



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE FÍSICA**

NELSON FERNANDO DA PAIXÃO RIBEIRO

**A TEORIA QUÂNTICA NA VISÃO DE L. DE BROGLIE SOBRE A
DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.**

Belém –2015

NELSON FERNANDO DA PAIXÃO RIBEIRO

**A TEORIA QUÂNTICA NA VISÃO DE L. DE BROGLIE SOBRE A
DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado à Disciplina de TCC, do
Curso de Graduação em Física da Universidade Federal do Pará.

ORIENTADOR: PROFESSOR DR. RUBENS SILVA

BELÉM
OUTUBRO DE 2015

NELSON FERNANDO DA PAIXÃO RIBEIRO

**A TEORIA QUÂNTICA NA VISÃO DE L. DE BROGLIE SOBRE A
DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como pré-requisito de obtenção do título de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Pará, submetida à aprovação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Orientador:

Prof. Dr. Rubens Silva

Examinador 1:

Prof. Dr. Klaus Cozzolino

Examinador 2:

Prof. Espec. Ubiracir Barbosa

Belém, 05 de outubro de 2015

Dedico este trabalho à meus amados pais, Fernando Martins Ribeiro (In Memoriam) e Elizabeth Sinfônio da Paixão por sempre terem incentivado este momento.

E a minha querida esposa (Tathiane) pela tolerância devido à ausência e companheirismos durante todos esses anos de formação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por ter me dado o dom da vida e realizar mais essa etapa primordial da minha vida.

À meus pais, Fernando Martins Ribeiro (In memoriam) e Elizabeth Sinfrônio da Paixão, pela dedicação e o esforço empregado em minha educação com incentivos constantes.

Ao meu orientador, professor Dr. Rubens Silva, por ter acreditado no trabalho e pelo empenho.

Aos professores que irão analisar este trabalho e a todos aqueles que participaram direta e indiretamente dele.

À minha família pelo grande apoio e incentivo, em especial a minha esposa Tathiane Palhares Ribeiro, Filhos Maria Eduarda Palhares Ribeiro e João Victor Palhares Ribeiro por quem me dediquei ao máximo para este momento.

À meus irmãos Nelma Fabrícia da Paixão Ribeiro e Nielson Fernando da Paixão Ribeiro pelo apoio e incentivo constante.

À todos aqueles que participaram da minha educação e do meu crescimento pessoal e profissional.

À todos os amigos e em especial a André Luiz, Elder Augusto, Márcio Antonio, Hélio Oliveira, ao professor José Ciríaco e demais professores, da universidade por todos estes anos de graduação.

E a todos que utilizarão este trabalho.

Muito obrigado.

“Todo aquele que se dedica ao estudo da ciência chega a convencer-se de que nas leis do Universo se manifesta um Espírito sumamente superior ao do homem, e perante o qual nós, com os nossos poderes limitados, devemos humilhar-nos”.

Albert Einstein.

SUMÁRIO

RESUMO	9
PALAVRAS-CHAVE:	9
Abstract	10
KEYWORDS:	10
INTRODUÇÃO	11
CAPÍTULO I	13
1 – OS PRIMEIROS PASSOS PARA A CONSTRUÇÃO DA TEORIA DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.	Erro! Indicador não definido.
1.1- O Início do Interesse Louis de Broglie pela Física	14
1.2 –Os Primeiros Trabalhos de Broglie.	Erro! Indicador não definido.
CAPITULO II	Erro! Indicador não definido.
O APOIO ÀS IDEIAS DE DE BROGLIE.	Erro! Indicador não definido.
CAPITULO III	Erro! Indicador não definido.
EXPERIMENTOS QUE COMPROVARAM A TESE DAS ONDAS DE MATÉRIA	24
CAPITULO IV	Erro! Indicador não definido.
O RECONHECIMENTO CIENTÍFICO DE LOUIS DE BROGLIE.	28
CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. – 1º Conselho de Solvay em 1911. Fonte: CRQ-IV.....	17
Fig. 2. – Clinton Joseph Davisson (esquerda) e Lester Halbert Germer.....	18
Fig. 3. – Fotografia de difração de elétrons em um filme de ouro.....	25
Fig. 4. – Aparelhagem experimental de Davisson e Germer.....	25

RESUMO

Neste trabalho, procuramos mostrar a visão de Louis de Broglie sobre a dualidade onda-partícula no contexto da recém-criada física quântica. Não faremos uso da linguagem matemática avançada, mas explanaremos as idéias fundamentais que nortearam a intuição de Louis de Broglie numa época em que nem um único fato conhecido fundamentava esta teoria.

PALAVRAS-CHAVE:

Física quântica, onda de matéria, dualidade, onda-partícula.

ABSTRACT

In this paper, we try to show the vision of Louis de Broglie on the wave-particle duality in the context of the newly established quantum physics. We will not make use of advanced mathematical language, but to explain the fundamental ideas that guided the Louis de Broglie intuition in a time when not a single known fact grounded this theory.

