

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HISTÓRIA

YEMANE FERNANDA TELLES

O GIGANTESCO MICROCOSMOS SEGUNDO NIELS BOHR

MARIANA

2019

YEMANE FERNANDA TELLES

O GIGANTESCO MICROCOSMOS SEGUNDO NIELS BOHR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em História do Instituto de Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em História. Linha de Pesquisa: “Ideias, Linguagens e Historiografia”.

Orientadora: Prof. Dra. Helena Miranda Mollo

MARIANA

Instituto de Ciências Humanas e Sociais - UFOP

2019

T274g Telles, Yemane.
O gigantesco microcosmos segundo Niels Bohr [manuscrito] / Yemane Telles. - 2020.
75f.:

Orientadora: Profª. Drª. Helena Mollo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Humanas e Sociais. Departamento de História. Programa de PósGraduação em História.
Área de Concentração: História.

1. Teoria quântica. 2. Ciência - História. 3. Bohr, Niels Henrik David, 18851962. 4. Física - História. 5. Teoria do conhecimento. I. Mollo, Helena. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 94(043.3)



Yemane Fernanda Telles

“O gigantesco microcosmos segundo Niels Bohr”

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em História da UFOP como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em História. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Mariana, 04 de julho de 2019.

Prof.ª. Dr.ª. Helena Miranda Mollo

Departamento de História/UFOP

Prof.ª. Dr.ª. Anny Jackeline Torres Silveira

Departamento de História/UFOP

Prof.ª. Dr.ª. Michele Hidemi Ueno Guimarães

Departamento de Física/UFOP

Participa por videoconferência
Prof.ª. Dr.ª. Francismary Alves da Silva

Departamento de História/UFSB

Agradecimentos

O tempo, durante o mestrado, é o grande desafio para todo pós-graduando. Esses dois anos foram realmente bastante complicados em todos os aspectos da minha vida e, mesmo assim, consegui concluir mais essa etapa. Tal conquista não seria possível sem minha mãe, que sempre esteve do meu lado e me ajudou em tudo quanto fosse possível. Mesmo quando eu não acreditava em mim, ela me desejava boas energias e fazia suas orações, tudo que tenho na minha vida eu agradeço em primeiro lugar à Dona Rita, a mulher mais forte e guerreira que eu conheço. Sou grata também ao meu pai, ao meu namorado, à minha irmã, aos meus sobrinhos, ao meu tio Paulo, ao Pedro (eterno veterano do 13.1), à Daiane, ao André e à Ruty, que sempre me enviaram mensagens animadoras, me fizeram rir quando eu estava triste e desanimada além de me derem apoio, ainda que fosse com o envio de um *emoji*, *meme*, vídeo ou um abraço, me mostrando o lado sereno e tranquilo da vida e me encorajando.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto, pela educação pública, gratuita e de qualidade, tanto durante a graduação quanto durante meus estudos no Programa de Pós-Graduação em História. Agradeço a todos os funcionários e funcionárias da Instituição, que sempre trabalham com carinho, expertise e competência. Sou grata a todos os professores, que contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal, a partir dos textos, vídeos, questionamentos e debates promovidos, em especial à Helena Miranda Mollo, pela excelente orientação na Iniciação científica, durante a graduação, e no mestrado. A UFOP me proporcionou a oportunidade de ser estagiária no Museu da Inconfidência, no setor educativo desse, ao qual sou infinitamente grata por toda experiência e aprendizado, pois foi nesse local que consegui articular o conhecimento adquirido na Universidade à prática, que está intimamente relacionada ao respeito ao ser humano e à diversidade. Por fim, agradeço ao Daniel Neri, professor do departamento de Física do Instituto Federal de Minas Gerais de Ouro Preto, pelo inestimável auxílio na redação desta dissertação.

“Toda grande e profunda dificuldade carrega em si sua própria solução. Isso nos obriga a mudar o nosso pensamento, a fim de encontrá-la.” Niels Bohr

Sumário

Resumo	9
Abstract	10
Introdução	11
CAPÍTULO I	25
I.I – Nascimento da Física Quântica	25
I.II – A Complementaridade de Bohr e a Epistemologia	38
Capítulo II	53
II.I Século XX e a física quântica: transformações epistemológicas	53
II.II Microfísica: contribuições para uma nova visão de mundo	62
Conclusão	71

Resumo

Durante as três primeiras décadas do século XX, a Física passou por significativas transformações, dando margem à imersão de novas formulações teóricas. A descoberta do raio-x, o Princípio da Incerteza de Heisenberg, as noções de Complementaridade de Bohr, a descoberta da fissão nuclear, todos esses são exemplos de trabalhos científicos que fizeram com que as premissas que fundamentavam a Física Clássica fossem questionadas, o que deu origem ao processo de desenvolvimento da Mecânica Quântica. O Princípio da Incerteza de Heisenberg e a teoria da Complementaridade de Bohr, especialmente, tornaram-se fundamentações essenciais para a constituição daquele campo e da mudança no quadro teórico, principalmente relacionado à microfísica. Niels Bohr foi um dos cientistas que dedicou grande parte da sua vida ao desenvolvimento e à organização teórica e metodológica da Mecânica Quântica, em que a noção de Complementaridade era utilizada pelo físico dinamarquês como explicação mais elementar. O desenvolvimento científico daquele campo, então, colaborou com a mudança na forma como as pessoas se relacionavam com o mundo e com a Ciência, a partir do primeiro quartel do século XX.

Palavras-chave: Teoria Quântica; História da Ciência, Niels Bohr, História da Física, Teoria do Conhecimento.

Abstract

During the first three decades of the twentieth century, Physics underwent significant transformations, enabling the immersion of new theoretical formulations. The discovery of the X-ray, the Heisenberg's Uncertainty Principle, the notions of Bohr's Complementarity, the discovery of nuclear fission, these are all examples of scientific work based on the premises of Classical Physics that were questioned and gave rise to the development process of Quantum Mechanics. The Heisenberg's Uncertainty Principle and Bohr's Complementarity theory particularly became essential foundations for the constitution of Quantum Mechanics and the change in theoretical framework, mainly related to the microphysics. Niels Bohr was one of the scientists who devoted most of his life to the development and the theoretical and methodological organization of Quantum Mechanics. The idea of Complementarity was used by the Danish physicist as the most elementary explanation of Quantum Mechanics. From the first quarter of the twentieth century, the scientific development of this field contributed to change the way people related to Science and to the world.

Keywords: Quantum Theory; History of Science, Niels Bohr, History of Physics, Theory of Knowledge.

Introdução

Durante minha graduação, percebi que era possível unir a Física à História, após conhecer a obra de Thomas Kuhn “A Estrutura das Revoluções Científicas”¹. Foi a partir daí que me deparei com o trabalho de Niels Bohr. O objeto desta dissertação foi reformulado várias vezes, entretanto, havia a certeza de que Bohr e a Física Quântica, mais especificamente sua visão elaborada a partir da Complementaridade, foram a grande inspiração dessa produção acadêmica. Para tanto, o livro que reunia várias de suas apresentações em congressos ao longo da sua vida: “A Física atômica e o Conhecimento humano”², foi o principal guia para o desenvolvimento desse trabalho, entretanto, outras fontes primárias, que serão mencionadas adiante, também foram necessárias.

Niels Bohr foi um cientista dinamarquês da virada do século XIX para o XX que se dedicou ao desenvolvimento do que significou uma grande revolução na História da Física: uma nova forma de compreensão das partículas, e que derivou no que hoje conhecemos como Mecânica Quântica³. Durante o desenvolvimento das pesquisas relacionadas à estrutura atômico-molecular da matéria, o físico dinamarquês trabalhou na constituição da teoria da Complementaridade. Aqui destaca-se o objeto dessa dissertação: a Complementaridade e o desenvolvimento da Mecânica Quântica, que colaboraram para uma nova visão de mundo no tocante à forma de ser e agir dos seres humanos; esses que começaram a viver num mundo de novos conceitos, tanto científicos quanto filosóficos. Diante disso, essa dissertação tem como objetivo geral é cooperar para a identificação da contribuição de Bohr para a Mecânica Quântica e indicar parte do legado desse campo,

¹“A Estrutura das Revoluções Científicas”, originalmente impresso em inglês sob o título “The Structure of Scientific Revolutions”, foi publicado pela primeira vez em 1962. Após a publicação dessa obra Thomas Kuhn recebeu críticas tanto de filósofos quanto de cientistas pelo seu conteúdo. Kuhn foi chamado de irracionalista, relativista dentre outras coisas. As ideias apresentadas pelo físico historiador da Ciência em The Structure of Scientific Revolutions foram veemente criticadas. Após a publicação desse livro, Thomas Kuhn passou o resto de sua vida fazendo palestras e escrevendo livros que explicassem melhor suas ideias e algumas reformulações também. Esse é o livro mais famoso de Kuhn em todo mundo, até 2018 havia 13 edições publicadas só em português, com tradução de Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. A edição do livro *A estrutura das revoluções científicas* utilizado nesta dissertação é de 2013

²“Atomic Physics and Human Knowledge” foi publicado pela primeira vez em 1958 e reunia sete artigos escritos por Bohr que foram apresentados em momentos diversos: congressos, conferências, celebrações e homenagens. A coletânea abrange produções textuais e científicas que o físico dinamarquês escreveu entre 1932 e 1957. A obra conta, ainda, com um prefácio escrito por Bohr em 1957. “A Física atômica e o Conhecimento humano” foi traduzida para o português e teve sua primeira publicação em 1995, cuja revisão original foi de Cesar Benjamin, revisão tipográfica de Tereza da Rocha e projeto gráfico de Regina Ferraz. A obra consultada para a constituição dessa dissertação foi publicada em 2012 - 5ª edição - pela editora Contraponto, cuja tradução foi feita por Vera Ribeiro e a revisão técnica por Ildeu de Castro Moreira.

³ Paul G. Hewitt (2002) destaca que a Física Quântica é o conjunto de leis desenvolvidas, entre 1900 e 1920, utilizadas para descrever todos os fenômenos quânticos do mundo micro e a Mecânica Quântica, por sua vez é o estudo do movimento do micromundo, com leis específicas. Principalmente baseadas nos estudos de Bohr, Dirac, Schrodinger e Eisenberg.

principalmente no que tange ao conceito de Complementaridade, instituído pelo físico dinamarquês, norteador pela questão problema: “De que forma a Complementaridade contribuiu para o desenvolvimento da Mecânica Quântica e qual foi o seu legado para o mundo atual?”. Justifica-se a realização a investigação proposta, uma vez que estudar os expoentes do desenvolvimento da daquele campo científico e especificamente da Complementaridade é relevante para melhor compreendê-los, visto que os resultados das pesquisas relacionadas a esses assuntos resultaram na ampliação e evolução da tecnologia e colaborou para que os seres humanos assumissem um novo olhar sobre o mundo que partiu do conhecimento mais profundo do microcosmos. Diante disso, a hipótese que direciona as discussões aqui presentes é que o conceito de Complementaridade e os debates que o permearam foi crucial para o desenvolvimento da Mecânica Quântica, resultando em uma nova forma de os seres humanos lidarem com o mundo, através do conhecimento do microcosmos.

O estudo sobre a fissão nuclear, que esteve relacionado à implementação das bombas atômicas lançadas sobre as cidades japonesas, em 1945, e as nano partículas, por outro lado, muito utilizadas em aparelhos eletrônicos, são exemplos do leque de colaborações da microfísica para o mundo. Além disso, recentemente o físico brasileiro Marcelo Gleiser, professor e pesquisador na Dartmouth College, foi o primeiro latino americano a ser condecorado com o Prêmio Templeton⁴, por seu trabalho que articula a origem do mundo à espiritualidade. Para tanto, o físico se dedicou à pesquisa de campos quânticos, partículas elementares e da formação do universo.⁵

Decerto, o desenvolvimento da Mecânica Quântica está relacionado aos trabalhos de físicos como Einstein, Shroedinger e Eisenberg, Bohr, dentre outros. Nesta dissertação, serão apresentadas algumas das contribuições de diversos cientistas para a consolidação daquela área do conhecimento e destacará os esforços de Niels Henrik David Bohr, cujo trabalho relacionado à Complementaridade e à Mecânica Quântica são objetos desta produção acadêmica.

O cientista, nascido na Dinamarca, em 1885, se dedicou às investigações diretamente envolvidas com aquele campo, o que fez com que se tornasse um físico e

⁴Condecoração e homenagem oferecida pela Fundação John Templeton às pessoas que se dedicaram a trabalhos que estejam relacionados à afirmação de aspectos espirituais da vida. A láurea é oferecida anualmente desde 1979 e foi criada porque Templeton acreditava que o Prêmio Nobel não abarcava um aspecto importante que merecia reconhecimento: trabalhos relacionados à espiritualidade.

⁵Notícia publicada na página virtual do G1. <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/03/19/fisico-e-astronomo-brasileiro-marcelo-gleiser-e-o-vencedor-do-premio-templeton-2019.ghtml>> Acessado em 28/03/2018

uma personalidade de forte influência no mundo, devido as suas pesquisas relacionadas à estrutura do átomo, à radioatividade atômica e à fissão nuclear. De acordo com Maria Cristina Batoni Abdalla⁶ (2002), o prestígio do físico dinamarquês no meio científico era tão veemente que, além de ser condecorado com o Prêmio Nobel, em 1922, Bohr conseguiu uma significativa doação da Fundação Ford para a construção de um prédio anexo ao Instituto de Física Teórica⁷, após a Segunda Guerra Mundial, especificamente, em 1946, quando a Dinamarca vivia um quadro socioeconômico frágil. Essa doação evidenciou a influência pública do físico nesse contexto de instabilidade financeira em que as instituições se dispunham a investir nas propostas de Bohr. Na Dinamarca, o físico era visto com muito prestígio, como se integrasse uma “segunda família real” (ABDALLA, 2002, p. 152). Exemplo disso foi a sua condecoração como Cavaleiro da Ordem dos Elefantes⁸, tendo em vista que, de acordo com Abdalla (2002), esse é um reconhecimento raramente oferecido para pessoas fora do âmbito da família real dinamarquesa.

A honraria fez com que Bohr se visse obrigado a conseguir um brasão que o representasse. Abdalla (2002) reitera que o físico, influenciado por Hanna Kobylinski⁹, colocou no centro do seu brasão o símbolo chinês que representa a relação complementar dos elementos *Yin* e *Yang*. Segundo Tom Sintan Wen¹⁰ (1985), na China antiga, todos os

⁶ Maria Cristina Abdalla é pós doutora e professora de Física no Instituto de Física Teórica da UNESP. Abdalla, além de ministrar cursos de Mecânica Quântica, já publicou vários trabalhos relacionados ao assunto, inclusive o livro aqui citado, que é uma das biografias de Bohr mais referenciadas no Brasil, desde a sua primeira publicação em 2002. Para redigir o livro “Bohr, o arquiteto do átomo”, Maria Cristina Abdalla, que trabalhou no Instituto Niels Bohr entre 1983 e 1984, em Copenhague, conheceu a Sra. Margrethe Bohr, esposa de Niels Bohr e teve acesso aos arquivos do Instituto onde o físico dinamarquês trabalhou a maior parte da sua vida.

⁷ O Instituto de Física Teórica da Universidade de Copenhague foi criado por Niels Bohr, em 1921. O físico dinamarquês tinha o desejo de construir um instituto que articulasse o trabalho teórico ao experimental da Física. De posse de um projeto, Bohr foi até o departamento de Física da Universidade de Copenhague e apresentou-lhe a proposta da construção do Instituto, em 1918. No mesmo ano, Bohr foi chamado para uma reunião com as autoridades da Universidade e seu projeto foi aceito. O estado responsabilizou-se pela construção do prédio e a Fundação Carlsberg ofereceu bolsas anuais como fomento para o desenvolvimento de pesquisas científicas realizadas no local. Após a morte do físico dinamarquês, a instituição recebeu o nome de Instituto Niels Bohr, em homenagem e respeito ao trabalho de Bohr, que se dedicou durante anos à gestão do local e à pesquisa realizada nas instalações do Instituto de Física Teórica.

⁸ Elefantordenen ou Ordem dos Elefantes é uma condecoração dinamarquesa destinada a honrar aqueles que respeitam a monarquia da Dinamarca e que realizam feitos que fortalecem o reino.

⁹ Hanna Kobylinski foi especialista em história chinesa nascida na Alemanha, que emigrou para a Dinamarca no período nazista e influenciou culturalmente os dinamarqueses. O único que pode conceder essa honraria é o rei ou rainha da Dinamarca.

¹⁰ Tom Sintan Wen é um médico chinês que viveu no Brasil entre 1974 e 1984, desenvolvendo as técnicas da medicina oriental que aprendeu ao longo da sua vida pessoal e acadêmica voltadas para a acupuntura, mais precisamente, sobre os diagnósticos e pontos de tratamento utilizando esse meio de tratamento. Escreveu diversos livros sobre o assunto, entre eles, o “Acupuntura clássica Chinesa”, aqui citado,

fenômenos da natureza foram classificados de forma que eram positivos, *Yang*, ou negativos, *Yin*. Por serem complementares um do outro, *Yang* pode se transformar em *Yin* e o contrário também pode acontecer. Há relação de dependência entre esses dois elementos, ou seja, um não pode existir sem o outro. Além disso, *Yin-Yang* estão diretamente relacionados aos elementos da natureza que estão constantemente em mutação, logo, “a perda ou ganho de um elemento terá uma repercussão direta e complementar no outro” (WEN, 1985, p. 19).

Resumindo, as relações de interdependência, interconsumo e intertransformação de *Yin* e *Yang* podem ser sumarizadas como as leis das unidades de oposição. Além do mais, estas (...) relações entre *Yin* e *Yang* não são isoladas uma da outra, mas sim interconectadas, uma influenciando a outra e cada uma delas sendo a causa dos efeitos das demais.
(WEN, 1985, p. 20).

O símbolo presente no brasão de Bohr fazia referência direta aos seus estudos e aos resultados alcançados pelo cientista. Para o físico dinamarquês, a noção de complementaridade presente na teoria *Yin –Yang* poderia ser aplicada à Mecânica Quântica. Sara Madera Gómez (2016) sustenta que a teoria da Complementaridade está intimamente relacionada à articulação de dois conceitos, mutuamente excludentes e que se completam ao mesmo tempo, em que ambos são necessários para que se tenha uma constituição completa de um sistema atômico. A Complementaridade, para Bohr, expressada pelo símbolo de *Yin* e *Yang*, representava o que essas energias simbolizam: ideias opostas que se complementam.

Mas, afinal, o que é a Complementaridade para Bohr?

Diretamente relacionado à Física, esse conceito era “próprio para abranger os traços característicos e individuais dos fenômenos quânticos e, ao mesmo tempo, esclarecer os aspectos peculiares do problema observacional nesse campo da experiência” (BOHR, 1958, p. 50). O físico dinamarquês completa que as ocorrências da Mecânica Quântica que não têm correspondente na Física Clássica devem, ainda assim, apoiar-se nos conceitos dessa última para se expressar. Isso ilustra o que físico enuncia sobre ideias, elementos e aspectos que seriam excludentes entre si e se complementam. Como exemplo, tem-se o fato de que não existe uma separação entre o comportamento dos objetos atômicos e sua interação com “os instrumentos de medida que servem para definir as condições em que os fenômenos aparecem”. Ademais, “consequentemente, os dados obtidos em diferentes condições experimentais não podem ser compreendidos dentro de

publicado pela primeira vez em 1985, pela editora Cultrix. Nessa obra Dr. Tom Sintan Wen retoma alguns conceitos basilares para a Acupuntura e aponta sua aplicação no Brasil.

um quadro único, mas devem ser considerados complementares” (BOHR, 1958, p. 51). Destarte, os dados que são obtidos a partir de submissões a experimentos distintos não podem ser restritos a uma imagem singular, mas dual e complementar, “no sentido em que somente a totalidade dos fenômenos esgota as informações possíveis sobre os objetos” (BOHR, 1958, p. 51). Isso tem relação com o Princípio da Incerteza¹¹, com o fato de o instrumento de medida interferir no objeto/fenômeno que pretende medir. No tocante à Complementaridade, Paul Strathern (1998)¹² reitera que a base da teoria da Mecânica Quântica é a compatibilidade de dois opostos que parecem ser incompatíveis. Para o biógrafo, Bohr apropriou-se da noção de ambiguidade no âmbito mais profundo e nas proposições da teoria da Complementaridade e tentou abordar e solucionar essas inquietações. Além disso, José Luís Rodrigues Martins¹³ (1969), no prefácio à edição portuguesa do livro “Sobre a constituição de átomos e moléculas”, do físico dinamarquês, salienta que

(...) Princípio da Complementaridade de Bohr, que racionaliza a utilização de conceitos clássicos conjugados, dentro do âmbito das relações de Incerteza, ao prescrever tão-somente a viabilidade da sua existência complementar e nunca simultânea, e, ao mesmo tempo, a dogmática suspensão de qualquer juízo de existência, mesmo referido apenas à simples presença potencial de tais conceitos, fora dos instantes exatos das medições-observações, que os especificam e determinam. (MARTINS, 1969, p.16)

Bohr (1958) destaca que em muitos casos os conceitos utilizados teriam que ser assumidos a partir da teoria da Complementaridade. No que concerne a isso, o dinamarquês afirma que “por mais que os fenômenos transcendam o âmbito da explicação da Física Clássica a descrição de todos os dados deve ser expressada em termos clássicos” (BOHR, 1958, p. 50). Isso porque, segundo o físico, com o experimento é possível transmitir para os outros o que foi feito e o que foi apreendido durante uma pesquisa.

¹¹ O Princípio da Incerteza foi formulado por Werner Heisenberg, em 1927. A ideia que norteia esse Princípio é que “não é possível medir simultaneamente com precisão a posição e o momentum de uma partícula, assim como a energia e o tempo durante o qual a partícula possui aquela energia” (HEWITT, 2015, p. 597)

¹²Paul Strathern é um filósofo britânico. A obra consultada para a elaboração desta dissertação faz parte de uma coletânea em que há biografia de cientistas e que trata da vida e trabalho científico de cada um deles. A obra citada, “Bohr e a teoria quântica”, foi publicada pela primeira vez em 1998, em Londres. Sua primeira publicação brasileira foi um ano depois, a tradução é de Maria Helena Geordane e a consultoria técnica, de Carla Fonseca-Babatti.

¹³José Luís Rodrigues Martins é um cientista português, doutor em Física pela École Polytechnique Fédérale de Lausanne, na Suíça, professor universitário da Universidade de Luanda e realizou vários trabalhos relacionados à Física Quântica. Martins foi convidado para redigir o prefácio da edição portuguesa, em 1969, do livro “Sobre a constituição de átomos e moléculas”, de Niels Bohr, publicado pela primeira vez em 1963, em Copenhague, sob o título “On the Constitution of atoms and molecules”, em que foi uma reimpressão do doutorado de Bohr publicado inicialmente em 1913 na Philosophical Magazine. O livro aqui citado tem a publicação datada de 2001, cuja tradução é de Edígio Namorado e o prefácio de José Luís Rodrigues Martins, como mencionado.

A Complementaridade de Bohr e sua representação de complemento entre ideias opostas, como a utilização de conceitos tanto da Mecânica Newtoniana quanto da Mecânica Quântica, veio a dar munição para as discussões referentes ao desenvolvimento da História e da Filosofia da Ciência em momentos posteriores. A respeito disso, Silvio Seno Chibeni¹⁴ (1992) afirma que as recentes pesquisas da microfísica colaboraram para que houvesse uma conexão entre a Ciência e a Filosofia. Para esse autor, os desafios propostos pela teoria da Complementaridade foram os grandes incentivadores do estreitamento entre a Ciência e a Filosofia.

