ondulatório da luz: a interferência entra nas ondas que sofreram difração ao atravessar a fenda. Vale lembrar que em uma onda, há pontos que oscilam em concordância de fase e outros em oposição de fase, além das situações intermediárias. Quando pontos em concordância de fase se superpõem ocorre uma interferência construtiva e quando estes pontos estão em oposição de fase a interferência é destrutiva.

Interferência Construtiva



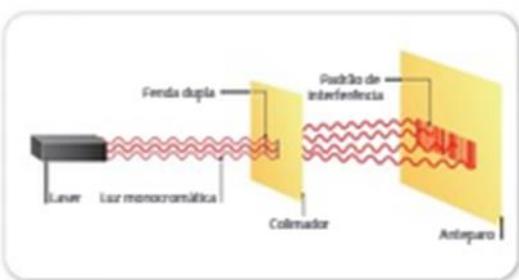
Interferência Destrutiva



• Interferência construtiva e interferência destrutiva de ondas.

O experimento da dupla fenda, realizado em 1800 pelo físico e médico britânico Thomas Young (1773-1829), mostrou que a luz tinha caráter ondulatório, pois apresentava os fenômenos da difração e da interferência.

No experimento de Young, um feixe de luz atravessa duas fendas estreitas, muito próximas. No anteparo situado do outro lado, em vez de um único feixe ou raio, o que se observa é uma sequência de faixas claras e escuras, chamadas de franjas de interferência. As faixas claras correspondem a interferências construtivas e as escuras, destrutivas, coerentes com a teoria ondulatória.



• Experimento da dupla fenda de Thomas Young.

Para aglutinar as observações dos dois comportamentos da luz – partícula na teoria dos quanta (fótons) e onda na observação da difração e interferência – o físico francês Louis De Broglie (1892-1987) propôs, em 1924, que a luz apresentava natureza dual se comportando ora como onda e ora como partícula. De Broglie, apresentou, então, a teoria em que expressava o comprimento de onda (λ) em função de sua quantidade de movimento ($Q = m \cdot v$).

UNIDADE 4 • Física contemporânea

Fonte: Leandro Godoy et al. (2020), p. 145

Os autores do LD4, nos seis volumes que contêm material sobre o Novo Ensino Médio em Ciências da Natureza e suas Tecnologias, não discutem modelos atômicos ou física quântica, seja na seção de Química ou de Física. Isso está alinhado com a nova estrutura do Novo Ensino Médio, já que as alterações anunciadas como melhorias no

ensino médio são, de fato, um retrocesso significativo. Contudo, essa abordagem foi revogada e o MEC encaminhou um novo documento com algumas alterações para a Casa Civil. O documento propõe mudanças na carga horária da educação básica, nas disciplinas obrigatórias e em outros aspectos relevantes.

Ademais, a fragmentação das disciplinas no Novo Ensino Médio ameaça a educação dos estudantes nesse período, bem como a integridade da rede de ensino superior. Os futuros itinerários curriculares poderão aumentar a disparidade entre as escolas públicas e privadas, privilegiando instituições de elite que possuem infraestrutura robusta para prover uma gama completa de opções formativas.

Figura 15: Coleção dos livros da Conexões.



Fonte: o autor.

5.1.3 – Contextualização com a dualidade onda-partícula

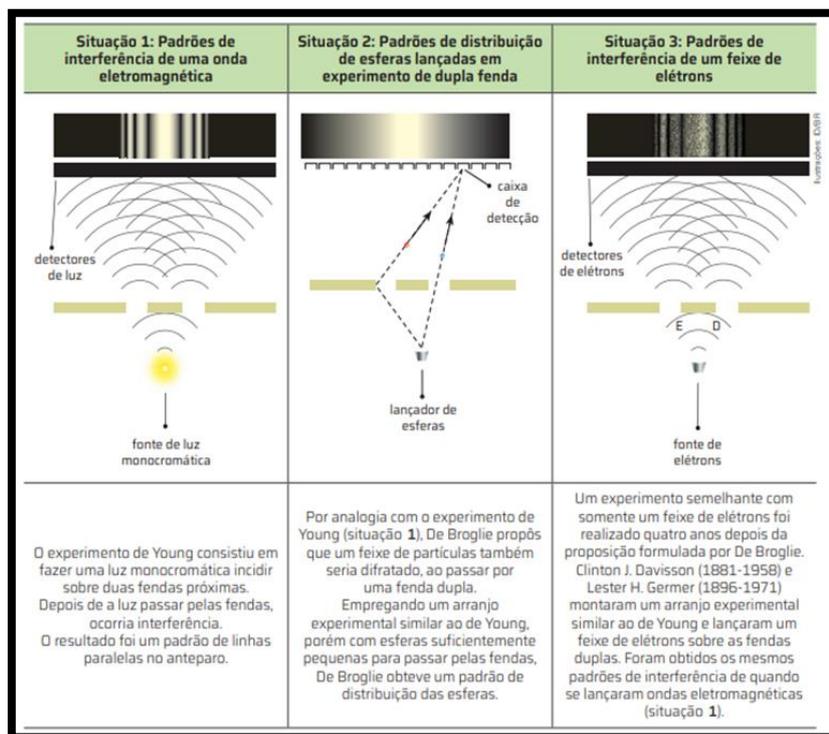
Em relação à contextualização, estamos de acordo com Vasconcelos (2007), que apontou como o ensino de conteúdo individualizado, sem integração com outros conceitos ou disciplinas, pode prejudicar a compreensão do aluno. Ademais, a construção do conhecimento torna-se mecânica e repetitiva, focando mais em atividades de memorização do que em estratégias de resolução de problemas.

Por outro lado, Otesbergue (2013) afirma que a contextualização é um fenômeno linguístico sob uma perspectiva histórico-cultural. Contudo, Barbosa e Mendes (2016) consideram a contextualização essencial para superar as dificuldades dos alunos. Entretanto, se a definição do conteúdo não for plenamente compreendida, novos problemas podem emergir, exigindo cautela ao contextualizar o tema.

Assim, considera-se que a educação contextualizada é de grande importância para superar os desafios previamente mencionados.

Os autores do LD1, na página 44, contextualizam o conteúdo da teoria de Louis de Broglie com uma imagem do experimento da dupla fenda para radiação eletromagnética, realizado pelo físico e médico Thomas Young (1773-1829).

Figura 16: Situações de experimentos sobre a dualidade onda-partícula.



Na página 115 do LD2, os autores apresentam diversas contextualizações sobre a dualidade onda-partícula proposta por Louis de Broglie. A primeira delas associa essa dualidade aos "níveis de energia dos elétrons" no modelo atômico de Bohr. A segunda contextualização refere-se ao experimento de fendas duplas e a interferência resultante da sobreposição em cristais. Por fim, mencionam o experimento de Jönsson com elétrons e fendas duplas, seguido pela terceira contextualização, o experimento de Clinton Davisson (1881-1958) e Lester Germer (1896-1971), que investigaram a difração de elétrons em cristais de níquel e por fim os autores falam em Erwin Schrödinger (1887-1961) que através de sua equação de onda propôs uma explicação para a organização da tabela periódica dos elementos químicos.

Figura 17: Sequencias de representações dos experimentos sobre a dualidade onda-partícula.

Note que, no texto, Louis de Broglie se refere ao comportamento ondulatório em termos da "ideia de periodicidade". Por outro lado, os números inteiros de que fala – "[...] a determinação do movimento estável dos elétrons no átomo introduz números inteiros [...]" – correspondem aos níveis de energia dos elétrons no modelo de Bohr. Ele associa os números inteiros aos modos normais de vibração de uma corda ou uma membrana, por exemplo.

A proposição de De Broglie pode ser expressa da seguinte maneira:

A onda associada a uma partícula com momento linear p tem comprimento de onda (λ) dado por:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

em que h é a constante de Planck. No caso de uma partícula não relativista, o momento linear pode ser escrito por $p = m \cdot v$, onde m e v são, respectivamente, a massa e a velocidade da partícula.

O experimento da fenda dupla com elétrons

Na Atividade 2 – Parte B do Capítulo 5, você realizou um experimento no qual incidiu a luz do laser sobre uma fenda dupla. O resultado foi a observação de um padrão de interferência na parede.

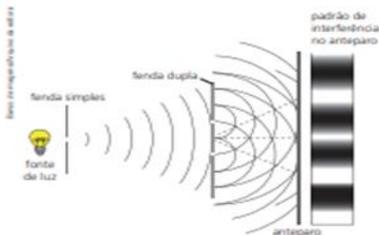


Figura 72 – Representação do experimento da fenda dupla. Os elementos não estão representados em proporção. Cores fantasia.

O padrão de interferência, como mostrado na figura 7.3, é formado por franjas claras e escuras decorrentes da sobreposição das cristas e dos vales das ondas. As franjas claras correspondem às regiões nas quais as cristas se somaram (interferência construtiva). Já as franjas escuras correspondem às regiões onde uma crista se

somou com um vale (interferência destrutiva). Além disso, a intensidade da luz é maior no centro da figura.



Figura 73 – Padrão de interferência da luz l vermelha em fendas duplas.

Em 1961, Claus Jönsson (1930-) realizou um experimento de dupla fenda, mas usando um feixe de elétrons em vez de luz. A figura 7.4 mostra uma série de imagens tomadas em tempos diferentes. Como existe apenas um elétron emitido a cada instante, o padrão de interferência é construído com base em eventos de um único elétron. O padrão de interferência resultante depois que um grande número de elétrons é observado corresponde ao padrão de interferência semelhante àquele apresentado pela luz. Portanto, os elétrons se comportam como ondas nesse experimento.

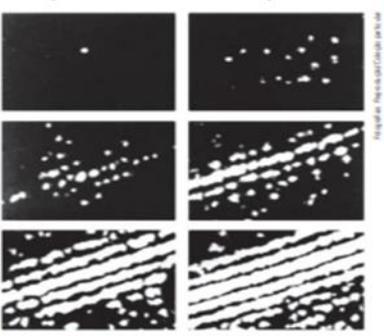


Figura 74 – Padrão de interferência obtido no l experimento de fenda dupla com elétrons.

O experimento de Jönsson é mais uma confirmação da hipótese de De Broglie. De fato, ainda nos anos 1920, os físicos Clinton Davisson (1881-1958) e Lester Germer (1896-1971) haviam mostrado o fenômeno de difração de elétrons em cristais de níquel, possibilitando utilizar a mecânica ondulatória para descrever o comportamento dos elétrons. Esse foi mais um resultado que levou Erwin Schrödinger (1887-1961) a propor uma equação de ondas para o elétron, que resultaria no modelo atômico que conseguiu explicar a organização da tabela periódica dos elementos químicos.

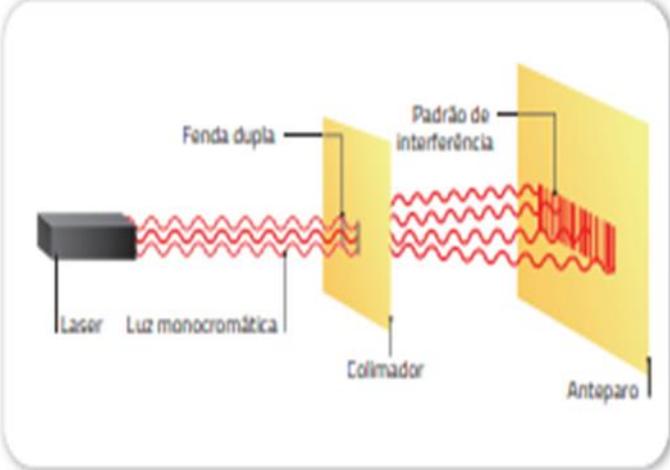
Fonte: Eduardo Mortimer et al. (2020), p.115

Os autores do LD3 discutem a dualidade onda-partícula de Louis de Broglie na página 145, relacionando-a com o experimento das fendas duplas de Thomas Young (1773-1829), que empregou luz. Na página 146, apresentam uma imagem diferente do experimento de Clinton Joseph Davisson (1881-1958), que utilizou feixes de elétrons.

Figura 18: Representação do experimento da dupla fenda de Thomas Young.

O experimento da dupla fenda, realizado em 1800 pelo físico e médico britânico Thomas Young (1773-1829), mostrou que a luz tinha caráter ondulatório, pois apresentava os fenômenos da difração e da interferência.

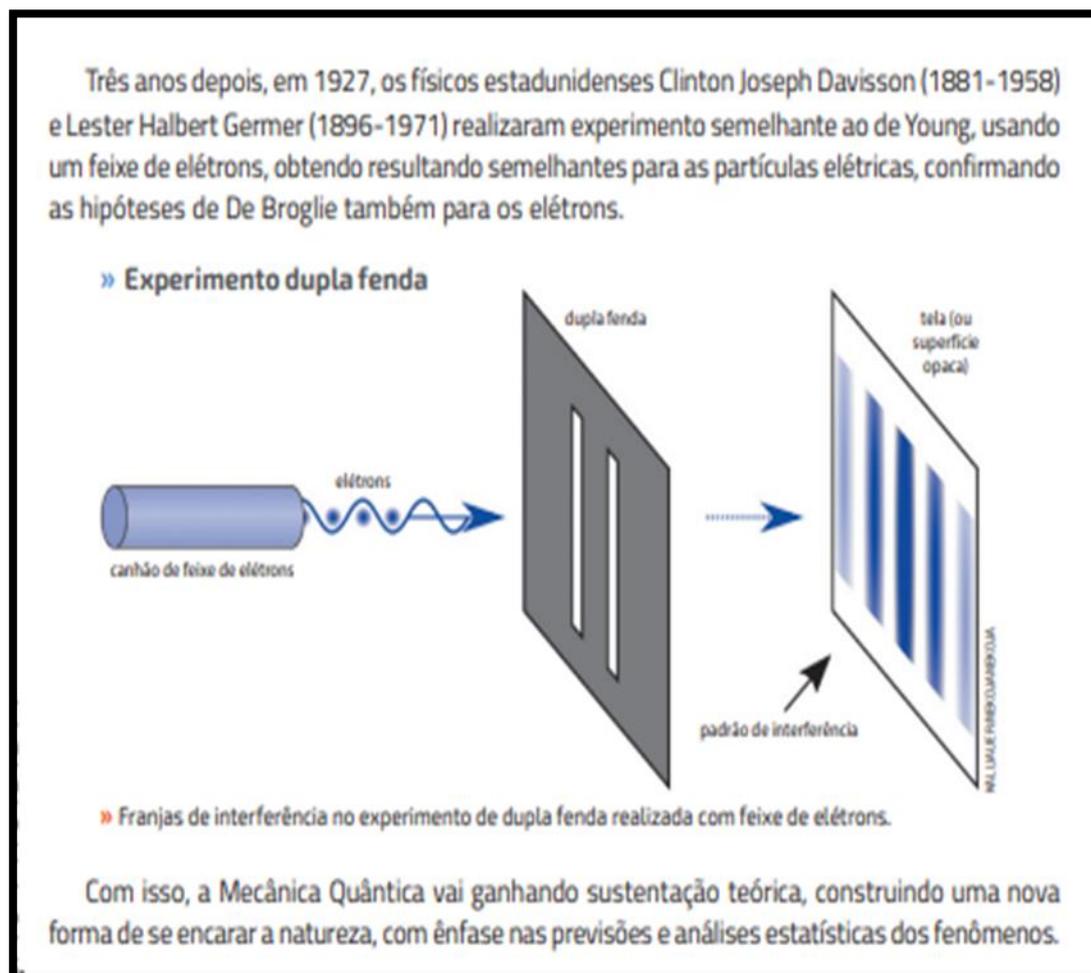
No experimento de Young, um feixe de luz atravessa duas fendas estreitas, muito próximas. No anteparo situado do outro lado, em vez de um único feixe ou raio, o que se observa é uma sequência de faixas claras e escuras, chamadas de franjas de interferência. As faixas claras correspondem a interferências construtivas e as escuras, destrutivas, coerentes com a teoria ondulatória.



» Experimento da dupla fenda de Thomas Young.

Para aglutinar as observações dos dois comportamentos da luz – partícula na teoria dos quanta (fótons) e onda na observação da difração e interferência – o físico francês Louis De Broglie (1892-1987) propôs, em 1924, que a luz apresentava natureza dual se comportando ora como onda e ora como partícula. De Broglie, apresentou, então, a teoria em que expressava o comprimento de onda (λ) em função de sua quantidade de movimento ($Q = m \cdot v$).

Figura 19: Representação do experimento sobre a dupla fenda realizada com feixes de elétrons.



Fonte: Leandro Godoy et al. (2020), p. 146.

5.2 - Recursos Visuais

Os recursos visuais, que vão além de meros complementos e destacam a importância dos aspectos gráficos como negrito, itálico, sublinhado, variados tamanhos e tipos de fontes, bem como elementos visuais de uma página impressa, tais como fotos, tabelas, gráficos, barras, linhas, caixas, ilustrações e cores, tornam-se cada vez mais essenciais para atender à necessidade da sociedade moderna de processar informações rapidamente. Sua utilização tem crescido na mídia, no entretenimento e na educação. Assim, os recursos visuais são reconhecidos não apenas como suporte ao texto, mas como uma mensagem independente, organizada e estruturada, que, conforme Buratini (2004),

possui frequentemente a mesma relevância que a informação verbal. Assim como, os recursos visuais desempenham um papel crucial nos livros didáticos, ajudando a tornar o aprendizado mais acessível, interessante e eficaz para os alunos.

Na nossa visão, a aplicação de recursos visuais contribui significativamente para o entendimento de conceitos, estruturas e processos, especialmente em química, uma vez que esta matéria pode ser bastante abstrata para os estudantes. Assim, as imagens se tornam ferramentas valiosas para a assimilação dos conceitos abstratos em química, sendo frequentemente o livro didático o recurso mais eficiente disponível para o ensino e o aprendizado dos alunos.

Portanto, a combinação adequada desses recursos visuais não apenas torna o conteúdo mais atraente e compreensível, mas também apoia diferentes estilos de aprendizagem, permitindo que os alunos absorvam melhor o material apresentado.

De acordo com os pesquisadores (Alves, 2011; Lima e Queiroz, 2020; Lima e Queiroz, 2021), as ilustrações têm um papel crucial tanto na Ciência quanto no seu ensino, não se limitando apenas a representar os fenômenos estudados. Elas também são fundamentais para registrar, armazenar, organizar, compartilhar dados e informações, indicar tendências e enfatizar pontos importantes.

Assim, os padrões de recursos visuais para esta pesquisa foram estabelecidos com base nos seguintes indicadores: qualidade da ilustração, grau de correlação com as informações e autenticidade presente na ilustração, conforme a Tabela 4 apresentada a seguir:

Tabela 4: Parâmetros de investigações para os recursos visuais

| Escala Semântica de compreensão qualitativa sobre os critérios que vai de 1 a 4 (totalmente satisfatório até totalmente insatisfatório) | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| RECURSOS VISUAIS | LD1 | LD2 | LD3 | LD4 |
| Qualidade da ilustração | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Grau de relação com as informações | 2 | 2 | 2 | 4 |
| Veracidade contida na ilustração | 2 | 2 | 2 | 4 |

Em resumo, a emergência de novos métodos de transmissão de informação, onde o aspecto visual ganha maior importância e se integra mais estreitamente com o verbal, nos faz considerar a escolha correta de informações visuais para o ensino e aprendizado

em Química, especialmente para conteúdos abstratos como os desta pesquisa. Há também a necessidade de incentivar os estudantes a utilizarem recursos visuais, de modo que estes possam efetivamente auxiliar no ensino e na compreensão dos conceitos químicos.

5.2.1 – Qualidade da ilustração

A excelência das ilustrações em livros didáticos é vital para o aprendizado dos alunos. Aspectos chave incluem: clareza e complemento ao texto, precisão e exatidão, estímulo visual, diversidade e inclusão, integração tecnológica e avaliação constante. Em suma, ilustrações de alta qualidade em materiais didáticos são essenciais para melhorar a compreensão e retenção do conteúdo pelos alunos, tornando o processo de aprendizado mais atraente e produtivo. Como por exemplo, em áreas como Ciências da Natureza e suas Tecnologias e Matemática, podem ser abstratos e difíceis de entender apenas com texto. Ilustrações ajudam os alunos a visualizar esses conceitos de maneira mais concreta e tangível.

Em síntese, as ilustrações presentes nos livros didáticos são fundamentais para ajudar na compreensão e promover a aprendizagem dos estudantes, contanto que sejam pertinentes, exatas e visualmente estimulantes, criando uma ligação direta e significativa com o conteúdo exposto no texto.

Em relação à qualidade das imagens que abordam a teoria da dualidade onda-partícula dos livros analisados para este estudo, o livro LD1 contém somente uma imagem referente à dualidade da matéria, o LD2 inclui três imagens para explicar a dualidade, e o LD3 possui duas imagens focadas na natureza dual da luz. O livro didático 4, por sua vez, não possui nenhuma imagem.

5.2.2 – Grau de relação com as informações

O grau de relação com as informações dos livros didáticos pode variar dependendo do contexto e do objetivo específico. Em geral, os livros didáticos são projetados para fornecer informações precisas e fundamentadas em teorias consolidadas dentro de um campo de estudo. Portanto, podemos considerar que:

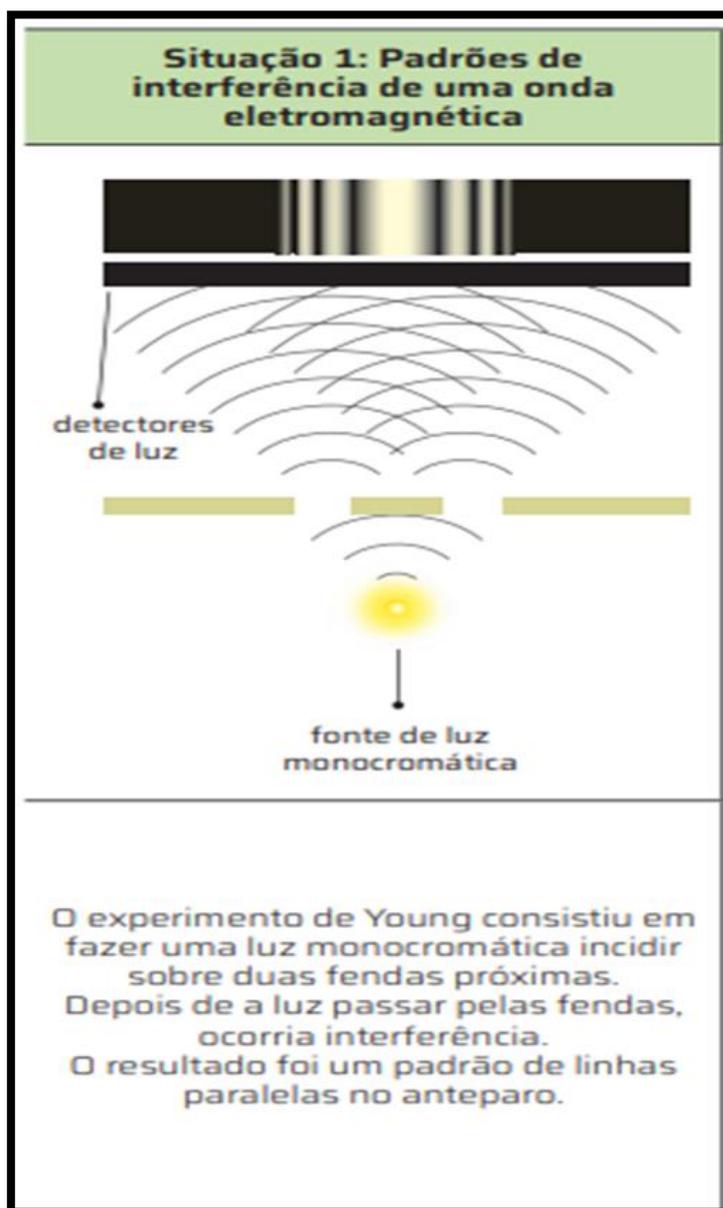
1. **Precisão e Fundamentação Teórica:** As informações dos livros didáticos tendem a ser precisas e baseadas em teorias reconhecidas. Isso significa que são uma fonte confiável de conhecimento dentro de um determinado campo acadêmico.
2. **Contextualização e Aplicabilidade:** Os livros didáticos frequentemente contextualizam o conhecimento com exemplos práticos e aplicáveis, facilitando a compreensão e a aplicação dos conceitos aprendidos.
3. **Limitações e Atualizações:** No entanto, os livros didáticos podem ter limitações em relação à atualização de informações. Dependendo da velocidade de desenvolvimento do conhecimento em um campo específico, algumas informações nos livros podem estar desatualizadas.
4. **Variedade de Perspectivas:** A diversidade de perspectivas e abordagens pode variar de acordo com o autor e o foco do livro didático. Alguns livros podem oferecer uma visão mais abrangente e crítica, enquanto outros podem ser mais tradicionais em sua abordagem.

Portanto, ao usar informações de livros didáticos, é importante considerar o contexto específico de uso, verificar a data de publicação para garantir a relevância atual do conteúdo e complementar com outras fontes quando necessário para obter uma compreensão mais completa e atualizada do tema em questão.

Em relação ao grau de conexão com as informações, dos 4 livros analisados para esta pesquisa, os autores do LD1 apresentam uma tabela composta por três experimentos que denominam situações. Na primeira, descrevem o experimento de Young com uma fonte de luz monocromática. Na segunda, mencionam que De Broglie fez uma analogia com o experimento de Young usando um lançador de esferas. Na terceira e última, discutem o experimento de Clinton J. Davisson (1881-1971) e Lester H. Germer (1896-1971), que empregaram fontes de elétrons em fendas duplas para validar a teoria da dualidade, embora esse experimento tenha sido realizado quatro anos após a divulgação das ideias de Louis de Broglie.

