

**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.

APRESENTAÇÃO

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, a prática da experimentação, bem organizada, podem ser úteis às necessidades de melhoria no processo de ensino-aprendizagem.

Acreditamos que integrar a prática experimental à teoria pode expandir a compreensão dos alunos em relação a um conteúdo específico, despertando sua curiosidade e interesse pelo aprendizado. Isso ocorre porque a prática oferece uma interação mais profunda com o conteúdo, o que enriquece a experiência educacional.

Embora a Teoria Quântica seja pouco explorada no ensino médio, principalmente na parte de atividades experimentais, atualmente ela integra o currículo do novo ensino médio em Pernambuco, incentivando a disseminação de mais informações sobre o renomado cientista Louis de Broglie e o conceito da dualidade onda-partícula aos professores de Química e estudantes.

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).

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.

Grato, Luciano da Nóbrega Azevedo.

LOUIS DE BROGLIE

Era um francês aristocrático
com foco na luta e diplomacia
Da política e ciência não fugia
Pois vou fazer um grande relato
Trilhou seus caminhos e foi exato
Foi um estudante espeto surreal
De pesquisas e fatos excepcional
Se errou, refez com fervor e atenção

Com a influência do seu amigo e irmão

FOI UM GENIO da FISICA EXPERIMENTAL

Foi um jovem que buscou e defendeu
A influencia do estudo da lei dualista
Era um físico, um poeta e um artista
Que sua pesquisa a todos surpreendeu
A Europa, pois o mundo inteiro entendeu
Seu gesto de cientista e homem ovacional
Seu nome foi clamado ao povo ocidental
Sem fugir das ideias, estudo e tradição

Com a influência do seu amigo e irmão

FOI UM GENIO da FISICA EXPERIMENTAL

Foi gênio no passado e é no presente
Para aqueles que buscam entender
Se estudarem vão se surpreender
Com a pesquisa deste inteligente
Que mostrou ser bastante competente
Sem fugir do clássico tradicional
Defendeu a ciência a ética e moral

Apresentou seu doutorado para nação, e
Com a influência do seu amigo e irmão
FOI UM GENIO da FISICA EXPERIMENTAL

A física quântica sempre agradece
Pelo esforço de estudo e pesquisa
Mestre, doutor que estuda e analisa
Se debruça, se esforça e permanece
Quem busca DE BROGLIE não esquece
Dos exemplos quânticos, químico e natural
Sua defesa foi para mundo físico e moral
Uma profunda e dura compreensão

Com a influência do seu amigo e irmão
FOI UM GENIO da FISICA EXPERIMENTAL

DE BROGLIE e o Doutor Azevedo
Tem em si alguma semelhança
Pode ate ter quem tenha discordância
Falo, aprovo sem qualquer segredo
que física e a química vou sem medo
DE BROGLIE na física foi e é real
E AZEVEDO na química é especial
Da França para o Brasil compreenderão

Com a influência do seu amigo e irmão
FOI UM GENIO da FISICA EXPERIMENTAL

Poesia de Cícero Carlos Mendes em homenagem a Louis de Broglie e ao meu orientador o Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto.

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).

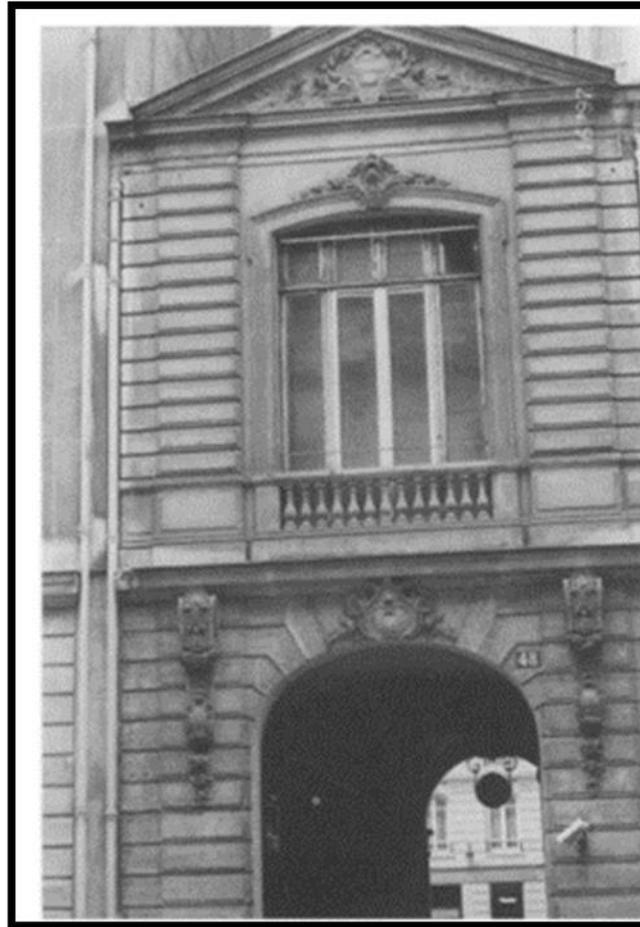
Devido ao hábito de viajar entre os nobres, era costume contratar um tutor para que a educação dos filhos não fosse interrompida quando a família se mudasse de um local para outro. Do final do século XVIII a meados do século XX, a presença de funcionários britânicos era comum nas famílias francesas de 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.



