



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA - IH
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

OLAVO LEOPOLDINO DA SILVA FILHO

TESE DE DOUTORADO

**MÉTODO PARA ANÁLISE DE INTERPRETAÇÕES DE TEORIAS
FÍSICAS EM UM CONTEXTO DE SUBDETERMINAÇÃO FORMAL E
EXPERIMENTAL**

BRASÍLIA-DF

2024

S586m Silva Filho, Olavo Método para Análise de Interpretações de Teorias Físicas em um Contexto de Subdeterminação Formal e Experimental / Olavo Silva Filho; orientador Samuel Simon. -- Brasília, 2024. 182 p.

Tese(Doutorado em Filosofia) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. Subdeterminação de Interpretações de Teorias Físicas.
2. Mecânica Quântica. 3. Interpretações da Mecânica Quântica. I. Simon, Samuel, orient.
- II. Título.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA - IH
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

**MÉTODO PARA ANÁLISE DE INTERPRETAÇÕES DE TEORIAS
FÍSICAS EM UM CONTEXTO DE SUBDETERMINAÇÃO FORMAL E
EXPERIMENTAL**

OLAVO LEOPOLDINO DA SILVA FILHO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da
Universidade de Brasília, como requisito para a obtenção do título de Doutor em
Filosofia

APROVADA POR:

SAMUEL JOSÉ SIMON RODRIGUES, DR. (UnB) (ORIENTADOR)

OLIVAL FREIRE JR., DR. (UFBA) (EXAMINADOR EXTERNO)

OSVALDO FROTA PESSOA JR., DR. (USP) (EXAMINADOR EXTERNO)

AGNALDO CUOCO PORTUGAL, DR. (UnB) (EXAMINADOR INTERNO)

Brasília – DF, 20 de março de 2024

*Dedico este trabalho à minha
esposa Ana Bárbara e ao meu
filho Olavinho por me servirem de
constante apoio e inspiração.*

Agradecimentos

Este trabalho deveu-se a uma rede de apoio sem a qual sua consecução seria impossível. Em primeiro lugar, meus agradecimentos à minha família: minha esposa, Ana Bárbara da Silva Nascimento, pelos momentos de compreensão quanto às ausências e lacunas que um trabalho desse inflige ao seio familiar. Em segundo lugar, e pelas mesmas razões, agradeço a meu filho, Olavo Leopoldino da Silva Neto, fonte inesgotável de aprendizados, mormente aqueles relativos à sensibilidade.

Agradeço ao prof. Dr. Samuel Simon pela confiança e apoio intelectual ao longo de todos esses anos, bem como pelo companheirismo de profissionais que já atuam em áreas contíguas do conhecimento.

Finalmente, agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Filosofia pelo denodo em ministrar as disciplinas necessárias para a realização do curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Nos primórdios de seu desenvolvimento histórico, a Mecânica Quântica contou com a elaboração, em seu plano interpretativo, de três princípios fundadores: o princípio de dualidade, o princípio de indeterminação e o princípio de complementaridade, que formam a base epistemológica da Interpretação de Copenhagen, mas também estão no fundamento epistemológico de inúmeras outras interpretações da teoria. Desde a conferência Solvay, em 1927, inúmeras outras interpretações surgiram, assumindo alguns desses princípios e, eventualmente, incluindo outros. Todas essas interpretações se baseiam no mesmo *corpus* de resultados experimentais e, *grosso modo*, formalismo, mas divergem de modo muitas vezes espetacular na construção do “mundo quântico” que lhes subjaz. Trata-se de uma situação tipicamente reveladora da subdeterminação da interpretação de teorias (físicas) pelo aparato experimental e formal subjacente. Este trabalho visa abordar essa questão propondo uma metodologia de análise dessas interpretações no sentido de estabelecer uma base *semântica* de comparação entre elas, tornando possível uma hierarquização das mesmas segundo critérios claros e específicos. O trabalho visa teorias físicas subdeterminadas em geral, mas apresentaremos um estudo de caso especificamente voltado para a Mecânica Quântica, que representa, atualmente, o melhor exemplo de teoria subdeterminada quanto à interpretação. Subsidiariamente, esse trabalho pretende desvelar alguns dos elementos que permitiram à Mecânica Quântica, em particular, apresentar um número tão alto de interpretações rivais, e geralmente contraditórias, para um mesmo formalismo e um mesmo conjunto de resultados experimentais, indicando meios de se evitar, ao menos em parte, essa situação.

Palavras-chave: Subdeterminação de Interpretações de Teorias Físicas, Mecânica Quântica, Interpretações da Mecânica Quântica.

Abstract

In the beginning of its historical development, Quantum Mechanics relied on the elaboration, in its interpretative plan, of three founding principles: the principle of duality, the principle of indeterminacy and the principle of complementarity, which form the epistemological basis of the Copenhagen Interpretation, but also lie at the epistemological foundation of countless other interpretations of the theory. Since the Solvay conference in 1927, numerous other interpretations have emerged, taking on some of these principles and eventually including others. All these interpretations are based on the same corpus of experimental results and, roughly speaking, formalism, but they diverge in an often-spectacular way in the construction of the “quantum world” that underlies them. This is a typical situation revealing the underdetermination of the interpretation of (physical) theories by the underlying experimental and formal apparatus. This work aims to address this issue by proposing a methodology for analyzing these interpretations to establish a semantic basis for comparing them, making it possible to rank them according to clear and specific criteria. The work aims at underdetermined physical theories in general, but we will present a case study specifically focused on Quantum Mechanics, which currently represents the best example of underdetermined theory in terms of interpretation. In a subsidiary way, this work intends to unveil some of the elements that allowed Quantum Mechanics to present such a high number of rivals, and often contradictory, interpretations for the same formalism and the same set of experimental results, indicating ways to avoid, at least in part, this situation.

Keywords: Quantum Mechanics, Underdetermination of Interpretations of Physical Theories, Interpretations of Quantum Mechanics.

Lista de Quadros

Quadro 1-1 Percurso gerativo de sentido e seus níveis. Fonte: Elaborado pelo autor a partir das contribuições de Greimas e Courtés (2008, p. 235).	36
Quadro 5-1. Percurso gerador de sentido da Interpretação de Copenhagen.....	146
Quadro 6-1. Percurso gerador de sentido da Interpretação Estocástica.....	167

Lista de Figuras

Figura 1-1 - Trajetórias de uma partícula quântica ao passar por um anteparo com duas fendas, segundo a abordagem de Variáveis Escondidas de D. Bohm.	53
Figura 1-2 - Experimento de Millikan em uma visão esquemática e com o aparato experimental real.	60
Figura 4-1. Modelo mecânico de Maxwell para o campo eletromagnético. Fonte: Maxwell (1862).	107

SUMÁRIO

Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Quadros.....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Introdução	11
Capítulo 1. As teorias físicas como linguagem	27
1.1 A interpretação de teorias físicas como um texto	34
1.2 Perspectivas semióticas	35
1.3 A semântica da Física e a das línguas naturais	38
1.3.1 Exemplo 1: Mecânica Newtoniana	43
1.3.2 Exemplo 2: A Interpretação de Copenhagen.....	47
1.3.3 Exemplo 3: A Mecânica Quântica de Bohm	51
1.3.4 Exemplo 4: A Mecânica Quântica de Everett	56
1.4 O papel da empiria no processo de geração de sentido	58
1.5 Subdeterminação de interpretações.....	61
1.6 A busca pelas razões	63
Capítulo 2. Percurso histórico de um paradoxo	65
2.1 Antecedentes do século XIX:.....	65
2.2 Rumo ao século XIX.....	66
2.3 Ondas e a teoria eletromagnética.....	73
2.4 Matéria e atomismo no século XIX.....	76
2.4.1 O atomismo químico.....	77
2.4.2 O atomismo físico.....	80
2.5 A síntese como paradoxo.....	84

Capítulo 3.	O apego a paradoxos: Kierkegaard, Bohr e complementaridade ...	89
3.1	Kierkegaard e Bohr: uma relação?	90
3.2	Kierkegaard e sua paixão por paradoxos	95
3.3	Bohr e os paradoxos da mecânica quântica.....	98
3.3.1	A Complementaridade e a evitação do irracionalismo em Bohr ...	100
Capítulo 4.	O papel de modelos físicos na Mecânica Quântica	106
4.1	Modelos e a semântica de teorias físicas	106
4.2	Modelos em Física	113
4.3	A Interpretação de Copenhagen e Modelos Físicos.....	119
4.4	Modelos físicos e o nascimento da Mecânica Quântica	122
4.5	Complementaridade e interdição ontológica a modelos físicos	128
Capítulo 5.	Enquadramento da Interpretação de Copenhagen no esquema de Greimas e Courtés	135
Capítulo 6.	Construção da Interpretação Estocástica Estendida e seu enquadramento no esquema de Greimas e Courtés.....	148
6.1	Alguns argumentos de nível discursivo	154
6.1.1	O problema da dualidade	155
6.1.2	O “Paradoxo” do Gato de Schrödinger	157
6.1.3	Sobre partículas de spin semi-inteiro	158
6.1.4	O limite newtoniano	160
6.1.5	Estatística e contagem de níveis energéticos.....	161
6.1.6	Átomo de Bohr-Sommerfeld	162
6.2	Representação da Interpretação no quadro de geração de sentido	166
Conclusão		169
Referências		171

Introdução

De modo geral, e *grosso modo*, uma teoria física pode ser caracterizada como um cálculo interpretado (Cf. capítulo 1). Tal caracterização estabelece, portanto, que, a um formalismo matemático capaz de descrever, nas suas interrelações, comportamentos de entidades físicas do mundo natural, deve corresponder (ao menos) uma interpretação.

Tal interpretação pode ser *local* ou *global* (sistêmica). A interpretação local estabelece justamente os elementos referenciais que, em um contexto fenomênico mais restrito, coordenam a construção de arranjos experimentais específicos, capazes de explicitar os comportamentos de entidades físicas e suas relações¹, a fim de confirmar ou infirmar aquilo que a teoria física afirma proposicionalmente². Assim, é porque se é capaz de vincular um conjunto de símbolos físicos a certas entidades naturais (e estas ao comportamento de elementos de um arranjo experimental, como ponteiros de certos aparelhos de medida) que determinado esquema descritivo ou preditivo de uma teoria física pode ser conectado a um arranjo experimental e, assim, ser testado empiricamente. É por meio dessas relações que determinadas variáveis da estrutura formal subjacente à teoria física podem ser consideradas importantes ou irrelevantes para a testagem e, portanto, serem consideradas ou desconsideradas, respectivamente, no arranjo experimental³.

Entretanto, essas interpretações locais, por referirem-se a contextos mais restritos de testagem, não são suficientes para produzir uma interpretação global

¹ Como o visor de um aparelho de medida de distância, que apresenta um número que tem, como referente, a distância de um objeto relativamente a uma origem selecionada.

² Como, por exemplo, a proposição que afirma que corpos caem com a aceleração da gravidade.

³ O processo pelo qual tal arranjo experimental é “isolado” do mundo e, assim, manipulado em busca da descrição da correlação quantitativa entre as variáveis consideradas pertinentes.

ou sistêmica de uma teoria física, ainda que possam sugeri-la. Essa dimensão semântica sistêmica e mais ampla é propriamente o que caracteriza o conjunto total de um cálculo, agora interpretado, como uma verdadeira teoria física. Não se trata mais de termos um conjunto de ilhas de interpretação, não necessariamente conectadas⁴, mas justamente uma interpretação de todo o sistema formal que, nos casos localizados, é capaz de atribuir, aos elementos relevantes do fenômeno em questão, suas correlações naturais e as correlativas variáveis formais. A essa interpretação global ou sistêmica, podemos chamar de “Mundo especificado pela teoria física” ou, simplesmente, “Mundo” (ainda que sempre relativo ao contexto de aplicação dos elementos da teoria, p. ex. fenômenos eletromagnéticos para uma Teoria Eletromagnética). De modo geral, essa interpretação propõe *ipso facto* uma ontologia particular, ao especificar os elementos naturais pressupostos que constituem tal Mundo.

Essa, de fato, é uma característica geral do processo de maturação das teorias físicas. No caso da Mecânica Newtoniana, por exemplo, levou-se aproximadamente dois mil anos, contando-se de Aristóteles e sua Física e Cosmologia, até Newton, para que se desenvolvesse a construção de um cálculo e de sua interpretação, assim como de sua ontologia subjacente. Um exemplo de processo de construção dessa ontologia é a maturação, em parte paulatina, em parte errática, de uma noção de vazio, conexa com a noção de Universo infinito, como única capaz de receber aquele sistema formal e conceitual (KOYRÉ, 2006). As três leis de Newton fazem a sistematização global referida anteriormente (NEWTON, 1999), quando se acoplam a elas alguns desses elementos ontológicos, como a existência de um vazio (rigorosamente, um éter), mas no sentido de permitir uma teoria corpuscular de sabor atomista) e a constituição do mundo material como corpúsculos (e não um *continuum*⁵).

⁴ Adiante apresento exemplos históricos importantes conectados com a própria Mecânica Quântica.

⁵ Evidentemente, é possível estudar meios contínuos com a Mecânica Newtoniana, como Newton faz na seção V do Livro II dos *Principia* e como se faz na Teoria da Elasticidade e na Teoria dos Fluidos, campos particulares da Mecânica Newtoniana. Mas isso é feito considerando-se o

Com a Teoria Eletromagnética não foi diferente. A partir, principalmente, do início do Século XIX, diversos experimentos e conceitos (como experimentos de indução, realizados por Faraday, Oersted e outros, e a proposição do conceito de linhas de força, feita por Faraday) foram sendo realizados e forjados como determinação de contextos naturais particulares, até que, em 1873, James Clerk Maxwell propôs um conjunto de equações, chamadas equações de Maxwell, nomeadas em sua homenagem, capazes de incorporar todos os fenômenos conhecidos à época envolvendo cargas elétricas e correntes (estacionárias ou não), além daqueles relacionados à Óptica (Geométrica ou Física) de seu tempo. A ontologia que decorreu desse processo de maturação foi uma ontologia relacionada a campos elétricos e magnéticos que oscilam de forma transversal, sugerindo também a presença de um meio material (chamado éter), além de corpúsculos carregados com dois tipos opostos de carga elétrica⁶.

Neste ponto, não seria supérfluo compreender o que se entende, neste trabalho, como uma “interpretação física”, seja de teorias (sistêmica), seja de partes dessa teoria (local). Na Lógica, como se sabe, uma interpretação I é uma função que leva uma proposição p no conjunto de valores de verdade $\{V, F\}$, ou seja, $I: p \rightarrow \{V, F\}$. Na Física, entretanto, essa noção se torna muito mais

caráter macroscópico dessas teorias e a possibilidade de se trabalhar com pequenos (“macroscopicamente infinitesimais”) elementos de volume, que ainda comportam um conjunto suficientemente grande de partículas ou corpúsculos.

⁶ A Teoria da Relatividade, por sua vez, foge ao esquema apresentado por ser uma adequação de escopo *de teorias já existentes*. Verificou-se, à época, que as transformações de sistemas de coordenadas espaço-temporais que mantinham a Teoria Eletromagnética invariante (transformações de Lorenz) eram incompatíveis com aquelas que mantinham a Mecânica Newtoniana invariante (transformações de Galileu), mas a postulação de que a toda física (e não só a Mecânica) deve ser invariante por *uma única transformação* que realiza a mudança de sistemas inerciais exigia uma adequação, feita então na Mecânica Newtoniana, engendrando a Mecânica Relativística como subárea da Teoria Especial da Relatividade. De fato, a Teoria Especial da Relatividade decorre, formalmente, da suposição de que a velocidade da luz é constante em qualquer referencial inercial e, com isso, corrige a Mecânica Newtoniana no sentido de torná-la, agora, invariante pelas mesmas transformações espaço-temporais da Teoria Eletromagnética. A Teoria da Relatividade Geral, por sua vez, faz algo similar, grosso modo, com a Gravitação Newtoniana, através do princípio de equivalência. De certo modo, portanto, as Teorias da Relatividade (Especial e Geral) são correções de teorias já existentes, com seus campos conceituais já especificados (mas estendidos por elas – como, por exemplo, com os conceitos de massa inercial, curvatura espaço-temporal, dentre outros).

complexa. Uma interpretação física de uma *teoria física* \mathfrak{T}_T , grosso modo, é dada pelo estabelecimento (explícito ou não) de uma ontologia \mathcal{R} de fundo e um conjunto minimal (de preferência⁷) de leis e equações matemáticas \mathcal{E} para as quais os referentes dos elementos simbólicos já se encontram correlacionados com os elementos naturais, ou seja, referencialmente interpretados devido justamente à ontologia de fundo.

Alguns exemplos relacionados a interpretações de *teorias físicas*:

- na Mecânica Newtoniana temos uma ontologia *corpúscular* de fundo \mathcal{R}_N com a atribuição dos referentes de m (como massa destes corpúsculos ou de seu agrupamento), x (como a posição destes corpúsculos ou do centro de massa de seu agrupamento), v (como a velocidade destes corpúsculos, ou do centro de massa de seu agrupamento), a (como a aceleração destes corpúsculos, ou do seu centro de massa de seu agrupamento) e F (como a força que age entre esses corpúsculos ou entre seus agrupamentos) e as leis de Newton \mathcal{E}_N , com a equação de Newton (segunda lei) já estabelecida. Temos algo como $\mathfrak{T}_N < \mathcal{R}(m, x, v, a, F), \mathcal{E}_N >$. Essa interpretação permite, ao ser aplicada aos elementos específicos do lançamento oblíquo, por exemplo (que é uma especificação do campo teórico newtoniano feita *a partir de um modelo*), que se caracterize o fenômeno como *se referindo a* uma partícula (ou corpo) sendo lançado de certo ponto $\vec{P}_0 = (x_0, y_0)$, com velocidade \vec{v} , sofrendo a aceleração da gravidade $\vec{g} = (0, -g)$ (na vertical para baixo) de modo que, ao se aplicar a segunda lei de Newton a ele, conclui-se que a partícula irá realizar uma trajetória parabólica. Decorre dessa interpretação geral, por exemplo, a interpretação de conceitos como “equilíbrio”, “energia”, “trabalho” etc., como conceitos derivados.

⁷ No caso de teorias físicas axiomatizadas, são as equações fundamentais da teoria física, como as equações de Newton, na Mecânica Newtoniana, ou as equações de Einstein, na Relatividade Geral, ou a equação de Schrödinger, na Mecânica Quântica não relativista etc.

- Na Teoria Eletromagnética, temos uma ontologia de campos, que atribui ao símbolo E um campo elétrico e ao símbolo B um campo magnético, aos símbolos q e i , cargas e correntes elétricas, e uma ontologia corpuscular *subsidiária*⁸, que atribui os mesmos elementos da Física Newtoniana (estendida pela Teoria da Relatividade Especial) aos símbolos m , x , v , a . Ou seja, temos algo como (na versão integral das equações fundamentais) $\mathfrak{S}_E = \langle \mathcal{R}_E(E, B, q, i), \mathcal{E}_M \rangle$. Tais campos são *interpretados* como ondulatórios porque se pode *derivar* uma equação ondulatória para eles a partir de \mathcal{E}_M ⁹.

Por outro lado, quando se trata de interpretações de fenômenos específicos (de uma teoria física que pode já existir ou não), outros elementos devem comparecer no processo de interpretação, como uma ontologia particular, que é especificada no modelo escolhido para representar o fenômeno, e eventuais hipóteses físicas relacionadas a este modelo, além de equações \mathcal{E} (usualmente já existentes, relacionadas à ontologia de fundo), eventualmente modificadas pelas hipóteses físicas¹⁰; algo como $\mathfrak{S} \langle \mathcal{R}, \mathcal{M}, \mathcal{H}, \mathcal{E} \rangle$. Se a teoria existir, \mathcal{R} já está dado (como na caracterização que fizemos anteriormente do lançamento oblíquo *no contexto da Mecânica Newtoniana*), sendo necessário especificar \mathcal{M} e \mathcal{H} . Se a teoria ainda não existir (como ocorre nos momentos iniciais de sua criação), os elementos mobilizados para a interpretação do

⁸ No sentido de que o *objetivo* da Teoria Eletromagnética é o estabelecimento das configurações dos campos E e B , como dado nas equações de Maxwell, mas a partir dos elementos de carga e corrente, que se referem aos descritores que mencionei como subsidiários. Tais elementos de carga e corrente são considerados dados na Teoria Eletromagnética e deles se podem obter os campos. A análise do *comportamento* dos elementos de carga e corrente *na presença* dos campos é uma interseção entre a Teoria Eletromagnética e a Física Newtoniana (estendida pela Teoria da Relatividade Especial, devido às transformações de Lorentz), por meio da força de Lorentz. Pode-se mesmo afirmar que a Mecânica Newtoniana teve que ser reformada pela Teoria da Relatividade Especial exatamente pela conexão entre ambas as teorias com a mediação da força de Lorentz. A força de Lorentz *não* é parte dos axiomas da Teoria Eletromagnética. Em versões mais modernas da Teoria Eletromagnética, tais elementos subsidiários são, eles mesmos, características dos campos (suas singularidades).