SITUAÇÃO 01

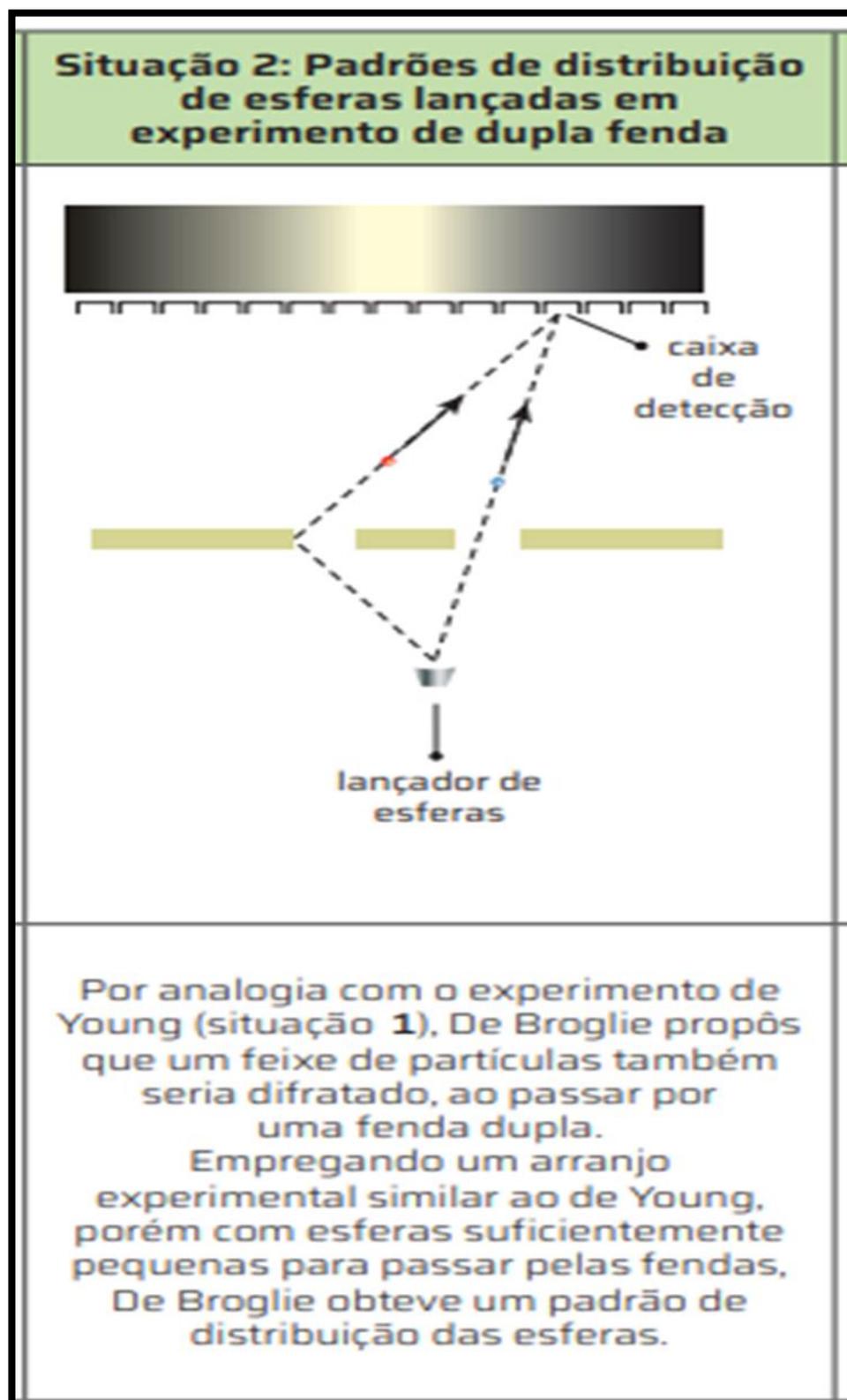
Figura 20: Representação do experimento sobre a interferência de uma onda eletromagnética.



Fonte: Ana Fukui et al. (2020), p. 44

SITUAÇÃO 2:

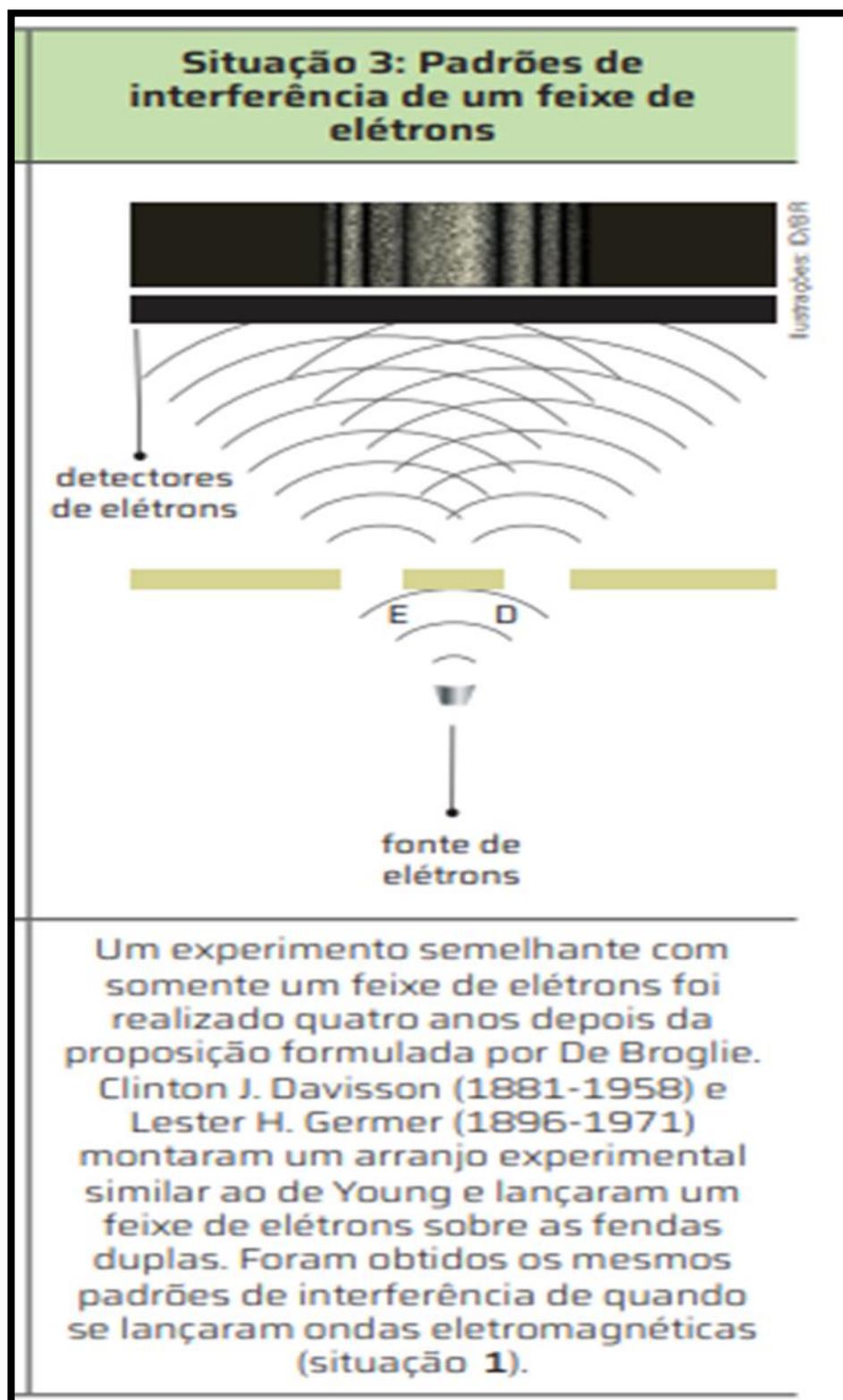
Figura 21: Representação sobre o experimento de padrões de distribuição esferas lançadas em experimentos de dupla fenda.



Fonte: Ana Fukui et al. (2020), p. 44.

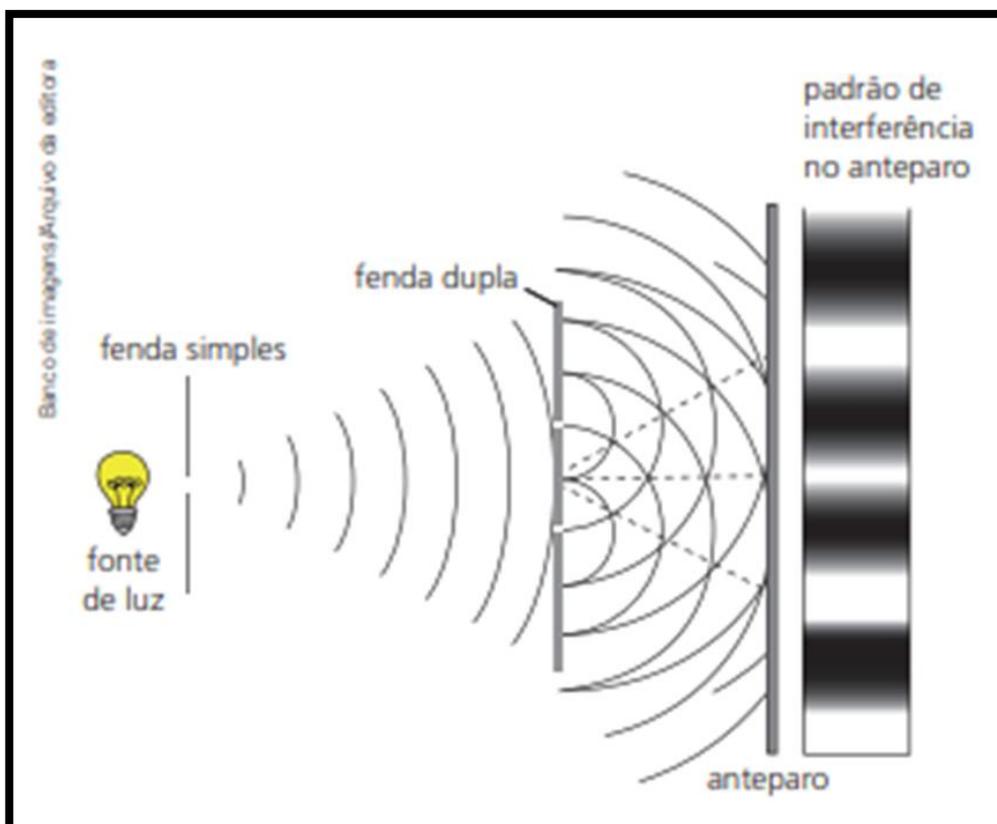
SITUAÇÃO 3:

Figura 22: Representação do experimento sobre padrões de interferência de um feixe de elétrons.



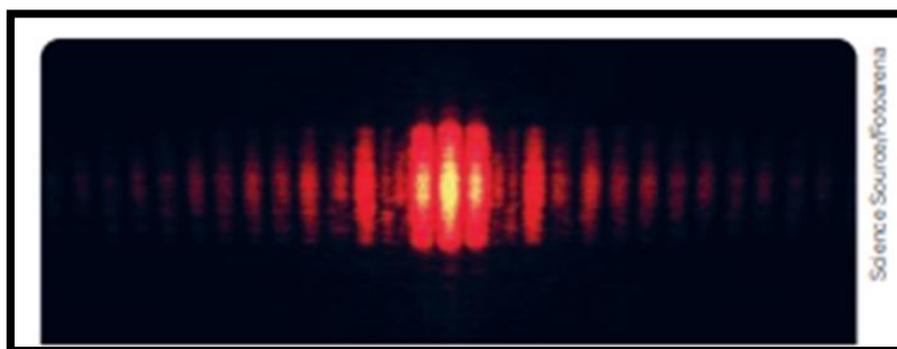
O livro didático 2 apresenta três figuras que ilustram a dualidade onda-partícula. A primeira figura mostra o experimento da fenda dupla com uma fonte de luz, a segunda ilustra um padrão de interferência de luz vermelha em fendas duplas, e a terceira descreve um padrão de interferência de fenda dupla com elétrons.

Figura 23: Representação do experimento sobre a dupla fenda utilizando fonte de luz.



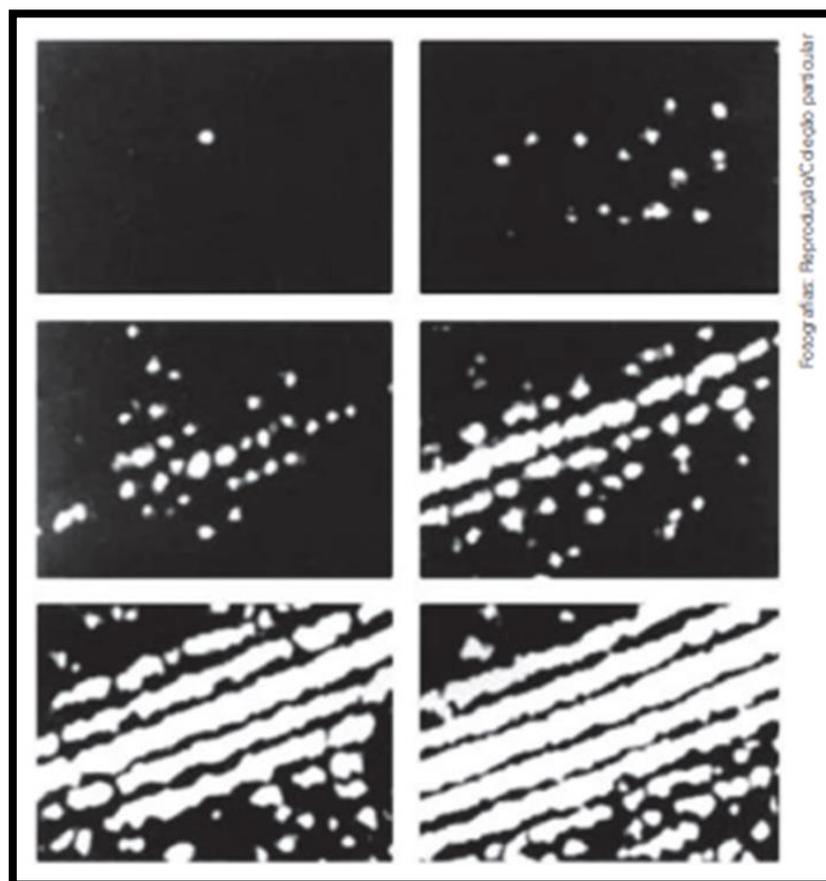
Fonte: Eduardo Mortimer et al. (2020), p.115

Figura 24: Representação do experimento sobre padrão de interferência da luz vermelha em fendas duplas.



Fonte: Eduardo Mortimer et al. (2020), p.115.

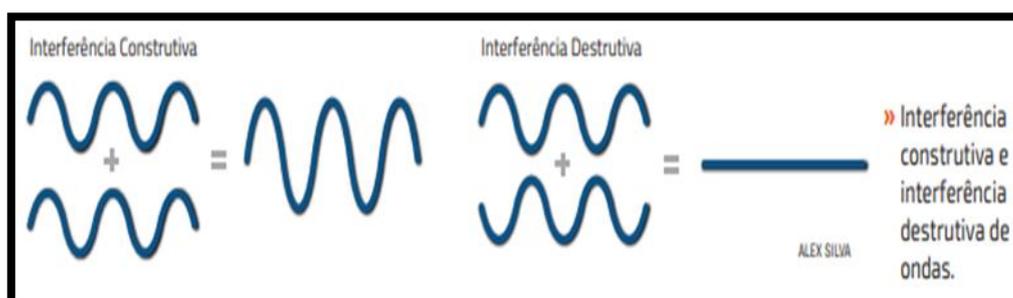
Figura 25: Representação sobre o experimento padrão de interferência da fenda dupla utilizando elétrons.



Fonte: Eduardo Mortimer et al. (2020), p.115.

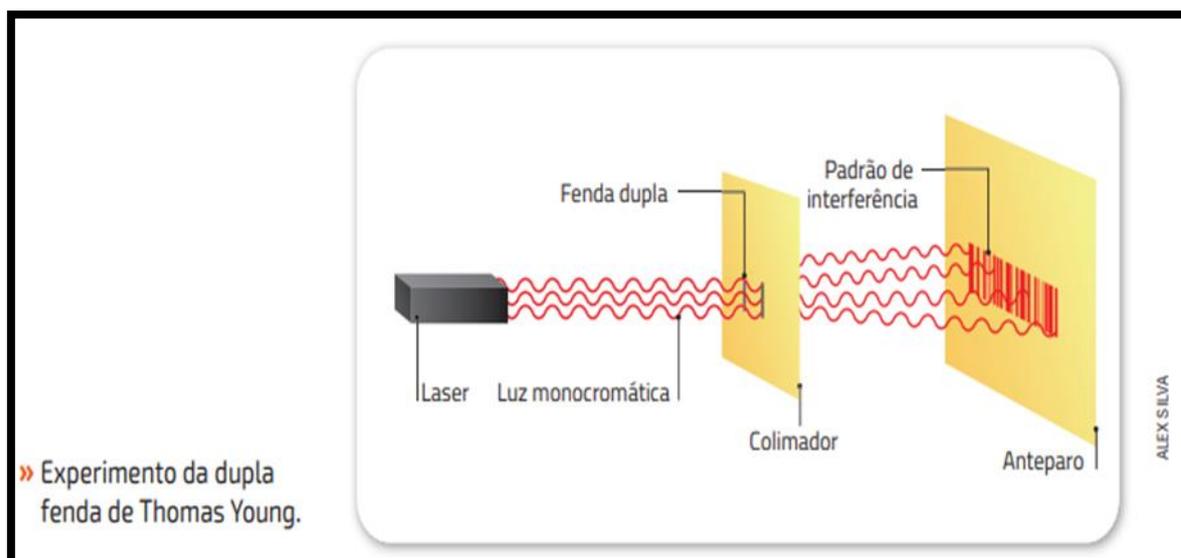
O livro didático 3 apresenta três figuras que ilustram a natureza dual da luz. A primeira figura mostra as interferências construtivas e destrutivas das ondas. A segunda figura descreve o experimento da dupla fenda realizado por Thomas Young, e a terceira figura demonstra o experimento da dupla fenda com o uso de elétrons.

Figura 26: Representação a interferências construtivas e destrutivas de ondas.



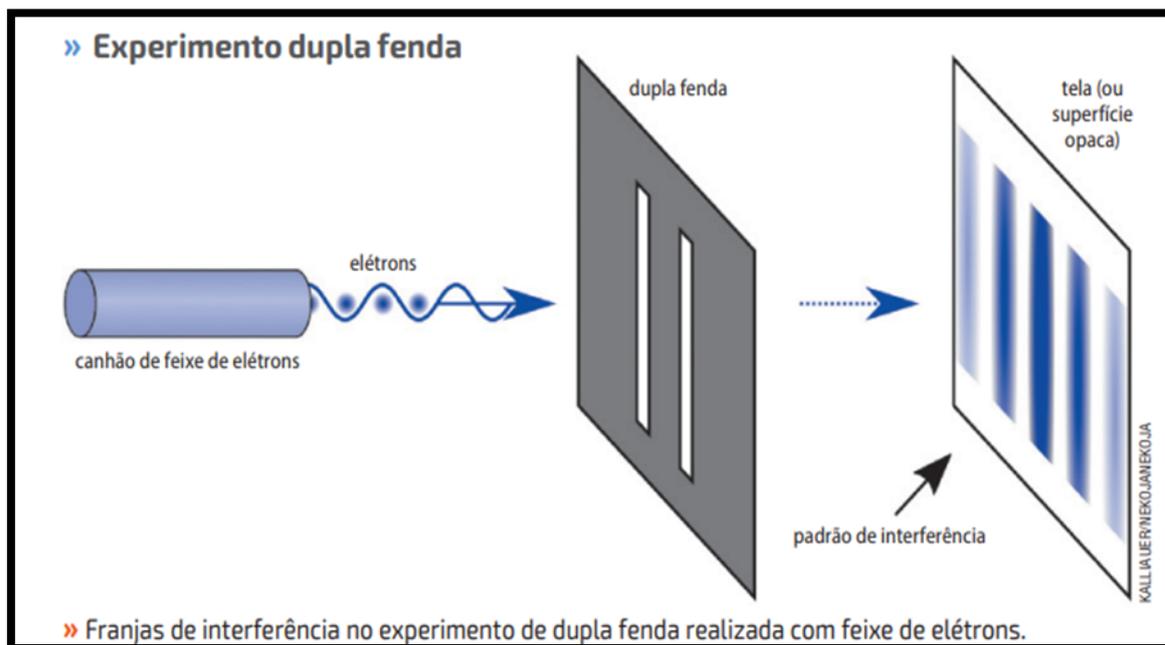
Fonte: Leandro Godoy et al. (2020), p. 145.

Figura 27: Representação sobre o experimento da dupla fenda de Thomas Young.



Fonte: Leandro Godoy et al. (2020), p. 145.

Figura 28: Representação sobre o experimento da dupla fenda utilizando elétrons.



Fonte: Leandro Godoy et al. (2020), p. 146.

O LD4 não traz nenhuma relação de imagem com as informações a respeito sobre a dualidade onda-partícula.

É evidente que as representações visuais nos livros didáticos estudados afetam como os estudantes do Novo Ensino Médio formam o conceito da dualidade onda-partícula, mesmo sem fazer referência à teoria de Louis de Broglie, e refletem sobre a Evolução dos Modelos Atômicos Quânticos. Assim, torna-se essencial prestar mais atenção à qualidade dos textos e das imagens contidas nesse recurso didático.

5.2.3 – Veracidade contida na ilustração

A autenticidade das ilustrações em livros didáticos é fundamental para a transmissão de informações exatas e educacionais aos alunos. Destacam-se alguns aspectos cruciais: Precisão Representativa, isto é, as ilustrações devem ser exatas e refletir com fidelidade o conteúdo ensinado; Contextualização Educacional, isto é, as ilustrações precisam ser contextualmente apropriadas ao material didático, complementando o texto e facilitando a compreensão dos conceitos pelos estudantes; Estímulo à Curiosidade, isto é, ilustrações de qualidade podem aguçar a curiosidade dos alunos, motivando-os a investigar mais sobre o assunto em questão; e Fontes Confiáveis, isto é, idealmente, os autores deveriam referenciar as fontes das ilustrações, assegurando que o conteúdo visual esteja fundamentado em informações confiáveis e passíveis de verificação.

Martins (2002), bem como Gouvêa e Martins (2001), consideram que as imagens têm uma variedade de funções nos livros didáticos contemporâneos. Entre elas, destacam-se a orientação da leitura, o estímulo ao interesse ou à curiosidade, a demonstração de procedimentos, a ilustração de ideias ou argumentos, a exibição de padrões por meio de uma apresentação organizada de casos e a correlação entre níveis de explicação e a descrição de fenômenos.

Segundo Mason (2006), Martins, Gouvêa e Piccini (2005), e Silva et al. (2006), a imagem é definida como a leitura que se inicia em qualquer ponto onde há um aumento significativo de informação em um breve intervalo de tempo, exigindo o uso da visão e do processamento cerebral. Enquanto a leitura de texto escrito requer uma sequência linear, com imagens isso não ocorre. Representações teóricas nem sempre bastam para a compreensão de conceitos; assim, imagens podem enriquecer essa compreensão com suas propriedades baseadas nas ideias que veiculam e, por meio de seus valores cognitivos, atuar como mediadoras no aprendizado da linguagem científica.

Os livros analisados para esta pesquisa estão adequados quanto à precisão das informações contidas nas imagens; todas estão corretamente intituladas e as legendas são claras, o que contribui para a compreensão do conteúdo com o apoio visual. No entanto, no que diz respeito à representação da dualidade onda-partícula de Louis de Broglie através de imagens, os autores falham em transmitir adequadamente, levando os estudantes a associarem erroneamente a teoria à Young, Clinton J. Davisson e Lester H. Germer, em detrimento a dualidade de Louis de Broglie.

Portanto, a veracidade das ilustrações nos livros didáticos desempenha um papel essencial na educação, influenciando diretamente na compreensão e no aprendizado dos alunos sobre diversos temas.

5.3 – Atividade proposta e experimentais

Nos livros didáticos, as atividades propostas e experimentais desempenham papéis fundamentais no processo de aprendizagem dos alunos. Aqui estão algumas características e importâncias dessas atividades:

1. Proposta de Atividades:

- **Reforço de Conteúdo:** As atividades propostas nos livros didáticos ajudam os alunos a consolidar o conhecimento adquirido em sala de aula. Elas oferecem oportunidades para praticar habilidades específicas, resolver problemas e aplicar conceitos teóricos.
- **Variedade de Níveis:** Geralmente, essas atividades são projetadas para atender a diferentes níveis de habilidade e compreensão dos alunos, proporcionando desafios adequados para todos.

2. Atividades Experimentais:

- **Exploração Prática:** As atividades experimentais são projetadas para permitir que os alunos aprendam através da experiência prática. Elas são especialmente importantes em disciplinas como ciências, onde a observação direta e a experimentação são essenciais para a compreensão dos conceitos.

- **Estímulo à Curiosidade:** Essas atividades incentivam os alunos a questionar, explorar e descobrir por si mesmos. Isso não só fortalece o entendimento dos conceitos, mas também promove o pensamento crítico e a criatividade.

Em resumo, as atividades propostas e experimentais nos livros didáticos são projetadas para tornar o aprendizado mais envolvente, prático e relevante. Elas desempenham um papel crucial no desenvolvimento das habilidades dos alunos e na consolidação dos conhecimentos adquiridos, facilitando uma educação mais eficaz e completa.