Muitos conceitos fundamentais da Física Clássica não são aplicáveis à Física Quântica. Com relação a isso, Bohr (1958) destaca que no início do século XX a investigação da Física Quântica revelou que a Física Clássica, referente à Mecânica de Newton, apresentava uma limitação e a teoria Quântica apontou “demandas de explicação científica incorporadas na Filosofia tradicional” (BOHR, 1958, p. I). Até a virada do século passado, alguns fenômenos, há tempos conhecidos pelos cientistas, ainda não tinham explicação satisfatória, como o espectro do átomo de hidrogênio e a radiação do corpo negro. Esse último é um corpo que absorve todas as radiações que recebe e emite apenas uma pequena parte dessa radiação. Há uma elevação da temperatura desses corpos ao absorver calor, os corpos negros, então, produzem entropia, ou seja, “absorve uma energia mais ou menos concentrada e ordenada e depois restitui sob forma difusa e homogênea”, de acordo com Yoav Ben-Dov (1996, p. 129). Max Planck, então, ao se dedicar a esse estudo e tentar estabelecer uma relação entre a radiação do corpo negro em função da frequência, propôs que a energia era associada a um conjunto de osciladores e introduziu o conceito de quantização baseado na ideia de que a energia é constituída por *quanta*, além disso, os estudos do físico alemão levaram à introdução de uma constante que posteriormente seria chamada de “constante de Planck¹⁵”. Os trabalhos de Planck

¹⁴Silvio Seno Chibeni é físico e professor da Unicamp. O início da sua carreira e vida acadêmica é marcado pelo grande volume de produção intelectual relacionado à Física Quântica. Ademais, há vários trabalhos em que o físico articula a Física Quântica à Filosofia. A citação aqui presente se refere à sua contribuição à revista *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, publicado inicialmente em 1992, quando cursava o doutorado, um dos trabalhos do cientista relacionado à Física Quântica e a Filosofia, e era professor Assistente do Departamento de Filosofia da Unicamp. O título da publicação aqui citada é “Implicações filosóficas da microfísica”.

¹⁵Para Planck, a energia era quantizada entre as partículas vibrantes dos corpos sólidos” (CESAR *et al*, 2016, p. 7). Segundo Cesar *et al* (2016) (“a energia (os quanta de energia) se determinava exclusivamente pela frequência de oscilações dessas partículas, e por uma nova grandeza”: a constante de Planck, representada na equação $E = h \times \nu$, em que E é a energia associada, ν é a frequência em que o átomo vibra e h é a constante de Planck, que mede $6,62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$).

indicavam que “a emissão e a absorção de radiação por parte de osciladores se dava em “quanta discretos de energia” (PESSOA JR, 2010, p. 3).

No final do oitocentos, é possível verificar que o físico alemão Willy Wien propôs, em 1894, a Lei do deslocamento, em “que radiação era alterada pelo efeito Doppler ao ser refletida em uma esfera que se contraía de maneira ‘adiabática’” (PESSOA JR., 2010, p.1); nessas relações não há troca de calor com o ambiente. Posteriormente, Max Planck, físico ganhador do Prêmio Nobel, em 1918, e precursor da Física Quântica, mais especificamente protagonista de trabalhos precursores desenvolvidos na última década o século XIX e na primeira do XX, associou a lei de Wien à Termodinâmica¹⁶, e indicou uma fórmula. Porém, entre 1899 e 1900, Lummer & Pringsheim testaram as ideias propostas por Planck e perceberam que havia desvios consideráveis quando frequências mais baixas, como o infravermelho, eram testadas, tendo em vista os resultados esperados pela lei de radiação de Wien era proposta para altos padrões de frequência e pequenos comprimentos de ondas. Albert Einstein também trabalhou com as teorias de radiação e se dedicou a explorar a hipótese formulada por Max Planck, mencionada anteriormente. Em 1905, Einstein reformulou as equações matemáticas envolvidas nas proposições de Planck, após realizar uma analogia entre “as expressões da entropia para a radiação emitida por um corpo negro (não dos osciladores) no limite de validade da lei de Wien e da entropia de um gás dada pela teoria cinética” (PESSOA JR, 2010, p. 3), então a energia de radiação é diretamente proporcional à frequência da radiação eletromagnética multiplicada pela constante de Planck. Além disso, esse físico demonstrou que os fótons, pacotes de energia, não se comportam como as partículas clássicas que se deslocam de onde são emitidos para local onde serão absorvidos, mas se propagam como ondas clássicas. A partir das proposições de Planck sobre os fótons e a radiação, Einstein supôs que a energia luminosa tem distribuição descontínua no espaço. Essa ideia deu origem ao Efeito fotoelétrico¹⁷, mais tarde, Millikan o confirmou experimentalmente em 1916, de acordo com Pessoa Jr (2010). Por outro lado, o problema relacionado ao espectro de

¹⁶Ao realizar essa associação Planck assumia que qualquer corpo que estivesse em equilíbrio termodinâmico poderia emitir fótons. Essa radiação emitida nesse processo era chamada de radiação do corpo negro ou radiação térmica. Pela Lei de Wien, o comprimento de onda com intensidade máxima que um corpo negro emite é inversamente proporcional à temperatura. Diante disso, tem-se que quando a temperatura aumenta o comprimento de onda diminui. Diante disso, Planck assumiu que a entropia estabelecia a lei da termodinâmica e então assumiu que a entropia de um oscilador seria dado pela relação entre a termodinâmica e a Lei de Wien para tentar inferir um equilíbrio entre a radiação, a temperatura, a frequência e comprimento de onda, importantes para a sua teoria.

¹⁷ O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons, que ocorre quando uma luz incide em uma superfície metálica.

hidrogênio foi resolvido por Niels Bohr, durante o seu doutorado publicado em 1913, na *Philosophical Magazine*. Ele conseguiu identificar a fórmula que revelou o valor dessa energia dispendida pelo espectro discreto do átomo de hidrogênio.

A radiação emitida quando o gás atômico é excitado por uma corrente elétrica possui um espectro com determinados comprimentos de onda discretos. De acordo com a Física Clássica, esses espectros presentes também no hidrogênio eram contínuos, entretanto, descobriu-se que o espectro de hidrogênio não era tão ordenado quanto previa a Física Newtoniana. O que ocorre é que esse espectro se inicia com uma linha na região do vermelho e do azul, depois segue com várias linhas na região do violeta e, por inúmeras, no ultravioleta. Ocorria também que o espaçamento entre as sucessivas linhas se torna cada vez menor da primeira linha no vermelho à última no ultravioleta, até que as linhas se tornam tão próximas que são vistas superpostas. (HEWITT, 2015, p. 597).

Bohr descobriu, então, que cada uma dessas regiões possuía uma quantidade de energia e que os elétrons transitavam por esses níveis, realizando saltos quânticos, ocupando estados estacionários de energia fixa. Com isso, o autor de “Sobre a constituição de átomos e moléculas”, reconhece que o lugar que a Mecânica Quântica se edificara e seus postulados eram completamente “sem precedentes na História da Ciência Física” (BOHR, 1958, p. 25). Nesse sentido, assumindo que elétron ocupa níveis discretos de energia, esse comportamento é comum a uma onda e, por outro lado, também é uma esfera que circula ao redor do núcleo, o que é comportamento de uma partícula, o elétron, então, assim como a luz, tem um comportamento dual, assumindo-se em determinado momento como onda e em outros como partícula, dependendo da sua interação com o sistema. Essas características da matéria e da radiação são assuntos aos quais a Mecânica Quântica dedica-se a investigar.

É oportuno destacar que os cientistas do século XIX já se debruçavam sobre o problema que revolucionou a Física novecentista, pois o astrônomo William Herschel conseguiu medir as temperaturas diferentes das cores produzidas, quando a luz branca passava pelo prisma. Pessoa Jr. (2010) aponta que Bohr utilizou a constante de Planck para concretizar a estabilidade do átomo. A teoria do físico dinamarquês constitui a premissa de que em “um sistema atômico só pode existir permanentemente em uma série descontínua de ‘estados estacionários’, nas quais ele não perde energia por radiação” (PESSOA JR., 2010, p. 5). Esse autor acrescenta que é verificado no modelo atômico proposto por Bohr uma tentativa de utilizar tanto aspectos da Física Clássica quanto da Mecânica Quântica em que haveria um equilíbrio entre essas concepções.

De acordo com José Luís Rodrigues Martins (1969), a expressão da Complementaridade tratada aqui, mais especificamente relacionada aos conceitos utilizados na Mecânica Quântica, é consequência da passagem de uma crise enfrentada pela Física. O início do século XX foi marcado por muitas mudanças nas Ciências Exatas, mais contundentemente na Física. Tanto Martins (1969) quanto Antônio Augusto Passos Videira¹⁸ (2007) consideram que esse período pode ser entendido como um momento de crise dessas áreas, causada pelas descobertas de Planck, Einstein e Bohr, mencionadas, o que acarretou em mudanças epistemológicas, experimentais e teóricas, como a inserção de aspectos fundamentais relacionados às novas descobertas da microfísica, exemplo disso são o Princípio da Incerteza e a teoria da Complementaridade.

(...) no decurso das três primeiras décadas desse século, se deu uma profunda transformação nos quadros teóricos da Física Clássica, atingindo-se de tal forma os seus fundamentos e a sua estrutura lógica e conceitual, que pode, sem exagero, afirmar-se que a Física de hoje é, radicalmente, distinta daquela e não apenas o seu prolongamento a novos domínios.
(MARTINS, 1969, p.13)

João Alex Costa Carneiro¹⁹ (2012) propõe que a crise enfrentada pela Física no início do século XX foi epistemológica, o que acarretou uma mudança no estilo de pensamento científico. Martins (1969), por sua vez, salienta que essa crise revelou o “caráter histórico e evolutivo dos próprios quadros racionais de pensamento científico e comprovou, no mesmo lance, a historicidade da razão e da consciência” (MARTINS, 1969, p. 17).

A Física Quântica trouxe consigo algumas mudanças epistemológicas, teóricas e experimentais, cujas premissas causaram dúvidas nos cientistas da época, o que resultou em debates relevantes para o desenvolvimento da Mecânica Quântica, como o protagonizado por Niels Bohr e Albert Einstein, que será abordado adiante. Apesar dos esforços do físico dinamarquês em tentar demonstrar a correspondência conceitual entre a Física Clássica e a Mecânica Quântica, as premissas da Complementaridade, fundamentadas na incerteza e na probabilidade, geraram certo desconforto entre alguns

¹⁸Antônio Augusto Passos é filósofo e já realizou vários trabalhos relacionados à Epistemologia e História da Ciência e teve oportunidade de mostrar seu trabalho em várias partes do mundo e pesquisar em universidades estrangeiras. O trabalho aqui referenciado “Historiografia e História da Ciência”, publicado em 2007, é frequentemente citado entre nas produções acadêmicas relacionadas à História das Ciências e bastante utilizado nas aulas dessa disciplina nas universidades brasileiras.

¹⁹João Alex Costa Carneiro é doutor em filosofia e biólogo e dedicou-se em sua vida acadêmica a estudar a Epistemologia, Filosofia e História das Ciências, pesquisando sobre a inter-relação entre a Filosofia, a História e a Sociologia no desenvolvimento das Ciências no início do século XX. A citação aqui presente refere-se à dissertação de João Alex Costa Carneiro, defendida em 2012, na Universidade de São Paulo, intitulada “A teoria comparativa de Ludwik Fleck: comunicabilidade e incomensurabilidade no desenvolvimento das ideias científicas”.

cientistas, como Einstein, Podolsky e Rosen – que tentaram refutar a teoria de Complementaridade, enquanto outros se dedicaram a aperfeiçoar essa teoria quântica, como Heisenberg, por exemplo. No meio filosófico, a teoria da Complementaridade gerou certa dúvida no que tange a sua essência.

No início do século XX, o neopositivismo encontrava-se fortalecido pelo Ciclo de Viena, entretanto, havia uma corrente filosófica que tendia ao oposto do proposto pelos positivistas lógicos, conforme exposto por Maia (2013). O trabalho de Bohr, com relação à Complementaridade, é a representação da união entre essas duas proposições, de um lado os positivistas lógicos e de outro a tendência a uma abordagem mais sociocultural. Carlos Alvarez Maia²⁰ (2013) concluiu que, no início do século XX, a Filosofia e a História das Ciências tomavam gradativamente uma posição de protagonismo, emplacando discussões, debates e uma nova historiografia das Ciências. Houve, ainda, um dilema entre as duas formas mais expressivas de escrita e investigação da História das Ciências no início do século XX: os internalistas, em que era basicamente predominada pelos cientistas, que escreviam a História das suas próprias áreas, a partir de um formato longe da História propriamente dita; e os externalistas, que escreviam a História das Ciências a partir de uma perspectiva mais social, baseada nas experiências humanas e nos contextos em que a História se dava. Esses conceitos foram introduzidos mais tarde por estudiosos que tentaram entender e explicar a forma como os contemporâneos do primeiro quartel do século XX, e parte do segundo, estabeleciam fundamentos para a Ciência. Entretanto, muitos autores acreditam que a utilização dessas ideias para caracterizar aquele período, seja insuficiente, apresentando uma terceira via como opção, em que as premissas de ambas os vieses se fazem presentes. Maia (2016) esclarece que tanto no externalismo quanto no internalismo há a presença das ideias positivistas. Diante disso, ressalta-se que essa dicotomia, apresentada na segunda metade do novecentos para tratar a História da Ciência, não é tão antagônica.

A partir da introdução da teoria da Complementaridade de Bohr, as ideias apresentadas pelo físico podem ser interpretadas como intermediárias, o que representa uma inflexão, apontada por Maia (2013) como um momento de apaziguamento entre as vertentes. Além disso, para esse autor, explicar a História da Ciência dessa forma é muito

²⁰Carlos Alvarez Maia é coordenador do Laboratório de Estudos Históricos da Ciência, da Universidade Federal do Rio de Janeiro e autor de uma das publicações mais significativas publicadas no Brasil sobre História das Ciências nos últimos anos: História das Ciências: uma História de historiadores ausentes, publicado em 2013. Essa obra é relevante para a História das Ciências por se tratar de um aspecto inédito sobre a Historiografia das Ciências.

simples e não abarca a real situação, em que ambas as vertentes partilhavam premissas fundamentais

O dinamarquês se dedicou durante muitos anos a formular e reformular a teoria da Complementaridade. O físico acreditava que a chave para o desenvolvimento efetivo da Mecânica Quântica e as soluções para os impasses ainda não resolvidos dessa área estavam no aperfeiçoamento do conceito e da sua aplicação. Werner Heisenberg²¹ (1971) discorre sobre as tentativas de Bohr em expandir a aplicação do conceito de Complementaridade. As longas conversas entre os físicos foram registradas e publicadas por Heisenberg em seu livro “A parte e o todo”. A obra mencionada, “Física atômica e o conhecimento humano” e “Sobre a constituição de átomos de moléculas”, as duas últimas escritas por Niels Bohr, foram as fontes primárias principais desta dissertação, e “A condição humana”²², de Hannah Arendt, guiou a elaboração do objeto e a leitura sobre contexto de produção científica ao longo da Modernidade e do momento específico da proposição da Mecânica Quântica, durante a elaboração da presente produção intelectual.

O desenvolvimento da Mecânica Quântica resultou em avanços tecnológicos decorrentes de pesquisas relacionadas àquele campo, como a implementação de aparelhos eletrônicos, sem os quais é impossível imaginar a sociedade atualmente (televisão, celular, computador...). A tecnologia é intrínseca à rotina de diversos grupos sociais, atuando diretamente na forma como os seres humanos lidam uns com os outros, com a vida, com a natureza e com a Ciência. Essa última está relacionada indiretamente com os modos de vidas resultantes da inserção mais efetiva da tecnologia no meio social, uma

²¹Werner Heisenberg foi assistente de Bohr durante muitos anos no Instituto de Física Teórica, em Copenhague, o que fez com que Heisenberg se tornasse amigo muito próximo de Bohr e participasse diretamente do desenvolvimento da Física Quântica e das pesquisas realizadas no Instituto que Niels Bohr coordenava e geria pessoalmente. O livro aqui mencionado trata de uma coleção de narrativas, em que Heisenberg descreve livremente conversas que teve com pessoas que participaram da sua vida científica. A obra, que foi publicada pela primeira vez em 1971, recebeu a sua primeira publicação portuguesa em 1996, com tradução de Vera Ribeiro, revisão de tradução de Luciana Muniz e Antônio Augusto Passos Videira, além da revisão técnica de Ildeu de Castro Moreira. A obra se inicia com a narrativa do primeiro contato que Heisenberg teve com a Teoria Atômica, em 1919, e se devolve até os seus trabalhos e investigações realizadas em 1965. O livro “A parte e o Todo”, originalmente “Physics and Beyond: Encounter sand conversations”, trata do relacionamento de Heisenberg com a Física Atômica, com o desenvolvimento da Física Quântica e cita várias conversas que teve com Bohr ao longo dos anos.

²²The Human Condition, de Hannah Arendt, foi publicado pela primeira vez em 1958, pela University of Chicago, após o lançamento do primeiro satélite artificial, o Sputnik I, em outubro de 1957. A obra mencionada inicia-se com uma inquietação provocada por esse momento inédito na humanidade. “A condição humana”, então, é composta por provocações e afirmações no tocante à relação entre o homem e a ciência. O livro é amplamente utilizado nos cursos de graduação de História, Filosofia e Ciências Sociais. Até o momento, há 13 edições publicadas em português e para o desenvolvimento desta dissertação foi utilizada a 10ª edição, referente à 2007, com tradução de Roberto Raposo e prefácio de Celso Lafer.

vez que é por meio do desenvolvimento científico que é possível fazer descobertas que interferem nos estudos relacionados à tecnologia.

A Ciência, também pode influenciar os modos de vida diretamente, quando, por exemplo, seus produtos resultam na transformação de um espaço, como aconteceu após a criação das bombas atômicas e de suas explosões sobre Hiroshima e Nagasaki, no Japão, em 1945, decorrentes de conflitos políticos; as consequências dessas detonações foram não somente geográficas, como políticas e sociais. Tanto os avanços científicos mencionados quanto a destruição causada pelas bombas atômicas são resultado do uso dos conhecimentos adquiridos por meio do desenvolvimento da Mecânica Quântica, que até o presente momento contribui, mesmo que indiretamente, para as mudanças na forma como o homem se relaciona com os mundos macroscópico e microscópico.

As investigações relacionadas à teoria quântica levaram à efetivação da Mecânica Quântica como campo autônomo e consolidado. Ao longo do século XX, e ainda na atualidade, muitas foram e são as contribuições científicas dessa área. A constituição daquele campo só foi possível a partir do aporte teórico de trabalhos de muitos cientistas, que serão melhores explicitados adiante. Com isso, as pesquisas relacionadas ao microcosmos fizeram com que os seres humanos percebessem um mundo microscópico, que antes era desconhecido, ou pouco se sabia a respeito. A natureza, o universo, o Planeta Terra, o corpo e a vida humana tiveram uma nova face revelada, em que a tecnologia e a Ciência poderiam oferecer uma infinidade de artefatos e questões aos seres humanos. Quem iria imaginar que partir do conhecimento da microfísica era possível criar a maior arma de destruição conhecida até então: a bomba atômica? A fragilidade humana e a magnitude da Ciência entraram em conflito quando o homem percebeu que ele era quem dominava a natureza, por meio do conhecimento da Astronomia e da microfísica.

Esclarece-se, então, que Silvio Seno Chibeni, e seu trabalho relacionado à Filosofia da Ciência, em especial sobre a Complementaridade de Bohr, Stefano Osnaghi, filósofo da Ciência, que pesquisou sobre a Física Atômica, e Ramiro Délio Borges de Meneses, autor de “A Complementaridade em N. Bohr: da Mecânica Quântica à Filosofia”, foram referências bibliográficas importantes para tratar da constituição da teoria da Complementaridade, pois seus trabalhos auxiliam na compreensão do desenvolvimento da Física Quântica e do legado de Bohr como um todo. Aspectos filosóficos e da Complementaridade e os percalços para a sua constituição, os desafios enfrentados por Bohr e as contribuições científicas para a consolidação daquela área são objetos abordados pelos autores mencionados e suas ideias serão utilizadas para dar corpo

à dissertação aqui apresentada. Em relação à biografia de Bohr, a pesquisa que será tomada, nesta dissertação, como fio condutor será a escrita por Maria Cristina Abdalla e Paul Strathern. Ademais, as publicações de Osvaldo Frota Pessoa Jr²³ também serão mobilizadas, pois contribuem para que se entendam aspectos específicos da Física e da constituição da Mecânica Quântica, como as diversas contribuições científicas utilizadas para ampliar e consolidar esse campo.

Diante do exposto, é relevante destacar que o fio condutor desta dissertação será o conceito de Complementaridade e o que ele representa para a microfísica. O primeiro capítulo tratará da contextualização da Física no início do século XX e haverá uma associação entre a constituição da Mecânica Quântica e as contribuições de Niels Bohr, para o desenvolvimento desse novo campo. Além disso, serão apresentadas algumas ideias e trabalhos científicos, que estiveram envolvidos com a constituição teórica e experimental da Física Quântica. Os conceitos e suas mutações ao longo do tempo estão presentes nas ideias de Bohr sobre a Complementaridade e será amplamente abordado nesta pesquisa.

No segundo capítulo, a historiografia da Ciência será tratada, para entender o contexto em que Bohr desenvolveu o conceito de Complementaridade e como se pode compreender a Filosofia da Ciência, à luz das assimetrias que a Mecânica Quântica apresenta em relação à Física Clássica.

As interpretações de Hannah Arendt sobre a Ciência moderna aparecem no segundo capítulo, ensejando a visão de um mundo em que os conhecimentos resultantes da Mecânica Quântica são levados à luz, mudando a forma estar no planeta, afinal, as mais diversas consequências vêm das descobertas feitas entre as últimas décadas do oitocentos e as quatro primeiras do novecentos. Nesse sentido, a microfísica é tomada com um grau de relevância social e científica semelhante à ampliação da astrofísica. Essas mudanças são similares àquelas ocorridas após a invenção do telescópio, para as gerações que vivenciaram a Ciência Moderna. O desenvolvimento da microfísica e os resultados dos trabalhos relacionados à Mecânica Quântica colaboraram para uma mudança na interação do homem com a natureza, com a Ciência, com a tecnologia e com a sociedade, ou seja, com o mundo, ampliando seu raio de visão que expandira para uma categoria

²³Osvaldo Frota Pessoa Jr é professor da Universidade de São Paulo e possui trabalhos relacionado à História da Física Quântica. Atualmente o físico é referência desse campo de investigação no Brasil, uma vez que realiza pesquisas relacionadas à Filosofia e História da Física, além de conceder cursos e minicursos, ademais publica livros e artigos amplamente referenciados por estudantes e pesquisadores da História e Filosofia da Física Quântica.

macro, a partir do século XVI, e se tornou mais ampla e mais abrangente a partir da inserção de uma categoria micro, marcada profundamente por aspectos da Mecânica Quântica, mesmo que indiretamente.

