

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE FÍSICA

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

LUCAS CHIBELOSKI BAIL

**DA NATUREZA DUAL DA MATÉRIA: PROPOSTA DE MATERIAL TEMÁTICO  
COMO FORMA DE MEDIAÇÃO DE CONCEITOS FILOSÓFICOS PARA A  
GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

LUCAS CHIBELOSKI BAIL

**DA NATUREZA DUAL DA MATÉRIA: PROPOSTA DE MATERIAL TEMÁTICO  
COMO FORMA DE MEDIAÇÃO DE CONCEITOS FILOSÓFICOS PARA A  
GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Licenciatura em Física do Departamento Acadêmico de Física - DAFIS - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para aprovação na Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Lenz

Coorientador: Prof. Dr. Nestor Cortez Saavedra Filho

CURITIBA

2019



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ CÂMPUS CURITIBA - DEPARTAMENTO  
ACADÊMICO DE FÍSICA - DAFIS**

**TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Título: Da Natureza Dual da Matéria: Proposta de Material Temático como Forma de Mediação de Conceitos Filosóficos para a Graduação em Física

Autor: Lucas Chibeloski Bail

Orientador: Jorge Alberto Lenz

Coorientador: Nestor Cortez Saavedra Filho

Este trabalho foi apresentado às 10:00, do dia 04/12/2019, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2), do curso de Licenciatura em Física, do Departamento Acadêmico de Física (DAFIS), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba. A comissão examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Comissão examinadora:

---

Prof. Dr. Jorge Alberto Lenz (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

---

Prof. Dr. Nestor Cortez Saavedra Filho (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

---

Prof. Dr. Marlos de Oliveira Ribas (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

---

Prof. Dr. Arandi Ginane Bezerra Junior (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

---

Professor Responsável pelas Atividades  
de Trabalho de Conclusão de Curso/  
Curso de Licenciatura em Física  
(DAFIS/UTFPR)

A versão física do Termo de Aprovação com as assinaturas encontra-se na direção do curso de Licenciatura em Física no Departamento Acadêmico de Física na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

## RESUMO

BAIL, Lucas Chibeloski. **Da Natureza Dual da Matéria: Proposta de Material Temático como Forma de Mediação de Conceitos Filosóficos para a Graduação em Física.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Superior de Licenciatura em Física - Departamento Acadêmico de Física - DAFIS, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, 2019.

O presente trabalho apresenta uma análise bibliográfica sobre Filosofia da Física, em especial da Física Quântica, abordando alguns conceitos filosóficos sobre a natureza do conhecimento Físico, objetivando promover a Filosofia da Física na formação de Físicos e Professores de Física. Aborda temas da Filosofia, ao mencionar temas de Epistemologia e Filosofia, e ainda com base em tais temas filosóficos, propõe-se uma Material Temático que conta com uma prática experimental sobre a Difração de Elétrons, como forma de contextualizar a Filosofia da Física, uma vez que a parte experimental da Física está sempre presente nas discussões sobre o caráter filosófico desta. Por fim, o trabalho traz como argumento para sua validação, pareceres de Professores de Física de Ensino Superior do Departamento Acadêmico de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná acerca de características do trabalho, pareceres estes obtidos através da aplicação de um questionário aberto (apêndice B).

**Palavras-chave:** Filosofia da Física; Difração de Elétrons; Dualidade; Material Temático.

## ABSTRACT

BAIL, Lucas Chibeloski. **The Dual Nature of Matter: Proposal of an Thematic Unit as a Mediation of Philosophical Concepts for Undergraduate Physicists.** 2019. Course Completion Paper. Physics Degree - Academic Department of Physics - DAFIS, Federal Technological University of Paraná - UTFPR. Curitiba, 2019.

This paper presents a bibliographical analysis on Philosophy of Physics, especially Quantum Physics, approaching some philosophical concepts about the nature of physical knowledge, aiming to promote the Philosophy of Physics in the formation of Physicists and Physics Teachers. Approaching themes of Philosophy, by mentioning themes of Epistemology and Philosophy, and also based on such philosophical themes, proposes a Thematic Unit that has an experimental practice on Electron Diffraction, as a way of contextualizing the Philosophy of Physics, once that the experimental part of physics is always present in discussions about its philosophical character. Finally, the work brings as an argument for its validation, opinions from Physics Teachers of Higher Education of the Academic Department of Physics of the Federal Technological University of Paraná about characteristics of the work, opinions obtained through the application of an open questionnaire (appendix B).

**Key words:** Philosophy of Physics; Electron Diffraction; Duality; Thematic Material.

## SUMÁRIO

<b>1) INTRODUÇÃO</b> .....	06
1.1) Justificativa .....	06
1.2) Objetivos .....	07
1.3) Questão de Pesquisa .....	07
<b>2) FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	08
2.1) O Advento da Teoria Quântica .....	08
2.2) A Filosofia da Física .....	11
2.3) Diretrizes Curriculares Nacionais - Graduação em Física .....	12
2.4) A Filosofia da Física na Graduação em Física .....	13
2.5) Considerações sobre Material Temático .....	14
<b>3) METODOLOGIA</b> .....	15
3.1) Concepção de Pesquisa .....	15
3.2) Etapas de Pesquisa .....	16
3.3) A Produção do Material .....	16
3.4) Constituição de Dados .....	16
3.5) Análise de Dados .....	17
<b>4) UMA BREVE APRESENTAÇÃO DE CONCEITOS DE FILOSOFIA E HISTÓRIA DA FÍSICA</b> .....	19
4.1) Epistemologia e Física .....	19
4.2) A Quantização da Energia .....	21
4.3) A Quantização do Campo Eletromagnético .....	23
4.4) O Átomo de Bohr .....	26
4.5) As Ondas de Matéria .....	29

<b>5) ANÁLISE DE DADOS</b> .....	31
5.1) Categoria de Análise “Tema” .....	31
5.2) Categoria de Análise “Organização Estrutural” .....	32
5.3) Categoria de Análise “Profundidade” .....	33
5.4) Categoria de Análise “Contribuição para a Formação do Licenciando” .....	34
5.5) Categoria de Análise “Conveniência” .....	35
5.6) Conclusão da Análise de Dados .....	36
<b>6) CONCLUSÕES</b> .....	37
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	38
<b>APÊNDICES</b> .....	41
Apêndice A .....	41
Apêndice B .....	43

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

Nos últimos períodos da minha graduação em Física apercebi-me de um problema presente em mim, e na maioria dos meus colegas: tanto nos preocupávamos em passar nas matérias, em “pegar” o conteúdo das aulas - isso tudo como que tendo em mente uma espécie de “lei do mínimo esforço na graduação” - que nos esquecíamos de uma importante face do conhecimento físico, que ironicamente, tratava da origem e natureza do conhecimento que estudávamos – a epistemologia, parte integrante da Filosofia da Física.

Tratar da parte filosófica da Física, ao meu ver, é tão imperativo quanto tratar do conhecimento em si. Ao discorrer sobre como o conhecimento físico é construído, e as mudanças pelas quais a Física passa durante essa construção, contextualizando para a graduação em Física, convenço-me de estar contribuindo para a qualidade da formação de graduandos em Física, uma vez que estes são o alvo do presente trabalho.

Por tratar-se de um ramo do conhecimento humano em constante desenvolvimento, a Física eventualmente passa por mudanças bruscas em determinados conceitos. É quando acontece a chamada “quebra de paradigma”, no qual uma estrutura mental firmada precisa ser adaptada, ou mesmo modificada (AMORIN, 2011). O estudo da natureza do conhecimento físico torna-se de suma importância para graduandos em Física, por tratar-se da própria origem dos conteúdos que tais graduandos se empenham em aprender, e por tal estudo ser necessário para o aprofundamento de suas formações (ALBIERI, 2016).

Conforme menciona Albieri, “a questão do conhecimento pode constituir com sucesso uma plataforma crítica comum para as diferentes áreas de investigação na universidade” (ALBIERI, 2016, p. 13). Assim, uma vez que os graduandos em Física podem optar por seguir carreira na pesquisa em Física propriamente dita, é mais do que importante que os mesmos tenham conhecimentos sobre a Filosofia da área em que atuam, como método científico, e critérios de demarcação do saber sábio (AMORIN, 2006).

A importância de uma base de conhecimentos de Filosofia da Física para um graduando em Física que visa atuar como professor, encontra-se no fato de que, eventualmente alguns dos conceitos e raciocínios por ele testemunhados em sala de aula (como professor), podem ser os mesmos que um dia a Física tinha como paradigmas, o ensino



aprendizagem é facilitado em função da compreensão de como os conhecimentos geram implicações (LONDERO, 2015).

## **1.2 Objetivos**

Objetivo Geral:

- Comentar acerca de algumas das principais concepções presentes na Filosofia da Física referentes à natureza dual da matéria.

Objetivos Específicos:

- Analisar materiais (livros, artigos, periódicos, textos de divulgação científica, etc.) sobre Filosofia da Física
- Discorrer sobre algumas das principais vertentes sobre a natureza do conhecimento Físico.
- Contextualizar a Filosofia e Epistemologia da Ciência na graduação em Física.
- Apresentar uma proposta de Material Temático.

## **1.3 Questões de Pesquisa**

O que dizem os referenciais bibliográficos que tratam das principais concepções da Filosofia da Física em relação ao caráter dual (ondulatório/corpuscular) da matéria?

É possível abordar aspectos filósofos no ensino da dualidade onda-partícula a partir de um Material Temático?

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O Advento da Teoria quântica

Em meados do fim do século XIX, os físicos presumiam que a Física havia alcançado o ponto máximo de seu desenvolvimento, que os modelos físico-matemáticos vigentes no momento tinham potencial para descrever todos os fenômenos no universo, que “não há nada de novo para ser descoberto na Física, tudo o que resta são medições mais e mais precisas” (SCHULZ, 2007, p. 509). A Mecânica Newtoniana descrevia com precisão movimentos de objetos celestes e terrestres; a teoria eletromagnética proposta por Maxwell unificou as forças elétrica e magnética, estabelecendo de forma indubitável que a luz era uma forma de uma entidade chamada onda eletromagnética. Bem estabelecidos os modelos de descrição da natureza para ondas e corpos, aos cientistas bastaria aplicá-los em sistemas mais e mais complexos. Não haveriam fenômenos que não pudessem ser explicados com tais modelos. A respeito desse contexto, Lord Kelvin teria dito que “no céu azul da Física clássica existem [...] duas nuvens a serem dirimidas” (SCHULZ, 2007, p. 509), fazendo menção aos dois fenômenos que ainda não haviam sido descritos com sucesso pelos modelos vigentes, sendo o primeiro, o experimento de Michelson-Morley, o qual objetivava provar a existência do éter luminífero através da determinação da velocidade do Planeta Terra em relação a este, e o segundo, a distribuição de energia na radiação de corpo negro. Seriam justamente essas duas lacunas no conhecimento físico que levariam à duas grandes revoluções na Física Moderna, a Teoria da Relatividade, e a Física Quântica.

A era das grandes transformações na Física que levaram ao desenvolvimento da Física Quântica começou no início do século XX, quando o físico alemão Max Planck teve êxito na dissolução da segunda nuvem de Lord Kelvin, explicando o espectro de radiação do corpo negro. As tentativas de explicar a radiação emitida por um corpo conforme a temperatura deste aumenta, através da teoria eletromagnética e da mecânica estatística (classicamente, portanto), mostraram-se falhas. Analisando esse problema, Planck propôs que o comportamento de sistemas em escalas muito pequenas é ditado por regras incomensuráveis com os modelos clássicos, dessa forma provocando um profundo ajuste no conhecimento físico. Planck introduziu uma das mais fundamentais relações matemáticas da como ficou conhecida, “Antiga Teoria Quântica”, relacionando a energia com a frequência da onda eletromagnética, e propondo que as entidades responsáveis pela emissão de radiação

eletromagnética (os quais se comportariam como osciladores) poderiam vibrar com valores de energia específicos. Tal explicação produzia previsões teóricas que estavam de acordo com os dados experimentais, entretanto contrariava frontalmente o conceito até então não questionado de a energia ser contínua, ou seja, poder ter qualquer valor – propor a “quantização” da energia revolucionaria a Física. “Proseguiu-se, porém, imaginando que a quantização ocorreria apenas nos osciladores eletrônicos atômicos, mas não na energia irradiada, que, segundo o eletromagnetismo, se propaga na forma de ondas eletromagnéticas” (CHIBENI, 2001, p. 2).

Em seu “ano miraculoso” (1905), o também físico alemão Albert Einstein, publicou três importantes artigos, tratando o segundo destes, acerca de um fenômeno detectado anteriormente por Heinrich Hertz, o efeito fotoelétrico, sendo esse efeito, a emissão de elétrons pela matéria quando da incidência de radiação sobre esta última, mas que ainda não havia sido explicado com sucesso. O problema se encontrava no fato de que a energia cinética dos elétrons expulsos dependia da frequência da radiação incidente, e não da intensidade, contrariando a previsão clássica. Para resolver o problema, Einstein propôs que a quantização da energia proposta por Planck se estendia à radiação eletromagnética livre, utilizando inclusive uma relação matemática análoga à de Planck, ou seja, “a radiação só poderia ser emitida e absorvida pela matéria através de quantidades bem definidas de energia [...], e a própria luz seria constituída por esses quanta de energia” (ROSA, 2004. p. 2).

Assim como a teoria de Planck, a explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico contrariava a Física Clássica, a qual dizia que a energia da luz se distribuía continuamente pelo espaço, por esta ser uma onda eletromagnética. Em 1914 o físico Robert Millikan confirmou as previsões de Einstein, e foi realizado em 1911 o congresso Solvay de Física, dedicado ao debate sobre a questão da quantização da energia e da radiação, já amplamente debatidos no meio científico. A discussão girou em torno de se era possível chegar a uma explicação clássica para o que vinha sendo observado, ou se era necessária a introdução de novos conceitos fundamentais ao conhecimento físico. Henri Poincaré defendeu em seus artigos que a teoria de Planck deveria ser vista como um novo princípio, que afetava as bases do que se pensava ser verdade sobre as interações entre matéria e radiação.

Esses novos conceitos foram aplicados pelo físico Niels Bohr em 1913 no desenvolvimento de sua teoria atômica, a qual propunha que o átomo é formado por um núcleo positivo, e que os elétrons (cargas negativas) descrevem órbitas em torno do núcleo. Esse modelo obteve sucesso na descrição de átomos que possuíam apenas um elétron. O

modelo atômico de Bohr, entretanto, apresentava a falha de que se o elétron realmente descrevesse órbitas, o mesmo emitiria radiação por estar sendo acelerado centripetamente e “cairia” no núcleo. Para resolver tal problema, Bohr postulou que o elétron não poderia orbitar a qualquer distância do núcleo, pois só algumas trajetórias seriam estáveis, envolvendo esta estabilidade uma constante matemática determinada por Planck e utilizada em sua teoria da radiação. Propôs ainda que quando o elétron passa de uma órbita para outra, acontece absorção ou emissão de um quantum de energia de frequência bem definida. Dessa forma Bohr quantizou as órbitas eletrônicas.

A “Antiga Teoria Quântica”, como ficou conhecida a embrionária versão do que hoje chama-se de Física Quântica, desenvolvida primeiramente por Planck, Einstein e Bohr, tinha a teoria atômica de Bohr como o máximo refinamento na teoria da estrutura da matéria até então, mesmo tal teoria sendo insatisfatória em alguns pontos. Mas o que tornava a teoria de Bohr deveras peculiar era a quantização das órbitas, levantando questionamentos sobre as razões pelas quais o elétron não orbitaria a qualquer distância do núcleo. Tais teorias, em conjunto com a verificação do comportamento corpuscular dos raios x, e, portanto, da radiação eletromagnética (Efeito Compton), levaram a comunidade científica a debater veementemente o caráter aparentemente contraditório da natureza das ondas eletromagnéticas (ROSA, 2004).

Em uma das teses de doutorado mais importantes da história, Louis De Broglie buscou justificar a quantização de Bohr, propondo que assim como fenômenos tidos como explicitamente ondulatórios exibem quantização, conforme Planck, Einstein e Compton haviam proposto, comportam-se como partículas, por uma questão de simetria, talvez partículas e entes tidos como unicamente corpusculares se comportem com características ondulatórias. Com as chamadas “Ondas Piloto”, De Broglie propõe que a cada partícula estaria associada um pacote de ondas piloto que governam o movimento da partícula. Essas “ondas piloto” são a forma embrionária do que atualmente tem-se na Física Quântica como “Funções de Onda”, as quais estão associadas à probabilidade de se detectar a respectiva partícula em um local do espaço (CHIBENI, 2001).

Ao propor a “natureza dual da matéria”, os físicos levaram a uma quebra de paradigma no conhecimento: somente se poderia ter noção da totalidade dos fenômenos da natureza utilizando-se conjuntamente os conceitos de partícula e de onda. A natureza é dual. Após terem noção dos conceitos propostos por De Broglie, os físicos Paul Dirac, Werner

Heisenberg e Erwin Schrodinger desenvolveram separadamente o formalismo do que atualmente tem-se como a área mais intrigante da Física Moderna – a Mecânica Quântica.

## 2.2 A Filosofia da Física

Essa subdivisão do raciocínio filosófico trata das questões que envolvem a Física e suas implicações para com a humanidade, suas características, métodos, objetivos, natureza, conceitos, etc., tratando muitas vezes de temas que estão no limiar do conhecimento da Física, e levando a questionar sobre os mais básicos fundamentos da Física, e da realidade, portanto. A Filosofia da Física é o estudo dos elementos subjacentes das teorias Físicas: o que essas teorias implicam, o que não implicam e, em particular, o que dizem sobre a maneira como o mundo e o universo é estruturado (PESSOA, 2017).

Filosofia significa “amor à sabedoria”, e Física, “natureza”. Abordar a Física a partir de uma perspectiva filosófica pode possibilitar a constatação de implicações que as equações matemáticas não são capazes de fornecer em primeira análise. Sendo uma área metafísica, um estudo da natureza essencial e fundamental das coisas, objetiva abordar questionamentos acerca da organização estrutural do universo, mudanças no conhecimento humano, epistemologia, a forma como a descrição matemática pode chegar a princípios fundamentais do universo, se estes existem ou se as teorias são necessariamente de naturezas distintas, etc. (PESSOA, 2017).

É comum que a literatura que trata de Filosofia não aceita que abordagens puramente filosóficas possam gerar resultados físicos, a função da epistemologia, o estudo da natureza do conhecimento científico, não é prever o que será observado na natureza, mas sim avaliar como a Ciência, e em especial, a Física, reagirá se determinados elementos forem verificados. Ou seja, as implicações da construção do conhecimento.

A Física Quântica, como área da Física, descreve o comportamento da natureza em escalas subatômicas. A metafísica, como ramo da Filosofia, aborda e analisa a natureza estrutural da realidade em si. As diferentes interpretações da Física Quântica propõem conceitos incomensuráveis para com a Física Clássica, e o próprio senso comum. Tais conceitos abrem espaço para uma análise filosófica e metafísica. A natureza dual da matéria, o problema da medição e o conceito de função de onda, são expoentes no que se refere a essa abertura da Física Quântica para uma análise filosófica de suas implicações, uma vez que estes e outros elementos da Teoria Quântica tratam dos mais fundamentais elementos da estrutura da realidade (PESSOA, 2017).