KEYWORDS: Quantum physics, matter wave, dual wave-particle.

INTRODUÇÃO

Quando se fala em teoria quântica, dualidade onda-partícula, quanta, etc., o que geralmente vem à mente é o nome de Max Planck com a sua proposta de quantização da energia e Einstein com o efeito fotoelétrico. Talvez por que Max Planck tenha rompido com a visão clássica da física e Einstein por ter obtido fama mundial com a teoria da relatividade na mesma época em que apresentou a teoria do efeito fotoelétrico. No entanto, há outro personagem na história da física quântica que deveria ser lembrado com mais destaque por ter enxergado a natureza da matéria de forma muito mais intrínseca se comparado a Max Planck e Einstein. Refiro-me, a Louis de Broglie, o qual vislumbrou a matéria de forma geral, não somente o elétron ou luz, como dual onda-partícula. Estes fatores foram fontes inspiradoras para a elaboração deste trabalho.

Neste trabalho tentaremos apresentar informações relacionadas ao desenvolvimento da teoria quântica na visão de Louis De Broglie da teoria dual onda-partícula, objetivando esclarecer certas dúvidas com relação à autoria dessa teoria, bem como os eventos que o levaram a se dedicar pelo estudo da física quântica. Desta forma, acreditamos que todas as informações aqui analisadas sejam justificadas para melhor entendimento sobre o assunto mencionado, elevando assim um conhecimento mais específico acerca da proposta deste trabalho.

Para melhor entendimento deste trabalho, o mesmo foi organizado nos seguintes capítulos:

- No **Capítulo 1** apresentamos um breve histórico da física quântica iniciando na proposta de Max Planck, passando pela teoria fotoelétrica de Einstein até culminar com as ideias da dualidade da matéria de Louis de Broglie. Também, explanaremos o início do interesse de De Broglie pela física, principalmente pela recém-criada física quântica. Analisaremos os seus trabalhos iniciais publicados no período compreendido entre 1923 a 1924. E, por fim, comentaremos o apoio que sua teoria obteve.

- No **Capítulo 2**, discutiremos a comprovação da teoria de De Broglie através do da difração do elétron por uma rede cristalina, experimento proposto pelo próprio De Broglie, bem como, o seu reconhecimento científico e seus principais prêmios.

CAPÍTULO I

1. BREVE HISTÓRICO DA FÍSICA QUÂNTICA

O cientista escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) propôs a teoria de que a luz seria constituída por ondas eletromagnéticas. Assim, radiações visíveis e invisíveis distinguir-se-iam por possuírem frequências diferentes.

Essa nova forma de entender a luz explicava muitos fenômenos. Porém, um continuava um mistério: por que, ao ser aquecido, um ferro primeiro irradia luz vermelha, depois amarela e finalmente branca? Para estudar esse comportamento os físicos usavam um pequeno orifício aberto em um corpo oco representando aproximadamente um “corpo negro”. Tal orifício aparecerá negro para corpos em temperaturas usuais, daí o seu nome. No entanto, à medida que a temperatura se eleva o orifício se torna vermelho, depois amarelo e, finalmente, branco.

Então, quando se buscava explicar as leis da radiação do corpo negro, os dados experimentalmente se mostravam incoerentes com a teoria ondulatória de Maxwell.

A elucidação do fenômeno surgiu em 1900, proposta pelo físico e matemático alemão Max Planck (1858-1947), como mero recurso matemático para encontrar uma expressão coerente com a experimentação. Mas o induziu a conclusão revolucionária, que a irradiação de calor não ocorreria na forma de um fluxo constante de energia, mas sim em pequenas porções, chamadas “quanta” (plural de quantum).

Em 1905, Albert Einstein usou a hipótese de Max Planck para explicar os resultados obtidos em seus estudos sobre o efeito fotoelétrico. Ao propor que a energia eletromagnética da luz era quantizada, que se propagava em “pacotes”, ou “quanta” (fótons), Einstein previu que se fossem realizados experimentos para a medição de certos parâmetros do efeito fotoelétrico, os resultados mostrariam que sua hipótese forneceria as previsões corretas. Essas previsões eram:

- 1) Que a energia cinética dos elétrons independeria da intensidade da luz;

- 2) Que existiria uma frequência de corte da luz incidente, abaixo da qual o efeito cessa, não importando quão intensa seja a luz; e
- 3) Que os elétrons seriam ejetados imediatamente, não importando quão baixa seja a intensidade da luz.

Ora, essas três previsões contrariam de modo frontal as previsões clássicas, que partem do pressuposto de que a luz é uma onda eletromagnética, e que, portanto a energia que transporta se distribui continuamente pelo espaço (SILVIO SENO CHIBENI).

A Física estava diante de uma dificuldade. Não se podia abandonar a concepção ondulatória da luz para retomar a concepção corpuscular. Se se fizesse isso, os novos problemas estariam solucionados, mas ressuscitariam outros resolvidos pela teoria ondulatória eletromagnética de Maxwell (difração e interferência da luz, correlações entre os parâmetros ópticos e eletromagnéticos). Ambas as concepções de luz, ondulatória e corpuscular, são requeridas para a explicação da totalidade dos fenômenos (SILVIO SENO CHIBENI).