CAPÍTULO I

I.I – Nascimento da Física Quântica

A Europa ocidental foi, por quase todo o século XIX, a principal irradiadora do pensamento e do conhecimento científico, uma vez que a colonização e a escravidão impediram que muitos países conseguissem desenvolver as pesquisas científicas ou bloquearam as possibilidades de divulgação dessas. Entretanto, esse seria o último século em que a difusão do saber científico seria praticamente hegemônico, originado daquele continente e difundido por ele, de acordo com Eric Hobsbawm (2003), tendo em vista que isso ocorria devido a uma questão política de dominação. A partir do século XX, países de outras localidades do globo terrestre também disputaram a supremacia política e científica, como os Estados Unidos da América e a União Soviética, chamada assim desde 1922 até a última década do século XX, dentre outros. A Ciência eurocêntrica, então, perdia a força, principalmente após o primeiro quartel do novecentos. Eric Hobsbawm (2003) afirma que a comunidade de cientistas ligados às Ciências exatas e naturais aumentou significativamente no mundo todo durante o século passado, embora ainda representassem uma pequena parcela da população do mundo.

Após a Primeira Guerra Mundial, a disputa política e a busca pelo poder e influência se intensificaram. O fato de o número de cientistas ter aumentado e essa classe produzir Ciência a partir de bases comuns fez com que as pesquisas se aglomerassem em grandes centros; as práticas científicas também ficaram mais comuns devido aos recursos financeiros das nações onde eram realizadas as investigações acadêmicas. A Mecânica newtoniana, então, foi posta em xeque pelas descobertas de Planck e Einstein. Bohr, a partir das suas proposições e postulados, tentou articular a Física de Newton ao novo campo que emergia rapidamente e com bastante força: a Mecânica Quântica.

Eric Hobsbawm (2003) inicia sua obra “A era dos extremos: O Breve século XX 1914-1991”, publicada pela primeira vez em 1995, apresentando fragmentos textuais que expressam as ideias de algumas personalidades sobre o que era o século XX. Muitos deles faziam menção à catástrofes, sofrimento, guerra e pavor. Alguns ressaltaram aspectos positivos desse período, como a emergência dos direitos das mulheres e o seu protagonismo fora dos lares, como na Segunda Guerra Mundial. Em apenas uma das citações é possível verificar a exaltação ao desenvolvimento tecnológico e científico ocorrido ao longo do século XX. Isso é interessante porque foi exatamente durante o novecentos que a Mecânica Quântica surgiu e se desenvolveu, principalmente durante a

primeira metade, em grande parte nos países do ocidente da Europa - como Dinamarca, Alemanha, França e Suécia - e nos Estados Unidos²⁴.

Joanne Baker²⁵ (2015) sustenta que a história da Mecânica Quântica contém muitas reviravoltas. Muitos foram os cientistas que contribuíram direta e indiretamente para a constituição daquele campo, por exemplo: Max Planck e a suas proposições sobre os fótons e os corpos negros, Albert Einstein e o aprimoramento do trabalho de Planck e a elaboração da Teoria da Relatividade, Werner Heisenberg e o seu Princípio da Incerteza, Bohr e seu trabalho exaustivo sobre o interior do átomo e a Complementaridade.

O objetivo deste capítulo é, então, apresentar as diversas contribuições para o desenvolvimento científico da Mecânica Quântica, uma vez que a Ciência é constituída por meio da cooperação de diversos cientistas e pesquisas científicas. Faz-se necessária uma explanação sobre os trabalhos que foram base para que esse campo se tornasse autônomo e fortalecido, portanto, o objeto desse item são alguns dos resultados investigativos que colaboraram para consolidação da Mecânica Quântica, passando pelo esforço de Bohr em defender a teoria da Complementaridade, que ocupará posição de maior destaque no tópico II deste capítulo. As contribuições para o desenvolvimento da Mecânica Quântica não foram, em muitos casos, aportes teóricos e experimentais relacionados diretamente para esse campo; exemplo disso é a confirmação da existência das ondas eletromagnéticas por Heinrich Hertz, em 1888, o que influenciou indiretamente para as pesquisas de Einstein.

Pessoa Jr. (2010) afirma que o desenvolvimento da Física Quântica poderia ter seguido vários caminhos, mas foi a partir do estudo da radiação do corpo negro²⁶ e dos

²⁴A Dinamarca foi o grande centro do desenvolvimento da Física Quântica, a partir da criação do Instituto de Física Teórica, em 1921, por Bohr, por meio do auxílio financeiro de um ex-colega de classe de Bohr, o Reino da Dinamarca, da Universidade de Copenhague e da Fundação Carlsberg, que contribuíram com o fornecimento de bolsas anuais para alunos. Os físicos que desenvolviam trabalhos relacionados à Física atômica também contribuíram para a consolidação da Física Quântica, como Heisenberg, durante a Segunda Guerra Mundial e sua equipe. O CERN foi construído na Suécia, e, até a presente data é um dos grandes centros de pesquisa relacionada à Física Quântica. Na França, também houve alguns trabalhos de relevância para aquele campo, por exemplo o de Bogle (que será mencionado com mais detalhes neste tópico). Os EUA sediaram o Projeto Manhattan e a implementação das bombas atômicas, realizadas a partir do estudo da fissão nuclear no Urânio e no Plutônio.

²⁵Joanne Baker é graduada em Física pela universidade de Cambridge e doutora pela Universidade de Sidney, atuando como editora em uma das revistas mais conceituadas do mundo científico, a Science. Dada essa breve biografia, é oportuno mencionar que a física é autora de um dos livros mais lidos na atualidade pelo público leigo sobre física quântica: “*50 quantum physics ideas you really need to know*”, publicado originalmente em Inglês, em 2013 e traduzido para o português em 2015, da qual a citação em questão se trata.

²⁶Corpos negros, como será explicitado, é um corpo capaz de absorver toda a energia que for incidida sobre ele, uma vez que não reflete ou emite parte alguma da radiação incidente sobre ele. Um exemplo de corpo negro pode ser um objeto oco que contém um orifício, em que este conecta o interior do objeto ao exterior.

trabalhos de Planck, realizados no início do século XX, que aquele campo se desenvolveu. A hipótese inicial de Planck era baseada na ideia de que a energia da radiação era emitida em porções discretas, em que cada uma dessas seria chamada de *quantum*, o que contrariava as leis da Física vigentes até aquele momento. Para o físico alemão, frequência da radiação é proporcional à energia de radiação de cada quantum correspondente, de acordo com Hewitt (2015). Com isso, físicos como Einstein e Bohr conseguiram dar continuidade a estudos relacionados aos átomos. É relevante nesse momento apresentar os aspectos mais específicos desse fato, que resultaram no processo de consolidação do campo de estudos da Física que se atém aos estudos dos mistérios do microcosmos.

Em 1900, Max Planck apresentou, numa reunião da Sociedade Alemã de Física de cientistas, o seu trabalho intitulado “Sobre a Teoria da lei de Distribuição de energia do espectro normal”. Segundo Eisberg e Resnick²⁷ (1979), esse artigo significou o início da revolução no campo da Física e a data de apresentação dele é reconhecida como o nascimento da Física Quântica, entretanto, a Mecânica Quântica moderna, base da atual concepção de natureza quântica, começou a desenvolver-se, de fato, somente depois das duas primeiras décadas do século XX, por Erwin Schrödinger²⁸ e outros.

Foi naquela publicação que Planck apresentou a utilização da constante, que posteriormente viria a receber seu nome (constante de Planck, caracterizada pela letra “*h*” do alfabeto), no momento em que explicava as propriedades observadas da radiação térmica²⁹: Caso um corpo esteja inicialmente mais quente que o meio, ele irá se resfriar, devido ao fato de que a taxa de emissão de energia excede a de absorção dessa, por outro lado, quando há um equilíbrio térmico, ambas as taxas, de emissão e de absorção de

²⁷ Autores do livro mais utilizado nos cursos de Física Quântica da atualidade, com críticas em sua extrema maioria positivas: Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas, cuja primeira publicação em português foi em 1979 pela editora Elsevier. É indispensável a presença desses autores para dar substância aos fatos apresentados, exatamente pela grande importância dessa obra para o ensino da Física Quântica e seu estudo. Essa obra será um guia para o desenvolvimento desse tópico, diante da sua relevância na introdução ao estudo da Física Quântica.

²⁸ Erwin Schrödinger foi um físico austríaco que contribuiu muito para a Física Quântica. O físico foi responsável por desenvolver o experimento mental chamado de “Gato de Schrödinger”, desenvolvido em 1935, que tinha como premissa responder à questão que permeava diante da inserção do Princípio da Incerteza de Heisenberg, na teoria quântica: em qual momento o sistema quântico deixa de ter vários estados simultaneamente e começa a ter apenas um deles? O experimento do físico austríaco foi utilizado por Einstein, Podolsky e Rosen na tentativa de refutar a teoria quântica implementada pelo grupo de cientistas de Copenhague. Além disso, Schrödinger contribuiu diretamente para o desenvolvimento da Física Quântica quando, em 1921, publicou um trabalho que sugeria uma formulação matemática para sistemas que envolvem o átomo de hidrogênio.

²⁹ Radiação térmica é a radiação emitida por todo corpo, para o meio que o cerca e que dele absorve, devido a sua temperatura.

energia, são iguais. Além disso, com o aumento da temperatura, o corpo emite mais radiação térmica e há um aumento, também, da frequência onde a radiação é mais intensa. Apesar de a radiação térmica de cada corpo depender da composição de cada um, há um tipo de corpo que emite espectros térmicos de caráter universal: os corpos negros, que absorvem toda radiação térmica que são incididas sobre eles, de acordo com Eisberg e Resnick (1979). Esses autores reiteram que o nome dado àqueles corpos é apropriado, uma vez que não refletem luz e são, de fato, negros.

Todos os corpos negros emitem radiação térmica com o mesmo espectro, independentemente dos detalhes da sua composição. O postulado de Planck, apresentado inicialmente na reunião, como mencionado, tratava, mais enfaticamente, “do comportamento dos elétrons nas paredes dos corpos negros e seu acoplamento ou interação com a radiação eletromagnética dentro da cavidade desses corpos” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 42). Mais tarde, Planck incorporou ao seu trabalho a ideia de que as ondas eletromagnéticas eram quantizadas. Os autores de “Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partícula” destacam que Planck não estava seguro da inserção da constante “ h ” à proposição apresentada em 1900, uma vez que Planck percebeu que resolveria o problema do diagrama do corpo negro a partir da ideia de que energia radiante fosse diretamente proporcional à frequência da radiação e não à amplitude, como previa a teoria eletromagnética clássica. Mas esse resultado só era possível com a introdução da constante na famosa fórmula $E = h \times \nu$. Essa foi, então, a medida encontrada para chegar à solução do problema relacionado ao equilíbrio entre a matéria e a radiação. O cientista escreve para R. W. Wood sobre sua atitude, inicialmente forçada, com relação ao seu postulado:

(...) “Eu sabia que o problema (do equilíbrio entre matéria e radiação) é de fundamental significado para a Física, eu sabia a fórmula que reproduz a distribuição de energia no espectro normal; uma interpretação teórica tinha que ser encontrada a qualquer custo, não interessando quão alto”.
(PLANCK apud EISBERG; RESNICK, 1979, p. 42).

Eisberg e Resnick (1979) salientam que Planck tentou adaptar sua teoria quântica às ideias da Física Clássica por mais de uma década e como resultado das tentativas sempre eram geradas novas ideias e técnicas, que, mais tarde, foram incorporadas à teoria quântica. O que foi definitivo para a aceitação das proposições de Planck foi o fato de que suas hipóteses quânticas levavam formulações mais exatas da terceira lei da termodinâmica e do conceito estatístico de entropia.

Em um momento posterior, Einstein formulou algumas proposições sobre a teoria quântica da radiação, a qual Planck se opunha - embora os enunciados de Einstein tenham cooperado para a abrangência e ampliação do trabalho de Planck posteriormente. Sobre isso, Einstein “viu com o resultado do trabalho de Planck a necessidade de uma reformulação completa na estatística e eletromagnetismo clássicos” e estabeleceu “previsões e interpretações de muitos fenômenos físicos que foram mais tarde notavelmente confirmados pelas experiências” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 42). Exemplo disso é a utilização de Einstein dos resultados das experiências de Heinrich Hertz, que confirmaram a existência relacionada a ondas eletromagnéticas, no final da década de 1880, e a confirmação da teoria de Maxwell, sobre a propagação de luz que era base de alguns aspectos da teoria clássica do eletromagnetismo. Pessoa Jr. (2010) expõe que Einstein, no trabalho mencionado, afirmou que poderia haver uma transição espontânea dos elétrons, o que aconteceria sem excitação de uma causa externa. Segundo Pessoa Jr. (2010), essa descoberta foi utilizada posteriormente por Niels Bohr e colaborou para que o dinamarquês interpretasse as transições dos elétrons como algo “causal”.

Houve vários trabalhos sobre o efeito fotoelétrico, importantes para o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Esses foram constituídos a partir da contribuição de vários cientistas, em momentos distintos: após a descoberta de Hertz de que “a descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se faz incidir sobre um deles a luz ultravioleta”, Lenard³⁰ se inspirou nos experimentos de Hallwachs³¹, que mostrou que “a luz ultravioleta facilita a descarga ao fazer com que os elétrons sejam emitidos da superfície do catodo” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 51), essa emissão de elétrons que ocorre devido à incidência de luz sobre a superfície é chamada de efeito fotoelétrico. Robert Andrews Millikan³² também contribuiu para esse estudo, afirmando que há um limiar de frequência fotoelétrica, abaixo do qual o efeito fotoelétrico deixa de ocorrer. Além disso, o físico se dedicou aos experimentos relacionados à carga elétrica dos átomos, o que fez com que esse conseguisse descobrir o valor dessa carga. Esse

³⁰Philipp Eduard Anton von Lenard nascido no Reino da Hungria, em 1862, foi um físico vencedor do Prêmio Nobel, em 1905, devido às suas pesquisas relacionadas a raios catódicos.

³¹Wilhelm Hallwachs foi um físico alemão, assistente de Heinrich Hertz, que no final da década de 1880 descobriu a relação entre a luz ultravioleta e os elétrons, que mais tarde seria trabalhado por Einstein, que anteciparia as ideias teóricas do efeito fotoelétrico, o que resultou num Prêmio Nobel para Einstein. O efeito fotoelétrico, então, foi utilizado por Bohr na formulação da sua teoria da Física Quântica.

³²Millikan foi o físico experimental que deu validade ao efeito fotoelétrico por meio de experimentos realizados a partir de 1905.

trabalho contribuiu para que o físico experimental recebesse o Prêmio Nobel de 1923, conforme apontamentos de Eisberg e Resnick (1979).

A contribuição de Einstein para os estudos relacionados ao efeito fotoelétrico e à teoria quântica se deu a partir de 1905, quando esse cientista questionou a teoria clássica da luz e propôs uma nova. Einstein, em contraste com Planck³³, propôs que a “energia radiante está quantizada em pacotes concentrados” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 54), os chamados fótons. Einstein demonstrou que esses não fazem o movimento de saírem de onde são emitidos para o local onde são absorvidos, como as partículas clássicas fazem, pois aqueles se propagam como ondas clássicas. Einstein se concentrou em estudar a maneira corpuscular em que a luz é emitida e absorvida:

Einstein argumentou que as experiências ópticas bem conhecidas de interferência e difração da radiação eletromagnética haviam sido feitas apenas em situação que envolviam um número muito grande de fótons. Estas experiências fornecem resultados que são médias do comportamento dos fótons individuais. A presença dos fótons nessa experiência não é mais aparente do que a presença de gotas d’água isoladas em um jato de água de uma mangueira de jardim, se o número de gotas de água é muito grande. Evidentemente as experiências de interferências e difração mostram definitivamente que os fótons não vão de onde são emitidos até onde são absorvidos da mesma maneira simples que a partícula clássica, como gotas d’água o fazem. Eles se propagam como ondas clássicas, no sentido que cálculos baseados nesse tipo de propagação clássico (e, em particular, na maneira que duas ondas se superpõem, reforçando-se ou anulando-se dependendo da sua fase relativa) explicam corretamente em média como os fótons viajam. (EISBERG; RESNICK, 1979, pp. 54-55)

Em 1921, Einstein ganhou um Prêmio Nobel por antecipar teoricamente a lei do efeito fotoelétrico, que Millikan complementou posteriormente. Durante o percurso de desenvolvimento da Mecânica Quântica, houve vários caminhos que se direcionaram para construções diferentes desse campo, mas todos apontavam para uma dissonância com relação à Mecânica Clássica. Diante disso, os físicos e outros profissionais da Ciência, de uma forma geral, contribuíram para que a Mecânica Quântica se desenvolvesse como um campo autônomo e robusto.

Além dos trabalhos mencionados, houve, ainda, outros aportes teóricos importantes antes de Bohr, Heisenberg e os estudantes e assistentes do Instituto de Física teórica de Copenhague se dedicarem mais incisivamente ao desenvolvimento da Mecânica Quântica. Louis de Broglie foi um cientista cujos trabalhos contribuíram para que aquele campo se desenvolvesse. Louis de Broglie ganhou um Prêmio Nobel, em

³³Nesse momento é importante destacar que Max Planck, como mencionado anteriormente, “restringiu o seu conceito de quantização de energia aos elétrons nas paredes de um corpo negro” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 54)

1929, por sua dedicação ao trabalho relacionado à existência de ondas de matéria. Sobre as pesquisas de Broglie, Eisberg e Resnick (1979) salientam que, por se tratar de um físico teórico, inicialmente seus resultados não tiveram tanto reconhecimento, devido à ausência de experimentos. Entretanto, Einstein reconheceu a relevância das proposições apresentadas por aquele cientista e difundiu para que outros pesquisadores as reconhecessem, e assim foi feito; o resultado foi o prêmio já mencionado.

A proposta de Broglie se baseava na ideia de que o comportamento dual (onda-partícula) poderia ser também aplicado à matéria. Para o físico francês, assim como um fóton tem associado a si uma onda luminosa, que está diretamente ligado ao seu movimento, a partícula material também tem a ela associada uma onda material que está diretamente relacionada ao seu movimento. Sendo o universo composto por matéria e radiação, em sua totalidade, a afirmação de Broglie sugere uma simetria da natureza, de acordo com Eisberg e Resnick, (1979). Esses autores destacaram que o teórico conseguiu relacionar conceitos relativos à partícula, energia, momento e articulá-los com a constante de Planck “ h ”, isso foi chamado de “relação de Broglie”.

Sobre a dualidade onda-partícula é interessante apontar alguns aspectos: Eisberg e Resnick (1979) destacam que na Física Clássica as ondas ou as partículas são quem transportam a energia, por exemplo, as ondas de águas que transportam a energia em sua superfície. Por meio de observações, os físicos clássicos estabeleceram um modelo ondulatório para alguns fenômenos macroscópicos e um modelo corpuscular para outros e naturalmente estenderam esses modelos para regiões menos acessíveis, sendo assim, era esperado que todos os “entes” fossem partículas ou ondas. Na Mecânica Quântica, a dualidade onda-partícula se aplica tanto à matéria quanto à radiação e é possível utilizar os modelos ondulatório e corpuscular para os mesmos entes. Entretanto, é utilizado somente um dos dois modelos em determinada medida. Ambos os modelos não são utilizados diante das mesmas circunstâncias, o que significa que:

(...) quando o ente é detectado por algum tipo de interação, ele atua como uma partícula no sentido que é localizado; quando está se movendo age como uma onda, no sentido que se observam fenômenos de interferência, e obviamente, uma onda tem extensão e não é localizada.

(EISBERG; RESNICK, 1979, p. 95)

Os autores de “Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas” completam que essa característica foi incorporada por Niels Bohr na sua teoria da Complementaridade. Para esse físico, os modelos corpuscular e ondulatório são complementares. O dinamarquês defendia que a partir de uma medida é possível provar

o caráter ondulatório da matéria ou da radiação e conseqüentemente comprovar o caráter corpuscular dessa mesma medida, e o contrário também se sustenta - nesse caso, a natureza da medida é o que determina qual modelo utilizar. Por fim, destaca-se que matéria e radiação não são onda ou partícula, mas podem ser ambas. Diante disso, é necessário um modelo mais geral, para que seja possível descrever o comportamento daquelas, embora em certas situações ainda seja admissível aplicar os modelos ondulatório simples e o corpuscular. A ligação entre esses modelos foi feita a partir de uma “interpretação probabilística da dualidade onda-partícula” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 95). Esses autores reiteram que Einstein foi o responsável por unificar as teorias ondulatórias e corpuscular no caso da radiação e Max Born contribuiu para a unificação dessas teorias no caso da matéria.

O conceito de probabilidade é de substancial importância para a união das descrições corpuscular e ondulatória da matéria e da radiação. Segundo Eisberg e Resnick (1979), foram Heisenberg e Bohr que demonstraram isso, por meio do Princípio da Incerteza, onde evidenciou-se que as interpretações probabilísticas são extremamente importantes para os fundamentos da Mecânica Quântica, abandonando-se o determinismo enraizado na Mecânica Clássica – embora, nessa última, a probabilidade já seja utilizada em menor escala.

Na Mecânica Clássica, assume-se que “para sistemas macroscópicos a posição e o momento³⁴ de um objeto (...) poderiam de maneira análoga ser determinados de forma precisa pela observação” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 97). Bohr e Heisenberg questionaram essa hipótese; para esses cientistas só é possível determinar a posição e o momento de um objeto no mesmo instante da radiação e da matéria até o ponto em que é permitido pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg. Este princípio constitui-se da ideia de que numa experiência não é possível determinar o valor exato do momento e da posição do valor de uma partícula ao mesmo tempo. Além disso, o Princípio da Incerteza também estabelece uma relação entre a energia e o tempo necessário para a medida: não é possível realizar previsões determinísticas, só há a possibilidade de supor possíveis resultados de certa observação, “dando as probabilidades relativas de sua ocorrência” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 100).

O ato de observar um sistema o perturba de uma forma que não é completamente previsível, a observação altera o movimento do sistema

³⁴ Momento é também chamado de quantidade de movimento, uma propriedade dos corpos materiais que se movem. Na Mecânica Clássica é dado pelo produto da massa e da velocidade do corpo, definido pelo produto da massa pela velocidade de um objeto.

fazendo com que ele não possa ser perfeitamente conhecido. (...) Portanto, o Princípio da Incerteza diz respeito ao processo de medida em si, e expressa o fato de que sempre existe uma interação não determinável entre o observador e o que é observado; não podemos fazer nada para evitar a interação ou para corrigir os seus efeitos. (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 100).

É a partir do Princípio da Incerteza que há a possibilidade de compreender como a matéria e a radiação podem se comportar em certos momentos como ondas e em outros como partículas. Portanto, em um experimento não é possível observar ambas ao mesmo tempo. Essa é a “essência da Complementaridade de Bohr: as ideias de onda e partícula se complementam em vez de se contradizerem” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 112).