Bohr sobre a natureza da Física Quântica: “Não existe mundo quântico. Existe apenas uma descrição Física quântica abstrata. É errado pensar que a tarefa da Física é descobrir como é a natureza. A Física diz respeito ao que podemos dizer sobre a natureza”. Bohr mais de uma vez mencionou a questão da limitação que a mente humana impõe ao entendimento completo da natureza, principalmente devido a problemas semânticos e de linguagem. Bohr considerou que para o devido entendimento das peculiaridades dos fenômenos quânticos, a substituição de conceitos elementares e o desenvolvimento de uma nova lógica seria necessária. Isso porque as condições fundamentais da mente humana são incompatíveis com alguns conceitos que a Física Moderna tem apresentado. Aparentemente a estranheza quântica é regra no universo, e conceitos do senso comum como realismo, determinismo e localidade foram relativizados, ou até mesmo dispensados (ZINKERNAGEL, 2015).

### **2.3 Diretrizes Curriculares Nacionais - Graduação em Física**

As diferentes áreas de atuação do indivíduo egresso de um curso superior de Física, seja licenciatura ou bacharelado, demandam qualificações específicas, e tais demandas refletem no desenvolvimento de cursos superiores no que se refere à estruturação destes, uma vez que esta será voltada a atender não só requisitos profissionais básicos, mas também atender às demandas que as diferenciadas áreas de atuação apresentam. Dessa forma, um curso superior de Física deve ser desenvolvido visando construir no estudante de Física as seguintes competências essenciais:

1. Dominar princípios gerais e fundamentos da Física, estando familiarizado com suas áreas clássicas e modernas;
2. descrever e explicar fenômenos naturais, processos e equipamentos tecnológicos em termos de conceitos, teorias e princípios físicos gerais;
3. diagnosticar, formular e encaminhar a solução de problemas físicos, experimentais ou teóricos, práticos ou abstratos, fazendo uso dos instrumentos laboratoriais ou matemáticos apropriados;
4. manter atualizada sua cultura científica geral e sua cultura técnica profissional específica;
5. desenvolver uma ética de atuação profissional e a consequente responsabilidade social, compreendendo a Ciência como conhecimento histórico, desenvolvido em diferentes contextos sócio-políticos, culturais e econômicos (BRASIL, 2001, p.4).

Ainda sobre a estruturação dos cursos de graduação, é proposto que o currículo seja dividido em duas partes, um Núcleo Comum, e Módulos Sequenciais Especializados. Sendo esse primeiro, composto por conteúdos curriculares que ocupam pelo menos 50% da carga horária do curso, o restante pode ser distribuído conforme os objetivos profissionais

(licenciatura ou bacharelado). Tais conteúdos são: Física Geral, Matemática, Física Clássica, Física Moderna e Contemporânea, e Disciplinas Complementares. Dentro desse conteúdo de e Disciplinas Complementares, dentre outros temas, se encontra a Filosofia e História da Ciência. (BRASIL, 2001). Dessa forma, observa-se que a estruturação dos cursos superiores em Física deve considerar a Filosofia e História da Ciência como um dos conteúdos necessários para uma formação superior de qualidade.

#### **2.4 A Filosofia da Física na Graduação em Física**

Seguem-se agora questões sobre qual a importância da abordagem da Filosofia da Ciência no que se refere ao ensino de Física. Na maioria dos casos dos cursos de graduação em Física no Brasil, os egressos saem da Universidade com uma quase total carência dos conteúdos de História, Filosofia e Epistemologia da Ciência (MARTINS, 2007). Há muitos motivos pelos quais tais conteúdos deveriam estar presentes nos cursos de graduação. O próprio Laureado com o Nobel de Física de 1944, Isidor Isaac Rabi propôs que a Ciência poderia ser ensinada em todos os níveis escolares, com grande ênfase na compreensão histórica, filosófica e humanística (LONDERO, 2015). Os Parâmetros Curriculares Nacionais citam temas como a Filosofia da Física como complementares ao Ensino de Física, desse modo, há embasamento para que a formação de professores de Física tenha mais foco nessa área que é tão pouco enfatizada.

Geralmente os cursos de graduação em Física trazem as concepções de que a partir de métodos de indução baseadas em observações, e de um enfoque fortemente positivista, o conhecimento total da Física foi construído e pode ser desenvolvido. Não levam em consideração as influências teóricas e subjetivas pelas quais os pensadores podem ter sido influenciados. É frequentemente defendido na literatura especializada, que a má formação de docentes de Física em conceitos de Filosofia da Ciência, levam a práticas docentes inadequadas (MARTINS, 2007). A aprendizagem por parte do professor de Física dos processos de desenvolvimento e construção do conhecimento é um componente fundamental na tentativa de superação das dificuldades encontradas na aprendizagem de Física, não só nos anos fundamentais da escola, mas como também no Ensino Médio e Superior (MOREIRA, 2005). Dessa forma, o professor estará hábil a abordar elementos da Filosofia e História da Ciência em suas aulas, de modo a poder passar a almejada concepção de que a Física como área da Ciência é uma construção humana, fruto de criatividade e imaginação, diferentemente do que muitos alunos podem pensar, ao encararem a Ciência como algo abstrato.

O estudo de certos episódios que contextualizam as descobertas científicas, permite a quem por exemplo assiste uma aula de Física, a perceber as relações sociais entre a Ciência, a Sociedade e aplicações tecnológicas (MARTINS, 2007). Ao ter um maior embasamento das concepções epistemológicas da Ciência, sobretudo da Física em seu currículo, o docente de Física estará mais apto a discorrer acerca de temas que envolvem consequências que a Ciência trouxe e traz para a humanidade. Ao complementar as aulas de Física com a introdução de Filosofia e História da Ciência, o professor está contribuindo para a melhoria da qualidade do Ensino de Física no País.

#### **2.4 Considerações sobre Materiais Temáticos**

O material didático é um instrumento utilizado em sala de aula objetivando-se uma melhoria no ensino, seja na questão da didática ou na facilitação do estudo independente por parte dos estudantes. O final bem-sucedido, no entanto, depende da forma de aplicação do material, e não somente do material em si. Dessa forma, materiais didáticos empregados em aulas devem ser encarados como um meio, não um fim. O Material Didático que de maneira geral trata de um tema específico, é chamado de Material Temático. O Material Didático Temático pode ser utilizado também pelos estudantes de maneira independente, ou seja, mesmo não havendo a quem questionar sobre determinado conteúdo, os estudantes podem valer-se do material nos seus estudos (BANDEIRA, 2009).

Um Material Temático, como o próprio nome indica, é um material com fins instrutivos, que trata de conceitos acerca de um tema específico. No caso do presente trabalho, o Material Temático (apêndice B) tem como tema específico, “Implicações Filosóficas da Dualidade Onda/Partícula. Trazendo conceitos e discussões que giram em torno desse tema, o material apresenta os conteúdos distribuídos de forma a privilegiar uma ordem razoável no que se refere à complexidade, ou seja, conteúdos que dependem de outros para serem compreendidos de forma melhor, são apresentados posteriormente a estes.



### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Concepção de Pesquisa

O presente projeto de pesquisa engloba pesquisa exploratória, no levantamento de dados através de pesquisa bibliográfica, enquadrando-se na tipologia de pesquisa, com o rótulo de qualitativa, e possuindo pesquisa por questionário aberto (apêndice A).

**Pesquisa Exploratória:** Frequentemente antecede uma pesquisa mais aprofundada, por se tratar de uma primeira aproximação dos conteúdos a serem abordados. Após a escolha de um tema, a pesquisa exploratória passa por uma delimitação, seja através de análise de referenciais ou outras abordagens. Esse tipo de pesquisa visa esclarecer o que virá a ser efetivamente abordado na pesquisa, no presente caso, bibliográfica (MOREIRA, CALEFFE, 2008). O emprego da pesquisa exploratória no presente trabalho se justifica quando se trata da forma como os conteúdos serão reunidos, para então serem estudados e compilados em forma de texto: uma pesquisa genérica visando a reunião de conceitos, autores e temas se dará primeiramente, sendo seguida de maior aprofundamento nos conteúdos escolhidos.

**Pesquisa Qualitativa:** Uma pesquisa que aborda temas não facilmente descritos e/ou registrados numericamente enquadra-se como pesquisa qualitativa, uma vez que a pesquisa em si se dará através de uma análise até mesmo subjetiva dos dados. (MOREIRA, CALEFFE, 2008). Tal tipologia de pesquisa torna-se de imperativo emprego devido à natureza cabalmente textual dos temas que serão abordados, de forma que haverá interpretação de texto por parte do pesquisador.

**Pesquisa Bibliográfica:** Por se tratar de uma pesquisa exclusivamente realizada sobre trabalhos já existentes, tal classificação de pesquisa é a imediata escolha. Como fontes bibliográficas que serão analisadas, estão sobretudo livros de referência informativa ou remissiva, bem como artigos, publicações periódicas ou não, obras literárias ou de divulgação. A pesquisa bibliográfica favorece o pesquisador de modo a dar-lhe maior abertura para contatar dados do que a que teria na pesquisa direta (GIL, 2002).

**Questionário Aberto:** Esse tipo de questionário é apropriado para pesquisas nas quais não há um grande número de sujeitos. A vantagem desse tipo de questionário encontra-se na riqueza de detalhes que as respostas trazem, se comparadas ao questionário fechado analisado através de estatísticas (BARDIN, 2006). O uso de questionário aberto no presente trabalho se justifica por neste não haver um grande número de indivíduos a serem consultados.

### **3.2 Etapas de Pesquisa**

Inicialmente, através da Pesquisa Exploratória foram delimitados os temas que seriam efetivamente abordados no trabalho. Após tal delimitação, a análise bibliográfica foi implementada para reunir os conteúdos que constituirão o trabalho em si. Após a conclusão do corpo do trabalho, a proposta de Material Temático foi entregue para professores Departamento de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que como citado, deram seus pareceres, sendo estes últimos então enfim, incorporados ao trabalho.

### **3.3 A Produção do Material**

O presente trabalho de conclusão de curso teve como parte importante de seu desenvolvimento, a elaboração de uma Material Temático (apêndice B) que trata das implicações filosóficas que a inserção das características quânticas como, dualismo, indeterminismo e não localidade trazem sobre o panorama da Física no contexto da comprovação da natureza dual da matéria. Esse Material Temático é direcionado a estudantes de graduação em Física, e pode ser utilizado como material complementar em disciplinas que tratem de Física Moderna, e Filosofia da Física, e objetiva fornecer informações ao estudante que não são comumente tratadas durante a graduação. O levantamento inicial para a elaboração dos textos (seção 5) e do Material Temático se deu por aplicação da “Regra da representatividade. A análise pode efetuar-se numa amostra desde que o material a isso se preste.” (BARDIN, 2011, p. 97), onde buscou-se estudar as implicações filosóficas que os conceitos físicos traziam, e organizar tais informações de forma compacta, geralmente um tópico por página. Com relação à prática experimental presente na Material Temático, os procedimentos experimentais são baseados em roteiros disponibilizados pela empresa Phywe, por observações práticas, e outros materiais sobre o experimento em questão, selecionados conforme a regra anteriormente citada, comumente disponibilizados por universidades.

### **3.4 Constituição de Dados**

A constituição de dados se deu através da aplicação de questionário aberto (apêndice A). A escolha dessa ferramenta de coleta de dados mostra-se apropriada para o presente trabalho, por se tratar de uma ferramenta que tem como uma de suas principais vantagens, o tempo, o qual será necessário aos professores para analisar o trabalho, e com o questionário em mãos, podem respondê-lo quando melhor lhes convier (MOREIRA, CALEFFE, 2008). Dessa forma, o uso do questionário aberto mostrou-se ser uma boa forma de coleta de dados, considerando que comumente professores universitários possuem pouco tempo livre.

O questionário foi aplicado da forma que se segue:

- Os dois professores que aceitaram analisar o Material receberam uma cópia impressa ou em pdf do mesmo em seus locais de trabalho, no caso, no Departamento Acadêmico de Física. Receberam também o questionário impresso.
- Os professores que aceitaram analisar o material possuem as seguintes características: doutores em Física; com mais de vinte anos de atuação; já lecionaram ou lecionam disciplinas de física moderna ou atuaram como pesquisadores na área.
- Foi combinado um prazo individual com cada professor para que estes tenham tempo de ler o material, e responder o questionário.
- Após o retorno do questionário respondido para o pesquisador, com a leitura flutuante das respostas individuais de cada professor respondente, foram levantadas hipóteses sobre a validação do trabalho, baseado em tais respostas. As conclusões provenientes dessa análise de dados foi parte integrante do trabalho como validação da Material Temático.

### **3.5 Análise de Dados**

A análise dos dados constituídos através da aplicação do questionário se dará através de, primeiramente, uma leitura flutuante das respostas a cada questão, leitura essa que levantará hipóteses que servirão como indicativos dos pareceres dos professores sobre o trabalho (BARDIN, 2011), no que se refere aos critérios de análise a seguir:

Critérios de análise dos Professores respondentes:

- Tema;
- Organização estrutural;
- Profundidade;
- Contribuição na formação do licenciando;
- Conexão entre partes do trabalho;
- Conveniência.

### **Quadro de Análise**

O quadro 1 é o quadro de análise que será utilizado no questionário aos professores:

Quadro 1: Quadro de Análise

<b>Critério de Análise</b>	<b>Questão</b>	<b>Professor</b>	<b>Parecer</b>
Tema	Considera o tema do trabalho interessante? Justifique.	Professor 1	
		Professor 2	
		Professor n	
Organização estrutural	Considera que a estrutura (ordem dos conteúdos) é razoável? Justifique.	Professor 1	
		Professor 2	
		Professor n	
Profundidade	Os conteúdos abordados tem profundidade razoável levando-se em conta o objetivo do trabalho? Justifique.	Professor 1	
		Professor 2	
		Professor n	
Contribuição na formação do licenciando	De que forma a leitura do Material Temático por um licenciando em Física contribui para sua formação?	Professor 1	
		Professor 2	
		Professor n	
Conveniência	O presente trabalho é pertinente sobre o que se exige de um licenciado? Justifique	Professor 1	
		Professor 2	
		Professor n	

## **4 UMA BREVE APRESENTAÇÃO DE CONCEITOS DE FILOSOFIA E HISTÓRIA DA FÍSICA**

### **4.1 Epistemologia e Física**

A Gnosiologia, ou Teoria do Conhecimento, trata do estudo do Conhecimento como um todo, abrangendo toda e qualquer reflexão sobre a criação de conhecimento na relação entre sujeito e objeto. Um subconjunto da Gnosiologia é a Epistemologia, que trata de assuntos concernentes a natureza, origem e possibilidade do conhecimento científico. Etimologicamente, Epistemologia significa “estudo do conhecimento”, não se confunde, porém, com a gnosiologia, pois o termo episteme se refere ao conhecimento mais aplicado, próximo do que atualmente é referido como Ciência, enquanto que gnosis se refere ao Conhecimento universal, superior da realidade. O termo “Epistemologia” foi pela primeira vez usado por James F. Ferrier.

A Epistemologia abrange os estudos e reflexões acerca do conhecimento científico como um todo, tratando de assuntos inerentes a Ciência, como as implicações, fundamentos e formalismos desta. As principais questões levantadas e analisadas nesse estudo, são acerca dos formalismos envolvidos na classificação e qualificação de algo como científico, os critérios envolvidos no quesito confiabilidade, e a finalidade da Ciência. Foi no século XX que a Filosofia da Ciência foi abordada como uma disciplina por si só, apesar de estudos sobre a natureza do conhecimento científico já existirem. Assim como a Teoria do Conhecimento geral, a Epistemologia trata do conceito de “verdade”, mas no contexto científico, buscando compreender até que ponto a atividade científica chega às verdades sobre a natureza. A Filosofia da Ciência é fundamentada no fato de que a Ciência é ontologicamente relacionada com a concepção empirista da Natureza do Conhecimento.

Dentre os diversos tipos de conhecimento, a saber, o senso comum, o religioso, o filosófico e o científico, é neste último que as peculiaridades se destacam por formar um tipo de conhecimento rigoroso e baseado em fatos. O conhecimento científico vai além do senso comum no que diz respeito a responder questões, é quando a explicação deixa o campo da opinião, campo esse composto por informações não rigorosas e dispersas, e adentra a uma sistematização de proposições, e a explicação passa a ser explanada através de alegações razoáveis e aceitáveis, é que o conhecimento, seja qual for, começa a seguir em direção ao conhecimento científico, e é comum que ao atingir tal tipo de conhecimento, as proposições

sejam consideradas verdade, uma vez que há sistematização e formalismo nas proposições (SANTOS, 2018). Levanta-se aqui a questão sobre a natureza da Ciência.

Ciência: “Conhecimento que inclua, em qualquer forma ou medida, uma garantia da própria validade [...] O oposto da Ciência é a opinião, caracterizada pela falta de garantia acerca de sua validade” (ABBAGNANO, 2007, p. 147). É dessa forma que Abbagnano apresenta o conceito de Ciência em seu dicionário de filosofia. Alguns autores apresentam uma descrição aproximadamente semelhante sobre a definição de Ciência: De acordo com Ander Egg (1978), conforme citado por Fernandes (2014, p. 10), Ciência “é um conjunto de conhecimentos racionais, certos ou prováveis, obtidos metodicamente, sistematizados e verificáveis, que se referem a objetos da natureza”. Assis (2014, p. 04) apresenta ainda outra descrição, citando a definição de Trujillo (1974), argumentando que a Ciência é um “conjunto de proposições logicamente correlacionadas sobre o comportamento de certos fenômenos [...], um conjunto de atitudes e atividades racionais, dirigidas ao sistemático conhecimento [...] capaz de ser submetido à verificação”.

Observa-se que o que há de comum nessas descrições de Ciência, é a necessidade de que as proposições feitas sejam verificáveis, e fundamentadas de forma lógica. O conhecimento científico é visto como um conhecimento com alto grau de confiabilidade, de certeza. Se comparado aos outros tipos de conhecimento, o científico é bem aceito na sociedade, devido ao amplo sucesso que áreas da Ciência tiveram historicamente, tanto em assuntos práticos – aplicações tecnológicas, biológicas etc. – como de conhecimento puro, a exemplo, cita-se a Física, a Química e a Biologia (CHIBENI, 2001).

Na revolução científica iniciada no século XVII, passou a ganhar força a concepção de que os pensadores – os filósofos da natureza – deveriam deixar de usar como base para a construção de conhecimento as obras e estudos antigos, como Aristóteles e a Bíblia. Muitos sentiram-se entusiasmados com o sucesso que eminentes cientistas experimentais estavam tendo na época, como Galileu, e passaram cada vez mais a encarar a experimentação como fonte de conhecimento. Um fator que contribuiu para a descontinuidade dos métodos vigentes, foi o de passar a considerar os dados extraídos de uma observação, como tal, apenas dados, e não como estando atrelados a conceitos já existentes, ou seja, os dados podem ou não fazer sentido em esquemas vigentes, e deveriam ser usados como base para o desenvolvimento de novos esquemas – são os esquemas que devem se adaptar à observação. Tal pensamento ganhou força com o passar do tempo, conforme mais trabalhos baseados em observações foram demonstrando-se valorosos, a tal ponto que atualmente a Ciência é vista

como uma estrutura essencialmente construída sobre o pilar da observação, do experimento, dos fatos (CHALMERS, 1993).

A Filosofia é uma área do conhecimento humano que se ocupa com questões concernentes à existência humana, conhecimento, valores, mente, etc. Etimologicamente o termo Filosofia significa “amor a sabedoria”, e representa a intenção de refletir acerca da realidade. A Filosofia Natural é a parte da Filosofia que trata de assuntos relacionados a natureza e seus elementos, e consiste no estudo dos princípios que regem o mundo natural. O termo Filosofia Natural foi utilizado para se referir à área do conhecimento que abordava assuntos que hoje são abordados pelas Ciências Naturais, e a partir do século XIX, o termo passou a se referir apenas à Física - a Física nasceu a partir de raciocínios filosóficos. Ainda atuando com o intuito de se aproximar das verdades universais, está o estudo filosófico e crítico da Física – a Filosofia da Física. Essa subdivisão do raciocínio filosófico trata das questões que envolvem a Física e suas implicações para com a humanidade, suas características, métodos, objetivos, natureza, conceitos, etc., tratando muitas vezes de temas que estão no limiar do conhecimento da Física, e levando a questionar sobre os mais básicos fundamentos da Física, e da realidade, portanto.