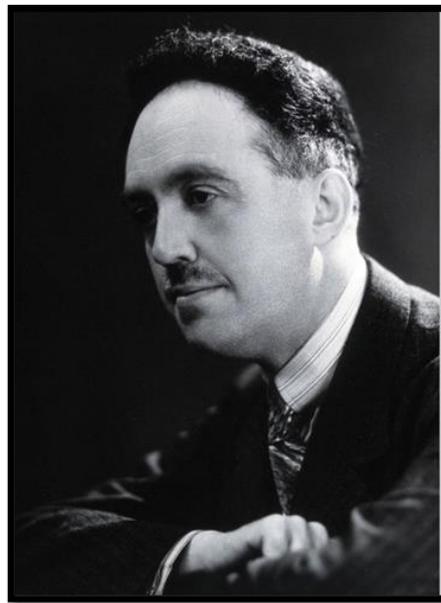
Fonte: (Ney, 1997, p. 402) (Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: Nye, Mary Jo (studylib.net))

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.



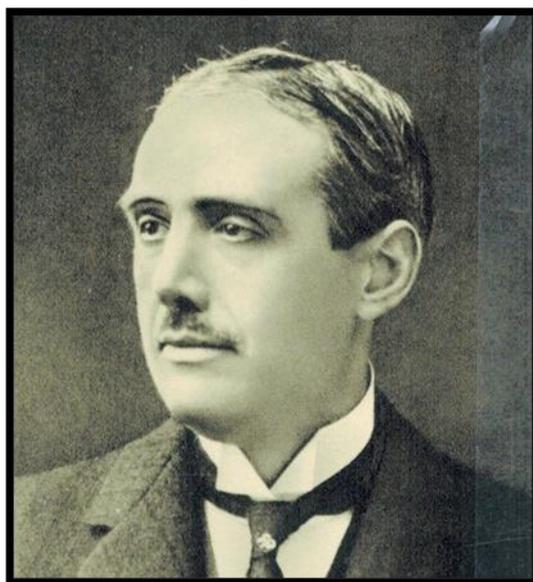
Fonte: futura-sciences (2023, <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-louis-broglie-258/>)

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)

