

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
FACULDADE DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA**

**LUIS VALTER MACHADO JUNIOR**

**AS AMBIGUIDADES INTERPRETATIVAS DE HEISENBERG  
ACERCA DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA**

**BELO HORIZONTE**

**2024**

LUIS VALTER MACHADO JUNIOR

**AS AMBIGUIDADES INTERPRETATIVAS DE HEISENBERG  
ACERCA DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Filosofia.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Maria Kauark Leite

BELO HORIZONTE

2024

100	Machado Junior, Luis Valter.
M149a	As ambiguidades interpretativas de Heisenberg acerca das
2024	relações de incerteza [manuscrito] / Luis Valter Machado Junior. - 2024.
	152 f.
	Orientadora: Patrícia Maria Kauark Leite.
	Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas.
	Inclui bibliografia.
	1. Filosofia – Teses . 2.Heisenberg, Princípio de incerteza de – Teses. 3.Mecânica quântica – Teses. 4. Física – Filosofia – Teses. 5. Heisenberg, Werner, 1901-1976. I. Leite, Patrícia Maria Kauark. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas. III .Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

## AS AMBIGUIDADES INTERPRETATIVAS DE HEISENBERG ACERCA DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA

**LUIS VALTER MACHADO JUNIOR**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Filosofia, como requisito para obtenção do grau de Mestre em FILOSOFIA, área de concentração FILOSOFIA, linha de pesquisa Lógica, Ciência, Mente e Linguagem.

Aprovada em 19 de dezembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Patrícia Maria Kauark Leite - Orientadora (UFMG)

Prof. Osvaldo Frota Pessoa Junior (USP)

Prof. Romeu Rossi Junior (UFV)

Belo Horizonte, 19 de dezembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Romeu Rossi Junior, Usuário Externo**, em 20/12/2024, às 14:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Osvaldo Frota Pessoa Junior, Usuário Externo**, em 20/12/2024, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Maria Kauark Leite, Professora do Magistério Superior**, em 20/12/2024, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3829040** e o código CRC **CBBBEDE3**.

## **Agradecimentos**

À professora Patrícia Maria Kauark, minha orientadora, pelo incansável trabalho de tornar minhas anotações e ideias desconexas em uma dissertação. Profissional exemplar, paciente e cuidadosa em suas correções.

Ao professor Ronei Clécio Mocellin e a professora Debora de Sá Ribeiro Aymoré, que nos momentos que pensei em desistir me acolherem novamente em suas respectivas aulas e grupo de estudos.

À minha mãe, Lisete Dissenha, que constantemente me impressiona com suas batalhas.

À minha vó, Lourdes, e à minha tia, Beatriz, pelo incessante apoio e incentivo.

Aos bons amigos que a vida me deu, Lucas, Spencer e Santana. As risadas, trapalhadas, vacilos e aprendizados, sei que com eles posso contar para os bons e maus momentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro, sem o qual esta dissertação não teria sido possível.

“Escutai, meu filósofo, meti na cabeça que a física sempre será uma pobre ciência, uma gota de água, presa na ponta de uma agulha sobre o vasto oceano, um grão destacado da vasta cadeia dos Alpes! As razões dos fenômenos? Na verdade, seria preferível ignorar do que saber tão pouco e tão mal” (DIDEROT, 1979).

*“It cannot be our task to formulate wishes as to how the atomic phenomena should be; our task can only be to understand them”*  
(HEISENBERG, 1958).

## RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo propor uma divisão em fases do pensamento de Werner Heisenberg. Ao analisar cuidadosamente a obra do físico, percebemos inconstâncias filosóficas sobre as derivações, causas e interpretações das suas relações de incerteza. Em alguns momentos, Heisenberg apresenta uma derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$ , enquanto que em outros momentos, ele considera apenas a derivação direta do formalismo de Dirac-Jordan. Nas causas, o físico varia entre justificar suas relações por meio da tese da perturbação ou por meio da complementaridade. Quanto às interpretações, Heisenberg oscila entre aceitar uma interpretação epistemológica ou uma interpretação ontológica para as relações de incerteza. A partir da análise dessas inconstâncias propomos três fases distintas, coerentes internamente, para o pensamento de Heisenberg, possibilitando uma maior compreensão de sua obra e um estudo filosófico mais preciso do físico.

Palavras-chave: relações de incerteza; Heisenberg; inconstâncias; divisão do pensamento; mecânica quântica.

## ABSTRACT

This dissertation aims to propose a division into phases of Werner Heisenberg's thought. By carefully analyzing the physicist's work, we observe philosophical inconsistencies regarding the derivations, causes, and interpretations of his uncertainty relations. At times, Heisenberg presents a derivation through the  $\gamma$ -ray microscope, while at other times, he considers only the direct derivation through the Dirac-Jordan formalism. Regarding the causes, the physicist varies between justifying his relations through the thesis of perturbation or through complementarity. As for interpretations, Heisenberg oscillates between accepting an epistemological interpretation or an ontological interpretation of the uncertainty relations. From the analysis of these inconsistencies, we propose three distinct, internally coherent phases for Heisenberg's thought, enabling a deeper understanding of his work and a more precise philosophical study of the physicist.

Keywords: uncertainty relations; Heisenberg; inconsistencies; division of thought; quantum mechanics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Movimento de uma partícula em uma teoria contínua e descontínua.....	27
---	----

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1 CAPÍTULO I: AS DUAS DERIVAÇÕES DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA.....</b>	<b>15</b>
1.1 Gênese das relações de incerteza: o período anterior a 1927 .....	15
1.2 Definição geral das relações de incerteza .....	28
1.3 Primeira derivação: por meio do microscópio de raios- $\gamma$ .....	32
1.4 Segunda derivação: das transformações de Dirac-Jordan .....	37
1.5 A impregnação teórica da observação como possível fundamento filosófico para a segunda derivação.....	42
1.6 Contradição entre operacionalismo e impregnação teórica da observação .....	46
<b>2 CAPÍTULO II: AS CAUSAS ATRIBUÍDAS POR HEISENBERG ÀS RELAÇÕES DE INCERTEZA.....</b>	<b>53</b>
2.1 A primeira causa: a tese da perturbação incontrolável .....	53
2.2 A segunda causa: complementaridade .....	57
2.2.1 Contexto histórico: a primazia da matemática sobre a física para Heisenberg.....	58
2.2.2 A crítica de Bohr ao microscópio de raios- $\gamma$ no artigo de 1927 .....	61
2.2.3 A complementaridade .....	66
<b>3 CAPÍTULO III: AS INTERPRETAÇÕES DE HEISENBERG PARA SUAS RELAÇÕES DE INCERTEZA.....</b>	<b>75</b>
3.1 É confiável dividir as interpretações pela diferença terminológica? .....	76
3.2 A interpretação epistemológica .....	80
3.2.1 Da tese da perturbação incontrolável à interpretação epistemológica.....	83
3.2.2 Da primeira derivação à interpretação epistemológica.....	88
3.3 A interpretação ontológica .....	90
3.3.1 Da segunda derivação à interpretação ontológica .....	92
3.3.2 Função de onda como <i>potentia</i> .....	96
<b>4 CAPÍTULO IV: A DIVISÃO DO PENSAMENTO DE HEISENBERG A PARTIR DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA.....</b>	<b>104</b>
4.1 A procura por novos conceitos de espaço e tempo.....	108
4.2 A ressignificação operacionalista de posição e velocidade .....	110
4.3 A necessidade dos conceitos clássicos .....	113
4.4 Esboço de uma outra divisão em fases do pensamento de Heisenberg .....	122
4.4.1 Primeira fase: a inconstância na gênese das relações de incerteza.....	123

4.4.2 Segunda fase: o antirrealismo .....	129
4.4.3 Terceira fase: a primazia da teoria e a ontologia da <i>potentia</i> .....	132
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>143</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>147</b>

## INTRODUÇÃO

Ao se deparar com as relações de incerteza na literatura é difícil de imaginar que a pessoa curiosa, inclinada à filosofia e à ciência, não se intrigue e questione, mesmo que brevemente, aquilo que acabou de ler. Trata-se de uma relação física, matematicamente fundamentada, que estabelece que algo intuitivo é impossível: um objeto não pode possuir posição e velocidade bem definidos ao mesmo tempo. Na física clássica aprendemos que é possível medir essas duas variáveis com precisão arbitrária e simultaneamente, como fazemos ao estimar a velocidade de um carro. No entanto, um dos campos emergentes da física no começo do século XX, a física quântica, coloca em dúvida esse fato físico tão simples e intuitivo.

As origens das relações de incerteza remontam ao seminal artigo de Werner Karl Heisenberg, “*The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics*”, publicado em 1927. Nesse trabalho pioneiro, Heisenberg não apenas apresentou as relações de incerteza, mas também revolucionou a compreensão da realidade quântica, questionando os pilares da física clássica. Entretanto, em vez de esclarecer, a leitura desse artigo, assim como de outros textos do físico alemão, frequentemente torna a compreensão dessas relações ainda mais complexa. Heisenberg incorpora, ora implicitamente, ora explicitamente, uma dimensão filosófica às relações de incerteza, transitando por questões de cunho tanto epistemológico quanto ontológico. Ele examina, por exemplo, se as relações refletem os limites do conhecimento humano sobre a natureza ou se dizem respeito à própria natureza em si. Essa constante alternância entre perspectivas filosóficas sobre as relações de incerteza revela o caráter multifacetado e eclético do pensamento de Heisenberg.

Por vezes um defensor de que as relações de incerteza versam sobre as próprias partículas, como em partes das *Chicago Lectures*, por vezes defendendo que elas versam apenas sobre o conhecimento humano, como no artigo “*The Idea of Nature in Contemporary Physics*”, ou ainda na variação intensa quanto à derivação e à causa de suas relações, o pensamento de Heisenberg é tudo menos constante. Como Cassidy deixa claro em sua monumental biografia científica do físico, a inconstância no pensamento de Heisenberg permite vê-lo, enquanto indivíduo, como alguém sujeito a uma espécie de “princípio de incerteza” (1992b, p. X). Em cada obra parece que o físico altera suas ideias, defendendo pontos antagônicos aos anteriormente defendidos. Para um estudo estruturado de sua obra isso é problemático, pois gera constantes contradições, dificultando a construção de uma concepção de Heisenberg acerca

das relações de incerteza, ou, até mesmo, de uma interpretação coerente de sua visão acerca da mecânica quântica.

Isso nos leva a considerar chaves interpretativas alternativas para estudar seu pensamento. Uma possibilidade é abandonar a pretensão de um sistema monolítico e constante em prol de uma divisão em fases de seu pensamento. Em outras palavras, se for possível identificar e estabelecer fases distintas em sua obra, que não apresentem contradições internas, o problema interpretativo de sua inconstância pode ser superado. Assim, poderíamos identificar qual é a perspectiva de Heisenberg acerca das relações de incerteza, ou até mesmo da interpretação da mecânica quântica, em cada fase.

Embora a literatura identifique essa opção como possível, ainda não existe um estudo abrangente que explore o tema em detalhes. Cabral em sua tese aponta: “Não obstante tal relevância trata-se, ao que parece, de um problema [identificação das fases no pensamento de Heisenberg] ainda em aberto, e de um tema pouco discutido na literatura especializada, com carência, até onde sabemos, de publicações ou estudos com tratamentos rigorosos mais consolidados” (2019, p. 27). Cabral (2019) e Camilleri (2007b) chegaram a propor divisões do pensamento de Heisenberg, só que a primeira é vaga e a segunda se limita a um período muito específico. Diante disso, considerando a falta de literatura acerca do tema e a importância de compreender as ideias de um dos físicos mais influentes do século XX, esta dissertação propõe uma divisão do pensamento de Heisenberg baseada nas suas inconstâncias acerca das relações de incerteza.

Após definirmos o nosso motivo e objetivo, é necessário delimitarmos o escopo da pesquisa. Em consonância com a nossa proposta, optamos por analisar as relações apenas sob a perspectiva de Heisenberg. Em se tratando de uma relação complexa, a qual muitos físicos dispõem de conceitos sem o cuidado de defini-los precisamente, a inclusão da perspectiva de outros físicos sobre as relações de incerteza seria improdutiva, salvo aqueles que dialogavam diretamente com Heisenberg. Portanto, restringimos a literatura primária às obras de Heisenberg e àquelas de Bohr que se apresentaram como imprescindíveis para compreensão do desenvolvimento do físico alemão.

Devido à adoção das relações de incerteza como norte para a nossa divisão, nossa abordagem será essencialmente conceitual. Identificaremos cada fase do pensamento de Heisenberg com base em suas diferentes posições sobre derivação, causa e interpretação das relações de incerteza. Após definir e analisar essas posições, o aspecto histórico se torna relevante. Em termos gerais, nossa proposta é associar, na medida do possível, cada fase, cada recorte histórico, a um conjunto específico dessas posições, de modo a construir uma

perspectiva livre, ou o mais próximo possível, de contradições internas em cada fase. Dessa forma, podemos utilizar as diferentes posições adotadas por Heisenberg como “conceitos demarcadores”, permitindo mapear o desenvolvimento das suas ideias e identificar as rupturas em seu pensamento, o que, por fim, nos permitirá dividir sua obra em fases distintas.

Reconhecendo que as múltiplas derivações, causas e interpretações das relações de incerteza são pré-requisitos para a divisão em fases do pensamento de Heisenberg, estruturamos o trabalho de forma a definir e discutir esses conceitos antes de abordarmos a questão das fases. Assim, no primeiro capítulo, analisamos as duas derivações das relações de incerteza presentes na obra de Heisenberg: a derivação exemplificada por meio do microscópio de raios- $\gamma$  e a derivação extraída do formalismo de Dirac-Jordan. No segundo capítulo, adentramos a problemática discussão acerca das causas das relações, investigando a tese da perturbação incontrolável, e seus consequentes desdobramentos, e a complementaridade como as duas causas possíveis. No terceiro capítulo, exploramos as diferentes interpretações das relações de incerteza, com foco nas interpretações epistemológica e ontológica como consequências das derivações e causas discutidas anteriormente. Por fim, no quarto capítulo, discutimos brevemente as divisões de Cabral e Camilleri para, em seguida, apresentarmos nossa proposta de divisão do pensamento de Heisenberg em três fases.

O primeiro capítulo começa com uma análise do contexto histórico que precede o artigo de 1927 de Heisenberg. Focamos nos problemas interpretativos entre a mecânica de matrizes, descontínua, e a mecânica ondulatória, contínua, destacando as divergências entre Heisenberg e Schrödinger, com ênfase nos conceitos intuitivos (*anschaulich*). Por fim, abordamos o complexo problema dos conceitos de posição, velocidade e órbita à luz das novas relações de não comutação. Argumentamos que esse problema culminou na escrita do artigo de 1927. Prosseguimos apresentando uma definição geral das relações de incerteza, com foco nos aspectos físicos e matemáticos, minimizando conceitos que possam direcionar a uma interpretação específica. Em seguida, abordamos as duas derivações das relações de incerteza que Heisenberg propôs em 1927 e adotou ao longo de sua obra. A primeira derivação é feita por meio do microscópio de raios- $\gamma$ , que propõe um experimento mental com esse aparato para definir os limites de precisão na medida simultânea da posição e momentum de um elétron. Essa derivação é profundamente influenciada pelo operacionalismo que norteava o pensamento de Heisenberg na época. A segunda é a derivação direta das transformações de Dirac-Jordan, sendo uma consequência do formalismo. Argumentamos que essa derivação possui uma conexão tardia com a tese da impregnação teórica da observação que Heisenberg adotou a partir da década de 1950.

O segundo capítulo analisa as duas causas das relações de incerteza presentes na obra de Heisenberg. A primeira causa, proposta no artigo de 1927, é a tese da perturbação incontrolável. A segunda causa emerge na crítica de Niels Bohr ao artigo de 1927, sendo ela a complementaridade. Dada a complexidade e o escasso material em que Heisenberg aborda essa segunda causa, optamos por contextualizá-la. Dessa forma, o segundo capítulo também explora as diferentes perspectivas entre Heisenberg e Bohr e a crítica de Bohr ao experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ .

O terceiro capítulo foca nas interpretações de Heisenberg das relações de incerteza. Antes de aprofundarmos nas interpretações, examinamos o uso conceitual de Heisenberg. Devido à utilização dos termos *Ungenauigkeit* (inexatidão ou imprecisão) e *Unbestimmtheit* (indeterminação) indiscriminadamente, argumentamos que embasar a interpretação das relações de incerteza no uso conceitual de Heisenberg é problemático, pois falta precisão conceitual ao físico alemão. Em seguida, analisamos as interpretações epistemológica e ontológica como consequências das derivações e causas. Associamos a interpretação epistemológica das relações de incerteza, que propõe a limitação do conhecimento humano da natureza, à primeira derivação e à tese da perturbação incontrolável. Por outro lado, associamos a interpretação ontológica das relações de incerteza, que propõe uma indeterminação inerente à natureza, à segunda derivação e ao conceito de *potentia*.

Compreendidos os conceitos centrais que serão utilizados para demarcar o pensamento de Heisenberg, propomos no quarto capítulo uma divisão de seu pensamento em fases. Iniciamos examinando as propostas de Cabral (2019) e Camilleri (2007b), propondo uma expansão com base na divisão de Camilleri. A nossa proposta de divisão do pensamento de Heisenberg também divide sua obra em três fases. A primeira fase, denominada “a inconstância na gênese das relações de incerteza”, inicia em 1927, no artigo sobre as relações, e se estende até 1935. Essa fase é caracterizada pela inconstância de Heisenberg acerca das relações de incerteza. A segunda fase, denominada “o antirrealismo”, inicia em 1935 e termina em 1955. Essa fase é caracterizada pela interpretação epistemológica, com Heisenberg enfaticamente defendendo que as relações de incerteza limitam o conhecimento humano da natureza. A terceira fase, denominada “a primazia da teoria e a ontologia da *potentia*”, inicia em 1955 e se estende até a morte de Heisenberg. Essa fase é caracterizada pela interpretação metafísica da tese da impregnação teórica da observação e a *potentia*, com Heisenberg adotando a posição filosófica de que a teoria precede a realidade.

## 1. CAPÍTULO I: AS DUAS DERIVAÇÕES DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA

Neste capítulo vamos abordar as duas derivações das relações de incerteza apresentadas por Heisenberg e seus fundamentos filosóficos. Apresentaremos, também, o contexto histórico que influenciou a formulação dessas relações, destacando os problemas interpretativos que Heisenberg enfrentava no desenvolvimento da mecânica quântica na época. Por fim, analisaremos uma possível contradição no artigo de 1927 entre os fundamentos filosóficos que geralmente são atribuídos ao físico alemão.

No contexto das três inconsistências de Heisenberg acerca das relações de incerteza que este trabalho se propõe a analisar, aquela relativa às derivações se apresenta como um pré-requisito para as demais. Isso ocorre porque cada derivação implica em uma interpretação diferente das relações de incerteza. Por essa razão, é necessário analisar as duas derivações das relações de incerteza apresentadas por Heisenberg no famoso artigo *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik* de 1927.

A primeira derivação está relacionada ao processo de medição e é exemplificada por meio do microscópio de raios- $\gamma$ . A segunda derivação é resultado de uma prova teórica diretamente extraída das transformações de Dirac-Jordan. Uma porção expressiva da literatura, especialmente aquela focada na história das relações de incerteza, discute apenas a primeira derivação relacionada ao microscópio de raios- $\gamma$  e ao chamado efeito Compton. Consideramos, entretanto, que a segunda derivação extraída diretamente do formalismo não apenas está presente na obra de Heisenberg, mas deve ser também considerada por ser uma ferramenta explicativa valiosa do seu pensamento com profundas implicações filosóficas.

Antes de adentrar nas derivações em si, faz-se necessário um recuo histórico a fim de compreender o contexto em que o artigo foi escrito. O objetivo não é uma discussão exaustiva dos primeiros anos da mecânica quântica, mas sim salientar os acontecimentos e descobertas relevantes que afetaram Heisenberg em seu caminho até as relações de incerteza. Essa breve gênese será valiosa para a compreensão não só da estrutura do artigo de 1927, mas, especialmente, para a compreensão das posições filosóficas adotadas pelo físico.

### 1.1. Gênese das relações de incerteza: o período anterior a 1927

A partir do trabalho revolucionário de Planck com a radiação do corpo negro, e suas consequências para o conceito de energia, gradualmente os físicos perceberam que seria

necessária uma mudança radical nas explicações da física clássica. A noção da energia como um fluxo contínuo foi substituída pela ideia de pacotes discretos, os chamados “quanta”. Desta forma, passe-se a pensar a energia de maneira quantizada, isto é, ela é emitida e absorvida em quantidades discretas, abrindo mão da continuidade tão fundamental nos sistemas clássicos. Nas palavras de Heisenberg:

A ideia de que a energia poderia ser emitida ou absorvida apenas em quantas discretos de energia era tão nova que não podia ser encaixada no quadro tradicional da física. Uma tentativa de Planck de reconciliar sua nova hipótese com as leis antigas da radiação falhou nos pontos essenciais. Demorou cinco anos até que o próximo passo pudesse ser dado na nova direção. (HEISENBERG, 1958a, p. 32, tradução nossa)<sup>1</sup>.

Einstein foi um dos primeiros autores a adotar a ideia dos quanta para explicar os fenômenos físicos, em particular o efeito fotoelétrico, que se refere à emissão de elétrons por um material após ser exposto à luz. A explicação fornecida por Einstein é que a luz deve se comportar de acordo com a ideia de Planck, sendo composta por *quanta* de energia. Dessa forma, Einstein chegou à noção de “quanta de luz” ou fóton, indicando que não somente a energia, mas também a luz é quantizada. A energia desse quantum de luz deve ser igual ao produto da frequência da luz pela constante de Planck, ou seja, a energia do quantum de luz é dada pela fórmula:  $E = h\nu$  (HEISENBERG, 1958a, p.32). Essa simples equação está na base da chamada “dualidade onda-partícula” e será central nas críticas que Bohr vai endereçar ao artigo de 1927 de Heisenberg.

As ideias de Planck sobre a radiação do corpo negro e Einstein sobre o efeito fotoelétrico estão associadas a uma interpretação corpuscular dos fenômenos quânticos, pois, afinal de contas, energia e luz concebidas como “pacotes” são como partículas. Essa interpretação ganhou ainda mais força após a descoberta do efeito Compton, realizada independentemente por Arthur Holy Compton e Peter Debye em 1922. De acordo com Mehra (1987, p. 466), o efeito Compton explica o espalhamento do quantum de luz após colidir com um elétron, resultando em um recuo (*recoil*) do elétron e na conservação tanto da energia quanto do *momentum* nos processos atômicos individuais. Em outras palavras, nota-se que há uma colisão entre o elétron e o fóton utilizado para iluminá-lo, fazendo com que ocorra um recuo do primeiro e uma troca de energia e *momentum* no processo. A relevância da descoberta do efeito Compton,

---

<sup>1</sup> *The idea that energy could be emitted or absorbed only in discrete energy quanta was so new that it could not be fitted into the traditional framework of physics. An attempt by Planck to reconcile his new hypothesis with the older laws of radiation failed in the essential points. It took five years until the next step could be made in the new direction.*

no contexto dessa gênese, é que ela corrobora a ideia dos quanta de luz, fortalecendo a explicação corpuscular dos fenômenos quânticos (BOHR, 2017 [1949]<sup>2</sup>, p. 47; MEHRA, 1987, p. 466).

Apesar do forte apelo à interpretação corpuscular dos fenômenos quânticos, Bohr continuou, contudo, a buscar uma explicação ondulatória para o efeito Compton e demais fenômenos, que culminou na chamada teoria BKS, desenvolvida por Bohr, Kramers e Slater em 1924. Não cabe ao nosso escopo uma explicação completa da BKS<sup>3</sup>, mas, em geral, a teoria procurava abandonar a estrutura quântica da radiação apresentada por Einstein em favor de uma abordagem totalmente probabilística e ondulatória (MEHRA, 1987, p. 466). Nela, as Leis da conservação da energia e *momentum* eram apenas estatísticas. Dessa maneira, a teoria BKS propunha um afastamento da visão corpuscular expressada pelos quanta, procurando explicar os fenômenos quânticos por meio do recurso ao “oscilador virtual” de maneira a tornar a teoria totalmente ondulatória<sup>4</sup> e contínua.

No contexto da gênese do artigo de 1927, a teoria BKS é importante, pois, segundo Cassidy (1992b, p. 187), Heisenberg se converteu totalmente a ela em 1924. Entretanto, apesar da sua conversão e dos seus esforços para aprimorar a BKS com Kramers<sup>5</sup>, esse entusiasmo foi efêmero. Estudos experimentais relacionados ao efeito Compton mostraram não haver violação das leis de conservação em colisões individuais, de forma que a teoria BKS teve que ser abandonada (1992b, p. 194). Nas palavras de Mehra: “este simples resultado representou o fim da teoria da radiação de Bohr, Kramers e Slater e o triunfo da conservação estrita da energia e *momentum* em processos atômicos individuais e seu veículo, o quantum de luz.” (1987, p. 467, tradução nossa)<sup>6</sup>. O trabalho de Heisenberg na teoria BKS, juntamente com a sua dissolução pelos resultados experimentais, é o pontapé para o empreendimento posterior na mecânica de matrizes (CASSIDY, 1992b, p. 188).

---

<sup>2</sup> Devido a relevância da data de publicação de grande parte da bibliografia primária, será identificado a data original de publicação das obras de Bohr e Heisenberg entre colchetes. Os casos em que a publicação é oriunda de alguma conferência ou conjunto de aulas prévias à publicação, e a informação se faz relevante a discussão, serão identificados por meio de notas.

<sup>3</sup> Uma explicação completa da BKS, junto ao contexto histórico, pode ser encontrada em Cassidy (1992b, p. 185-194).

<sup>4</sup> É importante pontuar uma mudança no pensamento de Bohr afim de não criar confusão. Entre 1924 e 1925, no contexto da BKS, Bohr rejeitava tanto um dualismo onda-partícula quanto a própria interpretação corpuscular (CASSIDY, 1992b, p. 194). É apenas entre 1927 e 1928 que o dinamarquês vai defender com afinco a dualidade.

<sup>5</sup> Em 1925 Heisenberg e Kramers publicaram o artigo *Über die Streuung von Strahlung durch Atome* na *Zeitschrift für Physik*. Segundo Cassidy (1992b, p. 188), esse artigo é a coroação da BKS.

<sup>6</sup> *This simple result represented the demise of the radiation theory of Bohr, Kramers and Slater, and the triumph of the strict energy-momentum conservation in individual atomic processes and its vehicle, the light-quantum.*

Após um curto período trabalhando com Bohr, em Copenhague, Heisenberg retornou à Göttingen em 1925, onde ele, Born e Jordan desenvolveram a mecânica de matrizes. Com a dissolução da BKS, crescia a necessidade de uma nova explicação para os fenômenos quânticos. Heisenberg recorda que Born, na época, salientou a necessidade de revisar e substituir a mecânica clássica por uma nova mecânica que desse conta dos novos fenômenos (HEISENBERG, 1973a [1972], p. 268). O primeiro passo dessa nova mecânica foi dado pelo próprio Heisenberg, em 1925, no artigo *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*. Ainda que esse artigo não apresente propriamente o formalismo em termos de matrizes, Cassidy (1992b, p. 197) sintetiza esse trabalho inicial em direção à sua formulação em três etapas. A primeira consiste na reinterpretação das equações cinemáticas espaço-temporais clássicas, utilizando apenas as propriedades observáveis da radiação emitida por osciladores virtuais. Essa reformulação sugeriu a reescrita das equações clássicas em função das frequências e amplitudes em vez da posição e velocidade do elétron (HEISENBERG, 1958a, p. 39, 1983a [1975]<sup>7</sup>, p. 45). A segunda etapa, que evidencia o caminho filosófico trilhado por Heisenberg em sua juventude científica, faz do critério positivista de observabilidade um postulado da teoria. Em outras palavras, aquilo que pode ser observado deve ser considerado como parâmetro explícito da formulação teórica. A terceira e última etapa abandona totalmente o conceito de órbitas mecânicas (1992b, p. 197), o que vai ser central no argumento do artigo de 1927.

A partir dos resultados obtidos por Heisenberg, progressos significativos na mecânica de matrizes foram apresentados por Born e Jordan no artigo *Zur Quantenmechanik*<sup>8</sup> de 1925. O primeiro avanço foi a introdução das próprias matrizes na explicação de Heisenberg. Born percebeu que as complexas deduções e tabelas matemáticas que Heisenberg utilizou em seu artigo eram simplesmente cálculo matricial (HEISENBERG, 1983a [1975], p. 45) — área da matemática não utilizada na física da época. O segundo avanço, que foi também introduzido independentemente por Dirac, foi a ideia, inata às matrizes, de não comutação entre posição e *momentum*. Segundo Heisenberg (1983a [1975], p. 45), a mecânica de matrizes permitiu

---

<sup>7</sup> Se faz necessário esclarecer uma possível confusão com as datas. Diversas obras de Heisenberg são compilados de artigos e conferências, de maneira que a data de publicação do livro não captura a real data em que o texto foi produzido. Esses compilados são: *Philosophic problems of Nuclear Science* (1966 [1935]), *The Physicist's Conception of Nature* (1958b [1955]), *Across the Frontiers* (1974 [1971]) e *Encounters with Einstein* (1983a [1977]). Considerando essa informação, preferimos citar a data do artigo ou conferência específica entre parênteses quando alguma dessas obras forem citadas.

<sup>8</sup> De acordo com Heisenberg, essa é a primeira instância em que o termo “mecânica quântica” aparece (1983a [1975], p. 43). Nos artigos prévios o tema era descrito como “teoria quântica”.

expressir de modo consistente e claro a relação central da mecânica quântica,  $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$ , possibilitando uma teoria sistemática da mecânica quântica como um todo.

A consolidação da mecânica de matrizes veio ainda em 1925 no famoso *Dreimännerarbeit* — intitulado *Zur Quantenmechanik II* — de Born, Heisenberg e Jordan. Nele, os autores estenderam o formalismo do primeiro artigo, *Zur Quantenmechanik*, para incluir sistemas degenerados e perturbados de qualquer grau de liberdade (CASSIDY, 1992b, p. 206), ao mesmo tempo que procuraram esclarecer o novo terreno matemático das matrizes que havia sido introduzido na física. Sendo assim, em novembro de 1925, o formalismo matemático da mecânica de matrizes se consolidou, tornando-se capaz de explicar uma gama de fenômenos quânticos.

Concomitante ao desenvolvimento da mecânica de matrizes, Schrödinger propôs um outro formalismo matemático capaz de explicar os fenômenos quânticos: a mecânica ondulatória. Fundamentando suas ideias nas ondas materiais de Louis de Broglie, o físico vienense explicou os estados estacionários do hidrogênio por meio dos autoestados da sua equação de onda (HEISENBERG, 1958a, p. 39). Por um curto período, em 1926, algo em torno de dois meses, segundo Cassidy (1992b, p. 214), houve dois formalismos matemáticos independentes capazes de explicar os fenômenos quânticos.

Essa independência matemática das duas mecânicas durou pouco, uma vez que Schrödinger e Pauli<sup>9</sup> provaram, de forma independente, a equivalência matemática entre os dois formalismos. Por conseguinte, os resultados matemáticos obtidos por meio das complexas matrizes eram idênticos aos obtidos pelos métodos mais acessíveis da função de onda de Schrödinger (BOHR, 2017 [1949], p. 49). A propósito disso Heisenberg escreveu: “a equivalência matemática entre mecânica de matrizes e mecânica ondulatória havia sido demonstrada por Schrödinger, a consistência do esquema matemático dificilmente podia ser duvidada; mas a interpretação física desse formalismo ainda era bastante controversa.” (1977 [1975], p. 3, tradução nossa)<sup>10</sup>. Em outras palavras, havia dois formalismos matemáticos consistentes e equivalentes para explicar os mesmos fenômenos quânticos, contudo, ainda faltava uma interpretação física clara, uma maneira de lidar com os vários paradoxos, como o caso da própria dualidade.

<sup>9</sup> Apenas Schrödinger publicou seus resultados. A prova de Pauli existe apenas em cartas (HEISENBERG, 1983a [1975], p. 50).

<sup>10</sup> *The mathematical equivalence of matrix mechanics and wave mechanics had been demonstrated by Schrödinger, the consistency of the mathematical scheme could scarcely be doubted; but the physical interpretation of this formalism was still quite controversial.*

O comentário de Cassidy elucidava bem a situação: “ao contrário de várias situações semelhantes, nas quais os cientistas devem se virar sem uma teoria, agora eles tinham *teorias demais*. Todos reconheciam que agora um único formalismo e uma única interpretação eram necessários” (1992b, p. 231, tradução nossa, grifo nosso)<sup>11</sup>. Observa-se, portanto, que a equivalência matemática entre a mecânica de matrizes e a mecânica ondulatória representou uma situação atípica na física teórica. Havia explicações matemáticas de sobra para os fenômenos, sendo necessário encontrar uma interpretação física unificada para os mesmos.

Embora, como fica claro pelas citações de Heisenberg e Cassidy, a busca por uma interpretação unificada fosse urgente, cada formalismo trazia consigo uma vasta bagagem interpretativa. O problema, colocando-o mais claramente, é que por mais que matematicamente os formalismos fossem equivalentes, suas interpretações eram contraditórias. Sendo assim, mesmo sendo matematicamente equivalentes e fornecendo os mesmos resultados, a mecânica de matrizes e a mecânica ondulatória sugeriam uma compreensão do mundo quântico totalmente distintas. Para elucidar a notória discrepância entre as interpretações, torna-se interessante a análise dos dois encontros que Heisenberg teve com Schrödinger em 1926.

O primeiro desses encontros ocorreu em uma conferência realizada por Schrödinger em Munique, durante a qual o físico vienense apresenta sua mecânica ondulatória contínua e, na sua concepção, *anschaulich* (intuitivo/visualizável). Nas palavras de Heisenberg: “Naquela época, Schrödinger considerava suas ondas como ondas-materiais verdadeiramente tridimensionais — comparáveis, por exemplo, às ondas eletromagnéticas — e queria eliminar totalmente as características descontínuas da teoria quântica, especialmente os chamados saltos quânticos” (1989 [1975], p. 51, tradução nossa)<sup>12</sup>. Nessa citação é possível identificar duas críticas de Heisenberg à mecânica ondulatória: a pretensão a ser intuitiva (*anschaulich*) e a desconsideração do caráter descontínuo, que é essencial na mecânica de matrizes.

Em relação à pretensão de visualização, Heisenberg argumentou que uma teoria que trabalha primariamente no espaço de configuração abstrato de muitas dimensões não pode ser considerada “intuitiva”. Segundo o físico, não é possível considerar a função de onda não tridimensional, que é a principal ferramenta explicativa e o coração da mecânica ondulatória, como intuitiva (*anschaulich*). Para um conceito ser intuitivo ele precisa ser concebível no espaço tridimensional da percepção ordinária. Essa repulsão à visualização da mecânica

---

<sup>11</sup> *Unlike most similar situations, in which scientists must make do without a theory, they now had one too many. Everyone recognized that a single formalism and a single interpretation were now needed.*

<sup>12</sup> *Schrödinger at that time regarded his waves as true three-dimensional matter-waves — comparable, say, to electromagnetic waves — and wanted to eliminate entirely the discontinuous features of quantum theory, especially the so-called quantum jumps.*

ondulatória fica clara em uma carta a Pauli, na qual Heisenberg classificou tal pretensão como uma “bobagem” (*Mist*) (HEISENBERG, 1979 [1926], p. 328). É crucial pontuar que Schrödinger também sustentava a posição de que a teoria rival, neste caso a mecânica de matrizes, era não intuitiva (*unanschaulich*). Para o vienense, uma teoria descontínua é essencialmente irracional e não intuitiva (CASSIDY, 1992b, p. 233). Sendo assim, as críticas mútuas sobre o caráter não intuitivo (*unanschaulich*) das teorias evidenciam as diferentes concepções entre eles. Para Heisenberg, a mecânica ondulatória não é intuitiva pois não pode ser concebida no espaço tridimensional da experiência cotidiana, enquanto para Schrödinger o caráter não intuitivo emerge das descontinuidades da mecânica de matrizes.

A segunda crítica sobre a desconsideração do caráter descontínuo é central para compreender o problema interpretativo entre as duas alternativas e demanda uma análise mais cuidadosa. É profícuo começar examinando a brilhante explicação feita por Cassidy das posições interpretativas adotadas por cada lado:

Enquanto os fundadores da mecânica de matrizes salientaram a existência dos saltos quânticos e dos elementos de descontinuidade, o positivismo e a falta de visualização dos movimentos atômicos, e a substituição das variáveis clássicas contínuas por matrizes de elementos discretos, Schrödinger empreendeu exatamente o oposto: ‘um passo da mecânica clássica de pontos em direção a uma teoria contínua’. Embora ele tenha argumentado que sua teoria era fundamentada em um campo contínuo, a função  $\Psi$ , essa existe em um espaço de configuração abstrato e multidimensional — no caso, não é o espaço de três ou quatro dimensões do nosso cotidiano. Ele acreditava que sua teoria retornava a física quase à sua visualização clássica (CASSIDY, 1992b, p. 214, tradução nossa)<sup>13</sup>.

Observa-se que os adeptos da mecânica de matrizes defendiam veementemente o caráter descontínuo da sua teoria. Os saltos quânticos — a transição descontínua de energia entre níveis estacionários — estão no coração da mecânica de matrizes. Por outro lado, a mecânica ondulatória defendia que era possível explicar os fenômenos quânticos sem a necessidade da descontinuidade, postulando uma teoria contínua. Schrödinger, em particular, buscou abolir os saltos quânticos da mecânica quântica. A segunda crítica de Heisenberg é focada exatamente nessa supressão da descontinuidade, argumentando que ao renunciar aos efeitos teóricos quânticos, Schrödinger era incapaz de se adequar aos fatos, não sendo capaz de explicar o efeito

---

<sup>13</sup> *While the founders of matrix mechanics stressed the existence of quantum jumps and the elements of discontinuity, positivism and lack of visualization of atomic motions, and the substitution of matrices of discrete elements for classical continuous variables, Schrödinger attempted just the opposite: “a step from classical point mechanics towards a continuum theory.” He argued that his theory was based on a continuous field, the  $\Psi$  function, albeit existing in an abstract, multidimensional configuration space — not our everyday space of three or four dimensions. He believed that his theory returned physics almost to its classical visualizability.*

fotoelétrico, as colisões de Franck-Hertz, ou o efeito Stern-Gerlach (CASSIDY, 1992b, p. 220; MEHRA, 1987, p. 483). Na verdade, a situação, segundo Heisenberg, era ainda mais drástica: sem a consideração da descontinuidade tornava-se impossível explicar a própria Lei da Radiação de Planck (HEISENBERG, 2016 [1969], p. 90, 1989 [1975], p. 51).

Fica assim evidente que a crítica de Heisenberg à mecânica ondulatória é puramente interpretativa. Heisenberg não aponta nenhum problema com o formalismo em si, muito pelo contrário, ele até utilizou o formalismo da mecânica ondulatória devido a sua simplicidade matemática em comparação com a mecânica de matrizes. O foco interpretativo fica explícito na entrevista que o físico concede a Kuhn na década de 60:

Eu estava preocupado com a teoria de Schrödinger porque senti que uma interpretação completamente equivocada poderia ser discutida, ao passo que ela provavelmente induziria muitas pessoas a acreditarem que poderiam retornar aos modos antigos. [...] Eu utilizei a técnica de Schrödinger com muito prazer, por exemplo, no caso do hélio. Entretanto, eu estava muito receoso acerca da interpretação. Então, lembro-me de uma carta que escrevi para Pauli, na qual afirmei: ‘Bem, a abordagem de Schrödinger é, obviamente, extremamente útil para cálculos matemáticos, contudo, eu não acredito em sequer uma palavra da sua interpretação física’. Eu estava muito chateado com a sua forma de interpretar as coisas (HEISENBERG, 1963, p. 32, tradução nossa)<sup>14</sup>.

Essas críticas interpretativas de Heisenberg se tornaram o tema central das investigações em Copenhague, em 1926, ao passo que um segundo encontro entre Heisenberg e Schrödinger veio a ocorrer lá. Após a conferência de Munique, Heisenberg escreve a Bohr sobre o encontro, o que impulsionou um convite de Bohr a Schrödinger para lecionar sobre sua mecânica ondulatória em Copenhague (HEISENBERG, 1967 [1964], p. 103). O físico austríaco aceitou o convite e chegou em Copenhague em outubro de 1926. Por mais que, majoritariamente, as discussões tenham ocorrido entre Schrödinger e Bohr, estavam presentes, nessas conferências, e consequentes discussões, Heisenberg, Oskar Klein e Paul Dirac (MEHRA, 1987, p. 483-484).

O cerne das discussões neste segundo encontro foi a questão dos saltos quânticos. Schrödinger manteve sua posição, atacando veementemente tal anomalia. Bohr<sup>15</sup>, por sua vez,

---

<sup>14</sup> *I was worried about the Schrodinger theory in the sense that I felt now an entirely wrong interpretation may come into a discussion and will probably induce many people to believe they could go back to the old thing. [...] I used the Schrödinger technique with great pleasure, for instance in the helium case. But I was very much afraid of the interpretation. So I remember one letter which I wrote to Pauli where I said “Well, Schrodinger’s approach is, of course, extremely useful to do mathematics, but of his physical interpretation, I don’t believe a single word.” I was very upset about his way of interpreting things.*

<sup>15</sup> Infelizmente, como Mehra avidamente aponta (1987, p. 484), não há atas, anotações ou qualquer registro dessas conferências na época. Todo o material disponível sobre esse encontro foi redigido por Heisenberg anos depois

adotou a mesma postura de Heisenberg, admitindo que as críticas de Schrödinger eram possíveis, contudo, recusando-se a abandonar os saltos quânticos devido a sua centralidade na mecânica de matrizes. Nas palavras que Heisenberg atribui a Bohr: “[...] nem mesmo a Lei de Planck poderia ser compreendida sem os saltos quânticos” (1955, p. 14, tradução nossa)<sup>16</sup>. Nota-se que tanto Heisenberg quanto Bohr defendiam que sem as descontinuidades não é possível explicar o fundamento da mecânica quântica, a Lei de Planck. Embora as discussões foram constantes durante a visita, nenhuma posição interpretativa comum foi encontrada, reforçando o abismo interpretativo entre os dois formalismos.

A análise das discussões ocorridas nesses dois encontros acerca da descontinuidade e da equivalência entre os dois formalismos matemáticos revela que o problema-chave na mecânica quântica no final de 1926 era a interpretação. Não havia necessidade de uma mudança na estrutura matemático-formal da teoria, mas sim na maneira de conectar livre de contradição a matemática aos experimentos. O problema maior residia, assim, na interpretação física do formalismo (HEISENBERG, 1967 [1964], p. 105). Essa busca interpretativa se tornou o foco dos cientistas no instituto de Bohr em Copenhague, ao ponto de Heisenberg salientar que o tema apareceu em todas as suas conversas com Bohr na época (HEISENBERG, 2016 [1969], p. 93). Por conseguinte, como bem resumiu Cassidy, a procura por uma interpretação física do formalismo que incluísse as descontinuidades se tornou essencial no instituto de Bohr (CASSIDY, 1992b, p. 229).

O problema interpretativo era acentuado pela utilização dos conceitos de “posição”, “velocidade” e “órbita”. Por mais que esses conceitos fossem cruciais na representação do formalismo, sua rejeição estava na base da mecânica de matrizes. Retomando a brevemente citada relação de não comutação,  $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$ , observa-se que, se os conceitos acima fossem utilizados na mecânica quântica, eles não poderiam reter seu significado clássico (JAMMER, 1966, p. 324). Considerando uma definição clássica para os conceitos de posição e velocidade, não faz sentido afirmar, como é feito na mecânica de matrizes, que a ordem dos fatores em uma multiplicação fornece resultados diferentes. Disso deriva a seguinte questão: como é possível interpretar o novo formalismo? Em outras palavras, como estabelecer uma correspondência entre os símbolos matemáticos abstratos da mecânica de matrizes com os conceitos intuitivos (*anschaulich*) da física clássica?

---

(1955, p. 14-15, 1963, VIII, 1967 [1964], p. 102-104, 1989 [1975], p. 51-52, 2016 [1969], p. 89-93). Sendo assim, é relevante manter em mente que essas são as palavras de Bohr reconstruídas por Heisenberg.

<sup>16</sup> [...] not even Planck's Law could be understood without the quantum jumps.

Após as conferências, nos meses que antecederam o artigo de 1927, Heisenberg intensifica sua atenção aos problemas interpretativos, em especial aqueles relacionados aos conceitos de posição, velocidade e órbita. O jovem físico se debruçou inúmeras vezes sobre eles, tentando em especial dar um sentido para o conceito de trajetória ou órbita. Ele assim indaga: “por exemplo, observamos um elétron em uma câmara de nuvem se movendo em uma certa direção com uma certa velocidade; como esse fato deve ser expresso na linguagem matemática da mecânica quântica [?].” (HEISENBERG, 1977 [1975], p. 4, tradução nossa)<sup>17</sup>. No caso descrito por Heisenberg a trajetória do elétron podia ser observada nas câmaras de nuvem, contudo, o formalismo matemático não era capaz de explicar esse simples fenômeno. Essa incapacidade decorre do fato de que o conceito de trajetória não existe na mecânica de matrizes nem na mecânica ondulatória (HEISENBERG, 1989 [1975], p. 50). Em outras palavras, mesmo detendo o poderoso e completo esquema matemático, os físicos não conseguiam explicar a simples trajetória do elétron observada nos instrumentos.

Ao examinar a correspondência entre Pauli e Heisenberg, a preocupação de Heisenberg com os problemas interpretativos é evidente. Em particular, em uma carta datada de 19 de outubro de 1926, Pauli apresentou para Heisenberg sua ideia do “ponto obscuro” (*dark point*), que se aproximava do que mais tarde seriam as relações de incerteza. Pauli, estudando o problema de dois elétrons colidindo, notou que quando eles estão distantes um do outro, sua posição e *momentum* se comportam de acordo com a teoria clássica, mas, quando se aproximam, como em uma colisão ou no átomo, seu comportamento quântico manifesta um “ponto obscuro” (CASSIDY, 1992b, p. 232). A intuição de Pauli era a de que se o *momentum* “p” é controlado, a posição “q” necessariamente deve ser incontrolada, de maneira que não é possível falar em uma trajetória definida da partícula nem de valores simultâneos para posição e *momentum* (CASSIDY, 1992a, p. 110, 1992b, p. 232-233, 2009, p. 165). O ponto obscuro, portanto, seria essa impossibilidade de controlar a posição e *momentum* quando dois elétrons se aproximam. Tal ideia pode ser pensada como precursora das relações de incerteza.

Em outra carta de Heisenberg para Pauli, de 28 de outubro de 1926, ele comenta que, devido à relação de não comutação, não faz sentido falar “do lugar” de uma partícula com velocidade definida. (JAMER, 1966, p. 325-326; MEHRA, 1987, p. 491). Essas trocas de correspondência indicam que tanto Heisenberg quanto Pauli estavam trabalhando intensamente para resolver os problemas interpretativos que a mecânica de matrizes enfrentava na época, com atenção especial ao problema da trajetória.

---

<sup>17</sup> E.g. we observe an electron in a cloud chamber moving in a certain direction with a certain velocity; how should this fact be expressed in mathematical language of quantum mechanics.

A solução para esses problemas interpretativos foi esboçada em uma longa carta datada de 23 de fevereiro de 1927, enviada por Heisenberg a Pauli. Nessa carta, considerando a ideia do ponto obscuro e as discussões prévias sobre o assunto, Heisenberg defendeu que a interpretação da relação de não comutação seria que o *momentum* “p” é totalmente indeterminado (*unbestimmt*), enquanto a localização, ou posição, “q” é determinada (HEISENBERG, 1979 [1927], p. 376; MEHRA, 1987, p. 493). Ora, se o ponto obscuro já se aproximava das relações de incerteza, essa carta é a base, praticamente o manuscrito, para a escrita do artigo de 1927.

Atendo-se ao artigo de 1927, é evidente a preocupação de Heisenberg com os conceitos de posição, velocidade e trajetória. Logo na primeira página do artigo, o autor destaca que:

A interpretação física da mecânica quântica ainda está cheia de discrepâncias internas, que se manifestam em argumentos sobre continuidade versus descontinuidade e partícula versus onda. A partir dessa circunstância, é possível concluir que nenhuma interpretação da mecânica quântica que empregue conceitos cinemáticos e mecânicos ordinários é possível. [...]. Além disso, como esse empreendimento parece ter sido bem-sucedido, o esquema matemático da mecânica quântica não precisa de revisão. Igualmente, uma revisão da geometria espaço-temporal em pequenas distâncias é desnecessária [...]. Entretanto, parece que uma consequência direta das equações básicas da mecânica quântica é a necessidade de uma revisão dos conceitos cinemáticos e mecânicos. Quando uma massa definida  $m$  é dada, é perfeitamente compreensível falar em nossa física cotidiana da posição e velocidade do centro de gravidade dessa massa. Todavia, na mecânica quântica a relação  $pq - qp = i\hbar$  entre massa, posição e velocidade é considerada válida. *Consequentemente, temos boas razões para suspeitar de todos os usos não críticos das palavras ‘posição’ e ‘velocidade’* (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 63, tradução nossa, grifo nosso)<sup>18</sup>.