Com relação aos exemplares analisados, podemos destacar que: o LD1 na página 50 traz duas questões abertas (questões 02 e 03). A primeira questão vem com duas proposições, na proposição “a” os autores querem que os estudantes “julgue quem terá maior comprimento de onda e frequência” entre um próton e um elétron. Para isso, os alunos devem utilizar a fórmula que foi dada na página 44. Na proposição “b” os alunos devem explicar as diferenças nos comprimentos de onda dessas partículas. Na segunda questão, também aberta, só que com três proposições a, b e c. Na letra “a” é para calcular o comprimento de onda de uma pedra utilizando a fórmula da página 44, só que nesse letra ele disponibiliza a constante de Planck e a velocidade da pedra. Na letra “b” os alunos têm que julgar se o comprimento de onda encontrado pode ser evidenciado no experimento de duas fendas. Na letra “c” os autores solicitam dos alunos uma escrita afirmativa sobre o comprimento de onda encontrado poderá ser associada a corpos macroscópicos.

O LD2 apresenta apenas duas questões na página 116 referente a dualidade onda-partícula. A primeira questão que é aberta, solicita aos estudantes que façam uma escrita sobre a ideia proposta por De Broglie. A segunda questão que também é aberta, mais com duas proposições “a” e “b”. Na letra “a” pede para calcular o comprimento de onda de um corpo utilizando a expressão de Louis de Broglie que é encontrada na página 115 e na letra “b” solicita uma explicação por que não se observa o caráter ondulatório nos objetos do nosso dia a dia.

O LD3 nas páginas 151 e 152 abordam 3 atividades sobre a natureza dual da luz. Na questão ele cita e traz uma imagem de Louis de Broglie, mas em nenhuma das proposições da questão faz referência a sua teoria; essa questão se reporta só ao experimento da dupla fenda de Young. Nas 153, 154 e 155 os autores trazem 14 questões como atividades extras, mas nenhuma faz referência a De Broglie.

O LD4 não traz nenhuma atividade referente a dualidade onda- partícula de Louis de Broglie.

Em relação a atividades práticas, nenhum livro analisado traz experimentos para serem desenvolvidos na escola referente a dualidade onda-partícula.

6. PROPOSTA DE ATIVIDADE EXPERIMENTAL

A eficácia no ensino de Ciências no Ensino Médio é influenciada por múltiplos fatores. Entre eles, a organização contextualizada do conhecimento é crucial, aproveitando as realidades vivenciadas pela escola e pelos estudantes, especialmente sob a nova estrutura do Ensino Médio. Esta abordagem é justificada pelo desafio de empregar métodos variados para que os alunos desenvolvam as competências e habilidades requeridas para sua formação integral, dentro de um contexto social e tecnológico. Nesse contexto, as atividades experimentais constituem um recurso fundamental para o sustento da ciência. Através da experimentação, os alunos aprendem o processo de investigação e observação. Mesmo que o experimento seja simples, ele se revela repleto de contradições significativas entre o pensamento do aluno, as hipóteses levantadas e as descobertas científicas. Além disso, são valiosas para atender às necessidades de aprimoramento, promovendo o desenvolvimento da capacidade de ensino e aprendizagem.

A experimentação teve um papel crucial no avanço da tecnologia, propondo um método científico fundamentado na racionalização, indução e dedução analítica desde o século XVII, desafiando o conceito tradicional da relação entre homem, natureza e o divino.

Além dos pontos principais, é essencial que a atividade experimental tenha relevância para o conteúdo do livro didático e esteja em consonância com os objetivos educacionais do currículo. Incluir dicas e precauções de segurança é também importante, especialmente se a atividade incluir materiais ou procedimentos com potenciais riscos.

A influência significativa dos trabalhos experimentais realizados nas universidades tem levado à incorporação de atividades experimentais nas escolas. O propósito dessas atividades é enriquecer o aprendizado científico através da aplicação prática do conhecimento adquirido (Galiazzi et al., 2001). Segundo Giordan (1999), o investimento em pesquisa no ensino de química é igualmente produtivo, evidenciando a relevância da experimentação no processo educativo de química e ciências.

O aprendizado dos conteúdos de química pode ser estruturado em três abordagens distintas: a fenomenológica, que engloba os elementos-chave do conhecimento e permite a visualização, análise e determinação concreta; a teórica, que oferece explicações baseadas em modelos como átomos e íons, essenciais para a compreensão dos fenômenos;

e a representacional, que envolve o uso de dados específicos da linguagem da química, tais como fórmulas e equações.

Em concordância com Oliveira (2010), a experimentação possui uma relevância essencial que cria uma ligação e uma abordagem nos três níveis do conhecimento químico mencionado anteriormente, permitindo-nos destacar as contribuições que ela oferece:

- ✓ Aguçar e provocar a atenção dos discentes.
- ✓ Trabalhar a coletividade entre os discentes.
- ✓ Instaurar as definições para a tomada de convicções.
- ✓ Incentivar a imaginação criativa.
- ✓ Despertar a habilidade da observação e registro.
- ✓ Analisar dados e fazer hipóteses sobre fenômenos.
- ✓ Assimilar a ligação entre ciência, tecnologia e sociedade.
- ✓ Observar para compreender a natureza da ciência.

Podemos concluir que a teoria emprega modelos para explicar fenômenos observados ou percebidos, enquanto os modelos representacionais atuam como ferramentas simbólicas para conectar a primeira e a segunda abordagem metodológica. Machado (2004) afirmou que a construção do conhecimento em química depende das conexões entre essas três estratégias. O mesmo autor critica a maneira como esses métodos são aplicados na educação formal. Conforme suas palavras:

Mas, o que a escola, o livro didático e o professor têm feito? Trabalhado descontextualizadamente somente os níveis representacional e teórico e, principalmente, o nível representacional, incluindo aí os aspectos matemáticos desse nível [...]. A ausência de fenômenos e seus contextos na sala de aula pode fazer com que os alunos tomem por “reais” as fórmulas das substâncias, as equações químicas e os modelos para a matéria (Machado, 2004, p.173).

Assim, nosso objetivo é desenvolver a Caixa da Interação Onda-Partícula para explorar experimentalmente a Teoria de Louis de Broglie com alunos do Ensino Médio em Escolas de Tempo Integral na cidade de Serra Talhada, que fica no interior de

Pernambuco. A seguir, apresentamos o protótipo da caixa, incluindo os reagentes e a formulação do experimento que ilustra a teoria mencionada.

Figura 29: Vista frontal da Caixa que será realizada os experimentos para demonstrar a dualidade onda-partícula.



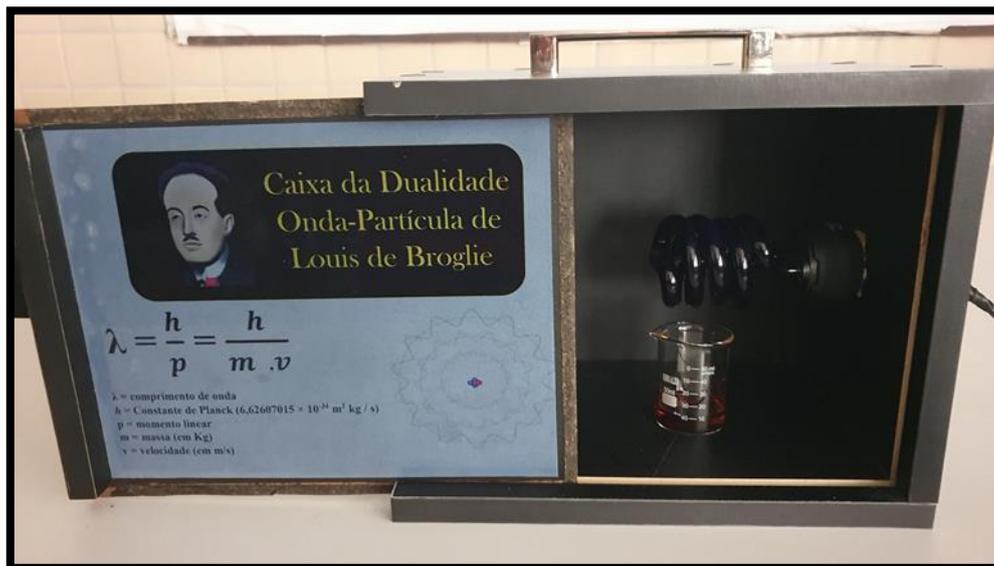
Fonte: O Autor.

Figura 30: Vista lateral da Caixa que será realizada os experimentos para demonstrar a dualidade onda-partícula.



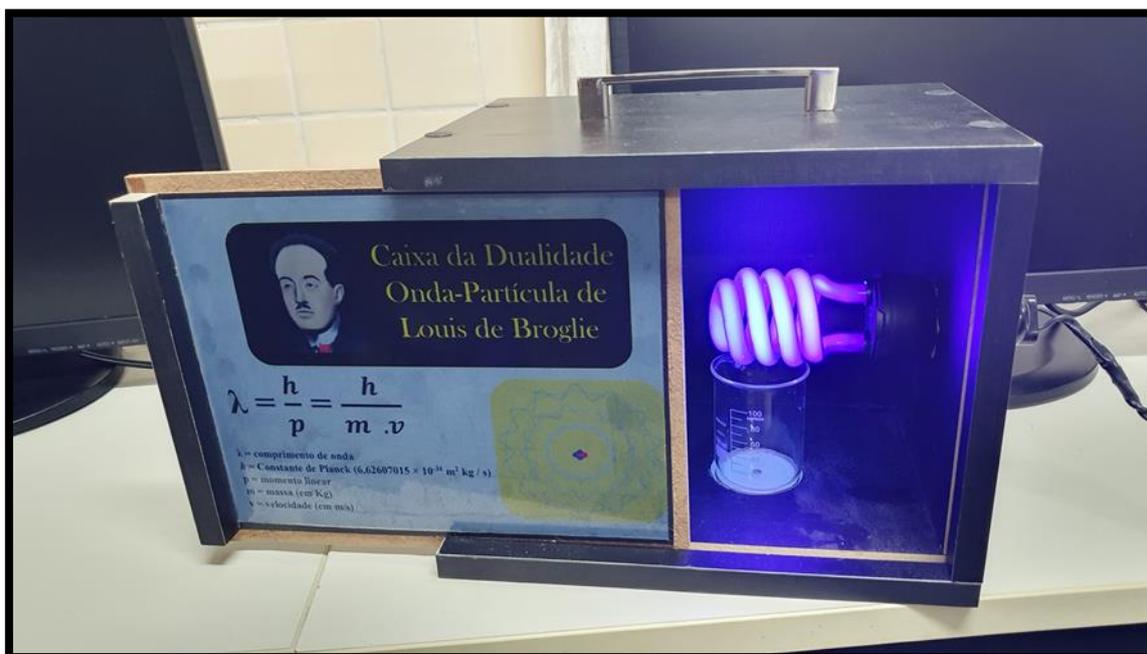
Fonte: O Autor.

Figura 31: Vista da Caixa aberta com sua Luz Ultravioleta conectada e um Becker de 100 ml.



Fonte: O Autor.

Figura 32: Vista da Caixa aberta com sua Luz Ultravioleta conectada e acesa com um Becker de 100 ml demonstrando como ocorre o experimento.



Fonte: O Autor.

A caixa foi produzida utilizando Compensado Lam Parica 15mm 2.20×1.60, com 25 cm de largura por 20 cm de altura. A porta da caixa é de correr com a finalidade de facilitar a abertura, assim como a sua vedação, um Bocal Soquete Rabicho para lâmpada comum 220 Volt., um metro de fio 14 mm e uma Lâmpada Luz Ultravioleta 36W efeito neon 220 Volt. A mesma foi revestida com um Laminado Pet Madeira Natural Preto 3000x1250mm 0.4mm.

A luz ultravioleta empregada neste experimento foi a UV-A, que, por ter um comprimento de onda próximo ao espectro visível, não é prejudicial à saúde. A abertura da caixa ocorreu apenas para a realização dos registros fotográficos.

Para a parte experimental foram preparadas duas soluções: a primeira resulta no nitrato de ferro III nona hidratado, a segunda uma mistura de ácido oxálico com ferricianeto de potássio. Após o preparo das soluções, as mesmas foram misturadas em volumes iguais.

Figura 33: Balão volumétrico com a solução alaranjada é a solução de nitrato de ferro III nona hidratado. Balão volumétrico com a solução amarelo é a solução em mistura do ácido oxálico com o ferricianeto de potássio.



Fonte: O Autor.

Figura 34: No Becker de 50 ml encontra a mistura das duas soluções resultando nessa coloração.



Fonte: O Autor.

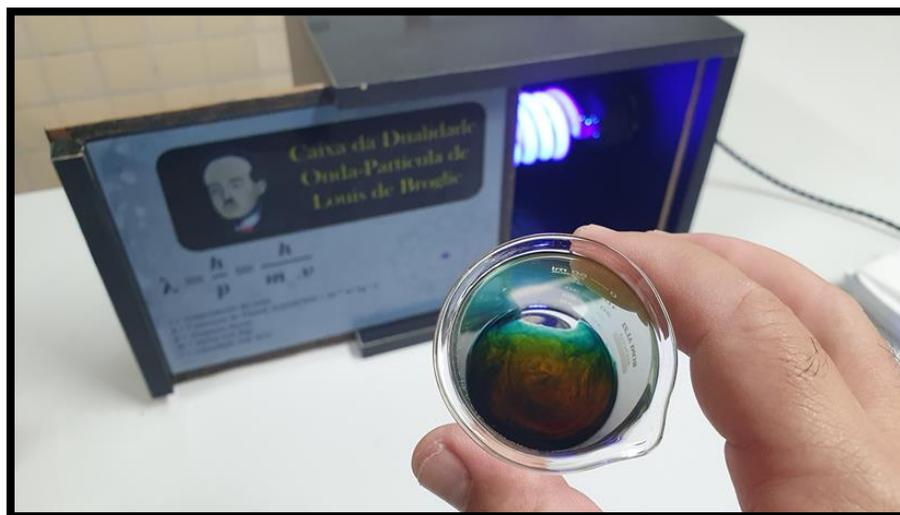
Após a mistura das soluções, o Becker foi colocado dentro da caixa, em seguida a caixa foi fechada e ligado o seu sistema elétrico na fonte de energia e aguardado dois minutos. Após esse intervalo de tempo abrimos a caixa e percebemos a formação do precipitado na coloração azul chamado de “Azul da Prússia”, comprovando a demonstração da dualidade onda-partícula. Logo abaixo temos as imagens do experimento.

Figura 35: Vista da solução já misturada dentro da caixa com a lâmpada acesa.



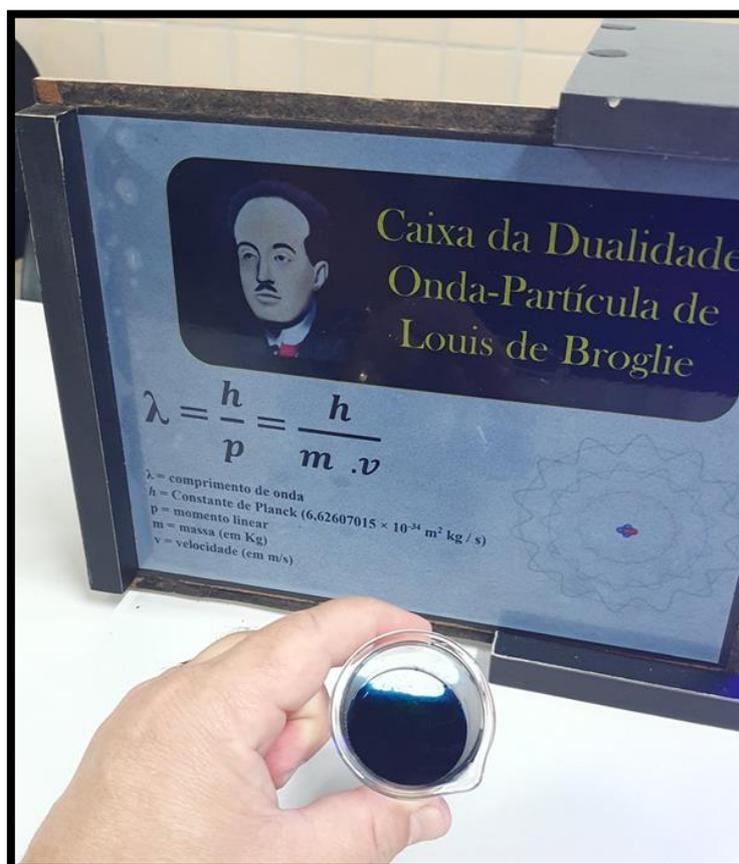
Fonte: O Autor.

Figura 36: Vista do início da precipitação e formação do Azul da Prússia.



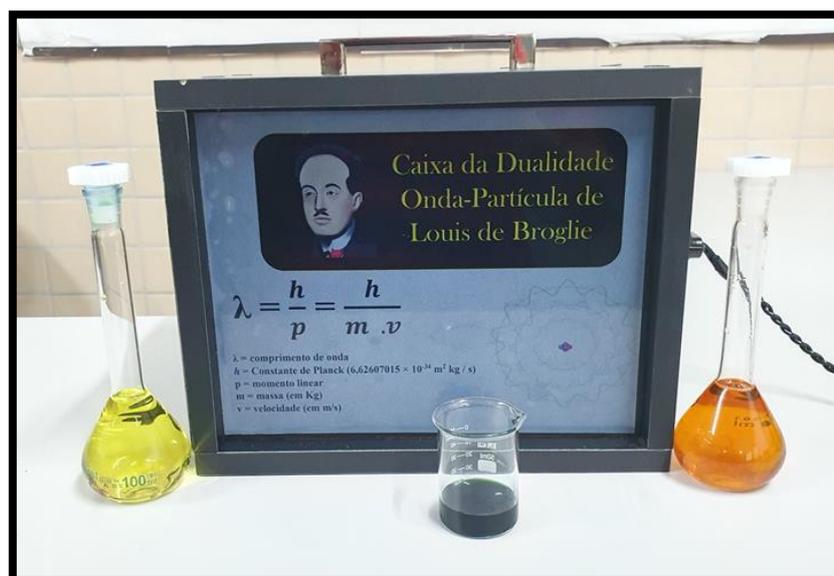
Fonte: O Autor.

Figura 37: Vista do final da precipitação com a formação total do Azul da Prússia.



Fonte: O Autor.

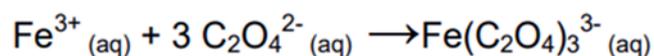
Figura 38: Comprovação efetiva do experimento, utilizando a caixa.



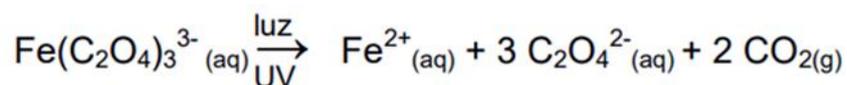
Fonte: O Autor.

6.1 Explicação do Experimento

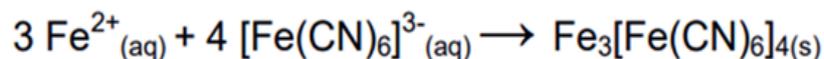
O experimento é explicável pelas reações de oxirredução que ocorrem sob a influência de uma lâmpada de luz ultravioleta, na presença de nitrato de ferro III ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) e ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$). Isso se dá porque a mistura da solução de nitrato de ferro com ácido oxálico resulta na formação de um complexo entre eles, de acordo com a reação a seguir:



O ácido oxálico serve como um agente redutor, convertendo íons de nitrato de ferro III (Fe^{3+}) em íons de ferro II (Fe^{2+}), quando o complexo é exposto à luz ultravioleta, resultando na formação de duas moléculas de dióxido de carbono.



A redução do ferro seria muito difícil de perceber se não houvesse o ferricianeto de potássio. O ferricianeto não reage com o ferro III inicial, porém reage com o ferro II, formando um pigmento de coloração azul intensa.



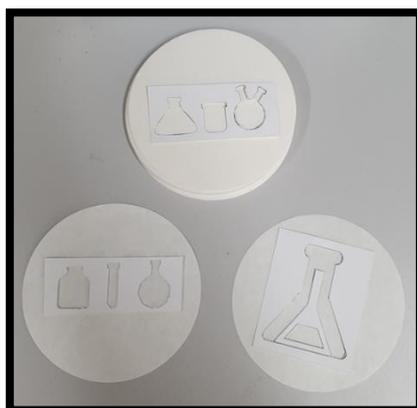
O aparecimento da pigmentação azul da Prússia é um caso especial, porque esse fenômeno deve-se a troca de carga que ocorre entre os íons de ferro no estado de oxidação +2 (dos ligantes, $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$) e os que se encontram no estado de oxidação +3 (íons centrais).

Este experimento ilustra como a luz pode influenciar reações químicas, especialmente em sistemas que envolvem íons metálicos e ácidos orgânicos.

A luz ultravioleta serve para realçar reações invisíveis à luz visível, possibilitando uma análise mais aprofundada das transformações químicas. Conhecida também como luz negra, a radiação ultravioleta (UV) faz parte do espectro eletromagnético e corresponde aos comprimentos de onda de 100 a 400 nanômetros.

Após realizar a experimentação, utilizamos a técnica de estêncil para pintar imagens de vidrarias dentro da caixa. Essa técnica envolve o uso de um molde vazado para aplicar um desenho em uma superfície distinta. Os moldes podem ser confeccionados com materiais diversos, como plástico, papel, metal ou acetato. Também é possível criá-los manualmente a partir de qualquer material que seja fácil de manusear e cortar, permitindo montar os moldes vazados com as imagens de preferência.

Figura 39: Moldes dos estêncis cortados e colocados sobre papel filtra qualitativo de 12,5 cm.



Fonte: O Autor.

Figura 40: Aplicação das soluções no molde estêncil com as imagens de um balão de fundo chato, um tubo de ensaio e um frasco reagente.



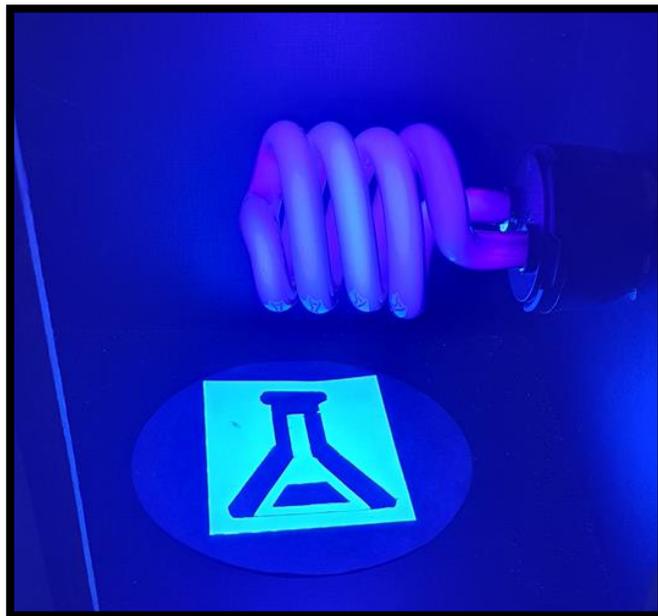
Fonte: O Autor.

Figura 41: Resultado da Aplicação das soluções no molde estêncil com as imagens de um balão de fundo chato, um tubo de ensaio e um frasco reagente. Toda parte em azul corresponde ao precipitado Azul da Prússia.



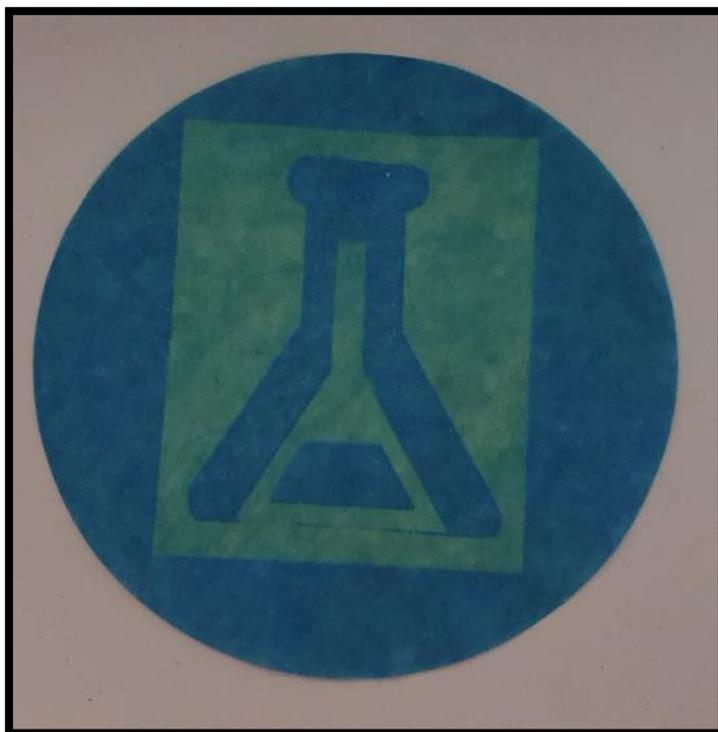
Fonte: O Autor.

Figura 42: Aplicação das soluções no molde estêncil com a imagem de um erlenmeyer.



Fonte: O Autor.

Figura 43: Resultado da Aplicação das soluções no molde estêncil com a imagem de um erlenmeyer. Toda parte em azul corresponde ao precipitado Azul da Prússia.



Fonte: O Autor.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação indicou que os livros didáticos de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, referentes ao triênio 2021-2023, necessitam aprimorar a maneira como apresentam o conteúdo educacional. Observou-se que, embora aprovados pelo PNLD, alguns desses livros falham em tratar os temas de estudo de maneira direta e objetiva, carecendo de contextualização e clareza na representação dos assuntos analisados.