O físico inglês Joseph John Thomson propôs um modelo atômico em 1903, após realizar pesquisas sobre os raios catódicos, trabalho pelo qual foi condecorado com um Prêmio Nobel em 1906. A nova estrutura atômica proposta pelo cientista era baseada na ideia de que o átomo era uma esfera carregada positivamente em que havia elétrons, carga negativa, dispostos no seu interior, como um “pudim de passas”. Niels Bohr e seu orientador, Rutherford, discordavam desse modelo atômico, pois apresentava certa inconsistência, uma vez que era baseado nos estudos do físico inglês sobre raios catódicos. Hewitt (2015) salienta que a equipe do orientador do dinamarquês havia realizado um experimento, conhecido como “experimento da folha de ouro” ou “experimento de Rutherford”, em que partículas carregadas positivamente - partículas alfa - eram emitidas por meio de uma fonte radioativa e direcionadas para uma folha de ouro extremamente fina. Era esperado que os feixes, com massas muito maiores que dos elétrons, não fossem impedidos de passar pelo “pudim de passas”, entretanto, alguns feixes eram desviados, o que permitiu que a equipe de cientistas percebesse que havia algo no interior do átomo, com uma carga também positiva, que repelia o feixe de partículas alfa. Diante disso, Rutherford constatou que em todo átomo havia o que ele denominou “núcleo atômico”. Inicialmente, Bohr, ao chegar à Inglaterra, procurou Thomson para falar sobre sua discordância quanto ao modelo do físico inglês, entretanto esse o recebeu com críticas e represálias, fazendo com que o dinamarquês procurasse Rutherford para o orientar em seus estudos, o resultado disso foi a implementação e proposição de um novo modelo atômico.

Em 1913, de acordo com Eisberg e Resnick (1979), Bohr apresentou um modelo atômico cujas premissas estavam em comum acordo com certos dados espectroscópicos, como o espectro de hidrogênio. Aqueles autores ressaltaram que os postulados que baseiam o modelo atômico de Bohr são “confusos”, sendo eles:

1) Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência de atração coulombiana entre o elétron e núcleo, obedecendo as leis da mecânica clássica; 2) Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de h (...); 3) Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto, sua energia total permanece constante; 4) É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sob a órbita de energia total E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma de forma a se mover em uma órbita de energia E_f (...).

(EISBERG; RESNICK, 1979, p. 138).

Sobre os postulados de Bohr, Eisberg e Resnick (1979) afirmam que o primeiro deles indica que o modelo atômico do dinamarquês é baseado na existência de um núcleo atômico, o segundo introduz a ideia de quantização, o terceiro postulado está relacionado ao fato de que, experimentalmente, os átomos são estáveis e o quarto é um postulado de Einstein, portanto, “a frequência de um fóton de radiação eletromagnética é igual à energia carregada pelo fóton dividida pela constante de Planck” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 139). Esses autores reiteram que os postulados mesclam as premissas da Física Clássica - no momento em que supõem que os movimentos em uma órbita circular obedecem às leis daquela - e da Física não clássica, quando se refere à quantização do momento angular, ou seja, referente à quantidade de movimento que existe quando a partícula tem velocidade angular, isto é, quando gira em torno de um ponto.

Einstein, Schrödinger e Broglie acreditavam que a Mecânica Quântica não conseguia corresponder a “uma descrição completa da realidade” (Chibeni, 1992, p. 142), enquanto Bohr, Heisenberg, Dirac, Born, Pauli e Jordan defendiam veementemente o contrário. Esse debate se estendeu por anos, em que se destacaram os argumentos de Einstein, Podolsky e Rosen³⁵ e de Schrödinger. Muitos livros e textos sobre a Mecânica Quântica abriram portas para uma discussão epistemológica da Ciência, dando margens para discussões filosóficas da Ciência Física. Houve alguns encontros em que a Mecânica Quântica era debatida e que “deram origem a vivas e emocionantes discussões científicas, que se repercutiram muito além das sessões de trabalho (...), mas que terminavam sempre

³⁵Einstein, Podolsky e Rosen publicaram um trabalho, em 1935, que continha as críticas aos direcionamentos da Mecânica Quântica, em que apresentam considerações sobre a possível incompletude e consequente falibilidade das proposições referentes àquele campo. Na ocasião, as pesquisas eram, em grande parte, realizadas por Bohr, Heisenberg e estudantes do Instituto de Física Teórica de Copenhague. A publicação foi intitulada “Pode a descrição quântica da realidade física ser considerada completa?”, que ficou conhecida, em seguida, como “Paradoxo EPR”. A Sigla EPR foi utilizada para referenciar o artigo publicado por Einstein, Podolsky e Rosen, em que cada uma das letras em maiúsculo era referência aos sobrenomes dos cientistas mencionados.

pela retirada de Einstein, vencido pelos espetaculares êxitos da Mecânica Quântica” (MARTINS, 2001, p. 22).

Gradualmente, os físicos da época começaram a aceitar o pensamento quântico, afastando-se das concepções clássicas, em alguma medida. Einstein, pelo contrário, se esforçou para provar a inaplicabilidade da teoria quântica, principalmente àquela diretamente relacionada ao Princípio da Incerteza de Heisenberg e da teoria da Complementaridade de Bohr, o que ocupou seus estudos até o final de sua vida, de acordo com Chibeni (1992).

Faye (2014) ressaltou que na Mecânica Quântica proposta por Bohr sempre que a posição do elétron é medida, este e o aparelho utilizado na medição interagem de forma incontrolável, o quer dizer que ou se mede a posição ou a velocidade (ou o momento); isso significa que se for possível medir onde o elétron se encontra, não será possível ter um valor preciso sobre sua velocidade. Resumindo, caso seja possível a determinação do valor da energia do elétron, não há como medir o instante em que a sua energia passou por aquele valor. Diante disso, na década de 1930, Einstein, Podolsky e Rosen publicaram um artigo que continha a descrição de um experimento mental, “Gato de Schrödinger”, na tentativa de demonstrar a incompletude da Mecânica Quântica. Foi nesse contexto que Einstein forjou as frases famosas “Sutil é o senhor, mas não malicioso”, e “Deus não joga dados com o Universo”, que mostram a sua discordância com o caráter probabilístico da Mecânica Quântica.

Bohr (1958) ressalta que os debates com Einstein sempre foram um grande estímulo e de muito valor. O dinamarquês, em seu ensaio de 1949, em que foi convidado para homenagear as contribuições de Albert Einstein para o mundo científico e filosófico, afirma que

A questão em debate era saber se a renúncia a um modo causal de descrever os processos atômicos, implicada nos esforços de lidar com essa situação, deveria ser encarada como um afastamento temporário de ideais a serem revividos em última instância, ou se estaríamos diante de um passo irrevogável para chegar à harmonia adequada entre a análise e a síntese dos fenômenos físicos.

(BOHR, 1958, p. 42)

Segundo Faye (2014), isso fez com que Bohr começasse a pensar em outros aspectos desse campo. Faye (2014) aponta ainda que, após a publicação do artigo, que continha a descrição do experimento mental dos críticos da Mecânica Quântica, Bohr percebeu que “falar de perturbação parecia identificar (...) que os objetos atômicos eram

partículas clássicas com propriedades dinâmicas e cinemáticas inerentes”³⁶ (FAYE, 2014, p. 27). Após a publicação do artigo mencionado, o físico dinamarquês, então, afirmou que “toda a situação na física atômica priva de todo significado os atributos inerentes que a idealização da física clássica atribui a tais objetos”³⁷ (FAYE, 2014, p. 27). Além disso, o cientista dinamarquês também endossou a relação de indeterminação de Heisenberg, uma vez que indicou, de acordo com Faye (2014), “(...) as consequências ontológicas de sua afirmação de que variáveis cinemáticas e dinâmicas são mal definidas, a menos que se refiram a um resultado experimental”³⁸ (FAYE, 2014, p. 27).

Bohr começou a considerar as descrições como fenômenos ou informações não mais como complementares. Diante disso, o físico “introduziu a definição de um ‘fenômeno’ como exigindo uma descrição completa de todo o arranjo experimental, e ele considerou um fenômeno como uma medida dos valores das propriedades dinâmicas ou cinemáticas.”³⁹ (FAYE, 2014, p. 27). Esse autor destacou também a negação do dinamarquês, ao contrário do que afirmaram Einstein, Podolsky e Rosen, a respeito de que os conceitos clássicos poderiam ser utilizados para atribuir propriedades a um mundo físico em si mesmo, ou seja, atribuir propriedades que não condizem com o fenômeno / objeto que estão sendo observados. A Física Clássica, ao contrário, “repousa sobre uma idealização, (...) pois assume que o mundo físico tem essas propriedades em si, isto é, como propriedades inerentes, independentemente de sua observação real”⁴⁰ (FAYE, 2014, p. 30).

O autor de “Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics” aponta que a discussão relacionada à publicação do artigo EPR resultou num aprimoramento das considerações de Bohr e da equipe que se dedicava à elaboração da teoria da Mecânica Quântica, em Copenhague, com relação a esse campo. Bohr (1958) declarou que todas as discussões entre Einstein e ele eram muito fecundas e que essa, em especial, sobre

³⁶Texto original: “speaking of disturbance seemed to indicate (...) that atomic objects were classical particles with definite inherent kinematic and dynamic properties.”

³⁷Texto original: “The whole situation in atomic physics deprived of all meaning such inherent attributes as the idealization of classical physics would ascribe to such objects.”

³⁸Texto original: “(...) the ontological consequences of his claim that kinematic and dynamic variables are ill-defined unless they refer to an experimental outcome.”

³⁹Texto original: “He introduced the definition of a “phenomenon” as requiring a complete description of the entire experimental arrangement, and he took a phenomenon to be a measurement of the values of either kinematic or dynamic properties. “

⁴⁰ Texto original: “ (...) classical physics rests on an idealization, he said, in the sense that it assumes that the physical world has these properties in-itself, i.e. as inherent properties, independent of their actual observation”

aspectos frágeis da Mecânica Quântica e do desenvolvimento desse campo, Einstein “desempenhou tão grande papel”, tanto com a sua colaboração direta, por meio de debates, quanto em contribuições indiretas, como o trabalho relacionado à radiação.

I.II – A Complementaridade de Bohr e a Epistemologia

Os resultados das pesquisas da Mecânica Quântica articulam-se com as atividades sociais e nas diversas culturas de várias formas, conforme propõe Frederico Firmo de Souza Cruz⁴¹ (2011). Para ele, uma simples pesquisa no *Google* exhibe milhares de buscas direcionadas a assuntos relacionados à medicina quântica, terapia quântica, psicologia quântica, dentre outros assuntos pertinentes à quantização da matéria. Cruz (2011, p. 303) afirma que essa diversidade demonstra que, além de ser uma “teoria revolucionária”, a Mecânica Quântica também é um “fenômeno sociocultural”:

O conhecimento científico, assim como a arte, a mitologia e outras criações culturais do espírito humano, é de domínio público. As práticas sociais, frequentemente, levam grupos a desenvolverem certa autonomia, criando fronteiras que são definidas por diferenças de conhecimento, de cultura, de linguagem, organização social... As fronteiras criadas geram uma falsa impressão de propriedade, mas são, em geral, porosas e móveis, e o conhecimento de uns é inevitavelmente apropriado por outros, podendo eventualmente adquirir novos significados e representações. A presença de um conhecimento tão sofisticado como a mecânica quântica, em ambientes sociais tão diversos, é um exemplo desta porosidade. (CRUZ, 2011, p. 304)

Para Cruz (2011), o século XIX foi marcado por diversas mudanças no âmbito social, político e científico no mundo, de uma forma geral. A Ciência, naquele período, viveu uma “crise de representação”, devido às descobertas científicas que “abalaram a crença no poder da percepção e na noção de realidade” (CRUZ, 2011, p. 305), como a descoberta do raio- x, que gerou grande impacto.

A noção newtoniana da Física tende a explicar qualquer objeto físico, a partir da dinâmica da evolução espaço-tempo: partículas, ondas, campos de radiação ou propriedades, como temperatura e cargas, só adquirem significado na Física Clássica, quando estão descritas no espaço- tempo; até mesmo a noção de realidade de um objeto está relacionada com a sua localização espaço-temporal, conforme Cruz (2011). Segundo esse autor, o quantum de Planck foi o que possibilitou a formulação da Mecânica Quântica, juntamente com a descoberta do raio-x. A Mecânica Quântica se desenvolveu, então, nesse cenário. Leite e Simon (2010) afirmaram que, no que tange à Física Quântica, Bohr e Heisenberg tiveram uma forte influência sobre os físicos a partir da década de

⁴¹Frederico Firmo de Souza Cruz é doutor em Física e professor do departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente trabalha com Ensino de Física e se dedica à História da Ciência. A citação supracitada se refere ao livro “Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais”, publicado pela primeira vez em 2011 e bastante referenciado no que tange à História da Física, especificamente da Física Quântica, e organizado por Olival Freire Jr., Osvaldo Pessoa Jr. e Joan Lisa Bromberg, no qual Frederico Firmo de Souza Cruz escreveu o tópico “Mecânica Quântica e a cultura em dois momentos”, aqui citado.

1920. Holton (1984) destaca que alguns experimentos e estudos realizados no início do século XX apontaram que a Mecânica Quântica não conseguia ser expressada completamente a partir da Mecânica Clássica de Newton, nem mesmo da eletrodinâmica de Maxwell. Isso fez com que Bohr percebesse a necessidade de suas ideias serem expressadas por meio de uma linguagem híbrida, de articulação dos conceitos da Mecânica Clássica (entende-se por Mecânica newtoniana) e da Mecânica Quântica.

Como mostrou Jammer: "Bohr não somente reconheceu a profunda falha no esquema conceptual de sua teoria, mas estava convencido de que o progresso da teoria quântica não poderia ser alcançado, a menos que a antítese entre as concepções teóricas quânticas e as clássicas fosse confrontada com uma análise teórica. Por isso, tentou pesquisar as raízes desta antítese o mais profundamente que pôde. Foi nessa busca por fundamentos que introduziu a concepção revolucionária de estados "estacionários", "indicando assim que eles formam um tipo de lugar de espera entre os quais ocorre a emissão da energia correspondente a várias linhas espectrais", como Bohr colocou no discurso de 20 de dezembro de 1913, falando à Sociedade Física de Copenhague (13)". Ao final de seu discurso, disse Bohr: "Espero ter-me expressado suficientemente para que os senhores apreciem a extensão em que estas considerações entram em choque com o admirável e coerente conjunto de concepções que têm sido corretamente chamados de teoria clássica da eletrodinâmica. Por outro lado, ao enfatizar esse conflito, tentei trazer aos senhores a impressão de que há a possibilidade de descobrir no decorrer dos tempos, uma certa coerência nas novas ideias". (HOLTON, 1984, p. 56)

A estratégia metodológica de Bohr, por enfatizar o conflito conceitual, resultou na elaboração e difusão da ideia de Complementaridade implementada pelo físico dinamarquês quatorze anos mais tarde. Antes disso, o dinamarquês formulou o Princípio da Correspondência, em 1918. Esse foi o caminho traçado pelo físico em direção à "conciliação entre a Mecânica Clássica e a Quântica" (HOLTON, 1984, p. 56). Ainda de acordo com esse autor, a intenção de Bohr era que houvesse de fato uma articulação entre as linguagens aparentemente opostas, em que tanto a Mecânica Quântica quanto a Clássica fariam concessões uma à outra.

O Princípio da Correspondência orientou os trabalhos de Bohr e de Heisenberg, segundo Jan Faye⁴² (2014). Esse autor afirma que essa regra contempla a ideia de que "uma transação entre estados estacionários se, e somente se, houver um componente harmônico correspondente no movimento clássico"⁴³, sendo um requisito metodológico em que "qualquer outra teoria do átomo deveria prever valores em domínios de altos

⁴²Jan Faye atualmente é Professor da Universidade de Copenhague, onde estudou vários aspectos da Física Quântica e História e Filosofia da Ciência, de uma forma geral.

⁴³Texto original: "The full rule states that a transition between stationary states is allowed if, and only if, there is a corresponding harmonic component in the classical motion."

números quânticos que deveriam ser uma aproximação de valores da Física Clássica”⁴⁴(FAYE, 2014, p. 6).

A regra da correspondência era um princípio heurístico destinado a assegurar que em áreas onde a influência da constante de Planck pudesse ser negligenciada, os valores numéricos previstos por tal teoria deveriam ser os mesmos como se fossem preditos pela teoria clássica da radiação.

(FAYE, 2014, p. 7).⁴⁵

No início da década de 1920, o modelo atômico de Bohr e Sommerfeld enfrentou dificuldades ao se sustentar, devido ao crescente número de fenômenos espectroscópicos. Exemplo destes fenômenos foi a introdução de um “novo grau de liberdade de acordo com o qual dois elétrons com os mesmos números quânticos conhecidos não poderiam estar no mesmo estado”⁴⁶ (FAYE, 2014, p. 12). Esse autor reforça, ainda, que a proposição de Pauli significou o questionamento, não somente do modelo atômico de Bohr- Sommerfeld, como também, o Princípio da Correspondência, uma vez que se acreditava na impossibilidade de conciliar os “movimentos periódicos clássicos pressupostos pelo Princípio (...) com a [ambiguidade] classicamente não descritível do momento angular do elétron”⁴⁷ (MISSIMI apud FAYE, 2005, p. 12). Apesar disso, Bohr continuou acreditando que as bases teóricas da Correspondência eram um importante aparato metodológico. Entretanto, segundo Faye (2014), o físico reconheceu que aquele não foi tão eficaz nos casos em que era necessária a introdução de conceitos não-clássicos para descrever o átomo. Mas, ainda assim, Bohr defendia que o Princípio da Correspondência era extremamente relevante por questões semânticas e estruturais para a constituição de uma teoria quântica adequada, partindo da generalização da Física Clássica.

De acordo com Faye (2014), Bohr defendeu que o Princípio da Correspondência se baseava na ideia de que era indispensável a utilização de conceitos clássicos, para a compreensão da realidade física.

A necessidade de fazer um uso extensivo (...) dos conceitos clássicos, dos quais depende em última instância a interpretação de toda a experiência, deu origem à formulação do chamado princípio de correspondência que expressa nossos

⁴⁴ Texto original: “any further theory of the atom should predict values in domains of high quantum numbers that should be a close approximation to the values of classical physics.”

⁴⁵ Texto original: “The correspondence rule was a heuristic principle meant to make sure that in areas where the influence of Planck's constant could be neglected the numerical values predicted by such a theory should be the same as if they were predicted by classical radiation theory.”

⁴⁶ Texto original: “new degree of freedom according to which two electrons with the same known quantum numbers could not be in the same state.”

⁴⁷ Texto original: “how to reconcile the classical periodic motions presupposed by the correspondence principle with the classically non-describable Zweideutigkeit of the electron's angular momentum?”

esforços para utilizar todos os conceitos clássicos, dando-os uma reinterpretação quântica adequada. (BOHR apud FAYE, 2014, p. 15)⁴⁸

Holton (1984) defende que houve trabalhos posteriores à tentativa de difusão do Princípio da Correspondência, que questionaram as proposições presentes no seu enunciado, o que provou que ele não era suficiente para resolver os problemas causados pelos conflitos entre os conceitos clássicos e os quânticos.

Após Heisenberg conseguir uma formulação mais consistente da teoria da Mecânica Quântica, em 1925, ele e Bohr seguiram em busca de uma interpretação mais coerente para o formalismo matemático⁴⁹ daquela teoria. Ambos seguiram direções diferentes, uma vez que Heisenberg desenvolveu o Princípio da Incerteza, enquanto Bohr analisou “arranjos experimentais concretos”⁵⁰ (FAYE, 2014, p. 22), como os de dupla fenda, por exemplo. Faye (2014) reitera que, de maneira geral, Bohr considerou a proposição de Heisenberg como uma expressão dos fenômenos atômicos, baseadas na ideia de Complementaridade, implantada por Bohr.

O autor de “Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics” afirma que há, para o físico dinamarquês, dois conjuntos de descrição complementares: as descrições espaço-temporais de propriedades dinâmicas ou cinemáticas; esses são complementares às alegações de causalidade, que têm relação com as interpretações de Bohr na “Física em termos de conservação de energia e momentum”⁵¹ (FAYE, 2014, p. 24). Existem, ainda, as descrições que atribuem propriedades de onda e de partícula a um único objeto. Bohr nunca indicou a forma como esses dois conjuntos de descrições complementares se relacionam. Além disso, “o fato é que a descrição da luz como partículas ou ondas já era um dilema clássico, (...) já que o momento do fóton como partícula depende da frequência da luz como uma onda.”⁵² (FAYE, 2014, p. 24). Ademais, Bohr percebeu que a

⁴⁸Texto original: “The necessity of making an extensive use ... of the classical concepts, upon which depends ultimately the interpretation of all experience, gave rise to the formulation of the so-called correspondence principle which expresses our endeavours to utilize all the classical concepts by giving them a suitable quantum-theoretical re-interpretation.”

⁴⁹“O objetivo principal do formalismo é provar que as ideias matemáticas são isentas de contradições. Caso os formalistas alcançassem seu objetivo, a Matemática se tornaria livre de paradoxos e contradições e, quando ela pudesse ser reescrita com demonstrações rigorosas em um sistema formal, se estabeleceria como verdade.” (Mondini, 2008, p. 6) <http://www2.rc.unesp.br/eventos/matematica/ebrapem2008/upload/287-1-A-gt2_mondini_ta.pdf>. Acessado em 14/04/2018

⁵⁰ Texto original: “concrete experimental arrangements”

⁵¹ Texto original: “where Bohr interpreted the causal claims in physics in terms of the conservation of energy and momentum.”

⁵² Texto original: “The fact is that the description of light as either particles or waves was already a classical dilemma, which not even Einstein's definition of a photon really solved since the momentum of the photon as a particle depends on the frequency of the light as a wave.”

distribuição de propriedades cinemáticas e dinâmicas de um objeto é complementar, porque a atribuição de ambas as variáveis conjugadas se baseia em experimentos mutuamente exclusivos.

Holton (1984) sugere que em 1927, num congresso em Como, na Itália, Niels Bohr apresentou, pela primeira vez, suas formulações sobre a Complementaridade. Havia uma plateia de vários físicos, entre eles Max Born, Peter Debye, Enrico Fermi, James Lan, Jon von Newmann. No ensaio apresentado por Bohr havia poucas ou simples formulações matemáticas, uma vez que, essa era a intenção do físico dinamarquês, segundo Holton (1984). Esse autor destaca, também, que Bohr mencionou, antes da sua apresentação, que esperava harmonizar as opiniões conflitantes de vários cientistas a partir da descrição de um ponto de vista geral. Nesse caso, Bohr estava se referindo à descrição clássica e à descrição quântica dos fenômenos físicos. A questão que estava em torno do abismo presente entre ambas as descrições era a seguinte:

(...) poderia alguém esperar que, como acontecera frequentemente outrora na física, uma das duas posições antitéticas seria de alguma forma subordinada ou dissolvida na outra (algo como Galileu e Newton mostraram não ser a física celeste diferente da física terrestre). A continuidade essencial subjacente à descrição clássica, onde coordenadas como espaço, tempo, energia e momento podem, em princípio, ser considerados infinitamente divisíveis, permaneceria inflexivelmente antitética em relação à descontinuidade e distinção essenciais dos processos atômicos? (HOLTON, 1984, p. 50)

Para Bohr, um “fenômeno é a descrição daquilo que deve ser observado e do equipamento usado para obter a observação” (HOLTON, 1984, p. 51). Bohr, então, sugeriu, em 1927, que os cientistas deveriam tentar “descobrir a complementaridade das apresentações dos eventos nessas duas linguagens tão diferentes” (HOLTON, 1984, p. 51). Alguns problemas começaram a partir do advento da Mecânica Quântica, que é a “teoria fundamental da estrutura da matéria” (Chibeni 1992, p. 142), cujas características apresentam um desafio para a Física Clássica. Os conceitos utilizados, a partir da Física Clássica, referentes à natureza da matéria e do espaço/tempo, não encontram correspondentes imediatos ou sem restrições no arcabouço teórico da Mecânica Quântica. Para Faye (2014), as preocupações de Bohr sobre a Mecânica Quântica eram:

(...) 1) a necessidade de conceitos clássicos para a descrição dos resultados de medição; 2) não separabilidade devido ao emaranhamento do sistema e do instrumento de medição; 3) a natureza contextual das medidas das propriedades complementares; e 4) o caráter simbólico do formalismo quântico. (FAYE, 2014, p. 30)⁵³

⁵³ Texto original: “In the foreground of Bohr's thinking was the (1) the need of classical concepts for the description of measuring results; (2) non-separability due to the entanglement of the system and the measuring instrument; (3) the contextual nature of the measurements of complementary properties; and (4) the symbolic character of the quantum formalism.”