Planck e Einstein mostraram a natureza corpuscular dos fenômenos de irradiação, até então tratados como ondulatórios. Com o progresso das investigações do comportamento da matéria, os Físicos da época se convenciam cada vez mais do comportamento dual, ora mostrava-se corpuscular ora ondulatório.

Mas coube ao Físico Francês Louis de Broglie a concepção de coexistência de onda e de partícula, a dualidade onda-partícula.

2. PRIMEIROS PASSO DE LOUIS DE BROGLIE

2.1. O Início do Interesse Louis de Broglie pela Física.

Apesar de toda sua fama ter sido construída sobre teorias físicas, Louis-Victor-Pierre-Raymond de Broglie (1892-1987) obteve aos 18 anos de idade o título de Licenciado em História, com um trabalho sobre a História da Idade Média (DE, BROGLIE, 1987,p.33).

Também se interessou pelo estudo do Direito, mas através da leitura de diversas obras científicas passou a se interessar pela Física, principalmente as obras de Henri Poincaré¹. Irmão caçula de Maurice de Broglie onde a partir de 1906 começou a trabalhar com Paul Langevin², e em 1908 defendeu sua tese de doutorado, o contato de muitos anos entre Maurice e Langevin, o que mais tarde Langevin passou a ter grande influência sobre Louis de Broglie.

Seu interesse por ciências começou quando teve acesso aos rascunhos dos trabalhos apresentados no primeiro Conselho de Solvay em 1911 (ver figura1), onde os anais foram editados por Paul Langevin³ (ver figura 2) em colaboração de Maurice de Broglie, seu irmão mais velho, que era um pesquisador amador, um tanto comum na época, principalmente as questões relacionadas à Física Quântica.

A partir de 1911, Louis de Broglie começou a aprofundar seu conhecimento em física, estudando os trabalhos de Henri Poincaré, Hendrik Lorentz, Paul Langevin, Ludwig Boltzmann, Josiah Gibbs, Albert Einstein e Max Planck (MEHRA & RECHENBERG, 1982, vol. 1.2, p. 582).



Figura 1 – 1º Conselho de Solvay em 1911. Fonte: CRQ-IV

Segundo o próprio Louis de Broglie, durante seus estudos de física, interessou-se particularmente pela mecânica analítica e pelas abordagens de Hamilton e

1 Jules Henri Poincaré (1854-1912), matemático, físico e filósofo francês.

2 Paul Langevin (1872 -1946), físico francês.

3 Paul Langevin (1872 -1946), físico francês.

Jacobi, tendo entrevisto a possibilidade de utilizar essas ideias para buscar uma conciliação entre as teorias ondulatória e corpuscular (DE BROGLIE, 1987, PP. 34, 39).

A analogia óptica e mecânica sobre a qual De Broglie insistiu tanto havia sido sugerida pela primeira vez por William Rowan Hamilton, em uma série de trabalhos publicados entre 1828 e 1835 (DARRIGOL, 1993, p.329).



Figura 2 – Paul Langevin. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Paul_Langevin

Logo após receber seu título de licenciado em ciências, em outubro de 1913, ingressou no corpo de engenharia militar francês. Sendo que devido a sua formação científica foi aceito na companhia de radiotelegrafia (DE BROGLIE, 1987, p. 26).

Seu tempo de serviço militar durou cerca de cinco anos, onde foi comandado pelo General Ferrié, o qual era encarregado das comunicações por rádio e valorizava muito o trabalho científico. Durante os cerca de cinco anos e meio que passou trabalhando no serviço de radiotelegrafia militar estabelecido junto à Torre Eiffel, Louis e Maurice, juntamente com Léon Nicolas Brillouin (1889-1979), se dedicaram a aperfeiçoar as técnicas existentes (MEHRA & RECHENBERG, 1982, vol. 1.2, p. 582).

Quando o período dedicado à vida militar chegou ao fim, de Broglie pode finalmente voltar suas atenções para a física e, no início da década de 1920, aprofundou suas pesquisas sobre os raios X e o efeito fotoelétrico. Foi assim que entrou em contato com as então recentes experiências na área da teoria atômica.

2.2. Os trabalhos iniciais

Intrigado com as teorias abordadas por Planck e Einstein e os experimentos realizados por Millikan e Compton, Louis de Broglie observou o fato de que os únicos fenômenos que exibem uma quantização desse tipo são determinados fenômenos ondulatórios, por exemplo, o ar nos tubos de um órgão, e as cordas de um piano, que vibram em determinada frequência.

Os trabalhos dos autores antes mencionados haviam mostrado a radiação eletromagnética tida como uma onda, e que também se comportava como se fosse composta por partículas em alguns casos.