Esta pesquisa permitiu constatar a presença da Química Quântica nos livros didáticos de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, especificamente na seção de Física, e não na seção correspondente ao conteúdo de Química, para o período de 2021-2023. Alguns livros apresentam uma boa abordagem, enquanto outros são mais sucintos. No entanto, esses livros raramente fazem referência direta à teoria de Louis de Broglie, indicando que o ensino dessa teoria, nas coleções de livros didáticos aprovadas para o PNLD, é insuficiente devido à falta de argumentação. A transição para o modelo atômico quântico muitas vezes não é claramente justificada, o que pode confundir os estudantes ao estudar esse conteúdo na disciplina de Química, especialmente porque esses conceitos são introduzidos na Física. A falta de uma revisão mais detalhada e rigorosa do conteúdo pelos autores pode ser uma explicação para essa situação. Em geral, a relevância da Química Quântica difere entre os livros didáticos, sendo frequentemente apresentada de maneira simplificada. Contudo, isso pode representar um desafio para o professor de Química ao tentar conectar os tópicos do livro com um entendimento mais profundo e atualizado da matéria.

Uma das coleções não trata desses conceitos. Embora tais escolhas não sejam objeto de consideração do PNLD, trata-se de uma perda significativa de conteúdo, pois o modelo atômico quântico possibilita discutir os limites do conhecimento humano, o realismo e as dificuldades em conceituar a referência não direta. Da mesma forma, o modelo atômico quântico pode ajudar a “evitar visões distorcidas sobre o trabalho científico. permitir uma compreensão mais apurada dos vários aspectos relativos ao processo de ensino-aprendizagem das ciências naturais. proporcionam uma intervenção mais especializada em sala de aula” (MARTINS, 2007), proporcionando uma maior introdução da história e filosofia da ciência ao ensino da Química.

Esta pesquisa revelou que os livros didáticos contemporâneos carecem de critérios que favoreçam a aquisição de conhecimento pelos alunos, a compreensão da origem dos

conteúdos através de contextos históricos, e a visualização de eventos específicos ou analogias do dia a dia por meio de textos ou imagens. As imagens presentes nas coleções habitualmente retratam a experiência da dupla fenda sem mencionar a teoria de Louis de Broglie. Além disso, esses livros não oferecem atividades práticas que possam explorar e consolidar o conhecimento sobre o tema de maneira eficaz, nem exercícios que auxiliem os alunos a organizar e aprofundar o conhecimento adquirido para obter sucesso no futuro.

É possível afirmar que os livros didáticos têm um papel crucial no processo educativo, contudo, devem ser vistos como uma fonte adicional de pesquisa devido à possibilidade de conterem erros conceituais que podem interferir na construção do saber. Assim, é essencial que os professores utilizem os livros didáticos em conjunto com outras fontes de informação para facilitar a compreensão dos alunos sobre o conteúdo estudado.

Neste contexto, é fundamental que os professores analisem frequentemente os livros didáticos e os atualizem de forma constante. Como mediadores do conhecimento, eles são capazes de identificar as lacunas dos materiais e escolher os melhores títulos disponibilizados pelo PNLD.

Por fim, aspiramos que esta pesquisa incite a reflexão e inspire novos estudos que enriqueçam o processo de ensino da química, bem como apoiem os professores na seleção de materiais didáticos que promovam o desenvolvimento e o aprendizado da ciência.

REFERENCIAS

Alexandre Janson. Fondateur du lycée Janson de Sailly. Disponível em: <<https://www.retrophoto.fr/france/paris-16/90008/lycee-janson-de-sailly-106-rue-de-la-pompe-6950968>>. Acesso em: 28, 05 de 2023.

ALVES, E. G. *Um estudo multimodal de textos didáticos sobre o efeito fotoelétrico*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

ANDRADE, R. S; VIANA, K. S. L. Atividades experimentais no ensino da química: distanciamentos e aproximações da avaliação de quarta geração. **Ciência e Educação** v. 23, n. 2, p. 507-522, 2017.

Adrien Vila-Valls. Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925- 1960). Autre [cond-mat. other]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. Français.

BACCIAGALUPI, G.; VALENTINI, A. (2006). *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press.

BARBOSA, E.J.T; MENDES, A.A. A Contextualização no ensino de equações- Uma análise em um livro didático antes e depois do PNLD. REVEMAT, Florianópolis, v.11,n 2, p.364-386, 2016.

BANDEIRA, A.; STANGE, C.E.B. Uma proposta de critérios para análise de livros didáticos de ciências naturais na educação básica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA,3.,2012, Ponta Grossa. **Anais...**Ponta Grossa: UTFPR, 2012. p. 10.

BARDINI, L.C. **Geometria no 50 ano: Uma Análise dos Livros Didáticos**. 2015.146 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo Lisboa: Edições 70, 1977.

BEZERRA, F. G; MARTINS, L. M. C. T. O Uso Do Livro Didático de Ciências Por Alunos do Ensino Fundamental de Formosa-Go. Revista Lugares de Educação [RLE], Bananeiras - PB, v. 5, n. 11, p. 133-146, ago. Dez. 2015.

Futura-sciences. Disponível em: <<https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-louis-broglie-258/>>. Acesso em: 28, 05 de 2023.

BRASIL. Decreto–Lei nº 1.006, de 30 de dezembro de 1938. Estabelece as condições de produção, importação e utilização do livro didático. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, Seção 1, 05 jan. 1939, p.277. Disponível em <<https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:decreto.lei:1938-12-30;1006>> Acesso em: 24 fev. 2023.

BURATINI, D. Z. **Os recursos visuais na compreensão de leitura em língua estrangeira: reflexões sobre exames de vestibular**. 2004. Dissertação (Mestrado em Linguística Aplicada) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

CASSIANO, C. C. F. O mercado do livro didático no Brasil: da criação do programa nacional do livro didático (PNLD) à entrada do capital internacional espanhol (1985-2007). 2007. 252f. Tese (Doutorado em Educação: História, Política e Sociedade) – Pontifícia Católica de São Paulo, São Paulo, 2007.

CHOPPIN, Alain. História dos livros didáticos e das edições didáticas: sobre o estado da arte. Educação e Pesquisa. São Paulo, v.30, n.3, p. 549-566, set./dez. 2004.

DARRIGOL, Olivier. (2003). *Quantum theory and atomic structure, 1900-1927*, In: *The Cambridge History of Science*, vol. 5, *The modern physical e mathematical sciences*, Edited by Mary Jo Nye, Cambridge University Press, p.331-349.

DE BROGLIE, L. (1927B). The new dynamics of quanta. In: BACCIAGALUPI, G.; VALENTINI, A. *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press, 2006, p.374-407.

DE BROGLIE, L. (1929). The wave nature of the electron. *Nobel Lectures*. Disponível em: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-lecture.pdf. Acesso em 19/05/2023>. Acesso em: 30/05/2023.

DE BROGLIE, L. (1960). *Non-Linear Wave Mechanics, A Causal Interpretation*, traduzido por Arthur J. Knodel e Jack C. Miller, do original *Une Tentative D'interprétation Causale et non Linéaire de la Mécanique Ondulatoire (La théorie de la double solution)*, 1956.

DE BROGLIE, L. (2004). *On the Theory of Quanta. Tradução de Recherches sur la Theorie des Quanta*, 1925. Ann. de Phys., 10a série, t.III, por A. F. Kracklauer. Disponível no site da Fundação Louis de Broglie (http://www.ensmp.fr/aflb/LDB-oeuvres/De_Broglie_Kracklauer.pdf)

EARP, Fábio Sá, KORNIS, George. 2005. A economia da cadeia produtiva do livro. Rio de Janeiro. BNDES.

FRACALANZA, Hilário; MEGID NETO, Jorge (orgs.). **O livro didático de ciências no Brasil**. 1.ed. Campinas: Komedi,p 199-215, 2006.

FERNANDEZ, Carmem. Revisitando a base de conhecimentos e o conhecimento pedagógico do conteúdo (PCK) de professores de Ciências. *Revista Ensaio*, Belo Horizonte, v. 17, n. 2, p. 500-528, maio/ago. 2015.

FERREIRA, S.; SILVA, F. D. e SALES, L. L. M. Análise dos livros didáticos de química no PNLD 2015 sobre a teoria atômica. *Revista de Pesquisa Interdisciplinar*. n. 2, suplementar, p. 216-255, 2017. Disponível em: <https://cfp.revistas.ufcg.edu.br>, acesso em fevereiro 2023.

FREITAS, Neli K.; RODRIGUES, Melissa H. O livro didático ao longo do tempo: a forma do conteúdo. **DA Pesquisa**, Florianópolis, v. 3 n. 5, p.300-307, 2008.

GALIAZZI, M. C. et al. Objetivos das Atividades Experimentais no Ensino Médio: A pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, 2001.

GENEANET. Pauline de BROGLIE. Disponível em <https://gw.geneanet.org/pierfit?lang=en&n=de+broglie&oc=0&p=pauline>. Acesso em: 28/05/2023.

GIORDAN, M. O Papel da Experimentação no Ensino de Ciências. **Química Nova na Escola**, 1999.

GOUVÊA G e MARTINS Imagens e educação em ciências in ALVES N e SGARBI P (eds.) Imagens e espaços na escola. Rio de Janeiro: D P & A, pp. 41-58, 2001.

GUIMARÃES, **Experimentação no Ensino de Química**: Caminhos e Descaminhos Rumo à Aprendizagem Significativa. Vol. 31, N° 3, p.148, 2009.

[Histórico - Portal do FNDE](http://www.fnde.gov.br/component/k2/item/518-hist%C3%B3rico). Disponível em <http://www.fnde.gov.br/component/k2/item/518-hist%C3%B3rico>. Acesso em: 24 fev.2023.

LIMA, M. S. e QUEIROZ, S. L. Modelo semiótico de leitura de inscrições: aplicação na educação em química. *Química Nova*, v. 43, n. 7, p. 987-997, 2020. LIMA, M. S. e QUEIROZ, S. L. Letramento gráfico no ensino superior de química. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 26, n. 2, p. 170-195, 2021.

MACHADO, A. H. Aula de química: discurso e conhecimento. 2.ed. Ijuí: Ed. Unijuí, 2004.

MACHADO, P. F. L.; MÓL, G. S. Experimentando Química com Segurança. **Química Nova na Escola**, N° 27, p. 57-60, 2008

MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no Ensino: há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007.

MARTINS I Visual imagery in science education Visual Imagery in School Science Textbooks. In GRAESSER A, OTERO J e DE LEON, J A (eds.) The Psychology of Scientific Text Comprehension. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Ass. Publ., pp. 73-90, 2002.

MARTINS, I.; GOUVÊA, G.; PICCININI, C. Aprendendo com Imagens. **Ciência e Cultura**, v. 57, n. 4, 2005.

Martins, R. A. Em Estudos de história e filosofia das ciências – subsídios para aplicação no ensino; Silva, C. C., org.; Ed. Livraria da Física: São Paulo, 2006, Introdução.

MOREIRA, M. A.; ROSA, P. R. S. **Pesquisa em ensino: Métodos Qualitativos e Quantitativos**, 1 a.ed. Porto Alegre, Ed do Autor, p. 83, 2009.

MORI, R. C. e CURVELO, A. A. S. O que sabemos sobre os primeiros livros didáticos brasileiros para o ensino de química. *Química Nova*, v. 37, p. 919-926, 2014.

MASON, R. et al. Reading scientific images the iconography of Evolution. **Cape Town: HSRC Press**, 2006.

NEY, Mary Jo. Aristocratic culture and the pursuit of science: the De Broglies in modern France. *Isis* 88: 397-421, 1997.

OFICINA NET. A fotografia mais inteligente de todos os tempos. Disponível em: <https://www.oficinadanet.com.br/post/19178-a-fotografia-mais-inteligente-do-mundo>.

Acesso em: 22 outubro 2023.

OLIVEIRA, J. R. S. A perspectiva sócio-histórica de Vygotsky e suas relações com a prática da experimentação no ensino de Química. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 25-45, 2010.

OLIVEIRA, Contribuições e abordagens das atividades experimentais no ensino de ciências: reunindo elementos para a prática docente. **Acta Scientiae** v. 12 n.1 p.139-153 jan./jun. 2010.

OSTESBELGUE, R.; SCHRÖDER, A. H.; DIAS, A. M.; ALBRECHT, L. D.; DUBOW, M.; FERREIRA, M. Programa Nacional do Livro Didático e a Análise de Livros Didáticos de Química. In: 33º EDEQ, UNIJUÍ, 2013.

PHILATÉLIE POUR TOU. Maurice De Broglie, physicien. Disponível em: <https://philatelie-pour-tous.fr/maurice-de-broglie-physicien/>. Acesso em: 22, 10 de 2023.

ROSA, P. **A história da teoria quântica: a dualidade onda partícula de Einstein a de Broglie**. São Paulo: Livraria da física, 2014.

RIBEIRO, M. L. História da Educação Brasileira: organização escolar. Campinas, SP: Autores Associados, 2003.

PONTUSCHKA, Nídia Nacib; PAGANELLI, Tomoko Iyda; CACETE, Núria Hanglei. Para ensinar e aprender Geografia. São Paulo: Cortez, 2007.

Porto, P. A. Em Ensino de Química em Foco; Santos, W. L. P.; Maldaner, O. A., orgs.; Editora Unijuí: Ijuí, 2010, p. 159-180.

SANTOS, W. e SCHNETZLER, R.P. **O que significa ensino de Química para formar o cidadão? Química Nova na Escola**, n. 4, p. 29, 1996.

SILVA, **A importância da experimentação no ensino de química e ciências. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista – UNESP**. Bauru 2016.

SILVA, José Luis de Paula Barros; CUNHA, Maria Bernadete M. Para compreender o modelo atômico quântico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 14., 2008, Curitiba. Anais.... Curitiba: UFPR/SBQ, 2008. p. 1 - 12. CD-ROM.

SILVA, A. M. DA. Proposta para tornar o ensino de Química mais atraente. **Ver. Quim. Ind**, v. 711, n. 7, 2011.

SILVA, H. C. et al. Cautela ao usar imagens em aulas de ciências. **Ciência e Educação** Bauru, v. 12, n. 2. 2006.

SPÓSITO, Maria Encarnação Beltrão. A avaliação de livros didáticos no Brasil – Por quê? In: SPÓSITO, Maria Encarnação Beltrão (Org.). Livros didáticos de Geografia e História: avaliação e pesquisa. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2006.

SCHNETZLER, R. P. A pesquisa em ensino de química no Brasil: conquistas e perspectivas. **Química nova**, v. 25, n. supl. 1, 2002.

SZYCHTA, A. L. **Ligações químicas em livros didáticos de Química do PNLD-2015: análise de conteúdo sobre um olhar das concepções alternativas**. 2015. 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Bacharelado e Licenciatura em Química Tecnológica do Departamento Acadêmico de Química e Biologia) Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba. 2015.

VASCONCELOS, M. B. F; A Contextualização e o Ensino da Matemática: Um Estudo de Caso.2007. 249 f. Dissertação (Mestrado em Educação Popular, Comunicação e Cultura) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa. 2007.

VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em Administração**. São Paulo: Atlas, 2005.

WIKIMEDIA COMMNS. 2023. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le_boulevard_des_Italiens_et_le_caf%C3%A9_Riche.jpg> Acesso em: 28, 05 de 2023.

WILLE, N.N.; BRAGA, P.R. e ROBAINA, J.V.L. Avaliação de livro didático de química na disciplina de estágio supervisionado II. VIDYA. v. 29, n. 1, p. 59-72, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/VIDYA/article/view/318>, acesso em mai. 2021.

APÊNDICE

E-BOOK

A vida e obra de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, através de uma proposta experimental sobre a sua Teoria da dualidade onda-partícula



Material associado ao programa de mestrado profissional em química em rede nacional (PROFQUI) e à dissertação de mestrado de Luciano da Nóbrega Azevedo.

RECIFE

2024

A importância do conteúdo histórico dos fatos científicos para o aprendizado na disciplina de Química

Apresentar aos alunos o contexto histórico do conteúdo em estudo é essencial, pois serve como uma ferramenta valiosa para enriquecer o ensino das ciências. Isso proporciona aos estudantes uma perspectiva mais abrangente e contextual do progresso científico ao longo da história. Entender como as teorias e descobertas foram desenvolvidas, bem como os desafios que os cientistas enfrentaram, pode despertar o interesse dos alunos e criar uma conexão mais profunda com o material, tornando o aprendizado mais significativo e pertinente às suas vidas.

Para (LUFFIEGO et al., 1994; HODSON, 1985) a inclusão da História da Ciência na educação se justifica por fundamentos filosóficos e epistemológicos, e a concepção de ciência escolhida influencia diretamente na seleção e no tratamento dos conteúdos. Acredita-se que adicionar mais conteúdo de História, Filosofia e Sociologia da Ciência aos currículos pode ajudar na humanização do ensino das ciências, promovendo a transição de visões simplistas para entendimentos mais relativistas e contextualizados desse tipo de saber. Com isso, a História da Ciência é vista como um conhecimento essencial para a humanização da ciência e o enriquecimento cultural, servindo como uma ponte que liga a ciência à sociedade.

Para Porto (2010) e Martins (2006), as abordagens ao conteúdo histórico dos fatos científicos encontrados nos livros didáticos nem sempre são consistentes com as recomendações atuais para o ensino de ciências, porque há uma série de desinformação não intencional sobre essas informações, resultando em erro, que possibilita a uma construção simplista e inadequada da própria ciência.

Segundo Reis et al. (2012), a inclusão da História da Ciência na educação contribui para o aumento do interesse e da vontade dos estudantes de aprender e debater sobre ciência. Conforme Martins (2004), analisar os eventos históricos da ciência ajuda os alunos a compreenderem a interação entre ciência, tecnologia e sociedade, e a perceber que a ciência não está isolada de outros campos do saber, mas é parte de um processo histórico e cultural que tem exercido influência em muitos aspectos da sociedade contemporânea. Além disso, ao conhecerem a trajetória e os erros dos cientistas do passado, os alunos podem desenvolver um pensamento crítico mais aguçado, questionando as informações apresentadas e compreendendo melhor o método científico.

Nota-se que há uma curiosidade dos alunos em entender como certas descobertas científicas aconteceram, pois debater a ciência em sala de aula tem um impacto direto no processo de aprendizado dos estudantes, conferindo-lhe significado.

É preciso também abandonar a noção de que a ciência é algo fácil, simples e que se alinha ao senso comum. Afinal, adentrar a cultura científica e suas descobertas significa assimilar uma maneira distinta de pensar, comunicar e explicar o mundo do dia a dia (Mortimer e Scott, 2002).

Nesse contexto, Chaves et al. (2014) defendem que a contextualização histórica é fundamental para a compreensão dos conceitos científicos. Ela permite entender a origem dos problemas, as hipóteses levantadas, as práticas experimentais e a superação de paradigmas antigos em favor de novos. Esclarecem ainda que a ciência não consiste meramente em um acúmulo de ideias, mas sim em uma (des)construção das mesmas, o que proporciona aos estudantes uma experiência mais enriquecedora com a ciência que está sendo estudada.

Neste contexto, é essencial que os professores desenvolvam uma prática de ensino mais crítica, visando reduzir cada vez mais o sistema de reprodução baseado no modelo de transmissão e recepção de conteúdos científicos. Devem também integrar a História e a Filosofia como estratégias didáticas nas aulas de Química. Pois, o uso apropriado dessas disciplinas pode demonstrar como a ciência é desenvolvida pelo ser humano e, se bem utilizada, pode enriquecer significativamente o processo de aprendizagem.

Assim, é possível afirmar que a abordagem aos fatos históricos da Química auxilia na compreensão de conceitos científicos e na natureza da ciência, tornando as aulas de Química mais atrativas e estimulantes.

Este estudo objetivou investigar e expor de forma clara e objetiva um experimento, bem como a vida e obra de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, que contribuiu significativamente para a ciência da dualidade onda-partícula, com o intuito de auxiliar professores de química, particularmente nas disciplinas introdutórias do ensino básico.

Vida e obra de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Família Broglie

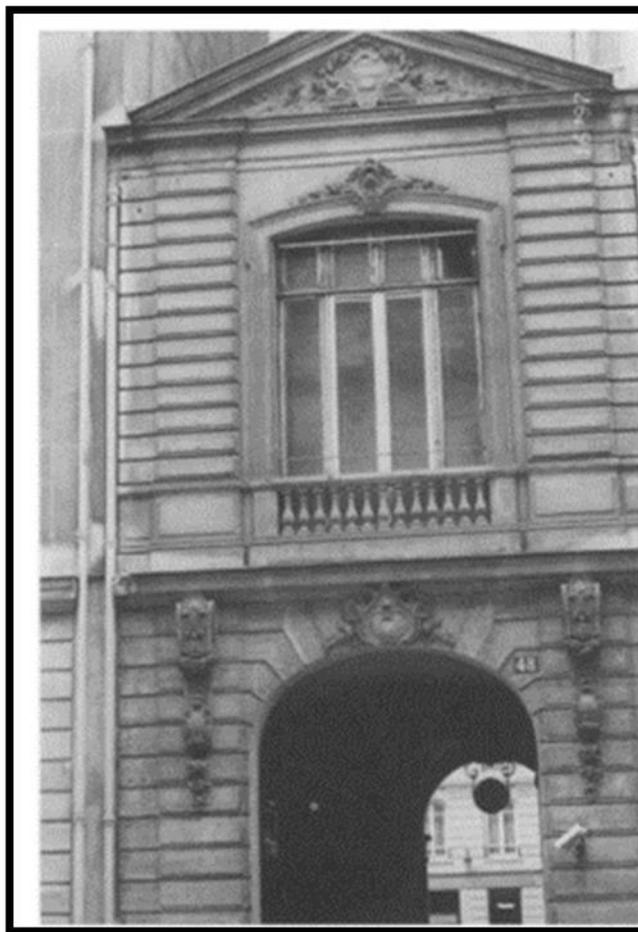
A família Broglie é uma família nobre francesa que remonta ao século XII. O nome da família deriva do castelo de Broglie, localizado na Normandia, norte da França. Acredita-se que a família tenha se estabelecido na região por volta do século XI. Como era de costumes, as rotinas familiares incluíam visitas dos pais à Inglaterra durante a época de caça e a estadia da família numa villa em Dieppe, no Château Saint-Amadour em Anjou, a maior e mais antiga propriedade da aldeia chamada Broglie (pronuncia-se brog-lee) a cerca de 150 quilómetros de distância de Paris. A história do castelo normando remonta ao primeiro duque de Broglie. No início de 1900, a sua biblioteca de mais de 40.000 volumes era considerada a segunda maior biblioteca privada da França e continha todos os livros de Madame de Staël (Ney, 1997, p. 403).

Devido ao hábito de viajar entre os nobres, era costume contratar um tutor para que a educação dos filhos não fosse interrompida quando a família se mudasse de um local para outro. Do final do século XVIII a meados do século XX, a presença de funcionários britânicos era comum nas famílias francesas de classe alta, especialmente nas de Paris, e a família de Broglie empregava babás britânicas, bem como governantas do clero (Ney, 1997, p. 403).

Para a família de Broglie, como para outras famílias antigas, o castelo e a casa da família continuam a ser o local de arquivos e propriedades extremamente importantes: mapas, escrituras de venda, testamentos, textos autobiográficos, cartas, livros, brasões, pinturas e retratos. Móveis, talheres, tudo em uso, são objetos que conectam literalmente o presente e o passado. Vender a propriedade da família seria uma traição não só à tradição familiar, mas também à própria França. Como disse um aristocrata nascido em 1925: “Quando uma propriedade é vendida, uma página da história se perde e a biblioteca é queimada”. Em 1902, a família de Broglie vendeu o Grande Hotel de Paris e mudou-se para um hotel menor (Ney, 1997, p. 403).

Ao longo dos séculos, os membros da família Broglie têm desempenhado papéis importantes na política, na aristocracia e nas forças armadas. Vários membros da família ocuparam cargos de destaque no governo francês, servindo como diplomatas, ministros e conselheiros reais.

Figura 1: Entrada na rue La Bote, 48, no oitavo arrondissement de Paris, local do hotel da família adquirido pelo pai em 1822 e vendido pelos de Broglies em 1902.



Fonte: (Ney, 1997, p. 402) (Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: Nye, Mary Jo (studylib.net))

Nascimento de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Louis Victor Pierre Raymond de Broglie nasceu no dia 15 de agosto de 1892, fruto do casal Louis Alphonse Victor de Broglie e de Pauline de La Forest d'Armaillé, na cidade francesa Dieppe, na rua Le Boulevard Aguado número 62. Dieppe é uma cidade marítima, que faz parte da região da Normandia. Na figura 2 temos a fotografia de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, e na figura 3 temos a foto da rua Le Boulevard (Abragam, 1987, p.26).

Louis de Broglie (1892-1987) teve 4 irmãos. Sua irmã mais velha se chamava Albertine (1872-1946). Louis não teve muito contato com essa irmã, pois a mesma ao se casar com o marquês Pirre de Luppe saiu da casa dos seus pais antes mesmo do nascimento de Louis. Seu irmão mais velho se chamava Maurice (1875-1960), que ficou

responsável pela sua educação, assim como, recebeu o título de sexto duque após a morte de seu pai em 1906. O outro irmão se chamava Philippe (1881-1890), mas Louis não chegou a conhecer, pois o mesmo faleceu ainda criança. Sua outra irmã chamava-se Pauline (1888-1972), foi a que mais conviveu com Louis de Broglie (Ney, 1997, pp. 400-401). Ele viveu em um período de grandes transformações sociais e científicas. Seu ambiente familiar e social certamente tiveram um impacto significativo em sua formação e nas escolhas que fez ao longo de sua vida. Nas figuras 4 e 5, observa-se Maurice e Pauline de Broglie.

FIGURA 2: Louis Victor Pierre Raymond de Broglie.