Nessa passagem, fica condensado todo o contexto histórico discutido anteriormente. É notável a enorme preocupação de Heisenberg com a interpretação da mecânica quântica. Ele em especial, faz referência, mesmo que implicitamente, às oposições: a mecânica de matrizes descontínua e a mecânica ondulatória contínua. O esquema matemático é considerado consistente pelo autor, com ele reafirmando que não era necessária uma revisão do formalismo

---

<sup>18</sup> *The physical interpretation of quantum mechanics is still full of internal discrepancies, which show themselves in arguments about continuity versus discontinuity and particle versus wave. Already from this circumstance one might conclude that no interpretation of quantum mechanics is possible which uses ordinary kinematical and mechanical concepts. [...]. Moreover, as this enterprise seems to have succeeded, the mathematical scheme of quantum mechanics needs no revision. Equally unnecessary is a revision of space-time geometry at small distances [...]. But that a revision of kinematical and mechanical concepts is necessary seems to follow directly from the basic equations of quantum mechanics. When a definite mass  $m$  is given, in our everyday physics it is perfectly understandable to speak of the position and the velocity of the center of gravity of this mass. In quantum mechanics, however, the relation  $pq - qp = i\hbar$  between mass, position and velocity is believed to hold. Therefore, we have good reason to become suspicious every time uncritical use is made of the words “position” and “velocity”.*

e reforçando que o problema era interpretativo. Por fim, o tópico central da citação é a necessidade, fruto da relação de não comutação, de uma revisão dos conceitos cinemáticos e mecânicos, em particular dos conceitos de posição e velocidade. Por consequência, como Camilleri salienta, torna-se necessário compreender o artigo de 1927 dentro do contexto das inquietações de Heisenberg na época, essas evidenciadas nas cartas trocadas com Pauli (CAMILLERI, 2007b, p. 184).

Para além da revisão dos conceitos de posição e velocidade, nota-se que, no artigo de 1927, Heisenberg reitera sua preocupação com o conceito de trajetória<sup>19</sup>. No entanto, diferente dos textos anteriores, nos quais o autor não sabia como explicar a observação da trajetória de um elétron em uma câmara de nuvem, no artigo de 1927 é apresentada uma explicação para a ausência do conceito na mecânica quântica:

Quando se admite que discontinuidades são, de alguma forma, típicas de processos que ocorrem nas pequenas regiões e em curtos períodos, então, uma contradição entre os conceitos de ‘posição’ e ‘velocidade’ é bem plausível. Se se considera, por exemplo, o movimento de uma partícula em uma dimensão, então na teoria contínua será possível desenhar (Figura 1) uma linha de mundo  $x(t)$  para a trajetória da partícula (mais precisamente, seu centro de gravidade), a tangente da qual fornece a velocidade em cada instante. Em contraste, em uma teoria fundamentada na discontinuidade, no lugar dessa curva haveria uma série de pontos separados finitamente (Figura 2). Nesse caso, é claramente sem sentido falar sobre a velocidade em uma posição (1) porque a velocidade só pode ser definida por duas posições e (2), inversamente, porque qualquer ponto é associado a duas velocidades (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 63, tradução nossa)<sup>20</sup>.

A figura que Heisenberg menciona na citação é a seguinte:

---

<sup>19</sup> É relevante registrar que Heisenberg demonstra sua preocupação com o conceito de trajetória em vários momentos de sua obra. Dois exemplos são nas *Chicago Lectures* (1949 [1930], p. 32-33) e em *A parte e o Todo* (2016 [1969], p. 95).

<sup>20</sup> *When one admits that discontinuities are somehow typical of processes that take place in small regions and in short times, then a contradiction between the concepts of “position” and “velocity” is quite plausible. If one considers, for example, the motion of a particle in one dimension, then in continuum theory one will be able to draw (Fig. 1) a worldline  $x(t)$  for the track of the particle (more precisely, its center of gravity), the tangent of which gives the velocity at every instant. In contrast, in a theory based on discontinuity there might be in place of this curve a series of points at finite separation (Fig. 2). In this case it is clearly meaningless to speak about one velocity at one position (1) because one velocity can only be defined by two positions and (2), conversely, because any one point is associated with two velocities.*

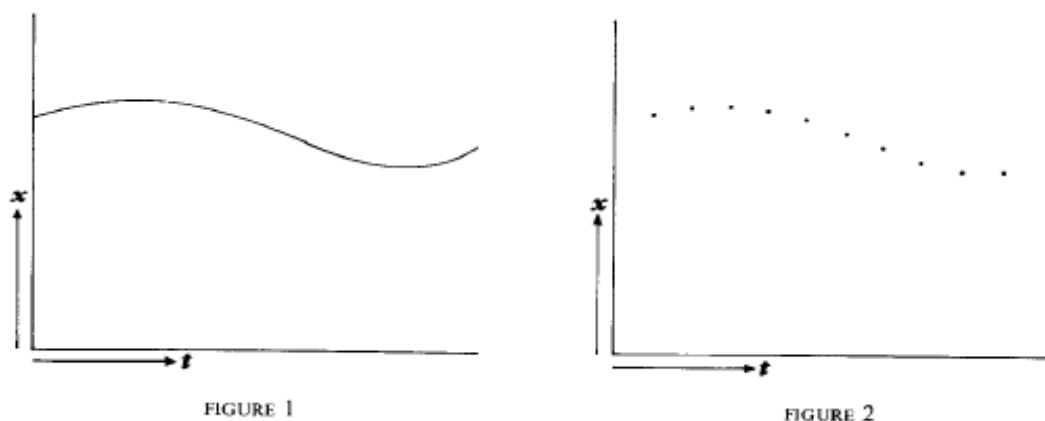


Figura 1: Movimento de uma partícula em uma teoria contínua e descontínua.

FONTE: Heisenberg (1983 [1927]).

A partir da própria natureza descontínua da mecânica de matrizes fica evidente que há uma contradição entre os conceitos de posição e velocidade, de maneira que não é possível se referir à trajetória clássica. Se considerarmos a Figura 1, que representa a trajetória de um elétron em uma teoria contínua, observa-se uma trajetória contínua representada pela linha. Nela, é possível traçar uma linha tangente em qualquer ponto “ $x$ ”, de maneira a se obter a posição e a velocidade em qualquer parte desejada na linha. Por outro lado, considerando a figura 2, que representa as posições de um elétron em uma teoria descontínua, nota-se que o conceito de “trajetória” não se aplica a essa série de pontos descontínuos porque uma linha contínua não é possível. Nesse caso, não há como falar da velocidade relacionada a uma determinada posição, uma vez que para obter uma velocidade é necessário que haja uma mudança de posição, mesmo que infinitesimal, entre dois pontos arbitrariamente próximos (CASSIDY, 1992b, p. 236). Como os pontos na teoria descontínua são separados, conclui-se que não é possível falar de um elétron em uma dada posição com dada velocidade. Em outras palavras, não há como falar da trajetória de um elétron no sentido clássico, pois seria necessário atribuir posição e velocidade em cada instante ao elétron, algo impossível na mecânica de matrizes.

Finalizando esse breve contexto histórico, Heisenberg apresentou no artigo de 1927 uma análise precisa dos conceitos cinemáticos de posição e velocidade (1983b [1927], p. 63). O intuito dessa análise era se livrar das contradições presentes na interpretação da mecânica quântica e alcançar uma compreensão física das fórmulas presentes no formalismo, ou seja, o objetivo era alcançar uma interpretação física consistente da mecânica quântica. Para esse fim,

Heisenberg neste artigo buscou uma redefinição dos conceitos de posição e velocidade, chegando, finalmente, nas relações de incerteza.

## 1.2. Definição geral das relações de incerteza

Nesta seção vamos explorar o significado das relações de incerteza<sup>21</sup>. Dado que as diferenças conceituais entre as duas derivações são sutis e demandam uma discussão de cunho filosófico, torna-se necessário apresentar uma definição geral das relações de incerteza antes de problematizar as duas derivações. Essa definição geral tem o objetivo de minimizar a tendência a endossar uma ou outra interpretação em particular e, ao mesmo tempo, explicar a parte física e matemática das Relações.

A busca por essa definição geral das relações de incerteza pode ser iniciada a partir do próprio resumo do artigo de 1927, no qual seu objetivo é assim explicitado: “é mostrado que quantidades canonicamente conjugadas podem ser determinadas simultaneamente somente com uma indeterminação característica” (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 62, tradução nossa)<sup>22</sup>. As quantidades conjugadas as quais Heisenberg se refere são posição e *momentum* ou energia e tempo. A passagem destaca o cerne das relações de incerteza: as variáveis conjugadas não podem ser determinadas, medidas ou conhecidas, simultaneamente com precisão arbitrária, isto é, não é possível obter valores precisos simultâneos para posição e *momentum* ou energia e tempo. Sempre haverá uma indeterminação, imprecisão ou incerteza. Isso é expresso matematicamente, ainda em 1927, pela relação  $p_1q_1 \sim h$ , ou, na forma mais moderna, pela desigualdade  $\Delta p \Delta q \geq \frac{\hbar}{2\pi}$ <sup>23</sup>.

<sup>21</sup> Devido ao emprego corriqueiro do termo princípio de incerteza, uma ressalva se faz necessária. Como Cassidy salienta (1998, p. 278), Heisenberg não emprega o termo “princípio” nem defende que suas Relações seriam um princípio no artigo de 1927. De fato, nem mesmo o termo “relações de incerteza” é empregado no corpo do artigo de 1927, com Heisenberg se referindo a elas apenas como “relações” ou pela própria equação matemática. No que concerne às Relações serem ou não um princípio, a partir da análise da parte conceitual-matemática se observa que as Relações são uma consequência do formalismo, elas não são um pilar da mecânica quântica, o que impossibilita considerá-las como um princípio (LEBLOND-LÉVY, 1998, p. 280). Sendo assim, o adequado, e seguido nesta dissertação, é empregar “relações de incerteza”. Ademais, ao analisar as outras obras de Heisenberg, nota-se que o autor prefere o uso do termo “relações de incerteza”, por mais que existam casos em que “princípio” é empregado. Esses casos ocorrem em *The Physical Principles of Quantum Theory* (1949 [1930]), *Physics and Philosophy* (1958a), *A parte e o Todo* (2016 [1969]) e *Development of Concepts in the History of Quantum Mechanics* (1973a [1972]). Nos dois primeiros exemplos, o físico alterna entre “princípio” e “relações”.

<sup>22</sup> *It is shown that canonically conjugate quantities can be determined simultaneously only with a characteristic indeterminacy.*

<sup>23</sup> A primeira generalização da relação qualitativa apresentada por Heisenberg foi feita por Kennard ainda em 1927. Ele introduz a desigualdade no lugar da aproximação, chegando na relação  $p_i q_i \geq \frac{\hbar}{2\pi}$ . A desigualdade moderna,

Antes de nos aprofundarmos nessa definição geral é importante fazer uma ressalva conceitual. Percebe-se que no parágrafo acima foram empregados termos como “determinadas”, “conhecidas” ou “medidas”, bem como “indeterminação”, “incerteza” ou “imprecisão”. Cada um desses termos possui profundas implicações filosóficas, e a utilização de qualquer um deles marca um limite na definição geral das relações de incerteza. Empregar “determinadas” e “indeterminação” tende a uma interpretação ontológica, no sentido de se referir “ao que é”; enquanto “conhecidas” e “incerteza” a uma interpretação epistemológica, no sentido de se referir “ao conhecimento daquilo que é”; e, por fim, “medidas” e “imprecisão” a uma interpretação operacionalista, no sentido de se referir “apenas ao que pode ser mensurado”. Levando em conta essas implicações filosóficas, para manter algum grau de neutralidade seria necessário empregar os três termos, o que prejudica a fluidez da leitura. Sendo assim, estabelecemos uma convenção válida somente para esta seção: quando se lê “medidas” e “imprecisão”, compreende-se que os termos podem também ser lidos como “determinadas” e “indeterminação” ou “conhecidas” e “incerteza”.

Uma definição geral mais completa pode ser encontrada em *Physics and Philosophy*:

É possível falar da posição e da velocidade de um elétron como na mecânica newtoniana, sendo possível ainda observar e medir essas quantidades. Entretanto, não é possível fixar ambas as quantidades simultaneamente com uma precisão arbitrariamente alta. De fato, o produto dessas duas imprecisões acabou não sendo menor que a constante de Planck dividida pela massa da partícula. Relações similares podem ser formuladas para outras situações experimentais. Elas geralmente são chamadas de relações de incerteza ou princípio de indeterminação (HEISENBERG, 1958a, p. 42-43, tradução nossa)<sup>24</sup>.

Essa definição destaca os aspectos essenciais das relações de incerteza. A análise da citação pode ser dividida em duas partes. Em primeiro lugar, as relações de incerteza restringem apenas a medida simultânea precisa das variáveis conjugadas. Isso significa que não há restrição na medida precisa da posição ou do *momentum* em separado (HEISENBERG, 1949 [1930], p. 20). Desta forma, se o intuito é medir apenas a posição ou apenas o *momentum* com precisão arbitrária, não há contradição com as relações de incerteza. Em segundo lugar, no caso da medida simultânea das variáveis conjugadas, as relações de incerteza estabelecem um mínimo

---

com  $4\pi$  no denominador ou  $\frac{h}{2\pi}$ , foi derivada por Robertson, em 1929, e clarificada por Ditchburn em 1930 (JAMMER, 1974, p. 72).

<sup>24</sup> *One could speak of the position and of the velocity of an electron as in Newtonian mechanics and one could observe and measure these quantities. But one could not fix both quantities simultaneously with an arbitrarily high accuracy. Actually the product of these two inaccuracies turned out to be not less than Planck's constant divided by the mass of the particle. Similar relations could be formulated for other experimental situations. They are usually called relations of uncertainty or principle of indeterminacy.*

de imprecisão, ou seja, um limite inferior para a precisão. O produto das imprecisões, de  $\Delta p \Delta q$ , deve ser, no mínimo, igual a  $\frac{\hbar}{2\pi}$  (CASSIDY, 1992b, p. 234). Como salienta Bohr, esse produto nunca pode ser menor que o quantum de ação (1961 [1929], p. 95). Sendo assim, de acordo com as relações de incerteza, em toda medida simultânea de variáveis canonicamente conjugadas haverá um mínimo de imprecisão. Esse mínimo faz com que, quanto mais precisa seja a medida de uma das variáveis, mais imprecisa será a medida da outra — e vice-versa (1983, [1927], p. 64). Isso é evidente na desigualdade matemática: quanto menor for o erro médio  $\Delta q$ , quanto mais precisa for a medida da posição, maior será  $\Delta p$ . Se caso  $\Delta q$  for medido com total precisão, a imprecisão no *momentum*  $\Delta p$  seria infinita ou indefinida (CASSIDY *et al.*, 2002, p. 676).

Por conseguinte, é possível afirmar que as relações de incerteza estabelecem um limite mínimo de precisão em toda medida simultânea de variáveis canonicamente conjugadas, sendo esse limite  $\frac{\hbar}{2\pi}$ . No domínio da mecânica quântica não é possível medir simultaneamente variáveis conjugadas com precisão arbitrária.

Retomando o contexto histórico, Heisenberg argumentou que as relações de incerteza solucionaram o intrincado problema interpretativo da mecânica quântica. Nas suas palavras: “Além disso, como podemos pensar qualitativamente nas consequências experimentais da teoria em todos os casos simples, não precisamos mais considerar a mecânica quântica como não física e abstrata” (1983, [1927], p. 82, tradução nossa)<sup>25</sup>. Nessa passagem, Heisenberg estabelece duas conclusões importantes. A primeira é que, com a adição das relações de incerteza, a mecânica quântica deixa de ser “não física”, ou seja, agora há uma conexão entre o formalismo e os fenômenos físicos, há uma interpretação física por meio de suas relações.

A segunda conclusão retoma o debate com Schrödinger acerca do caráter intuitivo (*anschaulich*) das teorias — interpretação que é corroborada pela nota de rodapé feita sobre a palavra “abstrata”, na qual Heisenberg menciona as críticas ao caráter abstrato e à falta de “intuitividade” da teoria tecidas por Schrödinger. Heisenberg argumenta que com a sua redefinição do conceito de intuitivo a mecânica quântica deixa de ser abstrata a partir do artigo de 1927. A nova definição fornecida no artigo é a seguinte: “nós acreditamos que compreendemos o conteúdo físico [*anschaulich*]<sup>26</sup> de uma teoria quando podemos ver suas

<sup>25</sup> *Moreover, as we can think through qualitatively the experimental consequences of the theory in all simple cases, we will no longer have to look at quantum mechanics as unphysical and abstract.*

<sup>26</sup> Por mais que a tradução para o inglês de Wheeler e Zurek seja cuidadosa, é crucial ressaltar que os autores traduzem *anschaulich*, que comumente é traduzido por “intuitivo”, como *physical content*, “conteúdo físico”. Isso pode ser observado até no título que traduz *Über den anschaulichen* por *The physical content*. O começo da passagem, que é a parte na qual o conceito aparece, em alemão é: *Eine physikalische Theorie glauben wir dann*

consequências experimentais qualitativas em todos os casos simples e quando, ao mesmo tempo, verificamos que a aplicação da teoria nunca contém contradições internas” (1983, [1927], p. 62, tradução nossa)<sup>27</sup>. Diferente do que defendia Schrödinger, os conceitos intuitivos não se referem ao mero visualizável ou pictórico, eles se referem àquilo que é física ou experimentalmente significativo (CASSIDY, 1992b, p. 233). Para definir o que é fisicamente significativo Heisenberg introduz, e reitera ao longo do artigo, o operacionalismo. De modo geral, os conceitos intuitivos não são meramente visualizáveis, eles precisam ser passíveis de mensuração, isto é, um conceito é intuitivo na mecânica quântica se for possível mesurá-lo. Sendo assim, considerando essa redefinição do que é intuitivo, Heisenberg defende que a mecânica quântica não é mais abstrata nem carece de interpretação física.

Dito isso, o físico alemão acreditava que as relações de incerteza, junto à interpretação estatística de Born, forneciam uma interpretação física completa e consistente para o formalismo matemático da mecânica quântica. Nas palavras de Heisenberg:

Desde a primavera de 1927, portanto, finalmente existia um procedimento matemático completo e não ambíguo para a interpretação dos experimentos em átomos ou para prever seus resultados. A interpretação, também, continha elementos estatísticos bem conhecidos, que haviam aparecido muito antes nos experimentos (por exemplo, no decaimento alfa, no efeito fotoelétrico etc.) (1955, p. 16, tradução nossa)<sup>28</sup>.

A interpretação fornecida pelas relações de incerteza foi rigorosamente testada na Conferência de Solvay de 1927 (HEISENBERG, 1958a, p. 43). Durante várias discussões entre Einstein e Bohr, a validade das relações de incerteza foi abordada. No entanto, o pai da relatividade não conseguiu desenvolver um experimento mental que refutasse as relações. Por conseguinte, Heisenberg considerou resolvido o complicado problema interpretativo que assombrou o desenvolvimento da mecânica quântica. As suas relações de incerteza conferiam a tão almejada interpretação física ao formalismo matemático da mecânica quântica.

---

*anschaulich zu verstehen*. Uma tradução livre desse excerto seria “Acreditamos compreender intuitivamente uma teoria física”.

<sup>27</sup> *We believe we understand the physical content of a theory when we can see its qualitative experimental consequences in all simple cases and when at the same time we have checked that the application of the theory never contains inner contradictions.*

<sup>28</sup> *From the spring of 1927, therefore, there existed at last a complete unambiguous mathematical procedure for the interpretation of experiments on atoms or for predicting their result. The interpretation, too, contained well-known statistical elements, which had appeared long since in the experiments (e.g. in  $\alpha$ -decay, the photoeffect, etc.).*

### 1.3. Primeira derivação: por meio do microscópio de raios- $\gamma$

Conforme mencionado no início do capítulo, constata-se que Heisenberg chega às relações de incerteza por dois caminhos distintos (CHIBENI, 2005, p. 182): pelo primeiro, o físico utiliza o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  e o efeito Compton para chegar às suas relações; pelo segundo, as relações são diretamente derivadas das transformações de Dirac-Jordan. Esta seção abordará a primeira derivação, a realizada por meio do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ .

A distinção entre as duas derivações é crucial, como destacado por Chibeni (2005, p. 182) e Jijnasu (2016, p. 63), porque cada uma implica em uma interpretação diferente das relações de incerteza. O tópico será expandido no capítulo três, mas, em resumo, a derivação pelo microscópio de raios- $\gamma$  é associada a uma interpretação epistemológica, enquanto a derivação pelo formalismo conduz a uma interpretação ontológica.

Antes de proceder para a análise da derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$ , é necessária uma digressão para compreender o pressuposto filosófico dessa derivação, o operacionalismo. De fato, o operacionalismo não somente fundamenta o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ , mas ele permeia todo o artigo de 1927 (JAMMER, 1974, p. 63). Nas palavras de Heisenberg:

Quando se quer ser claro sobre o que se compreende pelas palavras ‘posição do objeto’, por exemplo, do elétron (relativo a um dado referencial), então deve-se especificar experimentos bem definidos por meios dos quais se planeja medir a ‘posição do elétron’; caso contrário, essa palavra não possui sentido (1983, [1927], p. 64, tradução nossa)<sup>29</sup>.

O físico adota no artigo de 1927 uma teoria semântica do significado muito específica, que consiste em definir um conceito por meio da prescrição de um procedimento capaz de mensurar a quantidade à qual o conceito se refere (JAMMER, 1974, p. 68). Por exemplo, a definição de um conceito como a “posição do elétron” requer que haja um experimento específico, ou pelo menos a possibilidade de tal experimento, capaz de medir essa posição. Caso não existam experimentos capazes de medir a posição do elétron, o conceito não possui sentido (*meaningless*). Em resumo, “Definibilidade era baseada em, ou reduzida à, mensurabilidade”

---

<sup>29</sup> *When one wants to be clear about what is to be understood by the words “position of the object”, for example of the electron (relative to a given frame of reference), then one must specify definite experiments with whose help one plans to measure the “position of the electron”; otherwise this word has no meaning.*

(JAMMER, 1966, p. 332, tradução nossa)<sup>30</sup>. Logo, um conceito só é dotado de significado, ou seja, só pode ser definido, caso seja designado uma operação experimental capaz de mensurar o conceito (CHIBENI, 2005, p. 183).

Embora seja possível rastrear a definição e a expressão clara dessa posição filosófica ao livro *The Logic of Modern Physics* (1927), do físico americano Percy Bridgman, é profícuo notar que o operacionalismo era amplamente difundido entre os físicos na década de 1920. Isso é relevante, pois é virtualmente impossível que Heisenberg tenha lido Bridgman, de forma que a verdadeira influência para o operacionalismo do autor vem da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Conforme salientado por Jammer, Heisenberg acreditava que, por meio de uma análise operacional e consequente redefinição conceitual, os problemas da mecânica quântica seriam resolvidos analogamente ao que foi feito por Einstein com o conceito de simultaneidade na relatividade restrita (JAMMER, 1974, p. 58). Essa influência do preceptor da relatividade é expressa no próprio artigo de 1927:

Nesse sentido, é natural comparar a mecânica quântica com a relatividade restrita. De acordo com a relatividade, a palavra ‘simultâneo’ só pode ser definida por meio dos experimentos em que a velocidade da luz entra de maneira essencial. Se existisse uma definição ‘mais precisa’ da simultaneidade, como, por exemplo, sinais que se propagam infinitamente rápido, a relatividade seria impossível. [...]. Encontramos uma situação semelhante com a definição dos conceitos de ‘posição do elétron’ e ‘velocidade’ na teoria quântica (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 68, tradução nossa)<sup>31</sup>.

Análogo a como Einstein redefine o conceito de simultaneidade através do operacionalismo, Heisenberg pretende redefinir operacionalmente os conceitos de posição, velocidade e trajetória na mecânica quântica. Seguindo o mote "definibilidade é reduzida à mensurabilidade", Einstein definiu que dois eventos em um sistema de coordenadas em repouso somente serão simultâneos se eles ocorrerem ao mesmo tempo conforme medido por dois relógios sincronizados utilizando raios de luz. O relevante dessa redefinição para Heisenberg é a necessidade da medida dos relógios, ao ponto que a definição de simultaneidade depende da possibilidade experimental da medida dos relógios (CAMILLERI, 2007b, p. 187). Por meio dessa redefinição operacionalista Heisenberg pretende solucionar os problemas interpretativos

---

<sup>30</sup> *Definability was based on, or reduced to, measurability.*

<sup>31</sup> *It is natural in this respect to compare quantum mechanics with special relativity. According to relativity, the word “simultaneous” cannot be defined except through experiments in which the velocity of light enters in an essential way. If there existed a “sharper” definition of simultaneity, as, for example, signals which propagate infinitely fast, the relativity would be impossible. [...]. We find a similar situation with the definition of the concepts of “position of an electron” and “velocity” in quantum theory.*

de mecânica quântica. Logo, podemos afirmar que o físico fundamenta sua análise dos conceitos em 1927, e, conseqüentemente das relações de incerteza, no operacionalismo usado por Einstein em sua Teoria da Relatividade Restrita (MEHRA, 1987, p. 495).

Após essa breve digressão sobre a posição operacionalista adotada por Heisenberg em 1927, procedemos para um exame da derivação das relações de incerteza por meio do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ <sup>32</sup>. Para tal, é relevante observar como esse experimento mental é apresentado nesse artigo:

Quando se quer ser claro sobre o que se compreende pelas palavras “posição do objeto”, por exemplo, do elétron (relativo a um dado referencial), então deve-se especificar experimentos bem definidos por meios dos quais se planeja medir a “posição do elétron”; caso contrário, essa palavra não possui sentido. [...]. Por exemplo, ilumina-se o elétron e o observa sob um microscópio. Então, a maior precisão alcançável na medida da posição é governada pelo comprimento de onda da luz. No entanto, em princípio é possível construir, diga-se, um microscópio de raios- $\gamma$  e com ele realizar a determinação da posição com a precisão desejada. Nessa medida há uma característica importante, o efeito Compton. Toda observação da luz espalhada vinda do elétron pressupõe um efeito fotoelétrico (no olho, na placa fotográfica, na célula fotográfica) e pode, portanto, também ser interpretada como um quantum de luz atingindo o elétron, sendo refletido ou espalhado, e, então, novamente curvado pela lente do microscópio, produzindo o efeito fotoelétrico. No instante em que a posição é determinada — portanto, no instante em que o fóton é espalhado pelo elétron — o elétron sofre uma mudança descontínua no *momentum*. Essa mudança é tão maior quanto menor for o comprimento de onda da luz empregada — isto é, quanto mais precisa a determinação da posição (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 64, tradução nossa)<sup>33</sup>.

Reconstruindo o argumento, primeiramente, observamos que o objetivo de Heisenberg é redefinir o conceito de “posição do elétron” (CAMILLE, 2007b). Considerando a máxima adotada pelo físico de que definibilidade equivale à mensurabilidade, segue-se a necessidade

<sup>32</sup> Nas entrevistas com Kuhn, Heisenberg afirma que a ideia do microscópio de raios- $\gamma$  veio de Drude. Segundo o físico, o experimento mental rodeava sua cabeça já fazia um tempo e foi uma importantíssima ferramenta para desenvolver a filosofia das relações de incerteza (HEISENBERG, 1963, VII).

<sup>33</sup> *When one wants to be clear about what is to be understood by the words “position of the object”, for example of the electron (relative to a given frame of reference), then one must specify definite experiments with whose help one plans to measure the “position of the electron”; otherwise this word has no meaning. [...]. For example, let one illuminate the electron and observe it under a microscope. Then the highest attainable accuracy in the measurement of position is governed by the wavelength of the light. However, in principle one can build, say, a  $\gamma$ -ray microscope and with it carry out the determination of position with as much accuracy as one wants. In this measurement there is an important feature, the Compton effect. Every observation of scattered light coming from the electron presupposes a photoelectric effect (in the eye, on the photographic plate, in the photocell) and can therefore also be so interpreted that a light quantum hits the electron, is reflected or scattered, and then, once again bent by lens of the microscope, produces the photoeffect. At the instant when position is determined — therefore, at the moment when the photon is scattered by the electron — the electron undergoes a discontinuous change in momentum. This change is the greater the smaller the wavelength of the light employed — that is, the more exact the determination of the position.*

de apontar um experimento, mesmo que idealizado como nesse caso, no qual seja possível medir a posição desse elétron. Como o objetivo é localizar um elétron com precisão na pequena região de um átomo, essa tarefa demanda um microscópio com alto poder de resolução, capaz de empregar comprimentos de onda menores do que a dimensão do átomo, que é aproximadamente  $10^{-10}m$ . Dessa forma, a luz ordinária não é adequada para essa medida (CASSIDY *et al*, 2002, p. 675; HEISENBERG, 1958a, p. 47; JIJNASU, 2016, p. 63). Em contrapartida, um microscópio que empregue raios- $\gamma$ , cujo comprimento de onda é menor do que o átomo, algo em torno de  $10^{-11}m$ , é capaz de realizar essa medida com precisão do elétron. Sendo assim, um microscópio de raios- $\gamma$  possibilita a medida da posição do elétron com precisão.

Ciente de como medir a posição com precisão, dois fatos físicos devem ser considerados. Primeiramente, de acordo com a teoria ondulatória, quanto menor for o comprimento de onda utilizado, maior será a frequência e, mais importante nesse caso, o *momentum* da radiação (CASSIDY *et al*, 2002, p. 675). Essa relação inversa é prontamente visualizável na equação apresentada por De Broglie, que relaciona o *momentum* de uma partícula com seu comprimento de onda:  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Ora, quanto menor o comprimento de onda, maior será o *momentum*, pois há uma relação inversa entre as grandezas. Além disso, como a frequência também aumenta conforme diminui o comprimento de onda, considerando-se a equação da energia,  $E = hv$ , é possível afirmar que quanto menor o comprimento de onda, maior será a energia da radiação empregada. Temos, portanto, um impasse:

Conforme o tamanho do observado se *reduz*, [o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação eletromagnética deve ser reduzido para manter a mesma precisão de observação; isso implica um aumento na sua frequência ( $\nu$ ) (já que sua velocidade  $c$  é uma constante), ou, em outras palavras] a magnitude ( $h\nu$ ) dos quanta utilizados no processo de observação deve *aumentar* (JIJNASU, 2016, p. 64, tradução nossa)<sup>34</sup>.

O segundo fato físico necessário para compreender o microscópio de raios- $\gamma$  é o efeito Compton. A radiação empregada no processo de medida, seja ela raios- $\gamma$  ou mesmo uma luz monocromática, deve ser compreendida não somente como uma onda, mas também como uma partícula que colide com o objeto medido; neste caso, o elétron. Durante a colisão, ocorre um espalhamento do raio- $\gamma$  pelo elétron, resultando em um “recuo” (*recoil*) ou contragolpe no

---

<sup>34</sup> *as the size of the observed reduces, [the wavelength ( $\lambda$ ) of the electromagnetic radiation should be reduced to maintain the same accuracy of observation; this implies an increase in its frequency ( $\nu$ ) (as its speed  $c$  is a constant), or in other words] the magnitude ( $h\nu$ ) of the quanta used in the process of observation should increase.*

elétron que altera tanto seu *momentum* quanto a sua energia (HEISENBERG, 1949 [1930], p. 9-10). A mudança no *momentum* ocorre em magnitude e direção (CASSIDY *et al*, 2002, p. 675), sendo proporcional ao *momentum* da partícula espalhada. Em outras palavras, quanto maior o *momentum* da radiação utilizada para medir, maior o recuo do objeto medido. Logo, o efeito Compton se manifesta em qualquer medida que ilumine o elétron, de forma que a radiação empregada alterará o *momentum* e a energia do objeto medido.

Detendo as informações físicas necessárias, a explicação do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  é direta. É possível medir a posição do elétron com altíssima precisão ao empregar ondas com comprimento de onda curto, como os raios- $\gamma$ . Entretanto, isso implica que a radiação utilizada para a medida terá um alto *momentum* e energia. Levando em consideração o efeito Compton, o qual descreve que quanto maior o *momentum* da partícula espalhada, maior será o recuo do elétron, conclui-se que a medida precisa da posição implica em uma imprecisão na medida do *momentum* e vice-versa. Em outras palavras, a situação é que ou se mede a posição com precisão, empregando ondas com comprimento de onda curto, e se aceita a incerteza na medida do *momentum*; ou se mede o *momentum* com precisão, empregando ondas com comprimento de onda longo que possuem um *momentum* baixo, e se aceita a incerteza na posição. Nas palavras de Heisenberg: “Assim, quanto mais precisa for a determinação da posição, mais impreciso é o conhecimento do *momentum*, e vice-versa” (1983, [1927], p. 64, tradução nossa)<sup>35</sup>. Por consequência, devido aos dois fatos físicos supracitados, é impossível medir simultaneamente com precisão arbitrária a posição e o *momentum* do elétron.

Desta forma, fica claro a primeira derivação das relações de incerteza. O objetivo inicial de Heisenberg com o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  é redefinir o conceito de posição clássico, pois, como notamos no contexto histórico, para o físico a relação de não comutação apresenta “boas razões” (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 63) para se duvidar dos conceitos de posição e velocidades clássicos. Nesse contexto, Heisenberg adota a teoria semântica do significado operacionalista, adotando a máxima de que para definir um conceito é necessário prescrever um experimento possível capaz de medir tal conceito. Por conseguinte, considerando o operacionalismo como pressuposto semântico para suas definições, as relações básicas da teoria ondulatória para o *momentum* e energia e o efeito Compton, argumentamos que Heisenberg propõe o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  tanto como uma redefinição para o conceito de posição (CAMILLERI, 2007b) quanto como a primeira

---

<sup>35</sup> Thus, the more precisely the position is determined, the less precisely the momentum is known, and conversely.

derivação das relações de incerteza. Fica estabelecido, portanto, que é impossível medir posição e velocidade simultaneamente com precisão arbitrária. A medida precisa de uma das variáveis conjugadas impede a medida precisa da outra.

#### 1.4. Segunda derivação: das transformações de Dirac-Jordan

Além da derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$ , nota-se que há uma segunda derivação para as relações de incerteza no artigo de 1927: a derivação por meio do formalismo. Após uma exposição detalhada do microscópio de raios- $\gamma$  no primeiro parágrafo e uma análise do experimento de Stern-Gerlach, derivando as relações para energia e tempo, Heisenberg procede para uma derivação das relações de incerteza utilizando as transformações de Dirac-Jordan.

Antes de adentrar a derivação pelo formalismo, é necessário retomar a relação de não comutação. Conforme previamente mencionado, essa relação é essencial para o desenvolvimento da mecânica de matrizes. No artigo apresentado na conferência de Solvay de 1927<sup>36</sup>, Heisenberg e Born salientam essa relevância, defendendo que a quantização do formalismo, isto é, o caráter quântico do formalismo expressado pela constante “ $h$ ”, é introduzida somente pela relação de não comutação  $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$  (2009 [1927], p. 41). Essa centralidade fica ainda mais evidente em *Physics and Philosophy*. Nessa obra Heisenberg argumenta o seguinte: “Mais tarde, as investigações de Born, Jordan e Dirac mostraram que as matrizes que representam a posição e o *momentum* do elétron não comutam. Esse último fato demonstrou claramente a diferença essencial entre a mecânica quântica e a mecânica clássica.” (HEISENBERG, 1958a, p. 39, tradução nossa)<sup>37</sup>. Portanto, a não comutação é o que distingue a mecânica clássica da quântica: ela fornece o caráter propriamente quântico à nova mecânica.

Considerando a relevância da relação de não comutação, torna-se necessário explicá-la de maneira clara e objetiva. Comumente, o produto de duas quantidades A e B é o mesmo se

---

<sup>36</sup> A conferência de Solvay de 1927 foi um marco no desenvolvimento da física quântica. Financiada por Ernst Solvay e presidida por H. A. Lorentz, a conferência de 1927 teve como tema *Elétrons e Fótons*. Nela se reuniram vários nomes ilustres da física, como Bohr, Born, Curie, de Broglie, Debye, Dirac, Einstein, Heisenberg, Kramers, Langevin, Pauli, Planck, Schrödinger entre outros. O cerne das discussões foram os formalismos e paradoxos da mecânica quântica. Essa conferência e a de 1930 ficaram marcadas pelas incessantes tentativas de Einstein em demonstrar uma contradição nas relações de incerteza, todas essas sem sucesso. Segundo Heisenberg, não há dúvidas que essa conferência de 1927 teve um papel essencial no desenvolvimento e na história da física (HEISENBERG, 1975 [1974], p. VI).

<sup>37</sup> *Later the investigations of Born, Jordan and Dirac showed that the matrices representing position and momentum of the electron do not commute. This later fact demonstrated clearly the essential difference of quantum mechanics and classical mechanics.*

multiplicado da direita para a esquerda ( $A \times B$ ) ou da esquerda para a direita ( $B \times A$ ) (CASSIDY, 1992b, p. 202). Isso significa que as quantidades  $A$  e  $B$  comutam, logo, independente da ordem dos termos na expressão, o resultado será o mesmo. No entanto, na mecânica quântica essa regra de comutação não se aplica mais. Born e Jordan, ao desenvolverem a mecânica de matrizes, descobriram que  $pq \neq qp$ , o que resulta no fato da subtração ter o resultado  $\frac{h}{2\pi i}$  e não zero. Se expressarmos essa descoberta advinda do contexto das variáveis conjugadas na mecânica quântica em números reais, cairíamos na situação paradoxal de afirmar que  $3 \times 4 \neq 4 \times 3$  (CASSIDY, 1992b, p. 205). Porém, matematicamente essa descoberta não é problemática, uma vez que a multiplicação de matrizes não é comutativa. O interessante dessa descoberta é que essa não comutação está implícita na descrição dos fenômenos quânticos.

Voltando ao artigo de 1927, nota-se que é possível estabelecer uma conexão entre a relação de não comutação e as relações de incerteza. No artigo, Heisenberg afirma que: “Nessa circunstância [do microscópio de raios- $\gamma$ ], observamos uma interpretação física direta da equação  $pq - qp = -i\hbar$ ” (1983 [1927], p. 64, tradução nossa)<sup>38</sup>. Partindo da consideração que as relações de incerteza fornecem uma interpretação intuitiva da relação de não comutação (MEHRA, 1987, p. 495), torna-se possível compreender a manifestação física desta última: é impossível obter “ $p$ ” e “ $q$ ” simultaneamente de maneira precisa, pois a determinação precisa de um desses valores afeta necessariamente o outro. Por conseguinte, a ordem em que os valores são determinados é crucial para o resultado, explicando o porquê de  $pq \neq qp$ . Nesse sentido, é possível dar um passo além e afirmar, como Bohr fez, que as relações de incerteza são uma consequência da relação de não comutação (1948, p. 314-315; 2017 [1949], p. 50), sendo, portanto, uma consequência do próprio formalismo matemático da mecânica quântica.

A derivação das relações de incerteza por meio das transformações de Dirac e Jordan é apresentada por Heisenberg tanto no artigo de 1927 quanto nas *Chicago Lectures*. Em 1927, o autor afirma que “para a mecânica quântica, a equação (1) [ $p_1q_1 \sim h$ ] pode ser derivada da formulação de Dirac-Jordan por uma pequena generalização” (1983 [1927], p. 69, tradução nossa)<sup>39</sup>. Já na obra de 1930, ele comenta que “as relações de incerteza também podem ser deduzidas sem o uso explícito da imagem ondulatória, pois elas são prontamente obtidas do esquema matemático da teoria quântica e de sua interpretação física” (1949 [1930], p. 15-16,

<sup>38</sup> *In this circumstance we see a direct physical interpretation of the equation  $pq - qp = -i\hbar$ .*

<sup>39</sup> *For quantum mechanics equation (1) can be derived from the Dirac-Jordan formulation by a slight generalization.*

tradução nossa)<sup>40</sup>. Por consequência, de acordo com Heisenberg, é possível chegar às relações de incerteza sem recorrer à análise operacionalista dos conceitos e ao experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ , apenas derivando-as das transformações de Dirac-Jordan. Vale ressaltar que, na época, essas transformações constituíam o formalismo mais refinado da mecânica quântica, permitindo a conversão entre as abordagens matriciais e ondulatórias.

Para fins de simplicidade<sup>41</sup>, seguiremos a derivação apresentada por Mehra (1987, p. 493-494), que é semelhante à original de 1927. O raciocínio começa com a medida da posição de um objeto. A amplitude de probabilidade para a posição de um objeto que está no intervalo entre  $q_0 - q_1 < q < q_0 + q_1$  é dada por:

$$S(q) = \text{constante} \times \text{exponencial} \left[ -\frac{(q - q_0)^2}{2q_1^2} - \frac{2\pi i p_0 (q - q_0)}{h} \right]$$

O primeiro termo do exponencial representa uma distribuição gaussiana e o segundo uma função de onda geral. Com base nas transformações de Dirac-Jordan, é possível obter  $S(p)$  a partir de  $S(q)$  por meio da transformação:

$$\begin{aligned} S(p) &= \int S(q) e^{\frac{2\pi i p q}{h}} dq \\ &= \text{constante} \times \text{exponencial} \left[ -2\pi^2 q_1^2 (p - p_0)^2 + \frac{2\pi i}{h} (p - p_0) q_0 \right] \end{aligned}$$

Consequentemente, para um dado erro  $\Delta q = q_1$  na posição, a distribuição de probabilidade,  $|S(p)|^2$ , do *momentum* é não zero no intervalo  $p_0 - p_1 < p < p_0 + p_1$ . Com isso, é possível chegar em:

$$\frac{4\pi^2 q_1^2 p_1^2}{h} \approx 1$$

Aplicando as devidas operações algébricas, chega-se nas relações de incerteza:

$$p_1 q_1 \approx \hbar$$

<sup>40</sup> *The uncertainty relations can also be deduced without explicit use of the wave picture, for they are readily obtained from the mathematical scheme of quantum theory and its physical interpretation.*

<sup>41</sup> Uma derivação mais completa por ser encontrada em (JAMMER, 1966, p. 327-328; 1974, p. 62-63).

Assim sendo, constata-se que as relações de incerteza podem ser obtidas por dois caminhos distintos, ambos presentes no artigo de 1927. A primeira via é por meio do microscópio de raios- $\gamma$ . Nele, empregando a teoria ondulatória à análise do Efeito Compton, é possível obter uma derivação física das relações de incerteza, sem necessidade do recuo matemático, resultando em uma derivação qualitativa. O segundo caminho, por sua vez, é por meio das transformações de Dirac-Jordan. Heisenberg demonstra que é possível derivar as relações de incerteza unicamente por meio do formalismo, de forma que elas são uma consequência do formalismo ao mesmo tempo que conferem uma interpretação física para a relação de não comutação.

Para finalizar a discussão da segunda derivação, torna-se necessário abordar a questão da completude do formalismo. Esse tema transpassa a história de mecânica quântica e foi eternizado no embate entre Bohr e Einstein acerca dos fundamentos da física moderna (BOHR, 2017 [1949]). Em resumo — pois o tópico na íntegra será explorado no capítulo três —, a relevância da completude para este trabalho está relacionada à conexão entre a segunda derivação e a interpretação ontológica. Argumentaremos que a completude do formalismo é um passo integral, junto à interpretação metafísica da tese da impregnação teórica da observação, para uma possível interpretação ontológica das relações de incerteza.

O comentador que destaca essa discussão no contexto específico de Heisenberg é Cassidy. Segundo ele, “primeiramente, [Heisenberg] afirmou que o formalismo da mecânica quântica de Dirac-Jordan, sobre o qual sua derivação das relações de incerteza repousava, poderia ser considerado como completo e finalizado — assim, garantindo a irrefutabilidade das relações de incerteza” (1992b, p. 234, tradução nossa)<sup>42</sup>. Se esse formalismo é considerado completo, consistente e finalizado, isto é, livre de contradições e sem a possibilidade de que algum desenvolvimento futuro possa alterá-lo, Heisenberg possui fundamentos para afirmar que suas relações são irrefutáveis. O argumento é simples: considera-se o formalismo completo, consistente e finalizado, logo, não há como nenhum desenvolvimento futuro, seja teórico ou experimental, falseá-lo; as relações de incerteza fazem parte desse formalismo, sendo diretamente deriváveis dele; se conclui que as relações são irrefutáveis como todo o formalismo. Não obstante, como bem observa Cassidy (1992b, p. 234), Heisenberg não fornece argumentos

---

<sup>42</sup> *First, he asserted, the Dirac-Jordan formalism of quantum mechanics, on which his derivation of the uncertainty relations rested, could be regarded as complete and finished — thus ensuring the irrefutability of the uncertainty relations.*

para defender essa completude do formalismo, sendo quase que um ato de fé professado pelo autor ao longo de sua obra.

Cassidy ainda salienta que Dirac influenciou Heisenberg acerca da completude. Citando uma carta de Heisenberg a Jordan de 1926, na qual o remetente alude a Dirac, nota-se a ideia de que todas as aplicações da mecânica quântica, passadas ou futuras, são e serão explicadas pelo formalismo disponível (CASSIDY, 1992b, p. 236). Ora, nesse contexto a situação fica clara: Heisenberg compreendia que as transformações de Dirac-Jordan não apenas estavam completas, mas que seriam capazes de lidar com qualquer problema futuro na mecânica quântica.

Após a apresentação do argumento convincente de Cassidy, torna-se importante destacar que, para fins de precisão, parece-nos que o comentador faz uma afirmação sem fundamento. Embora Cassidy afirme que a defesa da completude do formalismo matemático aparece no artigo de 1927, não há menção explícita de Heisenberg no artigo a essa questão. É possível encontrar passagens como “o esquema matemático da mecânica quântica não precisa de revisão” (1983 [1927], p. 62, tradução nossa)<sup>43</sup>, mas, uma defesa enfática da completude do formalismo escapa o escopo do artigo. Essa carência de fundamento é evidenciada pelo fato de Cassidy, que referencia os textos originais constantemente em sua escrita, não citar o artigo de 1927 ao fazer sua afirmação. Isso não significa que o argumento de Cassidy esteja incorreto. O contexto fornecido pelas cartas de Heisenberg da época, como a carta enviada a Jordan, demonstra que o autor defendia essa posição até antes de 1927. Não obstante, por questões de precisão, é pertinente destacar que no artigo de 1927 essa defesa não é explicitamente encontrada.

Feita essa breve ressalva, é possível observar que no artigo apresentado na conferência de Solvay em 1927, Heisenberg e Born defendem enfaticamente a completude do formalismo. Citando os autores: “[...] nós consideramos a *mecânica quântica* uma teoria fechada, cujas premissas físicas e matemáticas fundamentais não são mais suscetíveis de qualquer modificação” (2009 [1927], p. 437, tradução nossa)<sup>44</sup>. Logo, por mais que a defesa da completude não seja explicitamente mencionada no artigo de 1927, é possível afirmar, categoricamente, que Heisenberg acreditava que o formalismo de Dirac-Jordan não era apenas completo, mas também final — no sentido de que nenhum desenvolvimento futuro poderia alterá-lo.

---

<sup>43</sup> *the mathematical scheme of quantum mechanics needs no revision.*

<sup>44</sup> *[...] we consider quantum mechanics to be a closed theory, whose fundamental physical and mathematical assumptions are no longer susceptible of any modification.*

Por conseguinte, atendo-se exclusivamente ao formalismo, sem recorrer às definições operacionais dos conceitos e ao efeito Compton, é possível derivar as relações de incerteza. Essa segunda derivação — como será argumentado — juntamente com a consideração da completude e a tese da impregnação teórica da observação, fornece uma possibilidade interpretativa diferente para as relações de incerteza, uma interpretação ontológica.

### 1.5. A impregnação teórica da observação como possível fundamento filosófico para a segunda derivação

Defendemos anteriormente que a primeira derivação das relações de incerteza no artigo de 1927 estava completamente fundamentada no operacionalismo. Apesar de ser um tópico problemático no contexto desse artigo — tema que será abordado na próxima seção —, Heisenberg parece assumir uma outra posição filosófica, distinta do operacionalismo, em sua segunda derivação. Essa segunda posição é a tese da impregnação teórica da observação (*semantic theory-ladenness*)<sup>45</sup>, e argumentaremos que Heisenberg só assumirá essa tese filosófica em obras posteriores, de modo que sua aplicação ao contexto do artigo de 1927 pode soar anacrônica. De todo modo, ao abordar o tema da segunda derivação, torna-se necessário um comentário a respeito dessa impregnação teórica da observação.

A primeira vez que a impregnação teórica da observação aparece explicitamente na obra de Heisenberg é no artigo “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*” de 1955. Nesse artigo a anedota com Einstein e a conexão com o problema da trajetória ainda não estão expostos, contudo, a noção de “inversão” do problema já está claramente presente. Heisenberg argumenta que, em 1927, ele “[...] tentou resolver o problema de como passar de uma situação experimentalmente dada para sua representação matemática invertendo a questão, isto é, pela hipótese de que apenas aqueles estados que podem ser representados como vetores no espaço de Hilbert podem ocorrer na natureza ou se realizar experimentalmente” (1955, p. 15, tradução nossa)<sup>46</sup>. Essa “inversão da questão”, ou, como o físico coloca em outras obras, o

<sup>45</sup> A ideia de que a observação é “carregada” teoricamente, que ela é influenciada por premissas teóricas, foi inicialmente defendida por Norwood Hanson, Paul Feyerabend e Thomas Kuhn no final da década de 50 e começo da de 60. Kuhn, especificamente, defende que observadores operando com diferentes paradigmas provavelmente terão experiências distintas sobre o mesmo fenômeno, ou seja, é possível que a “carga” teórica altere a observação de cada indivíduo. Como veremos, a impregnação teórica de Heisenberg é mais profunda, ao ponto da teoria determinar, e não apenas influenciar, a observação. Uma análise exaustiva dos filósofos que desenvolveram a tese da impregnação teórica da observação pode ser encontrada em (BOYD; BOGEN, 2021).