A compreensão do contraste entre as propriedades dos modelos mecânicos comuns e as leis peculiares, que agem sobre as estruturas atômicas, só foi possível por meio da inserção da relação complementar entre as diversas experiências sobre o comportamento do corpúsculo atômico (Bohr, 1958). O físico dinamarquês enunciou que só é possível conseguir a descrição mecânica dos experimentos, em termos causais, se a ação enviada ao sistema for de valor superior à do quantum e conseqüentemente seja possível a subdivisão do fenômeno. Caso isso não aconteça, é necessário que seja desconsiderada a ação do instrumento de medida sobre o objeto, o que resulta numa mútua exclusão dos vários tipos de informações, que são necessárias para a completude da descrição mecânica de tipo usual. Diante disso, o físico dinamarquês completa que:

Assim como o conceito geral da relatividade expressa a dependência essencial de qualquer fenômeno em relação ao sistema de referência usados para a sua descrição no espaço e no tempo, a noção de complementaridade serve para simbolizar a limitação fundamental, encontrada na física atômica, da existência objetiva de fenômenos independente dos meios de sua observação. (BOHR, 1958, p. 10)

O problema da medição, então, para essa teoria construída no início do século XX, está ligado ao colapso na função de onda⁵⁴, o que acontece quando se realiza uma observação, em oposição a uma evolução contínua num sistema fechado. Nesse colapso, qualquer coisa pode acontecer, segundo Stefano Osnaghi⁵⁵ (2011), enquanto em outras ocasiões os sistemas obedecem às leis contínuas naturais. Essa proposição está intimamente relacionada à Complementaridade de Bohr e, por parecer inconsistente⁵⁶,

⁵⁴ “Schrödinger conseguiu formular uma equação que descreve como as ondas materiais mudam sob a influência de forças externas. A equação de Schrödinger desempenha na Mecânica Quântica papel análogo ao da equação de Newton (aceleração = força/massa) na Física Clássica. As ondas materiais na equação de Schrödinger são entidades matemáticas não observáveis diretamente, de maneira que a equação nos fornece um modelo puramente matemático, mais do que um modelo visual do átomo (...). Na equação de onda de Schrödinger, o que se chama de “onda” é a amplitude de onda, que é imaterial – uma entidade matemática chamada de função de onda, (...) [*representada pela letra grega psi*] A função de onda dada pela equação de Schrödinger representa as possibilidades do que pode acontecer para um determinado sistema. Por exemplo, a localização de um elétron num átomo de hidrogênio pode estar em qualquer lugar, desde o centro do núcleo até uma distância radial afastada.” (HEWITT, 2015, p. 610)

⁵⁵ Stefano Osnaghi é doutor em Física Quântica e atualmente atua como pesquisador pós-doc no Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée de Paris e se dedicou ao estudo da filosofia, epistemologia e fundamentos da Física Quântica ao longo da sua carreira acadêmica. A citação utilizada nesta dissertação se refere à contribuição de Stefano Osnaghi ao livro já mencionado anteriormente “Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais”, publicada em 2011.

⁵⁶ Sobre as proposições de Bohr a respeito da medição parecerem inconsistentes, Osnaghi explicita mais detalhadamente: “O problema da medição está conexo com o chamado colapso da função de onda, que se supõe que ocorra quando se realiza uma observação, em contraste com a evolução contínua de um sistema fechado. Para poder ser considerada uma teoria completa, a Mecânica Quântica deveria dar conta de todos os fatores que desempenham algum papel no processo de medição (o qual pode ser entendido como apenas um tipo particular de interação física). O colapso da função de onda é tipicamente explicado pelo ato intencional de um observador consciente ou pelo caráter macroscópico do aparelho de medida. Então,

recebeu várias críticas, uma vez que se acreditava que a proposta da Física Quântica realizada no Instituto de Física Teórica em Copenhague era incompleta. Alguns cientistas contestaram a teoria de Bohr devido, ainda, à restrição dessa com relação à sua aplicabilidade ao mundo macroscópico, podendo ser utilizada somente no âmbito atômico.

(...) a visão de Bohr implica que “o mundo clássico é fisicamente distinto dos sistemas microscópicos” e que devemos tratar “uma porção do mundo de maneira diferente do resto dele”. Na concepção de Zurek (2003, p. 716), “a solução de Bohr era delinear uma fronteira entre o quântico e o clássico e manter determinados objetos – especialmente os instrumentos de medida e os observadores – ao lado do clássico”. Desta maneira, “o princípio de superposição” era suspenso por “decreto” no domínio clássico.

(ROVELLI apud OSNAGHI, 2011, p. 234).

Hugh Everett, por não concordar com o postulado de Copenhague, de que a “Mecânica Quântica não pode descrever o processo da própria medição” (OSNAGHI, 2011, p. 235), começou a desenvolver uma pesquisa, que envolvesse uma abordagem diferente daquela apresentada por Bohr.

A leitura que identifica a interpretação de Copenhague com a formulação do “observador externo” continua sendo popular, assim como as preocupações a respeito da completeza e da consistência da visão de Bohr que tal leitura suscita. Deste modo, van Fraassen (1991, p. 273), por exemplo, argumenta que, na abordagem de Bohr, “uma medição, ao deixar para fora alguma ou outra coisa, é uma interação descrita de maneira incompleta”. Na sua “variante de Copenhague” da interpretação modal, ele se dispõe a “completar” a abordagem de Bohr ao fornecer uma caracterização completa e objetiva das interações que contam como medições, eliminando, desta maneira, todas as “conotações antropocêntricas” e tornando possível “pensar a Teoria Quântica como uma descrição autônoma putativa do mundo em termos físicos neutros”.

(FRAASSEN, 1991 apud OSNAGHI, 2011, p. 236)

Para Stefano Osnaghi (2011), no formalismo matemático da Mecânica Quântica de Bohr, parece haver uma contradição, uma vez que esse cientista enfatiza que o instrumento de medida deve ser descrito classicamente e, por outro lado, esse faz parte do que ele denomina “sistema objeto”. Entretanto, o autor de “Implicações filosóficas da

dependendo da explicação do colapso adotada, a Mecânica Quântica deveria oferecer um modelo físico da mente, ou uma justificação do fato de que o aparelho de medida, e de maneira geral os objetos macroscópicos, não são encontrados numa superposição dos estados que correspondem às suas configurações “clássicas” (em contraposição ao famoso gato de Schrödinger).

O colapso da função de onda é considerado frequentemente como um “processo ‘mágico’ no qual alguma coisa bem drástica” acontece, “enquanto em todas as demais ocasiões supomos que os sistemas obedecem a leis contínuas perfeitamente naturais.” (Everett a Jammer, 1973, citado por OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 105) Quer se concorde ou não que este “processo mágico” caracteriza de forma justa “o aspecto estridente da Mecânica Quântica de Bohr” (ROVELLI, 1996, p. 1671), não surpreende que, quando entendido dessa maneira, o postulado da projeção levante preocupações a respeito da consistência da teoria (ver, por exemplo, HEISENBERG, 1955, p. 23).” (OSNAGHI, 2011, p.234)

teoria quântica: Bohr e o problema da medição: uma solução dualista? ” sustenta que não há dualidade nem contradição nas elucidações de Bohr.

De maneira aproximada, este pode ser caracterizado como o ponto de vista que supõe que o fenômeno e, portanto, nossas observações e os resultados de nossas medidas, seja produzido pelas propriedades de objetos cujas características não dependem da forma como investigamos a experiência. Dentro do ponto de vista representacionalista, espera-se que as teorias, em última análise, descrevam estes objetos e suas interações. Nesta perspectiva, é natural imaginar-se que o vetor de estado de um sistema reflita, mais ou menos diretamente, as propriedades objetivas do sistema, ou seja, seu “estado físico” (EVERETT, 1973, p. 63 apud OSNAGHI, 2011, p. 239)

As ideias de Bohr a respeito do formalismo da Física Quântica não pressupõem essa estrutura, visto que o físico não faz nenhuma referência às “propriedades”. “As predições se referem a resultados, com nenhuma alusão implícita a algo supostamente ‘revelado’ por eles” (OSNAGHI, 2011, p. 239). Para esse autor, isso possui duas implicações:

Primeiro, as afirmações empíricas são intrinsecamente condicionais, uma vez que elas se referem ao que ocorrerá se uma medida for levada a cabo. Segundo, uma vez que os símbolos matemáticos da teoria se referem unicamente às medidas, o uso significativo de uma teoria pressupõe que se possa definir de maneira inequívoca o arranjo experimental no qual as medidas são realizadas, assim como seus possíveis resultados (BOHR, 1963, p. 5). Deste modo, se assumimos a interpretação de Bohr do formalismo, tanto a possibilidade de se definir, quanto a de se comunicar de maneira inequívoca as condições sob as quais um experimento é realizado, é condição prévia para se dotar de significado físico os modelos formais (ver BOHR, 1935, p. 700). (OSNAGHI, 2011, p. 239).

Tal aspecto não deveria ser tomado como restrição à Física; ao contrário, é algo que pode ser utilizado em qualquer atividade experimental apresentada em um quadro teórico com definições bem delimitadas (OSNAGHI, 2011). A partir dessas premissas, pode-se apreender a interpretação de que a abordagem do formalismo proposto por Bohr não é dualista. Uma interpretação que indique o contrário é “um esforço malconduzido para se levar em consideração, dentro do ponto de vista ‘representacionalista’ da natureza inerentemente pragmática dos modelos quânticos” (OSNAGHI, 2011, p. 239).

Dissolução do dualismo mente-matéria. Uma vez que na visão de Bohr não há colapso da função de onda, não há, a fortiori, nenhuma necessidade de se postular que o colapso seja causado pela mente do observador. Poder-se-ia argumentar que atribuir um vetor de estado ao sistema depois de uma medida, o que é a maneira como o colapso deveria ser entendido na visão de Bohr, implica um ato consciente. Mas isto não envolve nenhuma ação da consciência sobre os sistemas físicos. Como Bohr enfatizou, a descrição do fenômeno atômico tem “um caráter perfeitamente objetivo, uma vez que nenhuma referência explícita é feita a qualquer observador individual” (BOHR, 1963 apud OSNAGHI, 2011, p.239).

E ainda:

Do ponto de vista de Bohr, o que a descrição objetiva de um experimento precisa é de uma distinção funcional entre os instrumentos de medida e o “sistema objeto” (MURDOCH, 1987, p. 97-98). Nada impede que seja estipulado um modelo de interação física que corresponda a uma medição. (OSNAGHI, 2011, p. 242)

Faye (2014) destaca que Bohr evidenciou a necessidade da distinção epistemológica entre sujeito e objeto, uma vez que esse é o único meio pelo qual é possível dar sentido a uma medida. E o físico dinamarquês não tratou o instrumento de medição pertencente ao mundo clássico de forma separada do objeto quântico em uma linha de divisão macroscópica e microscópica. Nesse sentido, era comum que o físico incluísse “partes do instrumento de medição a qual a descrição da Mecânica Quântica deveria ser aplicada” (FAYE, 2014, p. 35). Entretanto, segundo Don Howard (1994 apud FAYE, 2014), Bohr nunca considerou que os instrumentos de medida eram objetos clássicos, Klaas Landsman (2006 apud FAYE, 2014), no entanto, discorda dessa afirmação defendendo o contrário.

De acordo com Faye (2014), Bohr negou a tese de que o sujeito impacta diretamente no resultado da medição. Para esse autor, em alguns dos primeiros artigos de Bohr sobre a Complementaridade o físico mencionou a perturbação dos fenômenos por observação, entretanto, o dinamarquês nunca teve em mente um “colapso do pacote de ondas induzido pelo observador”, e, sim, que “o estado do objeto e o estado do instrumento são dinamicamente inseparáveis durante a interação.” (FAYE, 2014, p. 35).

Bohr (1958) evidencia que “(...) a inevitável interação dos objetos e dos instrumentos de medida instaura um limite absoluto à possibilidade de falarmos de um comportamento dos objetos atômicos que independa dos meios de observação” (BOHR, 1958, p. 32). Isso fez com que o físico dinamarquês insistisse na utilização dos conceitos clássicos para entender os fenômenos quânticos, o que não significa que a descrição dos objetos macroscópicos ou dos aparatos de medição fossem feitas a partir das leis dinâmicas da Física Clássica. Bohr ressaltou que o uso dos conceitos clássicos não é o mesmo na Física Clássica quanto na Mecânica Quântica. Além disso, Faye (2014) completa que o cientista dinamarquês estava ciente de que, diante da inconsistência, os conceitos clássicos deveriam se submeter a uma reinterpretação teórica quântica apropriada.

Estamos diante de um problema epistemológico bastante novo na filosofia natural.⁵⁷ No âmbito dessa, toda descrição das experiências, até então, baseava-se no pressuposto, já inerente às convenções comuns da linguagem, de que é possível traçar uma distinção nítida entre o comportamento dos objetos e os meios de observação. Esse pressuposto é não só plenamente justificado por toda experiência cotidiana, mas constitui, inclusive toda base da Física Clássica, a qual, justamente pela teoria da relatividade, recebeu um arremate tão maravilhoso. No entanto, tão logo começamos a lidar com fenômenos como os processos atômicos individuais – que, por sua própria natureza são essencialmente determinados pela interação dos objetos em questão e dos instrumentos de medida necessários à definição dos projetos experimentais – somos forçados a examinar mais de perto a questão do tipo de conhecimento que se pode obter com respeito aos objetos. Nesse aspecto, devemos reconhecer, por um lado, que a meta de todo experimento físico – obter conhecimento e condições possíveis de serem produzidas e comunicadas – deixa-nos sem outra alternativa senão utilizar conceitos cotidianos, talvez aperfeiçoados pela terminologia da Física Clássica, não apenas em todos os relatos da construção e manipulação dos instrumentos de medida, mas também na descrição dos resultados experimentais efetivamente obtidos. Por outro lado, é igualmente importante compreender que justamente essa situação implica que nenhum resultado de um experimento concernente a um fenômeno que, em princípio, esteja fora do âmbito da Física Clássica pode ser interpretado como dando informações sobre propriedades independentes dos objetos; está, antes, intrinsecamente ligado a uma situação definida, e cuja descrição os instrumentos de medida que interagem com os objetos também têm uma participação essencial. Este último fato explica as condições aparentes que surgem quando os resultados obtidos sobre objetos atômicos por diferentes processos experimentais são provisoriamente combinados numa imagem autônoma do objeto. (BOHR, 1958, pp. 32-33)

Bohr (1958) ratifica que, apesar de as informações relacionadas ao comportamento de um objeto atômico serem obtidas a partir de condições experimentais definidas, essas podem ser, também, caracterizadas como complementares a qualquer informação a respeito do mesmo objeto, que pode ser obtida por qualquer arranjo experimental que exclua o atendimento das primeiras condições.

As formulações de Bohr sobre a Complementaridade foram importantes para vários estudos. Pessoa Jr. (2014) afirma que há certa incerteza persistente entre os cientistas, no que tange aos fundamentos da teoria da Mecânica Quântica. Segundo esse autor, as incertezas se originam no fato de que as premissas dessa teoria desafiam o senso comum e o desenvolvimento da Física nos últimos séculos.

Alguns problemas começaram a partir do advento da Mecânica Quântica, que segundo Chibeni (1992, p. 142), é a “teoria fundamental da estrutura da matéria”, cujas características apresentam um desafio para a Física Clássica. Os conceitos utilizados a partir da Física newtoniana, referentes à natureza da matéria e do espaço/tempo, não

⁵⁷ “Filosofia Natural é o estudo da natureza. Tal episteme buscava explicar o mundo natural englobando todos os aspectos possíveis, fossem relativos ao habitat, fisiologia, utilidade ou hábitos”. (CONCEIÇÃO, 2016, p. 142)

encontram correspondentes imediatos ou sem restrições no arcabouço teórico da Física Quântica. Chibeni (1992) afirma que até 1930 não havia argumentos que contestasse os resultados empíricos da teoria da Mecânica Quântica.

Nesse sentido, se diz que a Mecânica Quântica é uma teoria indeterminista, já que os resultados das observações futuras sobre o sistema nunca são todos determinados, mesmo quando presentemente conhecemos perfeitamente o estado quântico do sistema. (Chibeni, 1992, p. 146)

Isso fez com que vários cientistas acreditassem que a descrição da realidade a partir da Mecânica Quântica fosse incompleta, visto que deixa de especificar resultados da observação que seriam genuínos, segundo Chibeni (1992), Einstein foi um deles.

As dificuldades de se conceber uma realidade compatível com uma interpretação realista da Mecânica Quântica levaram os físicos a propor interpretações instrumentalistas e idealistas, em uma escala sem precedentes na História da Ciência. (Chibeni, 1992, p. 153)

Para Faye (2014), muitos filósofos e cientistas frequentemente afirmavam que a interpretação de Bohr era positivista⁵⁸ ou subjetivista⁵⁹. Atualmente, há praticamente um consenso de que não se trata de um nem do outro, o que acontece é a presença de aspectos tanto realistas quando irrealista. Entretanto, a Complementaridade de Bohr foi associada erroneamente ao positivismo e ao subjetivismo, conforme Faye (2014), o que faz com que a visão filosófica da Complementaridade ainda não seja tão clara.

A interpretação da Mecânica Quântica que permeava a Universidade de Copenhague não era homogênea. Havia várias interpretações e nem mesmo Heisenberg e Bohr concordavam sobre todos os aspectos presentes na elaboração desse campo. Faye (2014) ressalta que a ideia de uma interpretação única da Mecânica Quântica estudada em Copenhague emergiu em meados do século XX a partir de trabalhos de historiadores e filósofos da Ciência. Don Howard (2004) reforça que o que é conhecido como a “Interpretação de Copenhague” difere da interpretação baseada na Complementaridade de Bohr. Aquele autor completa que esse termo surgiu em meados da década de 1950, em que o principal responsável por sua difusão foi Heisenberg e outros cientistas e filósofos como Bohm, Feyrabend, Hanson e Popper, em que pretendiam defender seus próprios interesses, de acordo com Howard (2004). Faye (2014) conclui que até Heisenberg cunhar

⁵⁸ Positivista é aquele que defende e endossa as ideias do Positivismo. Essa foi uma corrente filosófica que ascendeu no século XIX, e tinha como premissa a oposição com a metafísica na Ciência e também era contra qualquer influência teocêntrica nesse campo. Auguste Comte foi um dos principais implementadores e difundidores dessas premissas.

⁵⁹ Na teoria do conhecimento, a Filosofia apresenta o subjetivismo como expoente para a ideia de que a verdade é aquela que o sujeito determina. Johannes Hessen (2000) ressalta que os sofistas são exemplos de subjetivistas e o Protágoras é o autor da frase mais conhecida que representa essa particularidade do conhecimento: “O homem é a medida de todas as coisas” (HESSEN, 2000, p. 36)

o termo “Interpretação de Copenhague” não havia uma hegemonia com relação à interpretação da Mecânica Quântica produzida naquela cidade. O termo ocorreu pela primeira vez em 1955, pronunciado por Heisenberg, e a ideia que o permeava era exatamente a desse físico e não de Bohr.

Frederico Firmo de Souza Cruz (2011) afirma que outros colaboradores da estruturação da Mecânica Quântica, como Heisenberg e Pauli, discordaram de Bohr uma vez que Heisenberg, por exemplo, acreditava na necessidade da “aplicação e atribuição de uma nova semântica da linguagem formal da Mecânica Quântica” (HICKEY apud CRUZ, 2011, p. 308). Faye (2014) expõe que Don Howard e Kristian Camilleri conjecturam que a Complementaridade de Bohr originalmente se tratava da “descrição espaço-temporal e a descrição causal dos estados estacionários dos átomos - e não entre diferentes resultados experimentais do elétron livre”⁶⁰ (FAYE, 2014, p. 32). Entretanto, após a discussão com Einstein, Bohr começou a analisar experimentos de dupla fenda e foi necessário que o escopo do seu trabalho se estendesse até “cobrir o elétron em interação com o aparato de medição. ”. Por outro lado, “Heisenberg, em contraste com Bohr, acreditava que a equação de onda dava uma descrição causal, embora probabilística, do elétron livre no espaço de configuração.” (FAYE, 2014, p. 32).

As divergências de ideias relacionadas à Mecânica Quântica em Copenhague podem ser apresentadas de forma que de um lado encontra-se Bohr, que não assumiu a “medição quântica em termos de um colapso da função de onda”⁶¹ (FAYE, 2014, p. 32); no meio é possível encontrar Heisenberg, admitindo o colapso como um processo físico objetivo, mas assumindo que isso não poderia ser analisado devido à sua natureza indeterminista; e, na outra ponta, há Johann Von Neumann e Eugene Wigner, com a argumentação de que a mente humana tem uma influência direta na redução do pacote de ondas.

Com relação à visão de Bohr diante dos conceitos clássicos e da sua aplicação da Mecânica Quântica, Frederico Firmo de Souza Cruz (2011) alega que Bohr acreditava que esse campo dependia da linguagem da Física Clássica, uma vez que o cientista acreditava que a “a linguagem formal da Mecânica Quântica não seria capaz de dar uma descrição semântica e teria um papel apenas instrumental” e “completeza da teoria [da

⁶⁰ Texto original: “(...) fact that complementarity was originally thought by Bohr (in his Como-paper) to exist between the space-time description and the causal description of the stationary states of atoms — and not between different experimental outcomes of the free electron. ”

⁶¹ “(...)quantum measurement in terms of a collapse of the wave function (...)”

Complementaridade], incorpora, numa mesma representação, duas descrições diferentes e exclusivas sobre um mesmo objeto” (CRUZ, 2011, p. 308). Segundo Bohr (1958), é comum o pensamento de que o arcabouço conceitual que era comumente utilizado para explicar as experiências cotidianas e para formular todo o conjunto de leis aplicável ao comportamento da matéria, de forma geral, e que consiste, ainda, na importante estrutura da Física Clássica “teria que ser fundamentalmente ampliado para que pudesse abarcar os fenômenos atômicos propriamente ditos” (BOHR, 1958, p. 21).

Bohr (1958) explica que qualquer expressão do pensamento humano é inimaginável sem a utilização de conceitos que sejam enunciados a partir de uma linguagem comum às gerações, que transmitem também o conhecimento sobre cada conceito dessa linguagem que se tornará comum. Para Bohr (1958), a teoria da relatividade é um exemplo do avanço que pode haver nos aperfeiçoamentos formais das descrições adequadas.