Fonte: futura-sciences (2023, <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-louis-broglie-258/>)

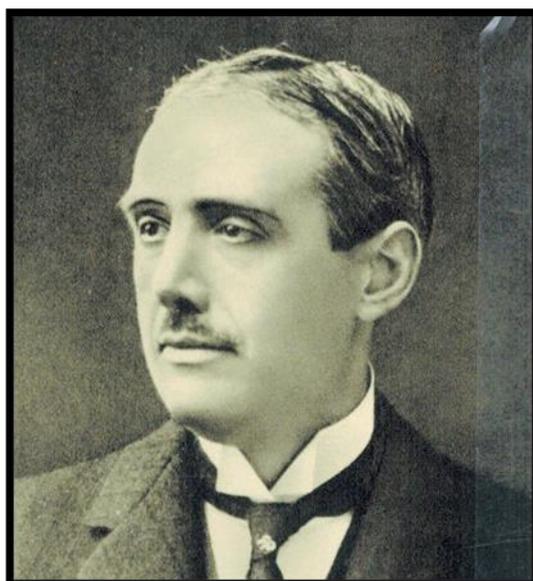
Figura 3: Rua Le Boulevard em Dieppe na França.



Fonte: Commons (1890,

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le boulevard des Italiens et le caf%C3%A9 Riche.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le_boulevard_des_Italiens_et_le_caf%C3%A9_Riche.jpg))

Figura 4: Maurice de Broglie (irmão de Louis de Broglie).



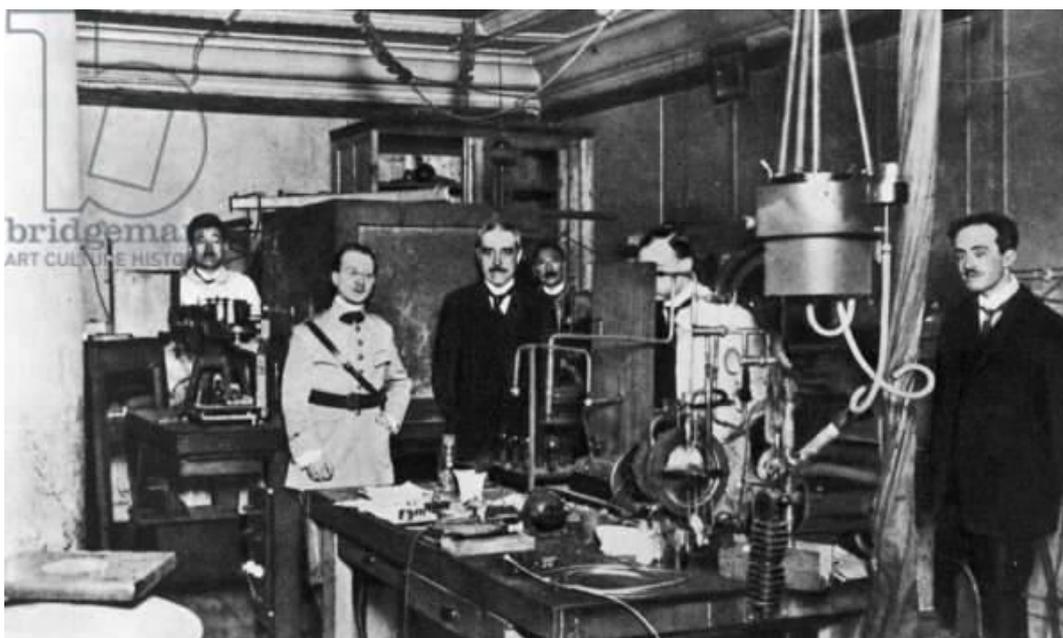
Fonte: philatelie-pour-tous.fr (1970, <https://philatelie-pour-tous.fr/maurice-de-broglie-physicien/>)

Figura 5: Louis de Broglie e sua irmã Pauline de Broglie.



Fonte: Noblesse & Royautés

Figura 6: LUÍS VICTOR de BROGLIE (1892-1987). Físico francês. Broglie (na extrema direita) em seu laboratório na rue Lord Byron, Paris, 1924.



Fonte: [https://www.bridgemanimages.com/en-](https://www.bridgemanimages.com/en-US/search?filter_group=&filter_text=Louis%20de%20Broglie&filter_region=BRA&sort=most_popular)

[US/search?filter_group=&filter_text=Louis%20de%20Broglie&filter_region=BRA&sort=most_popular](https://www.bridgemanimages.com/en-US/search?filter_group=&filter_text=Louis%20de%20Broglie&filter_region=BRA&sort=most_popular)

Figura 7: Pauline de Broglie (irmã de Louis de Broglie).



Fonte: (Ney, 1997, p. 407) (Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: Nye, Mary Jo (studylib.net))

Louis Victor Pierre Raymond de Broglie era uma criança amável, inteligente e com uma memória invejável, isso tudo foi descrito pela sua irmã Paulina, A Condessa de Pange, sendo quatro anos mais velha que ele. Ela escreveu em sua memória:

“... o irmão mais novo tornou-se uma criança encantadora, esbelta, com um rostinho risonho, olhos brilhantes de malícia. Sentado na grande mesa, vestia à noite um traje de veludo, com calções, meias pretas e sapatos com fivelas, que ele parece um pequeno príncipe de um conto de fadas. Sua alegria encheu a casa. Ele conversava o tempo todo, mesmo à mesa de jantar, onde as mais severas injunções de silêncio não podiam fazê-lo segurar a língua, tão irresistível era suas observações. Criado em relativa solidão, lia muito e vivera num mundo real. Ele tinha uma memória prodigiosa e sabia de cor cenas inteiras do teatro clássico que ele recitava com verve inesgotável. Ele parecia ter um gosto particular pela história, em particular pela história política. Ouvindo nossos pais discutirem política, ele improvisava discursos inspirados nos relatos dos jornais e podia recitar listas infalivelmente completas dos Ministros da Terceira República, que mudaram tantas vezes. Um grande futuro como um estadista foi previsto para Louis” (Abragam, 1987, p.26).

Pauline optou por não seguir o exemplo de sua irmã mais velha, Albertine, que se casou e levou uma vida privada conforme o esperado. Em 1902, aos quatorze anos, Pauline desenvolveu interesse por geologia e arqueologia. Anos mais tarde, vivendo com

a família de sua irmã em Beaurepaire, ela escreveu um conto sobre escavações neolíticas e o enviou para a revista *L'Homme Préhistorique* (Ney, 1997, p. 404).

Em resumo, os três irmãos de Louis de Broglie escolheram caminhos diferentes. Albertine, a mais velha, assumiu um papel tradicional e privado no casamento e na família. Desapareceu dos registros públicos. A irmã mais nova, Pauline, desistiu de seu amor original pela arqueologia para construir uma vida pública importante e bem-sucedida como romancista e estudiosa literária. Maurício, o segundo e mais velho filho, cumpriu as obrigações familiares para com ele, nunca deixando que a sua paixão científica comprometesse os seus deveres de príncipe e duque. Sua vida científica não é um “trabalho”. Ele vive principalmente dentro dos limites de sua residência privada. Tal como as casas de campo de Lords Charvere, Raleigh e Salisbury, os laboratórios De Broglie estavam equipados com o mais recente equipamento científico (Ney, 1997, p. 418).

É razoável afirmar que os três filhos mais novos do Quinto Duque de Broglie adotaram o papel tradicional reservado aos filhos da aristocracia, porém com adaptações do século XX e avanços científicos. Pauline, com seu profundo interesse em pesquisa e dedicação ao campo das intelectuais, seguiu a tradição de escrever sobre ciências sociais, história e literatura. Maurice, equilibrando as obrigações familiares e sua carreira científica, agiu conforme esperado de um oficial da Marinha, gerenciando tanto os negócios familiares quanto seu laboratório, expandindo o conhecimento técnico e educando jovens. Em seus trabalhos filosóficos, Louis mesclou o chamado da Igreja para uma vida de pesquisa e reflexão com os interesses científicos. Embora a classe social e a cultura aristocrática tenham distanciado os De Broglie da esfera pública científica na França, a colaboração dentro de suas famílias imediatas permitiu-lhes atingir notáveis patamares intelectuais na comunidade científica (Ney, 1997, p. 421).

O Irmão mais velho – Maurice de Broglie

Maurice concluiu os estudos no *College Stanislas*, uma escola secundária católica de elite, onde teve uma boa educação em matemática e ciências. Como era de costumes para os De Broglie, ele matricula-se na *École Navale* entrando para Marinha como oficial em 1897. Indicado para um navio no Mar Mediterrâneo, aproveitou e cursou física, química e astronomia na Faculdade de Ciências de Marselha, nesta época os raios X

estavam em evidências, assim como, os raios de urânio e a partícula negativa da matéria o elétron. Ele levou 4 anos para ter sua graduação em ciências físicas que ocorreu no ano de 1901 (Ney, 1997, p. 404).

Fascinado com a sua graduação em ciências físicas, comunica a família que deixaria o serviço militar. Seu avô, que tinha sido embaixador em Londres e ministro do gabinete no início da Terceira República não gostou da sua decisão, pois esperava que ele se tornasse o sexto duque dos De Broglie. A baixo o relato de seu avô.

[...] "Você está sempre pensando sobre estudos científicos e encerrar a carreira militar. A ciência é uma velha que se pode cortejar mais tarde e que não teme as homenagens dos velhos não fazem a felicidade" (Ney, 1997, p. 404).

Em 1904, Maurice solicita licença a marinha e chega a um entendimento com sua família após a morte de seu avô em 1901. Ele concordou com o casamento arranjado por sua família com a filha de uma família abastada da época, Camille de Rochetaillé, em troca da liberdade para continuar sua carreira científica e do benefício da fortuna de seus sogros para estabelecer um laboratório particular em um hotel adquirido por sua sogra, na 27 rue Chateaubriand, no 8º distrito. Em 1908, Maurice preparava uma tese de física no Collège de France com Paul Langevin sobre centros eletrificados de baixa mobilidade em gases.

Em 1906, Maurice uniu-se a Paul Langevin e instalou equipamentos em seu laboratório para estudar o movimento browniano das partículas de vapor ionizadas. Ele conseguiu medir a corrente elétrica usando um ultramicroscópio acoplado a uma chama elétrica. Esse é o projeto no qual Robert Millikan trabalhava na Universidade de Chicago. Em 1908, Pauline, Albertine, Camille e Louis reuniram-se para acompanhar a defesa da tese de Maurice diante do corpo docente da Sorbonne. Nesse mesmo ano, Maurice da baixa na marinha a passa a dedica-se aos seus estudos. Nessa mesma residência, ele sempre recebia a visita de seus dois irmãos mais novos, Pauline e Louis que sempre adoravam ir ao seu laboratório (Ney, 1997, p. 405).

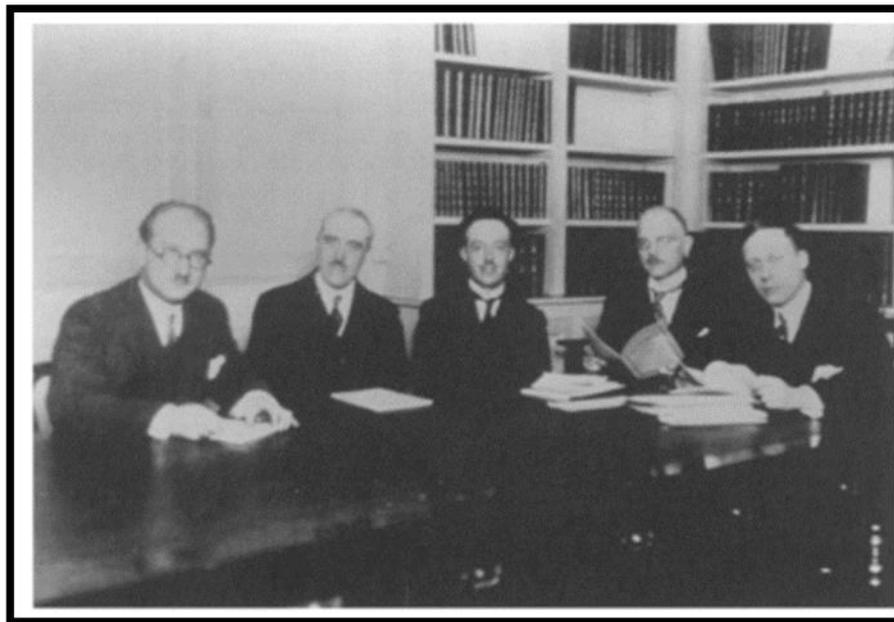
Em 1921, Maurice de Broglie foi agraciado com um doutorado honorário pela Universidade de Oxford, onde seu amigo Lindemann era o diretor do Laboratório Clarendon. Maurice candidatou-se à Academia de Ciências no final dos anos 1920 e foi eleito em 1924. O historiador Maurice Crosland afirmou: "Sua carreira excedeu a dos profissionais comuns." O departamento "Académiciens libres" foi criado em 1816 para a

nobreza. Henri Deslandres, apoiando a candidatura de de Broglie à academia em 1920, mencionou que o trabalho de Maurice de Broglie era o único estudo sobre raios X apresentado na França e poderia ser considerado o único trabalho que a França não tinha realizado. Isso está além do escopo deste estudo. De acordo com Deslandres, Maurice de Broglie alcançou isso em primeiro lugar como um "voluntário" científico em seu laboratório, independente de qualquer instituição educacional (Ney, 1997, p. 409).

O físico Paul Janet, entre outros, referiu-se a Maurice de Broglie como o líder de uma escola de pensamento. Os pesquisadores do laboratório de Broglie nas décadas de 1920 e início de 1930 incluíram Jean-Jacques Trillat (1899), diretor do laboratório CNRS em Bellevue, especialista em raios X e difração de elétrons; Jean Thibaud (1901-1960), fundador do Instituto de Física Atômica em Lyon, que investigou níveis extremos de radiação, do ultravioleta aos raios X; René Lucas (1898–1990), diretor da École de Physique et de Chimie de Paris de 1947 a 1969 e professor de física geral na Universidade de Paris de 1956 a 1968; Louis Cartan, um espectroscopista que ensinava em Poitiers e foi morto pelos alemães durante o regime de Vichy; e Louis Leprince-Ringuet (1901), que se tornou professor na École Polytechnique em 1936 e professor de física nuclear no Collège de France em 1959, especializado no estudo de energias altas, incluindo raios cósmicos. Leprince-Ringuet fez sua primeira visita ao laboratório em 1929 para ver seu primo Trillat. Maurice de Broglie contratou Leprince-Ringuet como assistente de pesquisa, aproveitando sua experiência como engenheiro elétrico no PTT (Serviço Nacional de Correios e Telecomunicações) para o desenvolvimento de dispositivos de detecção e medição de partículas radioativa (Ney, 1997, p. 410).

Figura 8: Biblioteca e sala de trabalho de Maurice de Broglie em sua residência particular na rue Chateaubriand, em 1925. Da esquerda para a direita: Jean Thibaud,

Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Alexandre Dauvillier e Jean-Jacques Trillat.
(Cortesia de Archives de l'Académie des Sciences, Paris).



Fonte: (Ney, 1997, p. 410)

Uma significativa celebração de jubileu foi realizada na Sorbonne em honra a Maurice, que se retirou da atividade científica em 1946. Durante sua carreira, Maurice de Broglie desempenhou deveres sociais e civis associados ao seu papel, além de suas contribuições científicas. Entre suas responsabilidades, Broglie gerenciou a propriedade de Saint-Amadour e atuou como representante oficial da família. Por exemplo, em 1931, ele viajou para os Estados Unidos com Pauline para celebrar o 150º aniversário da vitória em Yorktown, onde um antepassado dos Broglie lutou ao lado de Lafayette.

Após a prisão de Paul Langevin, sua aposentadoria forçada em 1941 e subsequente vigilância domiciliar em Troyes pela Gestapo durante quatro anos devido a suas atividades antifascistas, Maurice teve uma breve passagem pelo corpo docente do Collège de France de 1942 a 1944, após convite de Frederic Joliot. A aula inaugural de De Broglie, realizada sob a observação de oficiais, homenageou as pesquisas de Langevin.

O gabinete científico de Maurice de Broglie funcionava como seu laboratório privado, e ele mantinha um horário de atendimento na Academia de Ciências. Seus estudantes e colaboradores de laboratório recordam-no como uma pessoa conscienciosa, respeitosa e sensível para com aqueles que o rodeavam. O físico britânico William Wilson louvou-o por orientar "muitos jovens talentosos". Leprince-Ringuet recorda que "era extremamente humano, nada arrogante, e fazia com que todos se sentissem confortáveis

ao falar com ele: alguém que emanava uma vigilância constante, a humildade genuína de um verdadeiro cientista e um julgamento equilibrado dos eventos e personagens". Ele era engraçado e por vezes cáustico. Maurice de Broglie faleceu aos 85 anos, e seu funeral teve a presença de representantes da Academia, do governo francês e da Igreja Católica, incluindo o Bispo de Evreux. O obituário do *Le Figaro* mencionou a presença de membros destacados da família, mas omitiu Luís, agora o sétimo duque de Broglie (Ney, 1997, p. 417-418).

A Construção Educacional de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Em 26 de agosto de 1906 Louis Alphonse Victor de Broglie, pai de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, aos 59 anos de idade veio a óbito, deixando os dois filhos mais novos na companhia de sua esposa e mãe.

Após a morte de Louis Alphonse, Maurice torna-se o sexto duque de Broglie, título que seu avô tanto desejava. Maurice, 31 anos, agora chefe da família de Broglie, buscou uma boa educação para Louis de Broglie, que tinha na época 14 anos de idade. Seu irmão então decidiu mandá-lo para o *College Stanislas*, mas para uma escola estadual, o *Lycee Janson de Saily*, acompanhado pelo seu mentor, Padre Chanut. Essa decisão foi tomada, depois que Maurice soube que seu ex-professor de física em Marselha, Leopold Brizard, lecionava no Liceu (Ney, 1997, p. 405). Lá, ele passa três anos estudando e se graduando aos 17 anos em Bacharelado de filosofia e de matemática (Abragam, 1987, p.27). Na figura 7 é apresentado uma fotografia da Universidade *Lycée Janson-de-Saily*. Esse relato ficou comprovado pelo depoimento de seu irmão Maurice de Broglie.

“... Tendo experimentado a mim mesmo o inconveniente de uma pressão exercida sobre os estudos de um jovem, abster-me de dar uma direção rígida aos estudos de meu irmão, embora às vezes suas vacilações me preocupassem. Ele foi bom em francês, história, física, filosofia, e não em matemática, química e geografia, pobre em desenho e línguas estrangeiras” (Abragam, 1987, p.27).

Figura 9: Escola *Lycée Janson de Silly*.



Fonte: Les Jansoniens (1829, Alexandre Janson. Fondateur du lycée Janson de Saily).

A concretização de sua vocação científica ainda levou um tempo para acontecer. Destinado pelas tradições familiares a seguir uma carreira em literatura, história ou política, ele se graduou em história política aos 19 anos e estava prestes a começar uma tese sobre a história medieval. Contudo, desencantou-se com a disciplina e temporariamente redirecionou-se para o direito. Paralelamente, desenvolveu conhecimento e uma paixão pelas obras de Henri Poincaré: 'Ciência e Hipótese' e 'O Valor da Ciência'. Esse foi o momento decisivo para sua futura dedicação à ciência, Abragam (1988).

Examinando criticamente os fundamentos do raciocínio matemático de Henri Poincaré, ele hesita e está longe de acreditar em si mesmo. Soma-se a isso o fato de ele ter sido reprovado no exame geral de física (que trata de todos os fenômenos periódicos). Nada parece promissor, ele se tornará um fracasso apesar de seu trabalho duro? Foi-se a alegria e o bom humor de sua juventude! A fala brilhante de sua infância foi sufocada pela profundidade de sua contemplação. Segundo o relato, esse episódio marcou a vida de Broglie, pois a criança feliz e amável descrita por sua irmã havia se tornado um jovem reservado.

Segundo a sua bibliografia, “Louis de Broglie não encontrou ali o que procurava”. Um curso de matemática fez com que, ele se encontrasse nas áreas das ciências exatas

que foi o seu lugar de grande sucesso (Rosa, 2015). Essa mudança que Louis de Broglie fez em relação a sua formação acadêmica foi relatada pela sua irmã Pauline.

Pauline recordou-se de ter encontrado Louis escondido numa pequena sala repleta de livros de matemática. Ela não tinha certeza se gostara do que vira: "Belíssimo e encantador príncipe, percebi que a minha infância havia desaparecido para sempre. Um mero estudioso que levava uma vida religiosa (Ney, 1997, p. 406)".

Não foi uma tarefa simples. Apesar de Louis ter realizado cursos de matemática para se preparar para o diploma em ciências, ele não obteve sucesso no exame de física geral que tratava de fenômenos periódicos (ondas sonoras e luminosas). Contudo, aplicou seu conhecimento recém-adquirido em Física Teórica para ser aprovado em todos os exames, conquistando seu diploma em 1913 (Ney, 1997, p. 406).

O Primeiro Conselho de Solvay de Física de 1911

Em 1911, após concluir o bacharelado e os estudos universitários em filosofia, matemática e ciências, Louis de Broglie recebeu uma nova inspiração. Pois nesse mesmo ano ocorreu o primeiro congresso de Solvay em Bruxelas no outono de 30 de outubro a 3 de novembro de 1911, Langevin propôs Maurice de Broglie como secretário e coeditor de artigos publicados e atas de discussões. Maurice mostrou para Louis páginas dessas atas dos trabalhos dos 24 físicos que participaram desse conselho. Louis leu minuciosamente as atas que reuniu as mentes mais brilhantes da época para debater a "Radiação e o Quanta" (Ney, 1997, p. 406). Os físicos que participaram dessa conferência foram: Walther Nernst, Robert Goldschmidt, Max Planck, Marcel Brillouin, Heinrich Rubens, Ernest Solvay, Arnold Sommerfeld, Hendrik Lorentz (presidente), Frederick Leindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Emil Warburg, Jean Baptiste Perrin, Friedrich Hasenohrl, George Hostelet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Wilhelm Wien, Ernest Rutherford, Marie Curi, Henri Poincaré, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein, Paul Langevin. Todos estão na figura 10 abaixo.

Figura 10: Os 24 Cientistas que participaram da 1ª Conferencia de Solvay.



Fonte: S1911.jpg (640×410) (physika.info)

Após a conferência, Louis de Broglie sob forte influência do seu irmão Maurice, que foi um dos secretários do Conselho de Solvay de 1911 (conselho que foi dedicado à questão dos quanta), passa a acompanhar de perto o trabalho desenvolvido pelo seu irmão e seus colaboradores. No laboratório, eles trabalhavam nos problemas fundamentais da física dos quanta. Isso chamou a atenção de Louis que passou a pesquisar e publicar alguns resultados na mesma área de pesquisa de seu irmão.

Os cursos de Paul Langevin eram vanguardistas em comparação com tudo o que era feito na França naquela época: neles, ensinavam-se teorias estatísticas das propriedades da matéria, além da relatividade e da física quântica. Contudo, o domínio das teorias estatísticas e da relatividade foi decisivo para os trabalhos iniciais de Luis de Broglie.

A contribuição de Louis de Broglie no laboratório de seu irmão foi primordialmente a interpretação teórica dos dados experimentais coletados por seu irmão e colaboradores. Segundo Lochak, Louis trabalhava isoladamente no laboratório do irmão, intervindo apenas quando consultado sobre aspectos teóricos. Jean-Jacques Trillat, membro do laboratório, relatou a Lochak que Louis cumprimentava todos ao chegar pela

manhã e depois se isolava em seu escritório para se dedicar ao trabalho teórico, o qual realizava sem a presença de ninguém, inclusive de seu irmão, e cujo conteúdo era desconhecido (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 49).

Este isolamento não é completo. Apesar de ter desenvolvido sozinho as ideias que levarão à sua tese, ele ainda participa do trabalho intelectual do laboratório, como demonstram os artigos publicados em colaboração com seu irmão ou Alexandre Dauvillier (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 49).

Os de Broglie e a Guerra

Em agosto de 1914, inicia-se a guerra. Com seu marido na frente, Pauline se voluntariou para angariar fundos e suprimentos em apoio a um serviço de ambulâncias. A mulher, que antes do casamento nunca havia saído de casa sozinha, adotou estratégias e realizou treze viagens de trem a frente da guerra durante os dezoito meses seguintes (Ney, 1997, p. 406).

Atuando como telegrafista na Marinha, Maurice voltou à estação de rádio em Bordeaux antes de ser transferido para o Ministério da Exploração em Paris, em 1915. Louis de Broglie juntou-se ao esforço de guerra como engenheiro e foi designado para o Serviço de Comunicações Sem Fio em Paris. Durante o conflito, ele viveu com sua mãe e avó. Ele trabalhava no subsolo refrigerado da Torre Eiffel (Ney, 1997, p. 406). Há cerca de cinco anos, que ele trabalhou com aparelhos que geram, emitem e recebem ondas eletromagnéticas, o que o familiarizou com os conceitos de trens de ondas, modulação, sintonia e batidas, que foram posteriormente utilizados, em sua Mecânica das Ondas (Rosa, 2015).

A avó deles, Celestine de Segur, faleceu logo após a guerra. Pauline e seu marido se mudaram para Estrasburgo em 1920, quando a Alsácia-Lorena foi reincorporada à França. Por seis anos, eles organizaram atividades de apoio à universidade francesa recém-restaurada em Estrasburgo. Uma conferência em sua villa fomentou a reconciliação franco-alemã, contando com palestrantes do calibre de Thomas Mann e Maurice Barres (Ney, 1997, p. 406).

Após a Primeira Guerra Mundial, Louis de Broglie pôde retornar à pesquisa que despertou seu interesse pela física. Em 1920, dedicou-se a experimentos de raios X no laboratório particular de seu irmão Maurice. Tamanho era seu interesse pelo assunto que

assistiu como ouvinte a alguns dos cursos ministrados no Collège de France por Paul Langevin, que já havia dado palestras a seus alunos sobre o postulado de Einstein sobre o quantum de luz. Além disso, participou do Emil Porel. Ele também estudou as obras de Bohr, Sommerfeld, Einstein e outros. "Com base nesses estudos, De Broglie estava convencido da necessidade de elaborar uma teoria capaz de descrever tanto as propriedades ondulatórias quanto as partículas da radiação (Rosa, 2014).