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



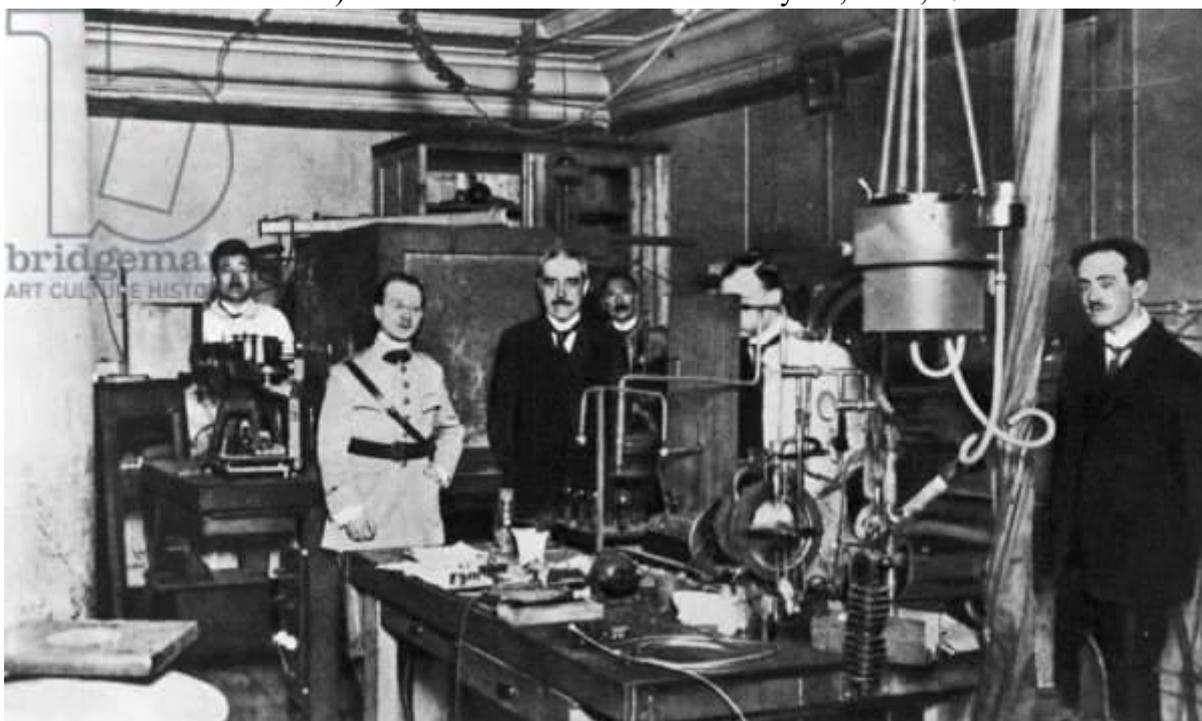
Fonte: philatelie-pour-tous.fr (1970, <https://philatelie-pour-tous.fr/maurice-de-broglie-physicien/>)

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-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 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).

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 Rochetaillée, 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.

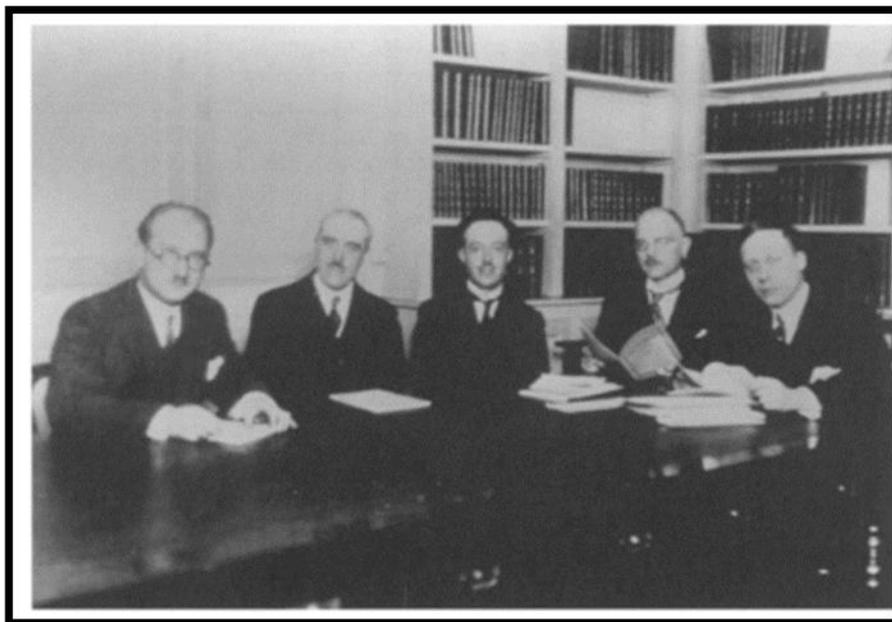
Em 1906, Maurice uniu-se a Paul Langevin e instalou equipamentos em seu laboratório para estudar o movimento browniano das partículas de vapor ionizadas. Ele conseguiu medir a corrente elétrica usando um ultramicroscópio acoplado a uma chama elétrica. Esse é o projeto no qual Robert Millikan trabalhava 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 e passa a dedicar-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 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 9: 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.