<sup>46</sup> *tried to solve the problem of how to pass from an experimentally given situation to its mathematical representation, by inverting the question, that is, by the hypothesis that only those states which can be represented as vectors in Hilbert space can occur in nature or be realized experimentally.*

“*turning around of the question*” (1958a, p. 42; 1963, IX), pode ser interpretado como a virada de posição filosófica de Heisenberg. Como analisaremos, ele abandona a concepção semântica operacionalista “invertendo a questão”, adotando a ideia de que a teoria é anterior à observação.

Para uma compreensão mais completa da tese da impregnação teórica da observação, torna-se profícuo analisar a reconstrução que Heisenberg faz do seu encontro com Einstein no Colóquio da Física de Berlim no dia 28 de abril de 1926 (CASSIDY, 1992b, p. 237). Análogo ao que ocorreu com a adoção da perspectiva operacionalista, a influência para a adoção dessa tese vem também de Einstein. Na ocasião do encontro entre os físicos, o tema em voga era o das órbitas dentro do átomo, ou, mais especificamente, o problema semântico relacionado ao conceito de órbita do elétron. Na época, Heisenberg defendia um positivismo relacionado à interpretação filosófica da mecânica quântica, argumentando que uma teoria só pode conter magnitudes diretamente observáveis, ou seja, todos os seus conceitos devem ser passíveis de observação (2016 [1969], p. 78). Como não era possível observar órbitas dentro do átomo, Heisenberg defendeu que o conceito deveria ser abolido da mecânica quântica. Perante esse positivismo incisivo de Heisenberg, Einstein questionou: “— Mas o senhor não acredita seriamente que só as grandezas observáveis devem entrar numa teoria física, não é?” (HEISENBERG, 2016 [1969], p. 78). Heisenberg respondeu ao questionamento citando a própria teoria da relatividade restrita de Einstein, na qual o físico seguiu os preceitos positivistas para rejeitar os conceitos absolutos de tempo e espaço em favor dos conceitos relativos. A resposta de Einstein a esse contra-argumento a seguinte:

É possível que eu tenha usado esse tipo de raciocínio, *mas ele é absurdo*, de qualquer maneira. [...]. Na realidade, dá-se exatamente o inverso. *É a teoria que decide o que podemos observar*. Somente a teoria, ou seja, o conhecimento das leis naturais, nos permite que, partindo de nossas impressões sensoriais, possamos deduzir os fenômenos adjacentes (HEISENBERG, 2016 [1969], p. 78-79, grifo nosso).

Einstein admite ter sido guiado pelo positivismo em sua juventude, contudo, nesse encontro com Heisenberg, ele defende um outro posicionamento filosófico. Segundo Einstein, não é a observação que decide os conceitos da teoria, mas sim é a teoria que decide o que pode ser observado. Nesse sentido, não é o caso que somente conceitos observáveis devem figurar em uma teoria. Ora, podemos assim identificar uma inversão da primazia na investigação científica: ao invés da observação decidir os conceitos da teoria, é a teoria que decide a possibilidade da observação. Somente aquilo contido na teoria pode ser observado. Em outras palavras, o que é observável ou não é ultimamente decidido pela teoria, somente a partir de uma

teoria completa que seria possível distinguir os fenômenos passíveis de observação. É nesse sentido que argumentamos de uma inversão de Heisenberg: o primário da investigação científica deixa de ser a observação ou mensuração, como dita o operacionalismo, para ser a própria teoria, como dita a tese da impregnação teórica da observação.

Como o conceito de observação deve ser consistente com as leis físicas, Heisenberg argumenta que as leis são anteriores à observação na física. Por conseguinte, a teoria se torna um pré-requisito para a observação. Essa visão é expressa por Heisenberg na seção VIII das entrevistas com Kuhn:

Essa maneira de inversão surgiu da minha primeira longa discussão com Einstein, sobre a qual eu lhe contei. Ele me explicou que o que é observado ou não é decidido pela teoria. Somente quando você detém a teoria completa que é possível afirmar o que pode ser observado. A palavra observação significa que você faz algo consistente com as leis físicas conhecidas. Enquanto você não tem leis na física nada é observado. Bem, você tem impressões e algo na sua placa fotográfica, mas não tem como passar da placa para os átomos. Se você não tem como passar da placa para os átomos, qual é a utilidade da placa? Esse foi um argumento que deixou uma impressão forte em mim — essa foi a discussão com Einstein (HEISENBERG, 1963, VIII, tradução nossa)<sup>47</sup>.

Analisando acriticamente a maneira que Heisenberg reconta os fatos, constata-se que ele considera essa conversa com Einstein como relevante para resolver o problema da trajetória que assombrava a mecânica quântica em 1926-1927. Embora se acreditasse que o formalismo da mecânica quântica estava completo, ele não poderia representar a simples trajetória de um elétron observada em uma câmara de nuvem (HEISENBERG, 1973a [1972], p. 269). Então, como conciliar essas duas posições? Segundo Heisenberg, em vários de seus textos (1955, p. 15, 1967 [1964], p. 105, 1973a [1972], p. 269-270, 1977 [1975], p. 5, 1989 [1975], p. 53, 2016 [1969], p. 95-96), a resolução do problema emerge da inversão em relação ao papel da observação que a tese da impregnação teórica da observação propõe. A pergunta que estava sendo feita na época, segundo o físico, estava equivocada. Considerando a nova tese, a pergunta não deve ser “como podemos representar a trajetória do elétron na câmara de nuvem?” Em vez disso, devemos perguntar: ‘Não é possivelmente verdade que na natureza ocorrem apenas

---

<sup>47</sup> *This way of turning around came from my first long discussion with Einstein about which I told you. He had explained to me that what is observed or not is decided by theory. Only when you have the complete theory can you say what can be observed. The word observation means that you do something which is consistent with the known physical laws. So long as you have no laws in physics you don't observe anything. Well, you have impressions and you have something on your photographic plate, but you have no way of going from the plate to the atoms. If you have no way of going from the plate to the atoms, what is the use of the plate? That was an argument which had made a strong impression on me — that was the discussion with Einstein.*

situações que podem ser representadas na mecânica quântica ou mecânica ondulatória?” (1973a [1972], p. 269, tradução nossa)<sup>48</sup>. A grande sacada de Heisenberg, baseando-se na impregnação teórica da observação, foi que não se deve buscar uma representação matemática daquilo que é observado, mas sim reconhecer que apenas o que está contido no formalismo matemático, na teoria, pode ser observado. Em outras palavras, não se trata de modelar matematicamente a “trajetória observada”, mas sim de limitar o real, ou o observável, por meio daquilo que é presente na teoria.

Ao adotar a tese da impregnação teórica da observação, as implicações ontológicas são profundas. Se não existe o conceito de trajetória do elétron na mecânica quântica, torna-se necessário concluir que a trajetória de um elétron não existe de fato. Portanto, o que é observado numa câmara de nuvem não é uma trajetória de um elétron, mas sim uma sequência discreta, descontínua, de gotículas d’água, como ilustrado na Figura 1 acima. Essas gotas permitem uma determinação imprecisa da posição e velocidade do elétron. Nas palavras de Heisenberg:

Isso significava: não havia um caminho real do elétron na câmara de nuvem. Havia uma sequência de gotas d’água. Cada gota determinava imprecisamente a posição do elétron, e a velocidade poderia ser deduzida imprecisamente da sequência de gotas. Tal situação poderia ser representada no esquema matemático; o cálculo forneceu um limite inferior para o produto das imprecisões da posição e *momentum* (1977 [1975], p. 5, tradução nossa)<sup>49</sup>.

Ao contrário do conceito clássico de trajetória contínua, o formalismo quântico acomoda a possibilidade de uma série de pontos discretos pelos quais o elétron passou, permitindo apenas uma determinação imprecisa da sua posição e *momentum*. Por consequência, o problema da trajetória é dissolvido. De forma que não se observa uma trajetória contínua no sentido clássico, mas sim uma sequência de pontos descontínuos.

Sendo assim, adotando a tese da impregnação teórica da observação como pressuposto filosófico, somada à conclusão acerca do problema da trajetória e a derivação das relações de não comutação, Heisenberg chega às relações de incerteza. Tecnicamente, a tese da impregnação teórica da observação não é necessária para a segunda derivação, uma vez que ela é oriunda apenas do formalismo, não obstante, a tese é a interpretação atribuída tardiamente por

---

<sup>48</sup> *How can we represent the path of the electron in the cloud chamber? We should ask instead: “Is it not perhaps true that in nature only such situations occur which can be represented in quantum mechanics or wave mechanics?”*

<sup>49</sup> *That meant: there was not a real path of the electron in the cloud chamber. There was a sequence of water droplets. Each droplet determined inaccurately the position of the electron, and the velocity could be deduced inaccurately from the sequence of droplets. Such a situation could actually be represented in the mathematical scheme; the calculation gave a lower limit for the product of the inaccuracies of position and momentum.*

Heisenberg à segunda derivação. De todo modo, é possível estabelecer uma conexão entre as observações na câmara de nuvem e o formalismo da mecânica quântica, com base nas relações de incerteza (HEISENBERG, 2016 [1969], p. 96). Como não é possível obter valores precisos simultâneos para posição e *momentum*, não faz sentido falar de uma trajetória do elétron. Em contrapartida, as relações de incerteza deixam claro que o que é observado na câmara de nuvem é uma sequência de pontos que fornecem a posição e *momentum* imprecisos, limitados pela constante de Planck, do elétron.

#### 1.6. Contradição entre operacionalismo e impregnação teórica da observação

A partir das duas derivações possíveis para as relações de incerteza presentes em 1927, torna-se profícuo analisar as bases filosóficas de cada uma. Conforme foi comentado, a derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$  é calcada na abordagem operacionalista, enquanto a derivação do formalismo pode ser fundamentada na tese da impregnação teórica da observação. Nesse contexto, emerge um problema: os fundamentos filosóficos das derivações são contraditórios, o que torna insustentável afirmar que Heisenberg defende ambos no artigo de 1927.

O tema da impregnação teórica da observação é pouco abordado pelos comentadores, e as discussões sobre a contradição entre operacionalismo e impregnação teórica em 1927 são praticamente inexistentes. Cassidy (1992b, p. 238-239) e Mehra (1987, p. 495), por exemplo, tratam os dois fundamentos filosóficos sem problematizá-los. Considerando o recorte bibliográfico desta dissertação, o único autor que reconhece essa contradição é Jammer. Conforme ele salienta: “Essa declaração de lealdade ao ponto de vista positivista da física soa estranha, ou até mesmo inconsistente, se lembrarmos que o ponto de partida do raciocínio de Heisenberg, que o levou às relações de indeterminação, foi o apotegma de Einstein que ‘apenas a teoria determina o que pode ser observado’.” (1974, p. 76, tradução nossa)<sup>50</sup>. De um ponto de vista histórico, é possível argumentar que Heisenberg abandona o operacionalismo após 1927, mas, do ponto de vista conceitual do artigo de 1927, essa retratação histórica não resolve a possível contradição interna ao artigo. Sendo assim, e considerando que a literatura canônica foge desse debate, torna-se produtiva a apresentação dos termos claramente e a investigação dessa problemática.

---

<sup>50</sup> *This declaration of allegiance to the positivistic viewpoint on physics sounds strange or even inconsistent if we recall that the point of departure of Heisenberg’s reasoning which led him to the indeterminacy relations was Einstein’s apothegm that ‘only theory determines what can be observed’.*

Ao analisar o artigo de 1927, é inegável que o fundamento filosófico explícito no texto seja o operacionalismo. No artigo, qualquer definição deve seguir o lema “definibilidade é igual à mensurabilidade”. Em outras palavras, para um conceito ser dotado de significado é necessário que, pelo menos em princípio, seja possível apontar um procedimento experimental capaz de medi-lo. Isso implica que a medida, ou até mesmo a “observação”, determina a teoria.

No entanto, Heisenberg também argumenta, em várias obras citadas na seção anterior, que o pontapé inicial para a segunda derivação das relações de incerteza foi a tese da impregnação teórica da observação sugerida por Einstein no encontro de 1926. De acordo com as obras posteriores à década de 50, a impregnação teórica da observação resolve o problema da trajetória, abrindo caminho para as relações de incerteza. Nesse caso, não é a medida ou observação que determina a teoria, mas a teoria que define aquilo que pode ser observado, portanto, a teoria precede qualquer observação.

Ora, atendo-se às derivações é possível notar um antagonismo entre as posições filosóficas. Enquanto o operacionalismo enfatiza a importância da medida, a tese da impregnação teórica da observação sustenta que a própria teoria define aquilo que pode ser observado. Por conseguinte, é impossível que essas duas posições antagônicas sejam encontradas na mesma obra sem a incidência de contradição.

Para lidar com esse problema, a hipótese que levantamos é que a adoção da tese da impregnação teórica da observação no artigo de 1927 é um anacronismo. No entanto, em primeira análise, Jammer rejeita essa solução, argumentando:

Que as reflexões retrospectivas de Heisenberg [adoção da tese da impregnação teórica da observação] sobre o fundamento conceitual da sua descoberta do princípio de incerteza são corretas e não projeções de ideias posteriores, e que seus famosos experimentos mentais para a determinação da posição de um elétron desempenharam, de fato, o mesmo papel metodológico que a definição operacional de Einstein da simultaneidade de eventos espacialmente separados, será completamente corroborado por nossa análise do artigo de Heisenberg (1966, p. 325, tradução nossa)<sup>51</sup>.

De acordo com Jammer, as reflexões retrospectivas acerca da impregnação teórica da observação são corretas e não projeções de ideias tardias de Heisenberg em seu pensamento juvenil. Não obstante, seu argumento parece contraditório. Em primeiro lugar, o comentador

---

<sup>51</sup> *That Heisenberg's retrospective reflections on the conceptual background of his discovery of the uncertainty principle are correct and are not projections of later ideas, and that his famous thought experiments for the determination of the position of an electron played, indeed, the same methodological role as Einstein's operational definition of the simultaneity of spatially separated events, will be fully corroborated by our analysis of Heisenberg's paper.*

defende que a tese da impregnação teórica da observação já está presente no artigo de 1927, não sendo uma projeção futura. Em segundo lugar, Jammer argumenta que o experimento mental para a determinação da posição — o microscópio de raios- $\gamma$  — possui o mesmo papel metodológico que a redefinição do conceito de simultaneidade na teoria da relatividade restrita. Em outras palavras, o microscópio de raios- $\gamma$  tem o papel de redefinir operacionalmente o conceito de posição. Se esse é o caso, fica constatada uma contradição no artigo de 1927 que não pode ser resolvida por meio de análises físicas, uma vez que os fundamentos filosóficos do operacionalismo e da tese da impregnação teórica da observação são contraditórios.

Considerando que Jammer não fornece argumentos exegéticos para defender sua posição, defendemos que a introdução da tese da impregnação teórica da observação no artigo de 1927 é anacrônica. A defesa do nosso argumento pode ser dividida em quatro passos. O primeiro passo, e o mais direto, é constatar que Heisenberg não faz qualquer menção, explícita ou implícita, à tese da impregnação teórica da observação no artigo de 1927. Em vez disso, nota-se que o artigo é transpassado por comentários e reafirmações do operacionalismo.

O segundo passo do argumento provém de uma análise histórica da bibliografia de Heisenberg. Conforme supracitado, a primeira vez que o físico assume a tese da impregnação teórica da observação é no artigo “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*”, de 1955. Desde então, essa tese imperou no pensamento do autor, reaparecendo em praticamente todas as obras, exceto na conferência “A descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica”, de 1958, e no livro *Across the Frontiers*, de 1974<sup>52</sup>. De todo modo, não é de se espantar que a tese não figure nessas obras. O texto de 1958 provém de uma conferência em que Heisenberg trata os problemas filosóficos que emergem da mecânica quântica, tecendo analogias entre a filosofia grega, especialmente de Platão, e a física moderna. O segundo é um conglomerado de artigos de tópicos gerais, focados mais em discussões políticas e socio-científicas do que em mecânica quântica. Dessa forma, são textos que se distanciam das reflexões sobre as relações de incerteza, o que explica o desaparecimento da tese da impregnação teórica neles. Não obstante, a referência à tese está presente em todos os demais textos de Heisenberg após 1955. Por conseguinte, é seguro afirmar que a relevância da tese da impregnação teórica da observação para Heisenberg só surgiu na década de 50, ganhando proeminência nas décadas de 60 e 70.

Um adendo se faz necessário a esse segundo passo. De fato, a tese da impregnação teórica era conhecida por Heisenberg muito antes de 1950. Se sua autobiografia e seus relatos

---

<sup>52</sup> Como é comum nas obras de Heisenberg, esse livro é um conglomerado de artigos e conferências proferidas pelo autor. Apresenta escritos de 1948, 1955, 1958, 1959, 1960, 1963, 1964, 1967, 1969, 1970, 1971, 1972 e 1973.

forem considerados verídicos, Heisenberg teria entrado em contato com essa posição filosófica na sua conversa com Einstein em 1926. A sua predileção pela matemática como método de fazer física — tópico abordado no próximo capítulo — reforça a possibilidade de que essa tese já estava nos pensamentos de Heisenberg anteriores a 1950. Nesse sentido, defendemos que, embora Heisenberg já conhecesse e até mesmo pudesse considerar a tese da impregnação teórica, ela só foi realmente adotada como fundamento filosófico para as relações de incerteza após a década de 50.

O terceiro passo constitui uma extensão do segundo, emergindo das entrevistas com Kuhn conduzidas em 1962 e 1963. Durante a oitava entrevista, Kuhn questiona Heisenberg acerca do embate com Bohr. A resposta de Heisenberg desvia parcialmente da questão, em defesa da impregnação teórica:

O ponto principal era que Bohr queria considerar esse dualismo entre ondas e corpúsculos como o ponto central do problema e dizer: ‘Isso é o centro de toda a história, e nós temos que começar por esse lado da história para compreendê-la.’ De certa forma, eu diria: ‘Bem, temos um esquema matemático consistente e esse esquema nos diz tudo o que pode ser observado. Nada está na natureza que não possa ser descrito por esse esquema matemático’. Era uma forma diferente de olhar para o problema, porque *Bohr não gostava de dizer que a natureza imita um esquema matemático, que a natureza faz apenas coisas que se encaixam em um esquema matemático* (1963, VIII, tradução nossa, grifo nosso)<sup>53</sup>.

A partir da análise da citação, de fato, o cerne da crítica de Bohr parece elevar a dualidade ao status de fundamento da mecânica quântica. Entretanto, o que deve ser destacado é que a maneira como Heisenberg responde à crítica nessa passagem de 1963 é diferente de como ele realmente procedeu em 1927, época em que o embate começou. Em suma, em 1927, Heisenberg aceita a complementaridade e a necessidade da dualidade. O que é observado na citação, por outro lado, é Heisenberg inferindo que a tese da impregnação teórica é uma resposta à crítica de Bohr. Ao afirmar que o físico dinamarquês “não aceita que a natureza imita a matemática”, Heisenberg implicitamente evoca a primazia da teoria sob a observação que caracteriza a impregnação teórica adotada por ele.

---

<sup>53</sup> *The main point was that Bohr wanted to take this dualism between waves and corpuscles as the central point of the problem, and to say, “That is the center of the whole story, and we have to start from that side of the story in order to understand it.” I, in some way would say, “Well, we have a consistent mathematical scheme and this consistent mathematical scheme tells us everything which can be observed. Nothing is in nature which cannot be described by this mathematical scheme.” It was a different way of looking at the problem because Bohr would not like to say that nature imitates a mathematical scheme, that nature does only things which fit into a mathematical scheme.*

Não é caso de a matemática apenas modelar posteriormente os fenômenos físicos observados, mas sim da natureza imitar e ser limitada pelo formalismo matemático que a precede, só podendo ocorrer na natureza aquilo contido no formalismo. Por conseguinte, o terceiro passo do argumento é constatar que Heisenberg força anacronicamente a tese da impregnação teórica da observação em discussões passadas que foram resolvidas de outra maneira. Em 1963, o físico reinterpretou o embate, resolvendo-o por meio da adoção da impregnação teórica.

O quarto passo do argumento consiste em reforçar, por meio do artigo apresentado com Born, em Solvay, 1927, que o operacionalismo fundamenta o pensamento de Heisenberg em 1927. Segundo os autores: “É, no entanto, um princípio testado e comprovado, particularmente na mecânica quântica, que se deve introduzir, tanto quanto possível, *apenas quantidades diretamente observáveis* como conceitos fundamentais de uma teoria” (BORN; HEISENBERG, 2009 [1927], p. 430, tradução nossa)<sup>54</sup>. Por mais que esta posição tenda mais ao positivismo do que diretamente ao operacionalismo, é o “observável” e não o “mensurável”, o fundamento filosófico encontrado aqui é claramente o contrário da impregnação teórica da observação. Não é o formalismo que define o que pode ser observado, mas sim o contrário. Logo, fica ainda mais evidente que, em 1927, o fundamento filosófico de Heisenberg é o operacionalismo e não a tese da impregnação teórica da observação.

Antes de concluir, é necessário analisar uma afirmação feita por Heisenberg em suas obras posteriores. Ele defende que através da tese da impregnação teórica da observação é possível dissolver o problema da trajetória e, conseqüentemente, chegar nas relações de incerteza. Entretanto, constata-se que é possível, e assim foi feito, dissolver o problema sem recorrer à tese, empregando o próprio operacionalismo para análise do efeito Compton. A passagem completa em que Heisenberg comenta essa situação no artigo de 1927 elucida a questão:

Voltamo-nos agora para o conceito de ‘trajetória do elétron’. Por trajetória compreendemos uma série de pontos no espaço (em um dado sistema de referência) que o elétron toma como ‘posições’ uma após a outra. Como já sabemos o que deve ser compreendido por ‘posição em um tempo definido’, não há novas dificuldades aqui. Não obstante, é fácil reconhecer que, por exemplo, a expressão frequentemente usada, ‘a órbita 1s do elétron no átomo de hidrogênio’, do nosso ponto de vista, não tem sentido. Para medir essa ‘trajetória’ 1s temos que iluminar o átomo com luz cujo comprimento de onda seja consideravelmente menor que  $10^{-8}$  cm. No entanto, um único fóton dessa

---

<sup>54</sup> *It is, however, a tried and proven principle, particularly in quantum mechanics, that one should introduce as far as possible only directly observable quantities as fundamental concepts of a theory.*

luz é suficiente para ejetar completamente o elétron da sua ‘trajetória’ (de forma que apenas um único ponto dessa trajetória possa ser definido). *Consequentemente, aqui a palavra ‘trajetória’ não possui significado definível* (1983 [1927], p. 65, tradução nossa, grifo nosso)<sup>55</sup>.

O cerne para compreender essa citação é assumir o operacionalismo. Segundo Heisenberg, o conceito de trajetória, ou órbita, do elétron só possui sentido se houver um experimento capaz de medi-lo. Essa trajetória pode ser definida, seguindo o exemplo da física clássica, como uma sequência temporal contínua de pontos no espaço nos quais o elétron foi observado (HEISENBERG, 1949 [1930], p. 33). A questão que se segue do operacionalismo, portanto, seria: é possível medir essa sequência temporal de pontos? Considerando o efeito Compton, constata-se que isso é impossível. Para medir a posição do elétron é possível empregar o microscópio de raios- $\gamma$ , porém, conforme constatado na explicação das relações de incerteza, o impacto do raio- $\gamma$  causa o efeito Compton, alterando o *momentum* do elétron e o ejetando da sua “trajetória”. Por conseguinte, só é possível medir um único ponto da “trajetória” do elétron.

Ora, no contexto do operacionalismo, o conceito de uma trajetória contínua não possui sentido. Dessa forma, é necessário alterar a interpretação do que se observa em uma câmara de nuvem: não há uma trajetória no sentido clássico, mas sim uma sequência de pontos descontínuos que denotam as posições em que o elétron foi observado. Sendo assim, redefine-se operacionalmente, em analogia ao conceito de posição, o conceito de trajetória. O problema da trajetória é dissolvido através do operacionalismo — e não pela tese da impregnação da observação.

Após a apresentação dos passos argumentativos e da resolução do problema da trajetória, conclui-se que imputar a tese da impregnação teórica ao artigo de 1927 de Heisenberg é um anacronismo. O conceito só é introduzido explicitamente na obra do físico em 1955, ganhando proeminência nas décadas posteriores. Por consequência, a possível contradição interna do artigo de 1927 é dissolvida. O pilar filosófico do artigo é apenas o operacionalismo. Por mais que a tese da impregnação teórica da observação seja essencial ao considerar a

---

<sup>55</sup> *We turn now to the concept of “path of the electron”. By path we understand a series of points in space (in a given reference system) which the electron takes as “positions” one after the other. As we already know what is to be understood by “position at a definite time”, no new difficulties occur here. Nevertheless, it is easy to recognize that, for example, the often used expression, the “1s orbit of the electron in the hydrogen atom”, from our point of view has no sense. In order to measure this 1s “path” we have to illuminate the atom with light whose wavelength is considerably shorter than  $10^{-8}$  cm. However, a single photon of such light is enough to eject the electron completely from its “path” (so that only a single point of such a path can be defined). Therefore here the word “path” has no definable meaning.*

interpretação ontológica que emana da derivação pelo formalismo, sua aplicação ao contexto operacional de 1927 é um erro.

## 2. CAPÍTULO II: AS CAUSAS ATRIBUÍDAS POR HEISENBERG ÀS RELAÇÕES DE INCERTEZA

Na obra de Heisenberg, identificamos uma segunda inconsistência relacionada à causa das relações de incerteza. Assim como no caso das derivações, o autor apresenta duas possíveis causas. A primeira delas, mencionada no artigo de 1927, denominamos de tese da perturbação incontrolável. Ela é considerada a causa original das relações no pensamento de Heisenberg.

Já a segunda causa origina-se na crítica de Niels Bohr ao artigo de 1927. Embora o físico dinamarquês aceite as relações de incerteza, ele discorda da causa proposta por Heisenberg. Para Bohr, a verdadeira origem das relações reside na complementaridade. Essa divergência desencadeou um extenso embate entre os dois físicos sobre a causa das relações de incerteza e os fundamentos da mecânica quântica. De qualquer modo, é possível encontrar essa causa já no *postscript* do artigo de 1927.

O objetivo deste capítulo é examinar essas duas causas. Inicialmente, será oferecida uma breve definição da primeira causa, seguida de uma comparação entre a perturbação inevitável da física clássica e a perturbação incontrolável da mecânica quântica, afim de explicitar o cerne da tese da perturbação incontrolável.

Quanto à segunda causa, faremos um breve recuo histórico para contextualizar as diferentes metodologias da física adotadas por Heisenberg e Bohr. Em seguida, abordaremos as críticas de Bohr à análise do microscópio de raios- $\gamma$  e apresentaremos a sua noção de complementaridade. Por fim, após estabelecermos o contexto histórico e conceitual, buscaremos oferecer uma explicação detalhada da segunda causa e da maneira como Heisenberg a incorporou em sua obra.

### 2.1. A primeira causa: a tese da perturbação incontrolável

Para esclarecer a primeira causa das relações de incerteza, é pertinente revisitar uma passagem do artigo de 1927, citada no primeiro capítulo: “No instante em que a posição é determinada — portanto, no momento em que o fóton é espalhado pelo elétron — o elétron sofre uma mudança descontínua no *momentum*” (1983 [1927], p. 64, tradução nossa)<sup>56</sup>.

---

<sup>56</sup> *At the instant when position is determined — therefore, at the moment when the photon is scattered by the electron — the electron undergoes a discontinuous change in momentum.*

À primeira vista, essa citação pode parecer não revelar muito, contudo, a chave para compreender a primeira causa está no seu desfecho: quando a posição do elétron é determinada, ele sofre uma mudança descontínua no seu *momentum*. Heisenberg argumenta que a medida da posição provoca essa mudança descontínua, ou, como é mencionado em outras obras, ela causa uma perturbação no *momentum* do elétron. Segundo as relações de incerteza, o inverso também é verdadeiro: a medida do *momentum* causa uma perturbação na posição.

Em outras palavras, citando Heisenberg em *Across the Frontiers*: “Uma determinação infinitamente precisa da posição, na verdade, pressuporia uma intervenção infinitamente grande, logo, não pode ser realizada de maneira alguma” (1974 [1958], p. 19-20, tradução nossa)<sup>57</sup>. Isso significa que qualquer medida ou determinação da posição implica em uma intervenção, ou seja, em uma perturbação do *momentum*, de modo que a causa das relações de incerteza é essa intervenção/perturbação causada pelo ato de medida ou observação. Essa mudança descontínua, perturbação ou intervenção, torna impossível o conhecimento preciso simultâneo das variáveis conjugadas. Denominamos essa primeira causa, adotada por Heisenberg em praticamente todas as obras em que as relações são mencionadas, de Tese da Perturbação Incontrolável.

A inclusão do adjetivo incontrolável é importante para interpretamos a perturbação na mecânica quântica. Embora frequentemente negligenciada, a perturbação já estava presente na física clássica. De fato, em qualquer experimento, seja na física clássica ou quântica, a interação com o objeto medido gera algum grau de perturbação. A diferença fundamental entre as duas físicas é que a clássica permite a correção teórica da perturbação introduzida pela medida (PESSOA JR., 2006a, p. 51). Na teoria clássica, é possível determinar o valor da perturbação e corrigi-la por meio das ferramentas matemáticas previstas no próprio formalismo.

Ora, essa correção dos erros experimentais só é possível porque a perturbação na física clássica é “determinada”, isto é, é possível mensurá-la. Na mecânica quântica, o fato da perturbação ser incontrolável, ao ponto de, por princípio, não ser possível saber seu valor quantitativo, torna impossível aquele processo “corretivo” da física clássica (JAMMER, 1973, p. 593). Em outras palavras, a alteração no sistema medido é, por princípio, um valor inverificável. Devido à natureza incontrolável da perturbação na mecânica quântica, a quantificação da perturbação é impossível, o que impede a introdução de um processo corretivo análogo ao empregado na física clássica.

---

<sup>57</sup> *An infinitely sharp determination of position would actually presuppose an infinitely large intervention, and so cannot be realized at all.*

Essa distinção de uma perturbação incontrolável é importante pois, como salienta Jijnasu (2016, p. 64), se a perturbação for determinável, como na física clássica, ela não constitui um problema para a mecânica quântica. Com efeito, se a perturbação fosse determinável não haveria incerteza, pois seria possível mensurá-la e corrigir o erro experimental introduzido pelo ato de medida. Portanto, o adjetivo “incontrolável” ou “indeterminável” é central para justificar as relações de incerteza por meio da primeira causa, é ele quem diferencia a perturbação clássica da quântica. Ao admitir que a perturbação é incontrolável, a mecânica quântica não permite os processos corretivos que eram possíveis na física clássica.

Após essa explicação da tese da perturbação incontrolável, é importante examinar as passagens nas quais Heisenberg a comenta. A tese pode ser encontrada em diversas obras, como “*Recent Changes in the Foundation of Exact Science*” (1966 [1934], p. 16) e “*Questions of Principle in Modern Physics*” (1966 [1936], p. 55), ambas incluídas em *Philosophic Problems of Nuclear Science*, além de “*Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich*” (2011 [1935], p. 12-14). No entanto, é nas *Chicago Lectures* que Heisenberg aborda a tese da perturbação incontrolável com mais detalhes. Vejamos uma passagem dessa obra:

Particularmente característica da discussão a seguir é a interação entre o observador e o objeto; nas teorias físicas clássicas, sempre se assumiu ou que essa interação é insignificamente pequena, ou que seu efeito pode ser eliminado do resultado por meio de cálculos baseados em experimentos de ‘controle’. Esse pressuposto não é permitido na física atômica; a interação entre observador e objeto causa mudanças *incontroláveis* e grandes no sistema sendo observado, devido às *mudanças descontínuas* características dos processos atômicos. A consequência imediata dessa circunstância é que, em geral, todo experimento realizado para determinar alguma quantidade numérica torna ilusório o conhecimento das outras quantidades, uma vez que a *perturbação incontrolável* do sistema observado altera os valores de quantidades previamente determinadas. Se essa perturbação for levada a sério em seus detalhes quantitativos, parece que, em muitos casos, *é impossível obter uma determinação exata dos valores simultâneos de duas variáveis*, mas que existe um limite inferior para a precisão com que elas podem ser conhecidas (1949 [1930], p. 3, tradução nossa, grifo nosso)<sup>58</sup>.

---

<sup>58</sup> *Particularly characteristic of the discussions to follow is the interaction between observer and object; in classical physical theories it has always been assumed either that this interaction is negligibly small, or else that its effect can be eliminated from the result by calculations based on “control” experiments. This assumption is not permissible in atomic physics; the interaction between observer and object causes uncontrollable and large changes in the system being observed, because of the discontinuous changes characteristic of atomic processes. The immediate consequence of this circumstance is that in general every experiment performed to determine some numerical quantity renders the knowledge of others illusory, since the uncontrollable perturbation of the observed system alters the values of previously determined quantities. If this perturbation be followed in its quantitative details, it appears that in many cases it is impossible to obtain an exact determination of the simultaneous values of two variables, but rather that there is a lower limit to the accuracy with which they can be known.*

Podemos notar que a linha de raciocínio e a conclusão de Heisenberg são consistentes com o que retratamos anteriormente. Inicialmente, ele considera a possibilidade de eliminar a perturbação causada pelo ato de medida utilizando experimentos de controle. No entanto, como foi argumentado, essa correção experimental não pode ser aplicada na mecânica quântica porque a perturbação introduzida pela medida é incontrolável. Nota-se, então, que Heisenberg introduz o termo “incontrolável” em seu enunciado da primeira causa, desmantelando qualquer tentativa de corrigir os erros introduzidos pela medida. Esse caráter incontrolável é atribuído pelo físico às mudanças descontínuas intrínsecas no domínio quântico. Em outras palavras, o caráter incontrolável é fruto do Postulado Quântico, que, de acordo com Bohr, “[...] atribui a qualquer processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade, totalmente estrangeira às teorias clássicas e simbolizada pelo quantum de ação de Planck” (1928 [1927], p. 580, tradução nossa)<sup>59</sup>.

A análise da citação acima também evidencia a conexão entre a tese da perturbação incontrolável e as relações de incerteza. As palavras de Heisenberg ilustram a consequência direta dessa tese: “Então, o princípio enuncia que toda observação subsequente da posição vai alterar o *momentum* por uma quantidade *desconhecida e indeterminável*, de modo que, após realizar o experimento o nosso conhecimento do movimento eletrônico é restringido pelas relações de incerteza” (1949 [1930], p. 20, tradução nossa, grifo nosso)<sup>60</sup>. Dessa forma, a tese da perturbação incontrolável é integrada à própria explicação das relações, oferecendo uma base sólida para a argumentação apresentada anteriormente.

Por fim, a expressão das relações de incerteza como a destruição do conhecimento prévio é um exemplo marcante da tese da perturbação incontrolável. Nas palavras de Heisenberg: “Isso pode ser expressado de forma concisa e geral afirmando que todo experimento destrói parte do conhecimento do sistema que havia sido obtido por experimentos anteriores” (1949 [1930], p. 20, tradução nossa)<sup>61</sup>. Supondo que seja medido o *momentum* “p” de um elétron no tempo  $T_1$ , as relações de incerteza preveem que a posição “q” no tempo  $T_1$  será incerta. No entanto, as relações não proíbem que a posição seja medida com precisão arbitrária no tempo  $T_2$ . Considerando as duas medidas realizadas em tempos diferentes, aparentemente é possível inferir a posição do elétron em  $T_1$  subtraindo sua trajetória da posição

<sup>59</sup> [...] attributes to any atomic process an essential discontinuity, or rather individuality, completely foreign to the classical theories and symbolized by Planck’s quantum of action.

<sup>60</sup> Then the principle states that every subsequent observation of the position will alter the momentum by an unknown and undeterminable amount such that after carrying out the experiment our knowledge of the electronic motion is restricted by the uncertainty relations.

<sup>61</sup> This may be expressed in concise and general terms by saying that every experiment destroys some of the knowledge of the system which was obtained by previous experiments.

em  $T_2$ . Realmente, para o caso passado é possível que  $\Delta p \Delta q$  seja menor que o limite usual, contudo, esse conhecimento é puramente especulativo (HEISENBERG, 1949 [1930], p. 20). Devido à perturbação incontrolável no *momentum* que ocorre na medida em  $T_2$ , não é possível extrapolar o conhecimento do *momentum* obtido em  $T_1$ . Assim, é impossível utilizar esse conhecimento como condição inicial para qualquer cálculo, tornando-o experimentalmente inverificável. Ora, a essência dessa explicação é que as relações de incerteza assumem um papel de “destruição do conhecimento prévio”, causado pela perturbação incontrolável. Por consequência, fica evidente que todo ato de medida gera uma perturbação incontrolável no objeto medido que “destrói” qualquer conhecimento prévio do sistema.

Concluimos assim que a primeira causa das relações de incerteza defendida por Heisenberg é a tese da perturbação incontrolável. Notamos que o adjetivo “incontrolável” é central, pois uma perturbação apenas inevitável, como é o caso da física clássica, é passível de correção por meio de experimentos de controle, de forma que a incerteza seria dissolvida. A expressão das relações de incerteza como destruição do conhecimento prévio reforça a tese da perturbação incontrolável, defendendo que todo ato de medida perturba o objeto medido ao ponto de destruir o conhecimento prévio dele.

## 2.2. A segunda causa: complementaridade

Ampliando a vasta gama de posições adotadas por Heisenberg, é possível identificar ainda uma segunda causa explicativa para as relações de incerteza em sua obra, derivada das críticas de Bohr ao seu artigo de 1927. Embora o físico dinamarquês tenha aceitado as relações de incerteza, ele discordou da explicação oferecida por Heisenberg no contexto da análise do experimento do microscópio de raios- $\gamma$ . Na visão crítica de Bohr, a tese da perturbação incontrolável é insuficiente para justificar o experimento mental, sendo necessário considerar o poder de resolução do microscópio e, fundamentalmente, a complementaridade. Para Bohr, somente a complementaridade poderia fundamentar as relações de incerteza, constituindo, assim, sua verdadeira causa.

O objetivo desta seção é apresentar essa segunda causa das relações de incerteza. Para tanto, começaremos com uma apresentação da diferença metodológica no “fazer física” entre Heisenberg e Bohr. Em seguida, analisaremos detalhadamente a crítica tecida por Bohr ao artigo de 1927. Por fim, apresentaremos e discutiremos a complementaridade.

### 2.2.1. Contexto histórico: a primazia da matemática sobre a física para Heisenberg

Para uma compreensão mais aprofundada das distintas abordagens adotadas por Heisenberg e Bohr, é indispensável recorrer ao contexto. Conforme discutido no capítulo anterior, a visita de Schrödinger a Copenhague em 1926 teve um impacto significativo nos físicos do Instituto de Bohr. As discussões acaloradas travadas entre Bohr e Schrödinger desencadearam uma busca incansável por uma interpretação coerente da mecânica quântica. Enquanto as relações de incerteza emergiram como uma solução proposta por Heisenberg para esta questão interpretativa, Bohr desenvolveu sua noção de complementaridade como uma concepção mais ampla para enfrentar o desafio

As soluções distintas, seja as relações de incerteza seja a complementaridade, derivam das diferentes posições metodológicas adotadas por cada autor. Heisenberg procurou resolver o enigma por meio do formalismo matemático, acreditando que seu desenvolvimento conduziria a uma interpretação abrangente para a mecânica quântica (HEISENBERG, 1955, p. 104). Por sua vez, Bohr concentrou-se nos aspectos físicos da teoria, postergando a análise do formalismo matemático até que esse pudesse ser devidamente interpretado. Assim, o físico dinamarquês procurou abordar o problema valendo-se da dualidade onda-partícula. Essa diferença metodológica fica evidente no relato de Heisenberg a Kuhn:

As dificuldades na discussão entre Bohr e eu eram que eu queria começar totalmente do esquema matemático da mecânica quântica e utilizar a teoria de Schrödinger possivelmente como uma ferramenta matemática às vezes, mas nunca entrar na interpretação [ondulatória] de Schrödinger, a qual eu não podia acreditar. Bohr, no entanto, queria tomar a interpretação de uma maneira muito séria e utilizar ambos os esquemas [ondulatório e corpuscular] (1963, VIII, tradução nossa)<sup>62</sup>.

A origem da predileção de Heisenberg pela explicação matemática na física pode ser rastreada até os seus professores e as universidades onde o físico fez sua formação acadêmica. Heisenberg frequentou três centros de ensino durante seus estudos. O primeiro foi a Universidade de Munique, onde cursou seus primeiros anos de física, entre 1920 e 1922, sob a orientação de Arnold Sommerfeld. O segundo foi a Universidade de Göttingen, onde, devido à viagem de Sommerfeld para os Estados Unidos, estudou com Max Born de 1922 à 1924. O

---

<sup>62</sup> *The difficulties in the discussion between Bohr and myself was that I wanted to start entirely from the mathematical scheme of quantum mechanics and use Schrödinger theory perhaps as a mathematical tool sometimes, but never enter into Schrodinger's interpretation, which I couldn't believe. Bohr, however, wanted to take the interpretation in some way very serious and play with both schemes.*

terceiro foi o Instituto de Bohr, em Copenhague, o qual ele visitou pela primeira vez em 1924 e para onde retornou com uma bolsa de oito meses do Instituto Rockefeller entre 1924 e 1925. Após adquirir sua habilitação em Göttingen e escrever o *Dreimännerarbeit*, retornou novamente como assistente de Bohr em maio de 1926<sup>63</sup>. Durante sua estadia em Copenhague, Heisenberg trabalhou principalmente com Bohr e Kramers. Essa informação biográfica é relevante porque cada universidade adotava uma metodologia física diferente. Segundo Heisenberg:

Se compararmos os três centros, Copenhague, Munique e Göttingen, onde os desenvolvimentos subsequentes [da mecânica quântica] principalmente ocorreram, podemos relacioná-los a três linhas de trabalho em física teórica que são claramente distinguíveis até hoje: a escola fenomenológica procura unir as novas descobertas observacionais de maneira inteligível, apresentando suas conexões por meio de fórmulas matemáticas que parecem, até certo grau, plausíveis do ponto de vista da física atual; a escola matemática se esforça para representar os processos naturais por meio de um formalismo matemático cuidadosamente elaborado, que também satisfaz, de certo modo, as demandas por rigor dos matemáticos; a terceira escola, que pode ser chamada de conceitual ou filosófica, procura, acima de tudo, clarificar os conceitos por meio dos quais os eventos na natureza devem ser ultimamente descritos. Em retrospecto, podemos alinhar a escola de Sommerfeld em Munique com a abordagem fenomenológica, o centro de Göttingen com a matemática e o grupo de Copenhague com a tendência filosófica, embora as transições sejam naturalmente fluídas (1989 [1975], p. 38, tradução nossa)<sup>64</sup>.

Analisando as duas primeiras escolas que Heisenberg frequentou, torna-se compreensível sua tendência à física matematizada. A primeira escola em Munique tinha um viés marcadamente fenomenológico, influenciado por Sommerfeld. Embora a física desenvolvida por Sommerfeld seja classificada como fenomenológica, ela empregava, segundo o próprio Heisenberg, uma matematização extensa. Na citação acima, a diferença entre essa escola e a de Göttingen, liderada por Max Born, não é muito clara, pois ambas empregavam uma abordagem teórica altamente matematizada para análise dos fenômenos físicos. Não

---

<sup>63</sup> Todas as datas referentes aos acontecimentos na carreira de Heisenberg foram retiradas do apêndice A do livro de Cassidy (1992b, p. 547-551).

<sup>64</sup> *If we compare the three centers, Copenhagen, Munich and Göttingen, where the subsequent developments primarily took place, we can relate them to three lines of work in theoretical physics which are still clearly distinguishable even today: the phenomenological school attempts to unite new observational findings in an intelligible fashion, to present their connections by means of mathematical formulae which appear to some degree plausible from the stand point of current physics; the mathematical school endeavors to represent natural processes by means of a carefully worked-out mathematical formalism, which also satisfies to some extent the mathematicians' demands for rigor; the third school which may be called conceptual or philosophical, tries above all to clarify the concepts by means of which events in nature are ultimately to be described. In retrospect we may align Sommerfeld's school in Munich with the phenomenological approach, the Göttingen center with the mathematical. And the Copenhagen group with the philosophical tendency, though the transitions are naturally fluid.*

obstante, atentando-se às descrições de Heisenberg do seu tempo como pupilo de Sommerfeld, é possível distinguir melhor as duas primeiras escolas. A primeira característica relevante que o físico levanta é que Sommerfeld empreendia uma física diferente da de Bohr, sempre procurando responder os problemas do ponto de vista da matemática e não da física (HEISENBERG, 1962, I). Nesse ponto, há quase uma igualdade entre as duas primeiras escolas, com ambas fundamentando sua explicação física na matemática. A segunda característica permite diferenciá-las, pois a diferença reside, na verdade, no tipo de abordagem matemática desenvolvida por Sommerfeld e Born. Embora Sommerfeld exigisse uma matemática clara para explicar os fenômenos, a questão das provas matemáticas não era uma preocupação para o físico (HEISENBERG, 1963, II). Born, por sua vez, demandava um rigor matemático maior, exigindo provas para as formulações matemáticas. Essa segunda escola era tão comprometida com a parte formal que, de acordo com Heisenberg, a matemática formava todo o “espírito de Göttingen” (1963, V). Por consequência, é possível distinguir as duas escolas pelo tipo de matemática empregada: Sommerfeld com tendências à matemática aplicada; e Born à pura.

Em contraste com essas duas primeiras escolas, a física produzida por Bohr era metodologicamente diferente. Como Heisenberg descreve: “a ênfase em Göttingen era maior no lado matemático, no lado formal, e em Copenhague a ênfase era maior no lado filosófico” (1963, VI, tradução nossa)<sup>65</sup>. Bohr se importava, primeiramente, em compreender e evitar as contradições que ocorrem na natureza, como a dualidade onda-partícula, antes de formulá-las matematicamente. Em outras palavras, a explicação física sempre deve preceder a explicação matemática (HEISENBERG, 1967 [1964], p. 98).

Essa posição bohriana fica evidente na resposta de Bohr ao artigo de Heisenberg de 1927. A derivação matemática das relações de incerteza não foi suficiente para convencê-lo, pois ele almejava “compreender como a natureza evita as contradições” (HEISENBERG, 1963, VI). Esse desejo se materializa em seu princípio mais geral de Complementaridade, que oferece uma explicação fundamentalmente filosófica para os fenômenos da mecânica quântica, sem o recurso aos aspectos matemáticos.

Dessa maneira, Bohr opta por resolver os problemas da física através de uma abordagem mais fundamentada na própria física e na análise experimental do que na matemática. É difícil compreender precisamente o que Heisenberg pretende expressar com essa metodologia física de Bohr, mas é possível argumentar que ele desenvolvia uma física muito mais próxima da “filosofia natural” do que da física contemporânea matematizada. Para Bohr, a descrição física,

---

<sup>65</sup> *Well, the emphasis in Göttingen was more on the mathematical side, on the formal side, and in Copenhagen the emphasis was more on the philosophical side, I should say.*

fundada em uma filosofia da natureza, precede qualquer modelagem matemática dos fenômenos.

Dessa forma, são delineadas as duas abordagens metodológicas sob as quais Heisenberg se formou: o enfoque matemático de Sommerfeld e Born, por um lado, e a abordagem mais física e filosófica, adotada por Bohr, de outro. Com o contexto fornecido, a seguinte citação de Heisenberg retoma e esclarece o tema desta seção:

Bohr e eu estávamos procurando a resposta para o enigma em direções um pouco diferentes. Eu havia sido, até aquele momento, instruído pela escola matemática de Göttingen para assumir que, por meio da aplicação lógica do formalismo da mecânica quântica, conclusões também deveriam ser inferidas em relação aos conceitos antigos remanescentes que sobreviveriam na nova linguagem. No entanto, Bohr queria partir das duas imagens inicialmente contraditórias das teorias ondulatória e corpuscular, avançando delas para os conceitos corretos (1989 [1975], p. 53, tradução nossa)<sup>66</sup>.

No contexto das discussões acerca da interpretação da mecânica quântica que se seguiram à visita de Schrödinger a Copenhague, Heisenberg e Bohr adotaram pressupostos metodológicos distintos. Bohr buscava resolver o problema de forma mais física, investigando melhor o problema da dualidade onda-partícula. Heisenberg, influenciado por Sommerfeld e Born, seguiu uma abordagem mais matemática, culminando nas relações de incerteza como uma interpretação para a mecânica quântica. Assim, evidencia-se a primazia da matemática sobre a física no pensamento de Heisenberg, em contraste com a ênfase de Bohr na dualidade onda-partícula como central em suas explicações com base no Princípio de Complementaridade.