#### **4.2 A Quantização da Energia**

Uma das duas nuvens no céu da Física citadas por Lord Kelvin era o problema da emissão de radiação por um corpo aquecido. Um corpo aquecido emite radiação eletromagnética em um largo espectro de frequências, havendo uma intensidade máxima de emissão em um determinado comprimento de onda. Um corpo que possui a característica peculiar de absorver toda a radiação que incide sobre ele, e irradia todos em todos os comprimentos de onda que absorveu, é chamado de “corpo negro”, sendo este um objeto importante dos estudos que levaram a grandes avanços na Física. O corpo negro é uma idealização, mas pode ser pensado de forma aproximada como uma cavidade com um pequeno orifício.

Em meados do fim do século XIX pensava-se que a radiação emitida pelos corpos aquecidos era associada ao movimento periódico dos átomos do corpo. O espectro de emissão de um corpo aquecido depende das características do material, os corpos negros, entretanto, apresentam um espectro universal de emissão, ou seja, todos os corpos negros, emitem radiação de uma determinada frequência para uma determinada temperatura. Para o caso da cavidade, as características da radiação dependem somente da temperatura das paredes internas da cavidade.

A Física da época, entretanto, não era capaz de determinar como o espectro da radiação emitida dependia da frequência desta radiação, ou seja, não havia uma relação matemática bem fundamentada e precisa para a distribuição espectral – havia só curvas com pontos obtidos experimentalmente. Porém, analisando os dados experimentais os pesquisadores foram capazes de perceber características importantes da radiação estudada, como a relação direta da intensidade da radiação com a temperatura do corpo – a intensidade aumenta rapidamente conforme a temperatura do corpo aumenta; e quanto maior a temperatura, menor será o comprimento de onda da radiação na parte de maior intensidade do espectro de emissão. Cientistas da época, como, Stefan, Boltzmann, Wien, Rayleigh e Planck, se dedicaram a buscar uma relação quantitativa que descrevesse o fenômeno em questão, entretanto, as dificuldades envolvidas nos procedimentos experimentais pareciam indicar que um princípio físico mais fundamental e ainda não descoberto estava presente nos dados experimentais. Esses cientistas então, passaram a buscar a determinação de uma equação analítica  $u_\nu(T)$  para a densidade de energia espectral para o corpo negro (MORAES, 2010).

**Modelo de Planck:** Em outubro 1900 Max Planck publica sua equação para  $u_\nu(T)$  como um comentário aos estudos de Heinrich Rubens (o qual havia comentado com Planck sobre a relação dessa função com a temperatura na região do espectro que não havia ainda sido descrita satisfatoriamente):

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \left( \frac{b}{e^{aT}-1} \right), \quad a \text{ e } b \text{ são parâmetros indeterminados,}$$

e o fator  $\frac{b}{e^{aT}-1}$  é a energia média dos osciladores na cavidade,  $\langle \epsilon \rangle$ . Diferentemente dos

outros modelos, a equação de Planck estava em consonância com os resultados experimentais com uma precisão inédita. O que Planck não havia feito, no entanto, era explicar o porquê desse modelo funcionar tão bem. Nas semanas seguintes Planck estuda os fundamentos físicos de seu modelo, e utilizando a equação de Boltzmann para a entropia ( $S = k \cdot \ln(w)$ ), e considerando que havia no corpo negro um número grande de osciladores lineares de frequência  $\nu$ , propõe que a energia total é  $E_N = n\epsilon$ . Visando satisfazer a Lei de Wien, a energia se relaciona com a frequência:  $\epsilon = h\nu$ , onde  $h$  é uma constante. Dessa forma, a

densidade de energia do corpo negro seria  $u_\nu(T) = \frac{8\pi}{c^3} \left( \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \right)$ , agora sendo a energia média

dos osciladores  $\langle \epsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$  (STUDART, 2000). Observa-se que, dessa forma, a energia

dos osciladores não poderia assumir qualquer valor, e sim apenas múltiplos inteiros de  $h\nu$ , substituindo a energia contínua dos osciladores por “quantas”, ou “pacotes” de energia.



Quando a temperatura é elevada, a energia média se aproxima dos valores classicamente previstos. Em suma, o modelo de Planck descreve como a energia total do sistema pode se distribuir entre um número finito de osciladores, havendo, portanto, um número finito de possibilidades. Observa-se também, que o modelo de Planck propõe uma “quantização”, ou seja, aplica a relação  $\epsilon = h\nu$  para os osciladores, e não à energia da radiação emitida pelo corpo negro. Propor que a energia é quantizada, apesar de ser uma “medida desesperada”, basicamente marca o nascimento de uma nova Física (MORAES, 2007).

### 4.3 A Quantização do Campo Eletromagnético

O efeito fotoelétrico é um fenômeno físico observado primeiramente em 1887 por Heinrich Hertz, e trata-se da ejeção de elétrons de uma superfície (geralmente metálica) quando sobre ela incidem ondas eletromagnéticas (o estudo é feito sobretudo com luz visível). O que se sabia essencialmente sobre o efeito fotoelétrico até o início do século XX é que, de alguma forma, a energia transportada pela luz é absorvida pelos elétrons, os quais assim adquirem energia o bastante para serem emitidos a partir da superfície. A aparato experimental do efeito fotoelétrico consiste, em suma, da superfície metálica atuando como cátodo, e um coletor dos elétrons ejetados (ânodo). Ao iluminar a superfície metálica (cátodo), mede-se uma eventual corrente elétrica entre esta e o ânodo. Os elementos observados experimentalmente no efeito fotoelétrico são os seguintes: a corrente elétrica é observada praticamente instantaneamente ( $\sim 10^{-9}s$ ) após a incidência de luz sobre a superfície metálica, mesmo a luz sendo de baixa intensidade; a corrente elétrica medida é diretamente proporcional à intensidade da luz, ou seja, conforme a intensidade da luz aumenta, um aumento no número de elétrons ejetados é observado; havendo uma diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo, a corrente elétrica decresce com o aumento desse primeiro, indo a zero em uma dada diferença de potencial específica, chamada de potencial elétrico de corte.

O eletromagnetismo clássico se baseia na concepção “ondulatória da luz e na ideia, clássica, de que a energia transportada pela onda apresentava uma distribuição contínua. Assim, segundo Maxwell, a energia incidente seria distribuída uniformemente sobre a superfície metálica do emissor” (VASCONCELLOS, 2007, p. 3). Se consideradas as equações de Maxwell, o eletromagnetismo clássico, portanto, as previsões para o efeito fotoelétrico são as seguintes: levaria um tempo para que a energia transportada pela luz incidindo sobre a área de um átomo fosse suficiente para ejetar um elétron (até a energia se acumular o suficiente), e a corrente elétrica ser observada, e esse tempo era muito maior que o tempo medido

experimentalmente; a energia cinética dos elétrons ejetados seria diretamente proporcional à intensidade da luz incidente, pois os elétrons absorveriam maior energia.

Observa-se, dessa forma, que as medições experimentais do efeito fotoelétrico contrariam frontalmente o eletromagnetismo clássico, ou seja, a própria Física Clássica não era capaz de descrever o que estava sendo observado.

O responsável pela resolução desses paradoxos foi Albert Einstein, propondo uma nova forma de se entender a radiação, baseada na teoria de Planck sobre a quantização nos osciladores na radiação de corpo negro. Einstein reconsiderou o modelo de Planck de modo a chegar à constatação de que “a teoria de Planck utiliza implicitamente a [...] hipótese do quantum de luz”. Surgia a questão de saber se seria possível estabelecer uma conexão entre a quantização de Planck e a explicação do efeito fotoelétrico a partir do ‘quantum’” (MORAES, 20??, p. 7). Einstein concluiu que sim. Seus estudos acerca da aplicação da hipótese de Planck na explicação do efeito fotoelétrico foi, no entanto, difícil de serem aceita entre os cientistas, pois se tratava de uma quebra de paradigma na Ciência, questionando a concepção vigente da natureza ondulatória do campo eletromagnético – Einstein estava propondo que não só a hipótese de Planck era correta, mas o próprio campo eletromagnético era quantizado. “Einstein parece ter visto nas propriedades do efeito fotoelétrico um sinal muito claro da composição corpuscular da radiação” (MORAES, 20??, p. 7). Se Planck tivesse visto sua própria explicação com o “‘quantum’ como algo inerente à própria radiação, independente da interação com a matéria [...], teria determinado que o ‘quantum’ de energia é determinado pela frequência da radiação emitida e absorvida. Mas, não o fez!” (MORAES, 20??, p. 7).

A explicação proposta por Einstein para o efeito fotoelétrico cobria as lacunas deixadas pela explicação clássica do fenômeno, e consistia na aplicação da hipótese de Planck da quantização na energia dos osciladores na emissão de radiação de corpo negro, nos campos eletromagnéticos, na radiação, portanto. Em suma, Einstein fez isso “propondo que a luz incidente consiste de porções discretas (quanta, ou fótons), que interagem com os elétrons no metal de maneira similar a partículas elementares, em substituição à concepção de Maxwell de ondas contínuas” (VASCONCELLOS, 20??, p.4), essas partículas de luz seriam dotadas de grandezas classicamente descritas, como energia e momento,  $h\nu$  e  $\frac{h\nu}{c}$ , respectivamente, e que essas grandezas dos fótons seriam conservadas na interação com a matéria. “Nas palavras do próprio Einstein, “a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores do espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia [...], e que poderiam

apenas ser produzidos e absorvidos como unidades integrais”” (SILVA, 2015, p. 2). Nessa concepção acerca da luz, a explicação do efeito fotoelétrico se dá ao entender que a energia de um fóton é absorvida de forma integral por um elétron singular, se a energia do fóton for suficiente, o elétron será ejetado do material, e a diferença entre a energia que o elétron absorve e a energia com a qual o mesmo estava ligado (energia de ligação) à superfície do material, é a energia cinética com a qual o elétron será ejetado.

Na hipótese de Planck para a quantização da energia, era prevista uma energia  $E = h\nu$  para um quantum. Analogamente, a hipótese de Einstein propõe que cada fóton, o quantum do eletromagnetismo, possui uma energia  $E = h\nu$ . Essa hipótese em si é suficiente para resolver os paradoxos que os resultados experimentais representavam se utilizada a Física Clássica para sua explicação: com relação ao tempo decorrido entre a incidência de luz (mesmo que de baixa intensidade) sobre o material, e a detecção de corrente elétrica (elétrons ejetados), a hipótese de Einstein explica que, uma vez que os fótons se deslocam na velocidade da luz, o tempo decorrido entre a absorção de um fóton por um elétron presente na superfície do material e sua consequente ejeção será inversamente proporcional à velocidade da luz, se levado isso em consideração, o tempo previsto será próximo do medido experimentalmente ( $\sim 10^{-9}$ s). Concernente agora à questão da intensidade da luz incidida, que não influencia na energia cinética dos elétrons emitidos, mas somente na quantidade destes (visualizada no aumento da corrente elétrica), a hipótese de Einstein explica que a intensidade da radiação emitida se relaciona com o número de fótons presentes, assim, uma luz mais intensa significa mais fótons, e considerando-se que cada fóton é absorvido por apenas um elétron, o número de elétrons emitidos aumenta, se aumenta-se o número de fótons incidentes, portanto. Em um mesmo material incidido por luz de determinada frequência, os elétrons seriam ejetados todos com a mesma energia cinética. Por outro lado, se a intensidade for mantida constante, e a frequência da luz for aumentada, o número de elétrons ejetados permaneceria o mesmo, mas a energia cinética destes será maior.

A equação matemática que descreve o efeito fotoelétrico segundo a hipótese de Einstein é  $E = h\nu - \phi$ , onde  $E$  é a energia cinética do elétron ejetado,  $h\nu$  é a energia do fóton incidente, e  $\phi$  é a energia com a qual o elétron se liga ao material, chamada de função trabalho. Dessa forma, um fóton precisa ter uma energia maior ou igual à função trabalho do material para que ocorra a ejeção de elétrons, isso corrobora a observação experimental, onde energia de baixa frequência não possibilita o efeito fotoelétrico.

Ao propor uma concepção essencialmente corpuscular da radiação, Einstein provocou na Física um grande abalo, mas não explicou como isso se aplica aos fenômenos tidos como

tipicamente ondulatórios. Uma nova concepção, dessa vez “dual” da radiação se desenvolveria para resolver a questão de como esta é observada ora como onda (nos fenômenos ondulatórios), e ora como partícula (efeito fotoelétrico).

#### **4.4 O Átomo de Bohr**

Desde a antiguidade pensadores consideraram a possibilidade de a matéria ser constituída por elementos fundamentais. Com Tales de Mileto se fazia presente a defesa de que poderia se compreender a natureza a partir de um princípio fundamental singular. Leucipo, Demócrito e Epicuro já consideravam que a matéria poderia ser composta por elementos fundamentais espaçados entre si, e que estes poderiam se combinar. Com o passar do tempo várias concepções sobre a estrutura da matéria foram desenvolvidas, cientistas como Boyle, Newton, Lavoisier e Dalton são exemplos de personagens que contribuíram substancialmente para a construção do conhecimento sobre a natureza da matéria. Thomson destaca-se por ter descoberto o elétron, bem como calcular a relação carga-massa deste, provando que átomos não só eram reais, como possuíam estrutura interna. Em 1904 é publicado por Joseph John Thomson um modelo sobre como tal estrutura poderia ser, o qual veio a ser o mais aceito por alguns anos.

O modelo atômico de Thomson consistia em considerar que o átomo como um objeto de simetria esférica, raio bem definido e carga elétrica positiva, na qual encontravam-se encrustados uma grande quantidade de elétrons – partículas de carga negativa – distribuídos de maneira uniforme sobre a esfera, na qual se deslocavam sem resistência. Thomson propôs que a esfera tinha como função manter os elétrons confinados através da atração eletrostática, sendo esta última compensada pela repulsão entre os elétrons nos arranjos (estáticos ou dinâmicos) na esfera, de modo que o átomo ficaria estável. O primeiro problema no modelo de Thomson era o fato de que quando considerados mais elétrons, era difícil descrever quantitativamente uma configuração de equilíbrio. O Modelo atômico de Thomson foi substituído em 1912 por um novo modelo proposto por Ernest Rutherford, após concluir uma série de observações experimentais acerca do espalhamento de partículas  $\alpha$  por átomos de uma fina lâmina de ouro com Ernest Marsden e Hans Geiger. As partículas espalhadas eram localizadas em um anteparo preparado, por meio de cintilações no mesmo. As observações geraram conclusões acerca da natureza da matéria que exigiam uma nova forma de entender o átomo: o átomo seria composto por um núcleo sólido dotado de carga elétrica positiva, e um espaço vazio de grandes proporções se comparado ao tamanho do núcleo, sendo nesse espaço onde os elétrons descreveriam órbitas, estando ligados ao núcleo por atração eletrostática (não

poderiam permanecer em repouso devido à forte atração eletrostática com o núcleo) (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013).

Os modelos atômicos de Thomson e de Rutherford apresentavam, entretanto, um problema que os fazia ser instáveis e impossíveis de serem exatamente como propostos a princípio, na realidade: a instabilidade eletromagnética. O eletromagnetismo clássico prevê que as formas como os elétrons se distribuiriam segundo as propostas de Thomson e de Rutherford seriam arranjos necessariamente instáveis. O Teorema de Larmor, importante equação da teoria eletromagnética, prevê a emissão de radiação por parte de uma partícula dotada de carga elétrica (independentemente do sinal desta) que seja acelerada. O elétron descrevendo órbitas em torno do núcleo estaria submetido a uma aceleração centrípeta, por isso, parte de sua energia cinética e potencial seria perdida, sendo convertida em energia eletromagnética na emissão, respeitando assim o princípio da conservação de energia. Devido à essa perda de energia, o elétron cairia no núcleo descrevendo um movimento em espiral, e tal comportamento se daria em um espaço de aproximadamente  $10^{-11}s$ . Dessa forma, o eletromagnetismo clássico (o modelo atômico de Rutherford, também, portanto) não é capaz de descrever a existência dos átomos, uma vez que, logicamente, o comportamento previsto não é observado na prática (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013).

O responsável por apresentar um modelo atômico que não apresentava falhas no que se refere à instabilidade eletromagnética foi Niels Bohr. Baseando-se no modelo planetário do átomo de Rutherford, Bohr propôs um modelo que, apesar das semelhanças com o primeiro, apresentava uma forma completamente distinta de se pensar o átomo, em uma proposta que descrevia não apenas átomos com apenas um elétron, e que o emprego de conceitos que se distanciavam da abordagem clássica, como por exemplo, a quantização da energia na radiação de corpo negro, proposta por Planck, a qual encontrou no átomo de Bohr, uma importante aplicação. O modelo atômico de Bohr se baseava em essencialmente dois postulados, o primeiro tratando da inadequação do eletromagnetismo clássico em descrever a forma como ocorria a transição entre níveis de energia: “o equilíbrio dinâmico dos sistemas atômicos nos estados estacionários é governado pelas leis da mecânica clássica, mas as transições entre os diferentes estados estacionários não podem ser tratadas desta maneira” (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013, p. 3). E o segundo sobre como a teoria de Planck tinha aplicação mais geral, inclusiva na natureza das transições entre níveis no átomo: “as transições entre os diferentes estados estacionários são acompanhadas de emissão de radiação eletromagnética de

frequência bem definida, para a qual a relação entre a frequência e a energia emitida é aquela dada pela teoria de Planck” (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013, p. 3).

No modelo proposto por Bohr, o elétron orbitava o núcleo em órbitas com raios bem definidos, mas para contornar o problema da instabilidade eletromagnética, Bohr valeu-se da hipótese de Planck sobre a quantização da energia nos osciladores que emitiam a radiação de corpo negro. Tendo conhecimento de que o espectro de emissão dos átomos não era contínuo, e sim discreto, e que a série de Balmer para a frequência da radiação visível emitida no caso do hidrogênio dada por  $\nu = cR\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ , onde  $R$  é a constante empírica de Rydberg, “Bohr percebeu imediatamente que o resultado de Balmer poderia ser interpretado como proporcional a uma diferença de energias” (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013, p. 4) ( $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = h\nu$ ). Bohr então propõe uma quantização para a energia de ligação do elétron, supondo que o átomo emite energia como Planck sugeriu, ou seja, múltiplos de  $\varepsilon = h\nu$ . Propõe então, que na transição entre uma órbita estável e outra (as órbitas nas quais os elétrons descreveriam suas trajetórias são chamadas de órbitas estacionárias, e são quantizadas: dentre todas as possibilidades espaciais nas quais o elétron poderia descrever uma órbita, este o fará somente onde seu momento angular é um múltiplo inteiro de  $\frac{h}{2\pi}$ , ou seja,  $L = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar$ ), há a emissão de radiação de frequência  $\nu$ , sendo tal frequência relacionada com a frequência  $f$  de revolução do elétron em torno do núcleo por  $\nu = \frac{f}{2}$ . Dessa forma, a energia de ligação  $W$ , é dada por  $W = \frac{nhf}{2}$ . Considerando isso, e envolvendo nos cálculos a energia cinética do elétron, Bohr deduziu a equação que descreve os raios permitidos para as órbitas dos elétrons:  $r_n = \frac{n^2h^2}{4\pi^2mZe^{*2}}$ , onde  $Z$  é carga elétrica do núcleo, e  $e^* = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}$ . Quando  $n$  e  $Z$  são iguais a 1, tem-se o raio de Bohr, sendo os raios superiores, ou seja, as órbitas superiores, múltiplos desse raio por um fator  $n^2$ . Na época de sua publicação, o modelo de Bohr surpreendeu muito os físicos da época, por fazer previsões teóricas sobre a constante de Rydberg e o espectro de emissão do hidrogênio que estavam em consonância com os dados experimentais (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013). Apesar da contribuição para a antiga teoria quântica, o átomo de Bohr apresentou inconsistências: descrevia átomos mais complexos, e nem certos fenômenos físicos, e era epistemologicamente questionável devido à quantia de postulados. O modelo de Bohr foi substituído em 1925 por novas interpretações sobre o átomo com o advento da teoria quântica de Heisenberg e Schroedinger.