Figura 3: Clinton Joseph Davisson (esquerda) e Lester Halbert Germer. Fonte: UNIVERSIDADE DO ESTADO DE GOIAS

Louis de Broglie resolveu desenvolver sua tese de doutorado com a proposta de que cada partícula (elétron, átomo, etc.) estaria associada a uma “*onda de matéria*” que ditaria parcialmente seu comportamento. Utilizando a mesma equação que Einstein usou para determinar a energia do fóton, onde pela frequência de Broglie determinaria a energia da partícula, $E=hf$.

Os primeiros artigos de Louis de Broglie referentes à teoria quântica foram publicados em 1922. Neste ano, ele publicou dois artigos sobre os quanta de luz, momento em que se preocupou em analisar os mesmos como partículas relativísticas, tentando associar fenômenos ondulatórios com este tipo de modelo. Baseado em sua familiaridade com a espectroscopia de raios X e após troca de informações com seu irmão, ele ficou convencido da natureza dual dos raios X, que em determinados experimentos exibiam um caráter ondulatório, sofrendo

interferência e difração e em outros possuíam um caráter corpuscular por retirar elétrons de uma superfície metálica, mesmo com baixa intensidade.

Em 1923, de Broglie resolveu estender a dualidade onda-partícula para a matéria, particularmente para os elétrons. Esta conjectura foi baseada em duas importantes observações: a primeira estava relacionada às condições de quantização das órbitas eletrônicas no modelo atômico de Bohr-Sommerfeld. Em seu discurso, realizado durante a cerimônia na qual ele recebeu o 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 autovibrações. 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)

A segunda observação estava relacionada a um princípio de simetria:

Já que para a luz existem os aspectos corpuscular e ondulatório unidos pela relação Energia = h vezes a frequência, onde h é a constante de Planck, então é natural supor que, para a matéria existem os aspectos corpuscular e ondulatório, tendo este último sido até então desconhecido. Estes dois aspectos devem ser unidos por fórmulas gerais em que aparece a constante de Planck, e deve conter como caso especial aquelas relações aplicadas para a luz. (DE BROGLIE, 1960, p. 3)

Sua ideias foram publicadas em três notas na revista *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, e também em dois artigos publicados em inglês, um na revista *Nature* e outro na revista *Philosophical Magazine*. Na primeira nota intitulada “*Ondes et quanta*” ele propôs que qualquer partícula teria um fenômeno periódico interno. No referencial de repouso da partícula, de massa de repouso m_0 , o

fenômeno possui frequência $\nu_0 = m_0 c^2 / h$: Ele propôs ainda que as órbitas fechadas são estáveis somente se as ondas fictícias permanecerem em fase com a oscilação interna do elétron. Desta hipótese ele foi capaz de derivar as condições de quantização de Bohr-Sommerfeld (BACCIAGALUPI e VALENTINI, 2006).

A segunda nota, intitulada "*Quanta de Lumière, Diffraction Et Interférences.*", possui um caráter mais conceitual. De Broglie inicia por relembrar os resultados obtidos anteriormente, que o movimento de um corpo deve ser associado a uma onda senoidal não material.

E acrescenta que a velocidade da partícula v é igual à velocidade de grupo da onda, que ele chamava de onda de fase. Ele afirma que o fenômeno da difração prova que os quanta de luz não podem sempre se propagar em linha reta, mesmo naquilo que chamamos de espaço vazio, e com isso ele propõe uma modificação no princípio da inércia (BACCIAGALUPI e VALENTINI, 2006).

Propomos adotar o seguinte postulado como a base da dinâmica de um ponto material livre: em cada ponto de sua trajetória, um corpo movendo-se livremente segue em um movimento uniforme o raio de sua fase, que é (em um meio isotrópico), a normal às superfícies de mesma fase. (DE BROGLIE, 1923, apud BACCIAGALUPI e VALENTINI, 2006, p.40).

Dessa forma, de Broglie estava propondo uma nova dinâmica, pois associar uma onda a cada ponto material, o movimento das partículas deveria ser guiado por esta onda, não obedecendo às leis usuais da mecânica clássica em sua forma newtoniana e relativística. O foco principal desse artigo é de que qualquer corpo em movimento pode sofrer difração:

[...] qualquer corpo em movimento pode, em certos casos, ser difratado. Um feixe de elétrons passando através de uma pequena abertura mostraria o fenômeno de difração. É nesta direção que talvez se verifique a confirmação experimental de nossas ideias. (DE BROGLIE, 1923, apud BACCIAGALUPI e VALENTINI, 2006, p.41)

A terceira nota, intitulada "*Les quanta, La Théorie Cinétique Dês Gaz Et Le Principe de Fermat*", é dividida em duas partes: na parte I, ele considera o tratamento estatístico de um gás de partículas acompanhado por ondas de fase; na

parte II, mostra como o seu novo postulado dinâmico leva a uma unificação do princípio de Maupertius, da ação mínima, ao princípio de Fermat, do tempo mínimo na óptica. Ainda em 1923; de Broglie terminou a redação de um artigo, em inglês, que sintetizava as três notas publicadas na revista *Comptes Rendus* e o submeteu à revista *Philosophical Magazine* com o título “*A Tentative Theory of Light Quanta*” (ROSA, 2004).