### 2.2.2. A crítica de Bohr ao microscópio de raios- $\gamma$ no artigo de 1927

Após a análise histórica, procedemos para um exame da crítica tecida por Bohr ao artigo de 1927 de Heisenberg. Para esse fim, é necessário considerar o contexto mais amplo dessa crítica, a fim de evitar equívocos em relação aos seus propósitos. Camilleri captura perfeitamente esse contexto:

---

<sup>66</sup> *Bohr and I were seeking the answer to the riddle here in somewhat different directions. I had meanwhile been so far educated by the Göttingen mathematical school as to assume that, through logical application of the quantum-mechanical formalism, conclusions must also be inferable as to the remainder of the old concepts that would survive in the new language. But Bohr wanted to set out from the two initially contradictory pictures of the wave and the corpuscular theories, and to push on from thence to the correct concepts.*

A crítica de Bohr ao tratamento de Heisenberg do microscópio de raios- $\gamma$  se baseou no ponto de vista de que o raio de luz que colide com o elétron deve ser compreendido tanto como uma onda quanto como uma partícula — algo que Heisenberg não o fez. Bohr insistiu que se deve considerar os limites do poder de resolução do instrumento óptico devido à troca de energia e *momentum* entre o quantum de luz incidente e o elétron durante a medida. Para os propósitos do experimento mental, Heisenberg simplesmente tratou o elétron como uma partícula pontual que sofreu uma transferência descontínua de energia e *momentum* com um quantum de luz. Em contraste, Bohr manteve que ‘uma troca descontínua de energia e *momentum* durante a observação’ não impediria que se ‘atribuísse valores precisos para as coordenadas espaço-temporais, assim como aos componentes de *momentum* e energia antes e depois dos processos’ (Bohr 1928:583) [(BOHR, 1928 [1927], p. 583)]. De acordo com Bohr, embora *a relação de incerteza de Heisenberg para a posição e momentum de uma partícula estava essencialmente correta, sua explicação do cenário de medida não era* (2007b, p. 188-189, tradução nossa, grifo nosso)<sup>67</sup>.

Em geral, Bohr sustenta que o artigo de 1927 é prematuro porque a justificativa fornecida por Heisenberg para o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  e, conseqüentemente, para relações de incerteza, é insuficiente. A tese da perturbação incontrolável não é suficiente para justificar as relações de incerteza, ou, em outras palavras, ela não pode ser elencada como sua causa última. Assim, Bohr não critica as relações de incerteza em si, mas sim a tese da perturbação incontrolável apontada por Heisenberg para essas relações. Ao mesmo tempo, ele oferece uma nova possível causa explicativa: a complementaridade.

Observa-se ainda na citação de Camilleri que duas novas considerações devem ser adicionadas à explicação de Heisenberg após a crítica de Bohr. A primeira, e a mais fundamental, é que a explicação correta do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  demanda a consideração da dualidade onda-partícula. Conforme foi comentado no capítulo anterior, Heisenberg explicou o microscópio no artigo de 1927 com base em uma concepção semântica operacionalista e empregando a explicação física do efeito Compton. Logo, ele utilizou apenas a teoria corpuscular, ignorando a teoria ondulatória. Nas palavras de Cassidy, o

---

<sup>67</sup> *Bohr’s criticism of Heisenberg’s treatment of the gamma-ray microscope rested on the view that the light ray impinging on the electron must be understood as both a wave and a particle — something Heisenberg had failed to do. Bohr insisted that one had to take into account the limits on the resolving power of the optical instrument due to the energy-momentum exchange between the incoming light quantum and the electron during measurement. For the purposes of the thought experiment Heisenberg had simply treated the electron as a point-particle that underwent a discontinuous transfer of energy and momentum in the interaction with a light quantum. In contrast, Bohr maintained that “a discontinuous exchange of energy and momentum during observation” would not preclude one from “ascribing accurate values to the space-time co-ordinates, as well as to the momentum-energy components before and after the processes” (Bohr 1928:583). According to Bohr, while Heisenberg’s uncertainty relation for the position and momentum of a particle was essentially correct, his account of the measurement scenario was not”.*

erro de Heisenberg na análise do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  é oriundo de seu excesso de confiança na descontinuidade e na teoria corpuscular da luz (1992a, p. 111). Dessa forma, de acordo com a crítica de Bohr, a teoria corpuscular não é suficiente para justificar as relações de incerteza, sendo necessário também considerar a teoria ondulatória. Além disso, para o físico dinamarquês, sem levar em conta o poder de resolução do microscópio de raios- $\gamma$  não há como justificar as relações de incerteza.

Compreendido o objeto da crítica de Bohr, é relevante adentrar no *postscript* do artigo de 1927. Historicamente, esta foi a primeira vez que a crítica de Bohr veio à público, levando Heisenberg a retificar os “erros” cometidos no corpo do artigo. Citando-o:

Após as conclusões do artigo, investigações mais recentes de Bohr levaram a um ponto de vista que permite um aprofundamento e aprimoramento essenciais da análise das correlações quântico-mecânicas empreendidas nesse trabalho. Nesse contexto, Bohr chamou-me atenção para alguns pontos essenciais que eu negligenciei no decurso de várias discussões nesse artigo. *Acima de tudo, a incerteza na nossa observação não emerge exclusivamente da ocorrência de descontinuidades, mas está diretamente ligada à exigência de atribuímos validade equivalente aos experimentos bastante diferentes que aparecem, por um lado, na teoria corpuscular, e, por outro lado, na teoria ondulatória.* No uso do microscópio de raios- $\gamma$  idealizado, por exemplo, a divergência necessária do feixe de raios deve ser considerada. Uma consequência disso é que, na observação da posição do elétron, a direção do recuo Compton só é conhecida com um espalhamento que leva à relação (1)  $[p_1 q_1 \sim h]$ . Ademais, não é enfatizado o suficiente que a simples teoria do efeito Compton, estritamente falando, somente se aplica a elétrons livres (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 83, tradução nossa, grifo nosso)<sup>68</sup>.

A citação acima é densa e, portanto, demanda uma análise minuciosa. Antes de tudo, é importante contextualizar esse *postscript*. Quando Heisenberg menciona as “investigações recentes de Bohr”, ele se refere especificamente às ideias que o físico dinamarquês apresentou na conferência de Como de 1927. Posteriormente, essas ideias foram publicadas no artigo intitulado “*The Quantum Postulate and the Recent Developments of Atomic Theory*”, de 1928.

---

<sup>68</sup> *After the conclusions of the foregoing paper, more recent investigations of Bohr have led to a point of view which permits an essential deepening and sharpening of the analysis of quantum-mechanical correlations attempted in this work. In this connection Bohr has brought to my attention that I have overlooked essential points in the course of several discussions in this paper. Above all, the uncertainty in our observation does not arise exclusively from the occurrence of discontinuities, but is tied directly to the demand that we ascribe equal validity to the quite different experiments which show up in the corpuscular theory on one hand, and in the wave theory on the other hand. In the use of an idealized gamma-ray microscope, for example, the necessary divergence of the bundle of rays must be taken into account. This has as one consequence that in the observation of the position of the electron the direction of the Compton recoil is only known with a spread which then leads to relation (1). Furthermore, it is not sufficiently stressed that the simple theory of the Compton effect, strictly speaking, only applies to free electrons.*

Para manter a fluidez, quando for utilizada a expressão “artigo de 1928 de Bohr”, entende-se que se refere a esse artigo específico.

Ao observar o trecho “alguns pontos essenciais que eu negligenciei no decurso de várias discussões nesse artigo”, evidencia-se a introdução das duas considerações discutidas acima. Antes de proceder para uma análise detalhada de cada consideração, é importante salientar o papel da tese da perturbação incontrolável e da complementaridade nessa citação. Heisenberg afirma que a descontinuidade, ou a perturbação, não pode ser exclusivamente a causa das relações de incerteza. Em consonância com a crítica de Bohr, é necessário atribuir valor igual tanto à teoria ondulatória quanto à teoria corpuscular. Considerando que o físico alemão utiliza apenas a teoria corpuscular em suas explicações no artigo de 1927, a citação acima enuncia a necessidade de também considerar a teoria ondulatória. Em outras palavras, Heisenberg reconhece<sup>69</sup> que a tese da perturbação incontrolável não é suficiente para justificar as relações, sendo necessário incluir ambas as teorias para a matéria e radiação, ou seja, é necessário considerar a dualidade onda-partícula com base no princípio de complementaridade para justificar as relações de incerteza.

Feitas as devidas ressalvas, adentramos na análise do poder de resolução do aparato de medida. Retomando o experimento mental do microscópio raios- $\gamma$ , Bohr afirma que é um equívoco considerar a mudança descontínua no *momentum* do elétron causada por uma perturbação incontrolável entre aparato de medida e objeto medido, como a justificativa da incerteza. A razão para isso é que, considerando apenas o efeito Compton, a mudança descontínua no *momentum* pode ser determinada com precisão caso a direção do quantum refletido seja conhecida (JAMMER, 1966, p. 331). Ora, se for possível determinar a perturbação no *momentum*, análogo à física clássica, então seria possível corrigir o erro decorrente da medida, o que poderia dissolver a incerteza. Entretanto, Bohr argumenta que a direção do quantum refletido não pode ser determinada com precisão devido ao limite do poder de resolução do aparato de medida. Nas palavras de Jammer: “Agora, somente porque esta direção não pode ser determinada com maior precisão do que o ângulo finito da abertura, pode-se falar em uma interação incontrolável” (1966, p. 331, tradução nossa, grifo nosso)<sup>70</sup>.

Seguindo o raciocínio de Bohr, em seu artigo de 1928, o argumento fica mais claro. O poder de resolução de qualquer instrumento óptico é dado pela expressão  $\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon}$ , na qual  $\lambda$  é

---

<sup>69</sup> O último capítulo discutirá esse caso em maiores detalhes. O nosso argumento é que Heisenberg aceita apenas temporariamente a segunda causa.

<sup>70</sup> *Now, only because this direction cannot be ascertained more accurately than up to the finite angle of the aperture may one speak of an uncontrollable interaction.*

o comprimento de onda da luz utilizada no microscópio e  $2\epsilon$  é o ângulo de convergência, que é o ângulo formado entre a direção de incidência do feixe de luz no elétron e o eixo longitudinal da lente do instrumento. Partindo desse conhecimento, Bohr argumenta que, independentemente de como o objeto é iluminado, “o valor finito da abertura impedirá um conhecimento exato do recuo que acompanha o espalhamento” (1928, p. 583, tradução nossa)<sup>71</sup>. Ora, após a colisão do fóton com o elétron, é impossível determinar em qual direção dentro do ângulo  $2\epsilon$  o fóton foi espalhado por causa do poder de resolução finito do aparato de medida. Ao considerar o poder de resolução finito, portanto, Bohr é capaz de explicar a razão da incerteza no *momentum*. Dessa consideração, Bohr deriva as relações de incerteza.

A relevância dessa primeira crítica reside na constatação de que Bohr fornece uma explicação física mais abrangente e consistente para o microscópio de raios- $\gamma$ . A explicação de Heisenberg, baseada apenas no efeito Compton, sugere que as relações de incerteza podem ser contornadas com o conhecimento preciso da direção do espalhamento do fóton. Em outras palavras, Heisenberg não fornece propriamente uma razão para a incerteza do *momentum* na explicação original (JAMMER, 1966, p. 329). No entanto, ao complementar a descrição do experimento com a consideração ondulatória do poder de resolução do instrumento de medida, Bohr esclarece que essa direção não pode ser conhecida com precisão, explicando a incerteza do *momentum* e salvaguardando as relações de incerteza. Por consequência, a afirmação inicial — de que, para Bohr, o artigo de 1927 de Heisenberg é prematuro — ganha força: não é o caso que as relações de incerteza estavam erradas, mas sim de que a justificativa do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  estava incompleta<sup>72</sup>.

A necessidade de considerar a dualidade onda-partícula surge como uma consequência direta da análise do poder de resolução do instrumento óptico. Observa-se que a simples explicação baseada no comportamento corpuscular do efeito Compton não é suficiente para justificar o microscópio de raios- $\gamma$ . É necessário compreender não apenas como o fóton se espalha após colidir com o elétron quanto também considerar o poder de resolução do próprio microscópio (CAMILLERI, 2007b, p. 189). Na perspectiva de Bohr, é crucial mobilizar essas duas situações para analisar o experimento mental proposto por Heisenberg. Nesse sentido, “Bohr argumentou que quando um feixe de luz colide com um elétron, a luz deve ser

---

<sup>71</sup> *the finite value of the aperture will prevent an exact knowledge of the recoil accompanying the scattering.*

<sup>72</sup> O problema de Heisenberg com o poder de resolução de um instrumento óptico data de antes do artigo de 1927. De acordo com o relato de Heisenberg a Kuhn (1963, III), o físico quase falhou no seu exame de doutorado devido a não conhecer a teoria do poder de resolução. Segundo o relato, o físico estudou a teoria após o ocorrido. Por mais que o tenha feito, ao conceber o artigo de 1927 a questão do poder de resolução foi deixada de lado. A provável razão para essa negligência é a predileção de Heisenberg pela teoria corpuscular e o desprezo pela teoria ondulatória em 1927.

conceitualizada tanto como partícula quanto como onda” (CAMILLERI, 2007b, p. 189, tradução nossa)<sup>73</sup>.

De fato, o argumento de Bohr em favor da dualidade é ainda mais fundamental. O físico dinamarquês destacou que, na derivação das relações de incerteza por Heisenberg, as fórmulas para o *momentum*,  $p = \frac{h}{\lambda}$ , e para energia,  $E = hv$ , já envolviam uma conjunção de conceitos corpusculares (energia e *momentum*) e ondulatórios (comprimento de onda e frequência) (CASSIDY, 1992b, p. 242). Nas palavras de Bohr: “Enquanto energia e *momentum* estão associados com o conceito de partículas, e, portanto, podem ser caracterizados de acordo com o ponto de vista clássico por meio de coordenadas espaço-temporais definidas, o período da vibração e o comprimento de onda se referem a um trem de ondas harmônicas planas de extensão ilimitada no espaço e tempo” (1928, p. 581, tradução nossa)<sup>74</sup>. Isso significa que a dualidade onda-partícula é epistemicamente anterior às relações de incerteza, aparecendo nas próprias fórmulas utilizadas para derivá-las.

Assim, a dualidade onda-partícula é essencial para justificar as relações de incerteza. Sem a consideração simultânea de ambas as teorias (corpuscular e ondulatória) não é possível concebê-las. Atendo-se ao fato de que a dualidade onda-partícula é fundamentada no princípio de complementaridade, sendo aquilo que Kauark-Leite denomina de complementaridade C2 (2017, p. 68), é importante procedermos para uma análise desse alicerce da interpretação bohriana.

### 2.2.3. A complementaridade

Enquanto Heisenberg propôs as relações de incerteza como solução para o problema interpretativo na mecânica quântica, Bohr, fundamentou sua abordagem na dualidade onda-partícula, desenvolvendo o princípio de complementaridade como alternativa. Para Bohr, onda e partícula são duas descrições complementares e mutuamente excludentes dos fenômenos quânticos (HEISENBERG, 1958a, p. 43). Diante desse cenário, se faz necessária uma incursão no conceito de complementaridade para compreendermos melhor essa segunda causa das relações de incerteza proposta por Bohr.

---

<sup>73</sup> Bohr argued that when a beam of light impinges on an electron, the light must be conceptualized both as particle and wave.

<sup>74</sup> While energy and momentum are associated with the concept of particles, and hence may be characterized according to the classical point of view by definite space-time co-ordinates, the period of vibration and wave-length refer to a plane harmonic wave train of unlimited extent in space and time.

Dada a diversidade e a complexidade das definições da complementaridade apresentadas por Bohr, é crucial abordar o conceito com cuidado. Conforme observado por Kauark-Leite (2017, p. 68-71), é possível identificar três concepções do princípio de complementaridade no artigo de 1928 de Bohr: C1, a complementaridade entre espaço-tempo e causalidade; C2, a complementaridade entre comportamentos ondulatórios e corpusculares; e C3, a complementaridade entre observáveis incompatíveis, como posição e momentum ou energia e tempo. Nesse contexto, é importante discutir brevemente essas três concepções da complementaridade, bem como o entendimento de Heisenberg sobre o tema.

A primeira concepção da complementaridade, C1, encontrada no artigo de 1928 de Bohr, é muitas vezes interpretada como uma “negação”, ou restrição, da causalidade. Bohr argumenta que, embora a descrição espaço-temporal e a causal sejam ambas necessárias para uma compreensão completa do fenômeno, elas são descrições mutuamente exclusivas na mecânica quântica. Nas palavras do físico dinamarquês:

A própria natureza da teoria quântica nos força a considerar a coordenação espaço-temporal e a exigência de causalidade, união que caracteriza as teorias clássicas, como *características complementares, mas exclusivas da descrição*, simbolizando a idealização respectiva da observação e definição (1928, p. 580, tradução nossa, grifo nosso)<sup>75</sup>.

Nesse sentido, a complementaridade restringe as descrições possíveis na mecânica quântica, limitando o horizonte de possibilidades da causalidade. Diferente da física clássica, na qual é possível unificar as descrições espaço-temporais e causais de um evento, na mecânica quântica, as descrições espaço-temporais são complementares e mutuamente excludentes às descrições causais. Embora ambas as descrições sejam necessárias para compreensão completa de um evento, espaço-tempo e causalidade deixam de ser uma conjunção e passam a ser uma disjunção (KAUARK-LEITE, 2013, p. 67-68). Nas palavras de Kauark-Leite:

A unidade do conhecimento espaço-temporal e causal possui um status nitidamente diferente na física clássica e na física quântica. Na física clássica, ela é pensada como uma *conjunção* das noções a priori essencialmente mutualmente independentes do espaço-tempo e da causalidade, mas na física quântica, ela é pensada como uma *disjunção* entre espaço-tempo e causalidade, onde as noções disjuntas de espaço-tempo e causalidade ainda

---

<sup>75</sup> *The very nature of the quantum theory thus forces us to regard the space-time co-ordination and the claim of causality, the union of which characterizes the classical theories, as complementary but exclusive features of the description, symbolizing the idealization of observation and definition respectively.*

estão essencialmente relacionadas pelo princípio geral da complementaridade (KAUARK-LEITE, 2017, p. 71-72, tradução nossa)<sup>76</sup>.

Portanto, C1, a primeira concepção da complementaridade de Bohr, refere-se à complementaridade da descrição espaço-temporal e da descrição causal. Embora ambas apareciam unidas na física clássica, na mecânica quântica elas surgem como aspectos mutuamente exclusivos, porém necessários, para a compreensão completa do fenômeno quântico.

A segunda concepção da complementaridade, C2, está essencialmente relacionada com a dualidade onda-partícula (KAUARK-LEITE, 2017, p. 69). Ela se fundamenta tanto na equação da energia ( $E = h\nu$ ), que estabelece a natureza corpuscular do fóton, quanto na relação de de Broglie ( $p = \frac{h}{\lambda}$ ), que estabelece a natureza ondulatória da matéria. A ideia central é que as descrições ondulatórias são complementares e mutuamente excludentes das descrições corpusculares. É nesse contexto que mencionamos anteriormente que a complementaridade fundamenta a dualidade onda-partícula de Bohr, de forma que o princípio de complementaridade pode ser considerado a causa das relações de incerteza proposta pelo físico dinamarquês.

O caso experimental oferece um ótimo exemplo de C2. Em certos experimentos, como aqueles voltados para detectar o efeito fotoelétrico ou o efeito Compton, a luz apresenta um comportamento corpuscular; enquanto em outros experimentos, como no experimento da dupla fenda, a luz se comporta como onda (CASSIDY *et al.*, 2002, p. 682). É importante observar que a luz ou a matéria nunca se comportam como onda e partícula simultaneamente, no mesmo experimento, de modo que cada experimento revela ou um comportamento ondulatório ou corpuscular. Consequentemente, o “mesmo objeto” se apresenta ou como uma onda ou como uma partícula dependendo do experimento (KAUARK-LEITE, 2017, p. 78). Essa é a essência de C2, a complementaridade entre onda e partícula: objetos quânticos podem se comportar como ondas ou como partículas, sendo cada descrição mutuamente excludente, mas complementar, necessária para a compreensão completa do fenômeno.

Por fim, a terceira concepção da complementaridade de Bohr, C3, é caracterizada pela complementaridade entre observáveis incompatíveis, como posição e momentum, ou energia e

---

<sup>76</sup> *the unity of spatiotemporal and causal knowledge has a sharply different status in classical physics and quantum physics. In classical physics, it is thought of as a conjunction of the essentially mutually independent a priori notions of space- time and causality, but in quantum physics, it is thought of as a disjunction between space- time and causality, whereby the disjointed notions of space- time and causality are nevertheless essentially related by the general principle of complementarity.*

tempo. De acordo com Kauark-Leite, essa concepção está essencialmente relacionada ao formalismo da mecânica quântica por meio das relações de incerteza (2017, p. 69). O cerne de C3 é que descrições que envolvem posição e momentum, ou energia e tempo, de um objeto quântico são mutuamente exclusivas, mas complementares. De maneira análoga à estrutura complementar de C2, ao descrever a posição ou energia de um objeto, a possibilidade de descrever seu momentum ou tempo é excluída.

Antes de proceder para como Heisenberg interpretou o princípio de complementaridade, é importante considerar o argumento central de Kauark-Leite que eleva C1 a um status epistêmico diferente de C2 e C3. De acordo com a autora, C2 e C3 podem ser considerados princípios físico-teóricos, pois ambos podem ser derivados diretamente do formalismo da mecânica quântica. A complementaridade onda-partícula (C2) pode ser derivada das equações da energia e do momentum, enquanto a complementaridade entre observáveis incompatíveis (C3) pode ser derivada das relações de incerteza. Assim, é possível afirmar que C2 e C3 pertencem à linguagem-objeto. Por outro lado, C1 não pode ser derivado do formalismo, sendo um princípio metateórico que é melhor compreendido como um princípio transcendental no sentido kantiano. Nas palavras de Kauark-Leite:

A meu ver, no entanto, as três noções da complementaridade presentes na conferência de Como de Bohr, e também em muitos de seus ensaios, não possuem o mesmo status epistêmico. A complementaridade onda/partícula (ou seja, C2) e a complementaridade entre observáveis incompatíveis (ou seja, C3) podem ser consideradas princípios físico-teóricos que podem ser derivados do formalismo da teoria quântica. Nesse sentido, podemos dizer que pertencem à linguagem-objeto. Em contrapartida, a complementaridade espaço-temporal/causal (ou seja, C1) é um princípio metateórico que não pode ser derivado do próprio formalismo. Nesse sentido, a complementaridade espaço-temporal/causal pertence à metalinguagem e é melhor compreendida como uma espécie de princípio transcendental no sentido kantiano (2017, p. 70, tradução nossa)<sup>77</sup>.

A conclusão da autora, com a qual concordamos, é que há apenas uma complementaridade geral, a entre descrição espaço-temporal e causal (C1). A ideia é que C1 funciona como um princípio metateórico, sem relações diretas com o formalismo quântico, do

---

<sup>77</sup> *In my view, nevertheless, the three notions of complementarity in Bohr's Como lecture and also in many of his essays do not have the same epistemic status. Wave/ particle complementarity (i.e., C2) and the complementarity between incompatible observables (i.e., C3) can be taken as physical- theoretical principles that can be derived from the formalism of quantum theory. In this sense, we can say that they belong to the object- language. By contrast, space- time/ causality complementarity (i.e., C1) is a meta- theoretical principle that cannot be derived from the formalism itself. In this sense space- time/ causality complementarity belongs to the meta- language and is best understood as a kind of transcendental principle in a Kantian sense.*

qual C2 e C3 podem ser instanciados (KAUARK-LEITE, 2017, p. 71). Em outras palavras, a complementaridade entre espaço-tempo e causalidade funciona como um metaprincípio geral, do qual C2 e C3 são apenas diferentes instanciações na linguagem-objeto, meros exemplos físico-teóricos. Assim, Kauark conclui C1 como o único princípio de complementaridade geral, interpretando-o não como um princípio acerca do mundo, não como um princípio no nível da linguagem-objeto, mas sim sobre o nosso conhecimento acerca do mundo, é um princípio no nível da metalinguagem (KAUARK-LEITE, 2017, p. 71 e 76).

Após compreender as três concepções da complementaridade presentes na obra de Bohr, é importante considerar a maneira que Heisenberg interpretou esse princípio. Para isso, é instrutivo examinar o posicionamento do físico em suas *Chicago Lectures*:

Agora, como uma descrição geométrica ou cinemática de um processo implica observação, segue-se que tal descrição dos processos atômicos necessariamente exclui a validade exata da lei de causalidade — e vice-versa. Bohr salientou que, portanto, é impossível exigir que ambos os requisitos sejam cumpridos pela teoria quântica. Eles representam aspectos complementares e mutuamente exclusivos dos fenômenos atômicos (HEISENBERG, 1949 [1930], p. 64, tradução nossa)<sup>78</sup>.

Nessa passagem de 1930, fica claro que Heisenberg adota a concepção C1 da complementaridade ao afirmar que uma descrição geométrica ou cinemática, que é uma descrição espaço-temporal, é complementar à descrição causal. Em outros momentos, como em *Physics and Philosophy*<sup>79</sup>, encontramos o físico alemão comentando as três concepções:

Portanto, Bohr defendeu o uso de ambas imagens, que ele chamou de “complementares” entre si. As duas imagens são, é claro, mutuamente exclusivas, porque uma certa coisa não pode ser ao mesmo tempo uma *partícula* (ou seja, uma substância confinada a um volume muito pequeno) e uma *onda* (ou seja, um campo espalhado por um grande espaço), mas as duas se complementam. Ao brincar com as duas imagens, indo de uma para a outra e vice-versa, finalmente obtemos a impressão correta do estranho tipo de realidade por trás de nossos experimentos atômicos. Bohr usa o conceito de “complementaridade” em vários lugares da interpretação da teoria quântica. O conhecimento da *posição* de uma partícula é complementar ao conhecimento de sua *velocidade* ou *momentum*. Se conhecermos um com alta precisão, não podemos conhecer o outro com alta precisão; ainda assim, devemos conhecer ambos para determinar o comportamento do sistema. A

<sup>78</sup> Now, as a geometric or kinematic description of a process implies observation, it follows that such a description of atomic processes necessarily precludes the exact validity of the law of causality — and conversely. Bohr has pointed out that it is therefore impossible to demand that both requirements be fulfilled by the quantum theory. They represent complementary and mutually exclusive aspects of atomic phenomena.

<sup>79</sup> Uma exposição muito semelhante das três concepções também pode ser observada em “Remarks on the Origin of the Relations of Uncertainty” (HEISENBERG, 1977 [1975], p. 6).

descrição *espaço-temporal* dos eventos atômicos é complementar à sua descrição *determinística* (HEISENBERG, 1958a, p. 49, tradução nossa, grifo nosso)<sup>80</sup>.

Embora seja possível notar as três concepções da complementaridade, com Heisenberg comentando a descrição espaço-temporal e causal, a onda-partícula e os observáveis incompatíveis, mantemos a interpretação adotada pelo físico (C1) nas *Chicago Lectures*. Kauark-Leite também defende que Heisenberg adota C1, afirmando que: “Heisenberg, por sua vez, tomou a complementaridade circular [C1] como a concepção original da complementaridade de Bohr (2017, p. 70, tradução nossa)<sup>81</sup>. Nota-se que, de maneira geral, o físico alemão sustenta que os conceitos clássicos são limitados, complementares e mutuamente excludentes, aproximando-se da formulação geral metateórica que defendemos para C1. Dessa forma, podemos concluir que, ao longo de sua obra, mesmo fazendo menções a C2 e C3, Heisenberg permanece fiel à C1. Portanto, quando for discutido a complementaridade do ponto de vista de Heisenberg, sempre vamos discutir a complementaridade entre descrição espaço-temporal e causal.

No entanto, há uma diferença<sup>82</sup> fundamental na compreensão da complementaridade entre Heisenberg e Bohr. Essa diferença reside na maneira como cada autor aborda os conceitos clássicos complementares. Enquanto Bohr afirma que esses conceitos não são ambíguos, Heisenberg acredita que eles são ambíguos (CAMILLERI, 2007a, p. 524). Para ilustrar essa diferença, é pertinente analisar uma citação de cada autor. Primeiramente, podemos observar Bohr argumentado que:

---

<sup>80</sup> Therefore, Bohr advocated the use of both pictures, which he called “complementary” to each other. The two pictures are of course mutually exclusive, because a certain thing cannot at the same time be a particle (i.e., substance confined to a very small volume) and a wave (i.e., a field spread out over a large space), but the two complement each other. By playing with both pictures, by going from the one picture to the other and back again, we finally get the right impression of the strange kind of reality behind our atomic experiments. Bohr uses the concept of “complementarity” at several places in the interpretation of quantum theory. The knowledge of the position of a particle is complementary to the knowledge of its velocity or momentum. If we know the one with high accuracy we cannot know the other with high accuracy; still we must know both for determining the behavior of the system. The space-time description of the atomic events is complementary to their deterministic description.

<sup>81</sup> Heisenberg, in turn, took circular complementarity to be Bohr’s original conception of complementarity.

<sup>82</sup> Camilleri elenca outras duas diferenças na interpretação da complementaridade dos autores. A primeira é como cada um interpreta a “descrição causal”. Bohr compreende que a descrição causal é sinônima da lei da conservação da energia, enquanto, para Heisenberg, ela é sinônima da equação de Schrödinger (CAMILLERI, 2007a). Por isso que é possível notar Heisenberg afirmando, nas *Chicago Lectures*, uma complementaridade entre descrição matemática, causal na equação de Schrödinger, e física, espaço-temporal (1949 [1930], p. 64-65). A segunda diferença envolve como Heisenberg compreende a noção de dualidade. Em termos gerais, Camilleri defende que, nas obras tardias, Heisenberg toma a posição de uma “complementaridade equivalente”, no sentido de que é possível usar ambas as imagens complementares, contudo, essas não acarretam um ganho na compreensão do fenômeno como para Bohr (CAMILLERI, 2006, p. 311-312).

De fato, é apenas a exclusão mútua de quaisquer dois procedimentos experimentais, permitindo a definição *não ambígua* das quantidades físicas complementares, que provem espaço para novas leis físicas, cuja coexistência pode parecer, à primeira vista, irreconciliável com os princípios básicos da ciência (1935, p. 700, tradução nossa, grifo nosso)<sup>83</sup>.

Enquanto Heisenberg, adotando um tom crítico, afirma que:

Em resposta à primeira questão, é possível dizer que o conceito de complementaridade introduzido por Bohr na interpretação da teoria quântica encorajou os físicos a *utilizar uma linguagem ambígua* em vez de uma linguagem *não ambígua*, a utilizar conceitos clássicos de *maneira um pouco vaga* em conformidade com o princípio de incerteza, a aplicar alternadamente diferentes conceitos clássicos que levariam a contradições caso empregados simultaneamente. Desta forma, fala-se sobre órbitas eletrônicas, sobre ondas materiais e densidade de carga, sobre energia e *momentum*, etc., sempre consciente do fato que esses conceitos possuem apenas uma *gama de aplicabilidade muito limitada* (1958a, 179, tradução nossa, grifo nosso)<sup>84</sup>.

Constata-se que Heisenberg concebe os conceitos clássicos complementares como ambíguos, vagos e limitados. Para ele, esses conceitos só podem ser empregados na mecânica quântica de maneira consistente se for considerada sua gama de aplicações limitada. Em contrapartida, Bohr defende que os conceitos complementares, por mais que não capturem perfeitamente os fenômenos quânticos, não são ambíguos. De fato, para o físico dinamarquês, é o princípio de complementaridade que possibilita o uso não ambíguo dos conceitos clássicos.

Nossa intenção até aqui foi a de apresentar com nitidez as concepções do princípio de complementaridade de Bohr e a maneira como Heisenberg as compreende. Essa digressão é relevante pois, segundo Heisenberg, a complementaridade “torna possível tomar o dualismo entre a imagem de onda e partícula como um ponto de partida adequado para uma interpretação. [...] Ele [Bohr], portanto, objetou ao fato que eu não havia começado pelo dualismo entre partículas e ondas” (1967 [1964], p. 106, tradução nossa)<sup>85</sup>. Sendo assim, podemos afirmar que

---

<sup>83</sup> *In fact, it is only the mutual exclusion of any two experimental procedures, permitting the unambiguous definition of complementary physical quantities, which provides room for new physical laws, the coexistence of which might at first sight appear irreconcilable with the basic principles of science.*

<sup>84</sup> *In answer to the first question one may say that the concept of complementarity introduced by Bohr into the interpretation of quantum theory has encouraged the physicists to use an ambiguous rather than an unambiguous language, to use the classical concepts in a somewhat vague manner in conformity with the principle of uncertainty, to apply alternatively different classical concepts which would lead to contradictions if used simultaneously. In this way one speaks about electronic orbits, about matter waves and charge density, about energy and momentum, etc., always conscious of the fact that these concepts have only a very limited range of applicability.*

<sup>85</sup> *make it possible to take the dualism between the wave and particle picture as a suitable starting point for an interpretation. [...] He therefore took objection to the fact that I had not started from the dualism between particles and waves.*

a causa apontada por Bohr para as relações de incerteza é o princípio de complementaridade. Para Bohr, é através desse princípio metateórico que podemos interpretar a problemática dualidade onda-partícula e os observáveis incompatíveis, como posição e momentum.

Para concluir o tópico da segunda causa é importante analisar como Heisenberg recebe a crítica de Bohr. Heisenberg adota a dualidade fundamentada pela complementaridade como causa em apenas duas de suas obras, no artigo apresentado em Solvay com Born e nas *Chicago Lectures*. Vale citá-las, começando com o artigo conjunto com Born:

Agora se verifica que todas essas quantidades podem ser medidas e definidas *individualmente* com exatidão, como na teoria clássica, porém, para medidas simultâneas de quantidades canonicamente conjugadas (em geral: quantidades cujos operadores não comutam) não é possível ficar abaixo de uma limitação característica de indeterminação [Unbestimmtheit]. Para determinar isso, de acordo com Bohr, pode-se partir, de maneira bem geral, do dualismo empiricamente dado entre ondas e corpúsculos (BORN; HEISENBERG, 2009 [1927], p. 431, tradução nossa)<sup>86</sup>.

Durante a conferência de Solvay de 1927, Heisenberg e Born defenderam que a dualidade onda-partícula fundamentada pela complementaridade justifica as relações de incerteza. Nos parágrafos subsequentes a essa citação, eles reforçam a centralidade da dualidade ao utilizar as fórmulas para o *momentum* e energia para derivar as relações de incerteza, retomando exatamente o caso que vimos em C2.

Os tradutores da versão em inglês do artigo apresentado por Heisenberg e Born, em Solvay, 1927, Bacciagaluppi e Valentini, destacam que os físicos fazem referência a um artigo que Bohr pretendia publicar, intitulado *Über den begrifflichen Aufbau der Quantentheorie*. Embora esse artigo nunca tenha sido publicado, os tradutores mencionam que é possível encontrar algumas páginas com o título *Zur Frage des begrifflichen Aufbaus der Quantentheorie* no arquivo de Bohr, sob o diretório “*Como Lecture II*” (BACCIAGALUPPI; VALENTINI, 2009, p. 446). Ora, é improvável que Heisenberg tenha tido contato com o artigo completo de 1928 de Bohr, pois, afinal de contas, ele só foi publicado meses após a conferência de Solvay de 1927. Não obstante, o físico alemão já havia recebido as críticas de Bohr em março de 1927 e, mais importante, esteve presente na conferência de Bohr em Como, que ocorreu um mês antes da conferência de Solvay. Considerando que a conferência de Como é a base para o

---

<sup>86</sup> *It now turns out that all these quantities can be individually exactly measured and defined, as in the classical theory, but that for simultaneous measurements of canonically conjugate quantities (more generally: quantities whose operators do not commute) one cannot get below a characteristic limit of indeterminacy [Unbestimmtheit]. To determine this, according to Bohr one can start quite generally from the empirically given dualism between waves and corpuscles.*

artigo de 1928, é muito provável que Heisenberg e Born façam referência a ela. O fato de os físicos evocarem a dualidade fundamentada na complementaridade como causa para as relações de incerteza confirma essa interpretação, uma vez que, como foi destacado, a causa defendida por Heisenberg no artigo de 1927 é a tese da perturbação incontrolável. Por conseguinte, é seguro concluir que, a partir da crítica de Bohr, Heisenberg se apropria da complementaridade como segunda causa para as relações de incerteza na conferência de Solvay de 1927.

A segunda ocasião em que Heisenberg utiliza a segunda causa é nas *Chicago Lectures*. Nela, há duas passagens centrais que demonstram a segunda causa. A primeira aparece logo na introdução: “Desta forma, obtém-se as limitações do conceito de partícula considerando o conceito de onda. Como N. Bohr mostrou, esse é o fundamento de uma derivação muito simples das relações de incerteza entre coordenada e *momentum* de uma partícula” (1949 [1930], p. 11, tradução nossa)<sup>87</sup>. A segunda citação já apresentamos no capítulo anterior: “De acordo com Bohr, essa restrição [da aplicabilidade dos conceitos causada pelas relações de incerteza] pode ser deduzida do princípio de que os processos da física atômica podem ser visualizados igualmente em termos de ondas ou partículas” (1949 [1930], p. 13, tradução nossa)<sup>88</sup>. Em ambas as passagens, Heisenberg cita o artigo de 1928 de Bohr, evidenciando o emprego do argumento bohriano de 1928 como causa das relações de incerteza. Em outras palavras, no artigo de Solvay e nas *Chicago Lectures*, Heisenberg aceita a crítica de Bohr, argumentando que a dualidade onda-partícula fundamentada na complementaridade é a verdadeira causa, ou seja, em última instância a complementaridade é a causa verdadeira das relações de incerteza.

Portanto, torna-se evidente a segunda causa explicativa das relações de incerteza presente na obra de Heisenberg. Essa causa surge das críticas de Bohr à primeira derivação, indicando que a tese da perturbação incontrolável não era suficiente para justificar o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  e, conseqüentemente, as próprias relações de incerteza. Ao considerar a necessidade da dualidade nas explicações e que essa é fundamentada por Bohr no princípio de complementaridade, podemos deduzir que a segunda causa para as relações de incerteza é a própria complementaridade. Assim, ao invés de argumentar que as relações são fundamentadas na tese da perturbação incontrolável, essa justificativa afirma que a complementaridade é a razão para a emergência das relações de incerteza.

---

<sup>87</sup> *In this way one obtains the limitations of the concept of a particle by considering the concept of a wave. As N. Bohr has shown, this is the basis of a very simple derivation of the uncertainty relations between co-ordinate and momentum of a particle.*

<sup>88</sup> *According to Bohr, this restriction may be deduced from the principle that the processes of atomic physics can be visualized equally well in terms of wave or particles.*

### 3. CAPÍTULO III: AS INTERPRETAÇÕES DE HEISENBERG PARA SUAS RELAÇÕES DE INCERTEZA

Uma vez compreendidas as derivações e causas das relações de incerteza apresentadas por Heisenberg, prosseguimos para a discussão de suas interpretações. Ao examinar a literatura especializada (CHIBENI, 2005; JAMMER, 1966, 1974; JIJNASU, 2016; PESSOA JR., 2006a, SILVA, 2014b), identificamos três interpretações predominantes dessas relações: a epistemológica, a ontológica e a estatística<sup>89</sup>. Das três, abordaremos apenas as duas primeiras porque são as únicas desenvolvidas dentro da obra de Heisenberg.

A interpretação epistemológica utiliza o termo “incerteza” para se referir precisamente aos limites do conhecimento humano. Os defensores dessa interpretação argumentam que não há uma indeterminação intrínseca na natureza, mas sim incertezas relativas ao conhecimento humano das variáveis conjugadas. Nesse caso, as imprecisões ou incertezas são introduzidas pela interação do aparato de medida e o objeto medido, não existindo propriamente na natureza imperturbada.

Por outro lado, adotaremos o termo “indeterminação” para caracterizar a interpretação ontológica das relações de Heisenberg, com o objetivo de diferenciá-la da interpretação epistemológica. Essa interpretação ontológica estabelece que as relações de indeterminação são uma propriedade fundamental e inerente da natureza (SILVA, 2014b, p. 2). Portanto, não se trata mais de um conhecimento incerto de um mundo preciso, mas sim da indeterminação como uma característica genuína da natureza. Assim, as partículas não possuiriam posição e *momentum* precisos simultaneamente, sendo os objetos quânticos intrinsecamente indeterminados.

Este capítulo propõe analisar a seguinte questão: ao afirmar que a medida precisa da posição torna o *momentum* incerto ou indeterminado (ou vice-versa), estamos considerando que 1) tais variáveis conjugadas têm seus valores definidos simultaneamente, porém nosso conhecimento preciso e simultâneo deles é impossível; ou 2) elas não possuem valores

---

<sup>89</sup> É importante justificar a exclusão da interpretação estatística do nosso escopo. Conforme sinalizado, o recorte desta dissertação são as relações de incerteza na acepção de Heisenberg, sendo assim, interpretações que ele não desenvolveu ou discutiu fogem do nosso escopo. Esse é o caso da interpretação estatística. Por mais que seja possível identificar o uso do conceito “desvio padrão” nas *Chicago Lectures* (CHIBENI, 2005, p. 185), fato que poderia indicar uma interpretação estatística, Heisenberg nunca desenvolveu o tema. De fato, quem desenvolveu e defendeu a interpretação estatística foi Karl Popper em *A Lógica da Pesquisa Científica* de 1934. Ademais, ainda é possível argumentar que Heisenberg sempre interpretou que  $\Delta q$  e  $\Delta p$  se referem a partículas individuais e não a conjuntos estatísticos como demanda a interpretação de Popper.

definidos simultaneamente, de maneira que a variável não medida não tem valor real ou tem um “valor borrado”? Em outras palavras, as relações de Heisenberg estabelecem um limite apenas epistêmico ou propriamente ontológico para os valores das variáveis conjugadas? Para responder essa pergunta, prosseguimos com uma análise e discussão dos conceitos empregados.

### 3.1. É confiável dividir as interpretações pela diferença terminológica?

Corriqueiramente, tanto na literatura especializada quanto na de divulgação, as relações de Heisenberg são denominadas de relações de incerteza. Essa terminologia é problemática quando analisada filosoficamente, pois o conceito de “incerteza” é polissêmico. Conforme salientado por Hilgevoord e Uffink (2016, p. 2), a incerteza pode se referir à falta de conhecimento acerca de uma quantidade, à imprecisão experimental, à ambiguidade na definição da quantidade ou até mesmo ao espalhamento estatístico em um conjunto. Nesses casos, a “incerteza” se torna sinônimo de imprecisão, inexatidão, indefinição, indeterminação, entre outros conceitos problemáticos.

O objetivo desta seção é distinguir os conceitos que orbitam as interpretações das relações de incerteza, a fim de alcançar uma maior clareza conceitual em cada uma delas. Para isso, retomaremos a pergunta de Harris: “Livros didáticos antigos se referem ao princípio de indeterminação de Heisenberg. Livros didáticos atuais se referem ao princípio de incerteza. No entanto, incerteza não é sinônimo de indeterminação. Quando e por que esse princípio mudou de nome?” (1997, p. 461, tradução nossa)<sup>90</sup>. A questão de por que e como as relações de incerteza mudaram, e continuam a mudar, de terminologia é a que nos interessa aqui.

Para responder Harris, a divisão terminológica fornecida por Jammer é esclarecedora. Segundo o comentador, Heisenberg emprega três termos para se referir às suas relações: *Ungenauigkeit* (inexatidão ou imprecisão), *Unbestimmtheit* (indeterminação) e *Unsicherheit* (incerteza). Jammer os define da seguinte maneira:

1. Se a ênfase se encontra na *ausência do conhecimento (subjetivo) dos valores dos observáveis*, devemos empregar o termo *incerteza* em conformidade com o uso de Heisenberg,
2. Se a ênfase se encontra na *ausência supostamente objetiva (isto é, independente do observador) de valores (precisos) dos observáveis*, devemos empregar o termo *indeterminado*.

---

<sup>90</sup> *Old textbooks refer to the indeterminacy principle of Heisenberg. Current textbooks refer to the uncertainty principle. But uncertainty is not synonymous with indeterminacy. When and why has this principle changed names?*

3. Se *nenhum dos aspectos for enfatizado*, devemos empregar *indeterminação* como um termo neutro (1974, p. 61-62, tradução nossa, grifo nosso)<sup>91</sup>.

As duas primeiras definições são essenciais para explorarmos uma resposta à nossa questão. Ao empregar o termo “incerteza” (*uncertainty*), pressupõe-se uma ignorância ou falta de conhecimento do sujeito em relação à Natureza, o que remete à interpretação epistemológica das relações de Heisenberg. Ao usar o termo “indeterminação” (*indeterminateness*), subentende-se uma indeterminação intrínseca da Natureza, remetendo à interpretação ontológica das relações de indeterminação. Por fim, discordamos da terceira afirmação que elenca “indeterminação” (*indeterminacy*) como um termo neutro. A indeterminação já indica uma interpretação ontológica, o que pode causar confusões se também for considerada neutra. Portanto, preferimos utilizar “inexatidão” ou “imprecisão”, termos que se referem ao processo de medida, como uma terminologia mais neutra.

Baseando-nos na distinção conceitual de Jammer, é possível responder à questão levantada por Harris. Por serem “incerteza” e “indeterminação” conceitos distintos, torna-se problemática a variação conceitual que acontece ao se referir às relações de Heisenberg. A partir da distinção conceitual de Jammer, fica claro que o emprego de “incerteza” remete a uma interpretação epistemológica, enquanto o uso de “indeterminação” remete a uma interpretação ontológica. Assim, em resposta a Harris, as mudanças na terminologia das relações de Heisenberg refletem as preferências interpretativas dos autores. Por questão de coerência, aqueles que interpretam que as relações estabelecem um limite epistemológico deveriam empregar a terminologia das “relações de incerteza”; enquanto aqueles que defendem uma indeterminação intrínseca na Natureza deveriam optar pelas “relações de indeterminação”.

Porém, conforme observado por Jammer e corroborado por Hilgevoord e Uffink (2016, p. 2), Heisenberg não adotou uma terminologia padronizada para se referir às suas relações, variando entre termos como incerteza, indeterminação e imprecisão. Dado que essa distinção entre os termos é feita tardiamente por Jammer, uma pergunta crucial é: Heisenberg teria sido fiel a essa distinção conceitual? Em outras palavras, é possível dividir as interpretações do próprio Heisenberg em cada uma de suas obras a partir dessa diferença terminológica?

Antes de abordar a resposta é importante destacar que as posições dos comentadores variam sobre o rigor filosófico e precisão conceitual de Heisenberg ao longo de suas obras. Por

---

<sup>91</sup> 1. *If the emphasis lies on the absence of (subjective) knowledge of the values of the observables we shall use the term uncertainty in conformance with Heisenberg’s usage, 2. If the emphasis lies on the supposedly objective (i.e., observer-independent) absence of (precise) values of observables we shall use the term indeterminateness. 3. If neither aspect is emphasized we shall use indeterminacy as a neutral term.*

um lado, Cassidy defende que Heisenberg não se aprofundou em questões filosóficas, interessando-se apenas naquilo que era estritamente necessário para desenvolver suas falas públicas de maneira mais compreensível (1992b, p. 257).

Por outro lado, Silva e Heelan sustentam que a filosofia era fundamental no pensamento do físico alemão. Silva argumenta que a filosofia era tão central para Heisenberg que se tornava indissociável de sua ciência (2016, p. 5). Heelan, por sua vez, observa que Heisenberg é o autor de “muitos ensaios investigativos filosoficamente sofisticados acerca da mecânica quântica [...]” (2016, p. 139-140, tradução nossa)<sup>92</sup>.

Independentemente da posição adotada, é essencial analisar os conceitos nas obras de Heisenberg. Nesse contexto, concordamos plenamente com Cassidy, que afirma que posições filosóficas sistemáticas não eram tão importantes para Heisenberg (1992b, p. 255; 2009, p. 177). Esse cuidado deve ser ainda maior ao considerar que a maioria das obras de Heisenberg deriva de falas públicas, colóquios, aulas lecionadas e planos de aula, o que, muitas vezes, compromete a precisão conceitual. A sua indiferença em relação aos sistemas filosóficos, aliada ao fato de que grande parte de suas obras provém de transcrições de sessões orais, levanta dúvidas sobre a precisão conceitual de suas ideias.

Mesmo assim, não pretendemos afirmar que Heisenberg era antifilosófico. Pelo contrário, tendemos a concordar com as posições de Silva e Heelan. Apesar de Heisenberg ter um grande interesse filosófico e produzir obras de considerável complexidade filosófica, sua precisão conceitual é questionável. Em várias ocasiões, é possível notar um certo descuido conceitual em suas obras, o que complica a interpretação de suas ideias. No tópico específico das relações de incerteza, Heisenberg também enfrenta esse problema. Três exemplos de variação conceitual interna ilustram efetivamente esse ponto.

O primeiro exemplo pode ser encontrado no artigo de 1927. Ao analisá-lo cuidadosamente, nota-se uma gama de conceitos que podem ser interpretados tanto de uma perspectiva epistemológica quanto ontológica. Citações do tipo “No instante em que a posição do elétron é *conhecida*, o seu *momentum* pode, portanto, ser *conhecido* até as magnitudes que correspondem a essa mudança descontínua” (1983b [1927], p. 64, tradução nossa, grifo nosso)<sup>93</sup>, contrastam com citações posteriores que afirmam: “No entanto, a órbita, como notada anteriormente, pode ser calculada apenas estatisticamente a partir das condições iniciais, circunstância que se pode considerar como consequência do *indeterminismo fundamental* das

---

<sup>92</sup> *many probing philosophically sophisticated essays about quantum mechanics [...].*

<sup>93</sup> *At the instant at which the position of the electron is known, its momentum therefore can be known up to magnitudes which correspond to that discontinuous change.*

condições iniciais” (1983b [1927], p. 74, tradução nossa, grifo nosso)<sup>94</sup>. No primeiro caso, ao insinuar um limite no conhecimento das grandezas do elétron, Heisenberg adota implicitamente uma interpretação epistemológica. No segundo caso, ele parece assumir uma interpretação ontológica ao afirmar o “indeterminismo fundamental” das condições iniciais.