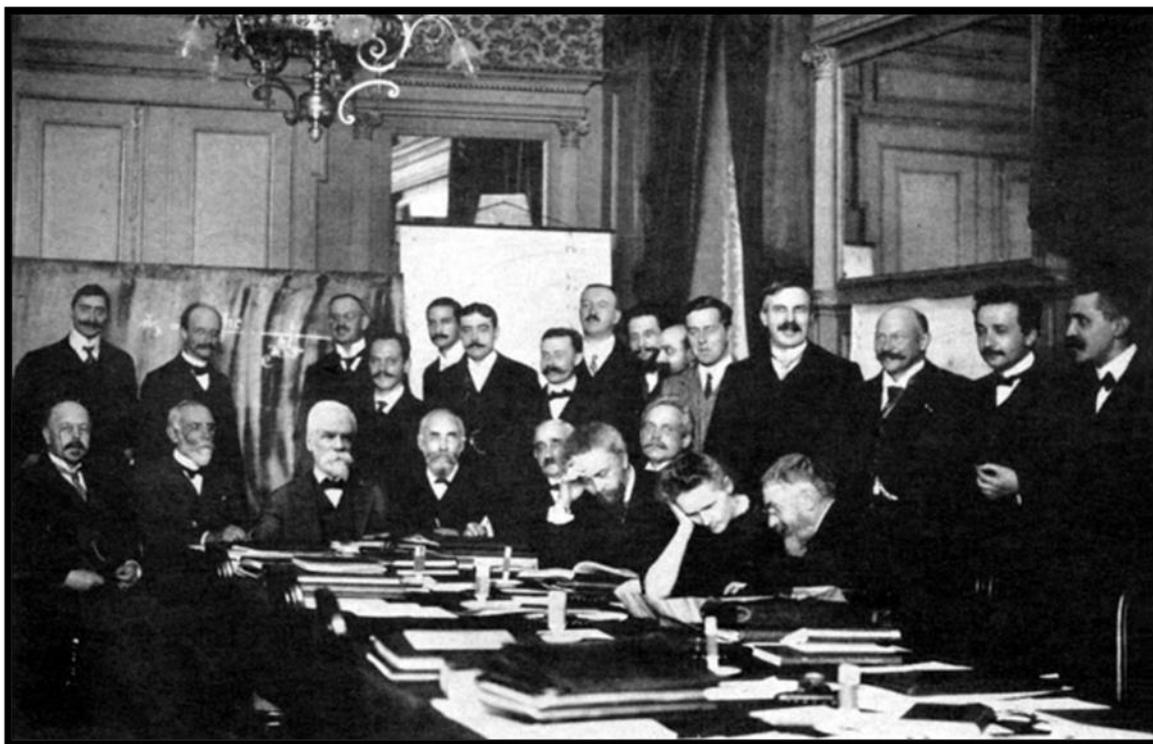
Pauline recordou-se de ter encontrado Louis escondido numa pequena sala repleta de livros de matemática. Ela não tinha certeza se gostara do que vira: "Belíssimo e encantador príncipe, percebi que a minha infância havia desaparecido para sempre. Um mero estudioso que levava uma vida religiosa (Ney, 1997,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

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 Hostenet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Wilhelm Wien, Ernest Rutherford, Marie Curie, 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 Berlim 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. 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 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

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

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

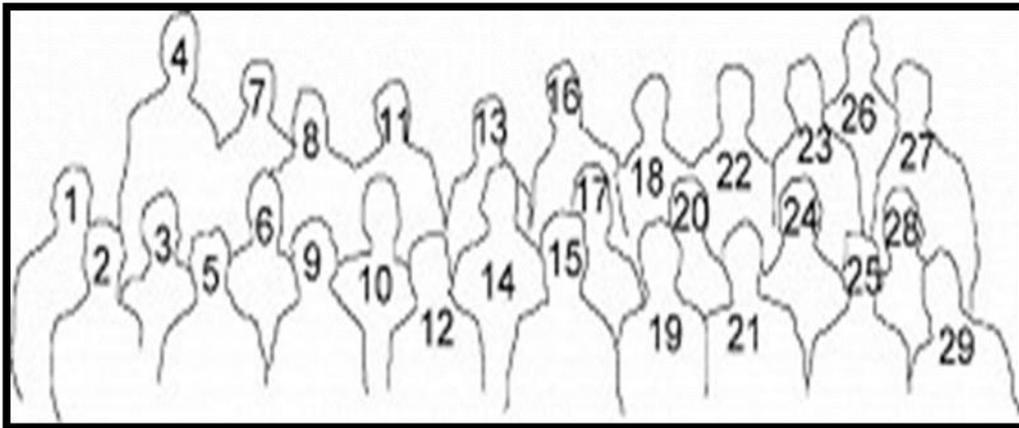
seus jovens discípulos (Heisenberg, Dirac, etc.) certamente apoiaram a nova interpretação puramente probabilística que desenvolveram e não contestaram minha posição. Pauli foi o único que se opôs à minha teoria, e o fez estudando o caso de colisão partícula-rotor que Fermi acabara de estudar (De Broglie, 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).