Tomando como referência os artigos citados, de Broglie elaborou a sua tese de doutorado que foi defendida em novembro de 1924; na Sorbonne, sob o título “*Recherches Sur La Théorie Des Quanta*” (DE BROGLIE, 2004).

De Broglie se baseou no efeito fotoelétrico para chegar a esta conclusão, já que Albert Einstein havia concluído que os fótons que atuavam no efeito fotoelétrico eram partículas com energia $E = h \cdot f$, onde f é a frequência de onda.

Einstein, concluiu desta forma que, em determinados processos, as ondas se comportam como corpúsculos. Então, de Broglie associou o inverso, ou seja, que toda a partícula se comportava como uma onda. O físico francês foi capaz de relacionar o comprimento de onda com a massa da partícula, mediante a fórmula $\lambda = h/m \cdot v$, onde o produto $(m \cdot v)$ representa o módulo do vetor P, ou quantidade de movimento, h é a constante de Planck, e ' λ ', o comprimento de onda. Observando-se a fórmula verifica-se facilmente que, à medida que a massa ou sua velocidade aumenta, diminui consideravelmente o comprimento de onda. Os corpos macroscópicos tem associada uma onda, porém a massa é tão grande que se pode afirmar que apresenta um comprimento de onda desprezível, porém não nula. Por isso, na hora de falar sobre partículas é muito importante considerar a dualidade, já que o comprimento de onda que possuem explica muitos de seus fenômenos.

3. APOIO AS IDEIAS DE DE BROGLIE

Louis de Broglie apresentou sua teoria primeiramente sob a forma de uma série de artigos publicados em 1923 e 1924 (Roberto de Andrade Martins, p.3, DE BROGLIE, 1923a, 1923b, 1923c, 1923d, 1924a, 1924b, 1924c) os quais culminariam com seu doutorado.

No entanto, para defender sua tese, De Broglie precisava de um orientador, pois não era vinculado a nenhuma universidade. Então, escolheu Paul Langevin.

Langevin foi um físico francês. Estudou na Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, onde foi mais tarde diretor. Costuma-se dizer que a tese de De Broglie só foi aceita pela banca por causa da influência de Einstein sobre Paul Lanvegin. (Olival Freire Jr., Osvaldo Pessoa Jr., Joan Lisa Bromberg, 2011, p 400).

Langevin contou a Einstein sobre o trabalho de De Broglie em julho de 1924 e no dia 27 do mesmo mês pediu a De Broglie que enviasse uma cópia de sua tese (ainda não defendida) a Einstein. No entanto, Einstein não reagiu imediatamente. A tese de De Broglie foi apresentada e aprovada no dia 25 de novembro do mesmo ano. Somente no dia 16 de dezembro, Einstein escreveu cartas para Lanvegin e para Lorentz, elogiando o trabalho o trabalho de De Broglie: “Ele ergueu uma ponta do grande véu”. Só então Langevin resolveu aceitar a tese e foi realizada a defesa. (MEHRA & RECHENBERG, 1982, vol. 1.2, p. 604). No dia 13 de janeiro, Lanvegin escreveu uma carta a De Broglie contando-lhe sobre a opinião de Einstein. (Wheaton, 1983, p. 297).

Na mesma época Einstein estava pesquisando a teoria quântica dos gases. Em um artigo que publicou em fevereiro de 1925, ele comentou que o trabalho de De Broglie poderia ajudar a esclarecer o significado dessa nova teoria. (Olival Freire Jr., Osvaldo Pessoa Jr., Joan Lisa Bromberg, 2011, p 400)

Estimulado pela referência de Einstein ao trabalho de De Broglie, Schrödinger obteve uma cópia da tese e a leu em outubro de 1925. Entretanto, Schrödinger teria dito “tratar-se de lixo”. Langevin em defesa de seu pupilo respondeu: “Eu penso que Schrödinger está errado; ele deve olhá-la novamente”. Certamente Schrödinger reconsiderou sua opinião, pois em novembro do mesmo ano, ele escreveu cartas para Einstein e Landé que mostravam que ele estava muito excitado com ideias de De Broglie. (Roberto de Andrade Martins, p.8, MOORE, 1989, p. 192). Em dezembro de 1925, Schrödinger começou a tentar produzir uma equação de onda a partir da teoria de De Broglie e aplicá-la ao átomo de hidrogênio.