A contribuição de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie para o Desenvolvimento Conceitual da Teoria dos Quanta e a sua Tese de Doutorado

Após a primeira conferência, que ocorreu em 1911, Louis de Broglie sob forte influência do seu irmão Maurice, que foi um dos secretários do Conselho de Solvay (conselho que foi dedicado à questão dos quanta), passa a acompanhar de perto o trabalho desenvolvido pelo seu irmão e seus colaboradores. No laboratório, eles trabalhavam nos problemas fundamentais da física dos quanta. Isso chamou a atenção de Louis que passou a pesquisar e publicar alguns resultados na mesma área de pesquisa de seu irmão. Mais, Louis de Broglie faz suas primeiras publicações científicas em 1920, logo após de ser dispensado do exército francês.

A primeira publicação surgiu nos Relatórios da Academia de Ciências em 8 de março de 1920, abordando modificações nas fórmulas do átomo de Bohr, especialmente considerando a presença de múltiplos elétrons, e sua comparação com experimentos. Seguiram-se uma série de artigos, escritos individualmente ou em colaboração com Dauvillier, focados principalmente na interpretação teórica dos espectros de absorção de raios X, na estrutura eletrônica dos átomos e no espectro de emissão de elétrons atômicos durante a ionização. Este trabalho destacou-se, em particular, pela sua proximidade com os dados experimentais, pois as especulações são restritas, e de Broglie utiliza principalmente teorias, e não somente fórmulas já existentes, para comparar os valores calculados diretamente com os experimentos (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 51).

A contribuição de Louis de Broglie para o desenvolvimento conceitual da teoria dos quanta pode ser vista como uma síntese que combina aspectos de ondas e partículas, tanto para a luz quanto para partículas como o elétron. Este trabalho que começou em 1922, com artigos sobre a teoria quântica. Neste ano, ele publicou dois artigos sobre quanta de luz, quando se concentrou em analisá-los como partículas relativísticas,

tentando conectar fenômenos ondulatórios a tais modelos. Com base em sua familiaridade com a espectroscopia de raios X e após discussões com seu irmão Maurice de Broglie, ele se convenceu da natureza dual dos raios X, exibindo características semelhantes a ondas em certos experimentos, sofrendo interferência e difração, enquanto em outros experimentos partículas propriedades podem ser alcançadas extraindo elétrons de superfícies metálicas, mesmo em baixas intensidades.

Em 1923, de Broglie decidiu estender a dualidade onda-partícula à matéria, especialmente para os elétrons. Esta conjectura é baseada em duas observações importantes: a primeira está relacionada às condições de quantização dos orbitais do elétron no modelo atômico de Bohr-Sommerfeld. Louis de Broglie fez relatos da sua descoberta sobre as ondas de matéria em três notas. Em suas primeiras observações, ele estabeleceu a relação entre o movimento de partículas livres e sua propagação de ondas, e relacionou a estabilidade quântica com o movimento dos elétrons nos átomos. Uma segunda observação nos leva a teorias de interferência e difração que são consistentes com a existência de fótons. Em uma nota final, ou melhor, a terceira nota de Broglie usa a lei da radiação de corpo negro de Planck para mostrar a relação entre o princípio da mecânica analítica de Maupertuis e o princípio da propagação de ondas de Fermat. Uma das observações tornadas claras nas referências de Broglie é que a data da descoberta da mecânica ondulatória é 1923, o que pode ser visto nas três notas que ele relatou. Muitos afirmam que remonta a 1924, quando Luis de Broglie publicou uma versão mais extensa de sua dissertação de doutorado (Rosa, 2014). Em seu discurso na cerimônia de aceitação do Prêmio Nobel, de Broglie declarou:

[...] a determinação dos movimentos estáveis dos elétrons no átomo envolve números inteiros, e até agora os únicos fenômenos que envolvem números inteiros em física foram aqueles de interferência e de auto vibrações. Isso sugeriu a ideia para mim que elétrons não poderiam ser representados como simples corpúsculos, mas também deveria haver uma periodicidade relacionada com eles. Eu, então, cheguei à seguinte conclusão que guiaram meus estudos: para ambos, matéria e radiação, luz em particular, é necessário introduzir o conceito corpuscular e o conceito ondulatório ao mesmo tempo. Em outras palavras, a existência de corpúsculos acompanhados por ondas tem de ser considerada em todos os casos. (De Broglie, 1929, p.4)

Ele ampliou essa síntese e a apresentou com muito mais detalhes em sua tese de doutorado defendida em 25 novembro de 1924 em Sorbonne sob o título “Recherches sur la théorie des quanta” (De Broglie, 2004). Esta uma das teses mais importantes da história da física é resultado de pelo menos três anos de pesquisas teóricas, que foram precedidas

de testes experimentais com radiação, mais precisamente com os raios X. Antes da defesa De Broglie redigiu notas adicionais e com mais detalhes no *Comptes Rendus* e no *Journal de Physique et le Radium*.

De certa forma, De Broglie dar início as suas pesquisas observando e estudando trabalho de Einstein sobre o quantum na radiação (luz), e nas suas primeira notas correspondente ao o assunto (1921-1922), ele aborda a radiação do corpo negro como sendo considerada como um gás formado por átomos leves, o que mostra que se está radiação for processada pela mecânica estatística, a lei de distribuição de Wien pode ser obtida, mas se o conceito de moléculas leves for introduzido, é possível obter a distribuição de Planck (Rosa, 2015).

Segundo os relatos de Broglie a luz existe um aspecto de partícula e de onda, energia = h vezes a frequência, onde h é a constante de Planck, é natural supor que a matéria tenha um aspecto de partícula e de onda, este último desconhecido até agora. Esses dois aspectos devem ser combinados pela formulação geral da qual emerge a constante de Planck, e aquelas relações que se aplicam à luz devem ser incluídas como casos especiais (De Broglie, 1960, p. 3).

Na segunda obra, Louis Victor Pierre Raymond de Broglie tentou conciliar a hipótese quântica de luz com os fenômenos de interferência e difração, e pela primeira vez propôs a ideia de que era necessário associar algum tipo de periodicidade a esses quanta, sem, no entanto, afirmar explicitamente como os átomos leves estão relacionados com as ondas. A exploração da relação entre as ondas e as partículas de luz foi o guia de seu trabalho, e as ideias básicas de sua teoria surgiram no final do verão de 1923. Suas observações, que resultaram no conceito para as ondas de fase foram aprimoradas com a publicação de três artigos que se tornaram o artigo de referência na mecânica ondulatória. Nessas publicações, de Broglie afirma para o movimento, pelo qual qualquer porção da matéria, estando com sua massa em repouso, m_0 , estaria associado a um fenômeno periódico proporcionando uma frequência igual a $\nu_0 = m_0 c^2 / h$, comprovando que pode relacionar essa energia de repouso $m_0 c^2$ com a equação de Planck ($E = h\nu$). Essa observação, de Broglie associou a todas as partículas estudadas através da mecânica relativística. Com tudo isso, surge um problema sobre a frequência associada a um quantum quando o observador não está em repouso em relação ao próprio quantum. De Broglie conclui associando a uma onda toda energia envolvida. Isso, faz com que, de Broglie parta para o desenvolvimento de sua teoria. Em seguida, investigando a relação entre propriedades corpusculares e ondulatórias, fez uma analogia com dois princípios:

Maupertuis (a dinâmica dos pontos na matéria) e Fermat (o efeito mínimo da óptica geométrica). Então ele conseguiu combinar física de ondas e física de partículas (Rosa, 2014).

Luis de Broglie compreendendo a estrutura da relatividade, o aspecto dual de onda e a partícula do fóton, inerente à teoria do efeito fotoelétrico dada por Einstein, faz com que, ele venha ter a ideia da dupla onda-partícula natureza do elétron. Pois, como Louis de Broglie teve contato diário com o efeito fotoelétrico, através do laboratório de seu irmão, ficou impressionado para a busca da solução deste enigma. No qual, a toda descoberta poderia ser resumida na seguinte frase: “Porque o fóton, que, como todos sabem, é uma onda, também é uma partícula, por que o elétron (ou qualquer partícula material) não deveria ser também uma onda?” difícil superestimar a ousadia extraordinária e o alcance das consequências desta simples hipótese (Rosa, 2015).

Em 1924 de Broglie envia sua tese para a banca composta por quatro cientistas ilustres, sendo três professores da Sorbonne: Jean Baptiste Perrin que receberia o prêmio Nobel em 1926 pelo seu trabalho sobre a “estrutura descontínua da matéria e especialmente pela descoberta do equilíbrio da sedimentação”, Charles-Victor Mauguin mineralogista e Élie Joseph Cartan matemático, especialista em geometria riemanniana e teoria dos grupos contínuos. Porém, esses três grandes cientistas não tinham embasamento ideal para compreender a grande descoberta de Broglie. O quarto professor que participou da banca foi Paul Langevin professor da College de France, no qual, o único que tinha conhecimento sobre a teoria quântica e da relatividade. No entanto, mesmo Langevin, a quem de Broglie recebeu uma cópia de seu manuscrito para uma avaliação, encontrando-se com o filósofo Leon Brunschvicg enquanto carregava debaixo do braço o precioso manuscrito, disse-lhe: ‘Estou levando comigo a tese do irmão de Maurice de Broglie com quem Langevin foi grande amigo. Lendo a tese, Langevin percebe que outro cientista tinha que ler a grande descoberta de Broglie e Einstein seria o cientista a altura para julgar este trabalho, com isso, ele instruiu de Broglie a enviar para Berlim uma cópia da sua tese. Chegando em Berlin e após a leitura Einstein compreende a ideia da escrita e imediatamente escreve uma carta para Langevin relatando a importância do trabalho de Broglie. Com o parecer de Einstein a banca aprovou com notável maestria a tese de Louis de Broglie (Abragam, 1987).

Louis de Broglie inicia sua tese com uma breve visão geral do desenvolvimento da física. Os séculos XVI e XX, destacando o sucesso da mecânica newtoniana em descrever os mais diversos fenômenos naturais, seu formalismo foi refinado ao longo dos

séculos XVIII e XIX até ganhar espaço com base no princípio de ação mínima de Maupertuis e ação estática hamiltoniana. Ele segue citando a termodinâmica desenvolvida por Clausius, Boltzmann, Gibbs, Carnot, etc., rapidamente explicada em termos mecanicistas, para o surgimento da mecânica estatística (Abragam, 1987).

De Broglie chamou a atenção para o desenvolvimento da óptica, que atraiu a atenção de muitos pesquisadores a partir do século XVII. Para explicar o fenômeno óptico observado, esses pesquisadores foram capazes de formular duas teorias completamente diferentes. Por um lado, Huygens defendeu o modelo de onda de luz, enquanto Newton defendia o modelo de partícula. No início de 1800, no entanto, o trabalho de Young e Fresnel estabeleceu que a luz possuía propriedades dual (Abragam, 1987).

Louis então apresenta as principais contribuições para o desenvolvimento da teoria quântica, citando Einstein, Bohr, Sommerfeld, Compton, Maurice de Broglie, Zeeman, Stark e outros. Para de Broglie, esses trabalhos forneceram evidências claras de que a natureza exibe aspectos de onda e partícula, e havia a necessidade de desenvolver uma teoria que pudesse unificar esses dois lados opostos e revelar a natureza fundamental do quantum. Alguns desses trabalhos já foram concluídos por ele em anos anteriores, e o objetivo da tese de doutorado é apresentar e discutir esses resultados obtido com sucesso, e as possíveis deficiências de sua proposta.

Importante frisar que tese de Louis de Broglie foi escrita em sete capítulos, nos quais ele pretendeu apresentar as suas ideias sobre a natureza dual da matéria e da radiação luminosa, cujo principal objetivo foi encontrar uma síntese entre as propriedades das ondas e das partículas.

Dentre os presentes na defesa, R.J. Van de Graaff (1901-1967) foi um que estudou na Sorbonne. "Isso não aconteceu com muitos", ele comentou posteriormente. Em um ano, Paul Dirac solicitou a Louis de Broglie uma cópia de sua palestra. Van de Graaff também estudou com Arnold Sommerfeld em Munique e com Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan em Göttingen. Em março de 1926, Erwin Schrödinger escreveu para de Broglie, aplicando as ideias deste à sua nova teoria (Ney, 1997, p. 414).

Um fato bastante interessante sobre a tese de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie ocorreu quando Einstein, publica em 1925 sobre a teoria quântica dos gases ideais, Einstein argumentou que a variação associada à nova estatística de Bose-Einstein contém dois termos distintos que podem ser interpretados como contribuições de onda e partícula. Ele argumentou que a contribuição poderia ser interpretada como uma onda de matéria pelo termo onda, citando o artigo de Broglie. Através do artigo de Einstein, o

artigo de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie tornou-se conhecido fora da França e influenciou o desenvolvimento da mecânica ondulatória de Schrödinger (Bacciagalupi; Valentini, 2006, p.57; Darrigol, 2003, p.346).

O Prêmio Nobel de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Três anos mais tarde, em 1925, Louis de Broglie e Maurice de Broglie foram indicados para o Prêmio Nobel de Física pelo físico de Leningrado Orest Khvol'son (nascido em 1852) por suas pesquisas sobre raios X. Em 1926, o filho de Khvol voltou a mencionar os irmãos. Em 1928, ele atribuiu sua pesquisa a Louis. No mesmo ano, Maurice foi nomeado por Hjalmar Tallqvist e Jarl A. Wasastjerna de Helsinque por suas contribuições para a emissão e detecção de raios X, assim como pela radiação beta secundária. Em 1929, Louis de Broglie foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física, tendo recebido doze indicações distintas, enquanto Maurice não recebeu nenhuma (Ney, 1997, p. 414).

Na correspondência sobre a concessão do Prêmio Nobel a Louis de Broglie em 1929, Jean Perrin incluiu um pôster com fotografias eletrônicas feitas por Maurice Ponte em Paris, destacando que o trabalho de Louis de Broglie havia sido comprovado cientificamente. Louis de Broglie, esperando validação no laboratório de seu irmão, solicitou a Dauvillier que realizasse um experimento. Após o insucesso, Dauvillier abandonou o projeto. Se os resultados tivessem emergido do laboratório de Maurice de Broglie, o Prêmio Nobel poderia ter sido compartilhado entre os irmãos.

A expectativa da família Broglie era que os irmãos fossem agraciados com um prêmio, e mais tarde, membros da comunidade científica francesa manifestaram surpresa pelo fato de o Prêmio Nobel não ter reconhecido as pesquisas de Maurice e Louis. Historicamente, já houve prêmios Nobel concedidos a familiares: o Nobel de Física de 1903 foi para o casal Marie e Pierre Curie (junto com Henri Becquerel), e o Nobel de Física de 1915 foi entregue a William Henry Bragg e seu filho, William Lawrence Bragg.

Podem existir incertezas quanto à contínua confiabilidade da pesquisa conduzida no laboratório de Maurice de Broglie. Se for o caso, elas podem ter origem nas discussões dos anos 1920 entre a equipe de Copenhague, formada por Dirk Coster e George Hevesy, e os colegas de Paris, Georges Urbain e Alexandre Dauvillier. O cerne do problema residia nas linhas observadas no laboratório de Broglie, que foram fundamentais para a

descoberta do elemento químico número 72. Somente Bohr e Rutherford sugeriram que a pesquisa de Dauvillier poderia ser o resultado de um erro, uma difamação enraizada no campo de feixe N. Isso prejudicou a reputação da ciência francesa no início do século XX.

Portanto, mesmo que Dauvillier pudesse confirmar as declarações de Louis de Broglie sobre a difração eletrônica, é possível que isso não fosse muito convincente para a comunidade científica em geral, especialmente para o grupo de Copenhague, que já possuía preconceitos contra a França e seu potencial na física quântica. Em uma carta à Academia Sueca de Ciências, recomendando Davisson e Louis de Broglie para o Prêmio Nobel em 1929, James Franck avaliou especificamente o trabalho de Schrödinger, Heisenberg e Born, colocando-os acima de Broglie.

Em dezembro de 1929, Pauline e Maurice acompanharam Louis a Estocolmo para a cerimônia do Prêmio Nobel. O amigo de Pauline, Thomas Mann, também foi agraciado com o Nobel. Posteriormente, Pauline mencionou em uma carta a Lindemann que estava se dedicando a palestras e livros, aspirando um dia receber o Nobel. Acrescentou que acreditava que seu irmão Maurice logo faria uma descoberta digna do prêmio, e seria notável ter três laureados na família (Ney, 1997, p. 415).

É uma pena que o Prêmio Nobel não tenha sido concedido um ano antes. A mãe de Louis, com quem ele ainda morava, faleceu em 1928. Pauline lamentou que levou para o túmulo a imagem de Louis como um "malfeitor" que nunca lhe proporcionaria o herdeiro tão desejado. Maurice perdeu sua filha única com apenas sete anos de idade. Broglie não deixou descendentes. Após a morte de sua mãe, Louis de Broglie vendeu sua residência em Paris e se mudou para o elegante subúrbio de Neuilly. Ele foi nomeado professor da Universidade de Paris no mesmo ano e começou a lecionar em 1931. Quando foi nomeado para a Sorbonne, um de seus amigos íntimos disse: "Então, você se tornou um funcionário público" (Ney, 1997, p. 416).

O Quinto Conselho de Solvay de Física de 1927

No dia 25 de outubro de 1927, Louis de Broglie participou do renomado congresso de Solvay, um dos mais significativos na história da física moderna. Sua teoria inovadora sobre a natureza da matéria foi um marco no avanço da mecânica quântica. Durante a Quinta Conferência Internacional de Solvay, ele apresentou um artigo chamado "La

nouvelle dynamique des quanta" (De Broglie, 1927B). O objetivo principal desse artigo era oferecer uma perspectiva teórica que pudesse restabelecer o significado de fenômenos específicos, como a equação de Schrödinger. O estudo é dividido em três partes, sendo que no primeiro capítulo, De Broglie expõe as ideias fundamentais de seus trabalhos anteriores que conduziram à interpretação da fórmula de ondas estacionárias de Bohr-Sommerfeld e ao desenvolvimento da mecânica ondulatória de Schrödinger.

Até o momento, o impacto das previsões experimentais da onda de eventos foi confirmado. Fotografias de hibridização de elétrons foram obtidas por Clinton J. Davisson e Lester H. Germer nos Bell Laboratories em Nova Jersey, e por George P. Thomson, filho de J. J. Thomson, em Aberdeen. Os resultados foram apresentados nessa Conferência, enquanto um artigo de 1925 de Walter Elsasser, discípulo de James Franck, já indicava que físicos como Davisson e C.H. Kunsmann haviam observado propriedades similares em feixes de elétrons entre 1921-1923. Outra evidência para a verificação do fenômeno é a transparência observada no movimento lento de elétrons finos, conhecido como efeito Ramsauer (Ney, 1997, p. 414).

Para Schrödinger, em relação a nova Mecânica, as ondas devem ser representadas por funções cujas amplitudes são contínuas e descritivas

$$\Psi = a \cos \frac{2\pi}{h} \varphi \quad (1.1)$$

sendo que α representa uma função contínua e φ é a solução da equação jacobiana na primeira aproximação.

Uma partícula seria representada por um conjunto de ondas de frequência muito próxima se propagando dentro de um cone muito estreito, então a partícula não estaria realmente no tempo, ela ocuparia uma região do espaço pelo menos uma ordem de grandeza do tamanho de seu comprimento de onda. Para de Broglie, a ideia encontrou dificuldades.

Nos fenômenos subatômicos, a região onde ocorre o movimento têm dimensões da ordem dos comprimentos de onda, então a partícula não seria definida como um todo: para Schrödinger, os elétrons no átomo estavam espalhados de tal forma que não poderíamos falar sobre sua posição ou velocidade. Essa maneira de conceber pontos substantivos parece criar muitas dificuldades. Por exemplo, se um quantum de luz ultravioleta ocupa um volume da mesma ordem que seu comprimento de onda, é difícil

imaginar que esse quantum pode ser absorvido por átomos mil vezes menores (De Broglie, 1927).

Outra dificuldade que de Broglie levantou com a mecânica ondulatória de Schrödinger está relacionada à dinâmica de sistemas de muitos corpos, pois neste caso a equação de onda descreve a propagação de uma onda no espaço de configuração, que é um espaço abstrato com dimensões $3N$, onde N é o número de partículas no sistema considerado. Embora reconheça o sucesso desse método, ele diz:

Parece-me um tanto paradoxal construir um espaço de configuração a partir das coordenadas de pontos inexistentes. Além disso, embora a propagação de uma onda no espaço tenha um significado físico claro, não é o mesmo que a propagação de uma onda em um espaço de configuração abstrata com algumas dimensões. é determinado pelo número de graus de liberdade do sistema (De Broglie, 1927).

Sobre a prova de correspondência entre a mecânica ondulatória de Schrödinger e a mecânica quântica de Heisenberg, de Broglie a chamou de "uma transformação de criatividade admirável". No entanto, como a equação de Schrödinger não era relativista, de Broglie argumentou que, no caso de um simples ponto material, a teoria geral da relatividade deveria ser aceita exatamente como a equação de Klein-Gordo.

Numa admirável mudança de criatividade, Schrödinger mostrou que a mecânica quântica inventada por Heisenberg e desenvolvida por Born, Jordan, Pauli et al., pode ser traduzida para a linguagem da mecânica ondulatória (De Broglie, 1927).

Dando continuidade a quinta Conferência Internacional de Solvay de 1927, De Broglie relata que, para cada onda Ψ define uma classe de movimento, todos esses movimentos são controlados por uma fórmula de controle se soubermos a posição inicial da partícula. Se essa posição inicial for ignorada, a expressão relativista

$$K\alpha^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} - eV \right) d\tau \quad (1.2)$$

onde K é uma constante e α é a amplitude, indica a probabilidade de uma partícula ocorrer em um elemento de volume $d\tau$ em um dado tempo t . Dada a aproximação que temos de Newton,

$$\text{constante} \times a^2 d\tau \quad (1.3)$$

Com isso, refere-se à interpretação probabilística de Born.

Para De Broglie não havia razão para recusar o determinismo dos fenômenos físicos individuais, uma vez que o movimento das partículas pode ser inteiramente determinado por uma fórmula mestre. Pois, a onda Ψ teria duas funções: seria uma onda piloto responsável por controlar o movimento das partículas, assim como, uma onda de probabilidade.

Segundo de Broglie, a nova Mecânica permitiu uma interpretação dos fenômenos de interferência chegando ao mesmo resultado que a óptica de ondulatória. Considerando a propagação da luz em uma região pontilhada por obstáculos fixos, a propagação da onda depende do tipo e posição dos obstáculos, mas sua frequência é constante. A equação (3.0) pode descrever os riscos claros e escuros que aparecem nesse tipo de experimento. Nesse caso, a probabilidade de encontrar um fóton em regiões escuras é zero e diferente de zero em regiões claras.

Louis de Broglie retoma sua discussão sobre a dinâmica dos sistemas de muitas partículas. Referindo-se à crítica que ele fez na Parte 1, sobre o formalismo de Schrödinger lembrando do problema das "coordenadas de pontos inexistentes", que pode ser resolvido assumindo que os pontos de massa sempre têm posições bem definidas. E para o significado físico das ondas que se propagam no espaço abstrato ainda existem certas dificuldades.

Quando de Broglie analisou o significado das ondas nos sistemas atômicos, foi possível atribuir velocidades e posições bem definidas aos elétrons de um átomo em um determinado ponto no tempo para dar significado às variáveis de configuração.

Um átomo de hidrogênio em um estado estável deve ser descrito pela função,

$$\Psi_n = F(r, \theta) \cos \frac{2\pi}{h} \left(W_n - \frac{mh}{2\pi} \alpha \right) \quad (1.4)$$

$$W_n = m_0c^2 - \frac{2\pi^2m_0e^4}{n^2h^2}.$$

para as coordenadas esféricas, temos m como inteiro e

. Desta forma, o elétron se moverá em um círculo com a velocidade dada pela fórmula orientadora,

$$v = \frac{1}{m_0r} \frac{mh}{2\pi}. \quad (1.5)$$

A mecânica ondulatória de Schrödinger e o formalismo matricial de Heisenberg não são possíveis para descrever o que acontece com os elétrons durante sua transição entre dois estados estacionários. De Broglie argumentou que se uma posição inicial da partícula é assumida, a velocidade do elétron durante a transição pode ser determinada por uma fórmula orientadora, permitindo uma possível representação visual da transição. Na conclusão da segunda parte, De Broglie admite que as ideias consideradas nesta troca constituem apenas visões provisórias e que o momento angular intrínseco do elétron (spin) proposto por Uhlenbeck e Goldschmidt não pode ser usado na mecânica ondulatória.

Até agora consideramos o movimento da partícula como o movimento "externo" da onda ψ , seu movimento é determinado apenas pela propagação da onda. Aquilo é, Sem dúvida uma visão provisória: uma teoria estrutural real em nossa opinião, a estrutura atômica da matéria e da radiação deve ser incorporada nos fenômenos de onda considerando soluções singulares para a equação de onda. Então devemos provar que existe uma correspondência entre a onda de singularidade e a onda ψ (De Broglie, 1927). Na Parte III de sua publicação, de Broglie apresenta alguns experimentos que, segundo ele, confirmaram a nova dinâmica dos elétrons.

Após a comunicação houve uma discussão sobre as ideias apresentadas por de Broglie, e perguntas e comentários foram feitos por Lorentz, Born, Brillouin, Pauli, Schrödinger, Kramers e Ehrenfest. Einstein não comentou imediatamente após a apresentação de Louis de Broglie, mas durante a discussão geral ele disse: "Acho que de Broglie está certo".

A análise das discussões mostra que a teoria da onda piloto foi amplamente discutida por grande parte dos presentes. Mas a maioria dos congressistas não apoiou a teoria de Louis de Broglie, nem mesmo aqueles que discordavam do cálculo da probabilidade.