Um exemplo ainda mais enfático da imprecisão conceitual em 1927 pode ser encontrado no segundo parágrafo, no qual Heisenberg comenta: “Os próprios experimentos que fornecem tal definição sofrem uma *indeterminação* introduzida puramente pelos *procedimentos observacionais* que utilizamos quando perguntamos, por meio dos experimentos, sobre a determinação simultânea de duas grandezas canonicamente conjugadas” (1983b [1927], p. 68, tradução nossa, grifo nosso)<sup>95</sup>. Dessa citação podemos inferir uma interpretação ontológica pelo uso do termo *indeterminação* como uma característica intrínseca da Natureza não perturbada. Ora, essa *indeterminação* é apresentada como efeito do procedimento observacional, ou seja, como resultado da interação do sujeito com a Natureza. Nesse caso, a terminologia mais precisa seria *incerteza* ao invés de *indeterminação*, uma vez que a causa das relações implica uma interpretação epistemológica. Por conseguinte, fica evidente o descuido conceitual de Heisenberg em 1927, no uso da terminologia, como salientado por Jammer (1974, p. 61), variando sem critério entre *Ungenauigkeit* (imprecisão), *Unbestimmtheit* (*indeterminação*) e *Unsicherheit* (*incerteza*).

Um terceiro exemplo de inconsistência conceitual pode ser observado nas *Chicago Lectures*. Logo na introdução, Heisenberg comenta: “De modo semelhante, esse limite inferior à precisão com que certas variáveis podem ser *conhecidas* simultaneamente pode ser postulado como uma lei da natureza (na forma das chamadas *relações de incerteza*) [...]” (1949 [1930], p. 3, tradução nossa, grifo nosso)<sup>96</sup>. Por outro lado, em outro momento no próprio texto, ele afirma: “Essa *indeterminação* deve ser considerada como uma *característica essencial* do elétron [...]. Essa *relação de incerteza* especifica os limites dentro dos quais a imagem corpuscular pode ser aplicada” (1949 [1930], p. 14-15, tradução nossa, grifo nosso)<sup>97</sup>. O caso é semelhante ao artigo de 1927. Na primeira citação, Heisenberg adota uma interpretação

---

<sup>94</sup> However, the orbit, as noted earlier, can be calculated only statistically from the initial conditions, a circumstance that one can consider as a consequence of the fundamental indeterminism of the initial conditions.

<sup>95</sup> The experiments which provide such a definition themselves suffer an indeterminacy introduced purely by the observational procedures we use when we ask of them the simultaneous determination of two canonically conjugate quantities.

<sup>96</sup> In a similar manner, this lower limit to the accuracy with which certain variables can be known simultaneously may be postulated as a law of nature (in the form of the so-called uncertainty relations) [...].

<sup>97</sup> This indeterminateness is to be considered as an essential characteristic of the electron [...]. This uncertainty relation specifies the limits within which the particle picture can be applied.

epistemológica, empregando corretamente a terminologia das relações de incerteza para se referir a um conhecimento limitado das variáveis canonicamente conjugadas. Na segunda citação, ele altera sua interpretação, compreendendo as relações de maneira ontológica. O problema com essa mudança não é ela em si, mas a falta de consistência filosófica do físico. Se ele modificou sua abordagem para referir-se a uma interpretação ontológica, deveria ter empregado o termo “relações de indeterminação” ao invés “de incerteza”. Novamente temos um caso claro de descuido conceitual por parte de Heisenberg.

Ao analisar esses exemplos, é possível destacar dois aspectos-chave. O primeiro aspecto foi reconhecido por Chibeni. Heisenberg falha em distinguir as interpretações das relações de incerteza ao longo de suas obras (2005, p. 185), adotando alternativamente a interpretação epistemológica e ontológica sem distingui-las precisamente. Isso gera um problema que leva ao segundo aspecto-chave: a inconsistência na terminologia empregada por Heisenberg. Por conseguinte, podemos responder à questão feita no começo dessa seção de maneira conclusiva: é possível dividir as interpretações das relações de incerteza que Heisenberg adota em cada obra somente a partir do uso conceitual? Não. Conforme argumentado, Heisenberg não dispõe de uma precisão conceitual satisfatória para a análise filosófica. Devido à falta de reconhecimento por parte do autor das diferentes interpretações possíveis das relações de incerteza, muitas vezes conceitos que denotam uma interpretação epistemológica, como incerteza e conhecimento, são empregados em discussões nas quais a interpretação é ontológica, e vice-versa. Sendo assim, a nossa divisão vai pautar as interpretações por outros parâmetros<sup>98</sup>, mais seguros do que apenas a terminologia empregada.

### 3.2. A interpretação epistemológica

Devido ao uso pouco rigoroso da terminologia por parte de Heisenberg, serão empregados dois recursos para identificar a interpretação epistemológica em suas obras. O primeiro recurso é o emprego da primeira derivação — a por meio do microscópio de raios- $\gamma$ . O segundo recurso consiste em justificar as relações de incerteza por meio da tese da perturbação incontrolável. Desta maneira, o objetivo deste capítulo é demonstrar que ao utilizar

---

<sup>98</sup> Isso não significa que abrimos mão da distinção entre “relações de incerteza” como demarcação epistemológica e “Relações de Indeterminação” como demarcação ontológica. A distinção se mantém na escrita desta dissertação para fins de organização, ela apenas não será utilizada como guia para interpretar a obra de Heisenberg.

a primeira derivação ou a tese da perturbação incontrolável Heisenberg adota uma interpretação epistemológica.

Antes de explorarmos os casos na obra de Heisenberg, é crucial definir com precisão a interpretação epistemológica. Nesse sentido, os comentários de Pessoa Jr. são esclarecedores. Aquilo que Pessoa Jr. denomina de “interpretação dualista realista” satisfaz precisamente o que compreendemos como interpretação epistemológica:

Segundo esta visão, a partícula tem sempre  $x$  e  $p_x$  bem definidos simultaneamente, só que tais valores são desconhecidos. Se medirmos  $x$  com boa *resolução*, temos necessariamente uma *incerteza* ou desconhecimento grande para  $p_x$ , pois a medição de  $x$  por um aparelho macroscópico provoca um distúrbio incontrolável no valor de  $p_x$ . (2006a, p. 74; 2006c, p. 9).

Nesse caso, uma partícula sempre possui valores bem definidos simultaneamente para suas variáveis conjugadas, não havendo uma indeterminação intrínseca e fundamental na Natureza. O que as relações de incerteza estabelecem, portanto, é uma limitação no conhecimento do sujeito em relação às variáveis conjugadas. Devido ao distúrbio incontrolável em todo ato de medição<sup>99</sup>, há uma limitação no conhecimento humano das variáveis conjugadas de uma partícula. Por consequência, a interpretação epistemológica afirma uma limitação cognitiva acerca das variáveis canonicamente conjugadas, não sendo possível conhecê-las com precisão simultaneamente mesmo que ambas as variáveis tenham valores previamente definidos.

Diante disso, a interpretação epistemológica pode adotar um criptodeterminismo. O determinismo das leis naturais é mantido, e a “incerteza” é introduzida apenas no âmbito epistemológico. Assim, a imprevisibilidade dos resultados de medições e o caráter estatístico da mecânica quântica são decorrentes do conhecimento limitado sobre o estado de um sistema (PESSOA JR., 1992, p. 184; 2006a, p. 59), e não de uma indeterminação inerente à Natureza.

A analogia que Heisenberg faz com o conceito de temperatura da termodinâmica de Gibbs exemplifica a interpretação epistemológica:

Mas essas quantidades *não representam diretamente* um processo ou situação no espaço e tempo, como aquelas da mecânica clássica; não são simplesmente as localizações e velocidades das partículas que caracterizam um estado. Pelo

---

<sup>99</sup> Uma ressalva nesse ponto é importante. Como aquilo que denominamos de interpretação epistemológica pressupõe um sistema que sofrerá um distúrbio, pressupõe um realismo de fundo que vai ser alterado pela intervenção do sujeito, é possível compreender, pelo viés do realismo, como uma interpretação ontológica. A ideia é que ao considerar uma perturbação entre observador e objeto observado, sempre pressupomos uma realidade subjacente para ser perturbada.

contrário, elas *têm uma certa relação com o conceito de temperatura* ao passo que geralmente nos fornecem apenas informações acerca da probabilidade a qual podemos antecipar certas localizações e velocidade de partículas elementares caso empreendermos a observá-las (2019 [1942], p. 55-56, tradução nossa, grifo nosso)<sup>100</sup>.

Nota-se que os conceitos de velocidade e posição na mecânica quântica possuem uma analogia com o conceito de temperatura. Este último é definido por Heisenberg de uma forma peculiar: o conceito de temperatura não significa uma propriedade física do sistema, como uma posição ou velocidade na física clássica, mas sim o nosso grau de conhecimento acerca do sistema. Em suas palavras: “Portanto, temperatura não é algo pertencente ao próprio sistema mecânico, mas denota o nosso conhecimento do sistema” (2019 [1942], p. 53, tradução nossa)<sup>101</sup>. Nesse contexto, o conceito de temperatura introduz, pela primeira vez, na física clássica o conhecimento do sujeito acerca de um sistema físico. Análogo à forma que a temperatura na termodinâmica de Gibbs denota o grau de conhecimento do sujeito acerca de um sistema físico, a interpretação epistemológica das relações de incerteza declara que elas limitam o conhecimento simultâneo de variáveis conjugadas. Em outras palavras, ambos os casos se referem apenas ao conhecimento humano do sistema físico, e não às propriedades intrínsecas do próprio sistema.

Devido ao uso conceitual não rigoroso, é difícil encontrar citações em que Heisenberg se declara claramente a favor de uma interpretação específica. No entanto, em um manuscrito de uma aula intitulado *Encounters and Conversations with Albert Einstein*, de 1974, é possível observar uma forte tendência epistemológica. De acordo com Heisenberg:

Essas relações [de incerteza] envolvem a afirmação de que dois determinantes de um sistema, que devem ambos ser *conhecidos* ao mesmo tempo na física clássica para determinar um sistema completamente, *não podem*, na teoria quântica, *ser conhecidos exatamente no mesmo momento*; e, portanto, entre as *incertezas* ou *inexatidões* dessas quantidades existem relações matemáticas que impedem um *conhecimento exato de ambas as quantidades* (1989 [1974], p. 116, tradução nossa, grifo nosso)<sup>102</sup>.

---

<sup>100</sup> *But those quantities do not directly represent a process or situation in space and time, like those of classical mechanics; they are not simply the locations and velocities of the particles that characterize a state. Rather, they have a certain relationship to the concept of temperature insofar as they generally provide us only with information regarding the probability with which we might anticipate certain locations and velocities of elementary particles if we undertake to observe them.*

<sup>101</sup> *Therefore, temperature is not something belonging to the mechanical system as such but denotes our knowledge of the system.*

<sup>102</sup> *These relations involve the statement that two determinants of a system, which must both be known at once in classical physics, in order to determine the system completely, cannot, in quantum theory, be exactly known at the same moment; and hence that between the uncertainties or inexactitudes of these quantities there are mathematical relations which prevent an exact knowledge of both quantities.*

Nessa citação, observa-se o físico comentando uma limitação no conhecimento exato das variáveis canonicamente conjugadas. Na física clássica, era possível conhecer simultaneamente e com precisão esses dois determinantes, o que possibilitava determinar completamente um sistema. Contudo, na mecânica quântica, isso não é mais possível. Assim, se as relações de incerteza impedem um conhecimento preciso simultâneo das variáveis conjugadas, o que se expressa é uma interpretação epistemológica.

### 3.2.1. Da tese da perturbação incontrolável à interpretação epistemológica

Nesta seção prosseguimos com a discussão de um dos casos em que Heisenberg implicitamente emprega essa interpretação: a utilização da tese da perturbação incontrolável como causa para as relações de incerteza.

Ao assumir a tese da perturbação incontrolável estabelecemos um limite daquilo que pode ser obtido por meio do ato de observação ou medida. Retomando o próprio exemplo do microscópio de raios- $\gamma$ , ao realizar uma medida precisa da posição de uma partícula, isso implica em uma perturbação inevitável em seu *momentum*, e vice-versa, de forma que aquilo que podemos conhecer do estado do sistema é limitado. Em outras palavras, uma vez que o nosso conhecimento físico do estado de uma partícula necessita desse processo de observação, o qual inevitavelmente perturba esse estado, isso impõe uma limitação no conhecimento que possamos obter acerca desse estado. Assim, todo ato pelo qual obtemos conhecimento de um sistema quântico altera, ou melhor, destrói o conhecimento prévio desse sistema, estabelecendo um limite para o nosso conhecimento acerca dele. Como a limitação é relativa ao processo de obtenção de conhecimento, e não às partículas elas mesmas, assume-se aqui uma interpretação epistemológica.

Para ilustrar essa conexão na obra de Heisenberg é instrutivo revisitar uma passagem do texto *The Teachings of Goethe and Newton on Colour in the Light of Modern Physics*:

A natureza, assim, escapa à determinação precisa, em termos de nossas ideias do senso comum, por causa de uma *perturbação inevitável que é parte de toda observação*. Originalmente, o objetivo de toda a ciência era *descrever a natureza, tanto quanto possível, como ela é*, ou seja, sem a nossa interferência e a nossa observação. Agora percebemos que este é um objetivo inatingível. Na física atômica, é impossível negligenciar as mudanças produzidas no

objeto observado pela observação (HEISENBERG, 1966 [1941], p. 82, tradução nossa, grifo nosso)<sup>103</sup>.

Essa citação se torna mais clara se interpretada de trás para frente. O ponto de partida é a máxima de que no domínio atômico é impossível negligenciar as alterações causadas no objeto medido pelo processo de medição. Essa afirmação é considerada um fato extraído do experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ , onde a medida de uma das variáveis conjugadas inflige uma perturbação na outra. Assim, a tese da perturbação incontrolável, a primeira causa das relações de incerteza, coloca em xeque um dos pilares do paradigma da física clássica: não é mais viável descrever a natureza sem considerar os efeitos da perturbação da nossa observação, ou seja, não é mais possível descrever objetivamente a natureza como ela é em si mesma. Essa perturbação, presente no domínio quântico, necessariamente surge em toda observação ou ato de medida, sendo inevitável e, como discutido no capítulo anterior, incontrolável, não podendo ser mensurada e corrigida na teoria.

A conexão da tese da perturbação incontrolável com a interpretação epistemológica é destacada logo na primeira linha da citação. A perturbação do objeto medido impossibilita uma determinação precisa da natureza nos termos do senso comum. O emprego da expressão “determinação precisa” poderia sugerir inclinações ontológicas. Porém, considerando o aposto crucial, “determinação precisa, em termos de nossas ideias do senso comum”, a interpretação mais plausível é a epistemológica. Devido à perturbação incontrolável, somos incapazes de capturar precisamente a natureza com nossas ideias e conceitos do senso comum. Isso ocorre porque os nossos conceitos derivam da observação ou do ato de mensuração, sofrendo, por isso, da própria limitação desses processos. A implicação interpretativa central dessa limitação reside no fato de que não é necessariamente a natureza atômica que é indeterminada, mas sim a nossa linguagem. Em termos gerais, não se trata de uma interpretação ontológica “indeterminada”, mas sim de uma incerteza na nossa definição dos conceitos. Um argumento que enfatiza mais claramente tal conexão pode ser encontrado no artigo *The idea of Nature in Contemporary Physics* contido em *The physicist's Conception of Nature*:

Enquanto, na observação de objetos do cotidiano, o processo físico envolvido na realização da observação desempenha apenas um papel subsidiário, no caso das menores partículas que constituem a matéria, *todo processo de observação produz uma grande perturbação*. Não podemos mais

---

<sup>103</sup> *Nature thus escapes accurate determination, in terms of our commonsense ideas, by an unavoidable disturbance which is part of every observation. It was originally the aim of all science to describe nature as far as possible as it is, i.e. without our interference and our observation. We now realize that this is an unattainable goal. In atomic physics it is impossible to neglect the changes produced on the observed object by observation.*

falar do comportamento da partícula independentemente do processo de observação. Como consequência final, as leis naturais formuladas matematicamente na teoria quântica *não lidam mais com as partículas elementares em si, mas com o nosso conhecimento delas* (1958b [1953], p. 15, tradução nossa, grifo nosso)<sup>104</sup>.

O primeiro passo ao analisar essa citação é identificar a tese da perturbação incontrolável. Ao reafirmar que todo processo de observação produz uma perturbação no objeto observado, Heisenberg enfatiza que não é mais possível falar objetivamente dos objetos no domínio quântico independentemente do modo como são observados. A primeira consequência dessa constatação é que a descrição de qualquer objeto quântico deve levar em conta o processo de observação e a perturbação resultante. Além disso, dessa perturbação Heisenberg extrai uma consequência revolucionária para a física: as leis naturais na física quântica, incluindo as relações de incerteza, não fazem afirmações sobre as próprias partículas, mas sobre o nosso conhecimento dos objetos. Em outras palavras, leis naturais no domínio quântico não estabelecem propriedades ou relações dos próprios objetos, mas nos informam acerca deles. Como a descrição dos objetos quânticos necessariamente inclui considerações acerca do processo de observação, o conteúdo das leis físicas reflete o conhecimento humano, e não as propriedades dos objetos em si.

Considerando as relações de incerteza como uma dessas leis naturais, é correto afirmar, dentro dessa chave interpretativa, que elas demonstram apenas o nosso grau de conhecimento acerca de um sistema. Nesse caso, novamente, o que está sendo descrito pelas relações de incerteza não é uma indeterminação da posição e *momentum* das próprias partículas, mas sim uma limitação do nosso conhecimento acerca delas. Nada impede que tais valores existam simultaneamente na natureza; o ponto é que o nosso conhecimento dessas variáveis conjugadas é limitado devido à perturbação incontrolável no próprio ato de observação.

A sequência da citação de Heisenberg reforça esse argumento:

Assim, a realidade objetiva das partículas elementares foi estranhamente dispersada, não na neblina de alguma nova concepção mal definida ou ainda inexplicada de realidade, mas na clareza transparente da matemática que *não descreve mais o comportamento das partículas elementares, mas somente o*

---

<sup>104</sup> *While, in observing everyday objects, the physical process involved in making the observation plays a subsidiary role only, in the case of the smallest building particles of matter, every process of observation produces a large disturbance. We can no longer speak of the behavior of the particle independently of the process of observation. As a final consequence, the natural laws formulated mathematically in quantum theory no longer deal with the elementary particles themselves, but with our knowledge of them.*

*nosso conhecimento desse comportamento* (1958b [1953], p. 15, tradução nossa, grifo nosso)<sup>105</sup>.

A atividade da nova física, portanto, é a investigação humana da natureza — e não da natureza em si. Para elucidar essa nova situação, é relevante considerar o comentário de Silva (2016, p. 164) que remonta a Kant. De acordo com o comentador, há duas maneiras de conceber a atividade científica. A primeira é que a ciência descreve a natureza objetiva e diretamente, ou seja, descreve a “natureza em si”. A segunda é que a ciência descreve a maneira como o ser humano compreende a natureza, ou seja, a ciência não é mais uma descrição da natureza em si, mas sim uma descrição da relação do sujeito com ela. Esse segundo modo de fazer ciência é adotado por Heisenberg em algumas de suas obras, ficando evidente em passagens como: “Desta forma, mesmo na ciência *o objeto de pesquisa não é mais a própria natureza, mas a investigação humana*<sup>106</sup> *da natureza*” (1958b [1953], p. 24, tradução nossa)<sup>107</sup>. Por conseguinte, a partir da tese da perturbação incontrolável, Heisenberg culmina em uma interpretação epistemológica não somente para as relações de incerteza, mas para todas as leis naturais da física quântica. A física deixa de falar sobre a “coisa-em-si” e passa a tratar exclusivamente do conhecimento humano sobre a natureza.

Assim, observa-se uma conexão geral entre a tese da perturbação incontrolável que causa as relações de incerteza, provocando uma dissolução da tradicional divisão entre sujeito e objeto, e a necessidade de interpretar as relações de incerteza de maneira epistemológica. Heisenberg sintetiza todos esses elementos na seguinte passagem:

Descobrimos que a ciência está agora focada na rede de relações entre o homem e a natureza, no quadro que nos torna, enquanto seres vivos, partes dependentes da natureza, e que nós, enquanto seres humanos, simultaneamente transformamos em objeto de nossos pensamentos e ações. A ciência não mais confronta a natureza como um observador objetivo, mas se vê como *como um ator* nessa inter-relação entre homem e natureza. O método científico de analisar, explicar e classificar *tomou consciência de suas limitações*, que decorrem do fato de que por *sua intervenção a ciência altera e remodela o objeto de investigação* (1958b [1953], p. 29, tradução nossa, grifo nosso)<sup>108</sup>.

<sup>105</sup> *Thus, the objective reality of the elementary particles has been strangely dispersed, not into the fog of some new ill-defined or still unexplained conception of reality, but into the transparent clarity of mathematics that no longer describes the behavior of the elementary particles but only our knowledge of this behavior.*

<sup>106</sup> Essa forte conclusão de Heisenberg é repetida em outras obras. Dois exemplos são *Physics and Philosophy* (1958a, p. 81) e *A descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica* (2017 [1958], p. 20).

<sup>107</sup> *Thus even in science the object of research is no longer nature itself, but man's investigation of nature.*

<sup>108</sup> *Science, we find, is now focused on the network of relationships between man and nature, on the framework which makes us as living beings dependent parts of nature, and which we as human beings have simultaneously made the object of our thoughts and actions. Science no longer confronts nature as an objective observer, but sees itself as an actor in this interplay between man and nature. The scientific method of analyzing, explaining and*

Devido à perturbação que a observação impõe em qualquer objeto atômico, a física se vê forçada a abandonar o ideal de um objeto puro ou de uma coisa-em-si. O objeto resultante dessa interação é uma conjunção entre ser humano e natureza. O último passo não dado explicitamente por Heisenberg foi concluir que, uma vez aceitos esses termos, as relações de incerteza devem ser interpretadas de maneira epistemológica. Sendo assim, por mais que Heisenberg não seja constante e claro em seu uso conceitual, é possível identificar instâncias de interpretação epistemológica devido à consequência necessária ao assumir a tese da perturbação inevitável como causa das relações de incerteza. Logo, assumimos aqui a posição de que todas as vezes que o físico alemão emprega essa tese para justificar as relações de incerteza, ele, implicitamente, adota uma interpretação epistemológica.

Ao chegarmos à conclusão desta seção, é importante ressaltar que em relação à tese da perturbação incontável, há momentos em que Heisenberg vai além da defesa de uma tese meramente física. Chibeni salienta esse passo de Heisenberg:

Depois, o deslocamento da explicação das peculiaridades dos fenômenos quânticos para o ato de medição traz o risco latente de subjetivização da física. Como a história do debate sobre a mecânica quântica bem testemunha, por essa ladeira muitos efetivamente escorregaram, puxados pelo próprio Heisenberg e por Bohr, que facilmente passavam da *tese física*, em princípio defensável, *de um distúrbio físico entre o aparelho de medição e o objeto medido* para a *tese filosófica* duvidosa de *uma interferência mútua entre este último e os 'agentes de observação'*, no sentido do *sujeito* cognitivo, com a suposta implicação de uma ruptura essencial, pela mecânica quântica, da distinção geral entre sujeito e objeto (2005, p. 190, grifo nosso).

A distinção conceitual é sutil, porém significativa. Por um lado, é possível adotar uma tese estritamente física, na qual a interação do fóton com o elétron altera o estado desse último, como evidenciado pelo microscópio de raios- $\gamma$ , resultando nas relações de incerteza. Por outro lado, ao deslocar o uso conceitual da noção de interação para “observação” e até mesmo “medida”, é possível adotar uma tese filosófica subjetivista de que a interação do sujeito cognoscente com o elétron causa uma perturbação no último, o que leva às relações de incerteza. Em outras palavras, não estamos lidando apenas com um distúrbio físico, presente até mesmo na física clássica, causado pela interação do aparato de medida com o objeto medido. Trata-se de uma tese filosófica que defende que o sujeito, ao interagir com o sistema, o perturba. Ora, o

---

*classifying has become conscious of its limitations, which arise out of the fact that by its intervention science alters and refashions the object of investigation.*

comentário de Chibeni captura precisamente o que foi discutido até aqui: Heisenberg, em alguns períodos de sua obra, extrapola o campo físico, chegando em conclusões filosóficas como a impossibilidade do conhecimento objetivo, de forma que a mecânica quântica versa apenas sobre o conhecimento humano da natureza.

### 3.2.2. Da primeira derivação à interpretação epistemológica

O segundo caso que ilustra o emprego de uma interpretação epistemológica é a primeira derivação das relações de incerteza. Retomando brevemente a derivação pelo microscópio de raios- $\gamma$ , afirma-se que para medir a posição com precisão, faz-se necessário utilizar ondas com comprimento de onda curto. No entanto, devido à relação inversa entre comprimento de onda e *momentum*, isso resulta em uma incerteza na medida do *momentum*. Por outro lado, para medir o *momentum* com precisão, é necessário empregar ondas de comprimento de onda longo, que têm um *momentum* pequeno, o que, por sua vez, implica em uma incerteza na medida da posição. Assim, por uma questão experimental, não é possível obter valores precisos simultâneos para variáveis conjugadas.

De acordo com uma série de comentadores, como Cabral (2019, p. 149), Chibeni (2005, p. 184), Hilgevoord e Uffink (2016, p. 3-4) e Pessoa Jr. (2006c, p. 9), essa derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$  implica em uma interpretação epistemológica. A chave para captar a interpretação epistemológica contida nessa derivação é a questão experimental. Nas palavras de Chibeni, “O problema, se o raciocínio for aceito [experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$ ], é que tais grandezas não poderão ser *determinadas experimentalmente* com precisão arbitrariamente grande. Trata-se, pois, de *incertezas*, no sentido próprio do termo” (2005, p. 184).

Considerando essa primeira derivação, sabe-se que a medida de uma das variáveis conjugadas necessariamente altera o valor da outra variável. Isso implica que qualquer partícula que tenha sua posição medida pelo microscópio de raios- $\gamma$  sofrerá uma perturbação incontrolável no seu *momentum*. Essa perturbação no *momentum* altera o estado da partícula, destruindo todo o conhecimento prévio obtido acerca dela. Portanto, conforme Chibeni, há uma limitação experimental envolvida nessa derivação das relações de incerteza: devido à necessidade de iluminar a partícula, às leis da óptica e ao Efeito Compton, o microscópio de raios- $\gamma$  ilustra um limite na determinação experimental do par de variáveis conjugadas posição e *momentum*.

Ora, nesse caso temos uma demonstração experimental do argumento utilizado na seção anterior. Levando em conta que para conhecer o estado de uma partícula é necessário mensurá-la, ou observá-la, e que existe uma limitação experimental para a obtenção dos valores de variáveis conjugadas, podemos concluir que as relações de incerteza derivadas por meio do microscópio de raios- $\gamma$  estabelecem uma limitação no conhecimento humano.

Nesse cenário, as partículas não perturbadas, ou seja, aquelas que não interagiram com o aparato de medida, possuem posição e *momentum* simultaneamente precisos. Com isso, para o caso do microscópio de raios- $\gamma$ , uma indeterminação nos próprios objetos é descartada, pois sem a perturbação incontrolável oriunda da mensuração, ou observação, as partículas possuem posição e *momentum* simultaneamente precisos. É apenas o ato de medir que, experimentalmente, altera o estado do sistema, fazendo com que qualquer obtenção de conhecimento físico do sistema implique em uma alteração dele. A conclusão desse raciocínio, como pontualmente afirmado por Hilgevoord e Uffink, é a seguinte: “Em sua forma atual [a primeira derivação das relações de incerteza, o microscópio de raios- $\gamma$ ] é um princípio epistemológico, uma vez que limita o que podemos *conhecer* sobre o elétron” (2016, p. 4, tradução nossa)<sup>109</sup>. Portanto, como não são as partículas em si que são indeterminadas, mas sim o nosso conhecimento delas, a interpretação que emerge do microscópio de raios- $\gamma$  é epistemológica.

Exposto o raciocínio, nota-se uma conexão próxima entre a primeira derivação, a tese da perturbação incontrolável e a interpretação epistemológica. A conexão entre as duas primeiras é evidente, pois um dos fatores que gera a incerteza no microscópio de raios- $\gamma$  é o efeito Compton, uma perturbação física que altera o estado do sistema. Por conseguinte, observamos que causa das relações de incerteza na primeira derivação é a perturbação inevitável.

Nesse argumento é possível compreender a primeira derivação como uma “demonstração experimental” da perturbação incontrolável — ou até mesmo, no espírito do operacionalismo, como o estabelecimento de um procedimento capaz de mensurá-la. Assim, no microscópio de raios- $\gamma$ , como há uma impossibilidade experimental de obter ambos os valores das variáveis conjugadas devido ao processo de medida, impossibilitando a obtenção de conhecimento completo acerca do sistema, a interpretação implícita na primeira derivação é epistemológica.

---

<sup>109</sup> *In its present form it is an epistemological principle, since it limits what we can know about the electron.*

### 3.3. A interpretação ontológica

A segunda interpretação possível para as relações de indeterminação que Heisenberg manifesta em sua obra é a ontológica. Nesse viés, ele interpreta suas relações como fundando afirmações acerca da Natureza ela mesma, isto é, sobre aquilo que “propriamente é”, e não meramente aquilo que podemos conhecer.

Identificar as instâncias da interpretação ontológica na obra de Heisenberg é ainda mais desafiador do que o caso da interpretação epistemológica. Isso se deve, em grande parte, ao descuido conceitual do autor. Há várias situações em que Heisenberg implicitamente assume uma interpretação ontológica, mas seu uso de termos como “incerteza” ou “conhecimento” alude a uma interpretação epistemológica. Não é surpreendente, portanto, que uma das poucas identificações claras de uma interpretação ontológica no argumento de Heisenberg surja de uma crítica externa. No capítulo X de *A parte e o Todo*, Heisenberg descreve uma longa discussão acerca da mecânica quântica e filosofia kantiana travada com Carl Friedrich von Weizsäcker (seu orientando na época) e Grete Hermann. Nessa discussão, os dois físicos defenderam que a mecânica quântica levava ao abandono da causalidade kantiana. Hermann, por sua vez, defendeu que a causalidade kantiana é essencialmente de outra natureza que os princípios empíricos da física. Sendo um princípio *a priori*, não é possível abandoná-lo, pois ele fornece as próprias condições de possibilidade para a experiência e, por conseguinte, para a ciência. Ademais, Hermann questiona a reivindicação de que a mecânica quântica estaria completa, apresentando a possibilidade — mesmo que não assertivamente como Einstein — de que ainda seria possível encontrar causas para os fenômenos quânticos. É importante notar que, no desenvolvimento da discussão, Hermann capta com maestria uma nuance interpretativa de Heisenberg. Em suas palavras:

Na verdade, o senhor sustenta que a indeterminação, desde que formulada numa linguagem precisa, permite uma previsão clara em outro experimento. E também isso, segundo afirma, é confirmado pelas experiências. Argumentando dessa maneira, o senhor *transforma a incerteza numa realidade física*, dotada de um caráter objetivo, ao passo que, habitualmente, incerteza é sinônimo de ignorância e, como tal, é algo puramente subjetivo (2016 [1969], p. 144-145).

O que a filósofa alemã observa é uma transição de uma incerteza epistemológica para uma indeterminação ontológica. Nessa chave interpretativa, o termo incerteza é mal-empregado para as relações de incerteza, obscurecendo o verdadeiro papel das relações. Para identificar a

interpretação ontológica, que será denominada relações de indeterminação, serão empregados dois recursos. O primeiro deles é que ao assumir a segunda derivação — derivada das transformações de Dirac-Jordan —, a tese da impregnação teórica da observação e um passo metafísico adicional, Heisenberg é compelido a aceitar uma interpretação ontológica. O segundo, e provavelmente a ideia filosoficamente mais controversa de Heisenberg, é a relação entre o seu conceito de *potentia* e a interpretação ontológica.

Entretanto, antes de prosseguir para a explicação de cada caso, é essencial obter uma definição precisa da interpretação ontológica. A maneira como Heisenberg expressa a indeterminação das relações nas *Chicago Lectures* fornece um ótimo ponto de partida: “Essa indeterminação deve ser considerada como uma *característica essencial do elétron*, e não como evidência da inaplicabilidade de imagem ondulatória” (1949 [1930], p. 14, tradução nossa, grifo nosso)<sup>110</sup>. Ao discutir a proposta bohriana de considerar as relações de indeterminação a partir da dualidade onda-partícula, Heisenberg afirma que a indeterminação — comumente referida como incerteza — na medida simultânea da posição e velocidade do pacote de onda é uma “característica essencial do elétron”. Essa atribuição de uma indeterminação ao próprio elétron é fundamental. Não é mais caso de uma perturbação ou alteração causada pela medida, não há mais um agente externo que perturba, ou embaraça, aquilo que “essencialmente”, ou “naturalmente”, é preciso. O que Heisenberg expressa nessa citação, que vai contra a interpretação epistemológica, é que a indeterminação é inerente ao elétron, faz parte da própria natureza do elétron.

Nesse âmbito, a posição e *momentum* precisos de uma partícula não têm seus valores definidos precisa e simultaneamente, de modo que as relações de indeterminação postulam uma indeterminação inerente aos objetos quânticos (JIJNASU, 2016, p. 68 e 70). Em outras palavras, o âmbito de uma interferência do agente, ou de uma defasagem técnica, ambos epistemológicos, é deixado de lado em favor de uma afirmação filosófica profunda: os objetos quânticos são intrinsecamente indeterminados. Uma partícula simplesmente não possui em si valores precisos para os pares de variáveis conjugadas. Essa indeterminação não é oriunda de uma relação, como a entre aparato e objeto medido, e nem pode ser eliminada, ela é uma propriedade da Natureza. Por conseguinte, trata-se de uma interpretação ontológica das relações de indeterminação.

---

<sup>110</sup> *This indeterminateness is to be considered as an essential characteristic of the electron, and not as evidence of the inapplicability of the wave picture.*

### 3.3.1. Da segunda derivação à interpretação ontológica

Assim como a primeira derivação, a segunda derivação das relações de indeterminação implica uma interpretação específica: a ontológica. Por razões diferentes, uma gama de comentadores, como Chibeni (2005), Cabral (2019), Jijnasu (2016) e Pessoa Jr. (2006c), salientam essa tese. Será útil nos atermos inicialmente a uma longa citação de Jijnasu:

Por um lado, Heisenberg usou a teoria da transformação de Dirac-Jordan para chegar à relação  $p_1q_1 = \frac{h}{2\pi}$ ; esse resultado estabelece a incerteza como um ditame do formalismo, demandando a limitação da determinabilidade conjunta da posição e *momentum*. Permitindo-nos afirmar *apenas o que a matemática imediatamente implica* (isto é, sem adicionar interpretações a ela),  $p_1$  e  $q_1$  devem ser lidos simplesmente como ‘precisão’ (ou como ‘imprecisão’) sem oferecer razão alguma para a existência da imprecisão em primeiro lugar. *No entanto, esse silêncio falaria muito porque, por padrão, tornaria as condições objetivas (independentes da observação) responsáveis pela incerteza, implicando que há uma indeterminação intrínseca* (2016, p. 63, tradução nossa, grifo nosso)<sup>111</sup>.

Segundo o comentador, se as relações de indeterminação forem derivadas apenas das transformações de Dirac-Jordan, sem acréscimo de interpretações externas, haveria um “silêncio”, uma falta de fundamentação para as imprecisões representadas por essas relações. A única saída possível para explicar tais imprecisões seria, portanto, assumir uma indeterminação intrínseca. Concordamos plenamente com o ponto de partida e a conclusão de Jijnasu, contudo, sua argumentação parece ser apenas parcialmente satisfatória. Argumentamos, por sua vez, que considerando quatro situações interligadas e defendidas por Heisenberg em vários momentos de sua obra, em primeiro lugar, a derivação por meio do formalismo de Dirac-Jordan, em segundo lugar, a tese da impregnação teórica da observação — que se apresenta como um fundamento filosófico tardio para essa derivação —, em terceiro lugar, a completude matemática da mecânica quântica, e, por fim, o passo metafísico de considerar que a realidade é derivada do formalismo, a interpretação ontológica surge como uma conclusão necessária. Procedemos o argumento com as quatro preposições.

<sup>111</sup> *On the one hand, Heisenberg used the Dirac-Jordan transformation theory to arrive at the relation  $p_1q_1 = \frac{h}{2\pi}$ ; this result sets forth uncertainty as a dictate by the formalism, mandating the limitedness of joint determinability of position and momentum. Permitting ourselves to state only what mathematics immediately implies (i.e. not adding any interpretations to it),  $p_1$  and  $q_1$  are to read simply as “precision” (or as “imprecision”) without offering any reason for why there has to be an imprecision in the first place. But this silence would speak volumes as it would by default make the objective (observation-independent) conditions responsible for the uncertainty, implying that there is an intrinsic indeterminacy.*

De acordo com Heisenberg (1983 [1927], p. 69; 1949 [1930], p. 15-16), é possível derivar as relações de indeterminação diretamente das transformações de Dirac-Jordan, sem a necessidade de empregar o microscópio de raios- $\gamma$ . Nessa segunda derivação, as relações de indeterminação emergem apenas como uma consequência matemática do formalismo da mecânica quântica, sem a necessidade de interpretações ou demonstrações adicionais. Elas são obtidas simplesmente como derivação de um formalismo consistente.

O filósofo alemão Ernst Cassirer vê nessa derivação uma exemplificação clara da tese da impregnação teórica da observação. Em suas palavras:

Um dos resultados essenciais desses processos consiste na inversão, em certo sentido, da relação entre os conceitos de objeto e lei. O conceito de lei agora é considerado anterior ao de objeto, enquanto costumava ser subordinado a ele. [...] o que uma coisa é só pode ser descrito se referindo às leis que a governam (1956, p. 133, tradução nossa)<sup>112</sup>.

As leis representadas matematicamente no formalismo são, nesse sentido, anteriores aos objetos. Ao invés da investigação científica partir dos objetos dados para leis gerais, a tese da impregnação teórica da observação pressupõe que leis científicas são pré-condições para a definição de qualquer objeto na ciência. Como Heelan muito bem descreve, “afirmações ontológicas sobre a natureza não são validamente feitas em qualquer linguagem pré-teórica, mas apenas dentro do quadro linguístico teórico (explicativo) de uma teoria física” (2016, p. 22, tradução nossa)<sup>113</sup>. Ou seja, afirmações “sobre aquilo que é” só podem ser feitas após o estabelecimento de uma teoria. Essa tese está em perfeita concordância com a máxima de Heisenberg: apenas aquilo que pode ser representado no formalismo de Dirac-Jordan pode ocorrer na natureza (HEISENBERG, 1955, p. 15). Assim, somente aquilo representável matematicamente pela teoria quântica pode ocorrer no mundo físico.

Considerando apenas a conjunção da segunda derivação com a tese da impregnação teórica da observação, a conclusão interpretativa mais plausível é epistemológica. Isso acontece em grande parte por causa da tese da impregnação teórica. Se a teoria é anterior à observação, de modo que a última “possui a carga” (*ladenness*) da teoria, se só é possível fazer afirmações ontológicas a partir do quadro de uma teoria, o conhecimento se torna anterior e deveríamos interpretar as relações de incerteza de maneira epistêmica. É nesse ponto que é central discutir

---

<sup>112</sup> *One of the essential results of this process consists in the reversal, in a sense, of the relationship between the concepts of object and law. The concept of law is now regarded as prior to that of object, whereas it used to be subordinate to it. [...] what a thing is can only be described by referring to the laws governing it.*

<sup>113</sup> *ontological assertions about nature are not validly made in any pre-theoretical language, but only within the theoretical (explanatory) linguistic framework of a physical theory.*

o passo metafísico dado por Heisenberg: não apenas a teoria é anterior à observação, ela fundamenta aquilo que é possível ontologicamente.

Para compreender melhor esse importante passo metafísico, vamos nos atentar a duas passagens de Heisenberg. A primeira encontrada no artigo “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*”:

Eu tentei resolver o problema de como passar de uma situação experimentalmente dada para sua representação matemática invertendo a questão, isto é, pela hipótese de que *apenas* aqueles estados que *podem ser representados* como vetores no espaço de Hilbert *podem ocorrer* na natureza ou ser realizados experimentalmente. (1955, p. 15, tradução nossa, grifo nosso)<sup>114</sup>.

O caso aqui é explícito, aquilo que pode ocorrer na natureza é definido pela teoria, apenas o que pode ser representado no formalismo da mecânica quântica é que pode ocorrer na realidade. A posição de Heisenberg possui uma dimensão metafísica que não está presente na tese da impregnação teórica da observação: não é apenas o caso da teoria ser anterior à observação, mas sim ela que limita o que é possível no real, ou seja, a realidade, a ontologia, é derivada da teoria.

Em “*Quantum Theory and Its Interpretations*” encontramos uma passagem semelhante: “Ocorreu-me a ideia óbvia de que se deveria postular que a natureza *só permitia* a ocorrência de situações experimentais *que pudessem ser descritas dentro do quadro do formalismo da mecânica quântica*. (1967 [1964], p. 105, tradução nossa, grifo nosso)<sup>115</sup>. Assim, observamos que Heisenberg dá um passo metafísico além da tese da impregnação teórica da observação: a ontologia é derivada da teoria. No caso da mecânica quântica, os únicos fenômenos quânticos possíveis são aqueles que a teoria descreve. O exemplo discutido no primeiro capítulo da trajetória do elétron é característico: a teoria não permite uma trajetória contínua, apenas pontos descontínuos, logo, segundo esse passo metafísico de Heisenberg, não pode existir uma trajetória contínua do elétron na realidade.

Da conjunção dessas três preposições torna-se possível extrair uma interpretação ontológica das relações de indeterminação. Entretanto, ao considerar a completude matemática do formalismo matemático, a conclusão se torna inescapável. A crença de Heisenberg na

---

<sup>114</sup> *I tried to solve the problem of how to pass from an experimentally given situation to its mathematical representation, by inverting the question, that is, by the hypothesis that only those states which can be represented as vectors in Hilbert space can occur in nature or be realized experimentally.*

<sup>115</sup> *the obvious idea occurred to me that one should postulate that nature allowed only experimental situations to occur which could be described within the framework of the formalism of quantum mechanics.*

completude do formalismo é especialmente evidente no seu artigo, em coautoria com Max Born e apresentado em Solvay, em 1927, bem como nas entrevistas concedidas a Thomas Kuhn. No primeiro caso, os físicos afirmam: “A mecânica quântica pretende ser uma teoria que, nesse sentido, é *anschaulich* [intuitiva] e completa para os processos micromecânicos” (2009 [1927], p. 409, tradução nossa)<sup>116</sup>. No segundo caso, a defesa é ainda mais enfática:

Depois houve o artigo de Dirac, que foi muito importante e que também confirmou *minha crença* de que, uma vez que alguém tenha iniciado em um esquema matemático, não há saída; duas pessoas diferentes devem chegar à mesma conclusão. Portanto, fiquei muito feliz com o fato de Dirac ter chegado à mesma conclusão que Born e Jordan haviam chegado. *Então, vi que agora isso está resolvido. Não há mais espaço, agora está resolvido* (1963, VII, tradução nossa, grifo nosso)<sup>117</sup>.

Segundo o físico alemão, o formalismo matemático da mecânica quântica estava completo e consistente, não havia espaço para novas hipóteses. Desta forma, o formalismo de Dirac-Jordan deve englobar todos os fenômenos quânticos possíveis, sem a necessidade de adicionar novos fundamentos.

É possível construir o argumento em quatro passos. Os dois primeiros são assumir a tese da impregnação teórica da observação como pressuposto filosófico e a consideração adicional metafísica de Heisenberg, defendendo que “a totalidade das situações matematicamente representáveis foi identificada com a totalidade das situações reais” (HEELAN, 2016, p. 34, tradução nossa)<sup>118</sup>. Em outras palavras, tudo aquilo que possui validade ontológica está contido no formalismo matemático. Esse passo é central, uma vez que a ontologia é condicionada ao que é possível ser expresso matematicamente pela teoria física: o que não está contido nela não existe. O terceiro passo é considerar que as relações de indeterminação foram derivadas do formalismo de Dirac-Jordan, de forma tal que elas já estariam contidas no formalismo. O quarto, e último, passo do argumento é assumir que esse formalismo matemático é completo e consistente, não sendo possível complementá-lo.

Ora, se aquilo representado no formalismo de Dirac-Jordan é real, e se as relações de indeterminação fazem parte desse formalismo, a consequência direta, retomando a conclusão

---

<sup>116</sup> *Quantum mechanics is meant as a theory that is in this sense anschaulich and complete for the micromechanical processes.*

<sup>117</sup> *Then there was the Dirac paper, which was very important and which also confirmed me in my belief that if once one has started on a mathematical scheme, there is no way out; two different people must come to the same conclusion. So I was quite happy that Dirac had come to the same conclusion as Born and Jordan had done. So I saw now this is now fixed. There is no room anymore, now it is fixed.*

<sup>118</sup> *the totality of mathematically representable situations was identified with the totality of real situations.*

de Jijnasu, é que as indeterminações representadas nelas existem na própria natureza. O inverso do argumento também é válido. Como não é possível inferir valores precisos simultâneos para variáveis conjugadas no formalismo de Dirac-Jordan, isso implica que tais valores precisos não existem na natureza. Considerando, por fim, o fato de que esse formalismo é consistente e completo, de forma que o que ele expressa não pode ser modificado, a única conclusão possível é que existem indeterminações na própria natureza que são inescapáveis. Como Cassidy sumariza com maestria: “Essa indeterminação não é culpa do experimentador; é uma consequência fundamental das equações quânticas e uma característica de todo experimento” (1992a, p. 106, tradução nossa)<sup>119</sup>.

Por conseguinte, ao adotar a tese da impregnação teórica da observação, ao dar um passo metafísico de considerar que a ontologia é derivada da teoria, ao derivar as relações de indeterminação do formalismo de Dirac-Jordan e ao aceitar a completude e consistência desse formalismo, a interpretação ontológica surge como um resultado inevitável. Não se trata mais de uma perturbação causada pelo aparato de medida no objeto medido, mas sim de uma indeterminação intrínseca aos objetos quânticos. Se o formalismo matemático autoriza apenas valores simultaneamente indeterminados para posição e *momentum*, isso implica que na natureza existem apenas valores indeterminados para esse par de variáveis.

### 3.3.2. Função de onda como *potentia*

Embora de maneiras diversas, todas as instâncias da interpretação ontológica compartilham um fator em comum: a atribuição de uma indeterminação essencial à própria matéria. Isso não poderia ser diferente, afinal de contas, a interpretação ontológica pressupõe afirmações sobre a própria natureza dos objetos, isto é, “sobre aquilo que é”. Nesse contexto, uma discussão da noção de *potentia*, amplamente empregada por Heisenberg na década de 50 na tentativa de desenvolver uma ontologia da mecânica quântica (SHIMONY, 1983, p. 214-215), torna-se crucial.

De acordo com Camilleri, “Heisenberg introduziu o conceito de *potentia* na mecânica quântica para descrever o estado de um sistema quantum-mecânico tal como existe independentemente da sua interação com o instrumento de medida” (2005, p. 283, tradução

---

<sup>119</sup> *This indeterminacy is not the fault of the experimenter; it is a fundamental consequence of quantum equations and a feature of every experiment.*

nossa)<sup>120</sup>. A *potentia* foi adaptada pelo físico alemão para se referir aos objetos quânticos quando eles não estão sob o efeito da observação, isto é, nos momentos em que não são afetados pelo processo de medida. Essa noção introduz uma divisão entre os objetos quânticos durante a observação e aqueles entre observações ou apenas não observados. No primeiro caso, os objetos quânticos devem ser considerados como “atos”, com sua potencialidade realizada, enquanto no segundo caso eles são ainda potências, com a possibilidade de vir a ser (SILVA, 2012, p. 30).

Antes de aprofundar nessa noção, é importante para o nosso recorte localizar historicamente a noção de *potentia* na obra de Heisenberg. De acordo com Silva (2012, p. 28), a *potentia* teria sido introduzida pelo físico alemão na obra *Physics and Philosophy* de 1958. Por mais que seja nessa obra que Heisenberg desenvolve extensamente a noção, ela, no entanto, já havia sido introduzida em “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*” de 1955<sup>121</sup>. Nela, no contexto de comentar os acertos da teoria de Bohr-Kramers-Slater (BKS), o físico alemão afirma que:

A mais importante dessas foi a introdução da *probabilidade como um novo tipo de realidade física ‘objetiva’*. Esse conceito de probabilidade é intimamente relacionado ao conceito de possibilidade, a *‘potentia’* da filosofia natural dos antigos, como Aristóteles; é, até certo ponto, uma transformação do antigo conceito de *‘potentia’* de uma ideia qualitativa para uma quantitativa (1955, p. 12-13, tradução nossa, grifo nosso)<sup>122</sup>.