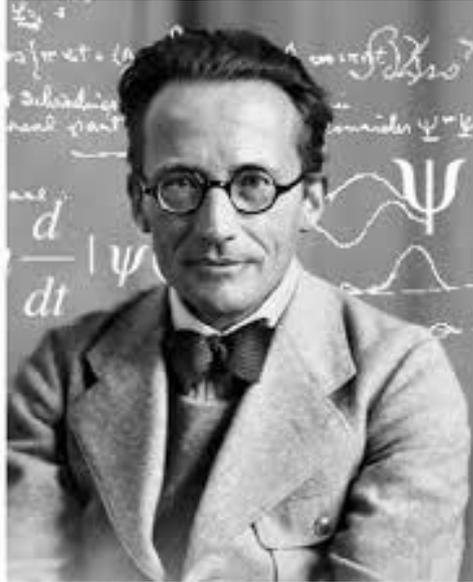


Figura 5: Erwin Schrödinger. Fonte: The Stanford Flipside

CAPÍTULO 2

2.1- EXPERIMENTOS QUE COMPROVARAM A TESE DAS ONDAS DE MATÉRIA.

No dia 25 de novembro de 1924, De Broglie finalmente defendeu sua tese, onde Jean Perin⁴, Paul Langevin, Élie Cartan⁵ e Charles Mauguin⁶ (MACKINNON, 1976), compuseram a banca que examinou a tese de De Broglie, reconhecendo a originalidade de seu estudo, porém não acreditavam na realidade física das ondas de matéria.

Jean Perrin questionou se estas ondas poderiam ser verificadas experimentalmente e de Broglie afirmou que a difração de elétrons poderia ser verificada se cristais fossem utilizados como rede de difração (JAMMER, 1966, p.247). Louis de Broglie sugeriu a Alexander Dauvillier, um dos colaboradores de Maurice de Broglie, que tentasse realizar o experimento de difração de elétrons, mas não o realizou, talvez por estar ocupado com outras pesquisas ou pelo simples fato de não acreditar nas ondas de matéria (BACCIAGALUPI; VALENTINI, 2006 p.54).

Somente em 1927 o experimento de Davisson e Germer mostra, para os elétrons, um comportamento típico de ondas. Na figura 4, analisaremos como foi que Davisson e Germer chegaram a esta conclusão.

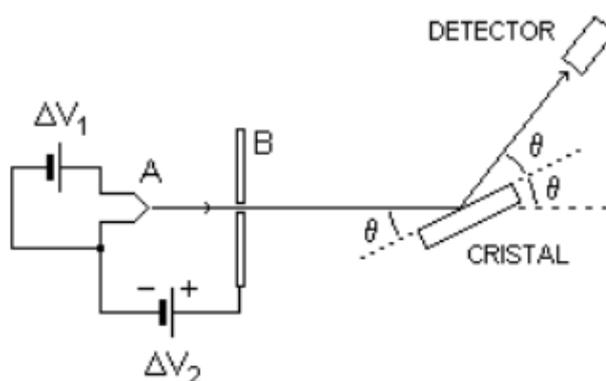


Figura 6 – Esquema simplificado da experiência de Davisson e Germer. Fonte: <http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna06.pdf>

⁴Jean Baptiste Perrin, (1870 - 1942), físico francês.

⁵Élie Joseph Cartan, (1869-1951), matemático francês.

⁶Charles Victor Mauguin, (1878-1958), mineralogista francês, considerado o fundador da escola francesa de cristalografia.

Pois bem, o filamento A, mantido a alta temperatura pela corrente gerada pela diferença de potencial V_1 , emite elétrons (emissão termoiônica). Esses elétrons são acelerados desde o filamento A até a placa colimadora B pela diferença de potencial V_2 (Fig.4). Passando pela placa colimadora, os elétrons, formando agora um feixe estreito, incidem sobre um cristal e são dispersados.

Um detector permite medir a intensidade do feixe de elétrons dispersados em função do ângulo $\varphi = 2\theta$, para diferentes valores da diferença de potencial ΔV_2 , isto é, para diferentes energias dos elétrons incidentes no cristal.

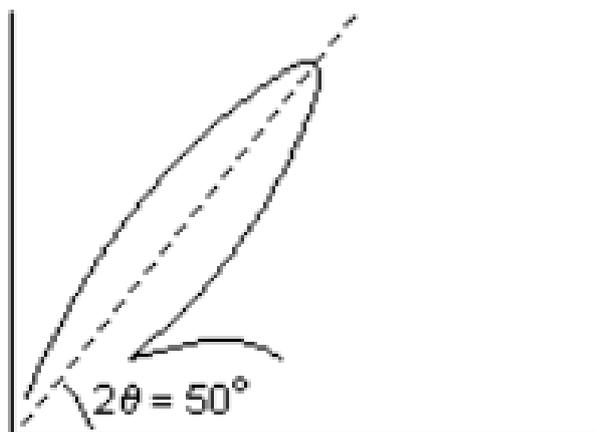


Figura 7 – Diagrama polar da distribuição da intensidade de um feixe de elétrons com energia de 60 eV. Fonte: <http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna06.pdf>

A Figura 5 representa um diagrama polar da distribuição da intensidade de um feixe de elétrons com energia de 60 eV, dispersado por um cristal de níquel. Pela figura, podemos observar que a intensidade do feixe de elétrons dispersados tem um máximo para $2\theta = 50^\circ$.