No Congresso Solvay, alguns da "velha guarda" (Lorentz, Einstein, Langevin, Schrödinger) insistiram que uma interpretação causal da Mecânica das Ondas deveria ser encontrada - sem, contudo, colaborar com os esforços - Bohr e Born, juntamente com seus jovens discípulos (Heisenberg, Dirac, etc.) certamente apoiaram a nova interpretação puramente probabilística que desenvolveram e não contestaram minha posição. Pauli foi o único que se opôs à minha teoria, e o fez estudando o caso de colisão partícula-rotor que Fermi acabara de estudar (De Broglie, 1960).

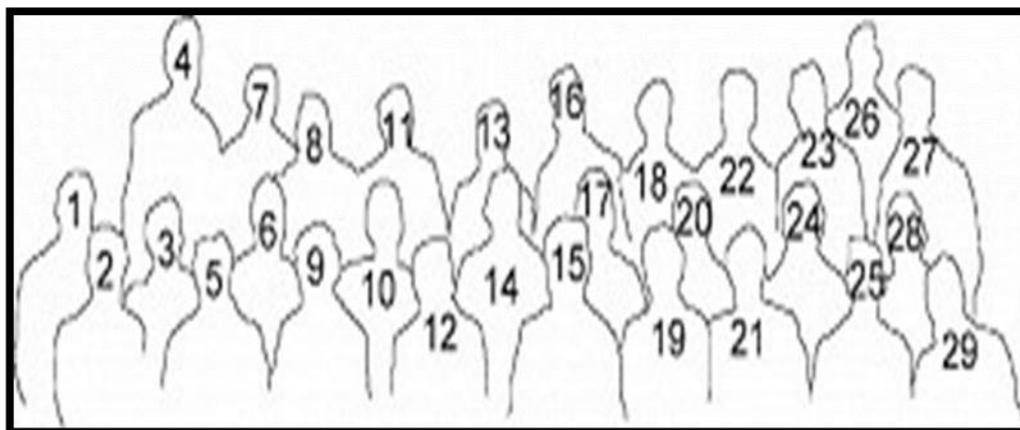
Embora de Broglie afirme que "o único defensor da interpretação probabilística em sua oposição foi Pauli", o registro do Congresso contém a crítica de Born. O físico alemão criticou a definição de Louis de Broglie da trajetória de uma partícula porque criaria dificuldades para analisar a colisão entre um elétron e um átomo. Brillouin veio para a defesa de Broglie argumentou que Born poderia até duvidar da existência de órbitas e afirmar que elas nunca poderiam ser observadas, mas ele não poderia provar que elas não existiam. Além disso, Brillouin observou que as fórmulas obtidas por Broglie eram compatíveis com as de outros autores, como Walter Gordon, que eram bem aceitas pelos físicos da época.

O comentário de Paul também se referiu ao conceito de partículas se movendo ao longo de trajetórias bem definidas e argumentou que esse conceito é baseado no princípio da conservação de carga, o que implica a possibilidade de introduzir um vetor de velocidade dependente do espaço, do tempo e da partícula movendo-se ao longo de linhas corrente deste vetor. Isso é algo que Slater já havia sugerido anteriormente em óptica, observando uma quantidade de luz movendo-se ao longo da linha do vetor de Poynting. Porém, segundo Pauli, essa atividade não poderia ser desenvolvida de forma satisfatória (De Broglie, 1927).

Durante a discussão geral, Pauli continuou a criticar as ideias apresentadas por de Broglie, mas inicialmente concordou que as ideias do físico francês eram compatíveis com a teoria de Born apenas no caso de colisões elásticas, e que os fenômenos de colisão inelástica não haviam sido descritos. Paul usou o rotor Fermi como exemplo. Pauli mostrou que se as ideias de Louis de Broglie fossem levadas em conta, ou seja, se os fenômenos individuais pudessem ser descritos objetivamente pela cinemática comum, então, após a colisão, a velocidade angular do rotor não deveria ser constante, ao contrário do requisito da teoria quântica de que o rotor deveria estar em estado estacionário antes e após a colisão. Mas, segundo Paul, os resultados obtidos no estudo de espalhamento de

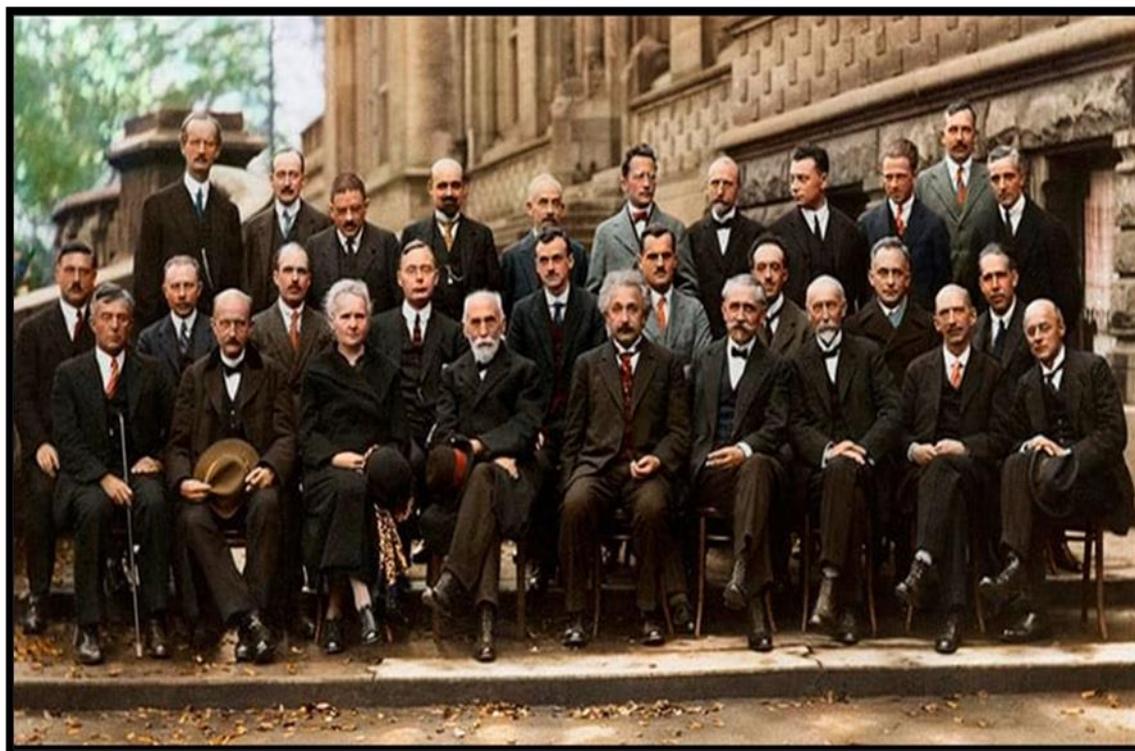
partículas seriam totalmente consistentes com a teoria de Born (Bacciagalupi; Valentini, 2006).

Figura 11: Sequência dos cientistas na foto.



Fonte: Oficina da Net (2017, <https://www.oficinadanet.com.br/post/19178-a-fotografia-mais-inteligente-do-mundo>)

Figura 12: Cientistas na Quinta Conferência de Solvay em 1927.



Fonte: Oficina da Net (2017, <https://www.oficinadanet.com.br/post/19178-a-fotografia-mais-inteligente-do-mundo>)

Na quinta conferência, 32 cientistas participaram, mas somente 29 foram fotografados e 17 possuíam láurea do Prêmio Nobel. Seguem os nomes e a ordem dos participantes da famosa fotografia conhecida como a mais inteligente: Peter Debye, Irving Langmuir, Martin Knudsen, Auguste Piccard, Max Planck, William Lawrence Bragg, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Marie Curie, Hendrik Anthony Kramers, Edouard Herzen, Hendrik Antoon Lorentz (presidente), Théophile de Donder, Paul Dirac, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Arthur Holly Compton, Jules-Émile Verschaffelt, Paul Langevin, Louis-Victor de Broglie, Charles-Eugène Guye, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Max Born, Charles Thomson Rees Wilson, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Niels Bohr, Owen Willans Richardson, William Henry Bragg (ausente na foto), Henri-Alexandre Deslandres (ausente na foto), Edmond van Aubel (ausente na foto).

Louis Victor Pierre Raymond de Broglie Pós Defesa da sua Tese de Doutorado

Em 1931, Louis de Broglie organizou um seminário. Participaram Claude Marnat, Andre George e Jean-Louis Destouches. Nos anos 1950, aproximadamente cinquenta indivíduos participaram do seminário, que ocorreu semanalmente por quarenta anos, sempre às terças-feiras às 15h. Entre os convidados estavam Max Born, George Darwin, Paul Dirac, Albert Einstein e Enrico Fermi.

Os cursos ministrados por Broglie no Institut Poincaré da universidade eram extensos e cerimoniais. A plateia respeitosa levantou-se quando ele entrou na sala e ouviu em silêncio enquanto ele lia em voz alta e monótona um texto escrito à mão em um monte de folhas grandes. Se alguém quisesse fazer uma pergunta, Anatole Abragam, físico nuclear, lembrou que era necessário solicitar uma consulta, mas "com o tempo, em vez de assistir às palestras, preferia estudar seus livros maravilhosamente escritos". Michel Eberhardt percebeu que Louis de Broglie era "por natureza... um homem solitário, quase à margem, mais preocupado em dar palestras do que em criar uma escola".

Sobre os estudantes de Louis de Broglie, ou o que poderia ser chamado de "grupo" de Louis de Broglie, Abragam criticou severamente que, com algumas exceções, eles eram "seguidores" "que não eram do mais alto nível intelectual e talvez nem sempre da mais alta integridade" intelectual. A atmosfera era de elogios, afirmou; "mecânica ondulatória", em vez de "mecânica quântica", era o tema preferido. A "mecânica ondulatória", a descoberta de Louis de Broglie, foi considerada por este público francês

como altamente abstrata e conceitualmente desafiadora, em contraste com a prática no exterior da mecânica quântica como uma "ferramenta diária do físico comum". A aceitação da mecânica quântica realista de Louis de Broglie pelos comunistas franceses na década de 1950 criou uma situação peculiar em que o trabalho de Louis de Broglie foi elogiado pela ideologia soviética, enquanto a mecânica quântica predominante - por exemplo, sua aplicação na química por Linus Pauling e outros químicos teóricos - foi criticada. A aceitação de um aristocrata francês pelos seguidores de Marx e Lênin constituiu uma estranha aliança, como afirmou Wolfgang Pauli, entre o preto e o vermelho (Ney, 1997, p. 416-417).

O príncipe solteiro Louis de Broglie tornou-se funcionário público ao solicitar e aceitar uma nomeação para o corpo docente da Universidade de Paris, uma instituição estatal cujos certificados eram muito menos prestigiados do que os da Academia Naval, da École Polytechnique ou do École Polytechnique. Academia Francesa. Ao contrário de seu irmão Maurice, ele tinha um emprego. Ele se distanciou dos estudantes que encontravam inspiração em suas palestras escritas, mas também ganhou considerável poder dentro do sistema acadêmico francês (Ney, 1997, p. 417).

Louis de Broglie viajou pouco, embora tenha participado das Conferências Solvay em Bruxelas em 1927 e 1933, tenha ido a Estocolmo em 1929 e feito pelo menos uma viagem à Inglaterra. O emigrado russo George Gamow contou uma história agora conhecida sobre um encontro com de Broglie no final da década de 1920, no qual Gamow, que trabalhava com Rutherford na época, providenciou para que de Broglie o conhecesse por meio de cartas. Visitando-o em sua casa em Neuilly durante as férias de Natal: Broglie, vestindo um casaco de seda, me encontrou em seu escritório luxuosamente mobiliado e começamos a conversar sobre física. Ele não falava inglês; meu francês era ruim. Mas de alguma forma, meio usando meu francês quebrado e meio escrevendo fórmulas no papel, consegui transmitir a ele o que queria dizer e entender seus comentários. Menos de um ano depois, de Broglie veio a Londres para dar uma palestra na Royal Society e, claro, eu estava na plateia. Ele fez um discurso maravilhoso em um inglês perfeito com um leve sotaque francês (Ney, 1997, p. 417).

Louis de Broglie renunciou à Universidade em 1962. Permaneceu ativo na comunidade científica até o outono de 1975, sendo sua última aparição pública em um simpósio da Fundação Louis de Broglie, que fundou em 1973 para a realização de pesquisas em microfísica. O castelo da família em Broglie e as obrigações cívicas

associadas à sua propriedade foram há muito transferidos para François de Broglie-Jean de Broglie, neto de Maurice e tio de Louis (Ney, 1997, p. 418).

O filho mais novo da família de Broglie acabou escolhendo uma vida de estudos sérios, mas também enfrentou preocupações de sua família de que estava se tornando muito ascético ou mesmo excêntrico. Boyle disse que Louis de Broglie não parecia bem, era magro e abatido, mas essa fragilidade era uma forma de delicadeza e até de força. A irmã de Louis, Pauline, temia que as descobertas de seu irmão na física teórica estivessem destruindo seu senso natural de humor e alegria. Ela percebeu que ele abandonou seu jeito infantil de se vestir durante as “buscas de roupas”. Paul Germain, secretário do colégio, recordou que os seus hábitos de vida eram extremamente regulares e quase monásticos (Ney, 1997, p. 419).

Contudo, de acordo com Guitton, seria incorreto classificar Louis de Broglie como tímido. Sua reserva não era sinal de vergonha, mas sim de um recato, uma espécie de "colocar um véu, de manter distância". Louis de Broglie, na visão de Guitton, distinguia-se pela beleza: a beleza de um comportamento quase feminino, a beleza de sua teoria. Era um homem de fé, "como reis e papas", guiado pela convicção de que se deve ser "servo dos servos" (Ney, 1997, p. 419).

Louis de Broglie foi um revolucionário relutante na história da mecânica quântica, mas não o único. Schrödinger, Einstein, Planck e Max von Laue também expressaram dúvidas sobre causalidade, indeterminação e complementaridade. No entanto, os cientistas de Berlim não foram marginalizados na história da nova física como De Broglie. Apesar de não ter contribuído para o desenvolvimento da Mecânica de Copenhague após 1927, De Broglie continuou a participar em debates públicos, discutindo suas pesquisas e suas implicações filosóficas. É notável que a personalidade e o estilo de vida de Louis de Broglie tenham influenciado a percepção de seu distanciamento com a comunidade científica (Ney, 1997, p. 420).

O fato de que a teoria de Broglie se mostrou menos radical que as ideias em constante evolução dos membros do grupo de Copenhague não o fazem um caso isolado entre os físicos, especialmente na sua geração. Heisenberg, Dirac e Pauli, mais jovens que Louis de Broglie, embora fossem radicais, buscaram a validação e o suporte de Niels Bohr e Max Born. Além disso, Paul Forman e outros historiadores sugeriram que as concepções similares de físicos alemães sobre causalidade e indeterminação refletiam preconceitos políticos da cultura pós-Weimar, que demandavam a rejeição de métodos tradicionais e do materialismo (Ney, 1997, p. 421).

A Continuação do Legado de Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

Louis de Broglie desempenhou um papel significativo na orientação de muitos físicos e químicos tanto na França, quanto em outros países, através de seu trabalho de divulgação científica que, que trabalharam no desenvolvimento e na aplicação de sua teoria, contribuindo para avanços significativos na física quântica e na compreensão do comportamento das partículas subatômicas. Isso fica claro em três exemplos citados por ele: E. Maurice Cotte, que completou uma tese sobre óptica eletrônica; Claude Magnan e sua equipe do laboratório de física do Collège de France, que "investigam problemas teóricos de óptica eletrônica em colaboração com o Instituto Henri Poincaré"; e, por fim, Raymond Daudel, "que atua no Instituto do Rádio e realizou extenso trabalho sobre a química de radioelementos artificiais, [e que] nos últimos dois ou três anos, esforços significativos foram feitos para avançar aqui as aplicações da mecânica ondulatória à química e atrair a atenção de jovens pesquisadores para essas questões" (Adrien Vila-Valls, 2012, p. 197).

Raymond Daudel foi um químico teórico francês conhecido por suas contribuições significativas para a química quântica e teoria de ligação química. Em termos de conexão entre os dois, especialmente no contexto das ideias de Louis de Broglie, podemos destacar que suas contribuições teóricas fundamentais sobre a natureza ondulatória das partículas tiveram um impacto profundo não apenas na física, mas também em campos relacionados, como a química quântica. A teoria de de Broglie ajudou a estabelecer a base para entender como os elétrons se comportam não apenas como partículas discretas, mas também como ondas, o que é crucial para entender fenômenos como a estrutura eletrônica dos átomos e as ligações químicas.

Daudel, como químico teórico, teria estudado e aplicado essas ideias no contexto da química quântica, onde se explora como a teoria de de Broglie pode ser usada para entender a estrutura molecular, as interações entre átomos e as propriedades das substâncias. Portanto, enquanto Daudel não é amplamente conhecido por trabalhar diretamente com as ideias de de Broglie na física fundamental, sua área de pesquisa estava profundamente influenciada pelas implicações das teorias de de Broglie para a química teórica e a ligação química.

Raymond Daudel orientou e influenciou muitos pesquisadores ao longo de sua carreira, incluindo Milan Trsic, um físico teórico sérvio conhecido por seu trabalho em mecânica estatística e teoria quântica de campos. A orientação de Daudel a Trsic sugere

uma colaboração no campo da química quântica, onde ambos contribuíram significativamente para o avanço do conhecimento nessa área.

Milan Trsic foi um renomado professor da Universidade de São Paulo. Orientou 17 dissertações de mestrado e 13 teses de doutorado, além de quatro trabalhos de iniciação científica em Química e Física. Sua atuação se destacou na Química Teórica. Profissionalmente, colaborou em co-autorias de trabalhos científicos com 124 pesquisadores. Seu trabalho abrangeu Química Quântica, Estrutura Eletrônica, Estudos Químicos Quânticos, Estudos Teóricos, Coordenadas Geradoras, Compostos Canabinoides, Estrutura Cristalina, Hartree-Fock e Hartree-Fock-Slater. Entre seus orientados, está o Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto, que atualmente atua na UFRPE e continua a disseminar a teoria de Louis de Broglie para as novas gerações de químicos. A orientação desta dissertação, por exemplo, visa facilitar a implementação e a divulgação desta teoria no currículo do ensino médio.

Em 2024 completam-se 100 anos desde a formulação da teoria de Louis de Broglie. Louis de Broglie propôs a teoria da dualidade onda-partícula, que sugere que partículas subatômicas, como elétrons, podem exibir tanto propriedades de partículas quanto de ondas. Sua descoberta foi um marco fundamental na física quântica, lançando as bases para o desenvolvimento da mecânica quântica e influenciando profundamente nosso entendimento da natureza fundamental da matéria e da energia, assim como, abrindo caminho para a compreensão do comportamento das partículas subatômicas.

A teoria de Broglie foi essencial para o desenvolvimento dos microscópios eletrônicos, transformando a maneira como visualizamos estruturas microscópicas. Suas concepções sobre a dualidade onda-partícula da matéria foram cruciais para entender as ligações químicas. O legado de Broglie ainda é estudado e utilizado em pesquisas científicas contemporâneas.

Importância da Experimentação no Ensino de Química

Conforme Silva (2011) e Schnetzler (2002), a química é uma das matérias mais desafiadoras para estudantes do ensino fundamental e médio. Seu caráter abstrato e a necessidade de compreender fórmulas, propriedades e equações químicas tornam seu conteúdo complexo. Isso frequentemente resulta em um aprendizado mecânico, onde os alunos não compreendem verdadeiramente a matéria. A experimentação pode tornar o aprendizado mais prazeroso e cativante para os estudantes.

Acreditamos que a combinação da prática experimental com a teoria pode ampliar o entendimento dos alunos sobre um conteúdo específico, estimulando sua curiosidade e interesse pelo aprendizado. Isso se deve ao fato de que a prática possibilita uma interação mais intensa dos alunos com o conteúdo, enriquecendo seu aprendizado.

Os experimentos representam uma ferramenta essencial que facilita a aprendizagem, especialmente nas ciências (Machado e Mol, 2007). Eles devem proporcionar aos estudantes a chance de expressar seus conceitos sobre fenômenos de maneira direta, através da experimentação, ou de forma indireta, por meio do registro de resultados. Machado e Mol são pesquisadores que contribuíram para essa área de estudo. Para esses dois pesquisadores:

[...] as atividades experimentais auxiliam na consolidação do conhecimento e no desenvolvimento cognitivo do aluno, trazendo benefícios no processo de ensino e aprendizagem de Química, pois a vivência de situações reais é de grande importância para a compreensão e correlação dos diversos temas, no entanto, é preciso ter alguns cuidados para que a experimentação seja uma ferramenta eficaz na formação cidadã dos alunos (Machado e Mól, 2007).

Conforme os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Novo Ensino Médio e o Guia Curricular do Ensino Médio (OCCEM), experimentos são essenciais no ensino de química. Estes documentos oficiais realçam a importância dos experimentos como uma estratégia pedagógica em química. Eles também recomendam uma metodologia para tratar diversos temas científicos que permeiam o ambiente escolar, o cotidiano dos estudantes e o mundo ao redor.

Segundo Silva (2016), a experimentação é um recurso valioso para o ensino de química, pois engaja os alunos na sociedade contemporânea, proporcionando-lhes uma compreensão aprimorada e habilidades para discutir contextos específicos. Isso se deve ao fato de que a química, sendo uma disciplina abstrata, muitas vezes apresenta conteúdos de difícil compreensão. Contudo, é crucial recordar que a natureza desta ciência é fundamentalmente experimental.

Os cientistas consideram que os experimentos realizados em sala de aula podem constituir uma fundação sólida para debater a realidade da química, por meio da exploração dos três níveis de entendimento da matéria (macroscópico, microscópico e representacional), contribuindo assim para o aprimoramento do aprendizado.

Oliveira (2010) destaca adicionais benefícios da experimentação como método de ensino em Química, além dos já mencionados. Estes incluem o incremento da motivação e atenção dos estudantes, o fomento ao trabalho em equipe, a criatividade, a iniciativa, a capacidade de tomar decisões, o aprimoramento das habilidades de observação e anotação, o desenvolvimento da competência analítica de dados e a formulação de hipóteses.

Conseqüentemente, o uso da experimentação contribui para alcançar diversos objetivos no ensino de Química. Santos e Schnetzler (1996) afirmam que as aulas práticas têm como objetivo ensinar os estudantes a tomar decisões, implicando a necessidade de integrar o conteúdo abordado ao contexto social dos alunos. Os autores defendem que:

“O objetivo básico do ensino de química para formar o cidadão compreende a abordagem de informações químicas fundamentais que permitam ao aluno participar ativamente na sociedade tomando decisões com consciência de suas conseqüências. Isso implica que o conhecimento químico aparece não com um fim em si mesmo, mas com objetivo maior de desenvolver as habilidades básicas que caracterizam o cidadão: participação e julgamento” (SANTOS & SCHNETZLER, 1996, p.29).

Portanto, é importante que atividades experimentais estejam presentes adequadamente em sala de aula, uma vez bem aplicadas, essas estratégias podem possibilitar que os alunos conectem conteúdos e conhecimentos aprendidos em sala de aula com os vivenciados na prática, e assim sejam estimulados a produzir, questionar, explorar durante essas atividades (Guimarães, 2009).

PROPOSTA DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

A eficácia no ensino de Ciências no Ensino Médio é influenciada por múltiplos fatores. Entre eles, a organização contextualizada do conhecimento é crucial, aproveitando as realidades vivenciadas pela escola e pelos estudantes, especialmente sob a nova estrutura do Ensino Médio. Esta abordagem é justificada pelo desafio de empregar métodos variados para que os alunos desenvolvam as competências e habilidades requeridas para sua formação integral, dentro de um contexto social e tecnológico. Nesse contexto, as atividades experimentais constituem um recurso fundamental para o sustento

da ciência. Através da experimentação, os alunos aprendem o processo de investigação e observação. Mesmo que o experimento seja simples, ele se revela repleto de contradições significativas entre o pensamento do aluno, as hipóteses levantadas e as descobertas científicas. Além disso, são valiosas para atender às necessidades de aprimoramento, promovendo o desenvolvimento da capacidade de ensino e aprendizagem.

A experimentação teve um papel crucial no avanço da tecnologia, propondo um método científico fundamentado na racionalização, indução e dedução analítica desde o século XVII, desafiando o conceito tradicional da relação entre homem, natureza e o divino.

Além dos pontos principais, é essencial que a atividade experimental tenha relevância para o conteúdo do livro didático e esteja em consonância com os objetivos educacionais do currículo. Incluir dicas e precauções de segurança é também importante, especialmente se a atividade incluir materiais ou procedimentos com potenciais riscos.

A influência significativa dos trabalhos experimentais realizados nas universidades tem levado à incorporação de atividades experimentais nas escolas. O propósito dessas atividades é enriquecer o aprendizado científico através da aplicação prática do conhecimento adquirido (Galiazzi et al., 2001). Segundo Giordan (1999), o investimento em pesquisa no ensino de química é igualmente produtivo, evidenciando a relevância da experimentação no processo educativo de química e ciências.

O aprendizado dos conteúdos de química pode ser estruturado em três abordagens distintas: a fenomenológica, que engloba os elementos-chave do conhecimento e permite a visualização, análise e determinação concreta; a teórica, que oferece explicações baseadas em modelos como átomos e íons, essenciais para a compreensão dos fenômenos; e a representacional, que envolve o uso de dados específicos da linguagem da química, tais como fórmulas e equações.