Faye (2014) evidencia que, para o dinamarquês, os átomos são reais e não são “construções heurísticas” nem lógicas, ou seja, a Mecânica Quântica não oferece uma representação “pictórica do mundo”. De forma geral, para o físico:

(...) as exigências da Complementaridade na Mecânica Quântica estavam logicamente em pé de igualdade com as exigências da relatividade na teoria da Relatividade. Ele acreditava que ambas as teorias eram resultado de novos aspectos do problema de observação, a saber, o fato de que a observação na Física é dependente do contexto. Isto novamente é devido à existência de uma velocidade máxima de propagação de todas as ações no domínio da Relatividade e um mínimo de qualquer ação no domínio da Mecânica Quântica. E é por causa desses limites universais que é impossível na teoria da Relatividade fazer uma separação inequívoca entre tempo e espaço sem referência ao observador (o contexto) e impossível na Mecânica Quântica fazer uma distinção nítida entre o comportamento do objeto e sua interação com os meios de observação. (BOHR apud FAYE, 1998, p. 105)⁶²

As abordagens referentes à Relatividade são úteis para promover uma atitude mais objetiva com relação às culturas humanas, “cujas semelhanças podem assemelhar-se, sob muitos aspectos, às maneiras diferentes e equivalentes pelas quais se pode descrever a experiência física” (BOHR, 1958, p. 37). Entretanto, Bohr lembra que há um limite nessa

⁶²Texto original: “the demands of complementarity in quantum mechanics to be logically on a par with the requirements of relativity in the theory of relativity. He believed that both theories were a result of novel aspects of the observation problem, namely the fact that observation in physics is context-dependent. This again is due to the existence of a maximum velocity of propagation of all actions in the domain of relativity and a minimum of any action in the domain of quantum mechanics. And it is because of these universal limits that it is impossible in the theory of relativity to make an unambiguous separation between time and space without reference to the observer (the context) and impossible in quantum mechanics to make a sharp distinction between the behavior of the object and its interaction with the means of observation.”

analogia, para que não haja interpretações errôneas sobre a essência da relatividade. Para o físico, essa teoria permite que haja a possibilidade de um observador prever, de acordo com seu arcabouço conceitual, a forma como outro observador descreverá a experiência diante do arcabouço que lhe é comum.

As diferenças profundamente enraizadas das tradições, nas quais são baseadas a harmonia cultural, nas diferentes sociedades humanas, são, de acordo com Bohr (1958), os principais obstáculos a uma atitude não preconceituosa com relação à multiplicidade de culturas humanas. Segundo Holton (1984), Bohr se dedicou nos últimos trinta anos da sua vida a ampliar os limites da Complementaridade, aplicando os conceitos a outros campos, o que pode ser indicado a partir das falas do físico dinamarquês em congressos que apresentava para outras áreas do conhecimento, como a Psicologia e a Biologia.

Eu espero, todavia, que a ideia da complementaridade seja adequada para caracterizar a situação, que mostra uma analogia profunda relativamente à dificuldade geral para a formação do pensamento humano, sobre a distinção entre sujeito e objeto. (...) O objetivo de nossa argumentação é enfatizar que toda experiência, seja na ciência, na filosofia, ou na arte, que possa ser útil à humanidade, deve ser passível de comunicação por meio da expressão humana, e é baseado nisto que devemos abordar a questão da unidade de conhecimento. (BOHR apud HOLTON, 1984, pp. 58 - 59)

Bohr (1958) acentua que é nesse contexto que a ideia de Complementaridade pode ser um meio para lidar com o obstáculo que impede uma atitude sem preconceitos diante das várias culturas humanas, uma vez que ao serem realizados estudos sobre culturas humanas, diferentes daquelas que são comuns ao estudioso, há a necessidade de lidar com o problema particular da observação. Essa dificuldade se assemelha àquela que os psicólogos enfrentam no seu trabalho cotidiano, “nos quais a interação dos objetos e instrumentos de medida, ou a inseparabilidade entre conteúdo objetivo e sujeito observador, impede uma aplicação imediata das convenções adequadas à explicação das experiências da vida cotidiana” (BOHR, 1958, p. 38).

O físico explicita que a Complementaridade - aqui utiliza-se a palavra tal como é usada na Física Atômica: “para caracterizar a relação entre experiências obtidas por diferentes arranjos experimentais e visualizáveis apenas por ideias mutuamente excludentes” (BOHR, 1958, p. 39) – está presente nas diferentes culturas humanas, ou seja, essas são complementares. Entretanto, Bohr (1958) afirma que no campo das Ciências Humanas não é possível que haja nenhuma relação que seja absolutamente excludente, como aquelas encontradas em experimentos complementares dos objetos atômicos bem definidos. O físico ressalta que essa característica do conhecimento humano se dá uma vez que dificilmente existiria uma cultura que pudesse ser

completamente autônoma, todavia, o que acontece entre as diferentes sociedades humanas é que o contato entre elas normalmente leva a uma fusão gradual das tradições, que pode resultar numa nova cultura, exemplo disso é a miscigenação presente em diversas relações sociais, como as imigrações. Bohr (1958) conclui que, “na verdade, grande perspectiva dos estudos humanistas talvez consista em eles contribuírem, por meio de um crescente conhecimento da história e do desenvolvimento culturais, para a eliminação gradativa dos preconceitos” (BOHR, 1958, p. 39).

A Mecânica Quântica vem se transformando até a contemporaneidade. Há ainda várias descobertas que necessitam de mais experimentos, como a descoberta do *Bóson de Higgs*. Entretanto, o início do século XX, como foi explicitado, foi um momento de bastantes contribuições para o desenvolvimento daquele campo. Exemplo disso foram os trabalhos de Niels Bohr e Werner Heisenberg. Esses cientistas se dedicaram durante grande parte das suas vidas a darem mais substância e consistência para a formulação da Mecânica Quântica, após o desenvolvimento do novo modelo atômico. Bohr e Heisenberg, algumas vezes juntos, outras não, desenvolveram os Princípios da Correspondência e da Incerteza e o conceito de Complementaridade, todos esses postulados foram implementados na tentativa de melhor explicar a Mecânica Quântica e o comportamento atômico. As pesquisas relacionadas a esse campo vêm sendo utilizadas para desenvolver equipamentos eletrônicos que facilitam a vida das pessoas, como os *tablets* ou as TVs. Ao passo que a Mecânica Quântica desenvolve, todos os campos que são diretamente ou indiretamente ligados a ela e também se desenvolvem provocando mudanças nas vidas dos seres humanos, tanto com relação ao conhecimento quanto nos modos de vidas.

Capítulo II

II.I Século XX e a física quântica: transformações epistemológicas

A Historiografia do século XX foi marcado por uma significativa divisão ideológica na forma como se escrevia a História da Ciência e das Ideias científicas. Pesquisas realizadas por Thomas Kuhn, na segunda metade do novecentos, por Antônio Passos Videira e Carlos Alvarez Maia, no século XXI, por exemplo, apontam uma divisão entre as abordagens internalista, externalista e uma terceira via, durante o século passado, com relação a uma expressão das ideias científicas. Essas abordagens não eram conhecidas no início do século XX, mas foram utilizadas por historiadores que se dedicaram a pesquisar a primeira metade do século XX, mais especificamente a partir da década de 1950, para descrever uma suposta divisão entre as percepções e interpretações sobre o meio científico. As análises dos autores, que se dedicaram a estudar esse assunto, são complexas e compreendem muitos exemplos, tanto de expressões internalistas quanto externalistas durante o século XX e, principalmente no início dele, como Ludwik Fleck e Karl Mannheim. Entretanto, Maia (2013) ressalta que essa divisão é demasiada simplória e ratifica que ideias fundamentais e filosóficas de um grupo estava presente no outro. Além disso, em ambos, “a visão do processo interativo, mais geral, se perde. O chão dos eventos históricos é seletivamente observado e recortado, servindo assim para ‘confirmar’ (ou verificar) suas propostas” (MAIA, 2013, p. 34).

Tentando observar o cenário científico do início do século XX, há Niels Bohr, que apresenta ideias plurais, pouco categóricas, e que tanto poderia representar os internalistas quanto os externalistas. É conhecido que nenhum dos cientistas, filósofos ou historiadores que viveram e experimentaram escrever sobre as ideias científicas no início do novecentos imaginavam que havia essa suposta dicotomia, nem mesmo tinham conhecimento desses conceitos que surgiram após a década de 1950. O que se pretende neste capítulo é realizar uma análise que perpassa à História das ideias científicas, tendo em vista as especificidades filosóficas e culturais, que implicavam diretamente na forma como a Ciência era constituída. Niels Bohr e o seu trabalho relacionado à Complementaridade, já explicitado, serão os objetos deste capítulo. O trabalho do físico, então, será abordado a partir das pesquisas apresentadas pelos historiadores apontados no início desse capítulo, endossando a hipótese de Maia (2013), de que em ambos os supostos grupos, internalistas e externalistas, existem a presença de ideias tanto de um quanto do outro. Por fim, este tópico tem como objetivo expor a Complementaridade e as proposições do físico dinamarquês articuladas a suas especificidades, além de apresenta

as proposições articuladas por Bohr, principalmente relacionada à Complementaridade, à hipótese de Maia (2013).

Apresentadas no capítulo anterior as disputas, discussões e contribuições para que a Mecânica Quântica se tornasse um campo de conhecimento e investigação mais consistente, o primeiro tópico do Capítulo II tratará, então, de forma epistemológica e filosófica, das ideias de Bohr e a possível posição que elas ocupariam diante das disputas filosóficas, que permearam as produções científicas e a implementação de uma História das ideias científicas. Isso é relevante para uma compreensão mais ampla do contexto em que a Mecânica Quântica se edificou e, conseqüentemente, compreender os debates históricos e filosóficos, que perpassam os trabalhos científicos, ligados especificamente à Mecânica Quântica.

Antes de discutir propriamente a possível posição ocupada pelas ideias de Bohr e por sua produção científica diante dessa provável dualidade, é necessário apresentar quais eram as premissas ideológicas que permearam o século XX, perante a historiografia das Ciências, e tentar entender se as produções científicas de Niels Bohr poderiam estar, de fato, diante da possibilidade dessa dicotomia intelectual (internalista x externalista) que alguns autores acreditaram ter afetado as Ciências exatas e a História das ideias científicas durante o século XX.

Houve, então, uma tendência durante o século passado em que as Ciências Sociais tentavam considerar a prática científica como uma construção social. Esse campo de investigação científica teve um papel relevante na suposta dualidade internalismo e externalismo. Videira (2007) admite que a divisão entre História com abordagem mais social e outra com uma abordagem mais voltada para o estudo da execução do trabalho científico e biográfico, muito presente no início do século passado, se intensificou na década de 1970. Maia (2013) discorre sobre o que seria cada uma dessas vertentes da historiografia das ideias científicas, Filosofia da Ciência e História da Ciência, completando, ainda, que ambas são insuficientes para verificar o objeto, por meio de uma análise efetivamente histórica.

Assim, no extremo, a História interna, ao privilegiar o olhar sobre as “ideias” descoladas do solo sócio histórico, as encadeia em uma diacronia epistêmica: “ideias” que causam outras “ideias”. Já a História externa promove um reducionismo sociológico: seja por abandonar essas “ideias”, seja por simplesmente vinculá-las a um determinado contexto que as teria “produzido”. Em ambas as Histórias a visão do processo interativo, mais geral, se perde. O chão dos eventos históricos é seletivamente observado e recortado, servindo assim para “confirmar” (ou “verificar”) suas propostas. Essas histórias veem duas “realidades” distintas, em geral incompatíveis entre si. (MAIA, 2013, p. 34)

Videira (2007) reitera que houve uma tentativa de separar a História da Ciência, considerada cientificista, daquela mais filosófica; essa ocorrência se estendeu por praticamente todo século XX. A fragmentação presente na História da Ciência se legitima a partir das instituições e da criação de pós-graduações específicas nessa área, de acordo com as convicções do departamento.

Segundo Videira (2007), a História da Ciência do século XX foi deslocada de um lugar em que era responsável pela legitimação da imagem da Ciência para o local onde era responsável pela análise crítica de todos os campos científicos. Entretanto, esse lugar fez com que aquele campo de investigação ocupasse um espaço cientificista ou uma tentativa de que pertencesse a essa posição, uma vez que muitos cientistas acreditavam que, para realizar a historiografia da Ciência, era necessário ter conhecimentos técnicos específicos da prática científica. O cientificismo da História da Ciência é ainda contestado por alguns historiadores da Ciência. Maia (2013) aponta que o desafio daquela área era fazer com que fosse possível harmonizar os assuntos relacionados aos agentes sociais e suas “emancipações cognitivas” (MAIA, 2013, p. 56).

Nesse sentido, Maia (2018) ressalta que a divisão da História da Ciência parte do pressuposto da oposição entre forma e conteúdo em que são representadas pela forma social e conteúdo cognitivo. Isso significa, segundo esse autor, que essas duas formas de abordar a Ciência, a partir da História, não se valem de aspectos efetivamente históricos presentes nos vários conteúdos daquelas. Ambas as formas de interpretar a Ciência se portavam de maneira alheia ao processo de cognição efetivamente, conforme o seguinte fragmento:

A externa o faz explicitamente, restringe-se ao exterior, à forma, contenta-se em examinar o “contexto social” da produção, mero cenário ornamental; e a interna persegue a trilha do roteiro que os próprios cientistas consideram ser a descrição verdadeira de sua atividade profissional. Essencialmente, tais histórias permanecem alheias ao processo cognitivo efetivo: “Estudava-se, de fato, não as descobertas científicas, mas a imagem que delas davam os próprios eruditos. Era esta imagem que era tacitamente associada à ciência, o que significava que o historiador comungava do ponto de vista daqueles cuja história ele fazia”. (POMIAN, 1990, p. 97 apud MAIA, 2013, p. 59)

Na década de 1920, houve o “período historizador” (MAIA, 2013, p. 76), o que esse autor considera ser um marco intermediário nas mudanças epistemológicas que viriam a acontecer na História da Ciência na década de 1970, principalmente. Todavia, a partir da reação cientificista, esse direcionamento sofreu alterações. Em oposição a essa

tendência historicista⁶³, o cientificismo positivista⁶⁴, especialmente amparado pelas ideias neopositivistas do Ciclo de Viena, tentou fortalecer o abismo entre a apreensão histórica e aquela mais voltada para o trabalho do cientista, impondo-lhes uma hierarquia. Maia (2013) admite que tanto os cientistas das Ciências Naturais quanto das Humanas compartilhavam de alguma forma as ideias postas pelos cientificistas.

Mauro Lúcio Leitão Condé (1995)⁶⁵ salienta que o Círculo de Viena, criado em 1920, na cidade de Viena, na Áustria, viria dar direção ao movimento chamado de Neopositivismo, Positivismo Lógico ou Empirismo Lógico. Em 1924, o grupo ganhou o nome de Círculo de Viena e angariou vários adeptos e participantes ao longo dessa década. Alan Chalmers⁶⁶ (1994) aponta que o Círculo de Viena foi o principal propagador das ideias do empirismo lógico durante as décadas de 1920 e 1930, que queria distinguir o discurso religioso e metafísico daquele baseado na empiria e no conhecimento técnico das Ciências exatas e naturais. Maia (2013) acredita que o Círculo de Viena foi um movimento basicamente composto por físicos, filósofos, matemáticos, lógicos e sociólogos, em alguma medida, que se orientavam a partir de três premissas básicas: reducionismo, que acabava por unificar vários campos do conhecimento, falta de apreensão histórica e crença no progresso da Ciência. Esse movimento rompia com as ideias metafísicas incorporadas à Ciência. Chalmers (1994) destaca, ainda, que esse grupo tendia a estabelecer critérios e caracterização ampla da Ciência, indicando a presença de um método ideal, que direcionasse a pesquisa e práticas científicas, delimitando o que era Ciência de fato, aquela que não estava baseada em princípios metafísicos, e o que não passava de uma pseudociência, ressaltando o valor da primeira.

Mauro Lúcio Leitão Condé (1995) ressalta que os empiristas lógicos se baseavam na razão, articulando os preceitos delimitados da lógica e do experimento, acreditando que conseguiriam extrair premissas universais, por meio de uma abordagem por vezes

⁶³ Refere-se a uma abordagem histórica mais voltada para os fatos em comum com a sociedade, em que se leva em conta o tempo e o espaço nos quais ocorreram.

⁶⁴ Refere-se a uma abordagem voltada para o trabalho científico, sem detalhes sobre os fatos e o cotidiano do período e do local onde aconteciam, havia pouca ou nenhuma apreensão histórica.

⁶⁵ Mauro Lúcio Leitão Condé é historiador e desenvolveu vários trabalhos relacionados à Teoria da História das Ciências, pesquisando mais contundentemente aspectos da História e Historiografia das Ciências relacionados à Ludwik Fleck e à Thomas Kuhn, todos os seus trabalhos são de grande importância para a História das Ciências e são bastante citados como referências em pesquisas de desenvolvimento sobre o assunto, além de serem bibliografias utilizadas nos cursos de História das Ciências nas universidades brasileiras.

⁶⁶ Alan Francis Chalmers é um filósofo cujas obras são referências mundiais no que tange à Filosofia e à História das Ciências. A obra aqui citada se refere à “A fabricação da ciência”, publicada inicialmente em 1990, sob o título original em inglês “Science and its fabrication”, traduzida para o português pela primeira vez em 1994, por Beatriz Sidou, e publicada pela Editora Unesp.

indutiva, a partir de determinados enunciados, teorias referentes a dados tomados como consistentes. Nesse sentido, os que compunham o Círculo de Viena e alguns filósofos de gerações subsequentes apresentavam uma Ciência que pretendia ser “universal e a-histórica - Universal no sentido de que se tencionava que fosse igualmente aplicada a todas as teses científicas” (CHALMERS, 1994, p. 15). Acreditava-se que, mediante várias experimentações, conseguiriam extrair uma teoria que pudesse ser, conseqüentemente, generalizada e aplicada de uma forma geral. A experiência, então, segundo Condé (1995), era aquela que determinaria as premissas a serem utilizadas no mundo prático e nas práticas científicas, determinadas e constatadas como verdadeiras. Disso, então, resulta o “princípio da verificabilidade”, em que “verificar é tomar um enunciado significativo e reduzi-lo a enunciados protocolares, isto é, ao conjunto de dados empíricos imediatos a fim de verificar se esses ocorrem, ou não, na realidade” (CONDÉ, 1995, p. 101).

Segundo Gabriel da Costa Ávila (2012), a linguagem é algo de extrema importância para os empiristas lógicos; é através dela que é possível evitar o erro. A filosofia, então, seria responsável por estabelecer “os critérios pelos quais se pode julgar quando a linguagem está sendo bem utilizada, de modo a produzir resultados cientificamente válidos” (ÁVILA, 2012, p. 35). Em decorrência disso, surgirá uma proposta bastante contundente de linguagem, que será capaz de eliminar todo tipo de metafísica, contrária à racionalidade presente na Ciência, que possa vir a influenciar as práticas e pensamentos científicos.

Defensores de um modelo de linguagem diretamente ligado à experiência, à dimensão empírica e, assim, à ciência, os positivistas lógicos do Círculo se distanciam de outros inimigos da metafísica por não a considerarem “falsa”, “fruto de mera especulação” ou de “contos de fada”, mas por a considerarem ininteligível, desprovida de sentido, incapaz de produzir qualquer conhecimento legítimo. A metafísica é tomada como terreno das especulações acerca da essência transcendente das coisas; identificada com a arte, não com a ciência. Foi o desenvolvimento da lógica moderna que possibilitou a crítica derradeira, indubitável e inescapável (na visão dos empiristas lógicos) à metafísica. A adoção da lógica transformou a filosofia praticada pelo Círculo de Viena, especialmente a filosofia da linguagem, em um trabalho técnico, em oposição à especulação da filosofia clássica.

(CARNAP, 1959, p. 72 apud ÁVILA, 2012, p. 36).

Isso posto, é possível pensar na posição intelectual em que Niels Bohr possivelmente ocuparia diante da sua forma de apreender a ciência e de narrar a História da Física. O físico apresenta uma preocupação particular com a linguagem: a partir do momento em que o dinamarquês introduz as ideias sobre a Complementaridade é presente uma preocupação com o seu uso. Bohr participou de algumas atividades relacionadas ao Ciclo de Viena, cedendo, inclusive, a mansão em que vivia para a realização do 2º

Congresso Internacional para Unidade da Ciência, ocorrido em 26 de junho de 1936, conforme afirmações de Jan Faye (2010). De acordo com esse autor, o positivismo lógico influenciou a produção científica dinamarquesa, exemplo disso é que, antes da Segunda Guerra Mundial, havia estreitas relações entre os membros do Círculo de Viena e os filósofos e cientistas de Copenhague, impactando não somente a Filosofia e a Ciência como, também, os debates políticos e sociais.

Segundo Jan Faye (2010), Neurath, filósofo da Ciência e entusiasta do positivismo, e Bohr se correspondiam com frequência e o primeiro encontrou nas ideias do dinamarquês inspirações bastante marcantes das correntes do positivismo lógico que permeou durante a década de 1930. Para Maia (2013), Neurath acreditava na premissa de uma “ciência sem concepção de mundo” (NEURATH, 1965, p. 288 apud MAIA, 2013, p. 103). Camilleri⁶⁷ (2009) sustenta que a abordagem de Bohr sobre a Complementaridade foi influenciada pelo empirismo lógico. Jordan (1944, 159 apud Camilleri, 2009) reitera que embora cada físico tivesse sua forma particular de abordagem a respeito da Filosofia e da História da Ciência, o positivismo lógico estava presente na maioria das apreensões epistemológicas e metodológicas apresentadas pelos cientistas durante as décadas de 1920 e 1930, e, ao longo dessa última década, o empirismo lógico esteve mais contundente. Nesse sentido, a interpretação da Mecânica Quântica apresentada por Bohr e Heisenberg é determinada pelas interpretações do positivismo lógico. Segundo Franck (1975, 179 apud Camilleri 2009) a Complementaridade de Bohr tem total influência do empirismo lógico que permeou o início do século XX.

Entretanto, Dennis Dieks⁶⁸ (2016) salienta que, de acordo com as abordagens do empirismo lógico, era necessária a descrição das experiências em laboratório, todavia, nesse ponto, há diferenças que esse autor considera substanciais entre Bohr e aqueles que são influenciados diretamente pelo Círculo de Viena: Bohr não defende experimentos que antecedem a teoria, mas acredita que a teoria interpretada deve vir a ser uma generalização a partir da Física Clássica. Nesse sentido, Bohr sugere uma maneira de veicular as pressuposições da teoria quântica à experiência através da descrição clássica já existente no mundo macro. Quanto a isso, Jan Faye (2014) acredita que associar a Complementaridade ao positivismo é uma atitude errônea, uma vez que a interpretação

⁶⁷Kristian Camilleri é professor de História e Filosofia da Ciência na Escola de Estudos Históricos e Filosóficos da Universidade de Malbourne, e realizou pesquisas importantes sobre a Física Quântica e a interação entre a cultura, Física e Filosofia nos últimos anos.

⁶⁸Dennis Dieks é filósofo da Ciência e físico que propôs, na década de 1980, uma nova abordagem da Física Quântica.

geral da Mecânica Quântica presente em Copenhague difere significativamente da Complementaridade de Bohr. A abordagem mais comumente difundida sobre aquele campo investigativo é associada às interpretações de Heisenberg e ao trabalho que esse desenvolveu na Mecânica Quântica, e pouco relacionada às contribuições de Bohr, propriamente ditas. A ideia de uma única interpretação de Copenhague, foi, segundo Faye (2014), difundida nos anos 1950, por filósofos como Popper e Feyerabend e físicos, como Heisenberg e Bohm, a fim de defender suas próprias interpretações filosóficas, como mencionado no tópico anterior.

Nesse sentido, é possível perceber, em algumas passagens, a proximidade do positivismo lógico nas interlocuções de Bohr, assim como ele se ausenta em outros pontos. Determinar se Bohr era adepto das ideias, que atualmente conhecemos como externalistas ou internalistas, resultado de pesquisas historiográficas feitas sobre o século XX, é reduzir o trabalho do físico dinamarquês.