---

<sup>120</sup> Heisenberg introduced the concept of *potentia* into quantum mechanics to describe the state of a quantum mechanical system as it exists independently of its interaction with the measuring instrument.

<sup>121</sup> No que concerne a uma introdução explícita, essa é seguramente a primeira instância que Heisenberg introduz o conceito de *potentia* em sua obra publicada. Entretanto, se a discussão abrange casos implícitos, passagens em que o físico alemão possivelmente alude ao conceito, mas não o cita diretamente, a discussão é complexificada. É possível citar três casos paradigmáticos anteriores a 1955. O primeiro deles é na conversa com Grete Hermann e Weizsäcker relatada no capítulo X de *A parte e o Todo*. Nele, Heisenberg afirma que os símbolos matemáticos representam possibilidades e não fatos, algo como um estágio intermediário entre possível e fatural (2016 [1969], p. 145). Por mais que o conceito de *potentia* não figure, a explicação é idêntica. Considerando que essa conversa é relatada como acontecendo entre 1930-1932, e se o relato autobiográfico de Heisenberg for verídico, há um adiantamento de mais de 20 anos no conceito. O segundo caso ocorre em *Reality and Its Order*. O caso aqui é abstrato, contudo, o físico afirma que o domínio que a teoria quântica trabalha é um no qual a realidade aparece como uma multitude de possibilidades que podem ser realizadas por intervenções externas (2019 [1942], p. 62). Isso pode ser interpretado como o domínio da realidade da *potentia*. Essa obra nunca foi publicada, mas os comentadores datam que sua escrita foi feita entre 1941-42, o que adianta o conceito em aproximadamente 15 anos. Por fim, em *The Notion of a “Closed Theory” in Modern Science*, de 1948, há outro comentário que se aproxima da noção de *potentia*. Heisenberg afirma que a matemática da mecânica quântica estabelece apenas possibilidades, essas que, por sua vez, são objetivas (1974 [1948], p. 42). Por conseguinte, essa é mais uma instância anterior a 1955 em que é possível implicitamente notar a noção de *potentia*.

<sup>122</sup> *The most important of these was the introduction of the probability as a new kind of “objective” physical reality. This probability concept is closely related to the concept of possibility, the “potentia” of the natural philosophy of the ancients such as Aristotle; it is, to a certain extent, a transformation of the old “potentia” concept from a qualitative to a quantitative idea.*

Nessa citação, Heisenberg não havia formulado precisamente a sua interpretação da *potentia*, mas o cerne da ideia já está exposto. As ondas probabilísticas de Bohr-Kramers-Slater, que mais tarde seriam substituídas pela função probabilística de Born, apresentam um novo tipo de realidade física objetiva: a potencialidade. Ao destacar a *potentia*, isto é, aqui é meramente possível, como uma realidade, Heisenberg rompe com a lógica clássica do “ser ou não ser”, introduzindo um terceiro excluído. Agora, além “daquilo que é ou não é”, a “possibilidade de ser” — a *potentia* — é uma realidade em si mesma: o possível é tão real quanto o existente.

A segunda apresentação da *potentia* ocorre concomitantemente na conferência “A descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica” (2017 [1958], p. 16) e na obra *Physics and Philosophy*. Citamos a última obra:

Esse conceito de onda probabilística era algo totalmente novo na física teórica desde Newton. Probabilidade na matemática ou na mecânica estatística significa uma declaração acerca do nosso grau de conhecimento da situação real. Ao jogar dados, não conhecemos os detalhes exatos do movimento de nossas mãos que determinam a queda dos dados e, portanto, dizemos que a probabilidade de lançar um número específico é de apenas um em seis. A onda probabilística de Bohr, Kramers e Slater, entretanto, significava mais do que isso; significava uma tendência para algo. Era uma versão quantitativa do antigo conceito de ‘*potentia*’ da filosofia aristotélica. Ela introduziu algo que fica no meio entre a ideia de um evento e o evento real, um tipo estranho de realidade física que fica justamente no meio entre a possibilidade e a realidade. Mais tarde, quando o arcabouço matemático da teoria quântica foi estabelecido, Born retomou essa ideia de onda probabilística e deu uma definição clara da quantidade matemática no formalismo, que deveria ser interpretada como a onda probabilística (1958a, p. 40-41, tradução nossa)<sup>123</sup>.

Observa-se que em 1958 a noção de *potentia* é desenvolvida com mais profundidade. Primeiramente, a explicação acerca do tipo de probabilidade que está em jogo é ampliada. Até então, a noção de probabilidade, tanto na matemática quanto na mecânica estatística, se referia ao nosso grau de conhecimento de um sistema. Agora, a probabilidade se torna uma nova realidade na forma da *potentia*. Heisenberg explica bem essa ideia na entrevista com Kuhn, na

---

<sup>123</sup> *This concept of probability wave was something entirely new in theoretical physics since Newton. Probability in mathematics or in statistical mechanics means a statement about our degree of knowledge of the actual situation. In throwing dice we do not know the fine details of the motion of our hands which determine the fall of the dice and therefore we say that the probability for throwing a special number is just one in six. The probability wave of Bohr, Kramers and Slater, however, meant more than that; it meant a tendency for something. It was a quantitative version of the old concept of “potentia” in Aristotelian philosophy. It introduced something standing in the middle between the idea of an event and the actual event, a strange kind of physical reality just in the middle between possibility and reality. Later when the mathematical framework of quantum theory was fixed, Born took up this idea of the probability wave and gave a clear definition of the mathematical quantity in the formalism, which was to be interpreted as the probability wave.*

qual ele afirma que “a probabilidade não é algo que trata apenas de contar números... mas essa expectativa em si é como algo real. [...]. Mas o ponto principal era que a probabilidade em si era algo real. Ela não estava apenas na mente das pessoas, *mas era algo na natureza*” (1963, IV, tradução nossa, grifo nosso)<sup>124</sup>. Nesse novo contexto, não é mais adequado justificar a probabilidade de um evento por meio do desconhecimento acerca do sistema. A *potentia*, essa realidade possível, é justificada pela “não decisão” (HEISENBERG, 1958a, p. 184), pela não concretização do possível, constituindo-se assim como uma nova dimensão da realidade. Em outras palavras, não se trata mais de captarmos probabilisticamente uma natureza determinada devido a uma defasagem do conhecimento, mas sim de uma natureza intrinsecamente probabilística que ainda não se concretizou em ato.

O segundo aspecto relevante no texto de 1958 diz respeito à realidade dessa nova natureza em potência. Ela é assim caracterizada como uma realidade intermediária entre a realidade das ideias e a realidade material, o ato. Os objetos quânticos estão nessa camada intermediária da realidade, apresentando-se como possibilidades. Além disso, no segundo parágrafo da citação acima, Heisenberg estabelece uma conexão importante. Inicialmente o físico identificava essa realidade potencial nas ondas probabilísticas da teoria de Bohr-Kramers-Slater. Isso é problemático pois a teoria de BKS teve que ser abandonada devido aos resultados experimentais negativos. Entretanto, na citação acima Heisenberg encontra na função probabilística de Born um novo e refinado suporte para sua noção de *potentia*.

A divisão entre ato e *potentia* na filosofia de Heisenberg é claramente explicitada por Silva. Segundo ele, “o ato, portanto, é a existência concreta, a concordância ontológica daquilo que é como de fato é, e a potência é também uma existência tão real quanto o ato, mas é existência daquilo que está presente no ato enquanto suas possibilidades” (2011, p. 111; 2012, p. 28). O ato representa a existência já concretizada, enquanto a *potentia* é um horizonte de possibilidades futuras no ato presente. O exemplo da árvore e da semente é útil para esclarecer essa situação. A semente de uma árvore, enquanto tal, existe tanto como um ato quanto, ao mesmo tempo, como a *potentia* de uma árvore. Ela é um ato pois ela já é, em si, uma semente concretizada. Por outro lado, ela contém a possibilidade de uma árvore. Essa *potentia* de árvore não “existe” no sentido tradicional de “existência realizada, concreta”, não existindo propriamente como ato. Porém ela existe como possibilidade de ser, portanto, como *potentia*. A grande chave interpretativa é compreender que essa existência potencial é equivalente à

---

<sup>124</sup> *probability is not something about just counting numbers... but that this expectation itself is like something real. [...]. But the main point was that the probability itself was something real. It was not only in the mind of the people, but it was something in nature.*

existência em ato, ou seja, a possibilidade ganha uma dimensão ontológica análoga à própria existência de fato.

No caso da mecânica quântica, “os objetos quânticos, mesmo que não possam ser medidos e localizados, mesmo que pareçam não existir concretamente, são reais porque existem enquanto possibilidades, *potências* elementares da natureza” (SILVA, 2011, p. 111; 2012, p. 28). Os objetos quânticos podem existir, portanto, como ato ou como *potentia*, de maneira que ambos possuem o mesmo grau de “existência”. Os atos são aqueles objetos quânticos que foram mensurados ou observados e tiveram sua *potentia*, a qual é representada matematicamente pela função probabilística, realizada. Já os objetos em potência são aqueles que não sofreram interação, não foram mensurados, e se mantêm apenas como potencialidades.

Por conseguinte, a conclusão de E. P. Fischer<sup>125</sup> condensa muito bem a situação exposta por Heisenberg: “é possível compreender a mecânica quântica como a primeira teoria que considera lado a lado uma ‘*res extensa*’ (realidade) e uma ‘*res potentia*’, como um campo de possibilidade, exatamente como Heisenberg sempre sustentou. O mundo se apresenta como ‘*potentia*’, a partir da qual, pela observação, uma realidade concreta é obtida” (2019, p. 138, tradução nossa)<sup>126</sup>. É nesse âmbito que Shimony sustenta que Heisenberg enuncia “uma implicação metafísica da mecânica quântica mais explicitamente que qualquer outro físico moderno” (1983, p. 212). O físico alemão propõe uma modalidade situada entre a possibilidade lógica e a sua realização, que seria o campo da *res potentia*: uma possibilidade objetiva que é ontologicamente equivalente à própria existência.

A noção de *potentia* é importante, pois oferece uma base ontológica para a mecânica quântica diferente da interpretação epistemológica das relações de incerteza, que atribui a causa da incerteza ao conhecimento humano incerto acerca dos sistemas quânticos. Concordamos parcialmente com a afirmação de Heelan de que Heisenberg procurou descrever os sistemas quânticos como eles são, e não como o sujeito os compreende. No entanto, discordamos de atribuir essa abordagem ao pensamento do físico alemão em sua totalidade, pois, como vimos, há momentos em que sua posição é claramente epistemológica<sup>127</sup>. De qualquer forma, nas ocasiões em que Heisenberg buscou uma descrição ontológica, o conceito de *potentia* foi seu

<sup>125</sup> Fischer expressa isso em seus comentários na versão em inglês de *Reality and Its Order*.

<sup>126</sup> *it is possible to understand quantum mechanics as the first theory that considers side by side a ‘res extensa’ (reality) and a ‘res potentia’, as a realm of possibility, just as Heisenberg had always maintained. The world presents itself as ‘potentia’ from which, by observation, an actual reality is gained.*

<sup>127</sup> Essa divisão precisa entre momentos de interpretação ontológica e epistemológica será tratada com detalhes no último capítulo.

recurso para explicar o complexo “estado-de-ser” dos objetos quânticos. Nas palavras de Heelan:

Para Heisenberg, o objetivo de uma consideração científica era descrever o que a realidade física realmente é. Seu objetivo era fornecer um relato ontológico da natureza, entendendo por ‘ontologia’ aquilo que os outros chamam de ‘metafísica’ — a saber, a ciência do que é independente da cultura e história humanas — embora ele reconhecesse que isso talvez não fosse possível no domínio microscópico. [...]. Muito mais tarde, ele encontrou expressão para seu interesse ontológico básico na física ao adotar a noção aristotélica de *potentia*, que, como ele propôs, descrevia o tipo de realidade representada pela função de onda quantum-mecânica (2016, p. 142, tradução nossa)<sup>128</sup>.

Sendo assim, a *potentia* é importante para Heisenberg porque ela introduz uma ontologia própria para a mecânica quântica, permitindo, segundo Shimony (1983, p. 213), a única interpretação ontológica consistente da função probabilística de Born. Essa interpretação consolida um novo papel para a probabilidade na mecânica quântica, incorporando-a, por princípio, na definição do estado de um sistema individual, de modo que a probabilidade se torna parte do próprio objeto quântico.

Além disso, cabe ressaltar que na interpretação ontológica a indeterminação assume o papel de uma “indefinição”, não no sentido linguístico, mas no contexto de “não decisão” mencionado anteriormente. Nesse sentido, o termo (des)determinação é mais adequado, pois não se trata de negar a determinação, mas de reconhecer sua ausência no estado de potência. Os objetos quânticos existem nessa realidade potencial na qual sua posição e *momentum* ainda não foram decididos, existindo apenas como uma potencialidade de ser. Por conseguinte, as relações de indeterminação, ontologicamente interpretadas, representam uma realidade *potencial*, capturando o estado em que a posição e o *momentum* preciso dos objetos quânticos ainda não foram decididos.

Para finalizar essa discussão, é de suma importância apontar um problema com a noção de *potentia*. Por mais que Heisenberg tenha extraído a tese metafísica mais profunda da mecânica quântica, ela, ainda assim, é incompleta. Nas palavras de Shimony, “Heisenberg extraiu da mecânica quântica uma tese metafísica profunda e radical: que o estado de um objeto

---

<sup>128</sup> For Heisenberg, the objective of a scientific account was to describe what physical reality is really like. Its goal was to give an ontological account of nature, taking “ontology” to mean what others call “metaphysics” — namely, the science of what is independently of human culture and history — although he recognized that this might not be possible in the micro-domain. [...]. Much later, he found expression for his basic ontological interest in physics by adopting the Aristotelian notion of *potentia*, which, as he proposed, described the kind of reality represented by the QM wave function.

físico é uma coleção de potencialidades. No entanto, sua descoberta é incompleta, pois a transição da potencialidade para a realidade permanece misteriosa” (1983, p. 215, tradução nossa)<sup>129</sup>.

O cerne do comentário de Shimony é que Heisenberg não apresenta um mecanismo para explicar a transição do possível para o real — o colapso da função de onda — que não seja a interação com o sujeito. Isso é problemático pois introduz um subjetivismo na ontologia da *potentia*. Para remediar essas críticas, em ocasiões na década de 50, como em *Physics and Philosophy* (1958a, p. 137) e “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*” (1955, p. 22), Heisenberg procurou explicar o colapso por meio da noção de “registro”. O argumento propõe que o papel do observador é apenas registrar essa passagem, não importando se esse registro é feito por um ser vivo ou um aparato de medida. Dessa forma, o sujeito não causa necessariamente o colapso, ele apenas o registra, não implicando em características subjetivas na mecânica quântica.

No entanto, esse argumento é insatisfatório e apenas usa o conceito de registro como um “bode expiatório”. Ao não conseguir se desvencilhar da acusação de subjetivismo, Heisenberg desvia a atenção da “causa do colapso” para o “registro” dele. Embora seja válido argumentar que o observador, que desempenha um papel idêntico ao do aparato de medida, apenas registre a transição de uma situação teórica de superposição possível para uma medida real determinada, surge a questão: se isso é verdade, como ocorre então o colapso? Shimony (1983, p. 214-215) reforça essa interpretação, argumentando que, se Heisenberg abandonar a transição do possível para o real — o colapso da função de onda — por meio da interferência do sujeito, ele se vê sem uma explicação para como essa transição ocorre. Assim, apesar dos esforços de Heisenberg para afastar as críticas subjetivistas com o argumento do registro, parece evidente que o autor apenas desloca o foco, sem oferecer uma resposta para o dilema inicial do colapso, ou o chamado “problema da medição”.

Assim, notamos que para Heisenberg os objetos quânticos podem existir tanto como ato quanto como *potentia*, de forma que o possível pode se realizar no “real” através de uma transição na qual ele “passar a ser o que potencialmente pode ser”. Esse processo de transição, comumente denominado de “colapso da função onda”, não é satisfatoriamente explicado por Heisenberg. Suas explicações vagas possuem um elevado teor subjetivista, sugerindo que o sujeito, de alguma forma, é responsável pela passagem do possível ao “real”. Assim, a única

---

<sup>129</sup> *Heisenberg has drawn from quantum mechanics a profound and radical metaphysical thesis: that the state of a physical object is a collection of potentialities. But his discovery is incomplete, in that the transition from potentiality to actuality remains mysterious.*

saída possível para Heisenberg ao explicar o colapso é afirmar que o sujeito faz a passagem do possível ao real, o que enfraquece seu ideal ontológico de explicação introduzido com o conceito de *potentia*.

#### **4. CAPÍTULO IV: A DIVISÃO DO PENSAMENTO DE HEISENBERG A PARTIR DAS RELAÇÕES DE INCERTEZA**

Para além da complexidade inerente aos tópicos trabalhados por Heisenberg, que exigem um conhecimento aprofundado de matemática, física, química e filosofia, a inconstância de seu pensamento representa um desafio significativo para qualquer estudo sistemático de suas obras. Uma leitura rigorosa de seus textos revela que Heisenberg varia, sem enunciar claramente, suas interpretações da mecânica quântica e das relações de incerteza, chegando mesmo a se contradizer. Essa variação interpretativa em si não é um problema se for possível estabelecer chaves interpretativas que conectem suas diferentes posições. Se for possível estabelecer uma divisão do pensamento do físico alemão em fases, nas quais cada fase seja internamente consistente; sem apresentar contradições em um dado período, essas inconsistências poderiam ser justificadas.

No entanto, por mais que a literatura especializada identifique essa possibilidade de dividir o pensamento de Heisenberg em fases, nenhum estudo, conforme nos chama a atenção Cabral (2019, p. 27), se debruçou seriamente sobre o tópico. Em suas palavras: “Não obstante tal relevância trata-se, ao que parece, de um problema [identificação das fases no pensamento de Heisenberg] ainda em aberto, e de um tema pouco discutido na literatura especializada, com carência, até onde sabemos, de publicações ou estudos com tratamentos rigorosos mais consolidados”. Nota-se, portanto, que mesmo sendo um tema de pesquisa importante para compreender Heisenberg e, assim, compreender a história e filosofia da mecânica quântica, a divisão foi pouquíssimo trabalhada.

Nesse contexto, antes de apresentarmos uma possível divisão do pensamento de Heisenberg com base nas suas variações acerca das relações de incerteza, focando nos tópicos das derivações, causas e interpretações, é profícuo analisar as duas divisões que encontramos em nosso levantamento bibliográfico. A primeira, brevemente esboçada por Cabral, faz um panorama das diferentes tradições filosóficas que influenciaram Heisenberg ao longo de sua escrita. A segunda, mais elaborada e que será utilizada como base para a nossa divisão, foi realizada por Camilleri. Em seguida, apresentamos e discutimos ambas as divisões, e, por fim, propomos a nossa.

Cabral sugere distinguir o pensamento de Heisenberg em três fases<sup>130</sup>. A primeira fase é a positivista, que abrange seu período de juventude, de 1924 a 1927. Ela é “marcada principalmente pela influência de Pauli, e pode ser referida de forma sucinta como o momento onde Heisenberg se atém ao observado” (CABRAL, 2019, p. 28). Esse é o período em que Heisenberg adota a máxima operacionalista, segundo a qual a definibilidade pode ser reduzida à mensurabilidade.

Esse positivismo é adotado por Heisenberg e também pelos seus colegas Jordan e Born<sup>131</sup>. Influenciado por Mach, Einstein e Minkowski (MEHRA, 1987, p. 472), e inspirado pela base filosófica da Teoria da Relatividade Restrita, Heisenberg eleva a observabilidade das quantidades a um postulado (CASSIDY, 1992b, p. 202; HILGEVOORD; UFFINK, 2016, p. 2). Apenas quantidades em princípio observáveis devem ser consideradas na teoria. Como remonta Cassidy, “Em 9 de julho [de 1925], ele [Heisenberg] estava ansioso para disposto a abandonar completamente as órbitas, voltando-se para o positivismo e a manipulação matemática — afinal de contas, funcionava!” (1992b, p. 203, tradução nossa)<sup>132</sup>.

Comentadores, como Cassidy, Hilgevoord, Uffink e Mehra, consideram que essa elevação da observabilidade positivista a um postulado data de 1925 e é marcada por uma sequência de artigos acerca da mecânica de matrizes. Essa posição é notável no próprio resumo do artigo “*Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*” (*Quantum-Theoretical Reinterpretation of Kinematic and Mechanical Relations*), da segunda metade de 1925, em que Heisenberg afirma: “O presente artigo procura estabelecer uma base para a mecânica quântica teórica fundada exclusivamente em relações entre quantidades que, em princípio, são observáveis” (HEISENBERG, 1968 [1925], p. 261, tradução nossa, grifo nosso)<sup>133</sup>. No referido artigo, o físico alemão procurou desenvolver uma mecânica quântica se baseando apenas em frequências e intensidades observáveis (CASSIDY, 1992b, p. 181), já explicitando seu positivismo. Conforme comentado no primeiro capítulo, o critério de observabilidade positivista é tão central que Cassidy o elenca como um dos três passos fundamentais para a criação da mecânica de matrizes (1992b, p. 197).

---

<sup>130</sup> Tomamos a divisão apresentada por Cabral apenas como exemplo porque o próprio comentador já afirma que ela é “uma sugestão de divisão não rigorosa” (2019, p. 27). Desta forma, abstermos de tecer críticas ao comentador.

<sup>131</sup> Cassidy (1992b, p. 198) enfatiza que Heisenberg não foi o único físico quântico na época que se voltou ao positivismo. Citando um artigo publicado por Born e Jordan de 11 de junho de 1925, o comentador salienta o apelo dos físicos à definição operacional da simultaneidade feita por Einstein na teoria da relatividade restrita, de modo que apenas termos em princípio observáveis devem figurar nas leis naturais.

<sup>132</sup> *By July 9, he was eager to abandon orbits entirely, turning instead to positivism and mathematical manipulation — after all, it worked!*

<sup>133</sup> *The present paper seeks to establish a basis for theoretical quantum mechanics founded exclusively upon relationships between quantities which in principle are observable.*

Não obstante, nas entrevistas com Kuhn, Heisenberg observa que a influência do positivismo é anterior a 1925. Ao questioná-lo acerca da exclusividade de conceitos observáveis na teoria, e se a ideia era mais prevalente em Göttingen ou Munique, Heisenberg responde:

Eu diria que em Göttingen estava intimamente conectada com o interesse na relatividade que havia em Göttingen. Havia Minkowski, e Minkowski, como você sabe, estava muito interessado na relatividade restrita. Quando se fala sobre a relatividade restrita, as pessoas sempre diziam, ‘Ora, havia este ponto muito famoso de Einstein de que só se deveria falar sobre aquelas coisas que se pode observar, que, na verdade, o tempo que entra na transformação de Lorentz era o tempo real.’ [...]. ‘Ora, por que não dizer que todas as coisas que devem ser tratadas na teoria são apenas aquelas coisas que também podemos esperar observar de alguma forma.’ Provavelmente isso foi mais difundido em Göttingen do que em Munique por causa desse interesse na relatividade, e o ponto da relatividade foi intensamente enfatizado por Minkowski e outras pessoas quando deram palestras sobre o assunto (1963, V, tradução nossa).<sup>134</sup>

Heisenberg, Born e Jordan, influenciados por Einstein e Minkowski, acreditavam que análogo ao caso da simultaneidade na Teoria da Relatividade Restrita, seria possível considerar apenas conceitos observáveis na nova mecânica quântica. Por conseguinte, observa-se que a influência do positivismo em Heisenberg pode ter ocorrido tão cedo quanto o período de 1922 a 1924, no qual ele estudou em Göttingen sob a tutela de Born — que, por sua vez, havia estudado sob a tutela de Minkowski no começo do século.

Avançando para 1927, observa-se no artigo apresentado em Solvay junto com Born que a influência do positivismo se mantém preponderante. Diferente do artigo no qual as relações de incerteza são apresentadas, no qual Heisenberg nuança o termo e fala em um “operacionalismo” ao invés de “passível de observação”, nessa conferência em Solvay o postulado da observabilidade é defendido com todas as letras. Citando-os: “É, no entanto, um princípio testado e comprovando, particularmente na mecânica quântica, que se deve introduzir, na medida do possível, apenas quantidades diretamente observáveis como conceitos fundamentais de uma teoria” (BORN; HEISENBERG, 2009 [1927], p. 430, tradução nossa, grifo nosso)<sup>135</sup>.

<sup>134</sup> *I would say in Göttingen it was closely connected with the interest in relativity which had been in Göttingen. There was Minkowski, and Minkowski as you know, had been very interested in special relativity. When one spoke about special relativity, people always said, “Well, there was this very famous point of Einstein that one should only speak about those things which one can observe, that actually the time entering in the Lorentz transformation was the real time.” [...]. “Well, why not say that all the things which should be handled in theory are just those things which we also can hope to observe somehow.” That was perhaps wider spread in Göttingen than in Munich on account of this interest in relativity, and the point in relativity was emphasized quite strongly by Minkowski and such people when they gave lectures on it.*

<sup>135</sup> *It is, however, a tried and proven principle, particularly in quantum mechanics, that one should introduce as far as possible only directly observable quantities as fundamental concepts of a theory.*

A segunda fase é a antirrealista, que, de acordo com Cabral, inicia-se com a publicação do artigo de 1927 e se estende até o final da Segunda Guerra, em 1945 (2019, p. 28). O comentador identifica o encontro de Heisenberg com Einstein<sup>136</sup> como marco fundante dessa fase. Logo, podemos supor que o cerne desse período é a adoção da tese da impregnação teórica da observação.

Por fim, o período de 1945 até a morte de Heisenberg, em 1976, é considerado a terceira fase, a idealista. Nas palavras de Cabral:

[essa] fase que possui, como marco referencial principal, a aproximação de Heisenberg com as ideias de filosóficas de Platão, tendo Heisenberg, eventualmente se aproximado de Aristóteles, mas, segundo pensamos, sempre resguardando um viés idealista. Essa fase, segundo acreditamos, se iniciou após o final da Segunda Guerra Mundial, em 1945, e se estendeu até a morte de Heisenberg em 1976, e se caracteriza pelo recurso em aludir a possibilidade de referência matemática para discutir mais detidamente aspectos filosóficos conceituais em torno dos fenômenos quânticos, no caso, como veremos, para tratar da conversão da energia em matéria (partículas elementares) (2019, p. 157).

O cerne dessa terceira fase é, portanto, o foco nas estruturas matemáticas para explicar as novas partículas elementares que surgiam na época e a adoção de duas ideias estruturantes do pensamento aristotélico. A primeira delas é a *potentia* como um quadro ontológico para a mecânica quântica. A segunda, também amplamente discutida em *Physics and Philosophy*, é uma versão modificada do hilemorfismo aristotélico. Heisenberg aceita a definição aristotélica de que os objetos possuem matéria e forma. No entanto, ele concebe matéria/energia e equações matemáticas como os correlatos de seu “hilemorfismo físico moderno” para matéria e forma. Assim, segundo Cabral, o período idealista de Heisenberg pode ser definido pela centralidade das formas matemáticas platônicas e pela adoção de algumas ideias da metafísica aristotélica, sendo *Physics and Philosophy* o melhor exemplo dessa fase.

Camilleri, por sua vez, adota uma abordagem diferente e utiliza uma chave temporal distinta para dividir o pensamento de Heisenberg. Segundo seu artigo “*Indeterminacy and the Limits of Classical Concepts: the Transformation of Heisenberg’s Thought*”, é possível

---

<sup>136</sup> Por mais que o nosso objetivo não seja criticar Cabral, afinal de contas, seu intuito com a divisão é apenas contextualizar o leitor, é importante pensar o aspecto cronológico dessa afirmação. O comentador não explicita a qual dos encontros com Einstein ele se refere, não obstante, ao afirmar que a postura antirrealista de Heisenberg é incitada por Einstein que, na época, curiosamente adotava uma posição realista, é seguro pensar que o encontro referido é o relatado em *A parte e o Todo*. Considerando que esse encontro é datado por Heisenberg (2016 [1969], p. 77) e por Cassidy (1992b, p. 237) como ocorrido em 1926, há uma incongruência cronológica na divisão de Cabral. Por conseguinte, é problemático elencar como marco fundante de uma fase antirrealista um encontro que ocorre antes do ápice da fase anterior positivista, vide a publicação do artigo de 1927.

identificar mudanças no pensamento do físico alemão acerca da indeterminação no período de 1925 a 1928. Diferente de Cabral, que buscou traçar uma divisão com base em toda obra de Heisenberg, Camilleri propõe um estudo mais específico, com foco apenas no período imediatamente anterior e posterior à publicação do artigo de 1927.

Para apresentar sua divisão proposta, Camilleri foca em três situações-chave: a busca inicial por novos conceitos para a teoria quântica; a redefinição operacional dos conceitos como posição e *momentum*; e a indispensabilidade dos conceitos clássicos. Citando-o:

Neste artigo mostro que no período crítico entre 1926 e 1928 o pensamento de Heisenberg passou por três fases, cada qual constituindo uma abordagem diferente para o desenvolvimento de um novo quadro conceitual para a mecânica quântica, na qual se reconheceu que os conceitos de ‘posição’ e ‘*momentum*’ têm apenas aplicabilidade limitada (2007b, p. 179, tradução nossa)<sup>137</sup>.

Em suma, Camilleri defende três fases no pensamento de Heisenberg no período de 1925 a 1928. A primeira delas, adotada após o desenvolvimento da mecânica de matrizes no final de 1925, é marcada pela procura de novos conceitos para o espaço e o tempo. A segunda fase começa em fevereiro de 1927, marcada pela redefinição operacional dos conceitos de posição e velocidade. O melhor exemplo dessa fase é o artigo de 1927, no qual Heisenberg empreende essa redefinição. Não obstante, segundo Camilleri, a segunda fase dura pouco. Após uma série de conversas com Bohr, Heisenberg percebe que o ideal operacionalista é inviável e passa a aceitar a doutrina de Bohr da indispensabilidade dos conceitos clássicos. Feito esse esboço, procedemos para uma análise pormenorizada de cada um desses momentos

#### 4.1. A procura por novos conceitos de espaço e tempo

A busca por novos conceitos quânticos para espaço e tempo no período de 1925 a 1927, anterior ao artigo das relações de incerteza, é o que classifica a primeira fase descrita por Camilleri. Nas palavras do comentador:

De fato, a tentativa de encontrar novos conceitos quânticos foi parte integrante do projeto de Heisenberg de reconstruir os fundamentos da mecânica quântica

---

<sup>137</sup> *In this paper I show that in the critical period between 1926 and 1928 Heisenberg’s thought passes through three phases, each of which constitutes a different approach to the development of a new conceptual framework for quantum mechanics, where it was recognized that the concepts ‘position’ and ‘momentum’ have only limited applicability.*

entre 1925 e 1927. Como mostra a sua correspondência com Pauli durante esse período, os esforços iniciais de Heisenberg para resolver as dificuldades associadas com a teoria quântica assumiram a forma de uma tentativa de construir uma nova concepção de espaço e tempo na teoria quântica (2007b, p. 181, tradução nossa)<sup>138</sup>.

O problema que os físicos enfrentavam na época era como descrever o movimento dos corpúsculos por meio dos conceitos clássicos de espaço e tempo. Conforme discutido no primeiro capítulo, a mecânica de matrizes não visava explicar o comportamento de um elétron a partir de sua trajetória, pois não fazia mais sentido falar da sua posição com *momentum* preciso. Essa dificuldade levou Heisenberg a afirmar que a única maneira de descrever o movimento de um elétron no espaço e tempo era a partir de uma nova estrutura para ambos, em uma base geométrica que fosse não euclidiana (CAMILLERI, 2007b, p. 181). Na carta enviada a Pauli, em 28 de outubro de 1926, Heisenberg chegou a considerar que a solução para os problemas cinemáticos na teoria quântica seria considerar posições e instantes de forma meramente estatística.

Na impossibilidade de falar da posição e *momentum* precisos de uma partícula, e considerando que as tentativas de transformar o espaço e tempo em conceitos estatísticos não foram frutíferas, Heisenberg procurou conceber o espaço e tempo como conceitos descontínuos. Como explicita Camilleri:

[...] Heisenberg especulou que o problema de interpretar a mecânica quântica poderia muito bem estar na descontinuidade do próprio espaço-tempo. O conceito de velocidade na cinemática clássica, explicou Heisenberg em uma carta a Pauli em novembro, é *por definição* dependente da divisibilidade infinita do espaço e tempo. Entretanto, se a ideia de um elétron se movendo em uma trajetória no espaço e tempo não fosse mais aplicável ao átomo, então novos conceitos de espaço e tempo precisariam ser formulados (2007b, p. 182, tradução nossa)<sup>139</sup>.

O físico alemão acreditava que se tornasse o espaço-tempo um conceito descontínuo, os problemas cinemáticos da mecânica quântica seriam dissolvidos. O argumento era o de que

---

<sup>138</sup> *Indeed, the attempt to find new quantum concepts was integral to Heisenberg's project of reconstructing the foundations of quantum mechanics between 1925 and 1927. As his correspondence with Pauli during this period shows, Heisenberg's early efforts to resolve the difficulties associated with quantum theory took the form of an attempt to construct a new conception of space and time in quantum theory.*

<sup>139</sup> *[...] Heisenberg speculated that the problem of interpreting quantum mechanics might well lie with the discontinuity of space-time itself. The concept of velocity in classical kinematics, Heisenberg explained in a letter to Pauli in November, is by definition dependent on the infinite divisibility of space and time. However, if the idea of an electron moving in a trajectory in space and time was no longer applicable in the atom, then new concepts of space and time would need to be formulated.*

para medir a velocidade de uma partícula seria necessário considerar pelo menos dois pontos contínuos ou infinitesimalmente próximos. Em um espaço quantizado e descontínuo, isso não seria possível, fazendo com que o conceito de velocidade clássico perdesse sua definição precisa. Assim, só faria sentido na teoria falar em posição e velocidade imprecisas para uma partícula, o que implicava em uma dissolução do problema. Por conseguinte, ao postular um espaço e tempo descontínuos, Heisenberg era capaz de explicar a ambiguidade dos conceitos clássicos cinemáticos, como posição e *momentum*, na mecânica quântica.

Considerando essas duas tentativas de conceber novos conceitos para espaço e tempo, dois pontos importantes merecem destaque. O primeiro deles é que Heisenberg acreditava que os conceitos clássicos eram limitados (CAMILLERI, 2007b, p. 183), isto é, que eles não eram totalmente capazes de lidar com o domínio quântico. O segundo ponto emerge do primeiro: se os conceitos clássicos são ambíguos, eles devem ser abandonados em prol de novos conceitos mais fundamentais de espaço e tempo para a mecânica quântica.

Camilleri identifica assim o período da primeira fase de 1925 a 1927, sendo suas duas características fundamentais o reconhecimento de que os conceitos clássicos são limitados e a procura por novos conceitos espaço-temporais que dessem conta dos problemas da teoria quântica.

#### 4.2. A ressignificação operacionalista de posição e velocidade

De acordo com Camilleri (2009b, p. 184), após várias tentativas frustradas de conceber novos conceitos para o espaço e o tempo — desde o espaço-tempo estatístico até o descontínuo — Heisenberg altera seu enfoque em seu artigo de 1927. A revisão conceitual agora se volta para os conceitos cinemáticos e mecânicos, particularmente posição e velocidade ou *momentum*. Essa mudança é perceptível logo no começo do artigo de 1927:

Igualmente, uma revisão da geometria espaço-temporal em pequenas distâncias é desnecessária, pois podemos fazer com que as leis quantum-mecânicas se aproximem arbitrariamente das clássicas ao escolher massas suficientemente grandes, mesmo quando distâncias e tempos arbitrariamente pequenos são indagados. Entretanto, parece que uma consequência direta das equações básicas da mecânica quântica é a necessidade de uma revisão dos conceitos cinemáticos e mecânicos (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 62-63, tradução nossa)<sup>140</sup>.

---

<sup>140</sup> *Equally unnecessary is a revision of space-time geometry at small distances, as we can make the quantum-mechanical laws approximate the classical ones arbitrarily closely by choosing sufficiently great masses, even*

Observa-se que, no artigo de 1927, Heisenberg ainda não havia abandonado a esperança de ressignificar os conceitos clássicos. Diante dos problemas que assolavam a mecânica quântica, como a impossibilidade de descrever a trajetória de um elétron, Heisenberg propõe novos conceitos para posição e *momentum*. O fundamento filosófico que orienta essa ressignificação, o mesmo que guiou seu pensamento nos anos anteriores, é o positivismo, que, nesse contexto, atinge seu ápice sob o véu do operacionalismo. Conforme abordado no primeiro capítulo, para compreender o que se entende por “posição do elétron”, é necessário definir experimentos capazes de medir a “posição do elétron” (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 64). Em outras palavras, só é possível atribuir significado a conceitos que podem, por princípio, ser mensurados. Conceitos que não podem ser mensuráveis ou observados não têm sentido nas teorias físicas.

Segundo Camilleri, nesse contexto operacional, Heisenberg elabora o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  para atribuir sentido aos conceitos de posição e velocidade, conforme essa redefinição operacional. O comentador afirma que:

O ponto crucial para Heisenberg ao elaborar o experimento mental sobre o microscópio de raios gama não era primariamente determinar os limites da precisão da medida, mas sim estabelecer o significado preciso dos conceitos ‘posição’ e ‘velocidade’ na mecânica quântica por meio de uma análise operacional. Nesse sentido, o microscópio de raios gama, conforme apresentado em seu artigo de 1927, não tinha como objetivo primário demonstrar os limites do nosso conhecimento acerca do elétron na teoria quântica. É uma preocupação semântica, e não epistêmica, que está por trás da formulação de Heisenberg do experimento mental em seu artigo sobre as relações de incerteza (2007b, p. 188, tradução nossa)<sup>141</sup>.

Camilleri propõe uma visão distinta da literatura canônica. Segundo ele, o objetivo principal do microscópio de raios- $\gamma$  é conferir significado para os conceitos de posição e velocidade na mecânica quântica. Como o operacionalismo exige que os conceitos sejam, por princípio, passíveis de medida, Heisenberg se vê obrigado a fornecer um método de medir a posição e velocidade de um elétron. Dessa forma, o objetivo primário do microscópio é

---

*when arbitrarily small distances and times come into question. But that a revision of kinematical and mechanical concepts is necessary seems to follow directly from the basic equations of quantum mechanics.*

<sup>141</sup> *The crucial point for Heisenberg in devising the thought experiment on the gamma-ray microscope was not primarily to determine the limits of precision of measurement, but rather to establish the precise meaning of concepts ‘position’ and ‘velocity’ in quantum mechanics through an operational analysis. To this extent, the gamma-ray microscope, as it was presented in his 1927 paper, was not intended primarily to demonstrate the limits of our knowledge of the electron in quantum theory. It is a semantic, not an epistemic, concern that lies behind Heisenberg’s formulation of the thought-experiment in his paper on the uncertainty relations.*

semântico, voltado para fornecer sentido aos conceitos, e não meramente epistêmico. Embora o aspecto epistêmico esteja também presente, ele é secundário e tangencial à questão semântica.

Por conseguinte, para Camilleri, o microscópio de raios- $\gamma$  tem a função primária de redefinir operacionalmente o significado dos conceitos de posição e velocidade, de forma que, na mecânica quântica, não faz mais sentido falar em posição e velocidade simultaneamente bem definidas (CAMILLERI, 2007b, p. 187). Isoladamente, os conceitos clássicos de posição e velocidade possuem significado bem definido, entretanto, atribuir valores precisos para ambos simultaneamente, não faz sentido. Conforme foi observado, o núcleo dessa fase do pensamento de Heisenberg é, segundo Camilleri, a ressignificação dos conceitos de posição e velocidade. Nesse ponto, a diferença da primeira fase é sutil: enquanto nela se procurava redefinir os conceitos espaço-temporais, na segunda fase Heisenberg altera seu foco para os conceitos de posição e velocidade.

Camilleri, entretanto, argumenta que o operacionalismo de 1927 representa uma fuga de Heisenberg dos problemas enfrentados pela mecânica quântica desde 1924 (2009b, p. 185-186). Ele sugere que, através do operacionalismo e da busca por novos conceitos de posição e velocidade, as relações de incerteza emergem nesse artigo de 1927. Desta forma, o comentador sugere implicitamente que o operacionalismo é a grande novidade introduzida por Heisenberg em 1927. Ora, como observado na seção anterior, o critério positivista da observabilidade, que é análogo ao do operacionalismo, já estava presente no pensamento do físico alemão desde 1922. Embora existam pequenas nuances entre o positivismo e o operacionalismo, a gênese desse operacionalismo em Heisenberg, como foi apontado por Camilleri (2009b, p. 185), reflete a mesma influência identificada na seção anterior: as definições operacionais da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein.

Sendo assim, questionamos o operacionalismo como uma das características distintivas da segunda fase, uma vez ser indiscutível sua presença marcante não apenas no artigo de 1927 e em toda a segunda fase, mas também na fase anterior. Se Camilleri pretende argumentar que a segunda fase representa o ápice da influência operacionalista, não objetamos, pois, de fato, ela é a posição filosófica que fundamenta o artigo mais importante do físico. Contudo, discordamos que o operacionalismo seja um divisor entre a primeira e a segunda fase, já que essa influência filosófica é comum às duas primeiras fases. Assim, o único critério que identifica de forma precisa segunda fase, conforme Camilleri, é a ressignificação dos conceitos de posição e velocidade, algo que se associa especificamente ao artigo de 1927.

### 4.3. A necessidade dos conceitos clássicos

Como ficou evidente, um ponto fundamental das duas primeiras fases de Heisenberg, de 1925 até o artigo de 1927, é a busca por novos conceitos para a mecânica quântica. Como o físico expressa claramente: “a partir [das discrepâncias internas da mecânica quântica], é possível concluir que nenhuma interpretação da mecânica quântica que empregue conceitos cinemáticos e mecânicos ordinários [ou clássicos] é possível” (1983 [1927], p. 62, tradução nossa)<sup>142</sup>. Isso demonstra que ele via os conceitos clássicos como limitados e acreditava que era necessário redefini-los para empregá-los na mecânica quântica.

A terceira fase identificada por Camilleri é marcada por uma ruptura nesse desejo de redefinir os conceitos clássicos. O fator chave para essa mudança são as ideias de Bohr, especificamente sua defesa da indispensabilidade dos conceitos clássicos. Após extensas discussões com Bohr acerca da interpretação da mecânica quântica em 1927, Heisenberg gradualmente muda sua posição em relação à redefinição conceitual. Como Camilleri descreve:

Entretanto, após discussões com Bohr, a posição de Heisenberg sofreu uma mudança significativa. Por meio da crítica penetrante de Bohr ao experimento mental, Heisenberg percebeu que ele não poderia dispensar os conceitos clássicos como posição e velocidade na mecânica quântica, apesar das limitações de sua aplicabilidade. Essa transformação no pensamento de Heisenberg fez com que ele abandonasse sua teoria da verificação do significado em favor da posição bohriana de que conceitos como posição e *momentum*, ultimamente, derivam seu significado da maneira como eles são usados na física clássica. A aplicabilidade desses conceitos, no entanto, pode estar sujeita a limitações inerentes, que é precisamente o caso na mecânica quântica. Essa continuaria sendo a posição de Heisenberg nos anos seguintes (2007b, p. 198, tradução nossa)<sup>143</sup>.

Após a crítica perspicaz de Bohr ao microscópio de raios- $\gamma$ , Heisenberg se vê forçado a aceitar tanto o poder de resolução do microscópio quanto, em alguns casos isolados, a segunda causa das relações de incerteza. Além disso, ele é pressionado pelo físico dinamarquês a repensar sua posição sobre a redefinição conceitual. Segundo Camilleri, Heisenberg percebe

---

<sup>142</sup> *Already from this circumstance one might conclude that no interpretation of quantum mechanics is possible which uses ordinary kinematical and mechanical concepts.*

<sup>143</sup> *After discussions with Bohr, however, Heisenberg's view underwent a significant change. Through Bohr's penetrating critique of the thought experiment, Heisenberg realized that he could not dispense with classical concepts like position and velocity in quantum mechanics, in spite of the limitations on their applicability. This transformation in Heisenberg's thought saw him to abandon his verification theory of meaning in favour of Bohr's view that concepts such as position and momentum ultimately derive their meaning from the way they are used in classical physics. The applicability of these concepts, however, may be subject to inherent limitation, which is precisely the case in quantum mechanics. This would remain Heisenberg's view in the years to follow.*

que não é possível abandonar os conceitos cinemáticos clássicos de posição e *momentum*. Embora sejam limitados, eles são indispensáveis para a mecânica quântica. Posteriormente, Heisenberg abandona o operacionalismo como teoria do significado, adotando a ideia de Bohr de que os conceitos cinemáticos derivam seu significado — mesmo que limitado — da forma como são empregados na física clássica.

Para compreender melhor essa transição, é necessário retornar à obra de Bohr. Na sua “*Introductory Survey*”, o físico dinamarquês expressa claramente a indispensabilidade dos conceitos clássicos:

Assim, de acordo com a posição do autor, seria um equívoco acreditar que as dificuldades da teoria atômica podem ser contornadas pela eventual substituição dos conceitos da física clássica por novas formas conceituais. De fato, conforme enfatizado, o reconhecimento da limitação das nossas formas da percepção não implica, de maneira alguma, que podemos dispensar com nossas ideias costumeiras ou suas expressões verbais diretas quando reduzimos nossas impressões sensoriais à ordem. Também não é provável que em algum momento os conceitos fundamentais das teorias clássicas se tornem supérfluos para a descrição da experiência física. O reconhecimento da indivisibilidade do quantum de ação, e da determinação de sua magnitude, não dependem somente de uma análise das medidas baseadas nos conceitos clássicos, mas continua sendo apenas a aplicação desses conceitos que torna possível relacionar o simbolismo da teoria quântica aos dados da experiência (1961 [1929], p. 15-16, tradução nossa)<sup>144</sup>.

Primeiramente, Bohr deixa claro que é um erro pensar que as dificuldades da mecânica quântica poderiam ser superadas por uma troca dos conceitos clássicos por novos conceitos. Embora não seja explicitamente indicado no texto se essa crítica é direcionada especificamente a Heisenberg, é contra o *modus operandi* de ressignificar os conceitos que Bohr se posiciona. Apesar de reconhecer que os conceitos clássicos são limitados e derivam das formas restritas da percepção, Bohr argumenta que eles são indispensáveis para a mecânica quântica. Somente por meio deles é possível conectar o simbolismo matemático-abstrato da mecânica quântica com a experiência. Além disso, Bohr ressalta que é improvável que os conceitos clássicos sejam abandonados futuramente, elevando-os ao status de postulados linguísticos da física.

---

<sup>144</sup> Thus, according to the view of the author, it would be a misconception to believe that the difficulties of the atomic theory may be evaded by eventually replacing the concepts of classical physics by new conceptual forms. Indeed, as already emphasized, the recognition of the limitation of our forms of perception by no means implies that we can dispense with our customary ideas or their direct verbal expressions when reducing our sense impressions to order. No more is it likely that the fundamental concepts of the classical theories will ever become superfluous for the description of physical experience. The recognition of the indivisibility of the quantum of action, and the determination of its magnitude, not only depend on an analysis of measurements based on classical concepts, but it continues to be the application of these concepts alone that makes it possible to relate the symbolism of the quantum theory to the data of experience.

Essa necessidade de empregar os conceitos clássicos — mesmo que limitados — é chamada por Camilleri de “doutrina da indispensabilidade dos conceitos clássicos de Bohr”, expressão que adotamos nesta dissertação (2005, p. 27; 2007b, p. 179). Pessoa Jr., por sua vez, a denominou “tese da linguagem clássica” (2006a, p. 92).

Compreendido o cerne da doutrina, é importante analisar a justificativa de Bohr para a indispensabilidade dos conceitos clássicos. Como indicado na citação acima, Bohr sustenta a doutrina de maneira controversa, estendendo-a até mesmo para momentos futuros. Portanto, é necessário que ele ofereça uma boa explicação para justificar a persistência desses conceitos clássicos frente ao potencial de novas descobertas científicas, evitando que essa sua posição se torne um dogma filosófico. A melhor explicação para essa justificativa pode ser encontrada no artigo de Bohr, “O Debate com Einstein sobre Problemas Epistemológicos na Física Atômica”:

Para esse fim, é decisivo reconhecer que, *por mais que os fenômenos transcendem o âmbito da explicação física clássica, a descrição de todos os dados deve ser expressa em termos clássicos*. O argumento é que, com a palavra ‘experimento’, referimo-nos a uma situação em que podemos dizer aos outros o que fizemos e o que aprendemos, e que, portanto, a explicação do arranjo experimental e dos resultados das observações deve ser expressa numa linguagem inambígua, com a aplicação adequada da terminologia da física clássica (2017 [1949], p. 50-51).

Toda a justificativa gira em torno da noção de comunicabilidade. Devido à necessidade de comunicar tanto o arranjo quanto os resultados experimentais de maneira clara, é essencial empregar uma linguagem não ambígua. A linguagem ambígua e incerta da física quântica não permite a comunicação eficaz de experimentos reprodutíveis. Para Bohr, a única linguagem capaz de fazer essa comunicação precisa é a da física clássica, baseada nos conceitos clássicos. Assim, os conceitos clássicos tornam-se indispensáveis porque são a única forma de comunicar os experimentos de forma inequívoca.