#### 4.5 As Ondas de Matéria

Niels Bohr propôs seu modelo atômico de forma a atender algumas características experimentalmente verificadas, inserindo elementos *ad hoc* em sua teoria – os postulados. Esse modelo foi o primeiro a propor uma quantização nos níveis de energia, adicionando à construção do seu modelo a relação  $L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$ . Assumindo a quantização do momento angular, Bohr obteve um modelo de átomo estável, capaz de explicar pontos importantes da Física construída até então. O modelo de Bohr (e a adaptação deste feita por Sommerfeld) era o grande representante da chamada “antiga teoria atômica”. Esta visão da natureza atômica foi durante dez anos considerada a mais convincente, e neste tempo não houve grandes alterações na forma como pensava-se o átomo. É neste contexto que Louis De Broglie, quando da elaboração de sua tese de doutorado, propõe uma ideia que mais uma vez iria mudar a forma como o átomo, e em especial, o elétron, eram encarados.

Em 1923, Louis De Broglie, um físico francês, propôs uma hipótese para explicar a estrutura atômica, em especial, explicar a Física por trás dos postulados de Bohr sobre a estabilidade do átomo. Utilizando algumas substituições físico-matemáticas, De Broglie manipula as equações que descrevem a trajetória de uma partícula, comparando-as com a propagação de uma onda, de modo às equações referentes à partícula conservarem propriedades da onda. Dentro de alguns anos, a hipótese de De Broglie foi testada por cientistas disparando elétrons e raios de luz através de fendas. O que foi constatado é que um feixe de elétrons se comportava da mesma maneira que De Broglie propôs (ROSA, 2004).

De Broglie derivou a equação que relaciona o comportamento ondulatório de partículas de matéria baseando-se em teorias já estabelecidas, como é o caso da equação do momento em função da energia:  $p = \frac{E}{c}$ . Utilizando a teoria de Planck da quantização da energia, que afirma que as quantidades discretas de energia respeitam a equação  $E = h\nu$ . Assim, o momento em função da energia tendo-se conhecimento da relação entre energia e frequência, fica  $p = \frac{h\nu}{c}$ .

Dessa forma, considerando a relação entre velocidade, frequência e comprimento de onda,  $v = \lambda\nu$ , De Broglie chegou à expressão final que relaciona o comprimento de onda de uma partícula com sua velocidade:  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Dessa forma, o comprimento de onda, uma característica intrinsecamente ondulatória, é relacionado matematicamente com a velocidade

de uma partícula. Sendo explicitada a dependência do comprimento de onda da partícula com seu respectivo momento.

Com relação à estabilidade do átomo postulado no modelo atômico de Bohr, De Broglie inclui sua hipótese no segundo postulado de Bohr. Imaginando uma circunferência da órbita como uma corda, e estendendo-a em uma linha reta, aplicou-se a relação de de Broglie, e derivou-se a mesma equação de momento angular proposta por Bohr.

Igualando-se o comprimento de uma circunferência com um número inteiro de comprimentos onda, tem-se:  $2\pi r = n\lambda$ . Inserindo-se nessa reação a equação que representa a hipótese de De Broglie, tem-se:  $2\pi r = \frac{nh}{mv}$ . Isso representa quantos comprimentos de onda “cabem” dentro de uma circunferência, a órbita do elétron. Manipulando-se a equação anterior, tem-se:  $mvr = nh/2\pi$ . Uma vez que  $mvr = L$ , sendo  $L$  o momento angular, tem-se a quantização do momento angular proposto por Bohr:  $L = \frac{nh}{2\pi}$ .



## 5 ANÁLISE DE DADOS

### 5.1 Categoria de Análise “Tema”

A questão respondida pelos dois professores que aborda a categoria de análise “tema” é: “Considera o tema do trabalho interessante? Justifique.”. O quadro 2 traz a transcrição das respostas (encaradas como pareceres para a validação da Material Temático):

*Quadro 2: Categoria de Análise “Tema”*

<b>Professor Avaliador</b>	<b>Resposta/Parecer</b>
Professor Avaliador 1	“Sim. É realizada uma abordagem de parte do assunto Física Moderna e Contemporânea à luz da Filosofia para compreender melhor o experimento denominado de difração de elétrons”.
Professor Avaliador 2	“Sim. A procura da compreensão do mundo Físico e das transformações que nele ocorrem sempre levou o homem à busca de explicações. É nesse percurso que usamos todas as ferramentas disponíveis. Sendo assim, o trabalho procura elucidar num viés científico-filosófico o que Louis De Broglie propôs em 1924”.

Ambos os professores responderam de forma positiva à primeira questão, deixando claro que suas opiniões sobre o conteúdo da Física abordado no Material Temático é que o mesmo é interessante em termos gerais. Aqui pode-se fazer uma observação acerca da natureza dos conteúdos abordados. A Física Moderna em geral e, portanto, a dualidade onda/partícula não é considerada um tema introdutório à Física, de modo que um “leigo” por assim dizer, talvez não demonstre interesse pelo material, uma vez que não traz consigo a bagagem intelectual requerida para que, ao primeiro contato com o material, evidencie-se interesse.

O parecer do Professor Avaliador 1 cita ainda que o conteúdo é abordado “à luz da Filosofia para compreender melhor o experimento denominado de difração de elétrons”, o que

retoma o debate acerca das vantagens que uma análise filosófica da Física Moderna pode proporcionar ao estudante de Física em nível superior, uma vez que, muitas vezes são as implicações do conteúdo no que se refere à constituição da realidade, que provocam no mesmo o *insight* que o faz compreender a Física com a devida seriedade (PEREIRA, MARTINS, 2000).

## 5.2 Categoria de Análise “Organização Estrutural”

A questão respondida pelos professores que aborda a categoria de análise “organização estrutural” é: “Considera que a estrutura (ordem dos conteúdos) é razoável? Justifique.”. O quadro 3 traz a transcrição das respostas (encaradas como pareceres para a validação do Material Temático):

*Quadro 3: Categoria de Análise “Organização Estrutural”*

<b>Professor Avaliador</b>	<b>Resposta/Parecer</b>
Professor Avaliador 1	“Não só razoável como muito boa. A sequência da leitura é contínua (sem sobressaltos)”.
Professor Avaliador 2	“O conteúdo deve ser apresentado de forma evolutiva e fundamentado no desenvolvimento histórico dos conceitos, e o texto traz alguns exemplos para determinadas situações abordadas”.

Novamente os pareceres de ambos os Professores Avaliadores foram positivos quanto à estruturação do Material Temático. O Professor Avaliador 1 complementa seu parecer positivo afirmando que a escrita do material proporciona uma “leitura contínua”, o que pode significar uma leitura mais agradável, uma vez que o estudante pode seguir a ordem dos conteúdos conforme o próprio material se organiza. Com relação à ordem dos temas no material, foi dada devida atenção, quando do seu desenvolvimento, ao nível de dificuldade dos temas e suas implicações filosóficas. Essa ordem não segue necessariamente uma precisa ordem crescente (o que seria tecnicamente impossível), mas a distribuição dos conteúdos levou em conta fatores gerais de dificuldade. Ainda, uma vez que a Física requer rigor nas definições, não se pode simplificar indefinidamente os conceitos, modificando a linguagem científica necessária, mas sim, o Material Temático deve ser fortemente embasado em

linguagem científica (OLIVEIRA, et al., 2009). O fato de ambos os Professores Avaliadores terem dado pareceres positivos quanto à ordem dos conteúdos é um indicativo de que o Material Temático tem potencial de ser utilizado como material complementar em disciplinas de Física Moderna.

### 5.3 Categoria de Análise “Profundidade”

A questão respondida pelos professores que aborda a categoria de análise “profundidade” é: “Os conteúdos abordados tem profundidade razoável levando-se em conta o objetivo do trabalho? Justifique.”. O quadro 4 traz a transcrição das respostas (encaradas como pareceres para a validação da Material Temático):

*Quadro 4: Categoria de Análise “Profundidade”*

<b>Professor Avaliador</b>	<b>Resposta/Parecer</b>
Professor Avaliador 1	“Considero o assunto complexo. Muitos educadores demonstram receio em discutir na sala de aula temas complexos, tais como o que o trabalho apresenta. O autor dá uma direção racional ao assunto. Só considero que a leitura do trabalho não seja adequada à leigos no assunto”.
Professor Avaliador 2	“Considerando o objetivo do trabalho acho que poderia ser mais detalhado em alguns tópicos, como descrição de equações”.

No caso da terceira questão, os Professores Avaliadores foram mais cautelosos quanto a seus pareceres, considerando que dificilmente um leigo no assunto poderia tirar proveito efetivo do material, uma vez que pode-se dizer que o mesmo tem como requisito conhecimentos prévios de Física Moderna, já que muitas vezes alguns conceitos são citados sem terem sido primeiramente apresentados, pois o escopo do trabalho seria desvirtuado se assim fosse.

Com relação ao parecer do Professor Avaliador 2, o mesmo apresentou uma observação que servirá como base para uma melhoria do material produzido, uma vez que eventualmente algum elemento das equações pode não ter ficado claro.

A Física Moderna, e sobretudo a Mecânica Quântica, tem como distinta característica a sua “estranheza”, de modo que em termos gerais pode-se considerá-la “complexa”. A questão da dualidade onda/partícula, como componente da Física Moderna, impõe ainda mais desafios ao entendimento dos estudantes de Física, tratando de conceitos que não serão compreendidos se uma aprendizagem prévia não tiver acontecido (ANTONOWISKI, et al., 2017). Essa estranheza inerente à Física Quântica tem como potencial auxílio em sua compreensão, as análises filosóficas da mesma, conforme citado anteriormente, e de fato esse foi o objetivo do presente trabalho.

#### 5.4 Categoria de Análise “Contribuição para a Formação do Licenciando”

A questão respondida pelos professores que aborda a categoria de análise “contribuição para a formação do licenciando” é: “De que forma a leitura do Material Temático por um licenciando em Física contribui para sua formação?”. O quadro 5 traz a transcrição das respostas (encaradas como pareceres para a validação do Material Temático):

*Quadro 5: Categoria de Análise “Contribuição para a Formação do Licenciando”*

<b>Professor Avaliador</b>	<b>Resposta/Parecer</b>
Professor Avaliador 1	“Talvez o modo como foi realizada a análise filosófica da Física quântica traga ou desperte interesses no licenciando de maneira a querer complementar seus estudos”.
Professor Avaliador 2	“Se o objetivo é oferecer uma dose de conteúdo compatível com a faixa acadêmica do licenciando, acredito que o texto favorecerá a gradual formação desse estudante e pode de algum modo induzir a questionamentos que suscitem a reflexão e a pesquisa”.

A essência do presente trabalho é desenvolver um material para estudantes de graduação em Física que tenha como forma de abordagem, a Filosofia da Física, o que torna a presente questão, talvez a mais importante. A possibilidade de implementação do material desenvolvido e suas contribuições para a formação em Física teve como positivos os

pareceres dos Professores Avaliadores. O avaliador 1 afirmou algo que pode ser considerado como confirmando sucesso no objetivo do presente trabalho: “o modo como foi realizada a análise filosófica da Física quântica traga ou desperte interesses no licenciando”. O avaliador 2 em seu parecer sobre a contribuição para a formação de um licenciado cita que o estudo do Material Temático desenvolvido pode “pode de algum modo induzir a questionamentos que suscitem a reflexão e a pesquisa”, o que remete à fundamentação teórica do presente trabalho, na qual se fez um discussão defendendo e fundamentando sobre os benefícios que o estudo de fenômenos e concepções Físicas a partir de uma abordagem filosófica pode proporcionar ao licenciando em Física.

Dessa forma, no que se refere à possibilidade de que o Material Temático auxilie estudante de Física a compreender melhor a Física Moderna estudada, com uma contextualização da Filosofia da Física no experimento de difração de elétrons, os pareceres de ambos os Professores Avaliadores indicam que é plausível.

### 5.5 Categoria de Análise “Conveniência”

A questão respondida pelos professores que aborda a categoria de análise “contribuição para a formação do licenciando” é: “O presente trabalho é pertinente sobre o que se exige de um licenciado? Justifique.” O quadro 7 traz a transcrição das respostas (encaradas como pareceres para a validação do Material Temático):

*Quadro 6: Categoria de Análise “Conveniência”*

<b>Professor Avaliador</b>	<b>Resposta/Parecer</b>
Professor Avaliador 1	“Sim. É sempre agradável estudar bons trabalhos. E este certamente é um deles”.
Professor Avaliador 2	“A Física é uma Ciência que envolve conceitos complexos e abrangentes. O trabalho de final de curso deve obedecer aos quesitos de apresentação, pesquisa, argumentação e conclusões, demonstrando a experiência do licenciado nessa atividade. O que pode ser verificado”.

As demandas que se apresentam cada vez mais às formações nas diversas áreas acadêmicas, também tem sua presença no contexto da licenciatura e bacharelado em Física. Tendo em vista os problemas e desafios da educação atualmente presentes no cenário brasileiro, não se pode dar margem proposital à presença de lacunas na formação de professores de Física, de modo que, o máximo de conhecimentos que este puder adquirir durante a graduação, é válido. Dessa forma, a quinta e última questão do questionário aberto envolveu a conveniência do Material Temático para a formação do estudante de Física em nível superior, objetivando adquirir pareceres dos Professores Avaliadores acerca da potencial implementação do material, no contexto das exigências de um formando em Física. Ambos os pareceres podem ser considerados positivos, o que novamente indica que o Material Temático tem potencial para ser utilizado em aulas de Física no Ensino Superior em Física, em disciplinas de Física Moderna.

## **5.6 Conclusão da Análise de Dados**

Uma vez que o objetivo do material desenvolvido no presente trabalho é a contribuição à formação de estudantes de Física no que se refere à conceitos filosóficos desta, com base nos pareceres dos Professores Avaliadores pode-se constatar que o Material Temático tem potencial de implementação, e sua leitura pode ser incentivada por professores de disciplinas relacionadas à Física Moderna. Uma vez que o material conta com uma prática experimental da Difração de Elétrons, o mesmo quando utilizado por estudantes, pode oferecer algo original a estes, já que que terão não apenas um roteiro de experimento de Física Moderna, mas uma discussão anterior e posterior ao experimento, sobre a Filosofia por trás daquilo que estão estudando.

## 6 CONCLUSÕES

No Material Temático desenvolvido no presente Trabalho de Conclusão de Curso discutiu-se sobre as implicações filosóficas que aceitação de certas concepções como verdade provocam. A inserção de determinados conceitos na Física representou verdadeiras reestruturações desta. A revolucionária concepção dual da matéria é exemplo vívido de como uma análise filosófica da Física é, não só possível, como enriquecedora. A Filosofia da Física tendo como objetivo refletir sobre os temas primeiros da Física, abordando temas que não raramente se encontram no limiar do conhecimento e capacidade de compreensão humana, é ferramenta muitas vezes negligenciada por estudantes de Física.

A Física Quântica, umas das mais intrigantes áreas da Física Moderna, é muitas vezes sinônimo de perplexidade por parte de quem a estuda. Por introduzir conceitos tão dissonantes para com o que até então era encarado como verdade absoluta e completa, a Teoria Quântica revolucionou a Física. Mais do que isso, a reestruturou. Poucas outras teoria ou modelos físicos havia abalado de tal maneira o conhecimento humano. Isso porque as implicações que estão por trás dos modelos matemáticos vão de encontro com muito daquilo que o senso comum humano encara como inquestionável, como parte integrante da realidade. Novas noções de realidade foram introduzidas no conhecimento humano quando do desenvolvimento da Teoria Quântica. As novas concepções de como o universo funciona em sua mínima escala, provoca consequências sem precedentes na forma de encarar a realidade macroscópica. Descobrir que a matéria não é tão simples quanto se pensava, que na realidade ela é apenas uma face de uma moeda, certamente carrega umas das mais profundas quebras de paradigma na história da Ciência.

A inserção dos conceitos de não-localidade e do indeterminismo na Física representam também quebras de paradigma sensíveis. A nova noção de que estrutura da realidade pode (e é) ser muito diferente do que a mente humana compreende como normal, certamente é uma das implicações filosóficas mais profundas que a Teoria Quântica provocou. A quebras dos paradigmas vigentes significaram uma passagem só de ida em direção à construção de conhecimentos que envolvem conceitos cada vez mais contra-intuitivos para a mente humana, o que não significa um obstáculo intransponível na busca sobre a compreensão sobre a estrutura da realidade.

## REFERÊNCIAS

- ABBAGNANO, Nicola. **Dicionário de Filosofia**. Tradução da 1. ed. Editora Martins Fontes, São Paulo, 2007.
- ALBIERI, Sara. **O Conhecimento como Questão: o Papel da Epistemologia na Formação Superior**. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Rev. Grad. USP, vol. 1, n. 2, nov. 2016.
- AMORIN, Sartório de. **O que é um paradigma?** Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- ANTONOWISKI, R.; ALENCAR, M. V.; ROCHA, L. C. T. **Dificuldades Encontradas para Aprender e Ensinar Física Moderna**. Universidade Federal de Mato Grosso, 2017.
- ASSIS, Maria Cristina de. **Metodologia do Trabalho Científico**. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. 2014. Disponível em: <[http://biblioteca.virtual.ufpb.br/files/metodologia\\_do\\_trabalho\\_cientifico\\_1360073105.pdf](http://biblioteca.virtual.ufpb.br/files/metodologia_do_trabalho_cientifico_1360073105.pdf)>. Acesso em: 21 out. 2018.
- BANDEIRA, Denise. **Materiais Didáticos**. Curitiba, 2009. Disponível em: <[https://www.academia.edu/10850993/Materiais\\_did%C3%A1ticos](https://www.academia.edu/10850993/Materiais_did%C3%A1ticos)>. Acesso em: 21 out. 2018.
- BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. 1ª ed. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.
- CHALMERS, Alan Francis. **O que é Ciência afinal?** Trad. de Raul Fiker. São Paulo, Brasiliense, 1997. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/EducacaoFilosofia/article/view/780/704>>. Acesso em: 21 out. 2018.
- CHIBENI, Silvio Seno. **Observações Sobre As Relações Entre A Ciência E A Filosofia**. I Semana da Física, Instituto de Física Gleb Wataghin, Unicamp, 10 – 14 set. 2001, Universidade de Campinas, 2001.
- GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.



LONDERO, Leandro. **A História E Filosofia da Ciência Na Formação De Professores De Física: Controvérsias Curriculares.** *História da Ciência e Ensino*, Volume 11, 2015 – pp. 18-32, 2015.

MARTINS, André Ferrer Pinto. **História e Filosofia da Ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho.** *Cad. Bras. Ens. Fís.* v. 24, n. 1 (2007), UFSC, Florianópolis. 2007. Disponível em: < <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6056>>. Acesso em: 21 out. 2018.