⁹ Mais adiante, no Capítulo 1, especificaremos mais este ponto, qual seja, de como a interpretação global da teoria depende também das consequências da interpretação de fundo.

¹⁰ Sendo, de modo geral, o que *estende* o domínio das teorias nas quais tais equações são usadas sem tais hipóteses.

fenômeno específico serão (assim espera-se), na dialogia da construção da teoria, usados para construir sua ontologia geral. Tais elementos são: uma ontologia particular, relacionada a um modelo específico, e hipóteses que permitam a correta interpretação *do fenômeno sendo analisado*.

Assim, como um exemplo mais correlato ao tema deste trabalho, no primeiro processo de maturação da Mecânica Quântica, que transcorreu desde o ano de 1900 até o ano de 1927, encontramos diversas interpretações locais referidas a esquemas experimentais específicos. Podemos citar:

1. o problema da radiação de corpo negro (ontologia de campos eletromagnéticos internos ao corpo na interação com os átomos das paredes do corpo), que levou Max Planck a sugerir a consideração do campo eletromagnético como um conjunto de osciladores harmônicos (modelo) com energia quantizada (hipótese), de modo a evitar o problema da catástrofe do ultravioleta, ou seja, estendendo a teoria eletromagnética para campos com energia quantizada;
2. o efeito fotoelétrico, que levou Albert Einstein a propor a caracterização da radiação eletromagnética como constituída de corpúsculos (ontologia), a que denominou fótons, que transmitiam sua energia de forma quantizada (hipótese) através de choques (modelo), evitando, assim, o problema da transmissão de energia de modo contínuo, como previa a Teoria Eletromagnética clássica, ou seja, estendendo-a;
3. o efeito Compton, que usou a ideia de Einstein, relativa aos fótons (ontologia), para caracterizar o espalhamento destes por elétrons presos a átomos por meio de choques elásticos e da relação $p = h/\lambda$, em que h é uma constante (modelo), explicando o aparecimento de dois comprimentos de onda (ou momenta) no feixe espalhado;
4. a descrição de Niels Bohr do átomo de hidrogênio, voltada a obter as sequências espectrais de emissão deste átomo, em que se usou uma ontologia corpuscular, em um modelo de átomo de Rutherford, com a hipótese da quantização do momento angular;

5. a difração de raios X por um cristal, modelado de forma corpuscular através de planos cristalinos constituídos por átomos, mas com a hipótese da relação entre momentum e comprimento de onda para a radiação incidente na forma $p = h/\lambda$ (h uma constante), que facultou o uso do modelo ondulatório para a radiação incidente. Isso permitiu, através da noção de espaço recíproco, a explicação do aparecimento de uma figura de difração, característica de comportamentos ondulatórios;
6. a interferência produzida por feixes de entidades que eram consideradas, até então, partículas, mas que pareciam, agora, comportarem-se como ondas sob o mesmo experimento. A ontologia era ondulatória e o modelo era essencialmente aquele da interferência de ondas. A hipótese era a mesma daquela usada na difração de raios X por um cristal, descrita anteriormente para o feixe incidente.

Cada um desses experimentos, e tantos outros, sugeriam um conjunto de possibilidades ontológicas a serem coordenadas, ou sistematizadas, em uma teoria física. Entretanto, não eram ainda capazes de, isoladamente, estabelecerem essa sistematização, com a proposição de uma ontologia subjacente. De fato, não raro propunham ontologias que pareciam contradizer-se umas às outras¹¹, e que, ademais, pareciam se distanciar indelevelmente das ontologias até então conhecidas.

Tal sistematização apareceu, como se sabe, na Conferência Solvay, em 1927, com a proposição da primeira Interpretação de Copenhague para a Mecânica Quântica¹². Essa interpretação só foi possível porque, em 1925, Heisenberg propôs um esquema formal geral¹³, e, em 1925/6 Schrödinger

¹¹ Como apresentado, todos os experimentos citados são relacionados à espectroscopia, que faz interagir campos com (supostamente) corpúsculos. Mais adiante retorno ao tema para apresentar as razões históricas dessas (possivelmente aparentes) contradições.

¹² Há inúmeras “interpretações de Copenhague”, que variam em pontos específicos, mas que mantém um corpo relativamente grande de construtos comuns (FAYE, 2019).

¹³ O chamado cálculo matricial, desenvolvido por Heisenberg, Born e Jordan, no chamado “*drei manner arbeit*” (MEHRA, 1987).

introduziu a equação fundamental de seu formalismo, ambos capazes de abraçar todos os fenômenos particulares conhecidos até então, aos quais se podia, agora, sobrepor uma interpretação global (que, pelas razões apontadas anteriormente, deveria se apoiar em uma visão dualista onda-corpúsculo do ponto de vista ontológico).

Vale dizer que o aparecimento do formalismo de Schrödinger, aplicável aos mesmos fenômenos físicos tratados pelo formalismo de Heisenberg, teve grande importância histórica, uma vez que este novo cálculo sugeria construtos, ontologias e, de modo geral, interpretações distintas das que se originavam do cálculo matricial – questão que toca de perto o tema desse trabalho. De fato, o aparecimento de uma equação que apresentava o construto “função de onda” gerou intermináveis discussões entre os físicos da época (MEHRA, 1987) – justamente relacionada aos eventuais *referentes* dessa função.

Ocorre que, no caso particular da Mecânica Quântica, o processo de maturação em direção a uma interpretação global (sistêmica), como os que ocorreram para a Mecânica Newtoniana, para a Teoria Eletromagnética e para a Física Estatística Clássica, não ocorreu totalmente, ou ainda não se concluiu. De fato, no contexto desse campo do conhecimento, percebeu-se que, ao arcabouço formal subjacente e a seus resultados experimentais, poderia corresponder um conjunto bastante grande de interpretações possíveis. De fato, presentemente, encontramos uma miríade de interpretações da Mecânica Quântica como, por exemplo:

1. Copenhagen (há muitas que, entretanto, variam em alguns detalhes);
2. Informação Quântica;
3. Relacional;
4. Bayesiana;
5. Muitos Mundos;
6. Histórias Consistentes;

7. Ensemble;
8. De Broglie-Bohm;
9. Darwinismo Quântico;
10. Transacional;
11. Colapso Objetivo;
12. von Neumann-Wigner (consciência causa o colapso);
13. Lógica Quântica;
14. Modal;
15. Estocástica;
16. Estatística...

Para além das citadas anteriormente, há ainda muitas outras, visto que muitas dessas interpretações podem ser subdivididas em interpretações ligeiramente distintas entre si. O fato é que cada uma das interpretações apresentadas fornece uma ontologia diferente para a Mecânica Quântica.

Tal situação é, de fato, inédita na história da Física. Evidentemente, cada teoria física contou, em seus primórdios, com interpretações e/ou ontologias alternativas que competiam entre si. Um exemplo disso é a teoria alternativa ao Eletromagnetismo de Maxwell e à Mecânica Newtoniana chamada de Eletrodinâmica e Mecânica e Relacionais (Assis, 1995, 1998), derivadas da Eletrodinâmica de Weber, que, entretanto, ocupam hoje em dia posições marginais na academia. Igualmente importantes foram as teorias dos fluidos imponderáveis (e.g. calórico e flogístico¹⁴) que foram substituídas por teorias do calor baseadas na constituição corpuscular descrita na Teoria Cinética dos Gases. No caso específico da Mecânica Quântica, o número incrivelmente alto

¹⁴ Alguns filósofos da ciência defendem que as abordagens, relativas ao flogisto e ao calórico, não se tratavam de teorias, mas de hipóteses sob a definição do que constituiria o calor. Como especificado anteriormente, na presente abordagem, tais hipóteses (ontológicas) compõem a interpretação geral das teorias, aqui, em particular, da Termodinâmica.

de alternativas, entretanto, chama a atenção e clama por elucidação, mesmo que parcial. Tais alternativas interpretativas usam as mesmas equações (grosso modo), mas ontologias muito diversas, para explicar os mesmos fenômenos, cujo valor de verdade ou adequação na relação entre o aparato formal e os resultados experimentais não está em questão.

Uma *hipótese subsidiária* que perpassa esse trabalho, portanto, é que, com o surgimento da Mecânica Quântica, algum princípio ontológico/metafísico ou metodológico foi incorporado à maneira como os físicos procedem ao escrutínio e à eliminação de interpretações alternativas, tornando esse processo de seleção ou afunilamento inaplicável ou pouco eficiente. A *hipótese específica* é que esse elemento envolve as dimensões assinaladas, na medida que remonta a um afrouxamento das exigências de interrelação dos construtos ontológicos/metafísicos (dados no âmbito da interpretação), com aqueles formais, dados na estrutura formal subjacente e, ao envolver esse afrouxamento, mostra-se, pois, como elemento metodológico.

Poder-se-ia imaginar, talvez, que tal eliminação de interpretações alternativas poderia ser feita unicamente pela relação entre a referida interpretação e sua expressão nos eventos experimentais, de modo que a empiria sozinha seria capaz de selecionar uma (ou ao menos um número pequeno) de interpretações alternativas sobre uma mesma estrutura formal.

Ocorre que, na Física, sobejam exemplos em que a experimentação não apresenta tal capacidade, ou seja, em que a um mesmo corpo formal e às realizações experimentais que lhe subjazem, corresponde mais de uma interpretação, tratando-se, pois, de uma subdeterminação¹⁵ da interpretação pela dimensão experimental.

¹⁵ A questão da subdeterminação de teorias remonta à tese de Duhem-Quine que, em uma de suas especificações, afirma que, em ciência, é impossível testar experimentalmente uma hipótese científica isoladamente, uma vez que um teste empírico envolve suposições de fundo, chamadas suposições auxiliares. Neste trabalho, consideramos a questão da subdeterminação como um dado factual, ou seja, o fato de existirem inúmeras interpretações diferentes da Mecânica Quântica, por exemplo, para um mesmo conjunto de dados experimentais (e até um

Um exemplo histórico trivial é aquele que se estabeleceu em torno da Óptica Geométrica, interpretada por Newton (NEWTON, 1996) como relativa a uma ontologia corpuscular (para os “corpúsculos de luz”) e interpretada por Huygens como relativa a uma ontologia ondulatória. Os experimentos eram igualmente passíveis de interpretação, seja pela perspectiva ondulatória, seja pela perspectiva corpuscular¹⁶. O século XIX pareceu fazer a balança pender para uma interpretação ondulatória para a luz, no que se poderia dizer ser um processo de depuração. Entretanto, o princípio de dualidade onda-partícula parece ter dado ainda uma nova, e bem diversa, configuração ao problema dessa interpretação.

Assim, uma vez que a empiria, ao menos em certo momento histórico¹⁷, não fornece elementos para a seleção de determinada interpretação, pode ser relevante trazer em auxílio um ou mais princípios metodológicos capazes de eliminar possibilidades interpretativas, eventualmente reduzindo o seu conjunto a um número relativamente baixo.

Novamente, a História da Ciência pode nos servir de auxílio: sabemos que os cálculos de Copérnico para as órbitas celestes ainda se calcavam no uso de epiciclos (afinal, supunham tais órbitas como circulares). Entretanto, ao colocar

mesmo formalismo). Essa subdeterminação se refere, pois, a *interpretações* diversas, e não a testes singulares de hipóteses, ainda que possa ser referida a este contexto. Voltaremos a esse ponto no capítulo um, de modo a situar adequadamente o trabalho nesse contexto filosófico.

¹⁶ A disputa que se estabeleceu entre estas duas ontologias (neste caso, passíveis de serem caracterizadas como “modelos”) foi inadequadamente resolvida à época “empiricamente” pelo fenômeno da polarização da luz. Tal “resolução”, entretanto, foi inadequada, sabemos hoje em dia, porque não se cogitou à época uma propagação transversal para as ondas de luz, mas apenas longitudinal, que seriam incapazes de explicar o referido fenômeno. Entretanto, Newton “resolveu” o problema considerando que os corpúsculos de luz teriam uma estrutura anisotrópica, que facilitaria a propagação em determinada direção em comparação com outras (equivalente à noção de polarização). Entretanto, esse modelo de corpúsculo de luz era apenas um modelo de inteligibilidade, uma vez que permaneceu apenas na dimensão semântica, sem qualquer representação no cálculo subjacente (diremos, mais adiante, que é uma afirmação semântica do nível discursivo da teoria). É capaz de fornecer alento aos que se encontram ansiosos por uma possibilidade de explicação, uma vez que permite compreender o fenômeno, mas não cumpre função real no cálculo subjacente, não havendo para si referente formal e, portanto, qualquer referente experimental.

¹⁷ Evidentemente, não é possível afirmar-se isso relativamente à empiria, sem situar-se em um momento particular da história do campo científico em questão.

o Sol no centro de tais órbitas, tais cálculos usavam um número muito inferior de epiciclos. Este resultado, por si só, não seria minimamente capaz de alterar a perspectiva geocêntrica da época, como está expresso no prefácio de Andreas Osiander (LOPARIC, 2008) ao *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Copérnico (COPÉRNICO, 2014). Isso só foi possível com o advento de uma metafísica da Matemática, introduzida por Galileu, que sustentou um conteúdo de realidade do heliocentrismo baseado na noção metadiscursiva de simplicidade matemática, dentre outras, um princípio ontológico que interrelacionava o cálculo formal (a matemática) e a noção de verdade ou adequação¹⁸.

É plausível, reafirmamos, que algum princípio metafísico/metodológico muito geral e profundo, que atuava nas teorias físicas clássicas, tenha sido suprimido com o advento da Mecânica Quântica, possibilitando o surgimento de um número imenso de interpretações. Esta é, de fato, uma das hipóteses subsidiárias deste trabalho. Explicitar esse princípio e suas consequências epistemológicas é uma de suas tarefas marginais. Obter um critério semântico de hierarquização para as interpretações de teorias físicas é sua tarefa *precípua*. Tais tarefas não estão desvinculadas, entretanto. É no processo de constituição do critério semântico de hierarquização para as interpretações de teorias físicas que se poderá compreender o elemento supressor capaz de gerar uma miríade de interpretações para a Mecânica Quântica, como teoria física particular.

Uma pista de qual princípio metodológico pode ter sido suprimido pode ser obtida do próprio *conteúdo* de cada uma das interpretações existentes para a Mecânica Quântica. Vejamos dois exemplos de tais interpretações, sem, entretanto, entrar em seus detalhes:

- Interpretação de De Broglie-Bohm: defende a existência ontológica de partículas que, entretanto, são guiadas por uma função de onda (que é ontologicamente real). Tal função de onda funciona, pois, como um

¹⁸ Mais certas determinações empíricas, mesmo limitadas, como o fenômeno das marés, e algumas observações astronômicas, como as fases de Vênus e luas de Júpiter.

campo físico concreto, que faz a partícula se mover segundo o exigido pela Equação de Schrödinger. Nessa interpretação, não há a necessidade de se impor o colapso da função de onda. A abordagem é de *ensemble*, ou seja, o resultado preconizado pela função de onda é reconstruído pela análise de um ensemble de partículas com trajetórias bem definidas, a partir do estabelecimento das condições iniciais. A teoria é determinística, mas há a ação à distância (é, pois, não local). A determinação *experimental* simultânea da posição e do momentum das partículas obedece ao princípio de incerteza ou indeterminação, mas apenas no que concerne às condições iniciais, já que a abordagem preconiza a existência de trajetórias. Do fato de ser não local, decorre que não há como individualizar os fenômenos, que se encontram todos interligados, constituindo um Universo Indiviso (BOHM, 1993). A teoria faz menção a supostas “variáveis escondidas” (*hidden variables*) responsáveis pelo comportamento não clássico das partículas (BUB, 2022). Em particular, defende a existência (relativamente a tais variáveis) de um “potencial quântico” (*quantum potential*) cuja fonte depende, justamente, de tais variáveis;

- Interpretação de Muitos Mundos: defende a existência de uma função de onda universal que obedece a leis determinísticas e reversíveis a todo instante (uma vez que a equação de Schrödinger impõe tais características à dinâmica *da função de onda*). Assim, rejeita a ideia de colapso da função de onda (que implicaria em indeterminação e irreversibilidade). Disso decorre a necessidade de se lidar com o problema da superposição dos estados na relação destes com o fenômeno de medida (que mede sempre um único resultado, e não uma superposição destes). A medida, portanto, se deveria a um processo em que os resultados experimentais diversos (que seriam resultado de indeterminação estatística em outras teorias) são explicados por um

contínuo desdobramento do universo em uma multiplicidade de histórias¹⁹ mutuamente não observáveis, gerando a noção de Multiverso (Everett, 1957; Everett et al., 1973), sendo que, em cada universo, se observaria apenas uma única saída experimental. É uma teoria local e determinística (com relação à função de onda). Esta interpretação da Mecânica Quântica depende crucialmente do caráter linear da Equação de Schrödinger (devido ao papel central cumprido pela superposição de estados).

Salta aos olhos, apenas com o resumo dessas duas interpretações²⁰, que não apenas há um número incrivelmente alto de interpretações da Mecânica Quântica, mas também que muitas (ou quase todas as) interpretações parecem pouco usuais, distanciando-se grandemente do senso comum físico²¹. O fato de serem inusuais, entretanto, não parece influenciar minimamente no sucesso que alcançam quanto à sua aceitação por grande parte da comunidade de físicos.

Decorre deste fato, portanto, que a eliminação ou substituição dos princípios metafísico/metodológicos do campo da Física Clássica não apenas fornece uma *maior liberdade quanto ao aparecimento* de possíveis interpretações, mas também uma enorme *liberalidade quanto ao seu conteúdo*.

Portanto, neste trabalho, pretendemos investigar os elementos metafísico/metodológicos que fornecem à Mecânica Quântica as condições para o surgimento e aceitação, sempre por grandes partes da comunidade de físicos, de interpretações que, no contexto de uma Física Clássica, seriam tidas como

¹⁹ Neste sentido, se assemelham à Interpretação de Histórias Consistentes da Mecânica Quântica (ROCHA, RICKLES & BOGE, 2022), diferindo destas pelo fato de as últimas ocorrerem em um mesmo Universo.

²⁰ Para um aprofundamento dessas interpretações, bem como uma visão atual do estado destas e outras interpretações da Mecânica Quântica, ver Freire Jr. (2022).

²¹ Com “senso comum físico” queremos dizer que não se trata de um senso comum puro e simplesmente, de toda a gente, mas do senso comum daqueles que compartilham o conhecimento próprio da área. Portanto, um senso comum já perpassado por algum treinamento (algo como um *educated common sense*, na versão em inglês).

mero fruto de uma imaginação fértil e fantasiosa, sem qualquer possibilidade de aceitação por parte substancial dessa comunidade.

Faremos isso no bojo de uma metodologia que toma as interpretações existentes e as caracteriza em uma divisão semântica que permite compreender as diferenças de força epistemológica entre suas proposições. Essa investigação sobre a miríade de interpretações para a Mecânica Quântica, portanto, será pano de fundo para nosso *objetivo fundamental*, que é prover as teorias físicas de um esquema semiótico (envolvendo semântica e sintaxe) que seja capaz de hierarquizar interpretações de teorias físicas (quaisquer, não apenas da Mecânica Quântica) mesmo, e principalmente, em um contexto de subdeterminação experimental e formal.

Para tanto, inicialmente caracterizaremos, no capítulo 1, as teorias físicas como linguagem e, *suas interpretações, como um texto*; e estabeleceremos a relação que constroem com a dimensão ontológica e sintática (formal). O capítulo 1 é, pois, essencial ao presente trabalho, pois é nele que são introduzidos (talvez reintroduzidos) os elementos metodológicos que estabelecem critérios para a análise e hierarquização de interpretações rivais de uma teoria física qualquer. Os capítulos seguintes visam apresentar *aplicações* dos elementos descritos no capítulo 1, tomando por exemplos a Interpretação de Copenhague e uma versão estendida (por este autor, ao longo de décadas) da Interpretação Estocástica. A adoção da Interpretação de Copenhague se justifica por duas razões: (a) foi a primeira interpretação de caráter relativamente consensual pensada para a Mecânica Quântica, estabelecendo uma “linha de base” para as demais propostas, (b) permite, na análise de sua semântica profunda, que elucidemos alguns elementos históricos que podem ter sido seus condicionantes, o que é relevante para a caracterização desta semântica profunda. Além disso, ela é a interpretação que introduziu, no contexto da Mecânica Quântica, a noção de paradoxo, em sentido metodológico bem diverso daquele que hauria no contexto da Física Clássica, que terá relevância para se entender as razões pelas quais tantas e tão díspares interpretações podem ser construídas para o mesmo aparato sintático subjacente (mesma equação etc.)