Essencialmente, as duas correntes historiográficas permaneceram em regime de fidelidade com o cientificismo e com seu vetor denegação embasado sobre a divisão de contextos de Reichenbach; esta dicotomia, sim, constituiu-se como núcleo *hard* de resistência à historicidade do processo cognitivo. E este processo dá-se em sociedades e momentos específicos, em conjunturas que favorecem e alimentam essa bipartição: a querela internalismo - externalismo reveste-se nas ambiguidades do/no jogo esquerda-direita entre perspectivas orientadas por uma visão liberal-individualista e uma outra, a do coletivismo, na qual o próprio marxismo e o historicismo encontram suas raízes (eis, aí e assim, um conjunto de propostas de interpretação, componentes da hipótese de trabalho da pesquisa orientada). (MAIA, 2013, p. 100)

Maia (2013) reitera que não há efetivamente uma disputa entre aqueles que historicizavam a Ciência e os idealistas, nem mesmo há antagonismo em seus fundamentos. Para Maia (2013), os dois grupos partem da mesma base conceitual, pois são cientificistas, ambos. Quanto a isso, Kuhn (1962) sugere que as abordagens da História das Ciências, interna e externa, são complementares. Por essa razão, é muito superficial determinar que o trabalho de Bohr, com relação à Complementaridade, que foi direcionado também às Ciências Humanas, é internalista ou externalista, apesar de Bohr ter frequentado algumas reuniões do Círculo de Viena e compartilhar de algumas direções epistemológicas apontadas por esse movimento.

A noção de complementaridade indicada por Kuhn, ao se referir à oposição entre internalismo e externalismo, é uma “pseudosolução” (MAIA, 2013, p. 166) que mascara a real dificuldade a ser vencida, indicando uma unidade que não existiu, de fato. Essa real

dificuldade é de compreensão de como o mundo se dava, fomentada pela transição em que o mundo vivia, naquele momento.

Nos anos 1950, há um direcionamento que aborda a noção de complementaridade como uma síntese, em que se expressa “a ideia de externalismo - internalismo serem faces complementares, analíticas, cujas recombinações reconstituíam e sintetizariam um todo” (MAIA, 2013, p. 168). Esse autor completa que, na prática, a complementaridade não existiu, o que aconteceu foi um momento em que as disputas entre aqueles que defendiam tanto um lado, internalismo, quanto o outro, externalismo, estava apaziguado, durante a década de 1950, mais especificamente. Maia (2013) ratifica que esse foi um momento de inflexão entre o primeiro momento, no século XX, em que houve uma disputa mais veemente entre os defensores de cada um desses dois pontos de vista, mais especificamente a partir dos anos 1930; e o segundo momento em que há um “acordo diplomático pacificando a disputa – há um combate sem vencedores e inicia-se sua coexistência complementar” (MAIA, 2013, p. 172). Nesse sentido, o autor de “História das ciências: uma história de historiadores ausentes” evidencia que Conant, Barber e posteriormente Kuhn indicaram a importância e a presença da complementaridade, informando, ainda, que Barber defende veementemente a complementaridade entre interpretações internalistas e externalistas.

Nesse sentido, Bohr, antes de Barber, havia introduzido ideias que já indicavam uma complementaridade, para além da Mecânica Quântica, que permeava a vida e as culturas humanas. O físico dinamarquês destaca que “as diferentes culturas humanas são complementares entre si” (BOHR, 1958, p. 39), indicando que, “através de numerosos exemplos” e não por meio de “experimentos”, o contato entre diferentes sociedades humanas pode resultar numa fusão gradual da tradição, o que pode dar origem a uma cultura nova. O dinamarquês completa que “a grande perspectiva dos estudos humanistas talvez consista em eles contribuírem, através de um crescente conhecimento da História e do desenvolvimento cultural, para a eliminação gradativa dos preconceitos, que é a meta comum de todas as Ciências” (BOHR, 2012, p. 39). Mais adiante, o físico critica rapidamente o distanciamento que as Ciências Exatas foram “forçadas a adotar” em relação às Humanas, em função da análise de experimentos físicos adotados pelo primeiro campo em detrimento do segundo.

Analisando as implicações de Bohr é possível perceber que a complementaridade proposta por Kuhn, e outros autores como os mencionados por Maia (2013), não era algo meramente utópico e ilusório, uma vez que Bohr (1958), ainda na década de 1930 - em

que a possível disputa entre o internalismo e o externalismo era latente, já havia apresentado algo semelhante em seus trabalhos. Todavia, esse fato não indica que o problema mais relevante da História das Ciências, apontado por Maia (2013), a crise do conhecimento, não estivesse acobertado pela oposição entre internalismo e externalismo e que ambos, embora persistisse em demarcar um antagonismo, partilhavam da base científicista.

As proposições apresentadas por Bohr (1958) e as discussões apresentadas nesse tópico sobre as posições a respeito dos trabalhos de Bohr indicam que Bohr, embora fosse entusiasta da complementaridade, representava a inflexão teórica apresentada por Maia (2013). Niels Bohr (1958) demonstrava, então, ao indicar a complementaridade nos discursos científicos, a intenção de enfatizar que o estudo e o conhecimento históricos podem conseguir eliminar, mesmo que gradualmente, os preconceitos, que eram presentes em todas as Ciências naquele contexto. Por fim, o que pode ser sugerido é que o físico dinamarquês indicava uma forma complementar de analisar as Ciências, o que poderia significar que os conhecimentos das humanidades pudessem complementar as experiências e atividades de todas as Ciências.

II.II Microfísica: contribuições para uma nova visão de mundo

Nesse ponto, é oportuno abordar a Complementaridade de Bohr e a Mecânica Quântica em um plano mais substancial e social, abarcando a vida cotidiana. Nos tópicos anteriores foram apresentadas algumas interlocuções de Niels Bohr diante das correntes historiográficas e filosóficas, além de direcionamentos de apreensão da História das Ciências, com a finalidade de introduzir as ideias de Bohr e então compor o escopo do conceito da Complementaridade, proposta pelo físico dinamarquês de forma mais abrangente. A partir disso, esse tópico tende a reforçar o caráter plural da Complementaridade, por meio de uma apreensão mais social, no que tange à microfísica, especificamente. O conceito proposto por Bohr esteve presente nas ideias que fundamentaram as elaborações da microfísica e, portanto, foi um aspecto relevante para colaboração da introdução de uma nova visão de mundo consequente da presença dessa área.

Bassalo e Caruso⁶⁹ (2016) afirmam que após Hitler tomar o poder, em 1933, e do início da sua perseguição contra judeus, Bohr contactou a Fundação Rockefeller, que havia criado um programa de emergência para refugiados europeus, para oferecer o Instituto em Copenhague como abrigo para receber físicos que precisassem ser acolhidos ao fugirem da perseguição alemã. Segundo Bassalo e Caruso (2016), vários foram os cientistas que se abrigaram no Instituto chefiado por Bohr, como Edward Teller (húngaro), Hilde Levi (alemã), Guido Beck (austríaco), dentre outros. O início da Segunda Guerra Mundial foi em 1939, em 1941 o Japão atacou a base naval de Pearl Harbor, no Havaí, nos Estados Unidos, o que fez com que esse país entrasse na Guerra do lado oposto ao do Japão, que o atacara de surpresa e, conseqüentemente, na direção contrária à de Hitler. Após a entrada dos EUA na Segunda Guerra Mundial, iniciou-se o Projeto Manhattan, localizado nesse país, mas que tinha a colaboração de outros países Aliados, como a Inglaterra. O Projeto baseava-se nos estudos realizados sobre a fissão nuclear⁷⁰ e a sua potencialidade bélica, que já era explorada por um grupo de cientistas na Universidade de Hamburgo, na Alemanha. Destaca-se que nesse momento, Bohr se

⁶⁹ Ambos os autores são físicos e tiveram acesso às fontes relacionadas à Universidade de Copenhague e ao atual Instituto Bohr. O resultado da investigação e estudo dessas fontes foi o livro aqui referenciado, publicado pela primeira vez em 2016.

⁷⁰ A conformação da fissão nuclear foi feita no final de janeiro de 1939, na Universidade da Califórnia, trabalho esse realizado por uma equipe de cientistas cujo líder era Luís Walter Alvarez, após investigações do espectro de raios X do Urânio, segundo Bassalo e Caruso (2016).

dedicava ao estudo e ao entendimento geral da fissão nuclear, de acordo com Bassalo e Caruso (2016).

Em 1941, o dinamarquês recebeu a visita de Heisenberg, que era líder do projeto alemão de energia nuclear e da utilização da fissão nuclear para fins bélicos, para conversar sobre esse assunto, mas a reunião foi bastante rápida e pouco se sabe o que foi conversado nessa ocasião. O que se pode afirmar, de acordo com Bassalo e Caruso (2016), é que após esse encontro, Bohr continuou seus estudos sobre a transmutação do núcleo atômico, até a ocupação da Dinamarca pelas tropas nazistas, em 1943, o que forçou Niels Bohr, sua família e seu irmão Herald, influente matemático dinamarquês, além de outros cientistas e mais 7 mil judeus, aproximadamente, a se refugiarem na Suécia.

Ao saber que Bohr estava asilado na Suécia, o físico inglês Frederick Alexander Lindermann o convidou para ir à Inglaterra, onde teve o primeiro contato direto com o Projeto *Manhattan*⁷¹, e de lá o dinamarquês e seu filho Aage, também cientista, seguiram para os EUA (todo trajeto foi feito com muita cautela e sigilo pelos países Aliados). Pai e filho receberam nomes falsos para não serem identificados e perseguidos. Durante o tempo em que Bohr esteve nos EUA, ele aproveitou para visitar Einstein e Pauli, que já residiam no local. O físico dinamarquês teve a oportunidade de conhecer também o lugar onde a bomba atômica era desenvolvida, em Los Alamos, no Novo México.

Durante essa viagem, Bohr começou a constituir a opinião de que os usos pacíficos ou bélicos da fissão nuclear deveriam ser de conhecimento público, inclusive dos soviéticos, considerando o bem geral da humanidade. Bohr, então, começou a difundir sua ideia de um “mundo aberto”⁷² (BASSALO; CARUSO, 2016, p. 160), entretanto, sua tentativa de fazer com que o mundo fosse mais pacífico e que a construção da bomba atômica não fosse algo secreto, não foi bem recebida, principalmente por Roosevelt e

⁷¹Esse projeto foi o responsável pela elaboração das bombas atômicas atiradas sobre Hiroshima e Nagasaki, em 1945, sob o pretexto da realização de teste, como chamou os cientistas envolvidos no Projeto, de acordo com Bassalo e Caruso (2016).

⁷²“An open world” foi a expressão usada por Niels Bohr para defender que as pesquisas científicas deveriam ser divulgadas amplamente e todas seriam feitas para o bem e evolução da humanidade e que, além disso, deveriam ser realizadas com a colaboração internacional. O Físico dinamarquês escreveu uma carta aberta à ONU, em 1950, em que defendia o “mundo aberto” em oposição ao sigilo sobreposto ao Projeto *Manhattan* e ao *Military Applications of Uranium Detonation*. Bohr já havia mencionado a ideia de um “mundo aberto” numa publicação no *The Times*, em Londres, em 1945. Após a Segunda Guerra Mundial, o então presidente dos EUA, Dwight D. Eisenhower, fez um discurso que defendia a utilização das pesquisas nucleares para fins pacíficos. O discurso deu origem ao Prêmio Átomos pela paz ou “Atoms for Peace Award”, resultado do fundo de doação da Ford Motor, e Niels Bohr foi o primeiro a receber a condecoração devido a sua luta para um “mundo aberto”.

Churchill que, em 1944, assinaram o *aide-mémoire*. Nesse documento constavam três pontos fundamentais:

1) O projeto da construção da bomba atômica deveria ser mantido secreto; 2) a colaboração do Projeto Manhattan e Military Applications of Uranium Detonation deveria continuar; 3) Bohr deveria ser vigiado (e, se fosse necessário, detido). (BASSALO; CARUSO, 2016, p. 162-163)

Os esforços iniciais de Bohr de um “mundo livre” foram suprimidos e as duas bombas atômicas implementadas a partir da contribuição dos dois projetos, o estadunidense e o inglês, que estavam interligados, foram enviadas às cidades japonesas, primeiramente em Hiroshima e depois em Nagasaki, em 1945, conforme mencionado anteriormente, em 6 e 9 de agosto daquele ano. Isso fez com que o mundo percebesse a Física e a Ciência de uma forma diferente, agora vista como a representação do perigo para a humanidade.

Nesse sentido, de uma forma geral, essas premissas contribuíram para uma nova apreensão do mundo, no sentido tempo-espacial, tanto para aqueles que presenciaram e assistiram o período dessas descobertas, análises e investigações quanto para os outros, que fazem parte das gerações seguintes, que presenciam as inquietações originárias da presença da microfísica, e, mais especificamente, da Física Quântica. Morin (2003) ressalta que houve duas reformas que foram responsáveis pela mudança de pensamento:

A primeira começou com a Física Quântica e, como já mencionamos, desencadeia o colapso do Universo de Laplace; a queda do dogma determinista; o esboroamento de toda ideia de que haveria uma unidade simples na base do universo; e a introdução da incerteza no conhecimento científico. (...) A segunda revolução, realizada com a constituição de grandes ligações científicas, faz com que se levem em consideração os conjuntos organizados, ou sistemas, em detrimento do dogma reducionista que imperara durante o século XIX. (MORIN, 2003, p. 89)

Martins (1969) enfatiza que as descobertas da microfísica e as mudanças na Física no início do século XX, que foram mencionadas ao longo desta dissertação, acarretaram em mudanças na forma de apreensão do mundo e no modo como os seres humanos ampliaram sua visão universal, que antes cósmico, começou a se revelar micro. Norman Clark (apud Martins 1969, p. 20) completa que “só agora (1957) principiamos a ter consciência nítida dos enormes benefícios que podem resultar do desenvolvimento tecnológico das novas descobertas físicas.”

Para começar as abordagens a respeito da Mecânica Quântica e a sociedade, de uma forma geral, é necessário remeter à obra “A condição humana”, de Hannah Arendt, e as suas afirmações e proposições a respeito da descoberta do telescópio e das grandes

mudanças que decorreram desse evento, nos séculos que antecederam a descoberta da Mecânica Quântica. Nesse sentido, a autora pontua a segunda revolução, ressaltada por Morin (2003), ao apresentar a narrativa de um jornalista que anuncia a invenção do telescópio: Para esse narrador, desde o “nascimento na manjedoura” nunca houve nada tão importante. A filósofa alemã, sobre essa afirmação, comenta que o ocorrido na manjedoura significava uma mudança contundente: o começo de algo inesperado e completamente novo; e “aquelas empreitadas tímidas em direção ao universo” por meio de um instrumento revelariam algo que antes não se alcançava, “estabelecendo condições de um mundo inteiramente novo” (ARENDDT, 1958, p. 270) que determinaria o curso de alguns eventos introdutórios à modernidade.

Para a autora de “A condição humana”, poucos foram aqueles que realmente receberam com “alvorço” a invenção do telescópio, somente um grupo reduzido, formado principalmente por filósofos, astrônomos e teólogos. Diante desse fato, a filósofa conclui, então, que o que Galileu fez de inédito foi, por meio do telescópio, revelar os “segredos do universo” (ARENDDT, 1958, p. 272), a condição humana. A reação em resposta a esse acontecimento foi a dúvida cartesiana, que fundamentou a Física Moderna.

(...) uma cosmovisão teológica, mística, pessimista de um universo físico e social, comandado por uma ordenação definitiva e por um fatalismo finalista, em que o homem viverá eternamente amarrado à sua posição natural, vai suceder-se sob o impulso da Física newtoniana, a claridade luminosa de um humanismo individualista, dominado pelo signo da razão e do progresso, vai suceder-se a concepção de um universo físico e social comandado por uma legalidade imanente, acessível à razão humana, e a partir de cujo conhecimento, a Ciência, o homem se pode tornar dono e senhor da natureza, no dizer altivo e orgulhoso. (MARTINS, 1969, p. 12)

A filósofa aponta que a descoberta de Galileu modificou a condição do homem, que antes se via preso ao planeta Terra, tendo-o como sua referência e condição de vida, o que se modificou com a descoberta do telescópio. A dicotomia presente, antes do início da era moderna, entre o céu e a terra, foi banida pela evolução presente nesse período e então o universo foi unificado, de modo que nada que acontecesse na natureza era tido como “mero evento terreno” (ARENDDT, 1958, p. 275). Para a filósofa alemã, os seres humanos não estavam presos nem mesmo ao sol, representando a existência de uma liberdade para que se movam no universo, ou seja, que conseguissem escolher seus pontos de referências conforme lhes convém, servindo a uma finalidade desejável. Com isso, a autora quer chamar atenção para o fato de que a mudança de uma apreensão heliocêntrica para uma visão de mundo sem ponto fixo é tão importante quanto a mudança de uma perspectiva geocêntrica para uma heliocêntrica, que ocorreu no século XVI. Somente a

partir daquelas modificações é que os seres humanos conseguiram se afirmar como seres universais e reconheceram que vivem na terra apenas por limitação de uma condição e que, por meio do raciocínio, isso poderia ser superado. Arendt (1958) assegura que a grande diferença da modernidade e do mundo modificado que sucedeu é que, após a modernidade, a visão de mundo passou a ser universal, o que fez com que a natureza pudesse ser dominada completamente. A partir do domínio da natureza, há o risco de destruí-la e, conseqüentemente, destruir a possibilidade desse domínio.

As descobertas sobre a fissão nuclear e a implementação das bombas atômicas são exemplos do domínio que o homem pode ter sobre a natureza e a conseqüente possibilidade de destruição. Após o lançamento das armas bélicas sobre Hiroshima e Nagasaki, muitos cientistas acreditavam que a forma como a Ciência era praticada precisava ser revista; Niels Bohr foi um deles ao defender o “mundo aberto”.

A partir, aproximadamente, da segunda metade do século XX, a Ciência passou pelo que alguns autores, como Bruno Latour (1998), acreditavam ser a Guerra das Ciências, em que as culturas, histórica e sociais, estavam em conflito com a cultura científica. Martins (1969) aponta que no pós-guerra, principalmente após a verificação da destruição causada pelas bombas atômicas, a imagem da Ciência para o mundo capitalista mudou. O que significava que a Ciência não era algo apenas especulativo e para devaneios, mas que poderia ser bastante recompensadora do ponto de vista do capital. E assim, a Física, bem como a Ciência, de modo geral, se tornou uma grande potência de investimentos em vários países, ocupando o lugar de mão de obra especializada auxiliadora no desenvolvimento econômico e social.

Todas as noções fundamentais da Física Clássica foram, de alguma forma, atingidas por transformações do início do novecentos, caracterizada como “Crise da Física”, que daria seguimento a uma revolução da “Física teórica, da Física experimental e dos próprios fundamentos da Ciência” (MARTINS, 1969, p. 13). As especialidades do estudo da Física desse período e os conseqüentes resultados possibilitaram ao pensamento humano a conquista de “um novo plano da realidade”: o microcosmos.

A partir desse novo campo experimental e teórico é que os conceitos e os próprios seres humanos perceberam o quanto alguns esquemas e alguns aspectos da linguagem da Física Clássica passaram a ser menos adequados para determinadas situações. Para Martins (1969), aquelas premissas estavam baseadas apenas na Física, voltadas para o mundo macroscópico, enraizadas nas descobertas, em grande maneira, de Galileu e de Newton. Esses aspectos contribuíram para que a projeção do homem sobre a realidade e

a própria totalidade do mundo fosse restrita a esse universo. Nesse sentido, a moderna Física Atômica foi responsável por lançar luz sobre novos problemas filosóficos, éticos e políticos” (HEISENBERG, 1971, p. 8).

Bohr (1958) também ressalta a importância das conquistas científicas da Mecânica Quântica, ratificando a relevância delas para a vida do ser humano e para sua expansão na concepção do universo, comparando a descoberta do microcosmos às expansões astronômicas e marítimas dos séculos anteriores.

Embora a importância dessas grandes conquistas para nossa visão global seja comumente reconhecida, isso ainda mal chega a acontecer no tocante à insuspeitada lição epistemológica que nos deu a abertura de novíssimos campos de pesquisa Física nos últimos anos. Nossa penetração no mundo dos átomos, antes vedado aos olhos do homem, é de fato uma aventura comparável às grandes viagens de descobrimento dos circunavegadores e às ousadas explorações astronômicas nas profundezas do espaço celeste.

(BOHR, 1958, p. 30)

Arendt (1958) endossa a ideia de que após as descobertas de Newton e Galileu a palavra universal começou a ter outro sentido, o que contemplava o universo em si e o que era além do sistema solar. Algo semelhante aconteceu com a ideia de relativo, a partir da Teoria da Relatividade de Einstein. A origem universal do homem, então, é confirmada a partir da capacidade dele de conseguir observar o mundo e a vida de um ponto de vista universal, sem ter que sair do lugar. E assim, a filósofa conclui que a interpretação cartesiana do ponto arquimediano para a mente do homem permitiu que ele se libertasse inteiramente da realidade dada, ou seja, da sua condição humana de habitar o planeta terra. Quanto a isso, Martins (1969) afirma que

Nessas condições, talvez nos seja legítimo concluir que a crise da Física apenas veio revelar o caráter histórico e evolutivo dos próprios quadros racionais de pensamento científico e comprovar, no mesmo lance, a historicidade da razão e da consciência, as quais deixam de ser, como postulava o racionalismo clássico, um dom intemporal absoluto, transcendente ao condicionalismo físico, social, e humano, deixam de constituir uma dádiva que se recebe passivamente, para se tornarem, afinal, o produto de uma atormentada e acidentada conquista, mas em que a vitória é certa: a humanização do Universo, no sentido da bela mensagem cartesiana. (MARTINS, 1969, p. 17)

A Teoria da Relatividade foi a fundamentação teórica que embasou a Mecânica Quântica, conforme aponta Heisenberg (1971) e, conseqüentemente, a mudança no horizonte de expectativas e da forma de apreender o mundo dos seres que viveram após e durante a constituição daquele campo científico. A Mecânica Quântica contribuiu para o direcionamento de uma nova visão de mundo, voltada para um mundo micro, ou seja, para além da visão macro universal, proporcionada pela descoberta do telescópio por Galileu.

A Teoria da Relatividade de Einstein, além de contribuir para uma visão mais relativa das concepções científicas, foi uma das principais bases para o desenvolvimento da Mecânica Quântica proposta por Bohr. O físico alemão não acreditava naquele campo da forma como o dinamarquês propunha que poderia ser verdadeira, como já mencionado no capítulo anterior. Einstein e outros cientistas se recusaram a aceitar o novo viés científico. Bohr (1958) salienta, então, a importância da participação do físico alemão para o desenvolvimento da Mecânica Quântica, destacando que se não fossem os constantes desafios desse cientista, e de outros que se dedicaram a refutar as premissas que permeavam aquele campo em expansão, a evolução daquela área teria sido mais lenta.

O desenvolvimento da Mecânica Quântica deu espaço ao desenvolvimento de várias pesquisas científicas que contribuíram para a facilitação de muitos aspectos da vida cotidiana e do entendimento humano, assim como foi responsável por uma mudança no pensamento humano, conforme mencionou Morin (2003).