MORAES, Benedito Tadeu Ferreira de. **A Fórmula De Planck E O Impacto Da Teoria Quântica.** Instituto Federal do Pará-IFPA, Belém. 2010. Disponível em: <<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/706/422>>. Acesso em: 21 out. 2018.

MOREIRA, Herivelto; CALEFFE, Luiz Gonzaga. **Metodologia da Pesquisa para o Professor Pesquisador.** 2ª ed. – Rio de Janeiro: Lamparina, 2008.

OLIVEIRA, T.; FREIRE, A.; CARVALHO, C.; AZEVEDO, M.; FREIRE, S.; BAPTISTA, M. **Compreendendo a Aprendizagem da Linguagem Científica na Formação de Professores de Ciências.** *Educar*, Curitiba, n. 34, p. 19-33, 2009. Editora UFPR.

PARENTE, F.A.G. SANTOS, A.C.F. TORT, A.C. **Os 100 Anos do Átomo de Bohr.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 4, 4301, 2013. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/354301.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

PEREIRA, Giulliano José Segundo Alves. MARTINS, André Ferrer P. **História E Filosofia da Ciência nos Currículos dos Cursos de Licenciatura em Física e Química da Ufrn.** VII Empec. Florianópolis, 2000. Disponível em: <<http://posgrad.fae.ufmg.br/posgrad/viiempec/pdfs/426.pdf>>. Acesso em: 11/10/2019.

PESSOA, Osvaldo. **Filosofia da Física - Filosofianas Controvérsias Científicas.** Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://opessoa.fflch.usp.br/sites/opessoa.fflch.usp.br/files/FiFi-17-Cap01.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

ROSA, Pedro Sergia. **Louis De Broglie E As Ondas De Matéria.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas. 2004. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/Teses/Pedro-Sergio-Rosa.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

SANTOS, Carlos José Giudice dos. **Tipos de Conhecimento**. Oficina de Pesquisa. Disponível em:

<[http://www.oficinadapesquisa.com.br/APOSTILAS/METODOL/\\_OF.TIPOS\\_CONHECIMENTO.PDF](http://www.oficinadapesquisa.com.br/APOSTILAS/METODOL/_OF.TIPOS_CONHECIMENTO.PDF)>. Acesso em: 21 out. 2018.

SCHULZ, Peter A. **Duas nuvens ainda fazem sombra na reputação de Lorde Kelvin**. Rev. Bras. Ensino Fís. vol.29 no.4 São Paulo, 2007. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172007000400006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172007000400006)>.

Acesso em: 21 out. 2018.

SILVA, Indianara. **Uma nova luz sobre o conceito de fóton: Para além de imagens esquizofrênicas**. Departamento de Física. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana. 2015. Disponível em: <

<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v37n4/0102-4744-rbef-37-4-4204.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

STUDART, Nelson. **A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck**.

Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, 2000. Disponível em: <

[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_523.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf)>. Acesso em: 21 out. 2018.

VASCONCELLOS, César Augusto Zen. **Efeito Fotoelétrico**. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Instituto de Física. Departamento de Física. 2014. Disponível em:

<<http://www.cesarzen.com/FIS1056Lista4.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

ZINKERNAGEL, Henrik. **Are We Living In A Quantum World? Bohr And Quantum Fundamentalism**. Department of Philosophy I, University of Granada, Spain, 2015.

Disponível em: <<http://philsci-archive.pitt.edu/11785/1/BohrQuantumWorld.pdf>>. Acesso

em: 21 out. 2018. Acesso em: 21 out. 2018.

## APÊNDICES

### Apêndice A

#### Questionário de Avaliação para os Professores

1) Considera o tema do trabalho interessante? Justifique.

---

---

---

---

---

2) Considera que a estrutura (ordem dos conteúdos) é razoável? Justifique.

---

---

---

---

---

3) Os conteúdos abordados tem profundidade razoável levando-se em conta o objetivo do trabalho? Justifique.

---

---

---

---

---

4) De que forma a leitura do Material Temático por um licenciando em Física contribui para sua formação?

---

---

---

---

---

5) O presente trabalho é pertinente sobre o que se exige de um licenciado? Justifique.


---

---

---

---

---

The background of the page is a deep blue gradient. A bright, glowing light source is positioned on the left side, creating a lens flare effect with several smaller, dimmer spots. Overlaid on this are several curved, semi-transparent blue lines that sweep across the page from the top right towards the bottom left, resembling diffraction patterns or wave fronts. The overall aesthetic is scientific and ethereal.

# **Implicações Filosóficas da Natureza Dual da Matéria – O Experimento de Difração de Elétrons**

**Lucas Chibeloski Bail**

2019



## Filosofia da Física

Essa subdivisão do raciocínio filosófico trata das questões que envolvem a Física e suas implicações para com a humanidade, suas características, métodos, objetivos, natureza, conceitos, etc., tratando muitas vezes de temas que estão no limiar do conhecimento da Física, e levando a questionar sobre os mais básicos fundamentos da Física, e da realidade, portanto. A Filosofia da Física é o estudo dos elementos subjacentes das teorias Físicas, o que essas teorias implicam, o que não implicam e, em particular, o que dizem sobre a maneira como o mundo e o universo é estruturado.

Filosofia significa “amor à sabedoria”, e Física, “natureza”. Abordar a Física a partir de uma perspectiva filosófica pode possibilitar a constatação de implicações que as equações matemáticas não são capazes de fornecer em primeira análise.

Sendo uma área metaFísica, um estudo da natureza essencial e fundamental das coisas, objetiva abordar questionamentos acerca da organização estrutural do universo, mudanças no conhecimento humano, epistemologia, a forma como a descrição matemática pode chegar a princípios fundamentais do universo, se estes existem ou se as teorias são necessariamente segregadas, etc.

Não é aceito que abordagens puramente filosóficas possam gerar resultados físicos, a função da epistemologia, o estudo da natureza do conhecimento científico, não é prever o que será observado na natureza, mas sim avaliar como a Ciência, e em especial, a Física, reagirá se determinados elementos forem verificados. Ou seja, as implicações da construção do conhecimento.

“Muitas pessoas hoje parecem-me com alguém que já viu milhares de árvores, mas nunca viu uma floresta. O conhecimento histórico e filosófico dá independência dos preconceitos que a maioria dos cientistas está sofrendo. Essa independência criada pelo pensamento filosófico é a marca da distinção entre um mero artesão ou especialista e um verdadeiro buscador da verdade” (EINSTEIN, 1944).



## Filosofia da Física Quântica

A Física Quântica, como área da Física, descreve o comportamento da natureza em escalas subatômicas.

A Metafísica, como ramo da Filosofia, aborda e analisa a natureza estrutural da realidade em si.

As diferentes interpretações da Física Quântica propõem conceitos incomensuráveis para com a Física Clássica, e o próprio senso comum. Tais conceitos abrem espaço para uma análise filosófica e Metafísica. A natureza dual da matéria, o problema da medição e o conceito de Função de Onda, são expoentes no que se refere a essa abertura da Física Quântica para uma análise filosófica de suas implicações, uma vez que estes e outros elementos da Teoria Quântica tratam dos mais fundamentais elementos da estrutura da realidade.

Bohr (1885 – 1962) sobre a natureza da Física Quântica: “Não existe mundo quântico. Existe apenas uma descrição Física quântica abstrata. É errado pensar que a tarefa da Física é descobrir como é a natureza. A Física diz respeito ao que podemos dizer sobre a natureza”. Bohr mais de uma vez mencionou a questão da limitação que a mente humana impõe ao entendimento completo da natureza, principalmente devido a problemas semânticos e de linguagem. Bohr considerou que para o devido entendimento das peculiaridades dos fenômenos quânticos, a substituição de conceitos elementares e o desenvolvimento de uma nova lógica seria necessária. Isso porque as condições fundamentais da mente humana são incompatíveis com alguns conceitos que a Física Moderna tem apresentado.

Aparentemente a estranheza quântica é regra no universo, e conceitos do senso comum como realismo, determinismo e localidade foram relativizados, ou até mesmo dispensados.

“Tudo o que chamamos de real é feito de coisas que não podem ser consideradas reais” – Niels Bohr.

## Conceitos Filosóficos

### Dualismo

O Dualismo é uma concepção filosófica definida pela existência de dois princípios independentes e incomensuráveis entre si que formam um todo. Isso significa que um lado do dualismo não pode ser descrito em termos do outro, e a princípio, não podem ser reduzidos a um mesmo modelo mais fundamental.

Historicamente na Física, entretanto, muitos conceitos que pareciam ser díspares mostraram-se ser na realidade diferentes manifestações de um mesmo princípio mais fundamental.

### Dicotomia

Do grego, significa “dividido em dois”, e representa um sistema composto por duas entidades normalmente opostas entre si, mas que são mutuamente complementares. Em suma, a dicotomia pode ser definida como a divisão de um conceito em outros dois. Dicotomia geralmente está ligada ao Dualismo, uma vez que as duas partes que formam o conjunto são essencialmente complementares, e portanto, de mesma notabilidade.

### Ontologia

Um subconjunto da metaFísica, a Ontologia trata de o que é a existência, e sobre como as coisas existem. Em suma, é a especificação das conceituações, descrição sistemática da existência. Um corpo de conhecimento formal se baseia em uma conceituação (objetos, conceitos, etc.) A conceituação é a visão abstrata da entidade que se objetiva representar. A Ontologia é a especificação explícita de uma conceituação, a representação/descrição daquilo que existe.

### Epistemologia

O estudo da natureza do conhecimento científico, sua origem, limites e definições. Um subconjunto da Filosofia do Conhecimento, a epistemologia trata das formas como a mente humana é capaz de criar, receber, compreender e expressar conhecimentos. Debate acerca da construção do conhecimento, sobretudo o científico, segundo as correntes filosóficas empiristas e racionalistas. Envolve critérios de demarcação do conhecimento científico e o processo de investigação.



## A Construção do Conhecimento

Desde a época dos filósofos antigos debatia-se sobre como o conhecimento é construído, sua natureza em si. Historicamente tornou-se forte o debate entre o empirismo e o racionalismo. O primeiro, afirmando que todo e qualquer conhecimento tem sua origem na experiência do observador, já o segundo, afirma que a experiência não é confiável o suficiente, e que somente com o emprego majoritário da razão, é que o conhecimento efetivo se constrói.

No contexto da Física como área da Ciência, o racionalismo seria empregado no desenvolvimento de modelos, teorias, leis, aplicação da lógica e da matemática, interpretando dados e fazendo previsões e generalizações. O empirismo é empregado quando se prioriza dados experimentais, reunidos pelos sentidos do pesquisador. A conexão entre as duas correntes filosóficas se dá pelo racionalismo auxiliar na compreensão dos padrões observados na natureza, evitando uma coleta de dados sem valor, assim a teoria alimenta o experimento, o qual por sua vez coloca em teste a teoria.

### Método Científico

A atividade científica tem como parte integrante a atitude do indivíduo. Essa atividade é definida pela aplicação de um *método* rigoroso e imparcial, que atua como crítico de modelos e teorias aplicando a racionalidade. O desenvolvimento de uma hipótese, seu teste e subsequente modificação para melhor descrever um fenômeno, ou comprovação, são regidas pela aplicação do método científico.





## A Dualidade Onda Partícula

Esse conceito físico se refere a uma característica peculiar da natureza, o de que comportamentos corpusculares e ondulatórios são observados em um mesmo sistema, geralmente em partículas como elétrons. Einstein propôs um modelo no qual campos eletromagnéticos seriam quantizados em pacotes com energia  $E=hf$  (onde  $f$  é a frequência da radiação, e  $h$  é a constante de Planck) chamados fótons, contrariando a concepção vigente de que o campo eletromagnético possui natureza essencialmente oscilatória e contínua. A concepção corpuscular no eletromagnetismo foi reafirmada no contexto do Efeito Compton. Um abalo nos pilares da Física se concretizou quando De Broglie propôs uma suposta simetria na natureza, a de que não só ondas poderiam apresentar comportamentos corpusculares, como a matéria também poderia apresentar comportamentos ondulatórios. O comportamento ondulatório da matéria foi experimentalmente comprovado posteriormente, o que introduziu formalmente na Física uma nova concepção na natureza, peculiar por ser intrinsecamente dualística. Não mais poderia se compreender a natureza sem considerar concomitantemente princípios físicos aparentemente em essência sem relação.

Uma compreensão da forma como os caracteres ondulatório e corpuscular se relacionavam de forma complementar foi enunciado por Bohr no Princípio da Complementaridade. Este princípio afirma que o que determina qual caráter será observado é o experimento, mas que os aspectos ondulatório e corpuscular são partes complementares, e não contraditórios, de um modelo mais fundamental.

## A Função de Onda

Introduzida com o formalismo de Schrödinger da Mecânica Quântica, a Função de Onda é essencialmente uma ferramenta que descreve o comportamento de partículas. Conforme será citado posteriormente, dependendo da Interpretação, a Função de Onda tem diferentes descrições. O que é consenso é que esta descreve o comportamento ondulatório das partículas.

A Função de Onda de um sistema passa por diferentes análises matemáticas dependendo da interpretação, mas a principal concepção sobre o conceito de Função de Onda, é que se trata de uma entidade puramente matemática, que não é dotada de existência por si só, e que carrega informações probabilísticas sobre o estado do sistema por ela descrito.

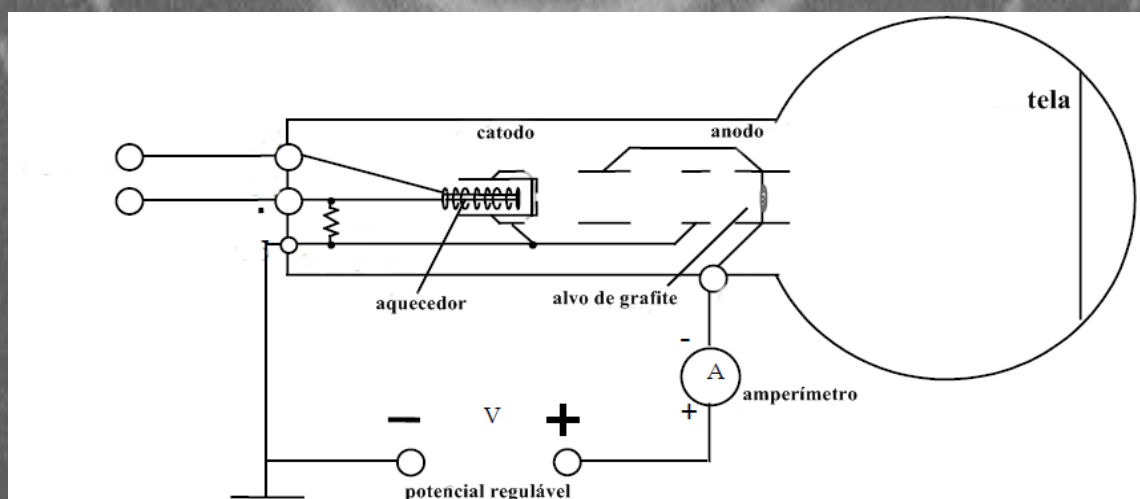
Sendo um dos pilares da Teoria Quântica, a Função de Onda é assunto de pesados debates físico-filosóficos acerca de sua natureza, sua ontologia.



## A Difração de Elétrons

Em sua suposição, De Broglie relaciona o comportamento ondulatório da matéria com o seu momento através da relação  $\lambda = \frac{h}{p}$  (onde  $p$  é o momento linear). Dessa forma, quanto maior o momento de uma partícula, mais fácil será de se observar o caráter ondulatório desta. Este é o princípio do experimento da Difração de Elétrons – um feixe de elétrons em alta velocidade (velocidade esta atingida devido a um potencial elétrico) é direcionado a (por exemplo) um cristal. O feixe sofrerá difração quando atingir as camadas atômicas do material, as quais agem como fendas, respeitando os princípios da Óptica Física, e observa-se um padrão de interferência. Esse experimento foi realizado primeiramente por Clinton Davisson e Lester Germer, comprovando a hipótese de De Broglie, e estabelecendo de forma sólida um princípio puramente quântico.

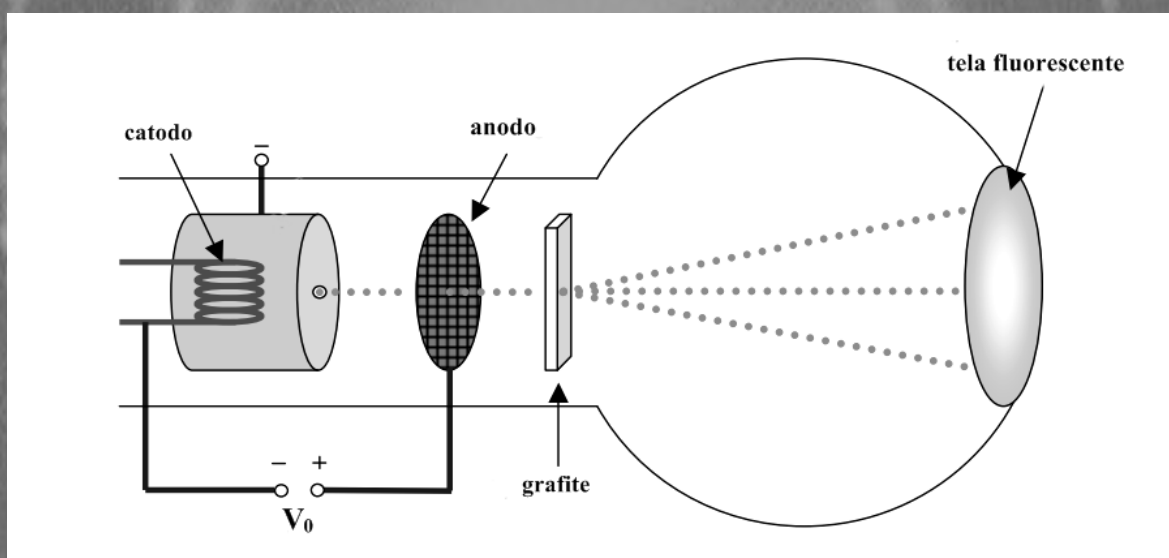
Do experimento: o aquecedor, o cátodo e o ânodo compõem o canhão de elétrons. Elétrons são ejetados de um filamento aquecido (emissão termiônica) localizado dentro de um cilindro de metal revestido de óxido. Após emitidos, os elétrons são acelerados por dois pares de anéis anódicos que geram um potencial regulável ao qual os elétrons são submetidos. Isso provoca a formação de um feixe de elétrons, o qual por não percorrer um espaço muito grande, mantém um ângulo de abertura relativamente baixo. O feixe terá energia cinética proporcional a esse potencial regulável. Para velocidades não relativísticas, essa energia é  $E_c = eV_0$  (onde  $e$  é a carga do elétron e  $V_0$  é o potencial). Passando pelo anodo, o feixe atinge uma tela que contém grafite. Esse grafite atua como um policristal, ou seja, microcristais aleatoriamente orientados, o que permite a incidência do feixe eletrônico por qualquer ângulo. Os planos atômicos do policristal atuam nesse experimento como uma rede de difração. Deixando o alvo, o feixe agora difratado percorre uma distância e atinge uma tela de vidro revestida com fósforo. A tela é excitada pelos elétrons, possibilitando a visualização do padrão de difração característico do comportamento ondulatório. A imagem a seguir traz uma esquematização do aparato. Essa comprovação, em conjunto com os resultados acerca da natureza corpuscular no eletromagnetismo, formaram as bases da teoria dual da matéria.