Heisenberg, em sua terceira fase, aceita a indispensabilidade dos conceitos clássicos e extrai dessa doutrina consequências ainda mais profundas: os conceitos clássicos se tornam um *a priori* para a mecânica quântica. De acordo com o físico em sua entrevista a Kuhn<sup>145</sup>:

Os conceitos da mecânica quântica só podem ser explicados a partir do conhecimento prévio dos conceitos newtonianos. Isto é, a teoria quântica se baseia na existência da física clássica. Esse é o ponto que Bohr enfatiza tão

---

<sup>145</sup> Esse argumento da linguagem clássica como *a priori* não é exclusivo dessa entrevista. Também é possível notar Heisenberg defendendo essa ideia em *Philosophic Problems of Nuclear Science* (1966 [1936], p. 49), *Reality and Its Order* (2019 [1942], p. 59), *Physics and Philosophy* (1958a, p. 90-91), *Across the Frontiers* (1972 [1958], p. 18) e *A parte e o Todo* (2016 [1969], p. 144).

fortemente, que não podemos falar sobre a física quântica sem antes termos a física clássica. Portanto, diria que a mecânica newtoniana é *uma espécie de a priori para a teoria quântica*. Ela é a priori no sentido de que *é a linguagem que nos permite dizer o que observamos*. Se não dispormos da linguagem da física clássica, não sei como podemos falar sobre nossas experiências (1963, IX, tradução nossa, grifo nosso)<sup>146</sup>.

A afirmação feita não é trivial: os conceitos clássicos não apenas são indispensáveis para a mecânica quântica, mas também constituem suas próprias condições de possibilidade. Assim como espaço, tempo e causalidade são, para Kant, condições a priori de toda a experiência (HEISENBERG, 2017 [1958], p. 18-19); os conceitos clássicos são as condições de possibilidade da experiência na mecânica quântica. Somente com a adoção da linguagem clássica é possível realizar e comunicar experimentos de forma eficaz. Camilleri ajuda a compreender melhor esse caráter *a priori* da linguagem clássica. Ele defende a noção de um “a priori prático” em Heisenberg. Os conceitos clássicos, mesmo limitados, formam as condições de possibilidade da experiência, contudo, diferente de Kant, eles perdem sua necessidade e universalidade transcendentais (CAMILLERI, 2005, p. 271-272). Tais conceitos *a priori* emergem do desenvolvimento histórico da linguagem humana e, como fica evidente pelas relações de incerteza, possuem uma gama limitada de aplicações. Camilleri ainda afirma que são “historicamente contingentes só que indispensáveis no nosso tempo pois constituem a única linguagem capaz de descrever e comunicar experimentos” (2005, p. 271). Essa interpretação é corroborada pelo comentário de Heisenberg em *Physics and Philosophy*:

O uso desses conceitos [clássicos], incluindo espaço, tempo e causalidade, é, de fato, a condição para observação de eventos atômicos e é, nesse sentido da palavra, ‘a priori’. O que Kant não havia previsto era que esses conceitos a priori podem ser as condições da ciência e, ao mesmo tempo, podem ter apenas uma gama limitada de aplicabilidade. [...] A física moderna mudou a afirmação de Kant sobre a possibilidade de juízos sintéticos a priori de metafísica para prática.

Nessa reinterpretação, o ‘a priori’ kantiano está indiretamente conectado com a experiência na medida em que foi transformado através do desenvolvimento da mente humana em um passado muito distante (1958a, p. 90-91, tradução nossa)<sup>147</sup>.

---

<sup>146</sup> *The concepts of quantum mechanics can only be explained by already knowing the Newtonian concepts. That is, quantum theory is based upon the existence of classical physics. This is the point which Bohr emphasizes so strongly, that we cannot talk about quantum physics without having already classical physics. So I would say Newtonian mechanics is kind of a priori for quantum theory. It is a priori in that sense that it is that language which enables us to say what we observe. If we have not the language of classical physics, I don't know how we should speak about our experiences.*

<sup>147</sup> *The use of these concepts, including space, time and causality, is in fact the condition for observing atomic events and is, in this sense of word, “a priori”. What Kant had not foreseen was that these a priori concepts can be the conditions for science and at the same time can have only limited range of applicability. [...]. Modern*

Convém comentar os dois pontos destacados por Camilleri. O primeiro é a limitação dos conceitos clássicos. Apesar de serem considerados *a priori* para a ciência, eles não possuem validade universal, sendo restringidos pelas relações de incerteza. O segundo ponto é a perda da necessidade. Ao colocar o “*a priori*” como fruto do desenvolvimento da mente humana — ou, como Camilleri coloca, como o produto do desenvolvimento histórico da linguagem humana — Heisenberg cria um jogo de palavras com os termos “*a priori*” e “*a posteriori*”. Os conceitos clássicos são “*a priori*” na medida em que se apresentam como as condições de possibilidade da linguagem para o desenvolvimento da ciência. Ao mesmo tempo, eles são “*a posteriori*”, pois emergem do desenvolvimento da linguagem humana, estando parcialmente conectados com a experiência. Assim, eles são “historicamente contingentes”, na medida em que não são necessários e imutáveis, pois foram moldados ao longo do processo de formação da linguagem. No entanto, são indispensáveis e *a priori* para a mecânica quântica, pois constituem os termos da única linguagem capaz de comunicar os experimentos de forma não ambígua.

Podemos depreender da citação acima que Heisenberg compreende os conceitos clássicos como as condições de possibilidade não só para a mecânica quântica, mas para toda a ciência. Somente através da linguagem clássica é possível descrever e comunicar os experimentos da mecânica quântica de maneira não ambígua. Embora inspirado em Kant, esse caráter *a priori* dos conceitos clássicos é diferente daquele relativo às noções kantianas de espaço, tempo e causalidade. Primeiramente, os conceitos clássicos são apenas um *a priori* da ciência, servindo como pré-condições do conhecimento científico e não de toda a experiência (PESSOA JR., 2004, p. 318). Em segundo lugar, os conceitos clássicos *a priori* possuem uma gama de aplicação limitada, como exemplificado pelos conceitos de posição e *momentum* no contexto das relações de incerteza, e são considerados fruto do desenvolvimento da linguagem humana, perdendo assim seu caráter necessário e imutável (HEISENBERG, 1974 [1958], p. 18).

Por fim, ainda no âmbito da doutrina da indispensabilidade dos conceitos clássicos, é importante discutir a sua limitação. A situação é colocada como um paradoxo por Bohr: por um lado, a mecânica quântica reconhece uma limitação fundamental no uso dos conceitos clássicos;

---

*physics has changed Kant's statement about the possibility of synthetic judgments a priori from a metaphysical one into a practical one.*

*In this reinterpretation the Kantian “a priori” is indirectly connected with experience in so far as it has been formed through the development of the human mind in a very distant past.*

por outro, a interpretação dos experimentos depende desses conceitos (1928 [1927], p. 580; HEISENBERG, 2016 [1969], p. 154). Essa limitação é considerada por Heisenberg como fruto do próprio processo de formação da linguagem. Conforme pontuado acima, o *a priori* da linguagem clássica é, na verdade, formado ao longo do desenvolvimento da linguagem. O argumento de Heisenberg para essa limitação é relativamente simples. Os conceitos clássicos foram desenvolvidos a partir da nossa interação com a “natureza clássica”, na escala macro da física clássica, de maneira que eles são adequados para descrevê-la. Eles não foram desenvolvidos para descrever os objetos quânticos, pois estão fora da escala na nossa percepção (SILVA, 2011, p. 113). Nas palavras de Heisenberg, “Essa linguagem [clássica] foi criada para que na vida cotidiana possamos nos relacionar com o mundo; não pode ser caso que, em situações extremas como a física atômica, ou estrelas distantes, ela seja igualmente adequada. Isso seria pedir demais” (1979<sup>148</sup>, p. 9, tradução nossa)<sup>149</sup>. Por conseguinte, devido ao próprio processo de desenvolvimento dos conceitos clássicos, eles são completamente adequados apenas para descrever os objetos “clássicos” ou “macros”, sendo limitados, ou seja, possuindo uma gama de aplicação restrita para descrever os novos fenômenos quânticos.

A melhor exemplificação dessa limitação são as relações de incerteza. Empregamos os conceitos clássicos, como posição e *momentum*, na mecânica quântica sempre considerando a limitação fornecida pelas relações (HEISENBERG, 1977 [1975], p. 6). Nesse contexto, é possível afirmar que as relações de incerteza ganham um novo propósito na terceira fase indicada por Camilleri: ao invés de ressignificar os conceitos de posição e velocidade, elas limitam os conceitos clássicos já existentes. Heisenberg reconhece essa mudança nas *Chicago Lectures*: “Essas relações de incerteza nos fornecem a medida de liberdade das limitações dos conceitos clássicos que é necessária para uma descrição consistente dos processos atômicos”

---

<sup>148</sup> Não foi possível encontrar a data original dessa entrevista concebida a David Peat e Paul Buckley. Segundo o site pessoal de Peat, a entrevista conduzida com Heisenberg ocorreu “no início da década de 70 como parte de uma série de documentários de rádio da rede CBC intitulada *Physics and Beyond*” (PEAT, S.I.). Após uma breve investigação acerca da série, concluiu-se apenas que ela faz parte de um programa da rádio CBC chamado *Ideas*, que começou em 1965 e existe até os dias atuais. Voltando os olhos para a segunda edição do livro no qual as entrevistas foram publicadas, intitulado *Glimpsing Reality: Ideas in Physics and the Link to Biology*, de 1996, é possível argumentar que a entrevista teria ocorrido em algum período entre 1975 a 1976 — ano em que Heisenberg veio a falecer. Essa informação é duvidosa, por esse motivo não a enfatizamos como concreta, mas no começo do livro os editores afirmam que “as entrevistas conduzidas por Buckley e Peat ocorreram vinte anos atrás” (1996, X), posição reforçada pela adição do capítulo *Reflection after Twenty Years* (1996, p. 151-158). Se essa diferença de 20 anos for precisa, a entrevista com Heisenberg teria ocorrido entre 1975 e 1976. Como não é possível alcançar a certeza desejada para essa afirmação, mantemos que ela ocorreu “no início da década de 70”.

<sup>149</sup> *This language is made so that in daily life we get along with the world; it cannot be made so that, in such extreme situations as atomic physics, or distant stars, it is equally suited. This would be asking too much.*

(1949 [1930], p. 4, tradução nossa)<sup>150</sup>. Sendo assim, na terceira fase, o papel das relações de incerteza é fornecer a “medida de liberdade” da limitação dos conceitos clássicos, isto é, elas indicam quantitativamente “até que ponto” é possível empregar os conceitos clássicos.

Explicitada a característica fundante da terceira fase — a doutrina da indispensabilidade dos conceitos clássicos de Bohr —, é importante se atentar para sua cronologia. Conforme Heisenberg relembra em suas entrevistas com Kuhn, os conceitos clássicos são rejeitados no artigo de 1927 em prol de uma ressignificação. É apenas a partir das discussões com Bohr, após publicação do artigo, que o físico alemão começa a mudar de ideia (1963, IX). A tarefa de datar precisamente essa mudança é intrincada, mas Camilleri (2007b, p. 195) e Heelan (2016, p. 48) defendem que ela deve ter acontecido alguns meses após a publicação do artigo de 1927, situando-se, portanto, entre o final de 1927 e o começo de 1928.

Concordamos com a afirmação de Camilleri de que as *Chicago Lectures* fornecem a melhor evidência dessa mudança de posição. Logo na introdução da obra, Heisenberg rejeita o operacionalismo que anteriormente havia fundamentado sua pesquisa:

Os experimentos da física e seus resultados podem ser descritos na linguagem do dia a dia. [...]. Para evitar essas contradições [entre a teoria e os experimentos], parece necessário exigir que *nenhum conceito entre em uma teoria que não tenha sido verificado experimentalmente* pelo menos com o mesmo grau de precisão que os experimentos a serem explicados pela teoria. *Infelizmente, é totalmente impossível cumprir esse requisito*, pois as ideias e palavras mais comuns seriam frequentemente excluídas (1949 [1930], p. 1, tradução nossa, grifo nosso)<sup>151</sup>.

Além dessa citação, Camilleri destaca outra característica nas *Chicago Lectures* que demonstra essa mudança de posição: a ausência de analogia entre a mecânica quântica e a teoria da relatividade (CAMILLERI, 2007b, p. 196). No artigo de 1927, Heisenberg argumenta que a redefinição conceitual da mecânica quântica é análoga à realizada por Einstein na relatividade (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 68). Essa analogia é fundamentada na ideia de que a filosofia operacionalista é empregada em ambos os casos, mas desaparece nas *Chicago Lectures*. A dissolução dessa analogia ainda pode ser identificada em três instâncias diferentes: no artigo “*The Notion of a ‘Closed Theory’ in Modern Science*”, na entrevista dada a Kuhn, e

---

<sup>150</sup> *These uncertainty relations give us that measure of freedom from the limitations of classical concepts which is necessary for a consistent description of atomic processes.*

<sup>151</sup> *The experiments of physics and their results can be described in the language of daily life. [...]. In order to avoid these contradictions, it seems necessary to demand that no concept enter a theory which has no been experimentally verified at least to the same degree of accuracy as the experiments to be explained by the theory. Unfortunately it is quite impossible to fulfil this requirement, since the commonest ideas and words would often be excluded.*

na entrevista dada a Paul Buckley e David Peat da década de 70. Em todas essas ocasiões, o físico afirma que na teoria da relatividade houve, de fato, uma modificação da linguagem clássica, que foi adaptada ao esquema matemático. Na mecânica quântica, por sua vez, a linguagem permaneceu a mesma, sem se adaptar ao esquema matemático (1963, IX; 1979, p. 8). Dessa forma, fica evidente que a analogia defendida inicialmente é rejeitada: enquanto a teoria da relatividade ressignifica os conceitos clássicos, a mecânica quântica se adequa a eles.

Assim, é possível concluir que, na época que as aulas foram lecionadas, em 1929, Heisenberg já havia abandonado o operacionalismo de suas duas primeiras fases. Embora o operacionalismo fosse desejável na ciência, ele se revelou impraticável. O físico alemão passa a adotar a doutrina bohriana, admitindo que os resultados da mecânica quântica devem ser descritos na linguagem cotidiana<sup>152</sup> ou na linguagem clássica.

Embora determinar o início da terceira fase seja uma tarefa complexa, ficando incerto o período exato entre 1927 e 1928 em que Heisenberg adota a doutrina da indispensabilidade dos conceitos clássicos, a datação do final é mais clara. Camilleri afirma, muito devido ao seu recorte histórico de 1925 a 1928, que essa é a fase que Heisenberg se mantém nos anos subsequentes (2007b, p. 198), estendendo-se até o final dos seus escritos. Observamos isso pela presença da doutrina da indispensabilidade dos conceitos clássicos na década de 30, em passagens de “*Questions of Principle in Modern Physics*”, presente em *Philosophic Problems of Nuclear Science* (1966 [1936], p. 50); na década de 40, em passagens de “*The Notion of a Closed Theory*” in *Modern Science*”, presente em *Across the Frontiers* (1974 [1948], p. 42-43); na década de 50, em passagens de *Physics and Philosophy* (1958a, p. 44); na década de 60, nas entrevistas dadas a Kuhn (1963, IX); e, na década de 70, com passagens de “*Scientific and Religious Truth*”, presente em *Across the Frontiers* (1974 [1973], p. 226), e na entrevista dada a Paul Buckley e David Peat (1979, p. 6-8).

Na entrevista concedida no início da década de 70<sup>153</sup>, Heisenberg retoma a condição paradoxal da linguagem na mecânica quântica:

O ponto é que estamos vinculados à linguagem, estamos pendurados na linguagem. Se quisermos fazer física, devemos descrever nossos experimentos e os resultados para outros físicos, para que possam ser verificados ou checados por outros. Ao mesmo tempo, sabemos que as

---

<sup>152</sup> Heisenberg varia as palavras empregadas. Em algumas obras, ele comenta “conceitos clássicos”, enquanto em outras é empregado “conceitos do dia a dia” (*daily life*). Para o nosso propósito é possível igualar as terminologias, mas há uma diferença sutil. Em suma, os conceitos clássicos são apenas um refinamento dos conceitos do dia a dia, dos conceitos ordinários (HEISENBERG, 1958a, p. 144). Desta forma, é possível afirmar que eles são mais precisos e mais bem definidos do que os conceitos do dia a dia.

<sup>153</sup> Cf. nota 148.

palavras que usamos para descrever os experimentos têm apenas uma gama limitada de aplicabilidade. Esse é um paradoxo fundamental que temos que enfrentar. Não podemos evitá-lo; simplesmente temos que lidar com isso, descobrir qual é a melhor coisa que podemos fazer a respeito (1979, p. 7, tradução nossa)<sup>154</sup>.

Observa-se, portanto, que mesmo em seus textos mais tardios, Heisenberg defende a indispensabilidade dos conceitos clássicos. Na década de 70, apesar dos avanços da física de partículas na eletrodinâmica quântica e na física de altas energias, o físico alemão não abandonou seu pressuposto filosófico de que a linguagem clássica, mesmo limitada, é necessária para a descrição dos experimentos na física quântica. Desta maneira, defendemos que a terceira fase, marcada pela indispensabilidade dos conceitos clássicos, continuou até o final de sua vida<sup>155</sup>. Assim, a transição da segunda para a terceira fase é marcada pelo abandono explícito do operacionalismo que fundamentava a física do jovem Heisenberg, bem como pela renúncia à procura por novos conceitos em prol da adoção dos conceitos clássicos.

Antes de concluir a discussão dessa fase, chamamos a atenção, no entanto, para um possível mal-entendido. Heelan defende (2016, p. 48) que os conceitos clássicos na mecânica quântica são definidos operacionalmente. Se esse for o caso, a base conceitual dessa teoria se mantém operacionalista, mesmo sendo explicitamente negada, colocando aparentemente em cheque a transição de fases. Seguindo Heelan, argumentamos que o cerne da transição não é a adoção ou a renúncia do operacionalismo, mas sim a adesão aos conceitos clássicos como uma base linguística *a priori* para a mecânica quântica. A grande transição é que na terceira fase os conceitos clássicos, mesmo que definidos operacionalmente, devem ser adotados dogmaticamente como pré-condições para a mecânica quântica. Em contraste, na segunda fase ainda havia uma esperança de encontrar novos conceitos propriamente quânticos. Por conseguinte, embora a rejeição da filosofia operacionalista possa parecer duvidosa, a mudança na base linguística solidifica a divisão entre as duas fases.

---

<sup>154</sup> *The point is we are bound up with language, we are hanging in the language. If we want to do physics, we must describe our experiments and the results to other physicists, so that they can be verified or checked by others. At the same time, we know that the words we use to describe the experiments have only a limited range of applicability. That is a fundamental paradox which we have to confront. We cannot avoid it; we have simply to cope with it, to find what is the best thing we can do about it.*

<sup>155</sup> Uma breve ressalva pode ser feita sobre essa afirmação. De fato, Heisenberg não abandona os conceitos clássicos, entretanto, na década de 60 e 70 ele considera que novos conceitos seriam possíveis. Nas entrevistas dada a Kuhn, assim como na dada a Buckley e Peat, é possível observar a ideia de que a linguagem clássica pode se adaptar à mecânica quântica caso o princípio do terceiro excluído da lógica aristotélica seja abandonado (HEISENBERG, IX; 1979, p. 8). Em outras palavras, Heisenberg reconhece que se a lógica clássica for modificada é possível alcançar uma linguagem “quântica”, uma que engloba a nova teoria física. O problema é que abandonar a lógica clássica é um preço muito alto segundo Heisenberg, tão significativo que ninguém está disposto a pagá-lo. Desta forma, mesmo sendo logicamente possível, é preferível utilizar os conceitos clássicos e recuar à matemática quando necessário.

Fica, portanto, evidente a divisão das três fases do pensamento de Heisenberg elencadas por Camilleri. A primeira fase ocorre entre 1925 e 1927, antes da publicação do artigo de 1927, é marcada pelo reconhecimento de que os conceitos clássicos são limitados na mecânica quântica e pela busca por novos conceitos espaço-temporais. A segunda fase, situada aproximadamente entre 1927 e o começo de 1928, é marcada pela tentativa de ressignificar os conceitos de posição e *momentum*. A expressão mais proeminente dessa fase é o artigo de 1927, no qual Heisenberg adota o operacionalismo como fundamento e chega à formulação de suas relações de incerteza. Essas duas primeiras fases são explicitamente fundamentadas na filosofia operacionalista ou positivista, de forma que os conceitos só são significativos se for possível apontar um experimento capaz de medi-los.

A terceira fase quebra com essa procura de novos conceitos. Nela, Heisenberg adota a doutrina da indispensabilidade dos conceitos clássicos bohriana, aceitando que, mesmo limitados, os conceitos clássicos são a única forma de comunicar os experimentos da mecânica quântica. A metáfora atribuída a Bohr em *A Parte e o Todo* captura bem a situação: utilizar a linguagem clássica na mecânica quântica é como lavar a louça com água e panos sujos. Embora não seja o ideal, o uso desse expediente cumpre sua função (HEISENBERG, 2016 [1969], p. 162). Mesmo com uma lógica defasada e uma linguagem limitada e pouco clara, os conceitos clássicos são capazes de cumprir a sua função de comunicar experimentos. Heisenberg extrai dessa condição uma conclusão filosófica profunda: os conceitos clássicos são *a priori* e condições de possibilidade da mecânica quântica. Camilleri, devido ao seu recorte temporal restrito, apenas indica que o físico alemão adota essa fase em 1928 e se mantém nela nos anos subsequentes. Argumentamos, e as várias citações ao longo da obra de Heisenberg corroboram, que essa fase se estende até o final de sua vida.

#### 4.4. Esboço de uma outra divisão em fases do pensamento de Heisenberg

Com base nas discussões acima, propomos uma outra divisão do pensamento de Heisenberg em três fases, considerando suas inconstâncias de derivação, possíveis causas e interpretações das relações de incerteza. Argumentaremos que é possível identificar três períodos em que internamente suas ideias são praticamente constantes: o período de juventude no qual as relações de incerteza são postuladas sem muita precisão conceitual e com bastante variação sobre os fundamentos filosóficos; o segundo período baseado na noção de que a ciência lida apenas com a compreensão humana da natureza; e, por fim, o período de

“maturidade”, no qual a primazia da teoria e a noção de *potentia* como uma ontologia da mecânica quântica são central.

Antes de proceder ao detalhamento dessas fases é importante esclarecer o nosso recorte. Nas pouquíssimas tentativas de tratar o pensamento fragmentado de Heisenberg, tende-se a considerar seus fundamentos filosóficos como categorizador. Vide a tentativa de Cabral (2019, 27-28) em classificar Heisenberg como um positivista ou operacionalista na juventude, um antirrealista no período da Segunda Guerra Mundial e um platonista contemporâneo a partir da década de 50. A divisão que propomos leva em consideração essas posições filosóficas, porém, não como pontos de cisão entre uma fase e outra. A nossa análise foca principalmente nas posições do físico alemão acerca das relações de incerteza que, de maneira preponderante, refletem sua interpretação da mecânica quântica.

#### 4.4.1. Primeira fase: a inconstância na gênese das relações de incerteza

Consideramos que a primeira fase do pensamento de Heisenberg se inicia em 1927, com a publicação do artigo que postula as relações de incerteza, “*Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*”, e se estende até 1935, ano no qual o físico escreve o artigo não publicado que pretendia ser uma resposta ao EPR, “*Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich?*”. Esse período inclui ainda as duas conferências reunidas na coletânea *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*, publicada em 1935 (a oitava edição, publicada em 1949, reuniu já oito conferências e serviu de base para a tradução em inglês publicada inicialmente em 1952, sob o título *Philosophic Problems of Nuclear Science*), a conferência conjunta com Max Born, no congresso em Solvay de 1927 e publicada originalmente em francês no anais deste congresso, em 1928, sob o título, “*La mécanique des quanta*” e as *Chicago Lectures*, publicadas em 1930, sob o título *The Physical Principles of the Quantum Theory*.

As características fundantes desse período são a imprecisão conceitual — conforme discutido no capítulo três — e inconstância nas derivações, causas e interpretações sobre as relações de incerteza. Devido à originalidade e ao caráter revolucionário da sua ideia, o físico oscila demasiadamente em suas apresentações, explicações, demonstrações, enfim, na

conceituação<sup>156</sup> das relações de incerteza, gerando uma imensa dificuldade interpretativa de suas obras no período. Complementando os exemplos dessa imprecisão conceitual apresentados no capítulo três, citamos mais este trecho das *Chicago Lectures*: “As relações de indeterminação se referem ao grau de precisão de nosso conhecimento atual (simultâneo) das diferentes grandezas da teoria quântica” (1930, p. 15, tradução nossa)<sup>157</sup>. Baseando-se na distinção tecida por Jammer, nota-se, novamente, a presença de três possíveis caminhos interpretativos nessa citação. Em primeiro lugar, ao se referir às relações como relações de indeterminação (*Unbestimmtheitsrelationen*), Heisenberg parece adotar uma posição ontológica. Não obstante, as relações que deveriam ser ontológicas afirmam algo acerca do grau de precisão (*Genauigkeitsgrad*) — argumentado como uma interpretação neutra — do nosso conhecimento (*unserer Kenntnis*) simultâneo das variáveis conjugadas. Em outras palavras, aquilo que deveria ser consistente com o emprego da noção de *unbestimmt*, se desvirtua em possibilidades neutras e epistemológicas. Por conseguinte, considerando apenas o uso conceitual é possível identificar três vertentes distintas de interpretação das relações de incerteza no intervalo de duas linhas, endossando a imprecisão conceitual do físico alemão no período.

A segunda característica do período, a inconstância de seu pensamento, pode ser visualizada nas suas variações acerca das derivações e causas. No primeiro caso, o artigo de 1927 e as *Chicago Lectures* são, coincidentemente, as únicas obras nas quais as duas derivações das relações de incerteza figuram juntas. Conforme extensamente discutido, o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  é inicialmente apresentado no artigo de 1927 (1983 [1927], p. 64-65) com dois propósitos: definir as relações de incerteza e redefinir operacionalmente o conceito de posição do elétron (CAMILLE, 2007b, p. 187), conferindo-lhe significado. Após essa apresentação inicial, a única instância em que o microscópio de raios- $\gamma$  reaparece em detalhes é nas *Chicago Lectures*. Nela, Heisenberg incorpora a crítica de Bohr acerca do poder de resolução do aparato de medida, considerando a abertura angular ( $\epsilon$ ) e a lei da óptica que governa o poder de resolução do microscópio  $\Delta x = \frac{\lambda}{\text{sen}(\epsilon)}$  (HEISENBERG, 1949 [1930], p. 21). Após 1930, o microscópio somente será retomado na terceira fase com uma nova roupagem, no intuito de apenas “provar empiricamente” as relações de incerteza fundamentalmente matemáticas.

---

<sup>156</sup> O foco na noção de imprecisão conceitual deve imperar. Embora tenham havido modificações tanto na parte matemática, com a implementação da generalização apresentada por Kennard, quanto na parte física, vide a consideração do poder de resolução do aparato nas *Chicago Lectures*, o nosso recorte é conceitual.

<sup>157</sup> *Die Unbestimmtheitsrelationen beziehen sich auf den Genauigkeitsgrad unserer gegenwärtigen (gleichzeitigen) Kenntnis der verschiedenen quantentheoretischen Größen.*

Não contente em derivar as relações de incerteza por meio do microscópio de raios- $\gamma$  nessa primeira fase, Heisenberg apresenta nessas publicações, e na conferência de Solvay de 1927, uma derivação estritamente matemática. No artigo de 1927, o físico alemão afirma que a equação obtida por meio do experimento mental pode ser derivada do formalismo de Dirac-Jordan (1983 [1927], p. 69). A mesma situação pode ser observada nas *Chicago Lectures* em que ele declara que as relações de incerteza podem ser diretamente obtidas do esquema matemático da mecânica quântica (1949 [1930], p. 15). Dentre as demais obras que constituem esse período, apenas a conferência conjunta com Born, em Solvay, apresenta uma derivação das relações, a por meio do formalismo matemático (2009 [1927], p. 431-432).

Ora, considerando as implicações interpretativas de cada derivação, é, no mínimo, curioso notar ambas as derivações estarem presentes nas duas obras mais importantes do físico acerca das relações de incerteza. Nesse contexto, argumentamos que, longe de tentar encontrar uma interpretação unívoca para os escritos de juventude das relações de incerteza, Heisenberg admite duas derivações possíveis para suas novas relações, demonstrando a inconstância de suas ideias durante o período.

Análogo ao caso das múltiplas definições, observa-se que as duas causas estão presentes nessa primeira fase. Inicialmente no artigo de 1927, devido à própria derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$ , a causa adotada para as relações de incerteza é a tese da perturbação incontrolável. Segundo o físico, quando a posição do elétron é determinada seu *momentum* sofre uma perturbação descontínua e vice-versa (1983 [1927], p. 64). Não obstante, considerando o *postscript* do artigo, nota-se a inserção da segunda causa com Heisenberg concedendo que após a crítica de Bohr as relações não emergem apenas da descontinuidade, mas também é necessário considerar a dualidade onda-partícula (1983 [1927], p. 83) e, ultimamente, a complementaridade. Voltando-se para esse *postscript*:

Nesse contexto, Bohr chamou minha atenção para o fato de que eu negligenciei pontos essenciais no decorrer de várias discussões nesse artigo. Acima de tudo, a incerteza em nossa observação *não emerge exclusivamente* da ocorrência de descontinuidades, mas está diretamente conectada à exigência de que atribuamos igual validade aos experimentos bastante diferentes que aparecem, por um lado, na teoria corpuscular e, por outro, na teoria ondulatória (1983 [1927], p. 83, tradução nossa, grifo nosso)<sup>158</sup>.

---

<sup>158</sup> *In this connection Bohr has brought to my attention that I have overlooked essential points in the course of several discussions in this paper. Above all, the uncertainty in our observation does not arise exclusively from the occurrence of discontinuities, but is tied directly to the demand that we ascribe equal validity to the quite different experiments which show up in the corpuscular theory on one hand, and in the wave theory on the other hand.*

Heisenberg ainda não nomeia, mas podemos supor que ao falar da necessidade de considerar ambos experimentos corpusculares e ondulatórios, ele aceita a necessidade da complementaridade de Bohr. Cassidy argumenta que nos meses subsequentes da publicação do artigo de 1927, especialmente na conferência de Como de 1927, Heisenberg adota totalmente a complementaridade como causa possível para as relações de incerteza:

As relações de incerteza de Heisenberg tornaram-se, para Bohr, não apenas uma manifestação da descontinuidade, do formalismo matemático ou da intrusão dos instrumentos, mas uma *consequência direta* do “caráter geral da complementaridade da descrição” — *um produto da complementaridade*. Na versão publicada da discussão com a audiência após o artigo de Como de Bohr, Heisenberg, anteriormente tão confiante em sua própria derivação da incerteza, fez o primeiro de seus generosos reconhecimentos a Bohr por esclarecer as origens da incerteza e por reunir a interpretação de Copenhague do formalismo quântico: “A interpretação física da *relação de inexatidão*  $\Delta p \Delta q \approx h$  e sua relação com os pontos de vista gerais levantados por Bohr foram *inteiramente esclarecidas* pela primeira vez por meio das *pesquisas de Bohr*.” Em sua própria versão da história da mecânica quântica, publicada pouco mais de um ano depois, Heisenberg, ao sobrevoar a mecânica ondulatória, creditou exclusivamente a Bohr a prova “em cada detalhe” que, juntos, *complementaridade e incerteza resultam em uma interpretação completamente consistente do formalismo quântico* (CASSIDY, 1992b, p. 249, tradução nossa, grifo nosso).<sup>159</sup>

A chave para compreender a adoção simultânea da complementaridade e da tese da perturbação nesse período se encontra no próprio *postscript*. Heisenberg afirma que a incerteza não emerge “exclusivamente” da perturbação, é necessário considerá-la junto a complementaridade de Bohr. Assim, notamos após as discussões e críticas de Bohr, Heisenberg adota tanto a tese da perturbação incontrolável quanto a complementaridade como causas para as relações de incerteza na primeira fase.

Dito isso, voltamo-nos para os três textos mais tardios desse período: *Recent Changes in the Foundations of Exact Science* (1934), *Questions of Principle in Modern Physics* (1935), ambos presentes em *Philosophic Problems of Nuclear Science*, e o artigo “*Ist eine*

---

<sup>159</sup> *Heisenberg’s uncertainty relations became, for Bohr, not merely a manifestation of discontinuity, mathematical formalism, or the intrusion of instruments, but a direct consequence of “the general complementarity character of the description” — a product of complementarity. In the published version of the audience discussion following Bohr’s Como Paper, Heisenberg, previously so confident of his own derivation of uncertainty, made the first of his generous acknowledgements to Bohr for clarifying the origins of uncertainty and for assembling the Copenhagen interpretation of the quantum formalism: “The physical interpretation of the inexactness relation  $\Delta p \Delta q \approx h$  and its relationship with the general points of view raised by Bohr have been made entirely clear for the first time through Bohr’s researches.” In his own version of the history of quantum mechanics, published just over a year later, Heisenberg, while gliding over wave mechanics, gave Bohr sole credit for proving “in every detail” that together complementarity and uncertainty yield a fully consistent interpretation of the quantum formalism.*

*deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich*” (1935). Percebemos que neles, Heisenberg não faz menção a complementaridade como causa das relações de incerteza, mantendo apenas a tese da perturbação incontrolável. No artigo de 1934 lê-se:

O efeito dos meios de observação no corpo observado deve ser concebido como uma perturbação, parcialmente incontrolável, por assim dizer, na região da linha divisória. Essa parte da perturbação, em princípio incontrolável, assume importância de muitas maneiras diferentes. Para começar, é a razão para o aparecimento de leis estatísticas da natureza na mecânica quântica. Além disso, ela impõe um limite à aplicação dos conceitos clássicos, pois a precisão até a qual é útil empregar esses conceitos para descrever a natureza de forma inteligível é limitada pelas chamadas relações de incerteza (1966 [1934], p. 16, tradução nossa)<sup>160</sup>.

Em outras palavras, a tese da perturbação incontrolável apresenta-se como fundamento tanto para as leis estatísticas quanto para as relações de incerteza. Ideias semelhantes podem ser observadas no artigo de 1935. Nele, não há menção direta à causa das relações de incerteza, mas, a causa do caráter estatístico e probabilista, comumente colocada lado a lado da incerteza por Heisenberg, é a tese da perturbação incontrolável. O físico afirma que “as afirmações da mecânica quântica adquirem seu caráter estatístico somente porque, no local que separa o observador com seus aparelhos do sistema a ser observado, *uma perturbação fundamentalmente incontrolável do sistema pelos meios de observação* nos impede de seguir as conexões causais” (2011 [1935], p. 14, tradução nossa, grifo nosso)<sup>161</sup>.

A partir dessas obras é possível perceber que após o período inicial, no qual Heisenberg defende a importância de aceitar tanto a tese da perturbação incontrolável quanto a complementaridade como causas para as relações de incerteza, as menções a complementaridade como causa desaparecem da obra do físico alemão. Se ampliarmos o escopo para incluir as demais fases, esse desaparecimento é evidente. Tanto na segunda quanto na terceira fase a única causa considerada é a tese da perturbação incontrolável. Desta forma, embora Heisenberg aceite que a complementaridade é tão necessária quanto a perturbação na conferência de Como (CASSIDY, 1992b, p. 249), confirmando seu comentário do *postscript*,

---

<sup>160</sup> *The effect of the means of observation on the observed body has to be conceived as a disturbance, partly uncontrolled, in, so to speak, the region of the dividing line. This part of the disturbance, uncontrollable in principle, assumes importance in many different ways. To start with, it is the reason for the appearance of statistical laws of nature in quantum mechanics. Further it imposes a limit on the application of the classical concepts; for the accuracy up to which it is useful to employ these concepts to describe nature intelligibly is limited by the so-called uncertainty relations.*

<sup>161</sup> *the quantum mechanical statements acquire their statistical character only because at the location separating the observer with his devices from the system to be observed, a fundamentally uncontrollable disturbance of the system by the means of observation prevents us from following the causal connections.*

essa é uma posição passageira que não se reflete em suas demais obras. Após esse período, a complementaridade é excluída das discussões acerca da causa da incerteza, sendo a tese da perturbação incontrolável o único fundamento considerado.

Por fim, é necessário discutir as interpretações presentes na primeira fase. Considerando as conexões estabelecidas entre derivações, a tese da perturbação incontrolável e interpretações, nota-se uma grande confusão em relação a estas últimas. No caso do artigo de 1927 e das *Chicago Lectures*, como ambas apresentam as duas derivações — a do microscópio, que implica uma interpretação epistemológica, e a do formalismo, que implica uma interpretação ontológica —, conclui-se que ambas interpretações são possíveis nessas obras. Pelo viés das causas, tanto no artigo de 1927 quanto nas *Chicago Lectures* Heisenberg adota a tese da perturbação incontrolável que, como discutimos no capítulo três, devido ao seu carácter subjetivo de interação do observador com o objeto observado, implica em uma interpretação epistemológica das relações de incerteza.

No caso das demais obras dessa fase após 1930, como as derivações não são discutidas, tudo o que podemos analisar são as causas, que pintam um quadro muito claro. Conforme discutido acima, mesmo que Heisenberg considere a necessidade da complementaridade junto à tese da perturbação incontrolável no *postscript* do artigo de 1927, a única causa considerada nas obras da década de 30 é a perturbação incontrolável, implicando uma interpretação epistemológica.

Por conseguinte, análoga e como consequência da inconstância acerca das derivações e causas, evidencia-se a mesma oscilação de posições acerca das interpretações. Nas obras do período entre 1927 e 1930, as duas interpretações são plausíveis, com o físico variando entre elas sem muito critério (CHIBENI, 2005, p. 183; HILGEVOORD; UFFINK, 2016, p. 6) — e, possivelmente, até sem mesmo perceber. Já nas obras do período entre 1931 e 1935, devido a adoção da tese da perturbação incontrolável como única justificativa para as relações de incerteza, Heisenberg tem uma tendência maior à interpretação epistemológica.

Antes de concluir a discussão acerca da primeira fase, é importante retomar a mudança filosófica do operacionalismo para a indispensabilidade dos conceitos clássicos que ocorreu entre 1927 e 1930. Devido aos parâmetros elencados para essa divisão serem diferentes dos, por exemplo, tomados por Camilleri, o período operacionalista e a aceitação dos conceitos clássicos acabam ambos sendo englobados naquilo que denominamos de primeira fase. De todo modo, salientamos que especificamente no ano de 1927, abrangendo apenas o artigo de 1927 (1983 [1927], p. 64) e a conferência apresentada em Solvay com Born (2009 [1927], p. 429-430), Heisenberg adota o operacionalismo. No restante do período, conforme observado na

introdução das *Chicago Lectures* (1949 [1930], p. 1), o físico alemão desiste do operacionalismo em prol da indispensabilidade dos conceitos clássicos argumentada por Bohr. Esse pano de fundo filosófico que transpassa a primeira fase como um todo não é crucial nesta dissertação, devido ao recorte escolhido, no entanto, vale a menção.

Em suma, portanto, elencamos três características nucleares que caracterizam a primeira fase que dura de 1927 a 1930. A primeira é a imprecisão conceitual. A segunda característica é a inconstância das derivações, causas e, conseqüentemente, interpretações das relações de incerteza. Especialmente nos primeiros anos dessa fase, nota-se que Heisenberg emprega as duas derivações, as duas causas, e, conseqüentemente, as duas interpretações possíveis das relações de incerteza. Realmente, após 1930, essa inconstância gradativamente converge em posições mais concretas, entretanto, seu pensamento do período como um todo oscila demasiadamente. Por fim, a terceira característica é a breve adoção da complementaridade como possível causa para as relações de incerteza. Observa-se que após a crítica de Bohr ao artigo de 1927, Heisenberg considera que as incertezas não emergem exclusivamente da perturbação, mas que a consideração da complementaridade seria necessária. De todo modo, essa posição é brevíssima, sendo abandonada ainda mesmo na primeira fase.

Por conseguinte, o conceito que define a primeira fase do pensamento de Heisenberg é inconstância. Conforme salientado, essa inconstância gradativamente converge no final do período, com uma certa estabilidade sendo alcançada acerca da causa e interpretação das relações de incerteza. Conforme veremos na segunda fase, essa constância na ideia da perturbação e da interpretação epistemológica é mantida, com Heisenberg sendo explícito em sua defesa de que a mecânica quântica apenas funda afirmações sobre a relação humana com a natureza.

#### 4.4.2. Segunda fase: o antirrealismo

A segunda fase começa em 1935 e termina em 1955. O artigo “*The Teachings of Goethe and Newton on Colour in the Light of Modern Physics*” (1941), presente em *Philosophic Problems of Nuclear Science*, o “*The Idea of Nature in Contemporary Physics*” (1953), presente em *The Physicist’s Conception of Nature*, junto à obra publicada postumamente contendo textos inéditos dessa fase, *Reality and Its Order*, formam o núcleo de escritos do período. Os demais artigos que compõem a segunda fase são: “*On the Unity of the Scientific*

*Outlook on Nature*”; “*The Notion of a ‘Closed Theory’ in Modern Science*”; e “*Atomic Physics and Causal Law*”.

Seguindo as ideias adotadas no final da primeira fase, a segunda fase é caracterizada por postura fortemente epistemológica. Defendemos que o cerne desse período é a concepção de que a ciência e a matemática não lidam com a natureza em si, mas sim com a nossa compreensão da natureza, ou seja, com a interação entre ser humano e natureza. Essa concepção de ciência defendida por Heisenberg é essencialmente epistêmica, uma vez que a ciência diz respeito apenas ao conhecimento humano da natureza, e não mais a ela em si.

Essa posição epistêmica pode ser observada em várias obras da segunda fase. No artigo “*The Teachings of Goethe and Newton on Colour in the Light of Modern Physics*” é expresso que: “Pois, nossos experimentos *não são a natureza em si*, mas uma natureza *modificada e transformada* por nossa atividade no curso da pesquisa” (1966 [1941], p. 80, tradução nossa, grifo nosso)<sup>162</sup>. Em *Reality and Its Order* é argumentado que “a realidade da qual podemos falar nunca é a realidade ‘per se’, mas uma realidade percebida, uma que, em muitos casos, nós mesmos moldamos” (2019 [1942], p. 39, tradução nossa)<sup>163</sup>. Por fim, em “*The Idea of Nature in Contemporary Physics*”, essa posição é evidente com o físico afirmando que: “Assim, mesmo na ciência o objeto de pesquisa não é mais a natureza em si, mas a investigação do homem sobre a natureza” (1958b [1953], p. 24, tradução nossa)<sup>164</sup>. Em suma, nessa fase Heisenberg defende que a ciência trabalha com uma “natureza alterada pelo ser humano”, e não com a natureza pura, objetiva. Todos os “dados” que a ciência estuda, descreve e prevê são, na verdade, fenômenos, ou seja, são oriundos da interação, e conseqüente alteração, do sujeito com a natureza. Seu escopo não pode ser a natureza “per se” pois essa não é possível, não há como estudar a natureza sem fazer parte dela e alterá-la. Por conseguinte, a ciência deixa de explicar a “coisa-em-si”, as “partículas nelas mesmas”, e passa a explicar a relação do ser humano com a natureza, isto é, os fenômenos. Como Heisenberg aplica esse raciocínio para todas as leis da mecânica quântica (1958b [1953], p. 15), é seguro afirmar que as relações de incerteza também versam apenas sobre o conhecimento humano da natureza e não dela em si.

Estabelecido o cerne da segunda fase, é importante discutir as posições adotadas para as derivações, causas e interpretações das relações de incerteza no período. No que concerne à derivação, Heisenberg não as discute detidamente em nenhuma obra do período. Embora as

---

<sup>162</sup> *For our experiments are not nature itself, but a nature changed and transformed by our activity in the course of research.*

<sup>163</sup> *the reality which we can speak is never reality “per se” but a perceived reality even, in many cases, one we ourselves have shaped.*

<sup>164</sup> *Thus even in science the object of research is no longer nature itself, but man’s investigation of nature.*

relações de incerteza esteja constantemente presente nas obras, seja de forma direta ou indireta para discussões filosóficas, em nenhum momento o físico alemão as define propriamente, dando preferência a formulações gerais do tipo:

Foi descoberto que era impossível descrever simultaneamente tanto a posição quanto a velocidade de uma partícula atômica com qualquer grau de precisão prescrito. Podemos medir ou a posição com muita precisão — quando a ação do instrumento utilizado para a observação obscurece o nosso conhecimento da velocidade, ou podemos fazer medições precisas da velocidade e renunciar o conhecimento da posição (1958b [1952], p. 39-40, tradução nossa)<sup>165</sup>.

No âmbito das causas a discussão é mais explícita. Diferente da primeira fase, esse período é marcado pela prevalência da tese da perturbação incontrolável. Em nenhum momento da segunda fase Heisenberg considera a complementaridade como fundamento possível para as relações de incerteza. Desde as obras iniciais do período, como o artigo de 1941, observa-se o argumento de que “A natureza, assim, escapa à determinação precisa, em termos de nossas ideias do senso comum, por causa de uma *perturbação inevitável* que é parte de toda observação” (HEISENBERG, 1966 [1941], p. 82, tradução nossa, grifo nosso)<sup>166</sup>. No artigo de 1942 a mesma ideia é repetida: “essa exclusão [o conhecimento preciso simultâneo] emerge automaticamente por meio da *perturbação* que, de acordo com as leis naturais, é *inevitavelmente implicada em toda observação*” (HEISENBERG, 1966 [1942], p. 102, tradução nossa, grifo nosso)<sup>167</sup>. Até nas últimas obra do período, como o artigo de 1953, o físico sustenta a posição de que todo processo de observação produz uma grande perturbação no sistema observado (HEISENBERG, 1958b [1953], p. 15). Sendo assim, há uma constância em relação à causa no segundo período, com a tese da perturbação incontrolável sendo a única adotada.

Analisando a obra *Reality and Its Order* publicada postumamente, observa-se a mesma defesa da tese da perturbação incontrolável, ao ponto que Heisenberg afirma que ela é uma característica decisiva da teoria quântica:

---

<sup>165</sup> *It was discovered that it was impossible to describe simultaneously both the position and the velocity of an atomic particle with any prescribed degree of accuracy. We can either measure the position very accurately — when the action of the instrument used for the observation obscures our knowledge of the velocity, or we can make accurate measurements of the velocity and forego knowledge of the position.*

<sup>166</sup> *Nature thus escapes accurate determination, in terms of our commonsense ideas, by an unavoidable disturbance which is part of every observation.*

<sup>167</sup> *This exclusion arises automatically through the disturbance which, according to natural laws, is inevitably implied in every observation.*

Segue-se que esse ato de observação e a *intervenção necessária à observação* são uma *característica decisiva da teoria quântica* e de seu objeto de estudo. A observação geralmente altera o estado do sistema. Ela o faz, por um lado, por meio da própria intervenção que torna a observação possível. Além disso, na área que lida com as mudanças descontínuas das menores unidades da matéria, essa intervenção *não pode mais ser minimizada à vontade nem suas repercussões determinadas com precisão* (2019 [1942], p. 57, tradução nossa, grifo nosso)<sup>168</sup>.

Por fim, analisamos as interpretações da segunda fase. Inegavelmente esse é o período em que Heisenberg manifesta sua maior tendência epistemológica. O motivo para essa conclusão é a utilização da tese da perturbação incontrolável para justificar as relações de incerteza. A consequência dessa tese, muito explorada por Heisenberg nessa fase, é o argumento de que a ciência lida apenas com a relação do ser humano com a natureza. Conforme foi discutido, essa ideia engloba todas as leis da mecânica quântica, obrigando a conclusão de que as relações de incerteza não afirmam algo acerca da própria natureza, mas sim do conhecimento humano acerca dela.

Por conseguinte, a ideia de que a ciência trabalha apenas com o conhecimento humano da natureza define a segunda fase. Observamos que essa ideia é uma consequência da adoção da tese da perturbação incontrolável e implica, segundo Heisenberg, uma interpretação epistemológica para toda a mecânica quântica. Contrastando com as inconstâncias e imprecisão conceitual características da primeira fase, Heisenberg encontra uma constância na segunda fase adotando apenas noções epistêmicas para a mecânica quântica e, conseqüentemente, para as relações de incerteza.

#### 4.4.3. Terceira fase: a primazia da teoria e a ontologia da *potentia*

A terceira e última fase do pensamento de Heisenberg é a mais extensa, iniciando em 1955, com o artigo “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*”, e se estendendo até a morte do físico, em 1976. As principais obras do período incluem o artigo inicial de 1955, *Physics and Philosophy* (1955-56)<sup>169</sup>, as entrevistas com Thomas Kuhn (1962-

---

<sup>168</sup> *It follows that this act of observation and the intervention necessitated by observation are a decisive feature of quantum theory and its subject matter. Observation generally alters the state of the system. It does so, on the one hand, through the very intervention that makes the observation possible. In addition, in the area dealing with the discontinuous changes of the smallest units of matter, this intervention can no longer be minimized at will nor its repercussions accurately determined.*

<sup>169</sup> De acordo com Northrop (1958, p. 26), redator da introdução à *Physics and Philosophy*, e Cassidy (1984, p. 78), essa obra publicada em 1958 foi inicialmente lecionada num conjunto de aulas na Universidade de St. Andrews no semestre de inverno de 1955-1956. Por isso essa obra também é referida como *Gifford Lectures*. Ao

63), o artigo “*Quantum Theory and Its Interpretation*” (1964), *A parte e o Todo* (1969) e a conferência publicada com o título *Development of Concepts in the History of Quantum Mechanics* (1972).