Tendo isso em mente, no capítulo 2, abordaremos sob uma perspectiva histórica os desdobramentos que levaram à constituição da Mecânica Quântica e sua interpretação. Isso será feito para indicar como a noção de *paradoxo* se tornou passível de ser incorporada à interpretação. Esse capítulo, a despeito de trazer elementos históricos, não deve ser visto como uma História da Física do período, uma vez que se preocupa com a *dimensão lógica* desses desdobramentos históricos, e não acessa as idas e vindas características de tais desdobramentos²².

O capítulo 3 desenvolve a noção de paradoxo a partir da perspectiva de Niels Bohr, formando a base da enunciação de seu Princípio de Complementaridade.

No capítulo 4 investigamos a relação da proposição dessa noção de paradoxo, a partir da solução dada por Bohr, com o papel de modelos na constituição de interpretações para teorias físicas, tendo a Mecânica Quântica por exemplo.

Os capítulos 2, 3 e 4 são então considerados para se analisar a Interpretação de Copenhagen a partir dos elementos metodológicos desenvolvidos no capítulo 1. Isso é feito no capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta, sucintamente, a Interpretação Estocástica Estendida²³, como outra perspectiva interpretativa para a Mecânica Quântica. Entretanto, isso é feito já no contexto dos elementos desenvolvidos no capítulo 1 e, portanto, com vistas a uma comparação, segundo tais elementos, entre as duas interpretações. Mais do que uma comparação, visa-se apresentar como o elemento de hierarquização pode ser articulado na presente abordagem. Ao final, segue nossa Conclusão.

²² Essa ressalva serve para que não se considere o capítulo uma abordagem acurada e historicamente detalhada dos desdobramentos históricos havidos, caso em que o capítulo refletiria uma perspectiva “sanitizante” (e, portanto, distorcida) dessa história.

²³ Na sua forma “estendida”, realizada por este autor em suas pesquisas na área.

Capítulo 1. As teorias físicas como linguagem

Como dito no capítulo introdutório, a Física pode ser entendida como uma ciência que utiliza a Matemática como linguagem estruturante para a compreensão de fenômenos naturais, ou seja, é uma linguagem que se estrutura a partir de exigências metodológicas particulares. Há, nessa afirmação, uma dupla chave interpretativa, de caráter histórico e epistemológico, que, entretanto, se imbricam. Este capítulo investiga como esses dois elementos se inter-relacionam, partindo, para tanto, de um prisma semiótico de suas relações. Tal abordagem se faz necessária, uma vez que estamos interessados em levantar questões essencialmente semânticas (de interpretação) sobre as teorias físicas em geral (e a Mecânica Quântica, em particular); e o papel da Matemática neste processo, seja como gramática, seja como sintaxe, não pode ser ignorado.

Para esclarecer este ponto, considere-se um exemplo localizado no contexto da Teoria Eletromagnética. A equação que é interpretada como representando a conservação da energia é dada por

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \right) = -\vec{E} \cdot \vec{J}.$$

Essa interpretação *exige* que \vec{E} seja interpretado como o campo elétrico, \vec{B} seja interpretado como o campo magnético, u é a densidade de energia (dada em termos dos campos por $u = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$), \vec{J} é a densidade de corrente e o termo $-\vec{E} \cdot \vec{J}$ representa uma eventual dissipação de energia, para o caso de haver correntes livres (além de μ_0 e ϵ_0 , que são as constantes do vácuo – por sua vez relacionadas com a velocidade da luz).

Assim, no exemplo, é fácil entender que os conceitos, ao serem vinculados por uma expressão matemática, podem ser interpretados como uma *conservação da energia eletromagnética* na ausência de termos de dissipação. Para tanto, note-se, há que se compreender também uma dimensão semântico-matemática da sintaxe *física*. No exemplo em questão, é importante entender

que a referida conservação é interpretada a partir da interpretação do símbolo de derivada (parcial) como uma taxa de variação (no caso, exclusivamente no tempo) enquanto os símbolos formais $\nabla \cdot \vec{P}$ (com \vec{P} o vetor de Poynting definido como $\vec{P} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$), representam um *fluxo* ($\nabla \cdot$) de uma densidade de momentum eletromagnético (\vec{P}). A interpretação de uma equação na forma

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{B} = \frac{dA}{dt} = 0 \rightarrow A = \text{const.},$$

escrita em um contexto puramente matemático (e independente da interpretação *física* dos símbolos A e \vec{B}), se torna a equação da conservação *da energia eletromagnética* apenas quando tais símbolos são interpretados *fisicamente* da maneira que sucintamente indicamos. Neste trabalho, assumimos essa semântica matemática como dada e consensual, e estabelecemos nosso foco na semântica *física*.

Note, ainda, que não é necessário exigir, para o que nos interessa neste trabalho, que a *todos* os símbolos formais de uma teoria física se encontre um referente no mundo²⁴, mas apenas que se possa definir uma função interpretação que atribui a alguns dos termos da teoria, um referente.

De maneira ainda seminal, consideramos a Física como um cálculo interpretado (HUTTEN, 1948) no sentido de se ter, em um plano sintático, suas equações, símbolos e interrelações estabelecidas formalmente (e.g. como as interrelações entre o campo elétrico e o campo magnético com a energia, no contexto da Teoria Eletromagnética) e, ao mesmo tempo, haver a *exigência*, para que se tenha uma Física, que a tal plano sintático se acople uma dimensão semântica²⁵, ou seja, que haja uma interpretação, como já apresentado, que

²⁴ Os “termos teóricos” sendo aqueles termos para os quais faltaria referente.

²⁵ Temos, como é óbvio, uma percepção de uma teoria física como a realização de uma semântica. Entretanto, não o fazemos como em Suppes (1967), pensando-a como uma mera coleção de modelos (KRAYSE & BUENO, 2007, pg. 2), formalizável a partir da Teoria dos Conjuntos. De fato, sequer temos a pretensão de formalizar essa ideia. A sintaxe, no nosso caso, é dada pela Matemática, não a Lógica. Suppes, por seu lado, afirma que “A scientific theory consists of two parts. One part is an *abstract logical calculus*. In addition to the vocabulary of

dará, a boa parte dos termos do formalismo, um referente no mundo, seja como objeto, seja como comportamento. É essa interpretação que, em um *ciclo virtuoso*, permite que se compreenda um experimento, mas que também é deles derivada no contexto de sua diacronia (mais sobre este ponto adiante).

De fato, do ponto de vista histórico, a Física se torna um campo de conhecimento autônomo quando erige para si um critério próprio de verdade, ou adequação empírica, assim como uma abordagem específica para buscá-la. Este processo tem origem já no início do período moderno, com os trabalhos de Francis Bacon (2014) e outros sobre o papel que a experimentação deveria cumprir na busca da verdade natural (como *manipulação* de certos arranjos físicos), para além da mera empiria (como forma de se salvar os fenômenos meramente observados); assim como o estabelecimento, em novos termos, da relação entre a Lógica e a Matemática nesse processo. Concorreram, para este último ponto, as essenciais postulações de Galileu Galilei (2001), que revitalizou a ideia neoplatônica (e neopitagórica) de uma harmonia essencialmente matemática, já expressa, de forma seminal, no *Timeu* (CORNFORD, 1997; TAYLOR, 1928; PLATÃO, 1999), que poderia ser recuperada pela mente humana. Criou-se, portanto, uma nova metafísica da Matemática no contexto da Física (BURTT, 1991), estritamente vinculada à sua noção de verdade²⁶.

Desde Galileu, cabe à experimentação a verificação contextual e particular das afirmações gerais contidas nas leis físicas, expressas quantitativamente por meio da simbologia matemática. Por sua vez, cabe à Matemática desenvolver, segundo seus critérios próprios (sintáticos), as consequências formais de tais leis. Tal característica é, por exemplo, essencial para a possibilidade de se ter, em Física, a *descoberta*, mesmo a Matemática se

logic, this calculus includes the primitive symbols of the theory, and the logical structure of the theory is fixed by stating the axioms or postulates of the theory in terms of its primitive symbols.” (SUPPES, 1967, pg. 56, meu itálico).

²⁶ Assim, por exemplo, podemos citar a doutrina das qualidades primárias e secundárias, que funcionam como elemento demarcatório para a física, no contexto já de sua matematização: qualidades primárias são, pois, os eventos naturais que são passíveis de matematização e, portanto, de análise física concreta; enquanto qualidades secundárias são herméticas à matematização (BURTT, 1991).

tratando, *a fortiori*, de um sistema simbólico essencialmente fechado. A *descoberta*, comumente, cumpre um papel extremamente relevante no contexto dos processos abduativos (CHIBENI, 1996) associados ao recebimento das teorias físicas, sendo esse um dos pontos em que as determinações históricas se intersectam com as epistemológicas e, se não são geradoras de sentido, certamente são responsáveis pela confiabilidade daqueles estabelecidos.

A partir desse ponto de virada entre os papéis da Lógica e da Matemática no contexto de teorias físicas, historicamente, passa-se a atribuir à Lógica um duplo papel, assaz diverso daquele que cumpria na abordagem aristotélica da descrição da natureza, em que a Lógica era vista como o principal meio de acesso ao mundo natural na busca pela descrição consistente de seus fenômenos (ARISTÓTELES, 1995a).

Modernamente, determinou-se, primeiramente, que cabe à Lógica (tanto formal clássica, como informal (TOULMIN, 2004)) o papel de elemento estruturador da argumentação pela qual se constrói um texto, capaz de articular a passagem discursiva entre expressões matemáticas, elucidando sua dimensão interpretativa (semântica, portanto). Em segundo lugar, e menos facilmente perceptível, cabe à Lógica (formal clássica) o papel de base para a própria construção da matemática que lhe subjaz²⁷. Na estrutura de uma teoria física, portanto, é particularmente importante a primeira função da Lógica, citada

²⁷ É sabido que não existe apenas uma “lógica”, mas um conjunto de lógicas que podem ensinar diferentes matemáticas, a depender do que postulam. Assim, por exemplo, uma lógica intuicionista irá ensinar uma matemática essencialmente menor, com menos resultados, do que a lógica formal clássica, uma vez que dela se excluem as demonstrações por contradição, essenciais para o desenvolvimento de alguns resultados matemáticos usuais. Um exemplo simples pode elucidar este ponto: na Lógica Proposicional Clássica temos que a proposição condicional $p \rightarrow q$ só é falsa *apenas* se p for verdadeiro e q falso. Isso significa que a *implicação* será verdadeira se p for falso, *independentemente do valor de verdade de q* . Esse ponto traz inúmeros debates e reformulações da Lógica (PRIEST, 2006), como é o caso da Lógica da Relevância, que não aceita essa interpretação (lógica) do conectivo condicional. Ocorre que esse elemento é essencial para a Teoria de Conjuntos, que define a relação de inclusão entre dois conjuntos A e B como $A \subset B \leftrightarrow (\forall x)[x \in A \rightarrow x \in B]$. Ocorre que a Teoria de Conjuntos afirma que o conjunto vazio \emptyset está contido em todos os conjuntos (incluindo ele mesmo). Mas $\emptyset \subset A$ implica que a proposição $x \in \emptyset$ é *falsa* (e se $B = \emptyset$, também o conseqüente será falso), de modo que é necessário assumir a interpretação (lógica) do condicional nos termos anteriormente definidos para se garantir a proposição, na Teoria dos Conjuntos, de que o conjunto vazio é subconjunto de qualquer outro conjunto, inclusive dele mesmo.

anteriormente, qual seja, a de prover, *conjuntamente com o aparato matemático*, uma interpretação das teorias físicas. Cria-se, assim, uma linguagem por meio da qual podemos associar a Matemática ao aparato sintático e gramatical, enquanto associamos, à interpretação deste aparato sintático, sua dimensão essencialmente semântica. É nessa dimensão semântica que a Física estabelece um conjunto de proposições e significados que subsidiam uma específica percepção do que o Mundo é, e daquilo que ele não pode ser.

Desse modo, a base epistemológica da Física pressupõe a utilização do pensamento lógico-formal, estabelecendo proposições que se referem às relações entre símbolos matemáticos abstratos²⁸, mas também fornecendo elementos que desbordam de tais símbolos. Tem-se, assim, uma dupla referência: de um lado, há o diálogo entre Física e Matemática em que uma convoca a outra em não raros casos; e de outro, entre os códigos linguísticos e o universo de sentido, que se articulam na produção deste. Há, pois, um pareamento entre dois sistemas distintos de significação que são autônomos, mas interdependentes, a depender do ponto de vista adotado – a Física seria, pois, a construção desta interdependência *a posteriori*. Por isso, na Física, para se representar a complexidade de operações que têm a função de denotar seus eventos, fundada essencialmente em uma prévia codificação dos fenômenos, pressupõe-se, geralmente, uma congenialidade entre a Matemática e o Mundo.

Exemplos desse transbordamento hermenêutico relativamente à dimensão sintática são certas afirmações sobre o Mundo que são, de fato, *condições de possibilidade* para que a teoria física, representada sintaticamente no cálculo subjacente, possa *fazer sentido*. De modo geral, há de se ter uma interpretação clara dos referentes dos símbolos matemáticos para se construir uma visão de mundo – a Mecânica Quântica, de fato, é um caso particularmente interessante em que a interpretação clara dos referentes dos símbolos matemáticos não se encontra finalizada, o que está na base, muito

²⁸ Como na proposição da Teoria Eletromagnética: a densidade de energia eletromagnética não muda com o tempo, a menos que haja fluxo de densidade de momentum eletromagnético e/ou dissipação desta energia por meio do efeito Joule.

provavelmente, da miríade de interpretações gerais (visões de mundo) que dela derivam²⁹.

A título de exemplo, podemos citar a assunção, presente na Física de Newton, de um conceito de vazio, ou de Espaço, em oposição ao conceito aristotélico de Lugar (ARISTÓTELES, 1995a), sem o qual a ideia da conservação do momento linear, fundamental para a Mecânica newtoniana, sequer se coloca – ou faz sentido. Esse ponto é particularmente representativo porque mostra as diferenciações *semânticas* profundas entre o sistema aristotélico e o sistema newtoniano.

Assim, para Aristóteles, o vazio não poderia existir, pois isso implicaria um espaço infinito. Segundo o Estagirita, além de não ser possível a existência em Ato de algo infinito (ARISTÓTELES, 1995b, 216^b:20), um espaço vazio implicaria a absoluta identidade de seus pontos (e, portanto, a impossibilidade de lugares naturais). Desse modo, como encontramos no seu livro da *Física*, Aristóteles diz que³⁰: se o vazio existisse, um corpo, uma vez posto em movimento, não poderia parar em um ponto x , uma vez que tal ponto não seria em nada distinto de outro ponto $x + a$ (qualquer a), de modo que o corpo assim posto em movimento, se manteria em movimento retilíneo uniforme indefinidamente – para o que seria necessário um espaço infinito em Ato. Logo, segundo Aristóteles, o vazio não poderia existir. Há outros argumentos de Aristóteles contrários ao vazio³¹, mas o que importa ressaltar aqui, entretanto, é que Aristóteles *enuncia* o princípio da conservação do momento linear, usando um belo argumento de simetria (a homogeneidade do espaço), *justamente para negá-lo*, com base em outros

²⁹ Podemos citar algumas interpretações: de Copenhagen, Relacional, Qbismo, Muitos Mundos, Histórias Consistentes, Ensemble, De Broglie-Bohm, Transacional, de Colapso Objetivo, dentre outras (OLIMPIA et al., 1979).

³⁰ “Ademais, ninguém poderia dizer por que uma coisa, uma vez posta em movimento, deveria parar em algum lugar; pois por que deveria ela parar aqui e não aqui? De modo que uma coisa permaneceria em repouso ou se moveria *ad infinitum*, a menos que algo mais poderoso entrasse em seu caminho.” (ARISTÓTELES, 1995b, 215a:20)

³¹ Por exemplo, o argumento de que, no vazio, a velocidade de um corpo seria infinita, conclusão que decorre do papel ambíguo que o meio material possui na física aristotélica, qual seja, ao mesmo tempo de limitador e possibilitador do movimento (GRANT, 1993, p.36).

elementos ontológicos que usa para subsidiar sua física (e.g. a impossibilidade da existência do infinito em Ato – uma das formas pelas quais, segundo ele, se pode enunciar o Ser).

Note-se que não há, no aparato sintático, qualquer variável que represente diretamente o vazio. Ele é sintaticamente representado, mediamente, pela consideração de uma força nula quando relativa ao meio circundante (p. ex. força de atrito nula). Ali onde não houver vazio, haverá, por exemplo, resistência ao movimento. Das relações entre o vazio e a força nula referente ao meio circundante com a primeira lei de Newton (e a segunda), verifica-se que ele se estabelece semanticamente (porque ontológica e formalmente) como *condição de possibilidade* da teoria.

O próprio exercício da experimentação em Física depende, em boa parte, de uma interpretação de seu formalismo matemático, pois a experimentação trata de manipular, no processo de construção dos aparatos experimentais e seus arranjos, justamente os *referentes* daqueles símbolos matemáticos, de modo que, ao exercício da experimentação, deve preceder uma etapa semântica, necessariamente, visto que o processo de referenciamento é essencialmente semântico, em particular em uma perspectiva que adota a noção de verdade por correspondência³².

Nesse sentido, para além de sua origem a partir de construções sócio-históricas articulares, a Física e a Matemática estabelecem surpreendentes e intrínsecas relações na organização formal sobre o universo (DUVAL, 2003; KARAM, 2007; FLORES & MORETTI, 2008).

É nessa perspectiva que consideramos as interpretações de teorias físicas *como um texto*. Na seção seguinte, introduzimos uma metodologia de avaliação das características de textos relacionados a interpretações de teorias

³² Em lógica formal clássica isso é apresentado pela expressão: “*p*” é verdadeira se, e somente se, *p*. Nesta proposição, a primeira ocorrência da proposição *p* vem entre aspas, sendo, pois, mencionada, enquanto na segunda ocorrência ela aparece sem as aspas, sendo, portanto, usada (representa, ali, o próprio evento do mundo que *p* expressa linguisticamente) (TARSKI, 2007).

físicas com base na abordagem de Greimas e Courtés (2008), mas que considera, também, outros desenvolvimentos na área.

1.1 A interpretação de teorias físicas como um texto

Costa (2014), partindo da proposta de Greimas e Courtés (2008), compreende que, para a descrição da produção e da compreensão dos discursos e suas manifestações textuais, é possível conceber a geração do sentido como um percurso que vai do mais simples e abstrato para o mais complexo e concreto – como nas teorias físicas, em particular as axiomatizadas. Desse modo, e em consonância com o que já afirmamos, o percurso gerativo da constituição de sentido, proposto por Greimas e Courtés (2008), auxilia a entender não apenas o percurso ontológico dos efeitos de sentido, já mencionados, mas igualmente a epistemologia por trás dos efeitos de sentido. Assim, o percurso gerativo constitui-se como um simulacro metodológico que retoma as marcas do discurso nas manifestações textuais, pois, a partir *do que* é dito, depreende-se *como* é dito e *porque* é dito.

No caso das representações semióticas, das quais a Física é um exemplo (STECIAG, 2013), ocorre, simultaneamente, uma relação de formulação e de comunicação de uma estruturação simbólica (BENVENISTE, 2005). Esse enquadramento que propomos, portanto, visa abordar as interpretações subdeterminadas de teorias físicas a partir de uma perspectiva semiótica, desvinculada do valor de verdade (dada a subdeterminação que as equaliza), *mas ainda capaz de articular uma hierarquização entre tais interpretações a partir dos seus modos de geração de sentido*, a serem apresentados no que se segue.

1.2 Perspectivas semióticas

A Semiótica é a ciência que estuda os signos e suas linguagens. Suas bases teóricas estão fundamentadas em Ferdinand de Saussure (1857-1913) e Charles Sanders Peirce (1839-1914). Conforme explicam Coelho, Costa e Fontanari (2016), há muitas e distintas teorias que abordam o sentido no campo das Ciências Humanas e da linguagem; o que diferencia a perspectiva semiótica das outras linhas de pesquisa é que a semiótica se empenha em constituir uma disciplina que possa dar conta dos efeitos de sentido *dos* e *nos* textos. Nessa perspectiva (HÉNAULT, 2006), podem ser encontradas diferentes escolas: de Paris (GREIMAS; COURTÉS, 2008), de Moscou (LOTTMAN, 1996) e anglo-saxônica (PIERCE, 2010), dentre outras.