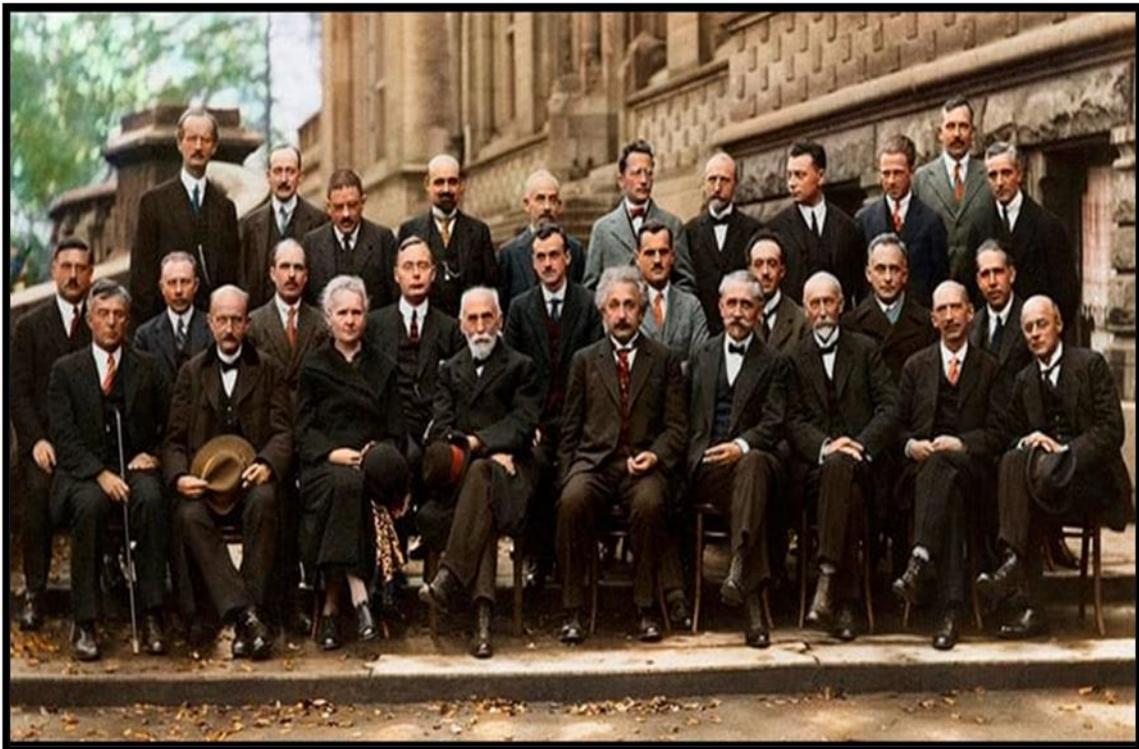
Durante a discussão geral, Pauli continuou a criticar as ideias apresentadas por de Broglie, mas inicialmente concordou que as ideias do físico francês eram compatíveis com a teoria de Born apenas no caso de colisões elásticas, e que os fenômenos de colisão inelástica não haviam sido descritos. Paul 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 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 Magnan, 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).

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 (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.

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.