A característica mais distinta dessa fase é a implementação explícita da tese da impregnação teórica da observação. Ao invés de demandar que todos os conceitos da teoria sejam mensuráveis para adquirirem significado, como no período operacionalista da primeira fase, ou defender que a ciência só é capaz de lidar com o conhecimento humano da natureza, como na segunda fase, no terceiro período Heisenberg coloca a teoria em primeiro lugar. Somente podemos dizer algo sobre o que acontece na natureza se isso estiver representado no formalismo matemático (HEISENBERG, 1955, p. 15), ou seja, a teoria é anterior à observação.

Considerando a centralidade dessa ideia na terceira fase, que a permeia do começo ao fim, não é coincidência que a obra que inicia o período seja a primeira na qual o físico explicitamente explica a tese da impregnação teórica da observação (HEISENBERG, 1955). Além disso, essa noção é sustentada até mesmo nas últimas obras do período. Observa-se que em *Remarks on the Origin of the Relations of Uncertainty*, no contexto de discutir o problema da trajetória, Heisenberg defende o seguinte:

No desespero sobre a futilidade de minhas tentativas, lembrei-me de uma discussão com Einstein e sua observação: ‘é a teoria que decide o que pode ser observado’. Portanto, tentei inverter a questão. Será que é verdade que somente ocorrem situações na natureza, ou nos experimentos, que podem ser representadas no esquema matemático da mecânica quântica? Isso significava que não havia uma trajetória real do elétron na câmara de nuvem. Havia uma sequência de gotículas d’água. Cada gotícula determinava imprecisamente a posição do elétron, e a velocidade poderia ser deduzida imprecisamente a partir da sequência de gotículas. Essa situação poderia de fato ser representada no esquema matemático; o cálculo forneceu um limite inferior para o produto das imprecisões da posição e *momentum* (1977 [1975], p. 5, tradução nossa)<sup>170</sup>.

---

longo da dissertação a citamos como sendo de 1958, entretanto, como a divisão em fases requer uma maior precisão cronológica, é importante salientar essa diferença entre o ano lecionado e o ano publicada. De todo modo, para fins de padronização, mantemos as citações de *Physics and Philosophy* como 1958a.

<sup>170</sup> *In the despair about the futility of my attempts I remembered a discussion with Einstein and his remark: “it is the theory which decides what can be observed”. Therefore I tried to turn around the question. Is it perhaps true that only such situations occur in nature or in the experiments which can be represented in the mathematical scheme of quantum mechanics? That meant: there was not a real path of the electron in the cloud chamber. There was a sequence of water droplets. Each droplet determined inaccurately the position of the electron, and the velocity could be deduced inaccurately from the sequence of droplets. Such a situation could actually be represented in the mathematical scheme; the calculation gave a lower limit for the product of the inaccuracies of position and momentum.*

A mesma ideia é defendida no artigo publicado postumamente “*The Beginnings of Quantum Mechanics in Göttingen*” (1989 [1975], p. 53), contido em *Encounters with Einstein*, explicitando que a ideia acompanhou o físico durante toda a terceira fase. Ainda na questão cronológica é curioso notar que das diversas obras que constituem esse período, com uma quantidade bibliográfica filosófica consideravelmente maior do que das duas primeiras fases, apenas duas não tratam da tese da impregnação teórica da observação: A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica (1958) e os artigos contidos em *Across the Frontiers* (1974).

É possível notar a importância que a tese da impregnação teórica da observação assume por meio da reinterpretação anacrônica que Heisenberg faz do desenvolvimento das relações de incerteza. Sobre esse tópico, três pontos merecem destaques. O primeiro é que, a partir de 1955, as relações de incerteza são definidas exclusivamente por meio do formalismo, sempre assumindo a tese da impregnação teórica da observação. O segundo ponto é a mudança na forma como o problema da trajetória foi resolvido. E, por fim, o terceiro é o papel secundário que o microscópio de raios- $\gamma$  assume após o reconhecimento da primazia da teoria matemática sobre a experimentação.

Antes de prosseguir, é importante recordar, conforme discutido no primeiro capítulo, que atribuir essa reinterpretação à primeira ou à segunda fase, ou seja, aos períodos anteriores a 1955 quando a tese da impregnação teórica da observação é propriamente introduzida, constitui um anacronismo — um erro ao qual, como argumentamos, Heisenberg recai. No entanto, considerá-la como a posição adotada após 1955, entendendo que o contexto das duas primeiras fases é outro, é possível e até mesmo consistente com a obra do físico alemão.

Feita essa ressalva, passamos ao primeiro ponto. Para isso, é útil analisar a reconstrução de como Heisenberg concebe o nascimento das relações de incerteza na terceira fase:

A solução final [para o problema da interpretação da mecânica quântica no período de 1926 a 1927] foi abordada de duas maneiras diferentes. A primeira foi uma inversão da pergunta. Em vez de perguntar ‘como se pode expressar uma dada situação experimental no esquema matemático conhecido’, outra questão foi colocada: será que *somente podem surgir* situações experimentais na natureza *que possam ser expressadas no formalismo matemático*? A suposição de que isso era realmente verdade levou a limitações no uso dos conceitos que tinham sido a base da física clássica desde Newton. É possível falar da posição e da velocidade de um elétron como na mecânica newtoniana, podendo ainda observar e medir essas quantidades. Entretanto, não é possível fixar ambas as quantidades simultaneamente com uma precisão arbitrariamente alta. De fato, o produto dessas duas imprecisões acabou não sendo menor que a constante de Planck dividida pela massa da partícula. Relações similares podem ser formuladas para outras situações experimentais.

Elas geralmente são chamadas de relações de incerteza ou princípio de indeterminação (1958a, p. 42-43, grifo nosso, tradução nossa)<sup>171</sup>.

A mesma ideia pode ser observada no artigo “*Quantum Theory and Its Interpretation*”, de 1964:

Ocorreu-me a ideia óbvia de que se deveria postular que a natureza *só permitia* a ocorrência de situações experimentais que *pudessem* ser descritas dentro do quadro do formalismo da mecânica quântica. Isso aparentemente implicaria, como se pode ver do formalismo matemático, que alguém não poderia conhecer simultaneamente a posição e velocidade de uma partícula (1967 [1964], p. 105, tradução nossa, grifo nosso)<sup>172</sup>.

Observa-se que em ambos os casos a tese da impregnação teórica da observação precede as relações de incerteza como um fundamento filosófico. Análogo ao operacionalismo que fundamenta a derivação por meio do microscópio de raios- $\gamma$ , na terceira fase, Heisenberg adota essa tese como fundamento para a derivação por meio do formalismo. A ideia do experimento do microscópio raios- $\gamma$ , assim como a da necessidade de definir os conceitos por meio da medida, que estão na gênese das relações de incerteza na primeira fase, são deixadas de lado a favor da tese da primazia do formalismo matemático. Nesse contexto, se o formalismo precede qualquer observação ou experimento, as relações de incerteza só podem ser conjecturadas diretamente dentro dele, marcando o predomínio da derivação por meio do formalismo na terceira fase.

O segundo ponto foi tratado extensivamente no final do primeiro capítulo, mas é importante retomá-lo como forma de demonstrar a centralidade da tese da impregnação teórica da observação na terceira fase. Heisenberg defende (1955, p. 15, 1967 [1964], p. 105, 1973a [1972], p. 269-270, 1977 [1975], p. 5, 1989 [1975], p. 53, 2016 [1969], p. 95-96) que o problema da trajetória, que dificultava o desenvolvimento da mecânica quântica nos anos de

---

<sup>171</sup> *The final solution was approached in two different ways. The one was a turning around of the question. Instead of asking: How can one in the known mathematical scheme express a given experimental situation? The other question was put: Is it true, perhaps, that only such experimental situations can arise in nature as can be expressed in mathematical formalism? The assumption that this was actually true led to limitations in the use of those concepts that had been the basis of classical physics since Newton. One could speak of the position and of the velocity of an electron as in Newtonian mechanics and one could observe and measure these quantities. But one could not fix both quantities simultaneously with an arbitrarily high accuracy. Actually the product of these two inaccuracies turned out to be not less than Planck's constant divided by the mass of the particle. Similar relations could be formulated for other experimental situations. They are usually called relations of uncertainty or principle of indeterminacy.*

<sup>172</sup> *the obvious idea occurred to me that one should postulate that nature allowed only experimental situations to occur which could be described within the framework of the formalism of quantum mechanics. This would apparently imply, as one could see from the mathematical formalism, that one could not simultaneously know the position and velocity of a particle.*

1926-27, foi dissolvido por meio dessa tese. O argumento é simples: se não existe um conceito para trajetória do elétron no formalismo da mecânica quântica, conclui-se que essa não existe na natureza. Aquilo que é observado numa câmara de nuvem, portanto, é apenas uma sequência discreta, descontínua, de gotículas d'água que representam, aproximadamente, as posições que o elétron tomou, de forma que a sua velocidade pode ser imprecisamente deduzida dessa sequência descontínua de posições. Ora, posições e velocidade imprecisas podem ser representadas no formalismo por meio das relações de incerteza (1977 [1975], p. 5). Assim, o problema da trajetória é dissolvido considerando que só pode ser observado aquilo contido no formalismo. Como a trajetória, no sentido clássico contínuo, não existe no formalismo da mecânica quântica, o que é observado na câmara de nuvem é outra coisa: apenas uma série de pontos descontínuos que são acomodados pelo formalismo quântico.

Por conseguinte, na terceira fase é possível traçar um outro caminho até as relações de incerteza diferente daquele que realmente ocorreu em 1927. Originalmente, observa-se que, diante da necessidade de redefinir os conceitos clássicos de posição e velocidade devido à relação de não comutação na mecânica de matrizes, Heisenberg adota o operacionalismo como teoria semântica para buscar novas definições. Com base nisso, ele propõe o experimento mental do microscópio de raios- $\gamma$  para redefinir o conceito de posição, chegando, por meio da análise desse experimento, nas relações de incerteza. A base filosófica dessa abordagem é partir do empírico ao teórico, daquilo que pode ou não ser mensurável até uma relação matemática. Por outro lado, com a adoção da tese da impregnação teórica da observação, Heisenberg inverte essa ordem. Embora o formalismo matemático quântico não dispusesse de um conceito contínuo de trajetória análogo ao clássico, ele permitia uma sequência de pontos descontínuos com posições e velocidades imprecisas. A questão, então, deixou de ser a busca de uma explicação para os pontos descontínuos observados na câmara de nuvem, para o reconhecimento que a teoria permitia aquele fenômeno, e que aquilo era a trajetória na mecânica quântica. Após essa inversão, restava apenas estabelecer relações a partir do formalismo que definisse a precisão máxima entre essas posições e velocidades descontínuas e imprecisas — as relações de incerteza. Heisenberg expressa esse argumento palavra por palavra:

Invertendo a questão, viu-se imediatamente que essa trajetória de um elétron em uma câmara de nuvem não era uma linha infinitamente fina com posições e velocidades bem definidas; na verdade, a trajetória na câmara de nuvem era uma sequência de pontos que não eram muito bem definidos pelas gotículas d'água, e as velocidades também não eram muito bem definidas. Portanto, eu simplesmente fiz a pergunta: 'Ora, se queremos saber tanto a velocidade quanto a posição de um pacote de ondas, qual é a melhor precisão que

podemos obter, partindo do princípio de que somente são encontradas na natureza situações que podem ser representadas no esquema matemático da mecânica quântica?’. Essa era uma tarefa matemática simples e o resultado foi o princípio de incerteza, que parecia ser compatível com a situação experimental (1973a [1972], p. 269-270, tradução nossa)<sup>173</sup>.

Desta forma, a explicação parte do teórico, do formalismo, para o empírico, com o primeiro determinando o que é possível no segundo. Por conseguinte, ao invés das relações de incerteza derivarem do empírico, do mensurável, elas são uma pura consequência do formalismo, reforçando tanto o caráter fundamental da tese da impregnação teórica da observação como princípio filosófico quanto a derivação pelo formalismo na terceira fase.

Por fim, o papel auxiliar que o microscópio de raios- $\gamma$  assume nessa fase demonstra a primazia da teoria matemática. Diferente da segunda fase, na qual as derivações estão ausentes, na terceira fase a derivação pelo formalismo reaparece por causa da adoção da tese da impregnação teórica da observação. O experimento do microscópio de raios- $\gamma$  é retomado, contudo, apenas tangencialmente. Embora em *Physics and Philosophy* (1958a, p. 47-48) Heisenberg retome seu experimento mental depois de anos ao discutir o processo de interpretação teórica de um experimento na mecânica quântica, o objetivo é apenas exemplificar o processo de medida de um elétron. A descrição do microscópio é bastante superficial, não fazendo menção nem ao seu poder de resolução nem ao efeito Compton.

Esse caráter auxiliar do microscópio na terceira fase é esclarecido pelos comentários nas obras da década de 60. Nelas, Heisenberg apresenta o microscópio de raios- $\gamma$  apenas como uma “prova empírica” da matemática da mecânica quântica. Na entrevista dada a Kuhn de 25 de fevereiro de 1963, após afirmar que obteve as relações de incerteza por meio da “inversão da pergunta”, o físico alemão sustenta:

Em seguida, tentei ver, ‘Bem, vamos assumir que só existe essa possibilidade de ter  $p.q > h/2\pi$ . Isso faz uma afirmação consistente? Posso então provar que meus experimentos nunca dão algo diferente?’. Lembrei-me, então, da minha antiga discussão com (Bockert) Drude, que chegou a um ponto essencial atualmente. Eu me lembrei, ‘Bem, sim, (Bockert) Drude me disse como eu poderia observar a órbita’. Então, logo vi, ‘Oh, não, agora posso salvá-la

---

<sup>173</sup> *Turning around the question, one saw at once that this path of an electron in a cloud chamber was not an infinitely thin line with well-defined positions and velocities; actually the path in the cloud chamber was a sequence of points which were not too well-defined by the water droplets, and the velocities were not too well-defined either. So I simply asked the question: “Well, if we want to know of a wave packet both its velocity and its position what is the best accuracy we can obtain, starting from the principle that only such situations are found in nature which can be represented in the mathematical scheme of quantum mechanics? That was a simple mathematical task and the result was the principle of uncertainty which seemed to be compatible with the experimental situation”.*

porque vejo que com o quantum de luz atingindo o elétron posso preservar a Incerteza aqui' (1963, VIII, tradução nossa)<sup>174</sup>.

De acordo com passagens da obra *A parte e o Todo* (2016 [1969], p. 96), sabemos que esse “como observar a órbita”, discutido entre Drude e Heisenberg, refere-se ao microscópio de raios- $\gamma$ . O curioso é que, na terceira fase, o microscópio é reduzido a um mero instrumento para provar empiricamente as relações de incerteza, que são derivadas do puro formalismo matemático. Perde-se, assim, o caráter definidor que o microscópio tinha na primeira fase. Ele se torna apenas um recurso para provar a consistência empírica das relações matemáticas, demonstrando que os valores limitados de “p” e “q”, derivados matematicamente, realmente não podem ser violados no mundo empírico.

Por conseguinte, duas conclusões importantes para a terceira fase podem ser destacadas. A primeira é a preponderância da derivação pelo formalismo no período. Como o formalismo matemático é anterior à observação, e como as relações de incerteza são oriundas desse formalismo sem a necessidade da última, conclui-se que a derivação preferida no período é por meio do formalismo. A segunda conclusão é a tese da impregnação teórica da observação como fundamento filosófico do período. Considerando a importância da explicação matemática que Heisenberg assimilou durante seus anos de estudante (1989 [1975], p. 38 e 53), a terceira fase marca o renascimento da primazia matemática em seu pensamento. Embora a matemática sempre tenha sido relevante para o físico, é apenas na terceira fase, com a adoção da tese da impregnação teórica da observação, que a ontologia passa a ser definida pelo formalismo, impactando profundamente a maneira como o físico concebe as relações de incerteza. Isso se evidencia no papel secundário que o microscópio de raios- $\gamma$ , antes central e definidor, assume: ao colocá-lo como uma demonstração *post factum* da derivação matemática, Heisenberg reafirma a primazia da matemática.

Para além da adoção da tese da impregnação teórica da observação, a noção da *potentia* marca a terceira fase. A *potentia* tem seu primeiro comentário explícito no artigo “*The Development of the Interpretation of Quantum Theory*” (1955). Nela, Heisenberg introduz a noção da *potentia* como uma nova realidade física objetiva, transformando a possibilidade de algo ser em uma realidade equivalente à própria existência. Em *Physics and Philosophy*, a

---

<sup>174</sup> Then I tried to see, “Well, let us assume there is only this possibility of having  $p.q > h/2\pi$ . Does this make a consistent statement? Can I then prove that my experiments never give anything different?” I remembered then my old discussion with (Bockert) Drude came in at an essential point now. I did remember, “Well, yes, (Bockert) Drude told me how I could observe the orbit.” Then I saw very soon, “Oh, no, now I can save it because I see that by the light quantum hitting the electron I can preserve the Uncertainty there.”

expressão mais contundente da *potentia* é feita, com o físico, novamente, alterando sua posição acerca da probabilidade na mecânica quântica. Diferente da probabilidade na termodinâmica, a *potentia* denota uma realidade probabilística que ainda não se concretizou em ato, ou seja, a probabilidade ganha realidade física. Ela assume um papel de fundamentação ontológica (1958a, p. 40-41). Não é o nosso conhecimento incompleto que gera uma probabilidade epistêmica, mas sim os próprios objetos quânticos que existem na realidade física objetiva como potência.

Embora não tão preponderantemente presente como a tese da impregnação teórica da observação, a noção de *potentia* permeia a terceira fase. Sem dúvidas a década de 50 foi o momento central da noção para Heisenberg, com todas as quatro obras empregando-a amplamente. Na década de 60, o conceito reaparece nas entrevistas com Kuhn e em *A parte e o Todo*. Comentários explícitos acerca da *potentia* somem nos anos finais da terceira fase, no entanto, algumas menções à potencialidade e ao caráter probabilístico ontológico da função de onda são feitas no artigo “*Development of Concepts in the History of Quantum Theory*” (1973a, [1972], p. 270) e na entrevista dada a Buckley e Peat (1979 [197?], p. 9-10).

Após o estabelecimento dos dois pilares da terceira fase, é interessante analisar as derivações, causas e interpretações do período. No que concerne às derivações, a discussão acerca da impregnação teórica da observação evidencia que a derivação adotada é a por meio do formalismo. Mesmo que o microscópio de raios- $\gamma$  seja mencionado, esses são ou apenas casos não rigorosos ou casos em que o experimento mental é subordinado à derivação pelo formalismo, deixando claro qual é a derivação preferida.

No quesito da causa, a situação é direta como na segunda fase: apenas a tese da perturbação incontrolável é possível. Embora o tópico das causas seja pouco abordado no período, é possível observar passagens do tipo: “Sabemos, a partir das relações de incerteza, que determinar uma posição requer uma intervenção cada vez mais acentuada na proporção da precisão da sua execução” (HEISENBERG, 1974 [1958], p. 19, tradução nossa)<sup>175</sup>. A ideia implícita é que toda determinação da posição intervém e perturba a medida de outra variável conjugada, de modo que a causa das incertezas é essa perturbação contida no ato de medida. No artigo “*The End of Physics?*”, de 1970, novamente a interação que gera uma perturbação é retomada, sendo elencada com o ponto de inflexão entre a física clássica e a mecânica quântica (1974 [1970], p. 187).

---

<sup>175</sup> *We know from the uncertainty relations that to determine a position requires an intervention of ever-increasing sharpness, the more accurately it is to be carried out.*

Por fim, a discussão interpretativa é complexa. Conforme estabelecemos no capítulo três, ao adotar a tese da impregnação teórica da observação, o passo metafísico de considerar que a ontologia é derivada da teoria, a derivação por meio do formalismo e a completude do formalismo, Heisenberg implicitamente adota uma interpretação ontológica para as relações de incerteza. Ao mesmo tempo, a introdução da noção de *potentia*, tornando a probabilidade uma realidade intermediária, indica uma interpretação ontológica. Como essas são posições adotadas amplamente por Heisenberg na terceira fase, argumentamos que a interpretação mais prevalente do período é a ontológica. É importante retomar os argumentos em detalhes para explicitar o argumento.

No primeiro caso, o argumento depende dos quatro pressupostos estabelecidos acima que são assumidos no período. Partindo da tese da impregnação teórica da observação, de que somente podemos dizer algo sobre o que acontece na natureza se isso estiver representado no formalismo matemático, Heisenberg dá um passo metafísico central para o argumento: somente pode ocorrer na natureza aquilo que está representado no formalismo matemático (1955, p. 15). Não é uma mera limitação da observação que sempre sucede a teoria, mas sim que a teoria delimita o que é possível ontologicamente, delimita a realidade. A dissolução do problema da trajetória que Heisenberg defende na terceira fase exemplifica muito bem essa ideia: como a teoria não permite uma trajetória contínua, a procura por ela é fútil, devemos adotar apenas o que é permitido pela teoria. Seguindo dessa afirmação metafísica e considerando que as relações de incerteza fazem parte do formalismo matemático da mecânica quântica, por causa da própria derivação pelo formalismo adotada, a impossibilidade de obter valores precisos simultâneos para variáveis conjugadas implica que tais valores não podem ocorrer na natureza. Em outras palavras, as “incertezas” se tornam “indeterminações”, a própria natureza, seguindo o formalismo matemático, não pode ser em si precisamente determinada. Ademais, ao admitir que o formalismo quântico está completo (HEISENBERG, 1963, VII), que não é possível a sua suplementação determinística, a indeterminação ontológica se consolida como definitiva.

No caso da *potentia*, a interpretação emerge do novo esquema ontológico provido pelo conceito. Ao considerar que as partículas existem numa realidade potencial na qual elas não possuem posição e *momentum* bem definidos, as relações de incerteza podem ser interpretadas como uma (des)determinação. Posição e *momentum* existem como possibilidades que podem vir-a-ser, sendo indeterminadas, ou melhor, (des)determinadas no sentido de que ainda não foram decididas. Como as relações afirmam algo acerca de uma realidade, mesmo que seja apenas potencial, elas são ontológicas. Em outras palavras, as “incertezas” das relações

denotam um estado de realidade potencial no qual as partículas podem assumir posição ou *momentum* bem definidos.

Por conseguinte, devido à aplicação ininterrupta dessas ideias na terceira fase, ao passo que em todas as obras do período pelo menos uma delas é empregada<sup>176</sup>, poder-se-ia conjecturar que a única interpretação do período deve ser a ontológica. Não obstante, evidencia-se uma situação que impossibilita essa conclusão categórica. Embora nosso argumento seja de que o ponto de inflexão da segunda para a terceira fase é a adoção da impregnação teórica da observação e da *potentia* em 1955, a noção de que a ciência lida com o conhecimento humano da natureza, característica da segunda fase, perdura nas três primeiras obras da terceira fase. No artigo “*The Development of the Interpretation of Quantum Theory*” que inicia a terceira fase, em *Physics and Philosophy* e *A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica* (2017 [1958], p. 19-20), a noção fundamental da segunda fase é mantida. Afirmações do tipo “Nesse ponto, percebemos o simples fato de que a ciência natural não é a Natureza em si, mas uma parte da relação entre Homem e Natureza, e, portanto, é dependente do Homem” (HEISENBERG, 1955, p. 28, tradução nossa)<sup>177</sup>, e “A ciência natural não simplesmente descreve e explica a natureza; ela faz parte da interação entre a natureza e nós mesmos; ela descreve a natureza tal como exposta aos nosso método de questionamento” (HEISENBERG, 1958a, p. 81, tradução nossa)<sup>178</sup>, não deixam dúvidas de que o pilar da segunda fase foi adotado nas obras de 1955 a 1958. Considerando que essa noção necessariamente implica uma interpretação epistemológica, afinal de contas, a ciência passa a versar sobre o conhecimento humano da natureza, o fato dela perdurar na terceira fase é um problema.

Analisando internamente as três obras, não há como fugir da conclusão de que nelas tanto uma posição ontológica quanto epistemológica são aceitas. Pela lente do período como um todo, sugerimos o artifício de que esses anos iniciais são um período de transição no pensamento de Heisenberg. Isso é possível, pois, após 1958, a interpretação peculiar do escopo da ciência desaparece completamente dos escritos do físico alemão, enquanto a tese da impregnação teórica da observação, a primazia da teoria e a *potentia* perduram em seu

---

<sup>176</sup> Essa é uma afirmação curiosa do nosso levantamento bibliográfico. De todas as obras que compõem a terceira fase, apenas três não discutem ou empregam a tese da impregnação teórica da observação: *Planck's Discovery and the Philosophical Problems of Atomic Theory* (1958), *Abstraction in Modern Science* (1960), ambas presentes em *Across the Frontiers*, e *Development of Concepts in the History of Quantum Theory* (1972). Coincidentemente, nas três obras a noção de *potentia* é citada direta ou indiretamente, na forma da função probabilística ou de uma “realidade potencial”.

<sup>177</sup> *At this point we realize the simple fact that natural science is not Nature itself but a part of the relation between Man and Nature, and therefore is dependent on Man.*

<sup>178</sup> *Natural science does not simply describe and explain nature; it is a part of the interplay between nature and ourselves; it describes nature as exposed to our method of questioning.*

pensamento até seus últimos escritos da década de 70. Por consequência, é possível argumentar que as obras iniciais da terceira fase são uma transição dos fundamentos essencialmente epistemológicos da segunda fase para os ontológicos da terceira. Em última instância, a inconstância inicial nesse período não é estranha ao pensamento de Heisenberg ao considerar que o físico constantemente oscila, mesmo que minimamente, suas ideias.

Sendo assim, é possível dividir dois polos interpretativos na terceira fase. No período transitório inicial de 1955 a 1958, ambas as interpretações são possíveis. O físico alemão ainda não havia consolidado a primazia da teoria matemática em suas ideias, variando entre uma ciência fenomênica e a nova ontologia formal-matemática. Após 1958, com o abandono dos fundamentos da segunda fase e confirmação da primazia da teoria matemática, a interpretação ontológica vindica seu posto de única interpretação possível.

Feito esse percurso, concluímos que a terceira fase reitera, de forma atenuada, a inconstância das ideias que marca a primeira fase. Nesse período, ela comparece na contraditória adoção simultânea da ciência fenomênica e interpretação metafísica da tese da impregnação teórica da observação nas obras iniciais entre 1955 a 1958. Argumentamos que esse é um curto período de transição da segunda à terceira fase. Por fim, os fundamentos que caracterizam a terceira fase como um todo, estando presentes desde o problemático começo até os últimos escritos, são a tese da impregnação teórica da observação e a *potentia*. Em sua maturidade, Heisenberg sustenta uma nova realidade potencial para a mecânica quântica, acompanhada de uma profunda afirmação metafísica que postula que a teoria precede a realidade, em contraposição à perspectiva positivista que caracterizou seu pensamento na juventude.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar a obra de Werner Heisenberg, torna-se evidente a presença de diversas inconstâncias em seu pensamento, especialmente no que tange às relações de incerteza. Conforme discutido ao longo desta dissertação, o físico apresenta diferentes derivações, causas e interpretações, por vezes contraditórias, para explicar suas relações. Um exemplo emblemático dessa inconstância é o caso das duas interpretações das relações de incerteza. Em determinados momentos, Heisenberg sustenta uma interpretação epistemológica para as relações de incerteza, argumentando que elas limitam apenas o conhecimento humano da natureza. No entanto, em outros momentos, ele defende uma interpretação ontológica para elas, argumentando que os próprios objetos quânticos são indeterminados. A contradição entre essas duas interpretações, por vezes sustentadas simultaneamente pelo físico, demonstra a dificuldade de compreender e conciliar o pensamento de Heisenberg.

A mesma inconstância pode ser observada nas posições filosóficas, explícitas ou implícitas, que Heisenberg adota. Na juventude, ele fundamenta sua pesquisa física na teoria semântica do significado do operacionalismo, segundo a qual os conceitos que fazem parte de uma teoria devem poder, por princípio, ser mensuráveis. Nesse sentido, Heisenberg adere à máxima operacionalista de que definibilidade é igual à mensurabilidade (JAMMER, 1966, p. 332). Por sua vez, na década seguinte, ele adota uma posição antirrealista, argumentando que a mecânica quântica trabalha com o conhecimento humano da natureza, e não com a natureza em si (HEISENBERG, 1958b [1953], p. 24). Por fim, na maturidade, Heisenberg interpreta metafisicamente a tese da impregnação teórica da observação, defendendo que a realidade é limitada pela teoria (1955, p. 15). Assim, constata-se que, ao longo de sua obra, o físico transita por três posições filosóficas conflitantes.

Na tentativa de organizar as ideias inconstantes de Heisenberg, a noção de “metaestável” que Shimony lança mão é interessante: “No entanto, a análise feita na primeira parte deste artigo mostrou que as *posições filosóficas* de Bohr e Heisenberg são, por assim dizer, ‘metaestáveis’, e o positivismo é um dos estados estáveis nos quais eles poderia se encaixar.” (1983, p. 217)<sup>179</sup>. Baseando-se nessa concepção, argumentamos que as diferentes posições filosóficas assumidas por Heisenberg — como o positivismo, antirrealismo e a interpretação metafísica da tese da

---

<sup>179</sup> *However, the analysis made in the first part of this paper showed that the philosophical positions of Bohr and Heisenberg are, so to speak, ‘metastable’ and positivism is one of the stable states into which they could fall.*

impregnação teórica da observação — podem ser compreendidas como estados metaestáveis, isto é, momentos de relativa estabilidade dentro do contexto geral de sua obra inconstante.

Nesse contexto, com o objetivo de mapear e conciliar as ideias contraditórias de Heisenberg, propusemos uma possível divisão do seu pensamento em três fases distintas. O fundamento dessa divisão foram as próprias inconstâncias do físico nas derivações, causas e interpretações das relações de incerteza. Ao longo da dissertação, observamos que elementos como a escolha entre a derivação pelo microscópio de raios- $\gamma$  ou pelo formalismo matemático, a defesa da tese da perturbação incontrolável ou da complementaridade como causa, e a adesão à interpretação epistemológica ou ontológica, podem atuar como demarcadores da transição entre uma fase e outra. Além disso, demonstrou-se necessário considerar as posições filosóficas adotadas por Heisenberg em cada fase, uma vez que elas influenciaram a forma como ele concebeu as relações de incerteza nos períodos.

A primeira fase que identificamos começa em 1927, com a publicação do artigo “*The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics*”, e se estende até 1935, terminando no artigo não publicado “*Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich?*”. Denominamos ela de “a inconstância na gênese das relações de incerteza”. Argumentamos que essa primeira fase é marcada por três características: a imprecisão conceitual, a inconstância acerca das derivações, causas e interpretações das relações de incerteza e, por fim, a adoção da complementaridade como possível causa.

Nos anos iniciais dessa primeira fase, entre o artigo de 1927 e as *Chicago Lectures* de 1930, Heisenberg utiliza indiscriminadamente os termos *Ungenauigkeit* (inexatidão ou imprecisão), *Unbestimmtheit* (indeterminação) e *Unsicherheit* (incerteza) para se referir às relações de incerteza. Isso denota, conforme discutido, um descuido conceitual do físico. Além disso, nesse período Heisenberg adota as duas derivações possíveis, a por meio do microscópio de raios- $\gamma$  e a pelo formalismo, assim como as duas causas, a tese da perturbação incontrolável e a complementaridade. Essa multiplicidade de derivações e causas refletem na possibilidade tanto da interpretação epistemológica quanto ontológica para as relações de incerteza. A terceira característica que destaca essa fase das demais é a presença da complementaridade como causa. Após críticas de Bohr, Heisenberg admite, no *postscript* do artigo de 1927, que a tese da perturbação incontrolável, por si só, não era suficiente para justificar as relações de incerteza, sendo necessário considerar a complementaridade. No entanto, a partir de 1930, Heisenberg abandona a complementaridade como causa, restringindo-a apenas a essa fase inicial.

O período final dessa fase, entre 1931 e 1935, é marcado por uma convergência à interpretação epistemológica, com a tese da perturbação incontrolável se tornando

predominante. Assim, argumentamos que a primeira fase do pensamento de Heisenberg é marcada pela inconstância, com frequentes oscilações conceituais ocorrendo.

A segunda fase “antirrealista” pode ser localizada entre 1935 e 1955. Dando continuidade à forte tendência epistemológica dos anos finais da primeira fase, argumentamos que essa fase é caracterizada pela defesa consistente da tese da perturbação incontrolável e pela adoção da noção epistêmica de que a ciência lida apenas com o conhecimento humano da natureza. Durante esse período, Heisenberg abandona a complementaridade como causa, concentrando-se na tese da perturbação incontrolável como única explicação para as relações de incerteza. Assim, conforme discutido, a interpretação das relações de incerteza é exclusivamente epistemológica nessa fase. Como consequência dessa impossibilidade de observar um sistema sem perturbá-lo, Heisenberg extrai a profunda implicação filosófica de que o objeto de pesquisa da mecânica quântica não é mais a natureza em si, mas sim a compreensão humana da natureza. Por conseguinte, diferente da primeira fase, marcada pela inconstância e oscilação conceitual, a segunda fase revela um pensamento significativamente mais coerente e consistente, fundamentado numa perspectiva epistêmica tanto para a mecânica quântica quanto para as relações de incerteza.

A terceira fase, denominada de “a primazia da teoria e a ontologia da *potentia*”, começa em 1955, com o artigo “*The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*”, e se estende até a morte de Heisenberg, em 1976. Argumentamos que essa fase é marcada pela interpretação metafísica da tese da impregnação teórica da observação e pela introdução do conceito de *potentia*, ambas as ideias introduzidas no primeiro artigo do período. Defendemos que Heisenberg vai além da afirmação de que a teoria precede a observação, dando um passo metafísico significativo ao defender que a teoria delimita a própria realidade. Além disso, Heisenberg introduz uma estrutura ontológica para o estado (des)determinado das partículas, o conceito de *potentia*. Ela descreve uma realidade intermediária entre o possível e o real, na qual as partículas existem como possibilidades. Assim, as posições e os momentos des(determinados) que as relações de incerteza representam existem como possibilidades que podem *vir-a-ser*.

Durante essa fase, a única derivação defendida por Heisenberg é a por meio do formalismo, relegando o microscópio raios- $\gamma$  ao papel de mera demonstração empírica das relações de incerteza, sem o caráter definidor que possuía na primeira fase. Seguindo a constância estabelecida na segunda fase, a única causa adotada continua sendo a perturbação incontrolável. Embora a interpretação suscitada pelo uso da tese da perturbação incontrolável seja a epistemológica, devido ao passo metafísico dado além da tese da impregnação teórica da

observação, a derivação por meio do formalismo e a completude do formalismo matemático, a interpretação nesse período tende a ser predominantemente ontológica. A adoção da *potentia* como uma realidade intermediária entre o possível e o real reforça essa tendência.

Por fim, é importante observar que nos anos iniciais da terceira fase, entre 1955 e 1958, Heisenberg mantém a concepção de ciência fenomênica característica da segunda fase e os comentários constantes acerca da tese da perturbação incontrolável. Argumentamos que esse período inicial da terceira fase é um período de transição entre as posições mais epistêmicas da segunda fase para as mais ontológicas da terceira fase. Após 1958, Heisenberg passa a defender com mais ênfase sua posição metafísica de que a teoria precede a realidade e a existência da realidade intermediária da *potentia*.

Por conseguinte, concluímos que, embora limitada, uma divisão do pensamento de Heisenberg é viável. Identificamos momentos em que as ideias do físico se agrupam, ora de maneira desordenada, como na primeira fase, ora de forma consistente e coerente, como na segunda fase. Assim, a divisão que propusemos fornece uma estrutura útil — análoga a um mapa — para o estudo detalhado da obra de Heisenberg, permitindo identificar e explorar suas diferentes posições acerca das relações de incerteza, os fundamentos filosóficos subjacentes e as possíveis rupturas em um pensamento que está longe de ser monolítico. Acreditamos que, em especial, a demarcação entre o período que Heisenberg adota enfaticamente uma ciência fenomênica e o período em que ele incorpora a interpretação metafísica da tese da impregnação teórica da observação, bem como o conceito de *potentia*, pode ser de grande valor para investigações futuras de sua obra.

## REFERÊNCIAS

### PRIMÁRIA

BOHR, Niels. **Atomic theory and the description of nature**. Great Britain: Cambridge University Press, 1961.

BOHR, Niels. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? **Physical Review**, v. 48, n. 8, p. 696–702, 1935.

BOHR, Niels. Causality and Complementarity. **Philosophy of Science**, v. 4, n. 3, p. 289–298, 1937.

BOHR, Niels. Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. *In*: **Atomic Physics and Human Knowledge**. New York: John Wiley & Sons, 1958, p. 32–66.

BOHR, Niels. **Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957**. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2017.

BOHR, Niels. On the notions of causality and complementarity. **Dialectica**, v. 2, n. 3/4, p. 312–319, 1948.

BOHR, Niels. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. **Nature**, v. 121, n. 3050, p. 580–590, 1928.

BORN, Max; HEISENBERG, Werner. Quantum Mechanics. *In*: BACCIAGALUPPI, Guido; VALENTINI, Antony (Orgs.). **Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference**. Trad. Guido Bacciagaluppi; Antony Valentini. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, p. 408–447. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/quant-ph/0609184v1>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

CASSIDY, David. **Werner Heisenberg: a Bibliography of his Writings**. Berkeley: University of California, 1984.

HEISENBERG, Werner. A descoberta de Planck e os problemas filosóficos da física atômica. *In*: **Problemas da física moderna**. Trad. Gita K. Guinsburg. 3. ed. São Paulo: Perspectiva, 2017, p. 9–27.

HEISENBERG, Werner. **A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política**. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2016.

HEISENBERG, Werner. [Entrevista concedida a] Paul Buckley; David Peat. **A Question of Physics: conversations in Physics and Biology**, Toronto, p. 3-16, 1979.

HEISENBERG, Werner. **Across the Frontiers**. Trad. Peter Heath. New York: Harper & Row Publishers, 1974.

HEISENBERG, Werner. Development of concepts in the history of quantum theory. *In*: MEHRA, Jagdish (Org.). **The physicist's conception of nature**. Dordrecht: Holland, 1973a, p. 264–275.

HEISENBERG, Werner. **Die Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie**. Leipzig: Verlag, 1930.

HEISENBERG, Werner. **Encounters with Einstein, and other essays on people, places, and particles**. New Jersey: Princeton University Press, 1989.

HEISENBERG, Werner. Oral History Interviews. [Entrevista concedida a] Thomas S. Kuhn; John Heilbron. **Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics (AIP)**, Maryland, seções I-XII, 1962-1963. Disponível em: <<https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-1>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

HEISENBERG, Werner. **Philosophic problems of nuclear science**. Trad. F. C. Hayes. New York: Fawcett Books, 1966.

HEISENBERG, Werner. **Physics and philosophy: the revolution in modern science**. New York: Harper & Brothers Publishers, 1958a.

HEISENBERG, Werner. Quantum Theory and Its Interpretations. *In*: ROZENTAL, S. (Org.). **Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues**. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1967, p. 94–108.

HEISENBERG, Werner. Quantum-Theoretical Reinterpretation of Kinematic and Mechanical Relations. *In*: VAN DER WAERDEN, Bartel (Org.). **Sources of Quantum Mechanics**. New York: Dover Publications, 1968, p. 261–276.

HEISENBERG, Werner. **Reality and Its Order**. Trad. M. B Rumscheidt, N. Lukens; I. Heisenberg. Cham: Springer International Publishing, 2019.

HEISENBERG, Werner. Remarks on the origin of the relations of uncertainty. *In*: PRICE, William; CHISSICK, Seymour (Orgs.). **The Uncertainty Principle and Foundations of Quantum Mechanics**. Great Britain: John Wiley & Sons, 1977, p. 3–6.

HEISENBERG, Werner. The development of the interpretation of the quantum theory. *In*: WOLFGANG, Pauli (Org.). **Niels Bohr and the development of physics: essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday**. London: Pergamon Press, 1955, p. 12–29.

HEISENBERG, Werner. The physical content of quantum kinematics and mechanics. *In*: WHEELER, John Archibald; ZUREK, Wojciech Hubert (Orgs.). **Quantum theory and measurement**. New Jersey: Princeton University Press, 1983b, p. 62–84.

HEISENBERG, Werner. **The physical principles of the quantum theory**. Trad. Carl Eckart; F.C. Hoyt. New York: Dover Publications, 1949.

HEISENBERG, Werner. **The physicist's conception of nature**. Trad. Arnold J. Pomerans. London: Hutchinson & Co., 1958b.

HEISENBERG, Werner. Tradition in Science. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 29, n. 10, p. 4–10, 1973b.

HEISENBERG, Werner. **Translation of: W. Heisenberg, “Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich?”** Trad. Guido Bacciagaluppi; Elise Crull. p. 1–19, 2011.

PAULI, Wolfgang; HEISENBERG, Werner. **Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. Band 1: 1919 - 1929**. New York: Springer-Verlag, 1979.

WHEELER, John Archibald; ZUREK, Wojciech Hubert (Orgs.). **Quantum theory and measurement**. New Jersey: Princeton University Press, 1983.

## SECUNDÁRIA

BACCIAGALUPPI, Guido; CRULL, Elise. Heisenberg (and Schrödinger, and Pauli) on hidden variables. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 40, n. 4, p. 374–382, 2009.

BACCIAGALUPPI, Guido; VALENTINI, Antony. **Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0609184>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

BATTIMELLI, Giovanni. Answer to Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? **American Journal of Physics**, v. 66, n. 4, p. 280, 1998.

BOYD, Nora; BOGEN, James. Theory and Observation in Science. In: ZALTA, Edward N. (Org.). **Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Winter 2021 Edition. [s.l:s.n], 2021. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/entries/science-theory-observation/>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

BUCKLEY, Paul; PEAT, David (Orgs.). **A Question of Physics: conversations in physics and biology**. Toronto: University of Toronto Press, 1979.

BUCKLEY, Paul; PEAT, David (Orgs.). **Glimpsing Reality: Ideas in Physics and the Link to Biology**. Toronto: University of Toronto Press, 1996.

CABRAL, João Edson Gonçalves. **Entre a matéria e a forma: o problema da objetividade dos fenômenos quânticos em Werner Heisenberg**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

CAMILLERI, Kristian. Bohr, Heisenberg and the divergent views of complementarity. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 38, n. 3, p. 514–528, 2007a.

CAMILLERI, Kristian. Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation. **Perspectives on Science**, v. 17, n. 1, p. 26–57, 2009.

CAMILLERI, Kristian. Heisenberg and the Transformation of Kantian Philosophy. **International Studies in the Philosophy of Science**, v. 19, n. 3, p. 271–287, 2005.

CAMILLERI, Kristian. Heisenberg and the wave–particle duality. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 37, n. 2, p. 298–315, 2006.

CAMILLERI, Kristian. Indeterminacy and the Limits of Classical Concepts: The Transformation of Heisenberg’s Thought. **Perspectives on Science**, v. 15, n. 2, p. 178–201, 2007b.

CASSIDY, David. Answer to Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? **American Journal of Physics**, v. 66, n. 4, p. 278–279, 1998.

CASSIDY, David. **Beyond Uncertainty: Heisenberg, Quantum Physics, and The Bomb**. New York: Bellevue Literary Press, 2009.

CASSIDY, David. Heisenberg, Uncertainty and the Quantum Revolution. **Scientific American**, v. 266, n. 5, p. 106–113, 1992a.

CASSIDY, David. **Uncertainty: the Life and Science of Werner Heisenberg**. New York: W. H. Freeman, 1992b.

CASSIDY, David; HOLTON, Gerald; RUTHERFORD, James. **Understanding physics**. New York: Springer, 2002.

CASSIRER, Ernst. **Determinism and Indeterminism in Modern Physics: Historical and Systematic Studies of the Problem of Causality**. Trad. Theodor Benfey. New Haven: Yale University Press, 1956.

CHIBENI, Silvio Seno. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 181–192, 2005.

HARRIS, William D. Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? **American Journal of Physics**, v. 65, n. 6, p. 461, 1997.

HEELAN, Patrick. **The observable: Heisenberg’s philosophy of quantum mechanics**. New York: Peter Lang Publishing, 2016.

HILGEVOORD, Jan; UFFINK, Jos. A New View on the Uncertainty Principle. In: MILLER, Arthur (Org.). **Sixty-Two Years of Uncertainty: historical, philosophical, and physical inquiries into the foundations of quantum mechanics**. New York: Plenum Press, 1990, p. 121–137.

HILGEVOORD, Jan; UFFINK, Jos. The Uncertainty Principle. In: ZALTA, Edward N. (Org.). **Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Winter 2016 Edition. [s.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

JAMMER, Max. Indeterminacy in physics. *In*: WEINER, Philip P. (Org.). **Dictionary of the history of ideas: studies of selected pivotal ideas**. New York: Charles Scribner's Sons, 1973, v. 2, p. 586–594.

JAMMER, Max. **The conceptual development of quantum mechanics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.

JAMMER, Max. **The philosophy of quantum mechanics: the interpretations of quantum mechanics in historical perspective**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

JIJNASU, Vasudeva. The uncertainty principle – A simplified review of the four versions. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 55, p. 62–71, 2016.

KAUARK-LEITE, Patrícia. Redefinindo a curvatura do arco: aspectos transcendentais da racionalidade quântica. **Analytica**, v. 17, n. 1, p. 59–78, 2013.

KAUARK-LEITE, Patrícia. Transcendental versus Quantitative Meanings of Bohr's Complementarity Principle. *In*: FAYE, Jan; FOLSE, Henry J. (Orgs.). **Niels Bohr and the Philosophy of Physics**. New York: Bloomsbury Academic, 2017, p. 67–90.

LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc; BALIBAR, Françoise. Answer to Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? **American Journal of Physics**, v. 66, n. 4, p. 279–280, 1998.

MEHRA, Jagdish. Niels Bohr's discussions with Albert Einstein, Werner Heisenberg, and Erwin Schrödinger: the origins of the principles of uncertainty and complementarity. **Foundations of Physics**, v. 17, n. 5, p. 461–506, 1987.

MEHRA, Jagdish. **The Solvay Conferences on Physics: aspects of the development of physics since 1911**. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 1975.

PEAT, David. **Werner Heisenberg 1901 - 1976**. Disponível em: <<https://fdavidpeat.com/interviews/heisenberg.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

PESSOA JR, Osvaldo. **Conceitos de física quântica, vol. 1**. 3. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006a.

PESSOA JR, Osvaldo. Introdução Histórica à Teoria Quântica, aos seus Problemas de Fundamento e às suas Interpretações. **Caderno de física da UEFS**, v. 04, n. 01–02, p. 89–114, 2006b.

PESSOA JR, Osvaldo. Kant Quântico. *In*: PIRES DA SILVA, J.C.S. (Org.). **Filosofia e Consciência Social**. Salvador: Quarteto, 2004, p. 309–323.

PESSOA JR, Osvaldo. Mapa das Interpretações da Teoria Quântica. *In*: MARTINS, Roberto A.; BOIDO, Guillermo; RODRIGUEZ, Victor (Orgs.). **Física: Estudos Filosóficos e Históricos**. Campinas: AFHIC-Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul, 2006c, p. 119–152.

PESSOA JR, Osvaldo. O Problema da Medição em Mecânica Quântica: Um Exame Atualizado. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 2, n. 2, p. 177–217, 1992.

PESSOA JR, Osvaldo. O Sujeito na Física Quântica. *In*: OLIVEIRA, Eduardo Chagas (Org.). **Epistemologia, Lógica e Filosofia da Linguagem - Ensaios de Filosofia Contemporânea**. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2001, p. 157–196.

SHIMONY, Abner. Reflections on the Philosophy of Bohr, Heisenberg, and Schrödinger. *In*: COHEN, R. S.; LAUDAN, L. (Orgs.). **Physics, Philosophy and Psychoanalysis**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1983, p. 209–221.

SILVA, Vinicius. A interpretação filosófica da mecânica quântica de Werner Heisenberg: ontologia matemática e crise nos fundamentos da lógica clássica. *In*: FREITAS, Fábio; GODOI, Felipe Daniel; SILVA, Francismary; *et al* (Orgs.). **Anais do III Encontro Nacional de Pós-Graduandos em História das ciências - ENAPEHC**. 1. ed. Mariana: UFOP/UFMG, 2014a, p. 624–635.

SILVA, Vinicius. **A interpretação filosófica da mecânica quântica de Werner Heisenberg: ontologia matemática e crise nos fundamentos da lógica clássica**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, Vinicius. Física e Filosofia no Pensamento de Werner Heisenberg. *In*: **Scientiarum Historia IX**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016, p. 161–169.

SILVA, Vinicius. O anti-realismo na filosofia da física de Werner Heisenberg: da potencia aristotélica ao formalismo puro. **Griot**, v. 3, n. 2, p. 109–120, 2011.

SILVA, Vinicius. O Princípio de Incerteza de Werner Heisenberg e suas interpretações ontológica, epistemológica tecnológica e estatística. *In*: **Scientiarum Historia VII**. Rio de Janeiro: UFRJ-HCTE, 2014b.

VAN DER WAERDEN, Bartel. **Sources of quantum mechanics**. New York: Dover Publications, 1968.