Importante para a Semiótica é a distinção entre *significado* e *significante* proposta por Saussure (2012), que apresentam uma relação dialética intrínseca. Enquanto o significado está relacionado ao conteúdo (que pode ser dado por modelos físicos particulares, por exemplo³³), o significante está relacionado à forma material do signo (por exemplo, extratos do Mundo, ou situações experimentais, dentre outras). Já a “significação” *expressa a relação entre ambos*. Interpretar, portanto, é um exercício de significação.

Na perspectiva da semiótica de linha francesa, que aprofunda essas inter-relações entre significante e significado, temos, como dito acima, um percurso gerativo do sentido. Esse percurso, conforme Costa (2014) e Greimas e Courtés (2008), é tripartido nos níveis fundamental, narrativo e discursivo, que podem ser adaptados à descrição de teorias físicas (Quadro 2-1), formando, de fato, o ponto central deste trabalho.

O nível fundamental é o mais simples e abstrato, no qual se encontram as oposições fundamentais do sentido, que consideramos aqui, de forma aplicada às teorias físicas, como constituído dos processos de estabelecimento dos

³³ Ver, mais adiante, as discussões entre Bohr e Schrödinger sobre a *visualizabilidade* (*anschaulichkeit*) de teorias físicas e o capítulo 5, em que aprofundamos essa questão.

elementos referenciais da teoria em questão, e a atribuição de seus correspondentes simbólicos no aparato sintático, além de suas condições de possibilidade. Também compõem esse nível as leis fundamentais da teoria (em particular no caso de a teoria ser axiomatizada, como é o caso da Mecânica Newtoniana ou a Teoria Eletromagnética).

Quadro 1-1 Percurso gerativo de sentido e seus níveis. Fonte: Elaborado pelo autor a partir das contribuições de Greimas e Courtés (2008, p. 235).

Percurso gerativo de sentido		
Nível	Componente sintático	Componente semântico
Fundamental	Sintaxe fundamental (leis em seu formato matemático)	Semântica fundamental (relação referencial entre grandezas físicas e variáveis)
Narrativo	Sintaxe narrativa de superfície (consequências formais gerais das leis)	Semântica narrativa (determinação do Mundo)
Discursivo	Discursivização	Semântica discursiva
		tematização

No caso específico da Teoria Eletromagnética, a título de exemplo, sua *sintaxe fundamental* seria dada pelas equações de Maxwell (seus axiomas formais), enquanto que sua *semântica fundamental* estaria associada às identificações das variáveis \vec{E} e \vec{B} aos campos elétrico e magnético, respectivamente, à interpretação das integrais que ali comparecem como fluxos ou circulações, aos símbolos ϵ_0 e μ_0 como a constante dielétrica do vácuo e a permeabilidade magnética deste, respectivamente, a c como a velocidade da luz, a q como a carga elétrica (ou sua densidade), a i como corrente elétrica (ou sua densidade), dentre outros.

No *nível narrativo*, temos, do ponto de vista do componente sintático, os desdobramentos formais das leis fundamentais. Tais desdobramentos, uma vez que conectam elementos interpretados da semântica fundamental, estabelecem

uma semântica narrativa, pela qual se vai constituindo uma visão de mundo. De modo geral, é nesse nível que são constituídas as constatações (ou refutações) empíricas da teoria³⁴.

Seguindo o exemplo anterior, na Teoria Eletromagnética, teríamos, por exemplo, as operações formais que levam às equações de onda para os campos e o aparecimento da velocidade da luz em tais equações, que determinam a interpretação de que os campos oscilam com a velocidade da luz, e que possuem caráter transversal, dentre outras propriedades – nesse sentido, *interpreta-se*, o fenômeno luminoso é a propagação desses campos, que é, pois, ondulatória.

No nível discursivo, temos as estratégias de especialização dos contextos de emissão e de justificação da teoria subjacente, construída nos níveis fundamental e narrativo. Ainda tomando-se a Teoria Eletromagnética como exemplo, neste nível estaria a articulação do conceito de éter, que não comparece, em nenhum momento, na estrutura sintática profunda, nem pode ser obtido operacionalmente na dimensão narrativa, por articulação de elementos da sintaxe profunda.

Assim, como vimos por este rápido exemplo, e segundo Greimas e Courtés (2008), esse percurso gerativo do sentido é capaz de retomar as marcas dos processos de construção do sentido nos textos/interpretações, fornecendo a eles *diferentes valores epistemológicos*.

Como se pode depreender do Quadro 1-1 que sintetiza a proposta de Greimas e Courtés (2008), cada nível do percurso gerativo de sentido tem seu próprio componente sintático e semântico. No nível profundo, o mais simples e abstrato, há sintaxe e semântica fundamentais. No nível narrativo, também existem uma sintaxe narrativa de superfície e uma semântica narrativa. No nível

³⁴ Não se pode, por óbvio, se “provar” ou “negar”, por exemplo, as equações de Maxwell (interpretadas ou não) *em si mesmas*, mas nos seus desdobramentos sintáticos e semânticos (nível narrativo), quando confrontados com o mundo.

discursivo, o mais complexo e concreto, encontra-se o processo de discursivização, em que ocorrem os processos de figurativização e tematização.

Do que foi dito, mostra-se essencial para a Física entender a sua relação com a Matemática como colaboradora na *produção do sentido*, juntamente com os processos históricos que dão, a tal produção, um devir. Mas como é possível um aparato sintático ser gerador de sentido – um aspecto semântico?

De fato, a interpretação é o processo de significação que é constitutivo dos sistemas teóricos que, sem ela, permanecem vazios de sentido. É, pois, elemento essencial da construção de uma visão de mundo (uma semântica sistemática) que as teorias físicas trazem consigo. A significação de modo algum está contida nos signos, nem tampouco na simbologia, justamente por não ser determinada por qualquer um deles, como já sustentava Benveniste (2005) e Saussure (2012). É isso, afinal, que permite uma mesma teoria – bem como um mesmo signo – ser interpretada de diferentes maneiras.

Há, entre significado e significante uma *interdependência* cuja revinculação *a posteriori* é essencialmente arbitrária (em princípio, como afirmou o pai da linguística). É essa arbitrariedade *a priori*, que perpassa toda e qualquer atribuição de sentido, como afirma Benveniste (2005), que constitui o esforço fundamental da Física na produção de sentido de forma *a posteriori*, *mas não arbitrária*, produção perpassada por elementos da empiria, mas também de caráter textual. A *expectativa* da Física (necessariamente de caráter metafísico ou metodológico) é que uma suposta unidade ontológica do mundo engendre, *a posteriori*, uma unicidade interpretativa de suas teorias.

1.3 A semântica da Física e a das línguas naturais

A despeito de ser, obviamente, expressa por seres humanos, a Física possui uma semântica própria nos níveis profundo e narrativo, que não se reduz àquela das línguas naturais, sendo caracterizada por elementos que lhe são

precípuos; em grande parte, vale ressaltar, pelo seu uso da Matemática. Assim, é interessante, neste ponto, estabelecer certas relações entre a semântica de línguas naturais e a semântica da Física, uma vez que essas entram em contato (às vezes mesmo em conflito) na dimensão discursiva.

Como qualquer campo de estudo, a semântica de línguas naturais possui diferentes correntes de pensamento, para as quais a noção de significado se modifica substancialmente. Assim, temos que:

- na abordagem “**representacional** ou **mentalística**, o significado é essencialmente um modo pelo qual representamos mentalmente a nós mesmos o conteúdo daquilo que se diz. São várias as formas como essa ideia pode ser articulada. Uma possibilidade é em termos de imagens mentais” (CHIERCHIA, 2003, pp. 40-41);
- a abordagem **pragmático-social**, por sua vez, “qualifica o significado como uma **práxis social**, assimilando-o à maneira como as expressões são usadas” (CHIERCHIA, 2003, pp. 43-44);
- a abordagem **denotacional** imagina a língua como constituída por um conjunto de palavras e de regras para combiná-las. “As palavras são associadas por convenção a objetos (isto é, os denotam). Em virtude dessa associação, podemos empregar sequências de elementos lexicais para codificar as situações em que os objetos se encontram.” (CHIERCHIA, 2003, p. 45)

No contexto das línguas naturais, cada uma dessas abordagens diz algo de relevante sobre significado e sobre língua. Dessas perspectivas surgiu um modo de relacionar a semântica e a Lógica (*para as línguas naturais*) que é particularmente elucidativo para o que diremos sobre a Física, no que se segue.

Desde Frege e o ressurgimento da Lógica, a semântica passou a ser tratada por algumas correntes em estrita relação com a Lógica (Cf. o tratamento do artigo definido feito por Bertrand Russell, por exemplo (CERQUEIRA, 2018)).

A Lógica, como se sabe, possui uma semântica de valores de verdade, ou seja, estabelece uma função interpretação I que toma por domínio proposições e leva no conjunto (contradomínio) $\{V, F\}$ das constantes lógicas. É, além disso, uma abordagem denotacional da linguagem, uma vez que trata os referentes dos predicados de primeira ordem como conjuntos de objetos, compreendendo-se “Lógica” como uma linguagem, acrescida de um método de prova e acrescida, ainda, de uma semântica denotacional. Assim, esta abordagem assume que, na base da linguagem deve haver

uma lógica de um determinado tipo que nos permita fazer isso: as sentenças da linguagem devem ter uma forma lógica a partir da qual possamos derivar suas consequências. Isso permite integrar os aspectos mais convincentes das abordagens tradicionais do significado, pelos seguintes motivos. Em primeiro lugar, uma lógica é um sistema de representações como na abordagem representacional. Em segundo lugar, essas representações são equipadas com um conjunto de regras de inferência, que constituem suas condições de uso – como na abordagem pragmático-social. Em terceiro lugar, as representações lógicas devem ser interpretáveis em termos de condições de verdade, como na abordagem denotacional (CHIERCHIA, 2003, p. 57).

O importante para a questão dessa perspectiva sobre as relações entre semântica e Lógica é que a Lógica permite introduzir uma estrutura que, em princípio, subjaz à fala usual. “Atribuir uma forma lógica significa especificar um *médium* simbólico com base no qual se definem as condições de verdade e os procedimentos inferenciais (...) de modo que as expressões das línguas estão associadas às suas denotações pela mediação de formas lógicas” (CHIERCHIA, 2003, p. 71).

Ocorre que a forma lógica relativa às línguas naturais é precisamente o que se busca no estudo da semântica, para os adeptos da abordagem denotacional, pois, “se as línguas possuem uma lógica, convém perguntar quais são as representações que essa lógica utiliza. Que linguagem usamos para calcular mentalmente os nexos entre as coisas que dizemos?”

É neste ponto que a Física se distingue importantemente das línguas naturais, uma vez que essa “lógica” que a semântica de línguas naturais exaustivamente procura é, para a Física, precisamente, a Matemática, *já dada*. É por meio da Matemática que se pode proceder ao cálculo dos nexos entre as coisas que dizemos em Física (em nível narrativo). Isso não afasta, obviamente, elementos pragmáticos ou sociais, como as pesquisas de Thomas Kuhn mostram bem, mas estes elementos interagem para além da Matemática e se articulam no plano propriamente discursivo.

A Matemática é o *médium* simbólico com base no qual se definem as condições de verdade e os procedimentos inferenciais, ainda que a verdade objetiva seja determinada pelo concurso da experimentação, e servem, de fato, em *feedback*, para eventualmente contestar as atribuições feitas nos níveis profundo e narrativo. É a partir da Matemática e dos vínculos denotacionais concretos (que se estabelecem para além dela – constituindo, propriamente, a teoria física) que se pode interpretar, objetivamente, e não apenas intralinguisticamente, os dados fenomênicos. A Matemática fornece, ainda, pela noção de operação, o princípio de composicionalidade³⁵, presente em praticamente toda teoria semântica, uma vez que é essencial para a explicação de fenômenos complexos em termos de seus elementos mais simples (narrativamente: da explicação de experimentos em termos dos axiomas e denotações instituídos no nível profundo).

É nesse sentido que a Matemática se constitui como elemento coadjuvante, mas essencial, na produção de significações no contexto da Física. Com as determinações semânticas de nível profundo, aliadas ao caráter composicional da Matemática, o formalismo faz espriar, em nível narrativo, um conjunto virtualmente infinito de significações derivadas (como a proposição sobre a conservação da energia eletromagnética, ou como a obtenção do caráter ondulatório dos campos). Tais significações derivadas, muitas delas

³⁵ O princípio de composicionalidade diz que o significado de uma expressão complexa depende de modo regular do significado das expressões que a compõem e do modo como são combinadas sintaticamente.

originalmente insuspeitas, podem fornecer também critérios para a rejeição da teoria subjacente, uma vez que podem levar a descrições flagrantemente absurdas do Mundo, ou simplesmente incompatíveis com certa experimentação.

Mais ainda, a Matemática, funcionando como gramática universal da Física, tem caráter gerativo (no sentido de uma gramática gerativa de Chomsky). Disso depreende-se a importância inestimável de Galileu, em particular pela substituição da Lógica pela Matemática nos níveis profundo e narrativo³⁶, para a constituição da Física moderna que, nestes termos, perpassa toda a Física desde então (SILVA FILHO, 2011). Não há Física, em sentido clássico ou não, para além da metafísica galileana da Matemática e da experimentação (BURTT, 1991).

As interpretações das teorias físicas podem ser entendidas como uma relação semiótica entre a Matemática e certos conjuntos de fenômenos naturais, devidamente selecionados pela teoria em questão, sendo a Matemática expressa por meio de símbolos e suas relações, usualmente apresentadas como operações formais, como derivações, integrações etc., simbolizadas em equações.

Entretanto, ressaltamos, o ponto não é a relação entre linguagem matemática e os “objetos” concretos do mundo, mas entre linguagem matemática e as “relações” entre *propriedades de objetos*. Assim, a constituição de sentido toma, inicialmente, os elementos referenciais que dão, a cada símbolo, um referente abstrato vinculado a características particulares possíveis no interior da teoria, como, por exemplo, massa, calor específico, carga, dentre outros, sob os quais objetos concretos podem ser referenciados *a posteriori* como meras instanciações da teoria. Essa constituição de sentido se completa

³⁶ Evidentemente, encontra-se já em Ptolomeu (Ptolomeu, 1998) a questão da matematização (e mesmo antes, na Academia platônica, com Eudoxo). Entretanto, é Galileu que insere a Matemática como constitutiva do processo gerador de sentido (junto à experimentação) no plano narrativo, ao contrário de seus antecessores, que usavam a Matemática essencialmente como uma “máquina de calcular” processos já ontologicamente determinados pelas teorias subjacentes (aristotélica, no caso particular de Ptolomeu, além de exigências estéticas relacionadas ao círculo).

com a organização, no plano matemático-operacional, de relações que se pretendem substitutivas, na dimensão linguística, dos próprios fenômenos físicos – assim, a Matemática, simbólica na dimensão fundamental e narrativa, torna-se simbólica e indicial na dimensão discursiva.

A Física, como ação linguística, se constitui na construção de teorias que visam subsumir amplos contextos experimentais a um conjunto relativamente pequeno de leis fundamentais, matematicamente expressas e interpretadas. As interpretações das teorias físicas podem ser entendidas como uma relação semiótica (de significação) entre a Matemática e certos conjuntos de fenômenos naturais, devidamente selecionados pela teoria em questão, sendo tais fenômenos matematicamente expressos por meio de relações entre símbolos. Nessa relação semiótica, cumpre papel essencial, como já dito, a confiança depositada em uma metafísica que atribui aos fenômenos uma organização captável pela linguagem matemática³⁷.

A título de exemplo, e de modo a tornar a discussão menos abstrata, é interessante, neste ponto, particularizar a discussão para algum campo específico da Física, com a apresentação de exemplos suficientemente ricos, capazes de explicitar o que estamos debatendo até aqui. De modo a caracterizar as diferenças entre os campos clássicos da Física e a Mecânica Quântica, apresentaremos, a seguir, e de forma abreviada, quatro exemplos.

1.3.1 Exemplo 1: Mecânica Newtoniana

Há vários exemplos possíveis para ilustrar tal proposição, bem como a complexidade envolvida do ponto de vista hermenêutico. Na visão moderna das Leis de Newton (SMITH, 2008), por exemplo, entende-se que o momento linear

³⁷ Muito similar, diga-se, à confiança dos linguistas gerativistas em uma sintaxe biologicamente inscrita, normalmente defendida com base no argumento da pobreza do estímulo, que diz que a quantidade de estímulos que uma criança recebe não seria suficiente para que ela apresentasse taxas tão incrivelmente altas (beirando 99%) de emissões gramaticalmente corretas. Daí surge a ideia, entre os gerativistas, da existência, na mente humana, de um esquematismo altamente estruturado e especializado para a linguagem, que seria a Gramática Universal, comum a todas as línguas, servindo como guia para a aquisição da linguagem na criança.

(p) é uma variável associada à massa (m) de um determinado objeto, multiplicada por sua velocidade (v), que estabelece relações espaço-temporais na teoria via suas leis fundamentais ou axiomas; bem como se estabelece que a aceleração (a) de um dado objeto é a relação entre a variação de sua velocidade (Δv) em um intervalo de tempo (Δt)³⁸. Para além de uma relação de nomeação arbitrária (m é massa, v velocidade etc.), o que se busca é uma relação entre os descritores formais m, v, \dots que seja representativa dos fenômenos naturais que supostamente recaem sob o campo em análise – e que subsidie o concurso da Matemática. Ocorre que foram necessários alguns séculos de árduo trabalho para se chegar à simples construção do momento linear p da forma assinalada – para se chegar à ponderação de que a introdução de um descritor p escrito como mv é *semanticamente relevante* para a descrição dos fenômenos que recaem sob o escopo da teoria.

De modo sucinto, pode-se dizer que o momento linear representa construto historicamente datado e intimamente conexo a uma noção de inércia, conceito que *se seguiu historicamente* àquele de *impetus* (KOYRÉ, 1986), desenvolvido no final da alta Idade Média por Buridan e outros, e que só faz sentido no interior de uma percepção do Universo como um infinito vazio (e não um Mundo fechado e perpassado por um *plenum*), como já ressaltamos (KOYRÉ, 2006). Com isso, o *momentum* é concebido a partir de duas fontes de inércia: uma fonte *intrínseca*, que é a massa³⁹, propriedade característica de um objeto abstrato, e uma fonte *extrínseca*, que é a velocidade que a ele se impõe⁴⁰. Uma vez *interpretado* como o descritor da inércia de um objeto abstrato, e uma

³⁸ E que se ressalte, aqui, o processo árduo que levou alguns pensadores do *Merton College*, como Thomas Bradwardine, William Heyteburry, Richard Swineshead e outros (CLAGETT, 1961), a formular tais noções, quase dois mil anos após a física de Aristóteles, chegando mesmo a formular noções antecipadoras da velocidade e aceleração instantâneas.

³⁹ E, de modo algum, “quantidade de matéria”.

⁴⁰ Para verificar a relevância do processo histórico assinalado, basta compreender que a própria noção de inércia é inarticulável no interior do sistema aristotélico, que trabalha, por exemplo, como vimos anteriormente, com a ideia de Lugares Naturais como tendências de movimento, ou ainda, com o pressuposto que toda força deve ser de contato. Mais ainda, tal noção de inércia estabelece uma relação entre movimento retilíneo uniforme e repouso igualmente inarticulável no contexto do sistema aristotélico.

vez *compreendida* a inércia como tendência à manutenção do movimento retilíneo uniforme (ou repouso – que, nessa teoria, se equivalem), e no contexto de um espaço já concebido como infinito e vazio, cabe então perguntar *a que* tal descritor estaria vinculado. Surge, então, a possibilidade do estabelecimento de uma *relação* entre dois descritores: o momento linear e a força.

Tal relação é, pois, *preparada* pela primeira lei de Newton, que estabelece o próprio conceito de inércia, especificando as situações em que ele deve ser esperado – ou seja, estabelecendo os sistemas de coordenadas (inerciais) em que pode ser verificado⁴¹. Assim, a primeira lei de Newton é definicional, mas já estabelece uma relação semântica entre força e inércia. De modo algum ela se reduz a um caso particular da segunda lei de Newton. Ao contrário, sem ela a segunda lei de Newton não faria qualquer sentido.

Ao analisarmos a dinâmica de objetos reais, observa-se a relação de proporcionalidade entre força e variação do *momentum*, mas jamais a relação de proporcionalidade direta. A Segunda Lei de Newton não é uma consequência lógica, mas uma imposição que Newton fez, arbitrariamente, seguindo critérios de simplicidade, além de processos empíricos⁴². Da capacidade essencialmente infinita de descrição dos fenômenos a partir de tal lei decorre, nesse ponto, o que Pierce (CAMARGO, 2021) considera ser um processo *abduativo* (nem indutivo, nem dedutivo), capaz de ensinar *crença*.