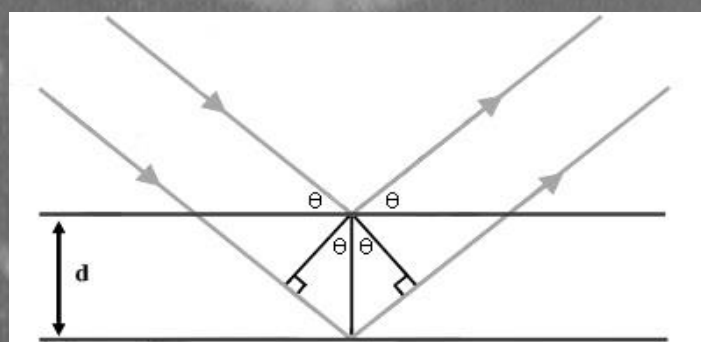
## O Experimento de Difração de Elétrons

### Dos Princípios do Experimento

O experimento consiste em um filamento que emite elétrons por emissão termiônica, elétrons esses que são acelerados por um potencial ajustável entre o cátodo e o ânodo (diferentemente do tubo de raios catódicos, o potencial utilizado na Difração de Elétrons é alto). Tais elementos configuram o canhão eletrônico, responsável pela geração do feixe de elétrons, que é direcionado a uma placa metálica que contém uma camada de grafite (átomos de carbono), que constitui um policristal que atua como rede de difração. A natureza ondulatória dos elétrons é observada através de sua difração no grafite. Na tela fluorescente (revestida de fósforo) observam-se anéis de difração em torno do ponto central no eixo do feixe. Essa configuração é colocada dentro de um tubo com vácuo, uma vez que moléculas de ar atenuariam o feixe devido as colisões. A imagem a seguir demonstra a montagem do equipamento.



As propriedades ondulatórias dos elétrons são observadas nesse experimento pela interferência resultante da dispersão do feixe de elétrons pelos sucessivos planos atômicos constituintes do policristal, conforme a imagem:





Para um único cristal, uma forte reflexão ocorreria quando a condição de Bragg fosse satisfeita:

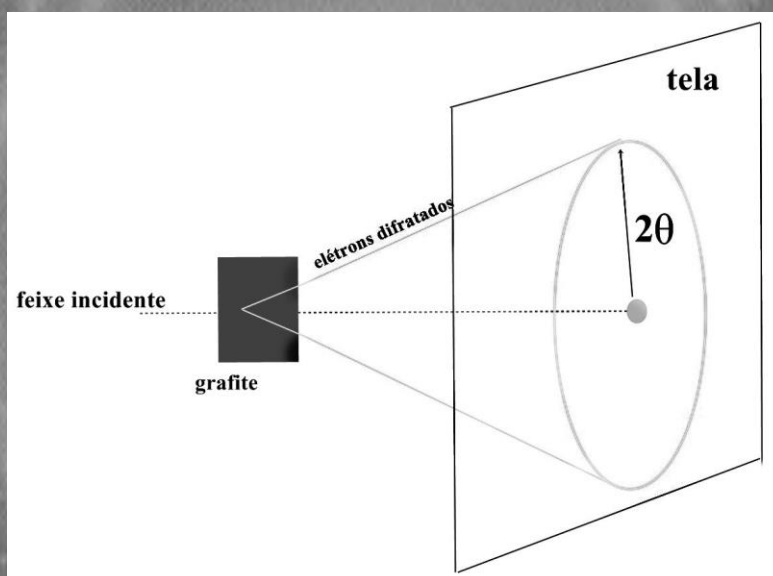
$$n\lambda = 2d\text{sen}(\theta) \quad (1)$$

Onde  $d$  é a espessura da fenda (no caso, distância entre planos) que causa a difração, e  $\theta$  é o ângulo de difração.

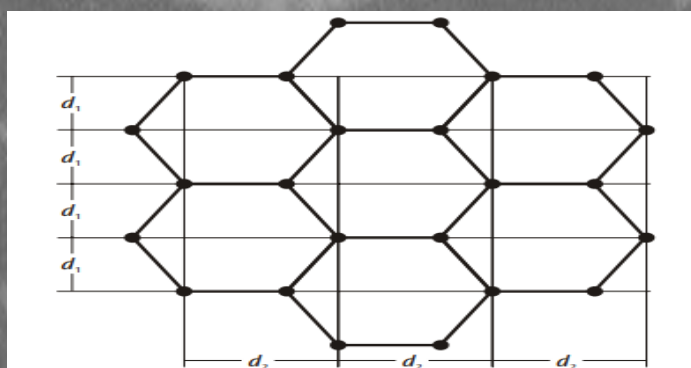
O ângulo de difração  $\theta$  pode ser determinado sabendo-se o valor dos raios  $r$  dos máximos, e a distância entre a tela fluorescente e o grafite, a qual é  $D = 127\text{mm}$ . Dessa forma, por geometria:

$$\theta = \frac{1}{4} \arcsen\left(\frac{2r}{D}\right) \quad (2)$$

O grafite utilizado no experimento, no entanto, é constituído de muitos microcristais orientados aleatoriamente, e devido a isso, o feixe após ser difratado emergirá com forma cônica de meio ângulo  $2\theta$ , conforme a imagem a seguir.



Uma vez que o grafite é constituído por uma estrutura cristalina com duas distâncias entre planos diferentes, quando da observação dos anéis de difração, os dois anéis mais internos ocorrem devido às reflexões de primeira ordem, ou seja  $n = 1$ , pelos planos interatômicos, cada um dos dois associado a uma dessas distâncias, as quais são tabeladas como  $d_1 = 123\text{ pm}$  e  $d_2 = 213\text{ pm}$ . A imagem a seguir demonstra tais distâncias:



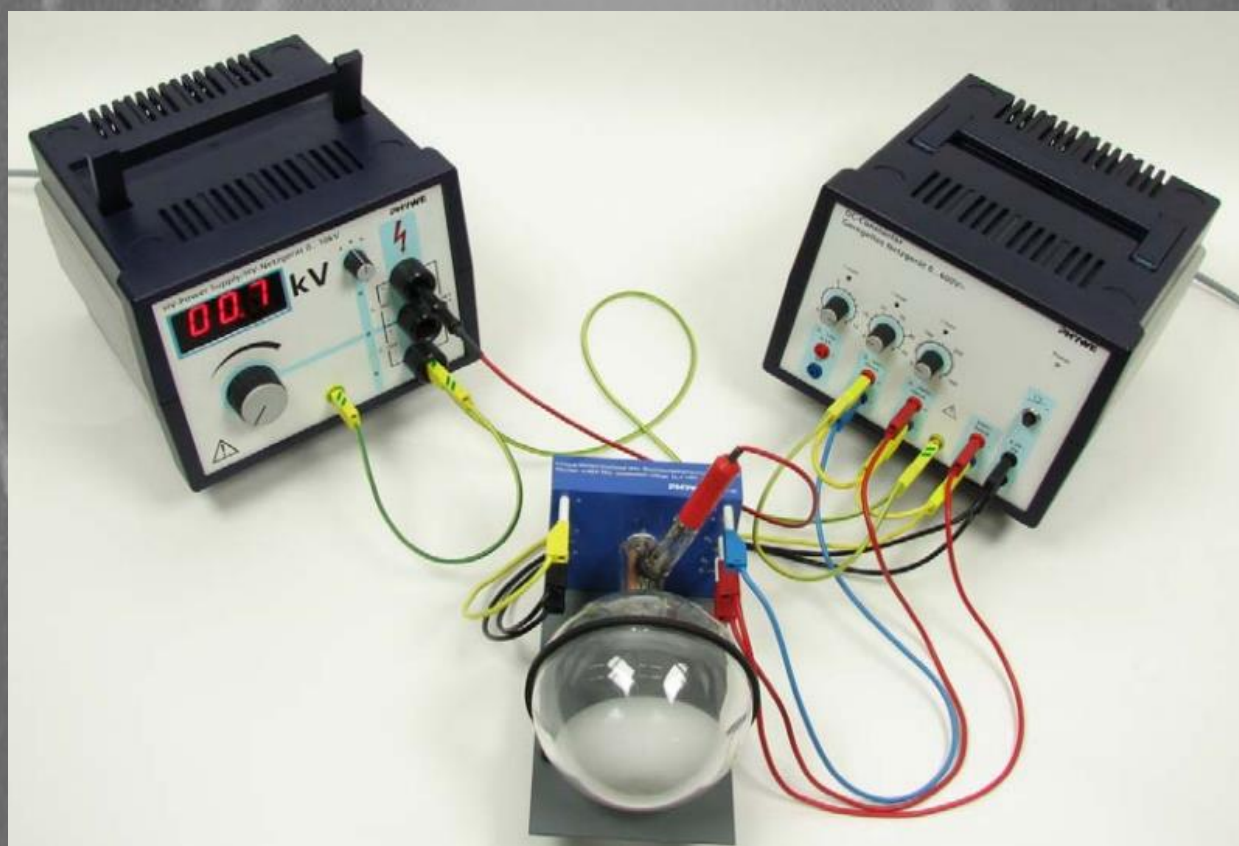
## Procedimentos Experimentais

### Aparatos:

- Tubo de difração de elétrons (1)
- Resistor de alto valor, 10 MOhm (1)
- Encaixe com pino (1)
- Plug conector, 2 pçs. (1)
- Cabo de conexão, 250 mm, vermelho (1)
- Cabo de conexão, 250 mm, azul (3)
- Cabo de conexão 750 mm, vermelho (2)
- Cabo de conexão, 750 mm, amarelo (2)
- Cabo de conexão, 750 mm, azul (3)
- Unidade de alimentação de alta tensão, 0-10kV (1)
- Fonte de alimentação, 0...600 VDC (1)

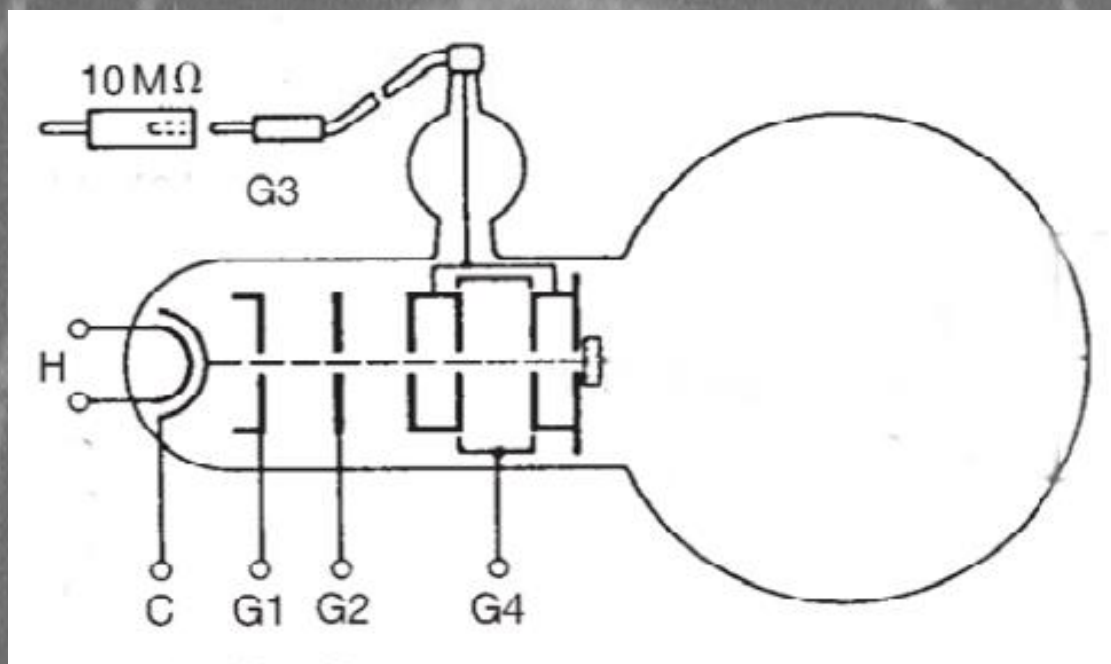
### Configuração Experimental:

- Configura-se os elementos do experimento conforme a figura a seguir:





- Conecta-se os terminais do tubo de difração da fonte de tensão conforme consta na imagem a seguir.
- Deve-se conectar a alta tensão ao anodo G3 através da ponta que contém um resistor protetivo de  $10\text{M}\Omega$ .
- Define-se a tensão de G1 utilizando o segundo botão na fonte de alimentação a qualquer valor em que se perceba o feixe brilhante o suficiente.



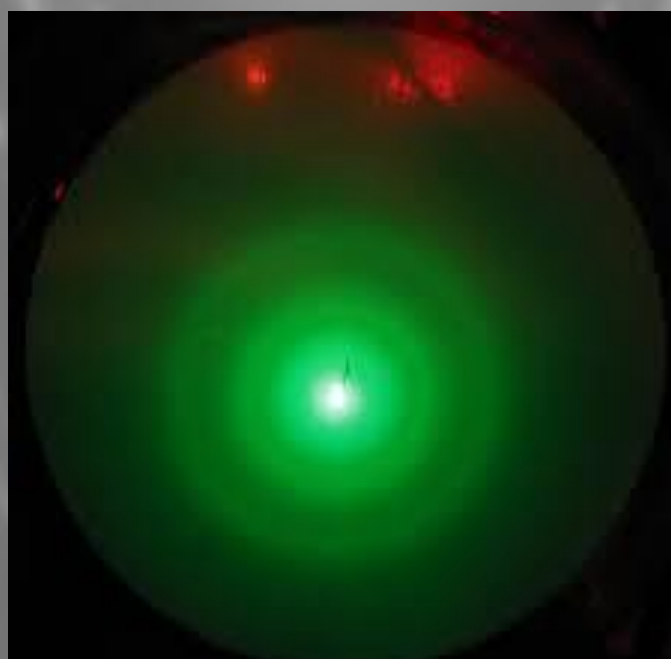
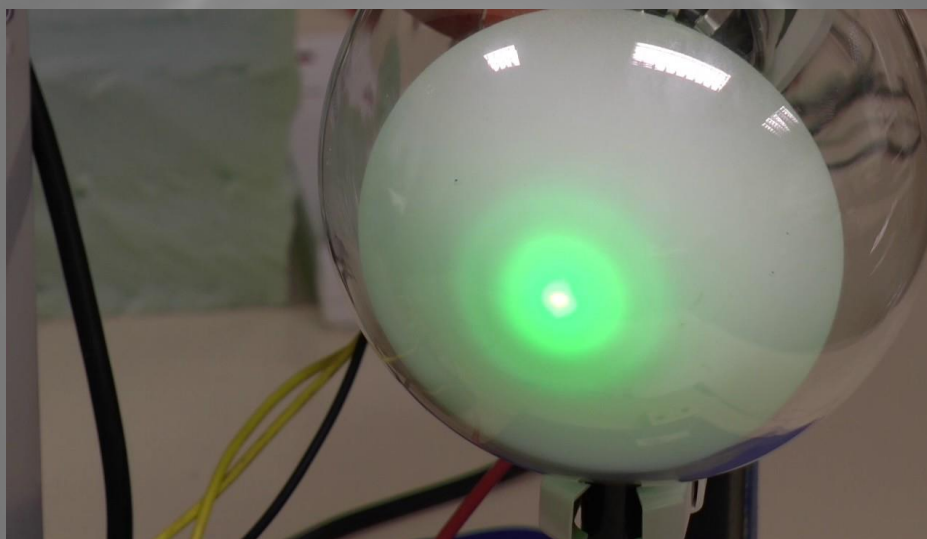
- Define-se a tensão G4 para aproximadamente  $0\text{V}$  (ou qualquer valor em que o feixe fique com considerável nitidez), utilizando terceiro botão da fonte de alimentação.
- Aumente-se lentamente a fonte de tensão até que a estrutura de anéis seja percebida na camada fluorescente no bulbo de vidro.

A visibilidade dos anéis de ordens superiores depende da intensidade da luz no laboratório, e o contraste do sistema de anéis pode ser influenciado pelas tensões aplicadas em G1 e G4. É provável que os anéis comecem a ser percebidos quando a tensão for de aproximadamente  $4\text{kV}$ .

### Precauções:

- Deve-se evitar tocar nos cabos e no bulbo de vidro durante a execução do experimento, uma vez que as tensões aplicadas podem chegar a 10kV.
- Não se deve exercer pressão mecânica sobre o bulbo de vidro, sob risco de implosão.
- O ponto mais luminoso presente no centro da esfera de vidro é dotado de alta intensidade, o que pode danificar a camada de fósforo presente no vidro, portanto deve-se reduzir a intensidade ao mínimo, suficiente, no entanto, para a execução do experimento, e reduzir a intensidade a cada leitura.

Se corretamente configurados, deve-se observar na tela um padrão semelhante aos presentes nas imagens a seguir:







• Pode-se realizar a comparação entre os comprimentos de onda determinados com a Lei de Bragg com os comprimentos de onda determinados teoricamente com a equação de De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck, e tem valor aproximado de  $6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ .

O momento linear  $p$  depende somente do potencial acelerador ajustável. Dessa forma, a energia cinética do feixe eletrônico é igual à perda de energia potencial, e é dada por:

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = eV_0 \quad (4)$$

Onde  $e$  é a carga do elétron, e  $m$  é sua massa (pode-se desprezar o erro devido ao acréscimo relativístico). Utilizando-se a energia cinética em função do momento linear:

$$E_{cin} = \frac{p^2}{2m} \quad (5)$$

Pode-se igualar as equações 4 e 5 para obter o momento linear em função do potencial acelerador:

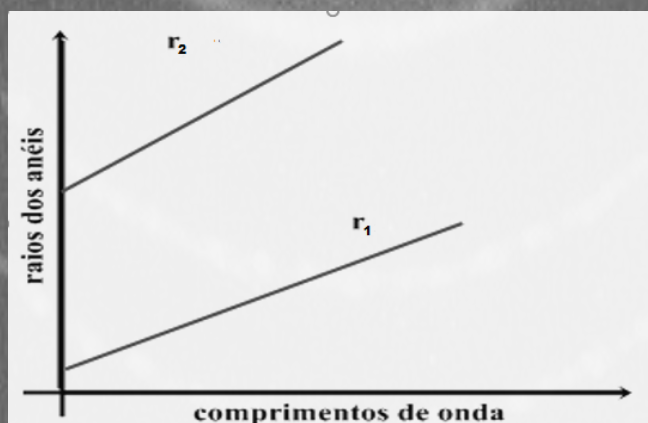
$$p = \sqrt{2meV_0} \quad (6)$$

Dessa forma, o comprimento de onda de De Broglie - o comprimento de onda do feixe eletrônico com comportamento ondulatório em função do potencial acelerador - é dado por:

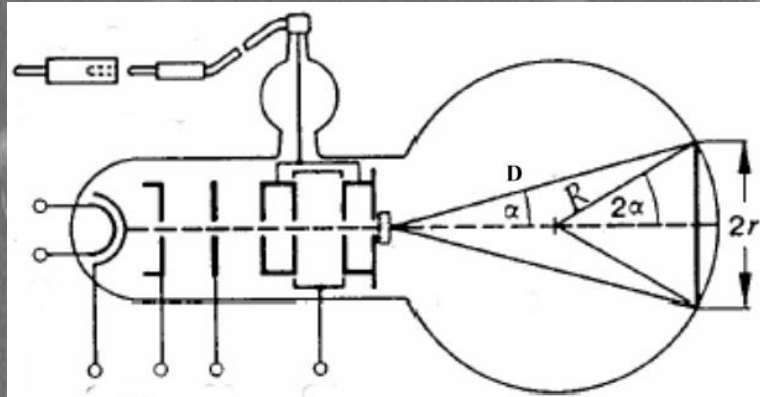
$$p = \frac{h}{\sqrt{2meV_0}} \quad (7)$$

Fazendo-se a comparação dos comprimentos de onda calculados com a Lei de Bragg e a equação de De Broglie para cada potencial acelerador utilizado, percebe-se a semelhança, de modo que a teoria das ondas de matéria proposta por De Broglie no início do século XX é demonstrada experimentalmente.