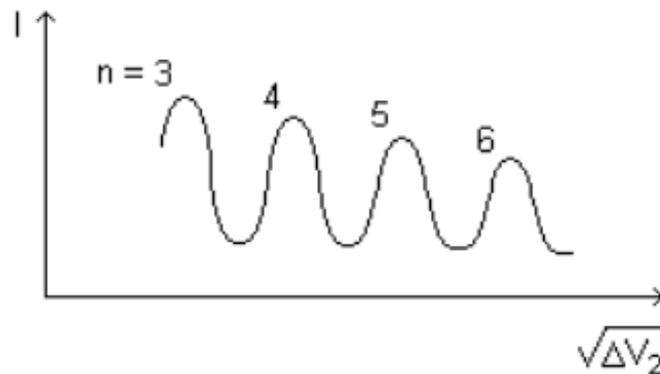


Figura 8 – Resultados de experimentos nos quais a intensidade do feixe de elétrons foi medida para um dado ângulo θ com valores diferentes para a diferença de potencial aceleradora. Fonte: <http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna06.pdf>

A Figura 6 mostra os resultados de experimentos nos quais a intensidade foi medida para um dado ângulo θ , mas com valores diferentes para a diferença de potencial aceleradora. No eixo das abcissas, colocamos a raiz quadrada dessa diferença de potencial para que os máximos e mínimos de intensidade ficassem mais ou menos a mesma distância uns dos outros. Os resultados apresentados nas duas figuras são típicos da distribuição de intensidades da dispersão de ondas. Máximos e mínimos de difração iguais a esses aparecem nos experimentos de Bragg, em que raios x e raios γ são espalhados pelos átomos que constituem um cristal.

O experimento de Davisson e Germer, os elétrons difratados são observados com a mesma geometria dos experimentos de difração de Bragg com raios x . Verificamos, então, que a corrente de elétrons registrada pelo detector é máxima toda vez que é satisfeita a condição de Bragg. Portanto, o experimento de Davisson e Germer mostra, para os elétrons, um comportamento típico das ondas com previsto na teoria de De Broglie. (<http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna06.pdf>)



Figura 9 – Fotografia de difração de elétrons em um filme de ouro, obtida por Thomson e Reid, (adaptado). Fonte: Louis de Broglie e as Ondas de Matéria

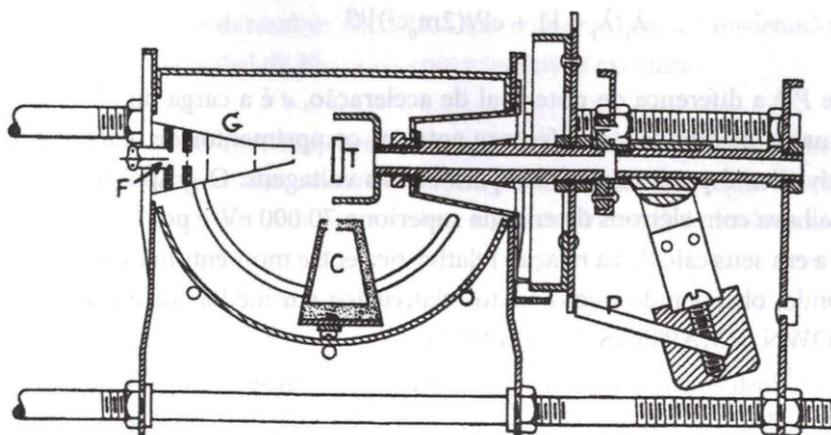


Figura 10 – Corte transversal da aparelhagem experimental de Davisson e Germer. As letras representam: G – disparador de elétrons; T – alvo; C – dupla caixa coletora de Faraday, P – dois pratos que teriam a função de auxiliar na concentração da emissão do filamento, (adaptado).Fonte: Louis de Broglie e as Ondas de Matéria

2.2 - O RECONHECIMENTO CIENTÍFICO DE LOUIS DE BROGLIE.

Em 1927, Clinton Davisson e Lester Germer demonstram experimentalmente a difração de elétrons através de cristais e desta forma confirmaram as ondas de matéria prevista pela teoria da dualidade onda-partícula de De Broglie. Como consequência de Broglie recebe o Nobel de Física em 1929.

Além do Nobel, De Broglie foi agraciado com vários outros prêmios dos quais podemos destacar a Medalha Max Planck em recompensa ao feito extraordinário em física teórica, Prêmio Kalinga por seus esforços em divulgar a ciência para o público leigo.

Após a manutenção de sua tese e, continuando a publicar trabalhos originais sobre a nova mecânica, Louis de Broglie assumiu as funções de ensino. Na conclusão de cursos livres de dois anos na Sorbonne, foi nomeado para ensinar física teórica no Instituto Henri Poincaré, que tinha acabado de ser construído em Paris.