Após a explosão das bombas atômicas, Bohr deu continuidade e tornou pública a sua ideia de “mundo aberto”, segundo Bassalo e Caruso (2016), publicando um artigo sobre o assunto, o que introduziu seu interesse em articular as Ciências Exatas às Ciências Humanas. Dando continuidade ao seu plano de “mundo aberto”, Bohr e outros cientistas, em especial Broglie, sugeriram a criação de um grande centro de pesquisa europeu, uma vez que, após a Segunda Guerra Mundial, os países europeus se encontravam em fragilidade econômica, enquanto nos EUA havia forte investimento em pesquisas científicas - após a percepção de que a Ciência era rentável, do ponto de vista do capital.

Com a criação do centro de referência de pesquisas científicas, a intenção era impedir que todos os cientistas emigrassem para os EUA. Inicialmente, devido à influência e ao prestígio de Bohr, esse centro seria construído na Dinamarca, entretanto, diante da idade avançada do dinamarquês, o conselho de cientistas europeus decidiu criar o espaço de pesquisa na Suíça, e, em 1953, o CERN⁷³ foi criado. Após a constituição do *Conseil Europé pour la Recherche Nucléaire* e a implementação do acelerador de partículas, muitas pesquisas relacionadas à Física Atômica e à Física Nuclear foram, e ainda são, realizadas, como os trabalhos relacionados à antimatéria, ao nascimento do mundo, ao *Bóson de Higgs*, à construção e elaboração dos colisor de partículas e à sua colaboração para o estudo de partículas cada vez menores presentes do átomo⁷⁴. A

⁷³Conseil Europé pour la Recherche Nucléaire

⁷⁴ Informações colhidas no *site* do CERN. Ver < <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>>. Acessado em 09/03/2019.

tecnologia avançou muito a partir da Mecânica Quântica, a invenção dos computadores e os avanços relacionados a esses equipamentos, como *notebook*, telefones celulares, a criação da *internet*, aparelhos utilizados pelos médicos em realização de exames - ressonâncias magnéticas e tomografias, por exemplo -, o *laser*, o aparelho de microondas, os aparelhos de TV, dentre vários outros equipamentos e eletrodomésticos implementados por meio da utilização do conhecimento da Mecânica Quântica. Pessoa Jr (2011) afirma que desde as primeiras aplicações no campo das tecnologias, o escopo de atuação daquela área parece infundável.

Além das contribuições da Mecânica Quântica para o desenvolvimento de várias pesquisas científicas e das técnicas que são resultado dessas investigações e novas teorias baseadas naquele campo, a microfísica contribuiu, ainda, assim como a descoberta do telescópio por Galileu, para uma nova apreensão do mundo. A descoberta de Galilei, conforme mencionado, a partir das elucidções de Arendt (1958), colaborou para que os seres humanos se desprendessem da Terra e conseguissem abordar a vida a partir do universo, ou seja, além do sistema solar. Esse fato, como dito, criou no homem a possibilidade de pensar sua existência além da Terra, abordando a vida de um ponto de vista universal. Os seres humanos, então, começaram a conceber uma visão macroscópica da humanidade, criando o desejo de viver em pontos fora do planeta onde vivem, bem como conhecê-los. A intenção é o desejo de explorar o universo, libertando-se da sua condição humana de viver na Terra, conforme a filósofa alemã. Por outro lado, a Mecânica Quântica proporcionou uma ampliação dessa visão, indicando a existência de universo micro, não apenas macro, já descoberto após a implementação do telescópio por Galileu. O microuniverso desvendado a partir da Mecânica Quântica demonstrou que o poder de dominação dos seres humanos era imenso, e praticamente irrestrito. Dominar o macrocosmo, assim como o microcosmo era dominar a vida e o futuro.

A visão universal, então, após a concepção da Mecânica Quântica e a Complementaridade de Bohr, passou a ser macro e micro e lançou luz para as observações de partículas, estendendo-se aos estudos dessas para praticamente todos os campos de investigação científica, conforme aponta Heisenberg (1971). Esse físico indica uma conversa que teve com Bohr, em que o próprio físico dinamarquês destaca o “moderno desenvolvimento da Física Atômica e sua importância para a análise e a síntese em muitos campos do conhecimento humano” (BOHR, 1958, p. I). A partir desses fatos, foi possível verificar que os seres humanos modificaram significativamente a forma como lidavam com vida e com o universo, de forma geral. A Mecânica Quântica possibilitou que a visão,

a partir do universo, fosse contemplada de forma mais complexa e ampliada, uma vez que as partículas e as formas como se comportam aproximaram o ser humano, consciente de sua composição orgânica, espacial e temporal, de um universo antes mais contemplativo, tendo em vista a visão da vida, e agora mais próximo e mais facilmente modificável, além da grande possibilidade do desenvolvimento de várias tecnologias.

Conclusão

A Mecânica Quântica se consolidou como campo autônomo na primeira metade do século XX, amparada por inúmeras contribuições científicas, resultado de pesquisas realizadas antes mesmo de a teoria quântica ser elaborada. Trabalhos como o de Hertz, realizados ainda no século XIX, foram significativos aparatos para a constituição daquele campo científico. O caminho para a constituição da Mecânica Quântica foi traçado a partir da equação de Planck e do trabalho desse cientista, relacionado ao efeito fotoelétrico e à radiação. Além disso, Einstein teve grande protagonismo na consolidação daquela área, quando aprimorou a equação de Planck e criou a teoria da Relatividade, que foi também um aporte teórico para a constituição da teoria quântica. As teorias, leis, postulados e princípios só são formulados por meio da contribuição de várias pesquisas. Não há como fazer Ciência isoladamente, até mesmo os cientistas mais conhecidos contaram com a colaboração, mesmo que indireta, de outros. A consolidação da Mecânica Quântica é um exemplo disso, como exposto, os resultados de muitas investigações científicas foram utilizados como aparato para que aquele campo conseguisse se edificar.

Como já mencionado, todo trabalho científico necessita do aporte de outros, e para Niels Bohr não foi diferente. O Físico dinamarquês também precisou se amparar em trabalhos anteriores. O modelo atômico implementado por ele e as pesquisas relacionadas ao espectro de hidrogênio, apresentadas em sua defesa de doutorado em 1913, estiveram diretamente relacionados às pesquisas de Rutherford, por exemplo. Antes disso, o dinamarquês havia estudado o modelo atômico de Thomson e assim conseguiu refutá-lo a partir das influências teóricas do seu orientador.

Para a elaboração da teoria da Complementaridade, Bohr contou com o auxílio de Heisenberg e seu princípio da Incerteza, além da teoria da Relatividade de Einstein e com seu caráter estatístico. A Complementaridade de Bohr possui, ainda, um aspecto filosófico, em que o físico dinamarquês defende a diversidade nas culturas humanas e se preocupa com a epistemologia dos conceitos. Einstein tentou refutar essa teoria durante muitos anos da sua vida, e foi a partir disso que Bohr investia cada vez mais no aprimoramento da teoria quântica e modificava a Complementaridade de acordo com as pesquisas que desenvolvia. Foi por meio das investidas de Bohr em promover a Complementaridade que a Mecânica Quântica se edificou, tendo em vista que os cientistas se dedicaram às pesquisas mais profundas diante das dificuldades e questões apresentadas por outros grupos de físicos. O artigo EPR e o experimento do Gato de

Schrödinger são exemplos dessa discussão, que colaborou em grande medida para o desenvolvimento daquele campo na primeira metade do século XX.

Bohr foi um cientista que trabalhou muito para um mundo menos injusto: criou o Instituto de Física teórica que recebia alunos de todo mundo, oferecia bolsa e acolhia cada um dos estudantes pessoalmente, como uma forma de gratidão e de afeto. Durante a Segunda Guerra Mundial, recebeu refugiados e acabou se vendo obrigado a se refugiar também. Mesmo nesse momento de instabilidade, tentou difundir a ideia de “mundo livre” e levar à Ciência um caráter plural, inclusivo e transparente para evitar o mal-uso das pesquisas científicas. Como visto, essa investida não foi bem recebida pelas autoridades durante a Segunda Guerra Mundial, mesmo assim, o físico dinamarquês não desistiu e o resultado foi o prêmio *Atoms for Peace Award*, em 1957. Além dessas contribuições para a Mecânica Quântica e para o mundo, após as Guerras, Bohr contribuiu para a implantação do CERN, um dos principais institutos, que, ainda hoje, é o local onde se produzem pesquisas importantes, relacionadas à microfísica, e continua cooperando com o avanço científico desse campo.

O objeto dessa dissertação, a complementaridade de Bohr e o desenvolvimento da Mecânica Quântica, foi abordado em toda a extensão dessa produção acadêmica. A conclusão quanto a isso é que, com o advento da Mecânica Quântica e com a construção das bombas atômicas, lançadas sobre as cidades japonesas, Hiroshima e Nagasaki, em 1945, os seres humanos começaram a ter uma visão mais ampliada do universo, que antes era visto de forma macro, a partir das descobertas de Galileu com o uso do telescópio, agora também poderia ser visto a partir de uma perspectiva micro. As bombas atômicas mudaram a forma como as pessoas lidaram com a Ciência, que começou a representar uma ameaça para a humanidade, ao mesmo tempo em que se apresentava rentável do ponto de vista do capital. Houve um significativo investimento nas pesquisas relacionadas à Mecânica Quântica, o que resultou em várias descobertas tecnológicas e científicas.

A questão central que permeou essa produção acadêmica, já mencionada - De que forma a Complementaridade de Bohr contribuiu para o desenvolvimento da Mecânica Quântica e qual foi o seu legado para o mundo atual? -, foi solucionada, o que pode ser percebido quando observa - se que as pesquisas realizadas e os resultados apresentados levaram a crer que descobertas científicas, relacionadas à Mecânica Quântica, ao longo do século XX e início do XXI, modificaram a forma como a humanidade lidava com o mundo, com a natureza e com a Ciência. Os homens perceberam que dominavam a natureza através da Ciência e assim aprimoravam técnicas e criavam novos modos de

vida. Foi a partir disso que a televisão, os computadores e *notebooks*, microondas, aparelhos de TV em Led, LCD, os telefones celulares - que a cada dia contam com uma tecnologia mais avançada -, dentre outros aparelhos e equipamentos eletrônicos, puderam ser criados pois todos esses são aparelhos implementados a partir das pesquisas relacionadas à Mecânica Quântica. Além disso, as questões existenciais dos seres humanos como a origem da vida e do universo também são assuntos tratados por esse campo, como as investigações direcionadas ao *Bóson de Higgs*, realizadas no CERN. Visto desse ponto, o legado de Bohr, a partir da Mecânica Quântica, é infinito e ainda na atualidade muitas outras pesquisas são realizadas a partir das ideias e do trabalho do físico dinamarquês.

Por fim, conclui-se que a Mecânica Quântica modificou não somente a visão de mundo dos seres humanos, como deu aparato para que as gerações seguintes conseguissem desenvolver várias tecnologias, que mudaram, conseqüentemente, a forma de vida deles, a forma como interagem com a vida, com as descobertas, com a técnica e com a própria Ciência. A criação da bomba atômica e a destruição causada por ela foram resultados das investigações e desenvolvimentos dos estudos da Física Atômica, assim como, em grande medida, os desenvolvimentos tecnológicos presentes na Guerra Fria também foram resultados de pesquisas envolvendo a Mecânica Quântica, como a invenção dos computadores e, mais recentemente, da nanotecnologia, dentre outras. As contribuições desse campo para uma mudança na forma como os seres humanos interagem com o mundo e com universo são várias e permeiam a vida desses até a contemporaneidade, mesmo que indiretamente, como as pesquisas relacionadas à tecnologia, ou diretamente, como a implementação das bombas atômicas e impactos sociocultural e ecológico nessas cidades, bem como a relação do ser humano com o mundo.

Referências bibliográficas

- ABDALA, Maria Cristina. Bohr, o arquiteto do átomo. 1ª ed; São Paulo: Odysseus Editora, 2002.
- ARENDT, Hanna. A condição humana. Rio de Janeiro: Forence Universitário, 2010.
- ÁVILA, Gabriel da Costa. Como conferir historicidade à ciência? Um retorno às contribuições de Ludwik Fleck e Karl Mannheim. *In: Biografia e História das Ciências: Debates com a História da Historiografia*, organização Mollo, Helena, Ouro Preto: Editora UFOP, 2012.
- BAKER, Joanne. 50 Ideias de Física Quântica que você precisa conhecer. Tradução Rafael Garcia. 1ª. ed. São Paulo: Planeta, 2015.
- BASSALO, José Maria Filardo. CARUSO, Francisco. Bohr. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.
- BEN-DOV, Yoav. Convite à Física. Tradução Maria Luiza X. de A. Borges. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Jorge Zahar, 1996.
- BOHR, Niels. Sobre a constituição de átomos e moléculas. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.
- _____. Física atômica e o conhecimento humano: ensaios de 1932-1957. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.
- CAMILLERI, Kristian. Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation. *Perspectives on Science*, Volume 17, Number 1, Spring 2009, pp. 26-57.
- CARNEIRO, João Alex Costa. A teoria comparativa do conhecimento de Ludwik Fleck: comunicabilidade e incomensurabilidade no desenvolvimento das ideias científicas. Dissertação (Mestrado em filosofia) – Faculdade de Filosofia, letras e ciências humanas. Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <file:///D:/Downloads/2012_JoaoAlexCostaCarneiro_VCorr%20.pdf> Acessado em 23/01/2018
- CARVALHO, Regina Simplício. A evolução dos modelos atômicos em uma perspectiva de Ludwik Fleck. 15º Seminário Nacional de história da ciência e da tecnologia. Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://www.15snhct.sbhct.org.br/resources/anais/12/1473040436_ARQUIVO_SBHC2016CompletoAevolucadosmodelosatomicosemumaperspectivadeLudwikFleck.pdf> Acessado em 04/03/2019
- CÉSAR, Rafael Sousa; OLIVEIRA, Leonardo Tavares de; PAIVA, Fernando Martins de. A constante de Planck: uma forma de ensino de física moderna a partir da experimentação. Anais do III CONEDU – Congresso Nacional de Educação; Natal. Natal: Editora Realize, 2016. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/revistas/conedu/trabalhos/TRABALHO_EV056_M D1_SA18_ID4810_18082016120405.pdf> Acessado em 03/02/2019.

- CHALMERS, Alan. A fabricação da ciência. Tradução de Beatriz Sidou. São Paulo: Editora Unesp, 1994.
- CHIBENI, SILVIO SENO. Implicações filosóficas da microfísica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*. Campinas, Série 3, 2(2), 141-164, 1992. Disponível em: <<https://www.unicamp.br/~chibeni/public/implicacoes-microfisica.pdf>> Acessado em 19/07/2017.
- CONCEIÇÃO, Gisele Cristina, *Natureza Ilustrada: Estudos sobre Filosofia Natural no Brasil ao longo século XVIII*. Porto, 2016, p. 142-179. Disponível em: <<http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/14535.pdf>> Acessado em 09/03/2019.
- CONDÉ, Mauro Lúcio Leitão. O Círculo de Viena e o Empirismo Lógico. *In: Cadernos de Filosofia e Ciências Humanas*. Belo Horizonte: vol. 5, pp. 98-106, 1995.
- CONSEIL EUROPÉ EN POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE. What is the universe made of?. Disponível em: <<https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>> Acessado em 15/03/2019
- CRUZ, Frederico Firmo de Souza. Mecânica Quântica e a cultura em dois momentos. *In: Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*. FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/xwhf5/pdf/freire-9788578791261.pdf>> Acessado em 11/04/2017
- DIEKS, Dannis. *Niels Bohr and the Formalism of Quantum Mechanics*. *In: Niels Bohr and philosophy and physics: the 21st Century perspectives*. FAYE. J; FOLSE. H (Eds.). London: Bloomsburg Publishing, 2016. Disponível em <<http://philsci-archive.pitt.edu/12312/1/bohrrevised2.pdf>> Acessado em 21/03/2018.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- EVENT HORIZON TELESCOPE. Astronomers Capture First Image of a Black Hole. Disponível em: <<https://eventhorizontelescope.org/>> Acessado em 18/04/2019.
- FAYE, Jan. Niels Bohr and the Vienna Circle. *In: The Vienna Circle in the Nordic Countries*, editado por Manninen, Juha; Stadler, Friedrich. Londres: Springer, 2010, pp. 33-46.
- _____ Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. *In Enciclopédia Stanford de Filosofia*. Edward N. Zalta (org.), Setembro, 2014. Disponível em <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/>>. Acessado em 21/03/2018.
- G1 PORTAL DE NOTÍCIAS. Físico e astrônomo brasileiro Marcelo Gleiser é o vencedor do Prêmio Templeton 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/03/19/fisico-e-astronomo-brasileiro-marcelo-gleiser-e-o-vencedor-do-premio-templeton-2019.ghtml>> Acessado em 28/03/2019

- GOMATAM, Ravi. Complementary: Did Bohr Miss the Boat?. São Francisco: Hopos, 2004. Disponível em: <https://www.academia.edu/31654582/Complementarity_Did_Bohr_Miss_the_Boat> Acessado em 24/01/2017
- GOMÉZ, Sara Madera. Complementariedad, identidade e contradicción em la lógica de Niels Bohr. *Sophia*, n 21(2), pp. 101-118, 2016. Disponível em: <https://www.academia.edu/33248800/Complementariedad_identidad_y_contradicc%C3%B3n_en_la_l%C3%B3gica_de_Niels_Bohr> Acessado em 25/01/2017.
- HEISENBERG, Werner. A parte do todo. Rio de Janeiro: Contraponto, 2011.
- HESSEN, Johannes. Teoria do Conhecimento. Tradução: João Vergílio Gallerani Cuter; Revisão técnica: Sérgio Sérvulo da Cunha. São Paulo: Livraria Martins Fontes Editora Ltda, 2000.
- HEWITT, Paul G. Física Conceitual. 9ª Ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2008.
- HOBBSAWM, Eric. Era dos Extremos: o breve século XX: 1914-1991. Tradução Marcos Santarrita; revisão técnica Maria Célia Paoli. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.
- HOLTON, Gerald. As raízes da complementaridade. *Revista Humanidades*, v. II, n. 9, p. 49-71, out.-dez, 1984. Disponível em: <<http://opessoa.fflch.usp.br/sites/opessoa.fflch.usp.br/files/HoltonComplementaridade.pdf>> Acessado em 13/11/2018
- KUHN, Thomas S. A estrutura das revoluções científicas. 12ª Ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.
- _____ O caminho desde a Estrutura. São Paulo: Fundação Editora da Unesp, 2006.
- _____ A tensão essencial. São Paulo: Fundação Editora da Unesp, 2011.
- LATOUR, Bruno. A guerra das ciências. Folha de São Paulo, 1998. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/mais/fs15119803.htm>> Acesso em 05/03/2018.
- LAUDAN, Larry; DONOVAN, Arthur; LAUDAN, Rachel; BARKER, Peter; BROWN, Harold; LEPLIN, Jarrett; THAGARD, Paul & WYKSTRA, Steve. Dossiê Filosofia da Ciência. “Mudança científica: modelos filosóficos e pesquisa histórica”. Trad. por Caetano E. Plastino. *Estudos Avançados (IEA-USP)* v. 7, n. 19, pp. 7-89, 1993. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141993000300002> Acessado em 29/02/2019.
- LEITE, Anderson. SIMON, Samuel. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica. *Scientiæzudia*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 213-41, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-31662010000200004> Acessado em 23/02/2019.

- MAIA, Carlos Alvarez. História das ciências: uma história de historiadores ausentes. Rio de Janeiro: Ed. UERJ, 2013.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução. A história das ciências e seus usos na educação. Pp. xxi-xxxiv. In: *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. SILVA, Cibelle Celestino (ed.). São Paulo: Livraria da Física, 2006.
- MARTINS, J. L. Rodrigues. Prefácio a edição Portuguesa. In: *Sobre a constituição de átomos e moléculas*. BOHR, Niels. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.
- MENESES, Ramiro D. Borges de. A complementaridade em N. Bohr: da mecânica quântica à filosofia. Eikasia. Revista de Filosofia, año III, 17, pp. 75-126, 2008. Disponível em <<http://www.revistadefilosofia.org/17-03.pdf>> Acessado em 16/03/2017.
- MONDINI, Fabiane. O Logicismo, o Formalismo e o Intuicionismo e seus Diferentes Modos de Pensar a Matemática. Anais do congresso XII Encontro Brasileiro de Estudantes de Pós-Graduação em Educação Matemática EBRAPEM - Educação Matemática: Possibilidades de interlocução Unesp - Rio Claro – SP Disponível em: <http://www2.rc.unesp.br/eventos/matematica/ebrapem2008/upload/287-1-A-gt2_mondini_ta.pdf> Acessado em 18/04/2019
- MORIN, Edgar. A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento. Tradução Eloá Jacobina. - 8a ed. -Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. Disponível em: <<http://www.uesb.br/labtece/artigos/a%20cabe%C3%A7a%20bem-feita.pdf>> Acessado em 20/01/2019.
- MOURTHÉ, Carlos Alberto. Ludwik Fleck: estilos de pensamento na ciência. Revista Brasileira de História da Ciência, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 120-124, jan | jun 2014. Disponível em: <file:///D:/Downloads/sbhc%202014_%20Carlos%20Alberto%20Mourthe%20Junior%200.pdf> Acessado em 23/01/2018.
- MÜLLER, Alexei Machado; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira; SARAIVA, Kepler de Souza Oliveira. Aula 16: Teoria da Radiação. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula16-132.pdf>> Acessado em 22/04/2019.
- OSNAGHI, Stefano. Bohr e o problema da medição: uma solução dualista?. In *Teoria Quântica: Estudos Históricos e implicações culturais*. Campina Grande: EDUEPB/ Livraria da Física, 2011, pp. 231- 251.
- PESSOA Jr, Osvaldo. História da teoria quântica. Apênd. Hist. I, 2010. Disponível em <<http://opessoa.fflch.usp.br/sites/opessoa.fflch.usp.br/files/Hist-MQ-2.pdf>> Acessado em 23/10/2017.
- RODRIGUES, Weiller Vilela. Bohr e o princípio da complementaridade: subsídios para materiais educacionais numa abordagem histórica. Dissertação. Ciência, Tecnologia e Educação, Centro Federal de educação tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2016. Disponível em <<http://dippg.cefet-rj.br/ppcte/attachments/article/81/2016%20>

%20BOHR%20E%20O%20PRINC%20C3%8DPIO%20DA%20COMPLEMENTARIDA
D~.pdf> Acessado em 23/03/2019.

SILVA, Giovanna Stefanello. A abordagem do modelo atômico de Bohr através de atividades experimentais e de modelagem. 2013. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em:
<<http://w3.ufsm.br/ppgecqv/Docs/Dissertacoes/GIOVANNA.pdf>>Acessado em 24/08/2018

VIDEIRA, Antônio Augusto Passos. Historiografia e história da ciência. Fundação Casa de Rui Barbosa, v.1, p. 111-158, 2007. Disponível em: <http://www.casaruibarbosa.gov.br/escritos/numero01/FCRB_Escritos_1_6_Antonio_Augusto_Passos_Videira.pdf> Acessado em 18/05/2018

STRATHERN, Paul. Bohr e a Teoria quântica em 90 minutos. Rio de Janeiro: Zahar. 1999.

WEN, Tom Sintan. Acupuntura clássica chinesa. 1ª Edição. São Paulo: Editora Cultrix, 1985. Disponível em: <<https://www.zangfu.com.br/biblioteca/23462659-livro-acupuntura-classica-chinesa.pdf>> Acessado em 15/12/2017.