• Se construído um gráfico dos raios dos anéis de difração em função comprimento de onda associado, se terá algo como as retas presentes no gráfico abaixo:



• Se realizada uma regressão linear para ambas as retas do gráfico, serão gerados dois coeficientes angulares  $a_1$  e  $a_2$ , respectivamente aos raios  $r_1$  e  $r_2$ . Com isso, pode-se equacionar a distância interplanar do grafite em função desse coeficiente angular, com base na geometria presente na imagem a seguir:



O ângulo de difração de Bragg  $\theta$  pode ser determinado a partir do raio  $r$  dos anéis de difração, porém deve-se perceber que o ângulo de desvio  $\alpha$  é o dobro:

$$\alpha = 2\theta \quad (8)$$

Com base na imagem, tem-se:

$$\text{sen}(2\alpha) = \frac{r}{R} \quad (9)$$

Onde  $R = 63,5 \text{ mm}$  é o raio do bulbo de vidro.

Para pequenos ângulos, a seguinte aproximação é válida:

$$\text{sen}(2\alpha) = 2\text{sen}(\alpha)\cos(\alpha) \cong 2\text{sen}(\alpha) \quad (10)$$

Portanto, para pequenos ângulos  $\theta$ , tem-se:

$$\text{sen}(\alpha) = \text{sen}(2\theta) \cong 2\text{sen}(\theta) \quad (11)$$

Assim, obtém-se:

$$r = \frac{2Rn\lambda}{d} \quad (12)$$

Dessa forma, observa-se que os coeficientes angulares das retas ajustadas no gráfico representam o quociente  $\frac{r}{d}$ . De modo que pode-se equacionar de forma generalizada as distâncias interplanares do cristal de grafite em função dos coeficientes angulares  $a_1$  e  $a_2$ :

$$d_i = \frac{2R}{a_i}, \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

Com a equação 13, portanto, pode-se determinar as distâncias interplanares tendo-se conhecimentos dos valores gerados pela equação 7.



## Do Espalhamento do Feixe pelo Cristal

• Operando o aparelho de difração de elétrons com uma dada tensão (8kV pode ser uma boa tentativa, uma vez que para este valor de tensão são observados ao menos três anéis com considerável clareza), deve-se medir os raios do primeiro e do segundo anéis de difração, e com isso calcular o espaçamento entre os planos da rede que compõe o cristal de grafite  $d_1$  e  $d_2$ , tendo-se em consideração que já deveria ser conhecido o valor do comprimento de onda de De Broglie.

• Procedimento: Resolvendo-se a equação 1 para a distância  $d$ , tem-se:

$$d = \frac{n}{2\text{sen}(\theta)} \lambda \quad (14)$$

Uma vez que o ângulo  $\theta$  pode ser determinado pela equação 2, e o comprimento de onda é determinado pela equação de De Broglie em função do potencial acelerador (equação 7), a distância interplanar da rede pode ser determinada por:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\text{meV}_0}} h \text{sen} \left( \frac{1}{4} \arcsen \left( \frac{2r}{D} \right) \right) \quad (15)$$

## Observações

Nessa análise dos dados, pôde-se determinar algo sobre a estrutura interna da matéria (a saber, a distância entre os planos dos átomos de carbono) atingindo uma amostra com pequenas partículas em alta velocidade, neste caso elétrons. Este procedimento é um dos princípios básicos usados em experimentos de Física de partículas. Tais experimentos de espalhamento resultaram na descoberta do núcleo atômico (Rutherford 1908) e na descoberta dos quarks na estrutura interna dos prótons e nêutrons.

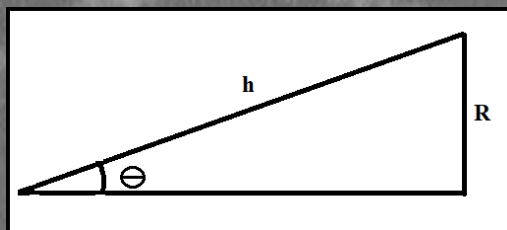
• Com a diminuição do potencial acelerador para cerca de 300V, o que é observado?

Resposta: Com essa voltagem, o padrão de difração não se forma na tela fluorescente. A razão é que o comprimento de onda de partículas aceleradas por esse potencial, é pela equação 7, de aproximadamente  $70,83 \text{ pm}$ , que é grande demais para ser difratado na rede do grafite ( $213$  e  $123 \text{ pm}$ ), pois a difração exige ondas e obstáculos de dimensões aproximadas.

Como o comprimento de onda De Broglie (equação 7) é inversamente proporcional ao momento linear, experimentos de espalhamento precisam de aceleradores de partículas fortes. Esta é a razão pela qual o tubo de difração de elétrons precisa de uma alta tensão.

### A Física da Relação de De Broglie

Considere-se a imagem abaixo, a qual representa esquematicamente o funcionamento de uma difração:



Com base na imagem, e levando-se em conta a definição da função seno, tem-se:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{R}{h} \quad (16)$$

Mas sabendo-se que a equação 17:

$$n\lambda = d\text{sen}(\theta) \quad (17)$$

é válida, tem-se que:

$$\lambda = GR \quad (18)$$

Onde  $G$  é uma constante (apesar de depender da geometria), definida como  $\frac{d}{h}$ .

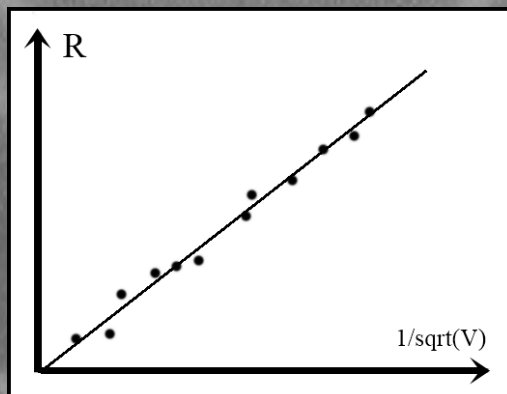
Mas considerando a relação de De Broglie (equação 3), e a equação 6 para o momento, pode-se resolver a equação 18 da seguinte forma:

$$R = \frac{h}{G} \cdot \frac{1}{(2meV_0)^{\frac{1}{2}} \cdot V_0^{\frac{1}{2}}} \quad (19)$$

Dessa forma, pode-se resumir a equação 19 como:

$$R = (\text{constante}) \cdot \frac{1}{V_0^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

Graficamente, isso pode ser interpretado como um gráfico de  $R$  em função de  $\frac{1}{V_0^{\frac{1}{2}}}$ :



De forma que a reta ajustada representa a relação de De Broglie.

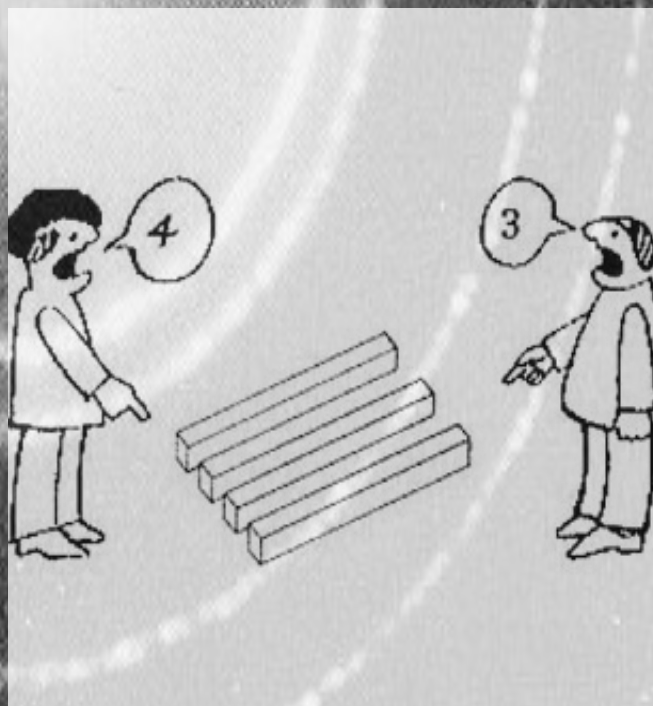
## A Epistemologia no Experimento de Difração de Elétrons

Propondo o caráter dual da matéria, epistemologicamente De Broglie aplicou o racionalismo, uma vez que não haviam dados que dessem a entender tal característica da natureza propriamente ditos. De Broglie partiu de uma concepção de “beleza” da natureza - a simetria. Se um conceito é verdadeiro de uma forma, não há porque concluir que o mesmo não seja verdadeiro visto por outro ponto de vista, ou até mesmo por outro formalismo. A comprovação de sua hipótese através de experimentos já demonstra a aplicação conjunta do empirismo com o racionalismo, pois os pesquisadores apesar de a princípio não buscarem comprovar a hipótese de De Broglie, obtiveram dados empíricos que após uma análise racional geraram conclusões.

Para fundamentar sua hipótese sobre a natureza dual da matéria, em sua tese De Broglie descreve um exercício mental no qual cita sem justificativa uma onda que se propaga ao lado da trajetória de uma partícula, e conforme as análises se seguem, percebe-se a partícula comportando-se como onda. Uma aplicação clara da inferência lógica, uma vez que se propôs ser verdadeira uma afirmação, devido a sua conexão lógica com proposições já tidas como reais.

### A Epistemologia no Contexto do Estudante de Física

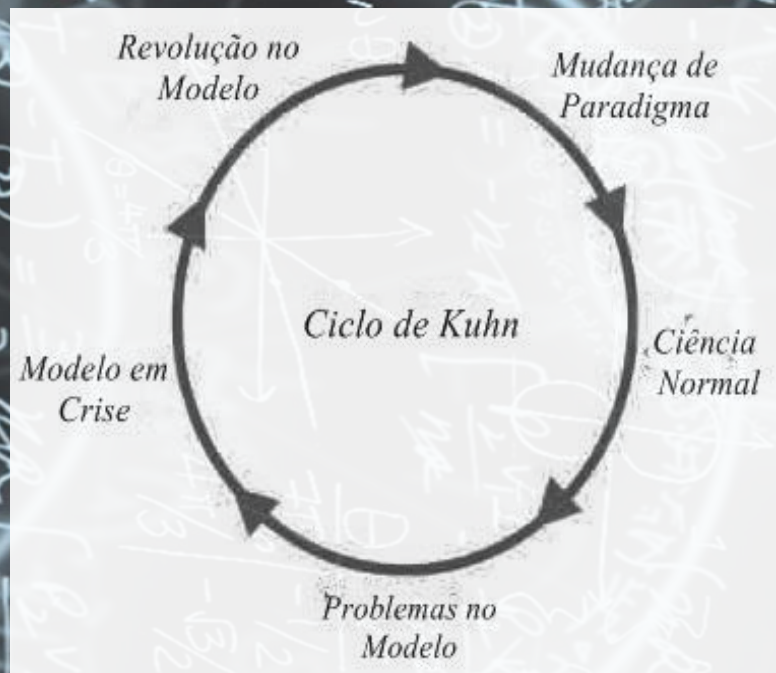
O estudante de Física que vai ao laboratório para verificar ou estudar um fenômeno, irá constatar e tomar nota de dados empíricos de um sistema, dados esses que serão tratados com o uso de sua racionalidade. O estudante que não vê através do que é imediatamente sensível, ou seja, não vê o que está por trás do que estuda - as implicações dos princípios - “não vê a floresta”, nas palavras de Einstein.





## A Epistemologia Paradigmática

Nos estudos acerca da forma como a Ciência se desenvolve, o modelo epistemológico de Thomas Kuhn se destaca. Esse modelo propõe um ciclo dentro do qual a Ciência é criada e modificada. Característico desse modelo, é o conceito de “paradigma”, que seria um modelo abrangente de compreensão que fornece aos pesquisadores de uma área, os pontos de vista e regras sobre como analisar as questões da área de pesquisa e como resolvê-los.



## Ciclo das Revoluções Científicas

- Todos as áreas da Ciência e, portanto, a Física, começam como Pré Ciência, na qual os esforços dos pensadores ainda não são capazes de produzir respostas satisfatórias.
- Os esforços para desenvolver um modelo teórico mais satisfatório acabam por dar resultados, e a área da Ciência pode fazer progressos sólidos. Isso coloca a área na etapa Ciência Normal, etapa essa a mais longa temporalmente.
- Com o tempo, a área chega em pontos conceituais mais profundos, a ponto de que seus atuais modelos teóricos com seus paradigmas não são capazes de responder. Essas anomalias nos modelos teóricos podem não ser corrigidas, e o modelo entra em crise.
- Visando substituir o antigo modelo paradigmático, outros modelos teóricos são desenvolvidos, e isso revoluciona a forma de pensar vigente. É uma revolução no modelo, e não uma evolução, pois o novo modelo é um paradigma, radicalmente distinto do antigo, mais que isso, são incomensuráveis. Um não pode explicar ou conter o outro.
- A mudança de paradigma acontece quando o antigo paradigma é substituído.

## A Mudança de Paradigma na Dualidade Onda Partícula

A mudança de paradigma se caracteriza pela substituição de um modo de compreensão por outro, a qual possui conceitos incomensuráveis para com a concepção antiga. O que se observou no desenvolvimento da Teoria Quântica tem tal característica, pois uma nova visão de mundo foi introduzida na Física em substituição aos paradigmas clássicos (Ciência normal). A Mecânica Clássica tinha por elementos fundamentais, por exemplo, a continuidade das grandezas Físicas e a diferenciação clara entre o que era onda e o que era partícula. Primeiramente sendo proposta por De Broglie, e posteriormente experimentalmente comprovada, a aceitação da ambiguidade do comportamento da matéria como real, representou uma quebra dos paradigmas clássicos. Desenvolveu-se uma nova visão de mundo segundo o qual o mundo quântico é feito de objetos classicamente incompreensíveis. Partículas e ondas são ontologias incompatíveis (partículas têm posições espaciais definidas, enquanto ondas são deslocalizadas e espalhadas), portanto, os resultados sugeriram que uma mudança na ontologia era necessária.

Niels Bohr sugeriu que seria preciso reformular as maneiras de se entender e descrever a realidade. Os conceitos de onda e partícula tornaram-se obsoletos, o mais correto seria se falar da dualidade onda/partícula. Existe, no entanto, um problema de semântica, pois para a mente humana significaria uma mudança na forma de compreensão, uma vez que somente pode imaginar ondas e partículas separadamente. Faltam conceitos adequados para descrever tais objetos quânticos, o que a Física Quântica pode fazer é prever resultados de medições. Feynman chegou a declarar sobre a Física Quântica, “cale a boca e calcule”. Se a realidade é tão estranha, a maior parte dos esforços e preocupações não deveriam, segundo Bohr, girar em torno de implicações filosóficas da teoria, e sim das previsões matemáticas desta.

No experimento da difração de elétrons, segundo a previsão clássica o que seria observado quando da emissão de elétrons pelo filamento em direção ao cristal, seria um espalhamento difuso em direções aleatórias. O que se observa, no entanto, como foi notado, são anéis de difração – matéria está sendo difratada, e isso não é trivial. Isso por si só pode ser visto como uma mudança substancial na Física.



## A Função de Onda

### Da Natureza da Função de Onda

As previsões feitas na Mecânica Quântica são derivadas da Função de Onda associada a um sistema. A Função de Onda é o coração da Física Quântica, e foi introduzida às análises quânticas primitivas por analogia: entidades microscópicas podem ter comportamento ondulatório, portanto devem ser descritas como tal. Uma Função de Onda  $\Psi$  tem sua evolução temporal dada pela Equação de Schrödinger: 
$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}, t) \right] \Psi(\vec{r}, t).$$
 Existem, entretanto, duas principais formas de se interpretar a natureza da Função de Onda, ou seja, a relação entre partículas materiais e a Função de Onda, a primeira se ela é dotada de existência real, e a segunda se é somente uma figura usada para entender sistemas quânticos. Uma diferença fundamental entre as interpretações da Função de Onda é sobre como ela evolui no tempo, apesar de comumente ser vista como determinística, essa evolução pode ou não sofrer interferência de agentes externos.

#### Existência Objetiva

A Função de Onda seria uma entidade real, associada a um sistema, mas ainda assim dotada de existência em si. Segundo essa visão, a Função de Onda seria algo como a descrição de um campo físico, campo este que representaria as propriedades do sistema, como massa, carga, etc. A essência dessa interpretação acerca da ontologia da Função de Onda está na questão da simultaneidade: uma vez que um campo se estende simultaneamente pelo espaço, ele determinará o movimento da partícula, movimento esse, comumente nas interpretações realistas da Função de Onda, tido como uma sucessão de posições bem definidas. Caberia a Função de Onda o papel de “guiar” a partícula com suas características bem definidas.

#### Sem Existência Objetiva

A Função de Onda seria apenas um objeto matemático, e nada mais seria do que uma representação das probabilidades para o resultado de possíveis medições. Essa visão ontológica da Função de Onda tem papel principalmente na Interpretação de Copenhague. A Função de Onda representaria todas os possíveis valores para um sistema, entretanto o sistema não teria nenhuma característica bem definida até que uma medição (no sentido genérico) fosse feita, o que colapsaria a Função de Onda em uma das possibilidades, mas até que isso ocorra, a partícula não “está” ou “tem” qualquer valor de grandeza. A Função de Onda seria completa, ou seja, ela compreende tudo o que pode ser conhecido sobre o sistema.

## Implicações Filosóficas da Natureza da Função de Onda na Interpretação de Copenhague

### Da Natureza Probabilística

Dada uma Função de Onda  $\psi(\vec{r}, t)$ , a probabilidade  $P(\vec{r}, t_0)$  de se encontrar a partícula associada à essa função em um comprimento infinitesimal é dada pela Regra de Born:  $P(\vec{r}, t_0) = |\psi(\vec{r}, t)|^2 d\vec{r}$ . Essa é a essência da Função de Onda – probabilidade. Pois nessa interpretação, ela não possui existência Física, é apenas uma ferramenta matemática que representa o conjunto das possibilidades dos estados do sistema, atribuindo uma amplitude de probabilidade a cada possível resultado de uma medição

A inserção da interpretação estatística na Física Quântica a torna não-determinística, pois o máximo que se pode saber sobre um sistema antes de medi-lo é a probabilidade dos resultados, o que envolve, portanto, uma incerteza, que distintamente da incerteza devido a erros de medição não tem a ver com precisão, ela é fundamental, faz parte da realidade. Tal característica não se fazia presente na Física até então. Isso representa uma ruptura com a concepção vigente de realidade, pois a Física é intrinsecamente limitada a prever probabilidades, nunca certezas. Medições da mesma grandeza sob as mesmas condições geram resultados diferentes, pois a natureza possui um caráter intrinsecamente aleatório.

### Do Problema da Medição

Antes da medição, a Função de Onda evolui conforme a equação de Schrödinger, mas a medição provoca uma interferência no sistema que não pode ser arbitrariamente minimizada. Isso provoca o “colapso da Função de Onda”, quando a mesma é reduzida a uma das possibilidades da superposição. A superposição não é observada, apenas inferida. O Princípio da Incerteza garante ainda, que conhecendo-se uma grandeza de um sistema, perde-se a informação sobre alguma outra. O observador tem um papel ativo no que será observado.

O sistema não se encontra em nenhum estado – não possui propriedades definidas – até que seja medido. Daí o célebre questionamento de Einstein: a lua está lá se não há alguém olhando? Filosoficamente isso implica que, ao admitir que as coisas não possuem propriedades definidas até que sejam observadas (no sentido genérico), aceita-se que a estrutura da realidade é sensivelmente distinta do senso comum.