Em concordância com Oliveira (2010), a experimentação possui uma relevância essencial que cria uma ligação e uma abordagem nos três níveis do conhecimento químico mencionado anteriormente, permitindo-nos destacar as contribuições que ela oferece:

- ✓ Aguçar e provocar a atenção dos discentes.
- ✓ Trabalhar a coletividade entre os discentes.
- ✓ Instaurar as definições para a tomada de convicções.
- ✓ Incentivar a imaginação criativa.
- ✓ Despertar a habilidade da observação e registro.
- ✓ Analisar dados e fazer hipóteses sobre fenômenos.

- ✓ Assimilar a ligação entre ciência, tecnologia e sociedade.
- ✓ Observar para compreender a natureza da ciência.

Podemos concluir que a teoria emprega modelos para explicar fenômenos observados ou percebidos, enquanto os modelos representacionais atuam como ferramentas simbólicas para conectar a primeira e a segunda abordagem metodológica. Machado (2004) afirmou que a construção do conhecimento em química depende das conexões entre essas três estratégias. O mesmo autor critica a maneira como esses métodos são aplicados na educação formal. Conforme suas palavras:

Mas, o que a escola, o livro didático e o professor têm feito? Trabalhado descontextualizadamente somente os níveis representacional e teórico e, principalmente, o nível representacional, incluindo aí os aspectos matemáticos desse nível [...]. A ausência de fenômenos e seus contextos na sala de aula pode fazer com que os alunos tomem por “reais” as fórmulas das substâncias, as equações químicas e os modelos para a matéria (Machado, 2004, p.173).

Assim, nosso objetivo é desenvolver a Caixa da Interação Onda-Partícula para explorar experimentalmente a Teoria de Louis de Broglie com alunos do Ensino Médio em Escolas de Tempo Integral na cidade de Serra Talhada, que fica no interior de Pernambuco. A seguir, apresentamos o protótipo da caixa, incluindo os reagentes e a formulação do experimento que ilustra a teoria mencionada.

Figura 13: Vista frontal da Caixa que será realizada os experimentos para demonstrar a dualidade onda-partícula.



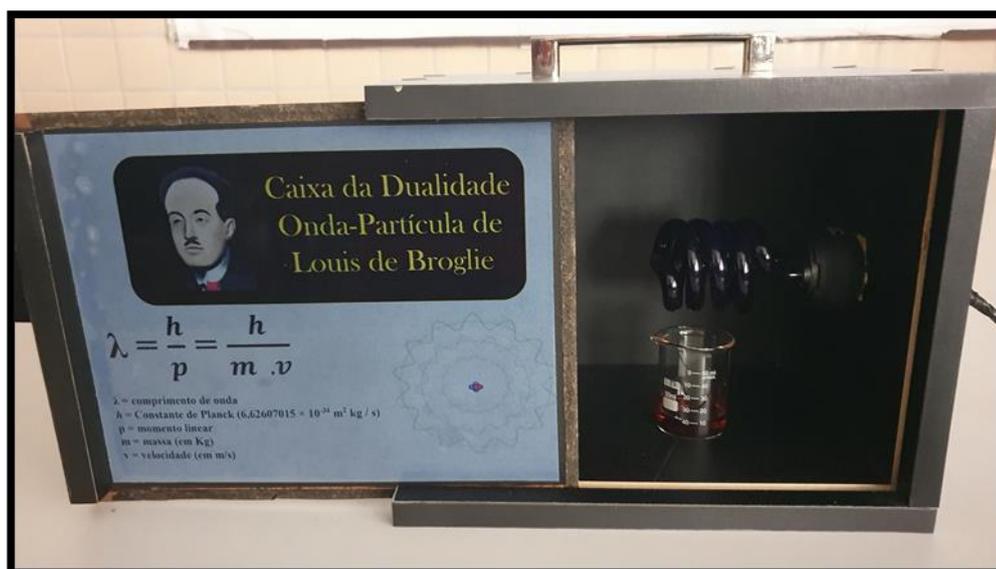
Fonte: O Autor.

Figura 14: Vista lateral da Caixa que será realizada os experimentos para demonstrar a dualidade onda-partícula.



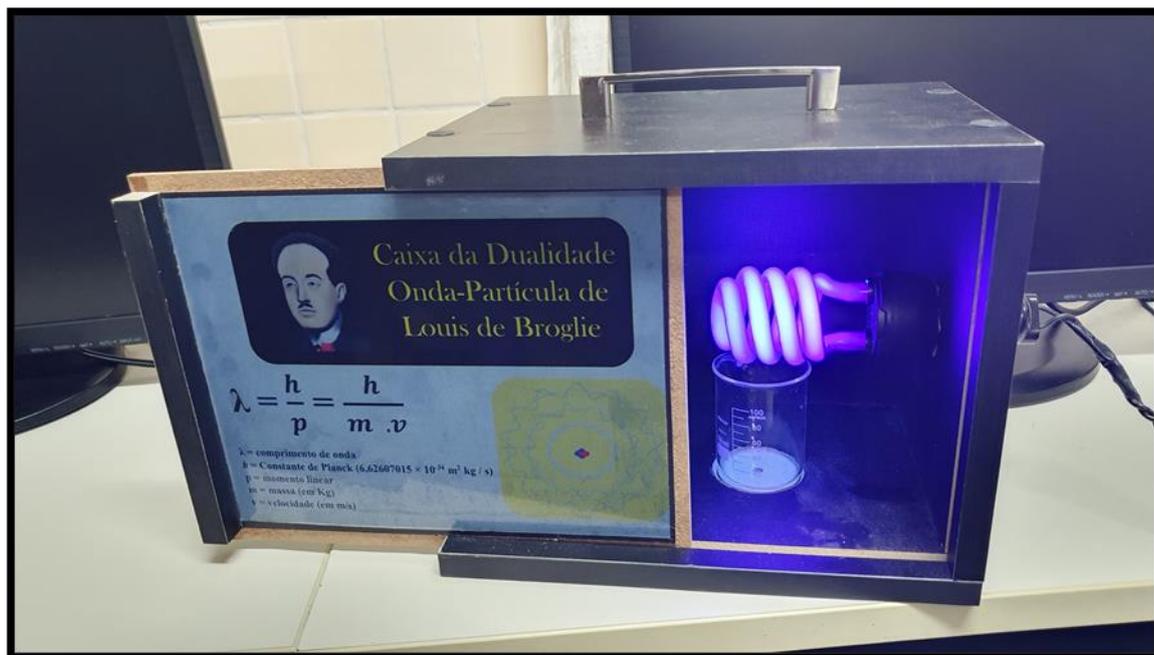
Fonte: O Autor.

Figura 15: Vista da Caixa aberta com sua Luz Negra conectada e um Becker de 100 ml.



Fonte: O Autor.

Figura 16: Vista da Caixa aberta com sua Luz Negra conectada e acesa com um Becker de 100 ml demonstrando como ocorre o experimento.



Fonte: O Autor.

A caixa foi produzida utilizando Compensado Lam Parica 15mm 2.20×1.60, com 25 cm de largura por 20 cm de altura. A porta da caixa é de correr com a finalidade de facilitar a abertura, assim como a sua vedação, um Bocal Soquete Rabicho para lâmpada comum 220 Volt., um metro de fio 14 mm e uma Lâmpada Luz Negra 36W efeito neon 220 Volt. A mesma foi revestida com um Laminado Pet Madeira Natural Preto 3000x1250mm 0.4mm.

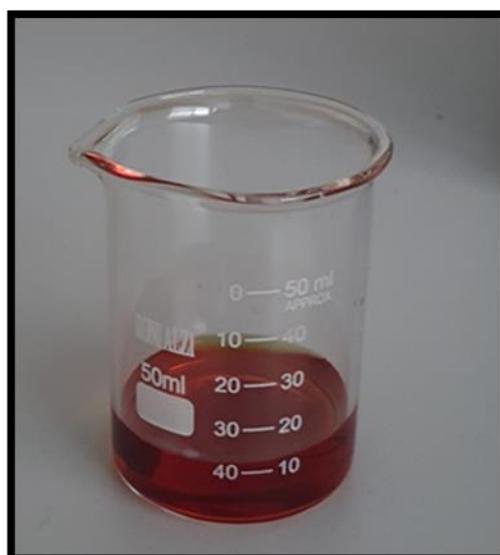
Para a parte experimental foram preparadas duas soluções: a primeira resulta no nitrato de ferro nona hidratado, a segunda uma mistura de ácido oxálico com ferricianeto de potássio. Após o preparo das soluções, as mesmas foram misturadas em volumes iguais.

Figura 17: Balão volumétrico com a solução alaranjada é a solução de nitrato de ferro nona hidratado. Balão volumétrico com a solução amarelo é a solução em mistura do ácido oxálico com o ferricianeto de potássio.



Fonte: O Autor.

Figura 18: No Becker de 50 ml encontra a mistura das duas soluções resultando nessa coloração.



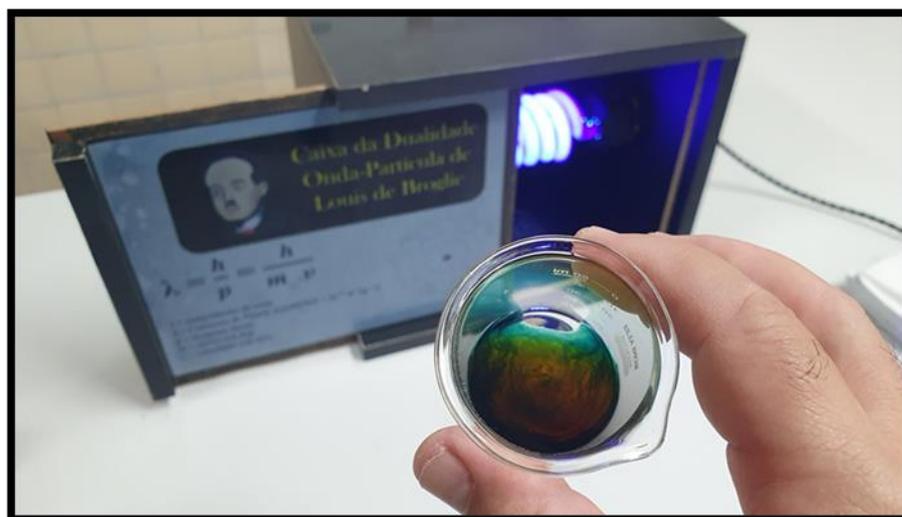
Fonte: O Autor.

Figura 19: Vista da solução já misturada dentro da caixa com a lâmpada negra acesa.



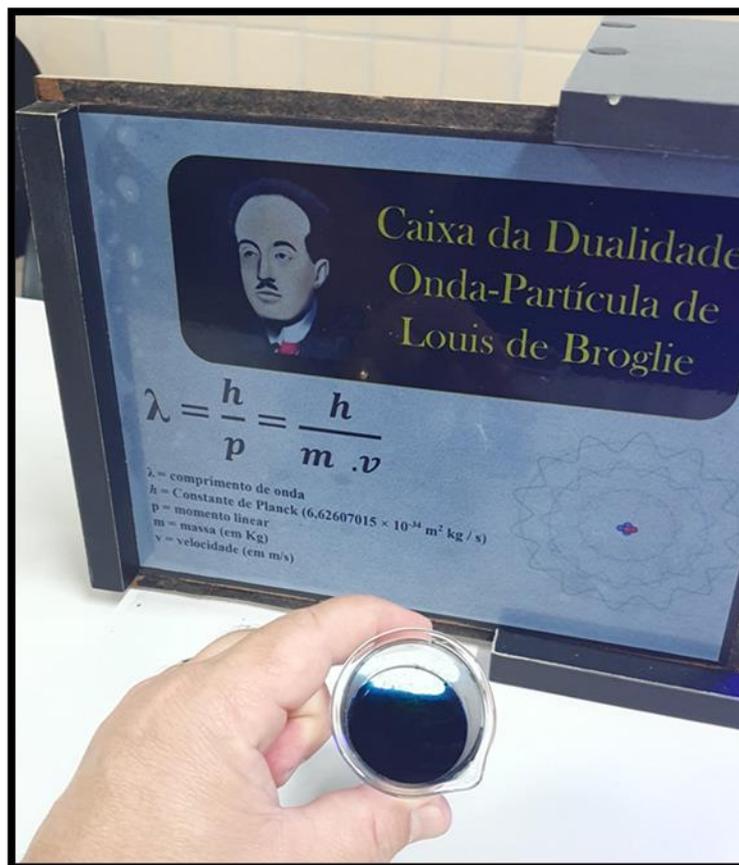
Fonte: O Autor.

Figura 20: Vista do início da precipitação e formação do Azul da Prússia.



Fonte: O Autor.

Figura 21: Vista do final da precipitação com a formação total do Azul da Prússia.



Fonte: O Autor.

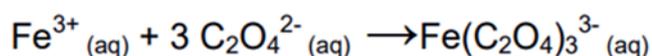
Figura 22: Comprovação efetiva do experimento, utilizando a caixa.



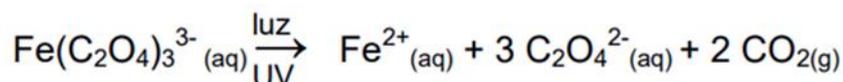
Fonte: O Autor.

Explicação do Experimento

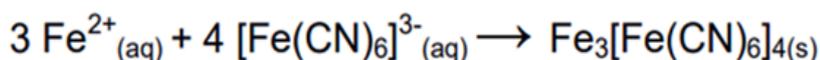
O experimento é explicável pelas reações de oxirredução que ocorrem sob a influência de uma lâmpada de luz negra (luz ultravioleta), na presença de nitrato de ferro (III) ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) e ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$). Isso se dá porque a mistura da solução de nitrato de ferro com ácido oxálico resulta na formação de um complexo entre eles, de acordo com a reação a seguir:



O ácido oxálico serve como um agente redutor, convertendo íons de nitrato de ferro (III) (Fe^{3+}) em íons de ferro (II) (Fe^{2+}), quando o complexo é exposto à luz ultravioleta, resultando na formação de duas moléculas de dióxido de carbono.



A redução do ferro seria muito difícil de perceber se não houvesse o ferricianeto de potássio. O ferricianeto não reage com o ferro (III) inicial, porém reage com o ferro (II), formando um pigmento de coloração azul intensa.



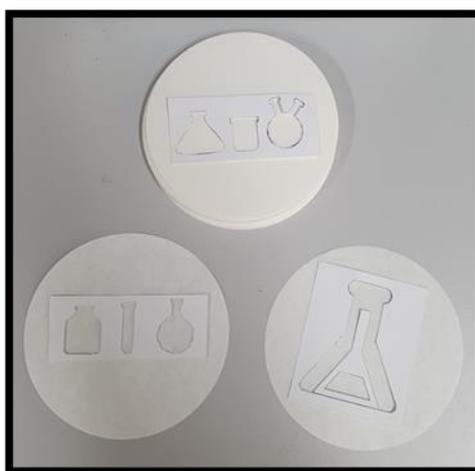
O aparecimento da pigmentação azul da Prússia é um caso especial, porque esse fenômeno deve-se a troca de carga que ocorre entre os íons de ferro no estado de oxidação +2 (dos ligantes, $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$) e os que se encontram no estado de oxidação +3 (íons centrais).

Este experimento ilustra como a luz pode influenciar reações químicas, especialmente em sistemas que envolvem íons metálicos e ácidos orgânicos.

A luz negra é utilizada para destacar reações que não são visíveis à luz normal, permitindo uma análise mais detalhada das transformações químicas que ocorrem.

Após realizar a experimentação, utilizamos a técnica de estêncil para pintar imagens de vidrarias dentro da caixa. Essa técnica envolve o uso de um molde vazado para aplicar um desenho em uma superfície distinta. Os moldes podem ser confeccionados com materiais diversos, como plástico, papel, metal ou acetato. Também é possível criá-los manualmente a partir de qualquer material que seja fácil de manusear e cortar, permitindo montar os moldes vazados com as imagens de preferência.

Figura 23: Moldes dos estêncis cortados e colocados sobre papel filtra qualitativo de 12,5 cm.



Fonte: O Autor.

Figura 24: Aplicação das soluções no molde estêncil com as imagens de um balão de fundo chato, um tubo de ensaio e um frasco reagente.



Fonte: O Autor.

Figura 25: Resultado da Aplicação das soluções no molde estêncil com as imagens de um balão de fundo chato, um tubo de ensaio e um frasco reagente. Toda parte em azul corresponde ao precipitado Azul da Prússia.



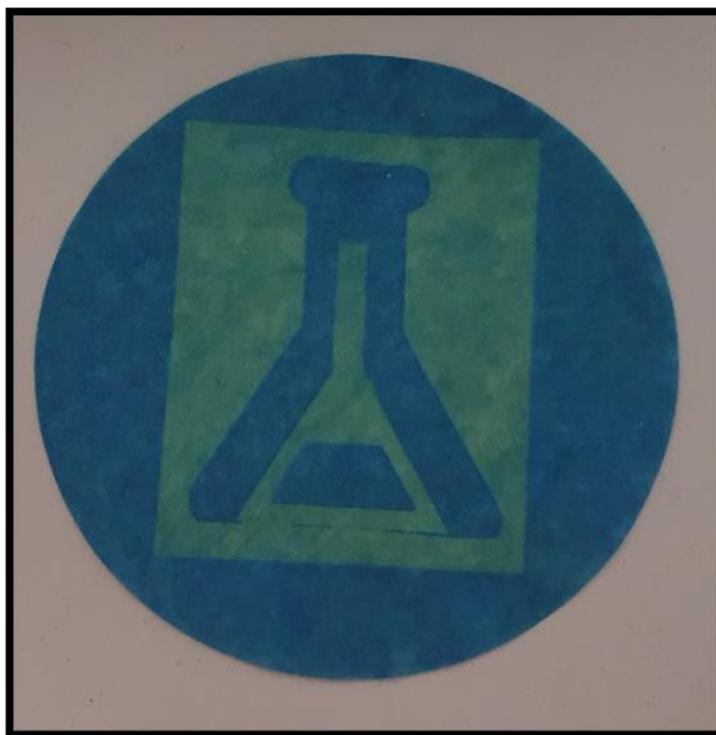
Fonte: O Autor.

Figura 26: Aplicação das soluções no molde estêncil com a imagem de um erlenmeyer.



Fonte: O Autor.

Figura 27: Resultado da Aplicação das soluções no molde estêncil com a imagem de um erlenmeyer. Toda parte em azul corresponde ao precipitado Azul da Prússia.



Fonte: O Autor.

O Fator Histórico, Aliado à Experimentação Química

É fundamental que os estudantes tenham acesso a uma metodologia de ensino organizada e alinhada com a cronologia dos eventos históricos da Química. Isso possibilitará a eles conectar o conteúdo aprendido com suas vivências, considerando a realidade sociocultural e econômica em que vivem. Dessa forma, poderão reconhecer a importância do conhecimento científico para a sociedade e entender a relevância da História da Química na construção de uma base educacional robusta e em harmonia com os princípios educacionais modernos. Afinal, o campo da Química é frequentemente associado à realização de experimentos, seja para o avanço de pesquisas inovadoras que buscam ampliar o conhecimento existente ou para confirmar e ilustrar saberes já estabelecidos.

Nesse contexto, a importância do conteúdo histórico dos fatos científicos na disciplina de Química, juntamente com a experimentação, é fundamental por várias razões:

- 1. Contextualização e compreensão:** Compreender como certos conceitos e teorias químicas foram desenvolvidos ao longo da história proporciona um contexto mais profundo para os estudantes. Isso não apenas enriquece seu entendimento, mas também mostra como o conhecimento científico evoluiu ao longo do tempo.
- 2. Motivação e inspiração:** Conhecer as histórias por trás das descobertas científicas pode motivar os alunos, mostrando-lhes que a ciência é um processo dinâmico e humano. Isso pode inspirá-los a se interessar mais pela disciplina e até mesmo a considerar carreiras na área.
- 3. Desenvolvimento do pensamento crítico:** Analisar como os cientistas do passado formularam suas hipóteses, conduziram experimentos e chegaram a conclusões pode ajudar os alunos a desenvolver habilidades críticas de pensamento. Eles aprendem a questionar, avaliar evidências e formular ideias próprias de maneira mais informada.
- 4. Correção de concepções equivocadas:** Compreender a história da ciência pode ajudar os alunos a corrigir concepções errôneas ou simplificações excessivas que possam ter adquirido. Por exemplo, entender como modelos atômicos evoluíram ao longo do tempo pode ajudar a desfazer ideias incorretas sobre como os átomos realmente funcionam.
- 5. Conexão com outras disciplinas:** A história da ciência frequentemente se entrelaça com desenvolvimentos em outras áreas do conhecimento, como filosofia, política e tecnologia. Isso permite aos alunos fazer conexões interdisciplinares mais amplas e entender como a ciência se relaciona com o mundo ao seu redor.
- 6. Ética e responsabilidade científica:** Estudar a história da ciência também levanta questões éticas e sociais importantes. Os alunos podem refletir sobre como o conhecimento científico é usado e as responsabilidades que os cientistas têm para com a sociedade.

Resumidamente, a integração do conteúdo histórico com a prática experimental em Química enriquece o aprendizado dos estudantes e os capacita a se tornarem cientistas críticos e bem-informados, contribuindo significativamente para o progresso da ciência. Assim, é essencial estudar a história da Química e incluir experimentos práticos, cabendo ao professor estimular o interesse dos alunos nessa matéria, muitas vezes percebida como complexa e abstrata.

REFERÊNCIAS

A. Abragam. (1987). "Louis Victor Pierre Raymond de Broglie". 34 (Memórias Biográficas dos Companheiros da Royal Society ed.): 22–41. DOI:10.1098/rsbm.1988.0002.

Adrien Vila-Valls. Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925- 1960). Autre [cond-mat. other]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. Français.

BACCIAGALUPI, G.; VALENTINI, A. (2006). *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press.

CHAVES, L. M. M. P.; SANTOS, W. L. P.; CARNEIRO; M. H.S. História da Ciência no Estudo de Modelos Atômicos em Livros Didáticos de Química e Concepções de Ciência. **Química Nova na Escola**, São Paulo-SP, BR. V. 36, n. 4, p. 269-279, 2014.

DARRIGOL, Olivier. (2003). *Quantum theory and atomic structure, 1900-1927*, In: *The Cambridge History of Science*, vol. 5, *The modern physical e mathematical sciences*, Edited by Mary Jo Nye, Cambridge University Press, p.331-349.

DE BROGLIE, L. (1927B). The new dynamics of quanta. In: BACCIAGALUPI, G.; VALENTINI, A. *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press, 2006, p.374-407.

DE BROGLIE, L. (1960). *Non-Linear Wave Mechanics, A Causal Interpretation*, traduzido por Arthur J. Knodel e Jack C. Miller, do original *Une Tentative D'interprétation Causale et non Linéaire de la Mécanique Ondulatoire (La théorie de la double solution)*, 1956.

DE BROGLIE, L. (2004). *On the Theory of Quanta. Tradução de Recherches sur la Théorie des Quanta*, 1925. Ann. de Phys., 10a série, t.III, por A. F. Kracklauer. Disponível no site da Fundação Louis de Broglie (http://www.ensmp.fr/aflb/LDB-oeuvres/De_Broglie_Kracklauer.pdf)

GALIAZZI, M. C. et al. Objetivos das Atividades Experimentais no Ensino Médio: A pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, 2001.

GIORDAN, M. O Papel da Experimentação no Ensino de Ciências. **Química Nova na Escola**, 1999.

GUIMARÃES, **Experimentação no Ensino de Química: Caminhos e Descaminhos Rumo à Aprendizagem Significativa**. Vol. 31, Nº 3, p.148, 2009.

HANSON, N. R. Observação e interpretação. In: MORGENBESSER, S. (Org.). **Filosofia da Ciência**. São Paulo: Cultrix, 1975. p. 128-136.

LUFFIEGO, M. et al. Epistemologia, caos y enseñanza de las ciencias. **Ensenanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 12, n. 1, p. 89-96, 1994.

MACHADO, P. F. L.; MÓL, G. S. Experimentando Química com Segurança. **Química Nova na Escola**, Nº 27, p. 57-60, 2008.

MACHADO, A. H. Aula de química: discurso e conhecimento. 2.ed. Ijuí: Ed. Unijuí, 2004.

MARTINS, R. A. **Introdução: A história das ciências e seus usos na educação**, 2004.

MORTIMER, E. F.; SCOTT, P. H. Atividade discursiva nas salas de aula de ciências: uma ferramenta sociocultural para analisar e planejar o ensino. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 7, 2002.

NEY, Mary Jo. Aristocratic culture and the pursuit of science: the De Broglies in modern France. *Isis* 88: 397-421, 1997.

OLIVEIRA, J. R. S. A perspectiva sócio-histórica de Vygotsky e suas relações com a prática da experimentação no ensino de Química. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 25-45, 2010.

OLIVEIRA, Contribuições e abordagens das atividades experimentais no ensino de ciências: reunindo elementos para a prática docente. **Acta Scientiae** v. 12 n.1 p.139-153 jan./jun. 2010.

ROSA, P. **A história da teoria quântica: a dualidade onda partícula de Einstein e de Broglie**. São Paulo: Livraria da física, 2015.

REIS, A. S. et al. O uso da história da ciência como estratégia metodológica para a aprendizagem do ensino de química e biologia na visão dos professores do ensino médio. **Revista História da Ciência e Ensino**. PUC-SP, Brasil. V. 5, 2012, p. 1-12.

SANTOS, W. e SCHNETZLER, R.P. **O que significa ensino de Química para formar o cidadão? Química Nova na Escola**, n. 4, p. 29, 1996.

SILVA, **A importância da experimentação no ensino de química e ciências. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista – UNESP**. Bauru 2016.

SILVA, A. M. DA. Proposta para tornar o ensino de Química mais atraente. **Ver. Quim. Ind**, v. 711, n. 7, 2011.

SCHNETZLER, R. P. A pesquisa em ensino de química no Brasil: conquistas e perspectivas. **Química nova**, v. 25, n. supl. 1, 2002.