Quando não há variação de massa do objeto analisado, a mesma proposição original de Newton em termos de força e movimento pode ser descrita como uma simples relação entre a massa do objeto multiplicada por sua aceleração.

Assim, sabendo-se que

$$p = m \cdot v , \tag{1}$$

⁴¹ A Mecânica Newtoniana só vale nestes sistemas de coordenadas. Em sistemas acelerados, deve-se introduzir o que Newton chamou de forças fictícias, que são correções da teoria.

⁴² Ver mais adiante o papel da empiria nos níveis semióticos de Greimas e Courtés.

e

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (2)$$

e de posse dos significados das variáveis que comparecem nessas expressões, observa-se que a proposição

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad (3)$$

ou

$$F = \frac{\Delta(m.v)}{\Delta t}, \quad (4)$$

implica em uma relação entre os símbolos envolvidos, no sentido de ser capaz de descrever as relações fenomênicas observadas nos mais variados contextos⁴³.

Na prática, esse raciocínio sugere que, aos processos naturais, corresponde uma lei, na qual a força resultante que atua sobre um corpo é proporcional à variação de seu momento linear ao longo do tempo e, conseqüentemente, ao produto da massa pela aceleração por ele desenvolvida, em situações em que a massa não varia. Estabelece-se, assim, aqui de maneira simplificada, o nível profundo da teoria, tanto do ponto de vista de suas predeterminações semânticas, quanto sintáticas.

Complementada a dimensão profunda pela Terceira Lei de Newton, abre-se a dimensão *narrativa* da física newtoniana, pela qual serão acessados os campos da gravitação universal, da teoria dos fluidos, dentre muitos outros. A teoria se lança, assim, em uma empreitada em que emergem significações derivadas que podem ser, eventualmente, refutadas experimentalmente, *ou gerarem, no plano discursivo, concepções de Mundo francamente absurdas*

⁴³ Ressalte-se a ideia de que a Física, devido ao caráter infinito e vazio do seu espaço, se vale da mesma maneira nas regiões “sublunares” e “supralunares”, sendo, de fato, um apagamento dessas noções de seu aparato semântico. Encontramos aqui outro elemento ausente da sintaxe da Física (de seu aparato matemático), traduzido no processo atitudinal de simplesmente aplicar as mesmas expressões sem diferenciação desses “lugares”, mas de imensa importância para a compreensão profunda da teoria.

(paradoxais) que induzam ao seu abandono ou, ao menos, à sua determinação restritiva de escopo⁴⁴.

É neste ponto, entretanto, que surgem diferenças entre os contextos clássicos e quântico. Para vermos isso, consideremos três exemplos hauridos de três interpretações da Mecânica Quântica, muito diversas entre si.

1.3.2 Exemplo 2: A Interpretação de Copenhagen

A interpretação de Copenhagen⁴⁵ parte da equação de Schrödinger, dada por

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r})\Psi(\vec{r}, t),$$

e interpreta a *amplitude de probabilidade* $\psi(\vec{r}, t)$ como um descritor estatístico que está vinculado a um *sistema individual* (e não a um *ensemble* de sistemas). A partir desse descritor, se constrói a *densidade de probabilidade* $\rho(\vec{r}, t)$ associada ao sistema individual por meio da expressão $\rho(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r}, t)^* \Psi(\vec{r}, t)$. A interpretação de Copenhagen assume, ainda, os Princípios de Dualidade onda-partícula, o Princípio de Indeterminação de Heisenberg e o Princípio de Complementaridade.

Com base no *Princípio de Dualidade*, afirma que não se pode falar, ontologicamente, em partículas (e, para algumas variantes da interpretação, não se pode falar ontologicamente sobre nada quântico), pois os componentes dos

⁴⁴ Um exemplo interessante pode ser haurido da questão da natureza do calor, envolvendo teorias que o concebiam como um fluido em oposição à abordagem da Teoria Cinética dos Gases. Nesse contexto, *no nível discursivo*, a partir da evidência experimental que havia troca de calor, mas não de massa entre corpos, surgiu a ideia de “fluidos imponderáveis” que, tomada *stricto sensu*, é uma noção paradoxal (um fluido é uma existência material e, portanto, deve ter massa; ser “imponderável” – sem possibilidade de ser pesado é, pois, um paradoxo) que se estabelece no plano discursivo da teoria apenas com o intuito de salvar a caracterização do calor como fluido. Já, por exemplo, questões relativísticas, relacionadas às transformações de Galileu, são restritivas de escopo.

⁴⁵ Genericamente falando – em seu núcleo interpretativo, pois há variantes, como já mencionamos na introdução.

sistemas quânticos se comportam, em alguns arranjos experimentais, como partículas, enquanto em outros, como ondas.

O *Princípio de Complementaridade*, em um sentido profundo que esclareceremos mais adiante, afirma que nossas conceptualizações da natureza são feitas em termos da nossa condição humana, que não estão adaptadas para o mundo quântico. Assim, conceitos como “onda” e “partícula” só podem ser tomados nesta perspectiva dual, complementar.

O *Princípio de Indeterminação* ressalta, por sua vez, que elementos descritivos como a coordenação espaço-temporal (trajetórias), fundamento das teorias Clássicas, não é esperada valer aqui. Tal princípio exige o construto Observador para sua enunciação – um observador com características muito distintas daquelas do observador clássico, daí as maiúsculas, que, no contexto clássico, é meramente um sistema de coordenadas.

Assim, constrói-se, *grosso modo*, uma semântica profunda para a teoria nessa interpretação.

Ocorre que, no plano discursivo (e não no fundamental, nem no narrativo), ao tratar do problema da dupla fenda, dentre outros, a interpretação encontra um problema. De fato, quando se envia (de um forno, por exemplo) entidades quânticas (que, classicamente, chamaríamos de partículas) que passam por um anteparo com duas fendas e se chocam com um detector, o que se observa no detector não é uma figura de interferência *para cada entidade*, mas apenas um único ponto – o que contrariaria o fato de que $\Psi(\vec{r}, t)$, que formalmente representa uma onda (nível fundamental), estar relacionado a um único sistema (a entidade quântica). Assim, neste ponto, *no plano discursivo*, introduz-se uma *teoria da medida* com um novo princípio, chamado *Princípio de Redução do Pacote de Ondas* (ou *Princípio do Colapso da Função de Onda*), pelo qual a onda quântica (o sistema de dupla fenda faz emergir um comportamento ondulatório) *colapsa* instantaneamente em um único ponto.

Se a última afirmação se mostra curiosa, quando submetida a escrutínio mais aprofundado mostra ainda mais dificuldades. Haveria que se perguntar, por

exemplo, *o que* faz a onda colapsar. As respostas se multiplicam: abordagens decoerentistas afirmam ser o caráter macroscópico do detector, enquanto abordagens “mentalistas” afirmam ser a mente do observador. O Observador, entretanto, *não faz parte da semântica profunda da teoria*, não estando correlacionado a qualquer elemento sintático (SHIMONY, 1963). *Ele é introduzido no plano discursivo*, assim como toda a teoria da medida, para dar conta de uma clara inadequação experimental⁴⁶. Desnecessário dizer que a inclusão da “mente” no contexto da Física deu azo a inúmeras mistificações de seu corpo teórico (feitas, inclusive, por físicos profissionais, e não apenas diletantes).

A introdução do Observador e a interpretação dada ao Princípio de Indeterminação de Heisenberg, *ambas articuladas no plano discursivo*, também trazem dificuldades, que se conectam com o apresentado nos parágrafos anteriores. A interpretação de Copenhagen afirma que a expressão

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$

representa a impossibilidade de se medir, simultaneamente, momentum e posição de uma entidade quântica – o que dá sustentação para a afirmação de que a coordenação espaço-temporal deve ser abandonada. Assim, em um experimento qualquer, jamais obteríamos os *erros experimentais* Δx e Δp tão pequenos quanto quiséssemos, mas sujeitos à expressão anterior, que sugere que o produto, *em um experimento particular*, seria sempre maior que o valor mínimo ali apresentado.

Ocorre que, quando se considera um problema particular, como um oscilador harmônico, por exemplo, o que se obtém, para cada estado quântico puro, *é uma igualdade*, dada, no exemplo específico do oscilador harmônico, por

⁴⁶ Um exemplo análogo ao de um “fluido imponderável” que, usualmente, implicaria uma contradição em termos, introduzido para salvar a interpretação de fluidos da *não observada* transmissão de massa entre corpos a diferentes temperaturas, como já ressaltado.

$$\Delta x_n \Delta p_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar.$$

A presença de uma igualdade torna a interpretação da desigualdade em termos de erros experimentais absolutamente indevida (BUNGE, 1972). De fato, sua assunção implicaria que, em um experimento *qualquer*, feito com quaisquer aparelhos de medida, os erros experimentais se comporiam de forma a dar sempre o mesmo valor, o que é um absurdo total! O símbolo de desigualdade ocorre porque, no seu cálculo, se abstrai dos estados quânticos aos quais se aplicaria, apenas isso. O símbolo de igualdade parece representar, em contraposição, uma propriedade objetiva do sistema.

Tal absurdo decorre de não se ter o construto Observador na semântica profunda da teoria e, pois, correlatamente, na sua sintaxe profunda, qualquer variável que represente, seja o Observador, seja qualquer instrumento de medida, de modo que proposições que os envolvam não têm como ser atreladas à dimensão profunda ou narrativa da teoria. O Princípio de Redução do Pacote de Ondas é *ad hoc* (WIMMEL, 1992, p.45). Flutua (como o éter, na Teoria Eletromagnética) como um elemento semântico que pode sempre ser trazido à baila em determinada interpretação de um fenômeno específico para salvá-la de eventuais inadequações experimentais ou contrassensos teóricos⁴⁷.

A despeito dessas questões, e muitas outras já apresentadas na literatura *ad nauseam*, pode-se dizer que a interpretação de Copenhagen, em suas características mais gerais, permanece como uma das mais adotadas, ainda que difusamente, pela comunidade de físicos.

⁴⁷ Não custa aqui retomar as críticas de Popper à Psicanálise e ao Marxismo (POPPER, 1972). Na primeira, por exemplo, argumenta Popper, há o elemento “história do indivíduo” que pode ser sempre mobilizado para não apenas salvar a teoria de inadequações interpretativas, mas até mesmo reafirmá-la a cada “sucesso”. Seria um engano imaginar que domínios da Física estejam livres dessa possibilidade.

1.3.3 Exemplo 3: A Mecânica Quântica de Bohm

A Mecânica Quântica proposta por David Bohm (1952) partiu da equação de Schrödinger para, escrevendo

$$\Psi(\vec{r}, t) = R(\vec{r}, t) \exp\left(\frac{iS(\vec{r}, t)}{\hbar}\right),$$

e

$$\vec{p}(\vec{r}, t) = \nabla S(\vec{r}, t),$$

obter as expressões

$$\frac{\partial R(\vec{r}, t)^2}{\partial t} + \nabla \cdot \left(R(\vec{r}, t)^2 \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = 0$$

e

$$\frac{\partial \vec{p}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{\vec{p}(\vec{r}, t)^2}{2m} + V(\vec{r}) - \frac{\hbar^2}{2mR(\vec{r}, t)} \cdot \nabla^2 R(\vec{r}, t) \right).$$

Bohm, então, *interpretou analogicamente* esta última expressão a partir da conhecida expressão da Mecânica Clássica (equações de Hamilton-Jacobi), para escrever

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\nabla \cdot \left(\frac{\vec{p}^2}{2m} + V(\vec{r}) \right).$$

Assim, *identificou* $\vec{p}(\vec{r}, t)$ a um momentum *de cada partícula* e

$$Q(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2mR(\vec{r}, t)} \cdot \nabla^2 R(\vec{r}, t)$$

a um potencial.

Há, aqui, inúmeras dificuldades com essa semântica profunda. Em primeiro lugar, a analogia é inadequada, pois, na sua versão clássica, a variável \vec{p} é independente da variável \vec{r} , e não uma função explícita desta. Ademais, a

equação que deve ser integrada para que se obtenha o comportamento do sistema *não* é a equação dita “equação de Bohm”, mas a equação

$$\vec{p} = \nabla S(\vec{x}, t),$$

que é uma *equação de primeira ordem*, não de segunda, como seria o caso, se o problema fosse mesmo relacionado a uma equação de Hamilton-Jacobi. Em segundo lugar, a identificação, com base nessa analogia⁴⁸, levou Bohm a chamar $Q(\vec{r}, t)$ de “potencial”, seu *potencial quântico*. Como não foi capaz de identificar *as fontes* naturais de tal potencial, atribuiu a ele uma fonte que estaria ligada a *variáveis escondidas*:

The usual interpretation of the quantum theory can be criticized on many grounds. In this paper, however, we shall stress only the fact that it requires us to give up the possibility of even conceiving precisely what might determine the behavior of an individual system at the quantum level, without providing adequate proof that such a renunciation is necessary. The usual interpretation is admittedly consistent; but the mere demonstration of such consistency does not exclude the possibility of other equally consistent interpretations, which would involve additional elements or parameters permitting a detailed causal and continuous description of all processes, and not requiring us to forego the possibility of conceiving the quantum level in precise terms. From the point of view of the usual interpretation, these additional elements or parameters could be called "hidden" variables. As a matter of fact, whenever we have previously had recourse to statistical theories, we have always ultimately found that the laws governing the individual members of a statistical ensemble could be expressed in terms of just such hidden variables. For example, from the point of view of macroscopic physics, the coordinates and momenta of individual atoms are hidden variables, which in a large-scale system manifest themselves only as statistical averages. Perhaps then, our present quantum mechanical averages are similarly a manifestation of hidden variables, which have not, however, yet been detected directly. (BOHM, 1952, p. 168)

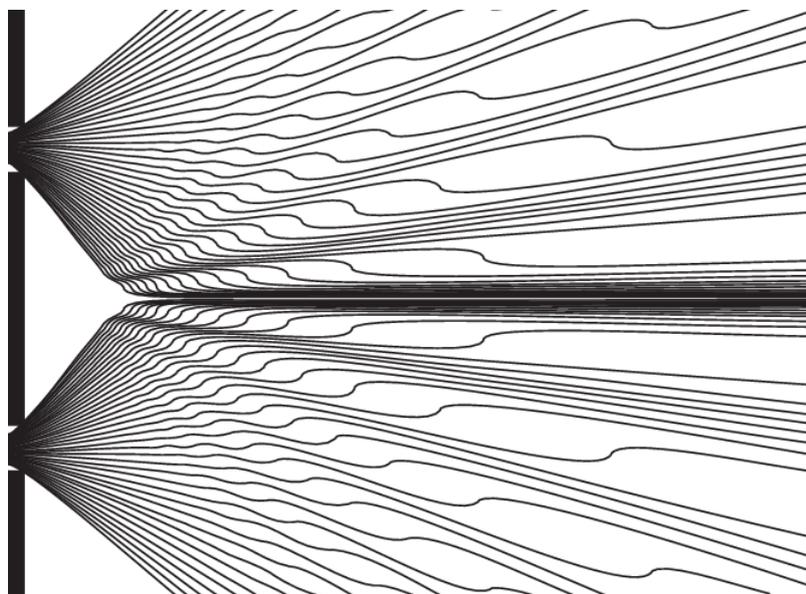
Ocorre que o potencial quântico se vincula ao campo $\psi(\vec{r}, t)$, usualmente concebido como campo de probabilidades (e não um campo real). Assim, Bohm

⁴⁸ Que se poderia dizer metáfora, já que perpassada por impertinências.

adiciona outro elemento ontológico à sua abordagem, que é aquele das *ondas guias*, que herdou das conjecturas de De Broglie (1992). As partículas (a teoria assume uma ontologia corpuscular com trajetórias bem definidas e de caráter determinístico) seriam, portanto, guiadas por essas ondas guias, que seriam responsáveis pelo comportamento de tais partículas, em determinados contextos, como ondas. Com isso, Bohm se desvencilha do Princípio de Dualidade⁴⁹, uma vez que separa natureza e comportamento: partículas (natureza) se movem (comportamento) como ondas.

Para uma explicação do fenômeno da dupla fenda, Bohm (1993) obtém o resultado apresentado na Figura 1-1, em que são apresentadas as trajetórias das partículas ao passarem pelas fendas. Veja-se que, na região apresentada, não haveria, classicamente, qualquer potencial $V(\vec{r})$, de modo que se esperaria, classicamente, que as trajetórias fossem linhas retas; assim, os desvios de trajetórias retilíneas que ali aparecem se devem ao “campo quântico”, segundo a interpretação de Bohm.

Figura 1-1 - Trajetórias de uma partícula quântica ao passar por um anteparo com duas fendas, segundo a abordagem de Variáveis Escondidas de D. Bohm.



⁴⁹ Ainda que, ele mesmo, não tenha se dado conta disso.

Tais resultados são compatíveis com os experimentos de dupla fenda, em que, a cada partícula enviada em direção às fendas, corresponde um, e somente um, ponto no anteparo.

Ocorre que, quando aplicada a sistemas estacionários, como alguns estados do átomo de hidrogênio ou todos os estados do oscilador harmônico, a abordagem de Bohm fornece o valor $\vec{p}(\vec{r}, t) = 0$, em todos os pontos do espaço, indicando que o campo de velocidades da partícula é nulo, ou seja, ela está parada! Tal conclusão, em todos os casos, mas, em particular, para os mencionados, é muito contraintuitiva. Como uma partícula essencialmente parada poderia gerar uma distribuição de probabilidades que se espalha por largas dimensões do espaço real? Distribuição de probabilidades que é usada na própria formulação de Bohm como elemento do campo guia. Evidentemente, a resposta só poderia ser dada em termos de uma teoria de *ensemble*, ou seja, a distribuição *emerge* de sucessivos sistemas (no exemplo supostos constituídos de apenas uma partícula, por simplicidade de análise), cada qual com a partícula parada em determinado ponto, com peso estatístico dado precisamente pela distribuição. Mas isso envolve dizer que diferentes membros de um ensemble (lembramos que a realização *concreta* desses diferentes membros é independente das demais, por definição do que *seja* um ensemble), que é o fundamento da amplitude de probabilidades, *estabelecem* o que deve acontecer com cada uma das partículas – inverte-se aqui a ordem usual, que assume que é do comportamento dos sistemas constituintes do ensemble que se obtém o comportamento final deste. Isso traz, obviamente, problemas relativos à causalidade, que não discutiremos aqui. Parece haver aqui uma contradição *interna* à abordagem, mas não nos deteremos mais no ponto.

Mais grave do que isso, no contexto das extensões relativísticas, como aquele estabelecido pela equação de Klein-Gordon, o potencial quântico permanece apresentando um comportamento não-local, de interação à distância, o que é incompatível com a própria teoria da relatividade especial que está na base da extensão proposta. Com base nessa interação à distância, suposta de base física, Bohm desenvolve a ideia de que “tudo está

interconectado” (o “*undivided universe*” de sua obra (BOHM, 1993)) além de *introduzir* conceitos como “ordem implicada” e “ordem explicada”. Mas isso também se coloca contra as condições de possibilidade de toda a experimentação, fundamento de toda a Física, moderna ou não, na medida em que não permite a separação experimental entre uma região do Universo e tudo aquilo que a circunda – algo imensamente contraintuitivo⁵⁰.

É verdade que se poderia assumir, para a função $\psi(\vec{r}, t)$ um caráter estatístico (reposicionamento semântico profundo), de modo que as “interações” à distância do “potencial” quântico se tornassem meras “correlações estatísticas” (para as quais a ideia de instantaneidade não é problema, da mesma maneira que correlações podem ser estabelecidas localmente, sem que se tenha que pressupor um “universo indiviso”, prenhe de eventuais desdobramentos místicos – que o próprio Bohm explorou). De fato,

a visão de que cada parte do universo reflete o todo é antiga nas visões naturalistas animistas como, por exemplo, a astrologia. Após a descoberta da holografia, na década de 1950, em que cada parte do holograma contém informação de todas as outras partes, diferentes interpretações passaram a trabalhar com esta ideia. Na década de 1960, David Bohm esboçou uma interpretação de “holomovimento”, também conhecida como “ordem implicada”, que buscava incorporar essa noção. Na mesma época, o neurologista Karl Pribram apresentou um modelo “holonômico” para o cérebro, em que as funções cerebrais são descritas por um “campo dendrítico” (ao invés da dinâmica convencional de neurônio e sinapse), que mais tarde seria matematizado por Umezawa, usando a teoria de campos quânticos. Mais recentemente, o paradigma holográfico foi explorado na abordagem mística

⁵⁰ Se poderia dizer que a abordagem de Bohm diz que tudo está em relação *física* com todo o resto do Universo, mas que, em experimentações particulares *selecionamos* parte deste Universo como sendo o contexto experimental desejado. Mas isso só é válido quando as interações restantes podem ser desconsideradas (devido a intensidades irrelevantes das forças envolvidas, por exemplo). Assim, em um experimento com o átomo de hidrogênio, posso desconsiderar o comportamento do Sol, por exemplo. Ocorre que o “potencial” Quântico é não local, implicando que as forças que dele decorrem não precisam, necessariamente, decair com a distância, não havendo justificativa *a priori* para desconsiderarmos o que quer que seja na montagem do problema e no seu processo de experimentação. Isso, evidentemente, conflita com a própria ideia de experimentação, que traz consigo a ideia de seccionamento da realidade para identificação das variáveis pertinentes em um contexto de análise de seu comportamento relativo.

de Michael Talbot (1991), em seu livro *O universo holográfico*⁵¹.