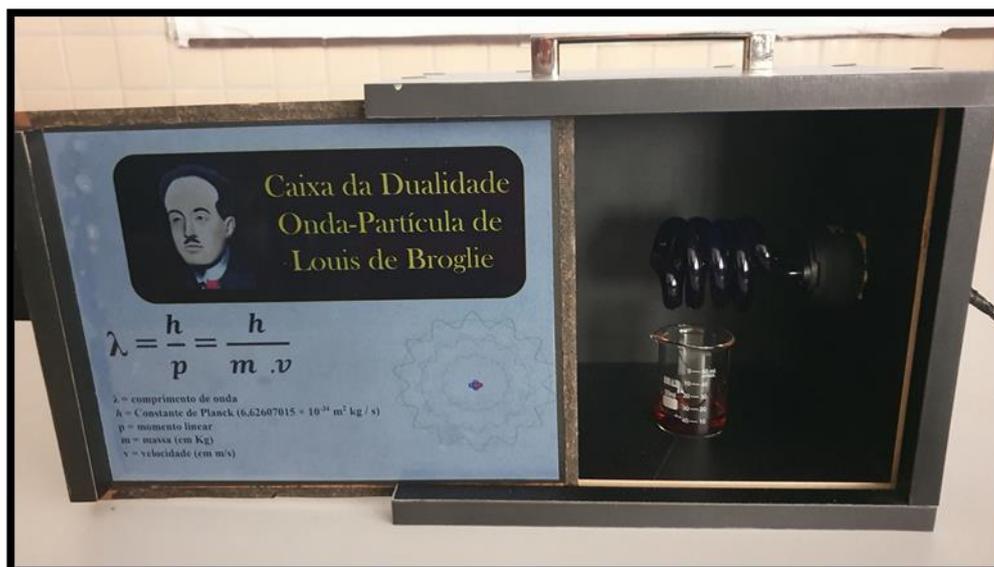
Fonte: O Autor.

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



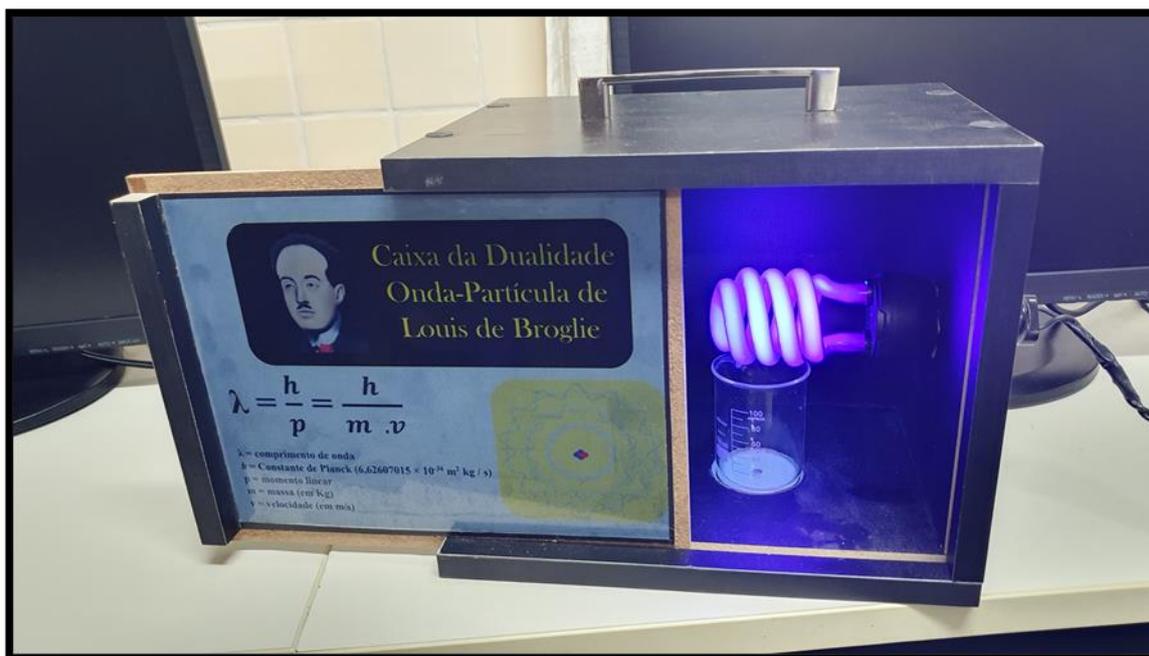
Fonte: O Autor.

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.