### Da Não-Localidade

Quanticamente, sistemas que compartilhem a mesma Função de Onda (emaranhados) influenciam-se mutuamente de forma instantânea, independentemente da distância (não dependendo de um campo mediador), o que viola o princípio da localidade. A explicação para esse fenômeno é que a Função de Onda é completa, compreende o sistema totalmente, e essa característica é válida apesar da distância.

A não-localidade implica que o universo é, de fato, profundamente distinto da habitual compreensão humana, pois todos os pontos do universo estariam, na verdade, potencialmente conectados de uma forma imediata. Exige uma revisão da concepção sobre os objetos, pois não se poderia mais considerar objetos como entidades independentemente existentes e localizados em posições definidas do espaço, mas sim que estão conectadas de maneiras incomensuráveis para com as atuais concepções.

## Algumas Interpretações da Mecânica Quântica

### Interpretação de Bohm-De Broglie

Também chamada de “Teoria das Ondas-Piloto”, postula que cada partícula não apenas tem uma Função de Onda associada, mas também existe como corpúsculo em si, deslocando-se por posições definidas sendo guiada pela onda-piloto, enquanto essa última evolui temporalmente segundo a equação de Schrödinger. Essa interpretação assume um universo determinístico (diferente da interpretação de Copenhague), de modo que não ocorre o colapso da Função de Onda quando da medição. A aleatoriedade das medições seria devida à ignorância sobre as condições iniciais (variáveis ocultas) da onda-piloto. Essa interpretação assume que há uma realidade mais profunda, descrita por um modelo mais fundamental, no qual existiriam “variáveis ocultas” garantindo caráter determinístico.

### Interpretação de Everett

Propõe uma Função de Onda universal, a qual não sofre colapso, mas que todas os resultados possíveis de uma medição se dão em algum “universo”, ou seja, o universo é repetidamente dividido em realidades alternativas mutuamente inobserváveis, por isso a teoria é chamada de “teoria de muitos mundos”, sendo assim, a evolução da realidade seria absolutamente determinística.

As implicações seriam que há um multiverso de grandes proporções; perda da noção de individualidade humana (pois existiriam versões das pessoas, assim como de tudo que existe); poderiam existir universos muito diferentes dentro de um maior. Essa interpretação tem implicações antropológicas sem precedentes.

### Observador Consciente

O problema filosófico do observador na Mecânica Quântica tem nessa interpretação uma definição intrigante. É proposto que o agente de medição (em última análise) é a consciência do observador. A superposição de estados existe até que um observador consciente interaja com o sistema, e o mesmo é instantaneamente reduzido a um estado. O colapso da Função de Onda ocorreria no momento em que a informação da medição chega à mente do observador. Por ser altamente filosófica essa interpretação não é considerada satisfatória, afinal, onde estaria localizado no cérebro o mecanismo que provoca isso?

### Interpretação Transacional

Descreve os fenômenos quânticos como a combinação - uma onda estacionária - de duas ondas, uma que precede a partícula (à frente no tempo), e uma que "segue" o sistema físico. Nessa interpretação, qualquer partícula atua como uma fonte de uma onda avançada e outra atrasada no tempo, cada uma das duas com metade de uma dada amplitude. As fases dessas ondas tem uma correlação, tal que, ao interferirem construtivamente em um ponto, correspondem à localização da partícula, enquanto em todos os outros pontos há interferência destrutiva. Um observador compreenderia esse padrão como a partícula se deslocando no espaço.

## A Difração de Elétrons e a Ontologia da Função de Onda

As diferentes Interpretações da Mecânica Quântica explicam de formas distintas a ontologia da Função de Onda, ou seja, sua natureza essencial. Com relação ao Experimento de Difração de Elétrons, alguns questionamentos e observações podem ser apresentados acerca dessa ontologia: O sistema analisado possui uma Função de Onda, e seria essa Função de Onda o que está sendo difratado? Qual a relação da Função de Onda do sistema analisado com a natureza dual da matéria? Tais questões são diferentemente abordadas dependendo da interpretação:

- de Copenhague: uma vez que os elétrons são partículas descritas pelo formalismo quântico, no experimento da difração de elétrons, de fato, haveria uma Função de Onda associada.

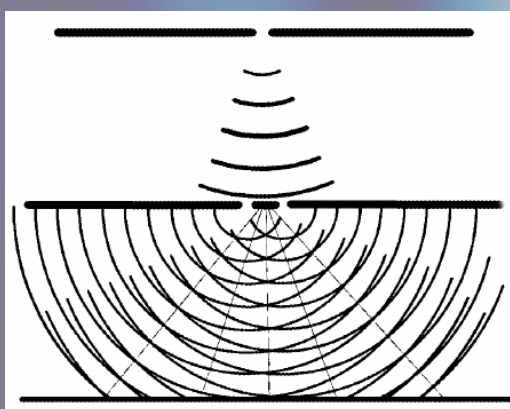
O padrão de interferência observado deve-se ao caráter dualístico da natureza, como foi visto, o elétron se comporta como onda, e o comprimento de onda dos elétrons difratados é que está sendo importante aqui. O que não é tão simples de se entender, no entanto, é o papel da Função de Onda aqui presente. Por não ter existência objetiva, a Função de Onda não pode ser difratada, o padrão observado deve-se puramente ao comportamento ondulatório dos elétrons. No entanto, a Função de Onda associada ao sistema, quando analisada seguindo-se os procedimentos matemáticos do formalismo de Schrödinger e a interpretação de Copenhague (o módulo quadrado), os resultados são probabilidades da localização dos elétrons no anteparo (no caso do experimento, no bulbo de vidro), e essas probabilidades coincidem justamente com os locais onde são observados máximos e mínimos de interferência, ou seja, onde a análise da Função de Onda indica haver mais probabilidades de haver elétrons (probabilidade essa que diminui conforme a distância a partir do centro do anteparo aumenta), é precisamente onde são observados os anéis luminosos no experimento. Maior probabilidade, mais elétrons, mais intensidade. Menor probabilidade, menos elétrons, menor intensidade.

- de Bohm: a Função de Onda, tendo realidade objetiva, pode, e é, difratada. A partícula continua tendo posição bem definida, e é guiada pela onda-piloto. O padrão de difração observado no experimento são as partículas interagindo com o anteparo (segunda a interpretação de Copenhague a partícula também tem caráter corpuscular quando da interação com o anteparo), mas estas foram partículas com caráter corpuscular durante o trajeto a partir do cristal, e tiveram posições e trajetórias bem definidas. A Função de Onda, é difratada, e “projeta” máximos e mínimos no anteparo, e os elétrons, sendo guiados por essa onda, simplesmente seguirão o padrão de difração da mesma. Dessa forma, os anéis de difração observados no experimento são os elétrons, mas estes foram guiados até determinadas posições no anteparo pela Função de Onda, ou onda-piloto.



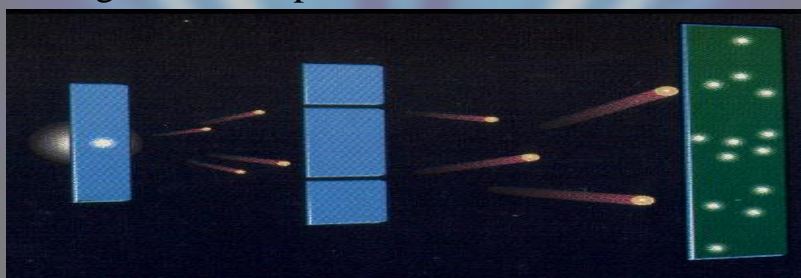
## O Experimento da Dupla Fenda Quântico

A luz como tendo características de onda foram demonstradas pelo experimento de Thomas Young no século XIX, no qual uma fonte (aproximadamente) pontual de luz iluminava duas estreitas fendas em um anteparo. A luz que passava pelas fendas era observada em um segundo anteparo, no qual era observado um padrão semelhante ao da imagem a seguir. As regiões claras e escuras são chamadas de franjas de interferência, e ocorrem devido às interferências construtivas e destrutivas das ondas de luz, respectivamente, conforme demonstram as imagens a seguir:



A questão era se matéria disparada também produziria esses padrões. Para descobrir, foram disparados elétrons e o padrão se verificou. No entanto, os elétrons agem como partículas, assim como fótons, ou seja, eles atingiriam os anteparos em pontos bem localizados. Dessa forma, se diminuir o número de elétrons disparados, em torno de um por segundo, o que se observaria?

Observam-se elétrons individuais atingindo o segundo anteparo, e com o tempo, o padrão de interferência é observado no acúmulo de elétrons. A uma taxa tão lenta, cada elétron (ou fóton) não interage com outras partículas. De fato, de alguma maneira misteriosa, eles interagem consigo mesmo, com seus próprios pacotes de onda. A formação do padrão de interferência requer a presença de duas fendas, então como um único fóton "sabe" a existência da outra fenda? A única solução é abandonar a concepção das partículas com localização. A localização de uma partícula aparentemente não é definida até que seja observada, como por exemplo, atingindo o anteparo.



## Conclusões

Na presente unidade temática discutiu-se sobre as implicações filosóficas que aceitação de certas concepções como verdade provocam. A inserção de determinados conceitos na Física representou verdadeiras reestruturações desta. A revolucionária concepção dual da matéria é exemplo vívido de como uma análise filosófica da Física é, não só possível, como enriquecedora.

A Filosofia da Física tendo como objetivo refletir sobre os temas primeiros da Física, abordando temas que não raramente se encontram no limiar do conhecimento e capacidade de compreensão humana, é ferramenta muitas vezes negligenciada por estudantes de Física.

A Física Quântica, umas das mais intrigantes áreas da Física Moderna, é muitas vezes sinônimo de perplexidade por parte de quem a estuda. Por introduzir conceitos tão dissonantes para com o que até então era encarado como verdade absoluta e completa, a Teoria Quântica revolucionou a Física. Mais do que isso, a reestruturou. Nenhuma outra teoria ou modelo físico havia abalado de tal maneira o conhecimento humano. Isso porque as implicações que estão por trás dos modelos matemáticos vão de encontro com muito daquilo que o senso comum humano encara como inquestionável, como parte integrante da realidade.

Novas noções de realidade foram introduzidas no conhecimento humano quando do desenvolvimento da Teoria Quântica. As novas concepções de como o universo funciona em sua mínima escala, provoca consequências sem precedentes na forma de encarar a realidade macroscópica. Descobrir que a matéria não é tão simples quanto se pensava, que na realidade ela é apenas uma face de uma moeda, certamente carrega umas das mais profundas quebras de paradigma na história da Ciência.

A inserção dos conceitos de não-localidade e do indeterminismo na Física representam também quebras de paradigma sensíveis. A nova noção de que estrutura da realidade pode (e é) ser muito diferente do que a mente humana compreende como normal, ou mesmo tem capacidade para compreender, certamente é uma das implicações filosóficas mais profundas que a Teoria Quântica provocou. A quebras dos paradigmas vigentes significaram uma passagem só de ida em direção à construção de conhecimentos que envolvem conceitos cada vez mais incomensuráveis para a mente humana, o que não significa um obstáculo intransponível na busca sobre a compreensão sobre a estrutura da realidade.

Para mais informações, recomenda-se visitar a página da “Ciência Curiosa” no YouTube, bem como visitar o trabalho “Material De Apoio Relacionado Ao Experimento Da Difração De Elétrons: Ensino De Física Moderna E Contemporânea Baseado Em Atividades De Laboratório Mediadas Pela Utilização De Um Software De Análise E Modelagem” de Marcus Vinicius Peres, disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1922/3/CT\\_PPGFCET\\_M\\_Peres%2C%20Marcus%20Vinicius\\_2016\\_2.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1922/3/CT_PPGFCET_M_Peres%2C%20Marcus%20Vinicius_2016_2.pdf).



## Referências Bibliográficas

3 SCIENTIFIC. **Electron Diffraction**. Disponível em: <[https://www.a3bs.com/product-manual/UE5010500-230\\_EN.pdf](https://www.a3bs.com/product-manual/UE5010500-230_EN.pdf)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

ALLORI, Valia. **Quantum Mechanics and Paradigm Shifts**. Topoi. 2015. Disponível em: <<http://philsci-archive.pitt.edu/11367/>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

BOSTON UNIVERSITY. **Electron Diffraction**. Disponível em: <[http://physics.bu.edu/ulab/modern/Electron\\_Diffraction.pdf](http://physics.bu.edu/ulab/modern/Electron_Diffraction.pdf)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

CERN. **Electron Diffraction Tube**. Disponível em: <<https://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/english/experiments/electron-diffraction-tube.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

GAO, Shan. **Meaning of the Wave Function**. Universidade de Sydney. Disponível em: <<http://philsci-archive.pitt.edu/12608/1/gaomwfbookv3.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

GODOY, Walkiria. **Explorações Filosóficas da Não-Localidade em Física Quântica: Desdobramentos do argumento de EPR**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018. Disponível em: <[http://filosofia.fflch.usp.br/sites/filosofia.fflch.usp.br/files/posgraduacao/defesas/2018\\_mes/2018\\_mes\\_WalquiriaGodoy.pdf](http://filosofia.fflch.usp.br/sites/filosofia.fflch.usp.br/files/posgraduacao/defesas/2018_mes/2018_mes_WalquiriaGodoy.pdf)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna**. Tradução de Denise Helena da Silva Sotero, Gerson Bazo Costamilan, Luciano Videira Monteiro e Ronaldo Sérgio de Biasi. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. p. 355.

LAZAROU. Dimitris K. **Interpretation of Quantum Theory An overview**. Universidade de Atenas, Atenas, 2009. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0712/0712.3466.pdf>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

NERMIN, David Descrição Nathaniel. **What's Wrong With the Quantum World?**. Revista Physics Today. 2004. Disponível em: <<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.1688051>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

PESSOA JR, Osvaldo. **Física Quântica Entenda as Diversas Interpretações da Física Quântica**. 2011. Disponível em: <[https://www.academia.edu/33015093/F%C3%8DSICA\\_QU%C3%82NTICA\\_\\_Entenda\\_as\\_diversas\\_interpreta%C3%A7%C3%B5es\\_da\\_f%C3%ADsica\\_qu%C3%A2ntica\\_\\_Osvaldo\\_Pessoa\\_Jr](https://www.academia.edu/33015093/F%C3%8DSICA_QU%C3%82NTICA__Entenda_as_diversas_interpreta%C3%A7%C3%B5es_da_f%C3%ADsica_qu%C3%A2ntica__Osvaldo_Pessoa_Jr)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

PESSOA JR., Osvaldo. **Filosofia da Física**. Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://opessoa.fflch.usp.br/sites/opessoa.fflch.usp.br/files/FiFi-17-Cap01.pdf>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

PHYWE. **Electron Diffraction**. c 2008. Disponível em: <<https://repository.curriculab.net/files/versuchsanleitungen/p2511301/p2511301e.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

PORTUGAL, Cadjá Araujo. **Discussão Sobre Empirismo e Racionalismo no Problema da Origem do Conhecimento**. Diálogos & Ciência – Revista Eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana. Ano I, n. 1, 2002. Disponível em: <<https://marcosfabionuva.files.wordpress.com/2015/01/portugal-c-a-discuss3a3o-sobre-empirismo-e-razionalismo-no-problema-da-origem-do-conhecimento.pdf>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.



RABINOWITZ, Mario. **Examination of Wave-Particle Duality Via Two-Slit Interference**. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0302/0302062.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

SKLAR, Laurence. **A Filosofia da Física**. Colorado, 1992. Disponível em: <<https://docero.com.br/doc/c>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

UNIVERSIDADE DE STANFORD. **Stanford Encyclopedia of Philosophy – Dualism**. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/entries/dualism/>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

### Referências das imagens por ordem de aparecimento

TOUGHTCO.. **Wave Particle Duality and How It Works**. c. 2019. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/wave-particle-duality-2699037>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

NOVA. **The Fabric Of The Cosmos**. c. 2019. Disponível em: <<https://www.pbs.org/wgbh/nova/series/the-fabric-of-the-cosmos/>>. Acesso em: 26 de set de 2019.

PINTEREST. **Netuno and Space Â>> Surrealista**. c. 2019. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/pin/525513850266450088/>>. Acesso em 26 de set. de 2019.

TRCACAK. **28 Collection Of Brain In Head Clipart Png - Human With Brain Png**. c. 2019. Disponível em: <[https://www.trzcacak.rs/imgm/iJiiJT\\_28-collection-of-brain-in-head-clipart-png/](https://www.trzcacak.rs/imgm/iJiiJT_28-collection-of-brain-in-head-clipart-png/)>. Acesso em 26 de set. de 2019.

BIOLOGY DICTIONARY. **Scientific Method**. c. 2019. Disponível em: <<https://biologydictionary.net/scientific-method/>>. Acesso em 26 de set. de 2019.

QUORA. **Why does electron diffraction produce a ring pattern?**. c. 2017. Disponível em: <<https://www.quora.com/Why-does-electron-diffraction-produce-a-ring-pattern>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

BOSTON UNIVERSITY. **Electron Diffraction**. Disponível em: <[http://physics.bu.edu/ulab/modern/Electron\\_Diffraction.pdf](http://physics.bu.edu/ulab/modern/Electron_Diffraction.pdf)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

CERN. **Electron Diffraction Tube**. Disponível em: <<https://project-phycsteaching.web.cern.ch/project-phycsteaching/english/experiments/electron-diffraction-tube.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

CARLETON COLLEGE. **X-ray reflection in accordance with Bragg's Law**. Disponível em: <[https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/BraggsLaw.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/BraggsLaw.html)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

PHYWE. **Electron Diffraction**. c. 2008. Disponível em: <<https://repository.curriculab.net/files/versuchsanleitungen/p2511301/p2511301e.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

BIRLA INSTITUTE OF TECHNOLOGY AND SCIENCE. **Electron Diffraction**. Disponível em: <<https://universe.bits-pilani.ac.in/uploads/P2511300-ed.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

PHYWE. **Electron Diffraction**. Disponível em: <<http://www.fen.bilkent.edu.tr/~kocabas/wp-content/uploads/2015/02/electrondiffraction.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

LANCASTER UNIVERSITY. **Electron Diffraction, Part 2: The Experiment**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=l2OXawoAD6M>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.



SLAYMYBOREDOM. **Both Are Right.** c. 2012. Disponível em: <<https://slaymyboredom.wordpress.com/2012/05/23/both-are-right/>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

TUMBLR. **Kuhn Cycle.** Disponível em: <<https://www.tumblr.com/search/kuhn-cycle>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

PHYS. **Quantum Physics Just Got Less Complicated.** Disponível em: <<https://phys.org/news/2014-12-quantum-physics-complicated.html>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

APPLICABLE PUN. **Applicable Pun Psi Greek Letter.** Disponível em: <<https://www.amazon.com/Applicable-Pun-Psi-Greek-Letter/dp/B07KYYNT24>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

STICK PNG. **Cat Silhouette Transparent.** Disponível em: <<https://www.stickpng.com/img/miscellaneous/silhouettes/cat-silhouette>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

POPULAR MECHANICS. **The Logic-Defying Double-Slit Experiment Is Even Weirder Than You Thought.** Disponível em: <<https://www.popularmechanics.com/science/a22280/double-slit-experiment-even-weirder/>>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

RESEARCHGATE. **The Double Slit Experience With Light.** Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Picture-of-the-resulting-pattern-obtained-in-a-typical-double-slit-experiment-with-a-red\\_fig8\\_274779268](https://www.researchgate.net/figure/Picture-of-the-resulting-pattern-obtained-in-a-typical-double-slit-experiment-with-a-red_fig8_274779268)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.

UNIVERSITY OF OREGON. **Two Slit Experiment.** Disponível em: <[http://abyss.uoregon.edu/~js/21st\\_century\\_science/lectures/lec13.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec13.html)>. Acesso em: 26 de set. de 2019.