Uma percepção de que o holismo, segundo o autor, ao menos *permitiria* que o “já enfraquecido naturalismo animista encontrasse na Física quântica um campo fértil para seu ressurgimento.”

Evidentemente, a abordagem estatística *resolveria* o problema anteriormente aludido de se ter $\vec{p}(\vec{r}, t) = 0$, pois tal resultado se referiria a uma média (claramente nula nos exemplos mencionados). Ocorre que tal reposicionamento no nível semântico simplesmente *dissolveria* a interpretação de Bohm.

A despeito de todas essas possíveis oposições à interpretação, ela conta com a adesão entusiástica de um número muito grande de físicos.

1.3.4 Exemplo 4: A Mecânica Quântica de Everett

Hugh Everett (1957), por sua vez, interessado nas aplicações da teoria no contexto relativístico geral, nega o Princípio de Redução do Pacote de Ondas *precisamente* com o uso do argumento de que ele viola a sintaxe profunda da teoria quântica:

How is one to apply the conventional formulation of quantum mechanics to the space-time geometry itself? The issue becomes especially acute in the case of a closed universe.¹ There is no place to stand outside the system to observe it. There is nothing outside it to produce transitions from one slate to another. Even the familiar concept of a proper state of the energy is completely inapplicable. In the derivation of the law of conservation of energy, one defines the total energy by way of an integral extended over a surface large enough to include all parts of the system and their interactions. But in a closed space, when a surface is made to include more and more of the volume, it ultimately disappears into nothingness. Attempts to define a total

⁵¹ Pessoa Jr., Osvaldo. Internet: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7828795/mod_resource/content/1/MQ-Paraiba-Scan.pdf (acesso em 22/03/2024).

energy for a doped space collapse to the vacuum state, zero equals zero (Everett, 1957, p. 142).

Assim, assume que a função de onda $\Psi(\vec{r}, t)$, chamada função de onda universal, possui um caráter objetivo real. Como a equação de Schrödinger é determinista e temporalmente reversível, mas permanece referindo-se (semântica profunda) a sistemas individuais (para a aplicação relativística geral, esse elemento é importante), faz-se necessário assumir algum processo pelo qual um determinado resultado experimental se mantenha estável. O processo de seleção é aquele de decoerência⁵².

Entretanto, todas as saídas experimentais continuam a ter existência objetiva, fruto do caráter objetivo da função de onda; dessa forma, como não aparecem na saída experimental que se apresenta *neste universo*, devem estar aparecendo em algum *outro universo* e, de fato, todas as saídas experimentais são objetivamente reais em cada um de tais universos, que se subdividem a cada experimento realizado, compondo histórias alternativas *inobserváveis*.

Para ficar no exemplo da dupla fenda, a cada entidade quântica que se enviasse e que, finalmente, tocasse o detector, surgiriam objetivamente infinitos resultados, cada qual em um dos infinitos universos, ainda que não possamos acessar tal afirmação, uma vez que temos acesso experimental apenas ao universo em que estamos. Ao final do processo, vale dizer, surgiria (*grosso modo*) a *mesma* figura de interferência em cada um desses infinitos universos, ainda que gerada por caminhos intermediários distintos.

Há, no texto de Everett (1957) toda uma elaboração matemática para sustentar essa perspectiva, mas toda ela envolve a ideia de Observadores e, portanto, como já referido, atua no plano meramente discursivo (para salvar as aparências, dir-se-ia).

⁵² “On the most sophisticated current formulations of the many-worlds interpretation, worlds are taken to be decoherence-induced emergent structures. While this picture is rather different from Everett’s original view, it is in many ways closer to Everett’s view than to DeWitt’s” (BARRETT, 2022, p. 1003).

Não se trata sequer de se criticar o caráter eminentemente fantasioso da interpretação, mas de notar que ela viola um princípio epistêmico da não introdução de *universa ex machina*, empiricamente incontroláveis – e incontroláveis justamente por terem sido aduzidos *no plano discursivo da teoria*. Assim, livramo-nos de um Princípio da Redução do Pacote de Ondas, e suas dificuldades de ancoragem nos níveis profundo e narrativo da teoria, pagando o preço de termos que admitir Multiversos, que apresentam as mesmas dificuldades semânticas⁵³.

A despeito disso, a interpretação de Muitos Mundos (que é uma extensão da obra de Everett, de fato), conta com inúmeros seguidores na comunidade de físicos.

1.4 O papel da empiria no processo de geração de sentido

Até aqui vimos analisando uma dimensão puramente textual relacionada à interpretação de teorias físicas. Entretanto, é evidente que a empiria participa desse processo, não apenas em um contexto de teste das relações simbólicas que comparecem nos níveis profundo e narrativo, mormente esse último, mas também na própria sugestão de articulações simbólicas que comparecem nas atribuições de referentes para as instâncias profundas da teoria.

As linhas de força de Faraday, que, mais à frente, se tornariam os campos de Maxwell, são um exemplo disso. A própria noção de “carga elétrica” pode ser considerada outro exemplo. Assim, no processo de experimentação ocorre uma transição vertical de ida e volta entre os níveis profundo e narrativo, principalmente, no sentido de se atribuir referentes para os símbolos básicos da teoria (campos, cargas, fluxos etc.), do nível narrativo para o profundo, assim

⁵³ Do ponto de vista *lógico*, defensores da Intepretação de Muitos Mundos constroem um ensemble de universos. Assim, ao invés de atribuir o descritor $\psi(\vec{r}, t)$ a ensembles *neste Universo*, atribuem a eles os universos de atualizações experimentais.

como de testagem das relações que surgem no nível narrativo a partir das articulações desenvolvidas a partir da sintaxe e semântica do nível profundo.

Isso deve ser assim porque os experimentos já trazem elementos teóricos predeterminados, que permitem interpretar os movimentos de suas partes (apontadores, painéis, números digitais etc.) em termos da presença ou ausência de elementos da teoria física e sua interrelação no contexto da experimentação.

O experimento da gota de óleo de Millikan (cf. Figura 1-2), para citar um exemplo concreto, só faz sentido em um contexto em que elementos simbólicos como força gravitacional, força elétrica, equilíbrio, massa, carga, campo elétrico, ionização, *elétrons* (como hipótese), dentre outros, permitam compreender o que significa a gota de óleo carregada ficar parada no visor do aparato experimental. É *a partir* desses elementos teóricos que se pode chegar ao valor da carga do elétron (visto que, à época, era conhecido apenas o valor da razão entre carga e massa). Consideramos mesmo que é essa transição constante, promovida pela empiria, entre os níveis profundo e narrativo que dá à abordagem experimental a sua força comprobatória (em particular na sua dimensão preditiva), permitindo que seja um elemento crucial no critério de verdade ou adequação da Física, desde o fim da Idade Média até os dias atuais.

A dimensão experimental, produtora e consumidora de referências para os símbolos da teoria e suas articulações, em um contexto de verdade por correspondência, é um elemento *extralinguístico* do processo gerador de sentido, mas que, *no presente estudo*, tem menor relevância por estarmos voltados para a compreensão de interpretações distintas em situação de subdeterminação experimental de teorias físicas.

Neste sentido, nos afastamos em parte da perspectiva de Greimas e Courtés, para os quais *tudo é texto*. Ainda que se possa fazer a “textualização” da produção de sentido de caráter experimental, isso não só traria pouca informação às análises, como eventualmente as deformaria frente à ideia de se ter verdade por correspondência, uma perspectiva que necessariamente inclui

elementos textuais e não textuais. Em particular, impactaria negativamente na questão do caráter não-arbitrário do estabelecimento dessa verdade, uma vez que envolve uma dimensão (a dos sistemas naturais) que escapam ao tipo de flexibilidade que se têm frente à textualidade usual, transformando verdade por correspondência em mera coerência, se tanto.

Essa é a diferença entre um texto *científico* e um texto qualquer. Um texto científico está submetido a vínculos metodológicos próprios de seu campo de articulação (e.g. reprodutibilidade dos achados experimentais etc.) que não fazem parte do contexto usual das línguas naturais. A Física, pois, é uma *linguagem*, não uma *língua*⁵⁴.

É a essa dimensão de linguagem que qualificamos e posicionamos as perspectivas deste trabalho no contexto da tese de Duhem-Quine sobre a subdeterminação de teorias (especificamente as teorias físicas), como mostraremos na seção seguinte.

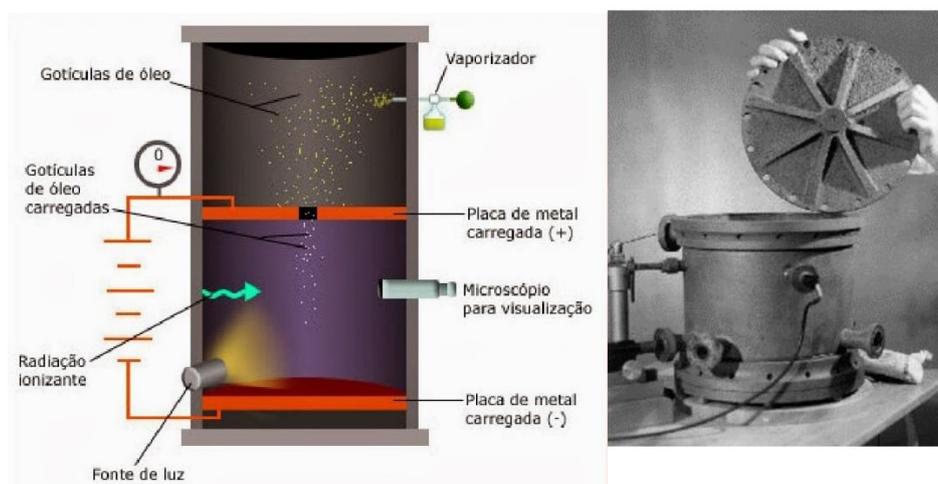


Figura 1-2 - Experimento de Millikan em uma visão esquemática e com o aparato experimental real.

⁵⁴ É fato que as línguas naturais também possuem dimensão metodológica de caráter, geralmente, pragmático. Assim, por exemplo, não é razoável que uma pessoa, no desejo de transmitir uma informação a outra, detalhe suas considerações e as especifique a tal ponto que a própria mensagem se torna obscura e de difícil compreensão (GRICE, 1991). Essa é uma questão metodológica, certamente, mas de caráter pragmático e que em nada se assemelha às dimensões metodológicas da ciência. Não se trata, pois, de dizer que nas línguas naturais vale tudo, mas que os requisitos metodológicos são de naturezas diferentes e, por isso, requerem, mesmo na consideração textual, abordagens diversas.

1.5 Subdeterminação de interpretações

Como já mencionamos anteriormente (ver nota 15), o ponto central da tese de Duhem-Quine é que, em certo momento, pode não haver suficiente evidência experimental que permita fazer uma escolha dos tipos de crença que devemos assumir. Duhem introduziu a questão, fornecendo inúmeros exemplos dela, e seu posicionamento foi posteriormente desenvolvido por Quine de tal forma que a tese de Duhem-Quine passou a defender que não se pode testar experimentalmente uma proposição isolada de uma teoria física, pois esta proposição vem sempre conectada a inúmeras outras suposições, inclusive relacionadas com os aparelhos experimentais. Assim, uma visão mais mitigada dessa abordagem é aquela que defende que o que se testa experimentalmente é um *feixe* de proposições, e não uma proposição isolada. Outros, entretanto, assumem que é o total de teorias que entra em questão a cada teste experimental que se pretende fazer de uma única proposição explicitada – a questão da subdeterminação holística. Nessa perspectiva,

a totalidade dos nossos chamados conhecimentos ou crenças, desde as questões mais casuais da geografia e da história até às leis mais profundas da física atômica ou mesmo da matemática pura e da lógica, é um tecido feito pelo homem que interfere na experiência apenas nas bordas. Ou, para mudar de ideia, a ciência total é como um campo de força cujas condições limite são a experiência. Um conflito com a experiência na periferia ocasiona reajustes no interior do campo. Mas o campo total é tão subdeterminado pelas suas condições limítrofes, a experiência, que há muita liberdade de escolha quanto a quais afirmações reavaliar à luz de qualquer experiência contrária. Nenhuma experiência particular está ligada a quaisquer afirmações particulares no interior do campo, exceto indiretamente através de considerações de equilíbrio que afetam o campo como um todo. (QUINE, 1951, pgs. 42–3)

Há, entretanto, uma versão diversa dessa perspectiva, ainda que conectada com ela, que pode ser chamada de subdeterminação contrastiva. A perspectiva contrastiva, em comparação com a perspectiva holística,

envolve a possibilidade bastante diferente de que, para qualquer conjunto de evidências que confirmem uma teoria, possa muito bem haver *outras teorias* que também sejam bem confirmadas por esse mesmo conjunto de evidências. Além disso, as alegações de subdeterminação de qualquer uma destas duas variedades fundamentais pode variar em força e carácter de inúmeras maneiras: poder-se-ia, por exemplo, sugerir que a escolha entre duas teorias ou duas formas de rever as nossas crenças é *transitoriamente* subdeterminada simplesmente pelas evidências que temos atualmente ou, em vez disso, *permanentemente* subdeterminadas por *todas as evidências possíveis*. (STANFORD, 2023 – itálicos no original em inglês)

Assim, se considerarmos um mesmo aparato sintático básico com duas ou mais interpretações distintas como duas *teorias* distintas, é a perspectiva contrastiva que estamos abordando neste trabalho, e especificamente quanto à interpretação destas, que exemplificaremos com o caso particular da Mecânica Quântica.

Alguns filósofos assumem, então, que essa subdeterminação pode ser resolvida a partir de elementos *externos* à teoria. Dentre esses, há aqueles que defendem que tais elementos decorrem de instâncias ligadas à Sociologia das Ciências (BLOOR 1991, COLLINS 1992, SHAPIN & SCHAFFER 1985), incluindo estudos feministas como em Longino (1990, 2002).

Este trabalho defende que o instrumento necessário para se superar tal subdeterminação (não necessariamente para a obtenção de *uma* interpretação, mas rumo à forte diminuição de suas possibilidades) é de *ordem linguística*, ou seja, se constitui *internamente à linguagem da Física a partir da percepção de que esta se organiza segundo diferentes níveis, tanto sintáticos, quanto semânticos*, e que tais níveis possuem diferentes valores epistêmicos, o que permite a hierarquização de diversas proposições. Em certa medida, essa abordagem vai na mesma direção da perspectiva de Quine, segundo a qual seria interessante se tentar adequar as teorias a partir das suas fronteiras, mantendo, sempre que possível, seu núcleo inalterado – apenas o faz a partir de uma análise linguística (particularmente semântica) do discurso da Física, não sendo, pois, uma abordagem pragmática, mas ainda normativa. Não se trata, ainda, de

buscar reformulações de teorias físicas frente a eventuais invalidações experimentais, mas de hierarquizar suas interpretações *mesmo quando tais invalidações não estão presentes*. Nesse sentido, a subdeterminação (em grande parte) seria devido à não consideração dessa dimensão linguística da teoria que, uma vez considerada, se mostra capaz de reduzir drasticamente o grau de subdeterminação, hierarquizando as propostas de interpretação existentes.

Reconhecemos que o próprio instrumento proposto pode ser submetido às mesmas questões acerca do holismo, algo já argumentado na literatura. Ocorre que não é nosso interesse *resolver* o problema *filosófico* da perspectiva holista ou daquela contrastiva (e de seus desdobramentos na questão do racionalismo científico), mas apresentar um instrumento capaz de resolver problemas que possam ser caracterizados como subdeterminados quanto à interpretação *no contexto de teorias físicas*.

1.6 A busca pelas razões

Mentes, Totalidades, Multiversos... O que pode estar ocorrendo para que comunidades inteiras de físicos adotem tais interpretações? Não se imaginaria um físico clássico, um Newton, por exemplo, que tinha lá suas mistificações, aceitando o comparecimento de tais elementos *em sua Física*.

Algum novo princípio, algum elemento da semântica, que permanece ativo em todas essas interpretações, provavelmente invisível à plena vista, deve estar no centro dessa “liberalidade” interpretativa que dá espaço para tantas e tão díspares interpretações de um mesmo fenômeno.

Entretanto, já podemos estabelecer aqui os princípios metodológico-semântico de comparações entre interpretações, especialmente aquelas em que se verifica uma subdeterminação empírica. Os dois primeiros níveis possuem *precedência epistemológica* sobre o nível discursivo. O nível profundo por

estabelecer, de uma vez, a sintaxe e a semântica básica da teoria, ao explicitar os seus descritores principais, seus referentes naturais e suas interrelações a partir de leis fundamentais. Em segundo lugar, o nível narrativo por representar o processo propriamente de *desdobramento* da teoria nas suas consequências formais e experimentais e, por isso mesmo, interpretativas. De particular relevância é a consideração de que é nesse nível narrativo que se localizam as comparações experimentais entre o que a teoria prediz ou descreve e o que se obtém do experimento, usando-se a mesma semântica profunda.

O nível discursivo, por sua vez, possui descolamento dos dois primeiros níveis – não apenas sugerindo novos construtos ontológicos que não encontram correlatos sintáticos (na sintaxe profunda), como sugerindo processos (geralmente baseados nesses próprios construtos discursivos) que buscam, quase sempre, *salvar (a interpretação d)os fenômenos*⁵⁵.

Assim, segundo essa abordagem, interpretações com forte apelo ao nível discursivo, ainda que possam cumprir importante papel histórico, *são epistemologicamente mais fracas* do que interpretações que aderem mais fortemente aos seus níveis profundo e narrativo. *Esse é, afinal, o princípio que fundamentará os desdobramentos apresentados nos próximos capítulos.*

Nos capítulos que se seguem, passaremos à aplicação da metodologia que explicitamos neste capítulo. Assim, iremos, inicialmente, abordar a noção de paradoxos, e como essa noção foi recebida pela Física Moderna, via Interpretação de Copenhagen e o Princípio de Complementaridade, ganhando proeminência em diversas interpretações que aderem a este princípio. Será necessário, entretanto, alguma digressão. Nossa busca, já afirmamos, é por um enquadramento da Interpretação de Copenhagen no quadro geracional de sentido de Greimas e Courtés para, posteriormente, compará-la com a abordagem Estocástica Estendida.

⁵⁵ Toda a Física Aristotélica se encontra nesse plano discursivo, em particular por não ter uma sintaxe (como matemática) associada. A grande obra de Galileu (2001) pode ser lida como um embate travado *nesse plano*.

Capítulo 2. Percurso histórico de um paradoxo

2.1 Antecedentes do século XIX:

Após o estabelecimento da Mecânica Newtoniana, e com o estudo da Óptica Geométrica, emergiram duas ontologias que visavam descrever a luz: uma em termos corpusculares, defendida por Newton, e outra em termos ondulatórios, defendida principalmente por Huygens. Essa disputa entre ontologias irá desembocar no século XIX com força total, uma vez que duas grandes áreas da Física, a Teoria Eletromagnética e a Teoria Cinética dos Gases, estariam, cada qual, baseada em uma dessas ontologias.

O resultado desse embate, em particular devido ao enorme sucesso de ambas as teorias, foi que, ao final do século XIX, encontramos duas ontologias mutuamente excludentes embasando fortemente dois campos distintos e largamente bem-sucedidos da Física, gerando, nos físicos da época, uma forte confiança naquilo que preconizavam.

Essa forte confiança, juntamente com o advento de muitos experimentos feitos no último quarto do século XIX, estabeleceram as condições conceituais para o advento da primeira interpretação da Mecânica Quântica, apresentada em 1927, com dois pressupostos que serão centrais para o que desejamos argumentar: a existência de algum tipo de dualidade (onda-partícula), codificada no Princípio de Dualidade, e o Princípio de Complementaridade, introduzido por Bohr. Mais importante, mostraremos sucintamente o caminho histórico que levou à concepção de que deve(-ria) haver, no cerne e constitutivos da Mecânica Quântica, *paradoxos*.