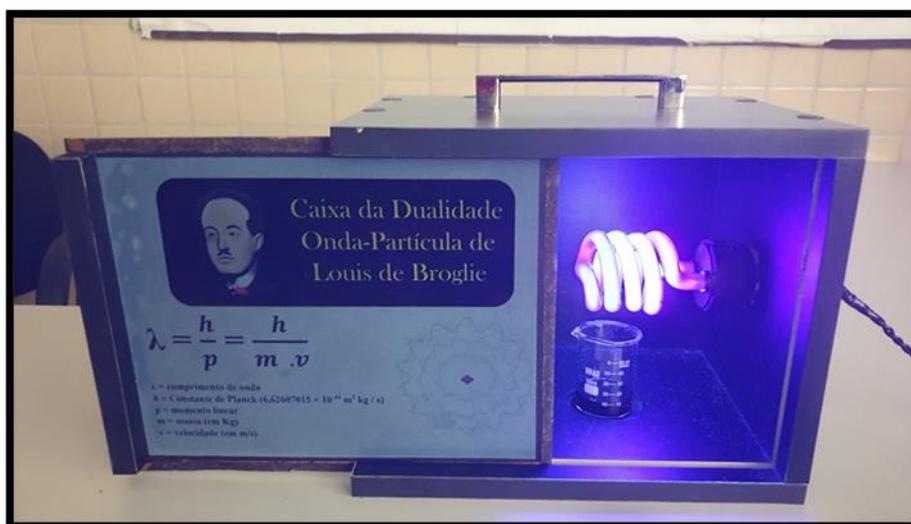
Fonte: O Autor.

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



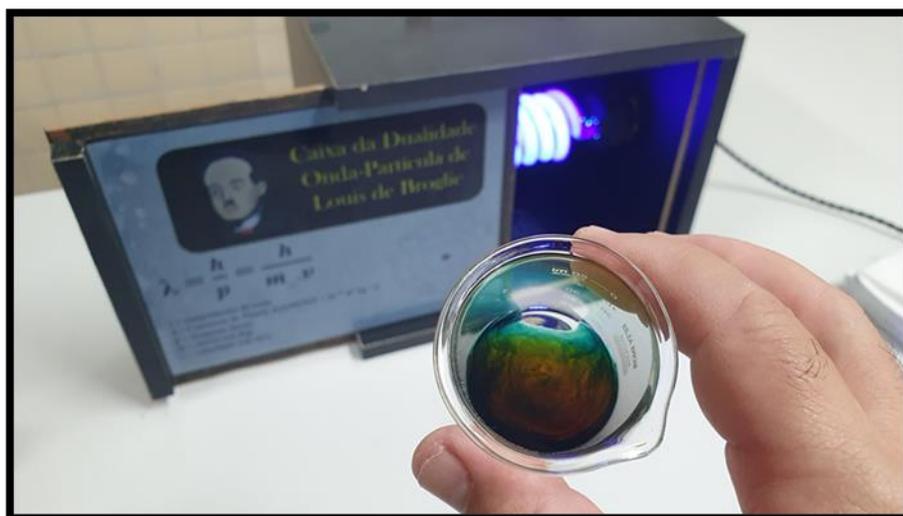
Fonte: O Autor.

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.

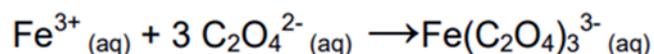
Figura 22: Comprovação efetiva do experimento, utilizando a caixa.



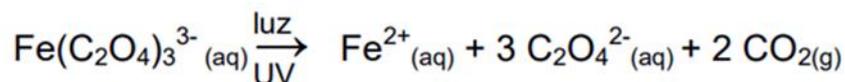
Fonte: O Autor.