Também foi Eleito membro da Academia de Ciências do Instituto Francês em 1933, sendo Secretário Permanente para ciências matemáticas desde 1942. Foi laureado doutor honorário das Universidades de Varsóvia, Bucareste, Atenas, Lausanne, Quebec, e Bruxelas, e um membro de dezoito academias estrangeiras na Europa, Índia e os EUA.

Até sua aposentadoria, continuou lecionando e ao falecer, em março de 1987, aos 95 anos, em Paris, era considerado um renomado cientista, e membro inquestionável de uma pequena elite de físicos notáveis da França.

2.3 - O RECONHECIMENTO CIENTÍFICO DE LOUIS DE BROGLIE.

Em 1927, Clinton Davisson e Lester Germer demonstram experimentalmente a difração de elétrons através de cristais e desta forma confirmaram as ondas de matéria prevista pela teoria da dualidade onda-partícula de De Broglie. Como consequência de Broglie recebe o Nobel de Física em 1929.

Além do Nobel, De Broglie foi agraciado com vários outros prêmios dos quais podemos destacar a Medalha Max Planck em recompensa ao feito extraordinário em física teórica, Prêmio Kalinga por seus esforços em divulgar a ciência para o público leigo.

Após a manutenção de sua tese e, continuando a publicar trabalhos originais sobre a nova mecânica, Louis de Broglie assumiu as funções de ensino. Na conclusão de cursos livres de dois anos na Sorbonne, foi nomeado para ensinar física teórica no Instituto Henri Poincaré, que tinha acabado de ser construído em Paris.

Também foi Eleito membro da Academia de Ciências do Instituto Francês em 1933, sendo Secretário Permanente para ciências matemáticas desde 1942. Foi laureado doutor honorário das Universidades de Varsóvia, Bucareste, Atenas, Lausanne, Quebec, e Bruxelas, e um membro de dezoito academias estrangeiras na Europa, Índia e os EUA.

Até sua aposentadoria, continuou lecionando e ao falecer, em março de 1987, aos 95 anos, em Paris, era considerado um renomado cientista, e membro inquestionável de uma pequena elite de físicos notáveis da França.

CONCLUSÃO

Como vimos, a teoria quântica teve início com o estudo de Max Planck da radiação do corpo negro. A nova teoria ganhou força com o apoio de Einstein, o qual usou as idéias de Planck para explicar o efeito fotoelétrico. No entanto, nenhum destes Físicos enxergou a existência simultânea do comportamento onda-partícula da matéria. Planck, apesar de ter proposto a quantização da energia, não era adepto da idéia, pois batia de frente com os pilares da física clássica. Já Einstein, acreditava no comportamento dual, mas não na sua coexistente.

Neste trabalho procuramos mostrar que desde o início da Teoria Quântica, na visão de Louis de Broglie, a concepção de dualidade onda-partícula divergia das concepções de Planck e Einstein. Porém, De Broglie, inspirado no artigo de Einstein do efeito fotoelétrico, procurou unificar a física das ondas e a física das partículas. E no final do verão de 1923 as idéias fundamentais da sua teoria eclodiram.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARTINS, Roberto de Andrade, ROSA, Pedro Sérgio. **História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

CRQ-IV - Conselho Regional de Química 4^o Região. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/informativomat_958> Acesso em 18 mar.2015.

Universidade do Estado de Goiás – Experimentos que deram sustentação à Física Moderna. Disponível em: <http://www.unucet.ueg.br/biblioteca/arquivos/monografias/TCC_Ester_final.pdf> Acesso em 18 mar.2015.

Louis de Broglie e as Ondas de Matéria. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/Teses/Pedro-Sergio-Rosa.pdf>> Acesso em 18 mar.2015.

O Surgimento da Física Quântica - Notas de Aula - Silvio Seno Chibeni <<http://www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/fisquantica.pdf>> Acesso em 18 mar.2015.

Notas de Aula – EE300 - Capítulo 2 – Teoria Quântica da Radiação <http://www.dca.fee.unicamp.br/~attux/notas_cap2.pdf> Acesso em 18 mar.2015.

Capitulo 3 - Efeito Fotoelétrico <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03>> Acesso em 18 mar.2015.

Corpo negro <https://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro> Acesso em 18 mar.2015.

Investigação dos Conceitos Quânticos Desenvolvidos Através de Representações Virtuais em Ensino de Física <<http://www.ppgecim.ulbra.br/teses/index.php/ppgecim/article/viewFile/156/148>> Acesso em 18 mar.2015.

LOUIS DE BROGLIE <<http://www.britannica.com/biography/Louis-de-Broglie>> Acesso em 18 mar.2015.

LOUIS DE BROGLIE – BIOGRAPHICAL

<http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-bio.html> Acesso em 18 mar.2015.

Today in Science History <http://todayinsci.com/1/1_23.htm> Acesso em 23 set 2015.

The Stanford Flipside <<http://stanfordflipside.com/2015/04/physicists-fascinated-by-schrodingers-antisemitism-in-socc-interview/>> Acesso em 23 set 2015.

Wikipédia. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein> Acesso em 25 set 2015.