A seguir, apresentamos, sem intenção de sermos exaustivos, algumas observações introdutórias sobre a situação da querela sobre a composição da

luz anterior ao século XIX e os enormes desenvolvimentos que ocorreram neste século⁵⁶.

2.2 Rumo ao século XIX

Se podemos ver a Mecânica como uma história das concepções de espaço, tempo e matéria ao longo dos séculos, é igualmente verdade que podemos abordar a Teoria Eletromagnética e a Óptica como o desenvolvimento da disputa sobre a natureza e as propriedades da luz.

A propagação retilínea da luz e os fenômenos de reflexão e refração já eram conhecidos por antigos filósofos, interessados na natureza da luz. Alguns dos primeiros estudos sistemáticos sobre as características da luz foram feitos por filósofos gregos (por exemplo, Empédocles, cerca de 490-430 a.C.) e matemáticos (Euclides, cerca de 300 a.C.). Os gregos daquela época já conheciam a lei da reflexão (ângulos iguais) (avo, 1981).

O advento do método experimental permitiu aos filósofos naturais modernos colocar o campo da Ótica Geométrica em bases sólidas, tanto do ponto de vista teórico, quanto empírico. O próprio Galileu publicou um relatório, em 1638, sobre suas tentativas para medir a velocidade da luz⁵⁷.

⁵⁶ Repisamos, neste ponto, que este capítulo não visa uma abordagem historiográfica das questões, mas *lógica*. Lido como historiografia, ele implicaria em uma sanitização deformante dos processos históricos que engendram interpretações, quase sempre repletos de idas e vindas, adesões e retratações. É, pois, uma reconstrução lógica, apenas, no sentido de buscar o *encadeamento de conexões conceituais* que se estabilizaram ao longo da história, sem envolver seu detalhamento em cada momento em que os conceitos foram apresentados e discutidos, suas alternativas ou problematizações. A sequência aqui adotada segue de perto a apresentação de Purrington (1997).

⁵⁷ Nesse relato, Galileu nos conta que ele se posicionou no topo de uma colina com uma lâmpada na mão, enquanto um de seus auxiliares permaneceu no topo de outra colina com outra lâmpada. Ao ver o relâmpago da lâmpada de Galileu, seu assistente deveria remover o pano que cobre sua própria lâmpada. Dessa forma, Galileu pensou que seria capaz de medir a velocidade da luz sabendo o tempo necessário para que a luz chegasse a ele (KOSSOVSKY, 2020, pg. 141).

A lei da refração foi descoberta experimentalmente em 1621 por Willebrord Snell (Snellius, 1591-1626). Já em 1657, Pierre de Fermat (1601-1665) enuncia o princípio do menor tempo de propagação, pelo qual a luz sempre leva o menor tempo possível para viajar de um ponto a outro do espaço considerando-se, como métrica, o índice de refração do meio. Apesar de seus desenvolvimentos, a Ótica Geométrica foi (e é) incapaz de decidir a polêmica sobre a natureza da luz: corpuscular, como muitos físicos com tendências newtonianas defenderiam, ou ondulatória, como físicos como Christian Huygens (1629-1695), Robert Hooke (1635-1703) e outros sustentariam.

Deve-se notar, entretanto, que muitos fenômenos que seriam capazes de distinguir as visões corpuscular e ondulatória sobre a natureza da luz já eram experimentalmente conhecidos na época de Newton; por exemplo, o fenômeno de interferência por filmes finos, atualmente conhecido como “anéis Newtonianos”, foi descoberto independentemente por Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke. Na verdade, Hooke também observou o fenômeno em que a luz pode ser encontrada na sombra geométrica de corpos iluminados. Esse fenômeno já havia sido relatado por Francesco Maria Grimaldi (1618-1663). Hooke pode ser considerado o precursor do princípio geométrico de Huygens no que diz respeito à construção de frentes de onda, uma vez que ele foi o primeiro a sustentar que a luz deveria consistir em vibrações rápidas (ou eventualmente instantâneas) propagando-se através do meio, de tal forma que cada vibração gera, a cada instante do tempo, ondas esféricas secundárias. O debate sobre a natureza da luz implicava também a disputa sobre a natureza do espaço (vazio ou éter) e isso teria muitas implicações para a Física dos séculos XIX e XX.

Hooke também tentou explicar os fenômenos de refração e dispersão de cor, mas o último foi caracterizado por Newton (1642-1727) em 1666, mostrando que a luz branca pode ser dividida em cores componentes usando um prisma, e que cada cor particular deve ser associada a uma mudança específica de direção (as relações de dispersão, como diríamos hoje). Entretanto, as dificuldades da teoria ondulatória em fornecer, à época, uma boa explicação para a polarização da luz foram um grande obstáculo para sua aceitação.

Esse fenômeno poderia ser compreendido a partir da abordagem corpuscular e do modelo pelo qual os corpúsculos de luz deveriam ter “tamanhos”⁵⁸.

Não são os Raios de Luz Corpos muito pequenos emitidos por substâncias brilhantes? (...). Nada mais é necessário para produzir toda a variedade de Cores, e graus de Refrangibilidade, do que os Raios de Luz serem Corpos de Tamanhos diferentes, o mínimo dos quais pode ser violeta, a mais fraca e mais escura das Cores, e ser mais facilmente desviado refratando as Superfícies do Curso certo; e o resto como Eles são cada vez maiores, podem tornar as cores mais fortes e mais lúcidas, azul, verde, amarelo e vermelho, e ser cada vez mais desviadas. (NEWTON, 1996, 29th Query)

Com isso, Newton foi capaz de resolver diversos problemas da óptica de seu tempo⁵⁹:

Assim, conjecturou Newton, a luz consiste em corpos materiais, movendo-se em linha reta por um meio homogêneo, com velocidades independentes da cor (pois de outra forma e o feixe envelhecido da luz branca mudaria de cor), mas com tamanhos (pesos) que são diferentes para diferentes cores. A partir dessa hipótese, ele foi capaz de explicar quantitativamente uma variedade de fenômenos ópticos, incluindo as leis da refração da luz. (PAIS, 1991, p. 55)

De várias maneiras, incluindo a política, o atomismo newtoniano desempenhou um papel considerável a favor da perspectiva corpuscular. De fato⁶⁰,

⁵⁸“Are not the Rays of Light very small Bodies emitted from shining substances? (...) Nothing more is requisite for producing all the variety of Colors, and degrees of Refrangibility, than that the Rays of Light be Bodies of different Sizes, the least of which may make violet, the weakest and darkest of the Colors, and be more easily diverted by refracting Surfaces from the right Course; and the rest as they are bigger and bigger, may make the stronger and more lucid Colors, blue, green, yellow and red, and be more and more difficultly diverted.”

⁵⁹“Thus, Newton conjectured, light consists of material bodies, moving in straight lines through a homogeneous medium, with velocities independent of color (since otherwise and aging beam of White light would change color), but with sizes (weights) that are different for different colors. From this hypothesis he was able to account quantitatively for a variety of optical phenomena including the laws of light refraction.”

⁶⁰“There were natural philosophers of the highest distinction, Hooke, Leibniz, Euler, and, of course, Huyghens among them, who were strongly critical of the corpuscular Picture. Newton’s authority was so immense, however, that, all told, his views held the Upper hand all through the eighteenth century.”

Havia filósofos naturais da mais alta distinção, Hooke, Leibniz, Euler, e, claro, Huygens entre eles, que eram fortemente críticos da perspectiva corpuscular. A autoridade de Newton era tão grande, entretanto, que, ao final, suas visões suplantaram as outras através do século dezoito. (PAIS, 1991, pg. 57)

Huygens foi certamente o seguidor mais proeminente das ideias de Hooke e seu princípio foi fundamental para dar credibilidade ao modelo ondulatório, uma vez que foi capaz de explicar os fenômenos de reflexão e refração da luz de forma sistemática⁶¹.

Em 1690, Christian Huygens publicou seu *Traité de la Lumière*, (...) propôs que a luz 'se espalha, como o som, por superfícies esféricas e ondas: pois eu as chamo de ondas por sua semelhança com aquelas que se veem ser encontradas em água quando uma pedra é atirada nela '. (...) Essas analogias plausíveis levantam uma nova questão crucial. Uma pedra cria ondas na água. (...) Qual é a transmissão correspondente para ondas de luz? (...) Huygens postulou que deve ser outra forma de matéria, "matéria etérea", isto é, "uma substância material de um tipo mais sutil do que os corpos visíveis, supostamente existente nas partes do espaço que estão aparentemente vazias. (PAIS, 1991, p. 56).

Huygens também foi responsável pela interpretação da refração dupla, descoberta em 1669 por Erasmus Bartholinus (1625-1698). Sua interpretação baseou-se na hipótese de que, no cristal, além das ondas esféricas primárias, deveria haver também uma onda elipsoidal secundária. Foi durante essas investigações sobre a refração dupla que Huygens descobriu a polarização da luz. Uma vez que, na época de Huygens, a luz não era reconhecida como uma onda transversal, a explicação de sua possível polarização não estava disponível e foi Newton que interpretou (aceitavelmente) o fenômeno, assumindo que os corpúsculos de luz têm "lados" [Cf. Questão 26, Livro III, Óptica (NEWTON, 1996)]. Como já dissemos, a interpretação da polarização, junto com a

⁶¹ "In 1690 Christian Huygens had published his *Traité de la Lumière*, (...) proposed that light 'spreads, as Sound does, by spherical surfaces and waves: for I call them waves from their resemblance to those which are seen to be found in water when a stone is thrown into it'. (...) These plausible analogies raise a crucial new question. A stone creates waves in water. (...) What is the corresponding transmission for light waves? (...) Huygens postulated that it must be another form of matter, 'Ethereal matter', that is, 'a material substance of a more subtle kind than visible bodies, supposed to exist in those parts of space which are apparently empty ..."

autoridade de Newton, contribuiu para uma aceitação hegemônica do modelo corpuscular para a Natureza da luz, ainda que o modelo ondulatório tenha recebido a adesão de alguns personagens intelectualmente muito significativos. O fato é que, “em 1700, entretanto, estas duas teorias teriam que ser consideradas *incompatíveis*” (PAIS, 1991, pg. 56 – grifo meu).

A descoberta de que a velocidade da luz é finita foi feita em 1675, quando Olaf Römer (1644-1710) mostrou que a anomalia nos satélites de Júpiter poderia ser explicada com essa hipótese⁶². Apesar disso, os debates sobre o caráter finito da velocidade da luz transcorreram durante os três primeiras décadas do século XVII até que, em 1729, James Bradley (1693-1762) finalmente decidiu a questão ao publicar seus cálculos da velocidade da luz proveniente de fenômenos de aberração causados pelo movimento orbital da Terra (suas descobertas foram bastante próximas às de Römer).

Do ponto de vista da disputa entre os modelos corpuscular e ondulatório, chegamos ao primeiro quarto do século XIX com uma clara hegemonia do modelo corpuscular, mas o século XIX teria muito mais a dizer sobre essa disputa.

Já em 1801, Thomas Young (1773-1829) enunciava o princípio da interferência e explicava, em termos ondulatórios, as cores obtidas em filmes finos⁶³:

Nenhuma série de ondas destruirá a outra, mas seus efeitos serão combinados: se (...) as elevações de uma série coincidem com as da outra, elas devem produzir juntas uma série de elevações conjuntas maiores; mas se as elevações da série estão situadas de modo a corresponderem à depressão da

⁶² De fato, Römer relatou uma variação nos tempos de observação quando a lua Io, em sua órbita ao redor de Júpiter, foi eclipsada por este planeta; ao trabalhar a correlação entre essa variação e as posições relativas da Terra e de Júpiter, ele calculou a velocidade da luz necessária para viajar de Io para a Terra (22min, bem próximo ao valor moderno de 17min).

⁶³ “Neither series of waves will destroy the Other, but their effects will be combined: if (...) the elevations of one series coincide with those of the other, they must together produce a series of greater joint elevations; but if the elevations of one series are so situated as to correspond to the depression of the Other, they must exactly fill up those depressions, and the surface of the water must remain smooth (...) Now I maintain that similar effects take place whenever two portions of light are thus mixed; and this I call the general law of the interference of light.”

outra, elas devem preencher exatamente essas depressões, e a superfície da água deve permanecer lisa (...) Agora mantenho que efeitos semelhantes acontecem sempre que duas porções de luz são assim misturadas; e isso eu chamo de lei geral da interferência da luz. (YOUNG *apud* PAIS, 1991, p.57)

No entanto, suas explicações ainda eram excessivamente qualitativas e não puderam reverter as convicções dos físicos sobre a adequação do modelo corpuscular. Nessa época, aproximadamente, Étienne Louis Malus (1775-1812) descobriu a polarização da luz por reflexão ao observar que a luz, que passava por sua janela e incidia sobre um pedaço de cristal, produzia uma imagem por dupla refração que variava em intensidade quando o cristal era girado em relação à linha de visão.

O modelo corpuscular da luz, entretanto, continuava a ser desenvolvido por físicos como Pierre Simon de Laplace (1749-1827) e Jean-Baptiste Biot (1774-1826). Laplace era muito influente à época na Academia Francesa de Ciências e propôs um concurso sobre o problema da difração. Ele esperava que uma explicação corpuscular fosse encontrada, comprovando a maior adequação do modelo corpuscular. Suas expectativas foram frustradas quando, apesar da forte oposição, o prêmio foi entregue a Augustin Jean Fresnel (1788-1827), que tratou do fenômeno de difração a partir exclusivamente do modelo ondulatório e anunciou também uma série de experiências que, no decorrer de alguns anos, desacreditaria totalmente o modelo corpuscular para a luz.

Curiosamente, Poisson, que era seguidor do modelo corpuscular, observou que os resultados de Fresnel, se corretos, deveriam dar origem (nível narrativo) a um fenômeno impensável: se a luz passasse por uma região ocupada por um disco opaco, no centro da sombra produzida pelo disco deveria aparecer um ponto brilhante! Poisson então argumentou que esse resultado absurdo deveria ser considerado como uma evidência de que deveria haver algo errado com as hipóteses assumidas por Fresnel, particularmente com respeito à natureza ondulatória da luz. Para desespero dos adeptos do modelo corpuscular, Dominique François Arago (1786-1853) realizou um experimento que confirmou a existência do ponto brilhante mencionado por Poisson. Isso fez com que o

modelo ondulatório passasse de um status descritivo para um status preditivo, adquirindo um poder de persuasão muito maior.

Junto com Arago, Fresnel estudou a interferência de dois raios polarizados e descobriu (1816) que dois raios, perpendicularmente polarizados um em relação ao outro, não interferem. Uma vez que tal descoberta não pode ser ajustada dentro de um modelo ondulatório com ondas longitudinais, concluiu-se que deveria ser assumido um modelo transversal para a propagação da luz - removendo assim o maior obstáculo para a aceitação do modelo ondulatório⁶⁴:

Huygens achou que era longitudinal. Em 1817, Young sugeriu, entretanto, que as ondas de luz são, pelo menos em parte, transversais. Pouco tempo depois, Fresnel mostrou que as ondas transversais são necessárias para explicar a refração dupla. Na verdade, a luz é puramente transversal, mas demorou muito mais para ser apreciada. (PAIS, 1991, pg. 60)

O modelo de onda transversal, entretanto, trazia problemas para a hipótese de um éter luminífero, visto que, como Fresnel (um de seus maiores entusiastas) observou, apenas um sólido deveria ser capaz de sustentar ondas transversais. Fresnel também foi responsável pela hipótese (1821) de que o calor poderia ser explicado por uma teoria molecular da matéria. Esse fato mostra que Fresnel estava assumindo um modelo ondulatório para a luz, enquanto defendia o modelo corpuscular para a matéria (atomismo).

Modelos para um éter sólido foram desenvolvidos por Fresnel e levaram-no a encontrar leis (agora com seu nome) que explicam o comportamento da intensidade e polarização da luz produzida por reflexão e refração. Muitas das teorias do éter sólido foram desenvolvidas por Louis Marie Henri Navier (1785-1836) e Augustin Louis Cauchy (1789-1857).

Na década de 1850, a teoria corpuscular da luz estava quase completamente desacreditada. O golpe final veio com o experimento feito

⁶⁴“Huyghens thought it was longitudinal. In 1817 Young suggested, however, that light waves are at least in part transverse. Shortly thereafter, Fresnel showed that transverse waves are necessary to account for double refraction. In actual fact light is purely transverse, but that took much longer to appreciate.”

independentemente por Foucault e Fizeau, e Breguet, mostrando que a velocidade da luz era menor em meios mais densos⁶⁵.

Embora muitos problemas tenham sido resolvidos pelo modelo ondulatório na primeira metade do século XIX, os fundamentos da Óptica ainda eram considerados insatisfatórios (não havia, ainda, uma semântica e sintaxe profundas). Este fato deve servir como exemplo de que os fundamentos de uma teoria física vêm, geralmente, muito mais tarde, frequentemente depois que suas aplicações, *que ensejam inúmeros modelos particulares*, já estão estabelecidas, de modo que esses fundamentos são mais adequados para nos dizer o que é a Natureza, do que para resolver problemas práticos. Estamos ainda em um momento anterior ao estabelecimento final da teoria eletromagnética por Maxwell (realizado em 1873) que ligaria os campos da Óptica, da Eletricidade e do Magnetismo, e daria ao modelo ondulatório seus contornos finais.

2.3 Ondas e a teoria eletromagnética

O surgimento da teoria eletromagnética tem sua própria história complexa⁶⁶. Junto com a noção de ondas, uma das novas noções mais proeminentes foi aquela de “campo”.

Um dos primeiros físicos a desenvolver a noção de campo foi Michael Faraday (1791-1867), embora não em termos matemáticos, já que Faraday era pouco versado em formalizações. Faraday foi discípulo de Humphrey Davy (1778-1829) e tomou conhecimento da experiência de Hans Christian Oersted (1777-1851) em 1819, na qual uma corrente elétrica faz uma agulha desviar.

⁶⁵ O modelo corpuscular usaria a conservação do momento linear para obter seus resultados sobre a velocidade da luz - e esses resultados levam a velocidades maiores em meios mais densos.

⁶⁶ Não visamos apresentar uma descrição histórica detalhada do Eletromagnetismo. Nossos interesses aqui repousam sobre a importância da Teoria Eletromagnética para o debate entre as visões corpuscular e ondulatória (no escopo do fornecimento de uma ontologia para a luz). Continuamos usando o texto de Purrington (1997) como base para nossas descrições.

Faraday interessou-se pelas relações entre eletricidade e magnetismo e, em 1821, descobriu a rotação magnética, tendo até construído o que poderia ser chamado de um precursor do motor elétrico.

Com a descoberta da indução magnética, em 1831, ele começou a formular suas questões em termos de linhas de força, ao invés de apenas em termos de força. Sendo um feroz adversário da noção de “ação à distância”, passou a trabalhar com a noção de linhas de força (como sendo verdadeiramente existentes, no mesmo sentido da matéria)⁶⁷. Perto da metade do século XIX, Faraday considerava as linhas de força em termos bastante realistas, como sendo capazes de serem polarizadas de forma a explicar a polarizabilidade dos materiais⁶⁸.

Na época da morte de Faraday (1867), suas obras estavam causando uma forte impressão em dois grandes físicos do século XIX: William Thomson (Lord Kelvin of Largs, 1824-1907) e James Clerk Maxwell (1831-1879). Esses dois cientistas assumiram para si mesmos a tarefa de colocar as intuições de Faraday em termos matemáticos estritos. Thomson foi, de fato, o primeiro a reconhecer a riqueza das obras de Faraday (embora inicialmente ele não as tivesse levado muito a sério). A amizade com Stokes permitiu a Thomson construir *modelos matemáticos para estudar as interações elétricas e magnéticas*, mas ao custo de abandonar o conceito de linhas de força, substituídas pela noção de torção em meios elásticos. Em 1847, Thomson escreveu que:

O que escrevi é apenas um esboço de uma analogia matemática. Não tive a intenção nem de sugerir seu uso como fundamento de uma teoria sobre a propagação das forças elétricas e magnéticas, que, se totalmente estabelecida,

⁶⁷ A noção de linha de força nos termos de Faraday é bastante complexa e se baseia em uma noção de átomo derivada do filósofo Roger Joseph Boscovitch (1711-1787), na qual esses átomos eram considerados entidades sem extensão, mas capazes de transmitir forças (Boscovitch usou essas noções para amalgamar a ideia de corpúsculos materiais de Newton e as mônadas Leibnizianas) (PULLMAN, 1998, pg. 176).