Explicação do Experimento

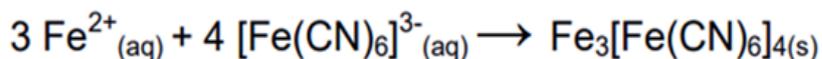
O experimento é explicável pelas reações de oxirredução que ocorrem sob a influência de uma lâmpada de luz negra (luz ultravioleta), na presença de nitrato de ferro (III) ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) e ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$). Isso se dá porque a mistura da solução de nitrato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



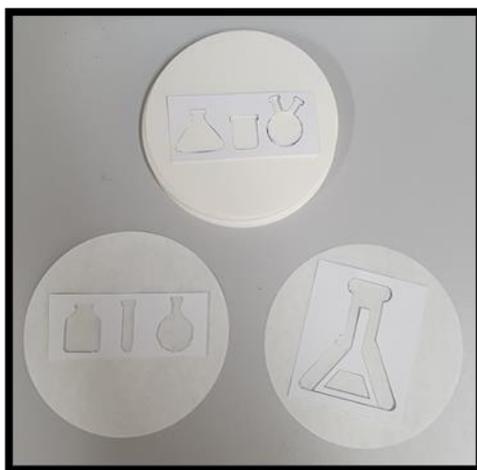
O aparecimento da pigmentação azul da Prússia é um caso especial, porque esse fenômeno deve-se a troca de carga que ocorre entre os íons de ferro no estado de oxidação +2 (dos ligantes, $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$) e os que se encontram no estado de oxidação +3 (íons centrais).

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.



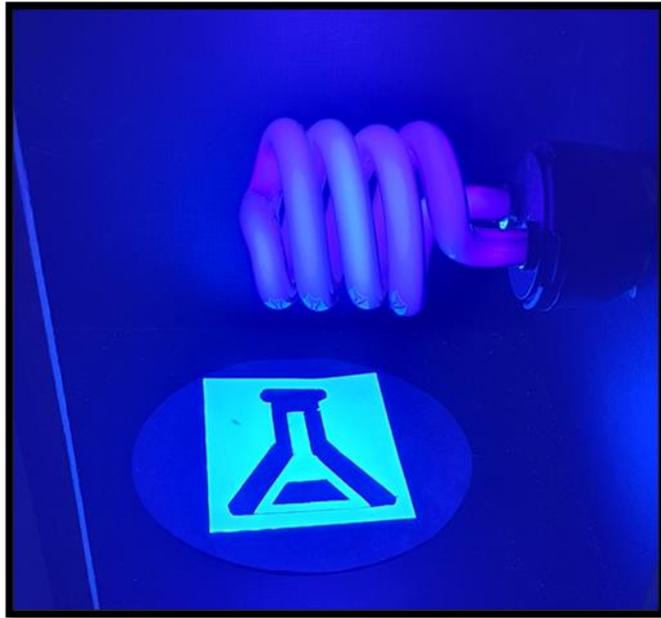
Fonte: O Autor.

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.



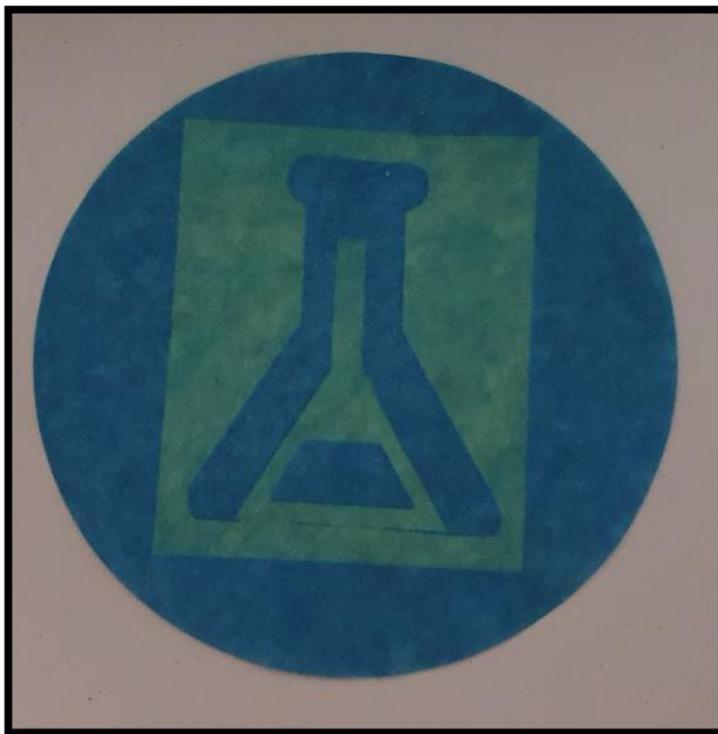
Fonte: O Autor.

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.

Referencias

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 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)

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 a 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.