⁶⁸ A explicação de Faraday para sua lei de indução, por exemplo, é baseada na suposição de que quando movemos um condutor através de um campo magnético (ou vice-versa), cortamos as linhas de força que reagem e geram uma corrente elétrica dentro do condutor

expressaria como resultado necessário a conexão entre as forças elétricas e magnéticas. (...) Se tal teoria pudesse ser descoberta, também explicará, quando considerada em conexão com a teoria ondulatória da luz, o efeito do magnetismo na luz polarizada⁶⁹. (William Thomson. Carta de Thomson para Faraday, junho, 11 de junho de 1847; *Apud* (PURRINGTON, 1997, pg. 61)).

Thomson teve muita influência sobre Maxwell, particularmente ao apresentá-lo ao trabalho de Faraday e convencê-lo de que as intuições de Faraday podiam ser profícuas. Em 1855-56, Maxwell publicou seu trabalho *On Faraday's Lines of Force*, no qual a teoria de campo imaginada por Faraday aparece em bases matemáticas sólidas. Para tanto, Maxwell utilizou um modelo baseado no comportamento dos fluidos que considerou apenas uma analogia útil, embora imaginária. Em seus últimos estudos, Maxwell absorveu a influência de Thomson e começou a usar o modelo rotatório, baseado nas noções de vórtices de Thomson, para o qual Maxwell buscou uma base mecânica. Por volta de 1860, o *modelo mecânico de Maxwell* para os vórtices de Thomson já estava abandonado e apenas a formulação matemática havia permanecido.

As equações de Maxwell, publicadas em 1873 (MAXWELL, 1954), unificaram os domínios da Eletricidade, do Magnetismo e da Óptica. Em sua estrutura, as equações de propagação da luz são inequivocamente representadas por equações de onda e isso parecia resolver o problema da natureza da luz (na época ligada à noção de éter). Do ponto de vista do presente trabalho, as equações de Maxwell (e a interpretação de seus símbolos), forneceram à teoria sua semântica profunda. De fato, não é incomum que a semântica profunda surja consideravelmente depois da constituição, ainda que assistemática, do nível narrativo e discursivo de uma teoria – e parte considerável do processo de depuração da teoria consiste, precisamente, em revê-la a partir desse surgimento.

⁶⁹ "What I have written is merely a sketch of the mathematical analogy. I did not venture even to hint at the possibility of making it the foundations of a physical theory of the propagation of electric and magnetic forces (...) If such a theory could be discovered, it would also, when taken in connection with the undulatory theory of light, in all probability explain the effect of magnetism on polarized light."

Como todos sabem, essa não foi a última palavra sobre o assunto. O atomismo foi desenvolvido durante todo o século XIX dentro do contexto da teoria da matéria. O próprio Maxwell foi um de seus colaboradores mais brilhantes. Na próxima seção, apresentamos algumas de suas características.

2.4 Matéria e atomismo no século XIX

Nesta seção, estamos interessados em analisar brevemente o processo histórico que ocorreu em paralelo àquele sobre a natureza da luz: a luta para compreender a natureza da matéria. Até certo ponto, a busca aqui é bastante semelhante àquela sobre a natureza da luz: os cientistas estavam interessados em saber se a matéria é um *continuum* ou se é composta por corpúsculos (átomos) mais elementares e distintos.

Esse problema, de fato, pode ser rastreado até o século V a.C., discutido por atomistas gregos como Leucipo e Demócrito e pode ser encontrado em grandes detalhes na obra preservada de Lucrécio, muito tempo depois de sua morte. Os esforços de todos esses filósofos para compreender a natureza usando o atomismo foram revividos na era moderna pelo filósofo natural Pierre Gassendi (1592-1655), contemporâneo de Descartes. A obra de Lucrécio foi recuperada no século XV e Gassendi teve acesso a ela. De fato, na Inglaterra, Francis Bacon disse, em sua obra *Sobre a Filosofia de Demócrito, Parmênides e Telésio*, que “a teoria atômica se distingue entre todas as outras desenvolvidas por ele [Demócrito] como a corrente que melhor conecta as melhores partes da filosofia física dos antigos e do mundo moderno”⁷⁰. (PURRINGTON, 1997, pg. 114)

Até o século XVII, a estrutura discreta da matéria podia ser considerada uma mera hipótese filosófica, sem qualquer suporte empírico. No século XVIII,

⁷⁰ “The atomic theory is selected upon and dwelt upon by him as the chain that connects the best parts of the physical philosophy of the ancient and the modern world”.

algumas considerações sobre a natureza do calor, feitas por Daniel Bernoulli em 1738, colocam essas especulações em um formato adequado à investigação científica. Porém, não foi antes do século XIX, com os trabalhos pioneiros de Lavoisier, Dalton e outros, que o atomismo passou a buscar sistematicamente sua verificação experimental, que o fixaria como um verdadeiro *modelo físico* da Natureza.

Podemos distinguir, por razões pedagógicas, dois tipos de atomismo: químico e físico. Embora o atomismo químico tenha começado com o surgimento do século XIX, as considerações físicas sobre a hipótese atomista começaram (desconsiderando-se a obra de Bernoulli) por volta da segunda metade do século XIX, no âmbito da teoria cinética dos gases, resgatada principalmente de intuições de Bernoulli.

2.4.1 O atomismo químico

Embora o modelo atômico, grosso modo, já tenha sido considerado por físicos da magnitude de Newton e Boyle no final do século XVII e início do século XVIII (PULLMAN, 1998), o que hoje é considerado o surgimento de um atomismo científico sistemático e moderno pode ser remontado às descobertas feitas na transição entre os séculos XVIII e XIX por Antoine-Laurent Lavoisier (1740-1794). Sua primeira descoberta, que afirmava que a água tem uma estrutura composta, foi mortal para a “filosofia dos quatro elementos” dos antigos gregos (remontando a Empédocles)⁷¹. Essa descoberta foi posteriormente confirmada pelos trabalhos de Henry Cavendish (1731-1810) e Joseph Priestley (1733-1804), que também provaram a natureza composta do ar.

⁷¹ Aqui é interessante ressaltar que já encontramos no *Timeu* de Platão uma *doutrina* dos quatro elementos e suas possibilidades de combinação e recombinação. Tal doutrina era essencialmente geométrica e baseada em uma descrição fundada no uso de triângulos (cumprindo papel similar aos átomos da perspectiva atomista – mas em sentido ontológico diverso). O modelo que decorre dessa doutrina é essencialmente de inteligibilidade, uma vez que não foi incorporado a uma teoria da matéria que sistematizasse sintaticamente os processos ali descritos.

Já no início do século XIX, surgiram diversos estudos importantes nessa mesma linha de pensamento, como o relacionado à Lei das Proporções Constantes, de Joseph-Louis Proust (1754-1826), publicado em 1806, e a Lei de Proporções Múltiplas, de John Dalton (1766-1844), publicada entre os anos 1802 e 1804. Em 1808, ao publicar sua obra *Um Novo Sistema de Filosofia Química*, Dalton expôs suas convicções sobre a existência de entidades invisíveis e indestrutíveis que seriam os constituintes primários da matéria.

Um dos maiores avanços desse atomismo inicial foi a suposição de que os átomos deveriam ser caracterizados por seu peso. Logo surgiram outras formas de classificar os elementos por meio de seus supostos constituintes atômicos, sendo a mais importante delas a devida a Jöns Jacob Berzelius (1779-1848). Sua classificação, essencialmente baseada na primeira letra do nome grego do elemento, evidenciou uma característica importante das leis de Proust e Dalton: elas nos dão apenas as razões pelas quais os átomos estão presentes nos elementos, mas não nos dão nenhuma pista à verdadeira estrutura deles - uma ambiguidade que se agrava para substâncias mais complexas.

Essa ambiguidade implicou na possibilidade de uma dupla interpretação dos resultados experimentais: a interpretação atomista, que acabamos de descrever, e uma interpretação equivalentista, cuja origem remonta a 1792, devendo-se a Jeremias Benjamin Richter (1762-1807). Ele, já em 1791, havia descoberto a Lei das relações recíprocas. A noção de equivalência foi formalmente introduzida com este nome por William Wollaston (1766-1828) em sua obra *Synoptic Scale of Chemical Elements*.

Outra fonte de confusão se deve à nomenclatura usada à época. Dalton, entre outros, não fez distinção entre as noções (modernas) de átomos e moléculas. A distinção entre esses dois conceitos começou a ser feita a partir da hipótese de Amedeo Avogadro (1776-1850) e das leis volumétricas de Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850). Essas leis foram desenvolvidas em 1809 e implicaram na transposição para os gases dos resultados das leis de Dalton para líquidos e sólidos. A hipótese de Avogadro (de que volumes iguais de todos os

gases nas mesmas condições de temperatura e pressão têm o mesmo número de moléculas) o levou a distinguir entre moléculas simples (átomos) e moléculas compostas. Assim, por exemplo, a lei de Avogadro permite entender o gás oxigênio como sendo formado por moléculas de O_2 e não por átomos de O .

Apesar de ter um início tão impressionante como química quantitativa, a teoria atômica (ou hipótese atômica, à época) continuou a ser muito criticada. Um dos críticos mais ferozes da abordagem atômica foi o químico francês Jean-Baptiste Dumas (1800-1884). A razão básica para a rejeição da abordagem atomista era que se deveria “recusar qualquer especulação muito distante dos fatos observados” (uma ideia que também estava presente na Física do século XX, embora mitigada). De fato, o positivismo científico do século XIX foi amplamente baseado nessas ideias.

Novos avanços devido ao uso do *modelo atômico* continuaram a aparecer na primeira metade do século XIX. Um exemplo foi a Lei de Dulong e Petit (Pierre Louis Dulong, 1785-1838 e Alexis Thérèse Petit, 1791-1820), anunciada em 1819. Outro belo exemplo foi a determinação mais precisa dos pesos atômicos de novos elementos, feita por Berzelius, Auguste Laurent (1807-1853) e Charles-Berhardt (1816-1907) e a construção de uma lista ampliada de elementos que, em 1869, foi colocada em sua estrutura sistemática por Dmitri Ivanovitch Mendeleev (1834-1907) na forma de uma tabela periódica.

Além dos desenvolvimentos a respeito da Teoria Eletromagnética, houve, na primeira metade do século XIX, os estudos eletroquímicos, feitos por Alessandro Volta (1745-1827), Sir Humphrey Davy (1778-1829) e Michael Faraday (1791-1867). Essas descobertas ajudaram a supor que as forças que ligavam os átomos nos elementos eram de origem elétrica, dando origem a toda uma abordagem teórica da eletroafinidade dos átomos, desenvolvida principalmente por Berzeilus.

Muito do trabalho de Faraday foi direcionado aos efeitos das correntes galvânicas em compostos químicos, especialmente eletrólitos. Sua técnica forneceu uma maneira diferente de encontrar pesos atômicos relativos. De fato,

as implicações da descoberta de Faraday em 1833 da segunda Lei da eletroquímica⁷² foram revolucionárias, uma vez que implicaram na existência de um quantum de eletricidade (o elétron).

Em 1860, a distinção entre átomos e moléculas que, inicialmente era uma fonte de confusão, tornou-se clara em um congresso em Karlsruhe, Alemanha. A partir de 1860, a ciência continuou apresentando evidências da adequação da hipótese atômica, embora uma verificação experimental tivesse que esperar até a última década do século XIX. De fato, após a primeira metade do século XIX, o desenvolvimento do modelo atômico, e sua aplicação cada vez mais bem-sucedida aos fenômenos, foi impulsionado principalmente pela abordagem física, embora outras descobertas importantes também tenham sido feitas no domínio da química, como o surgimento da química estrutural, na qual as substâncias passaram a ser consideradas do ponto de vista de sua estrutura interna, pela qual os átomos se ligavam uns aos outros.

2.4.2 O atomismo físico

A teoria do calor era outro campo em que se mostravam possíveis aplicações do modelo atômico. Por mais de um século, até 1780, o calor foi geralmente aceito como uma manifestação macroscópica dos movimentos atômicos (principalmente devido ao trabalho de Boyle), embora não em bases teóricas sólidas. Durante o período que vai de 1780 a 1825, a teoria calórica (um fluido imponderável⁷³) foi geralmente aceita e, após um período de transição

⁷² A quantidade de substância depositada em um eletrodo em um processo eletroquímico é proporcional ao seu peso equivalente.

⁷³ Ressalte-se aqui: inicialmente considerou-se o calor como um fluido. Verificando-se que a passagem desse fluido de um corpo a outro, medida pela variação de temperatura *não implicava* em variação da massa de nenhum deles, assumiu-se o caráter “imponderável” desse fluido. Parece absolutamente evidente que essa afirmação é feita no nível discursivo da teoria. Um “fluido imponderável” é uma contradição em termos.

(1825-1847), o modelo atômico foi revivido em conexão com uma teoria dinâmica do calor.

A termodinâmica teve um grande desenvolvimento durante esse período, uma vez que a maioria de suas conclusões não depende de considerações sobre a constituição microscópica dos corpos. Claramente, algumas propriedades da matéria dependem, de uma maneira óbvia, de sua constituição microscópica e, portanto, mesmo a termodinâmica estava prestes a chegar a um ponto em que as considerações atomistas se tornariam inevitáveis.

Na verdade, já em 1819, com a Lei empírica de Dulong e Petit, já se apresentava uma situação em que o conhecimento das propriedades dinâmicas da matéria e o uso do teorema da equipartição da energia seriam necessários para uma explicação completa dos fenômenos subjacentes.

Por volta de 1850, a Teoria Cinética dos Gases surgiu a partir de considerações que emergiram no período de transição sobre a realidade dos átomos. Essa teoria começou, em particular, com os trabalhos de John Herapath (1790-1868), que propôs que as propriedades de um gás eram o resultado da *vis viva* de suas partículas constituintes. Naquela época, no entanto, ainda havia confusão sobre a identificação de *vis viva* com a energia cinética e Herapath descobriu que o produto da pressão pelo volume era proporcional à temperatura ao quadrado, ao invés de ser linear com a temperatura.

No mesmo período (1845), J. J. Waterston (1811-1883) tentou (em vão) publicar uma obra que algum tempo depois (1891) foi redescoberta por Lord Rayleigh, na qual se pode conceber uma primeira enunciação do Teorema da Equipartição, mais tarde generalizado por Maxwell.

Em todos os casos, a Teoria Cinética dos Gases pretendia fornecer uma base dinâmica para a teoria do calor baseada na hipótese de uma realidade microscópica subjacente dos átomos, ou seja, nas consequências ontológicas de um *modelo atômico* (possuidor de uma sintaxe e semântica de fundo que, entretanto, ainda precisaria do concurso de noções estatísticas para se estabelecer – ver mais adiante). Desenvolveu-se, assim, todo um campo de

investigações que já pressupunha a existência de átomos e que, de uma perspectiva quantitativa, dava informações sobre tamanhos moleculares, velocidades, dentre outras características. Em uma palavra, a ontologia dessa área estava madura.

A partir desse momento, a hipótese atômica passou a fornecer previsões que poderiam ser confrontadas com os experimentos. A hipótese atômica tornou-se, portanto, uma Teoria Atômica. De fato, em 1847, James Prescott Joule (1818-1889) deu sua famosa conferência em St. Ann e apresentou, pela primeira vez, sua Teoria Cinética dos Gases, por meio da qual ele foi capaz de calcular o calor específico de vários gases e a usou para encontrar a velocidade dos átomos de hidrogênio a uma determinada temperatura.

Depois da obra de Joule, surgem as obras de August Krönig (1822-1879) e Rudolph Clausius (1822-1888), este último tendo publicado a importante obra intitulada *A natureza do movimento que chamamos de calor* (1847) em que chegou às suas próprias conclusões (independentemente de Herapath) sobre a importância da noção de *vis viva* na Teoria Cinética do Calor e, o mais importante, reconheceu que além dos graus de liberdade translacionais das moléculas, deve-se também considerar, na aplicação do Teorema da Equipartição, os graus de liberdade internos.

Outra contribuição importante de Clausius foi seu entendimento de que as velocidades calculadas para as moléculas ou átomos dos gases eram apenas velocidades médias, introduzindo assim a noção de probabilidade (e estatística) no relato dos fenômenos térmicos (dando completude à sintaxe e semântica profundas). Em outra importante obra intitulada *On the Mean Lengths and Paths*, publicada em 1858, Clausius introduziu o conceito de caminho livre médio para refutar a crítica, recorrente à época, que afirmava que se as moléculas de algum gás viajassem em caminhos retilíneos, dadas suas altas velocidades, dever-se-ia notar a combinação de diferentes gases muito mais rápido do que era realmente observado (uma crítica feita no nível narrativo da teoria – daí a importância da inserção da estatística no nível profundo). Em seus cálculos,

Clausius usou as velocidades das moléculas como iguais, uma vez que a noção de distribuição de velocidade, uma noção estatística, não estava disponível.

O conceito de distribuição de velocidade só seria desenvolvido em 1860 por Maxwell na obra *Ilustrações da Teoria Dinâmica dos Gases*. Em 1862, Maxwell publicou seu trabalho mais importante sobre a Teoria Cinética dos Gases, intitulado *Sobre a Teoria Dinâmica dos Gases*, em que surgia uma teoria sobre a viscosidade dos fluidos e permitia o cálculo dos diâmetros atômicos, juntamente com propriedades de transporte, como a difusão, por exemplo. No final, porém, Clausius rejeitou a abordagem estatística à qual ele mesmo deu à luz.

Por volta de 1870, não havia evidência de que os átomos dos físicos fossem iguais aos átomos dos químicos. Em 1871, Maxwell publicou sua Teoria do Calor em um período que também viu o aparecimento de Ludwig Boltzmann (1844-1906).

Boltzmann, em 1868, estendeu a abordagem estatística de Maxwell aos casos em que existem potenciais ou forças externas. Em 1872, ele derivou sua famosa equação integro-diferencial que permitiu a interpretação do mecanismo pelo qual os gases tendem ao equilíbrio (na média) e introduziu a noção de irreversibilidade.

O problema da irreversibilidade foi amplamente tratado em sua obra, publicada em 1877, intitulada *Sobre a Relação entre a Segunda Lei da Termodinâmica e a Teoria da Probabilidade*, mas não conseguiu mudar a perspectiva da comunidade, que era francamente resistente à introdução de elementos de estatística no contexto da Física.

A noção de entropia, entretanto, apareceu um pouco antes. Josiah Willard Gibbs (1839-1903) publicou, em 1875, uma obra sobre esse conceito, na qual retifica a noção utilizada por Maxwell. Em 1902 ele publicou suas ideias no trabalho intitulado *Princípios Elementares em Mecânica Estatística Desenvolvidos com Referência Especial aos Fundamentos Racionais de Termodinâmica* em que o campo da mecânica estatística moderna está

estabelecido quase como o conhecemos hoje (em termos gerais). Ele usou a noção de conjunto (*ensemble*) e introduziu as noções de sistemas micro canônicos, canônicos e gran canônicos.

O quantum da eletricidade (o elétron) estava, como já dissemos, implícito em muitos dos trabalhos sobre eletroquímica, mas a hipótese de uma carga elétrica elementar foi proposta por Henrik A. Lorentz e foi descoberta em 1894-97 por J. J. Thomson. A evolução das técnicas de vácuo permitiu a J. J. Thomson encontrar a razão carga/massa do elétron e mostrar que era da ordem de 2.000 a 4.000 vezes menor que a encontrada para o átomo de hidrogênio.

Experimentos ligados a espectros moleculares, feitos principalmente entre 1860 e 1870, uma vez entendidos em parte (já que seu completo entendimento teria que esperar pela Mecânica Quântica) foram capazes de preencher uma lacuna entre o átomo químico e o físico, mostrando a unidade conceitual veiculada pelo modelo atômico.

2.5 A síntese como paradoxo

Assim, do que já foi apresentado, chegamos ao final do século XIX com duas certezas longamente construídas: que a ontologia de partículas deve ser correta para uma Teoria Cinética dos Gases, e que a ontologia de um *continuum* deve ser correta para uma Teoria Eletromagnética. Ambas as teorias, vale dizer, extremamente bem-sucedidas experimentalmente. Neste ponto, poder-se-iam assumir três atitudes específicas, mas mutuamente excludentes com relação à situação da Física como um todo:

1. Assumir uma postura pragmática neutra e deixar como está, já que cada uma das ontologias se refere a uma área particular da Física;
2. Adotar uma postura monista e buscar uma resolução da situação, mostrando que uma das ontologias pode, de fato, servir de fundamento para as duas áreas de conhecimento;

3. Adotar uma postura dualista e assumir que, de algum modo, ambas as ontologias devem ser consideradas⁷⁴.

O primeiro quarto do século XX irá deixar bem claro que a alternativa 1 é francamente impossível. Experimentos de espectroscopia, alguns já conhecidos e realizados no século XIX, adentram o século XX sem apresentar um modelo e uma interpretação satisfatórios. Tais experimentos são justamente aqueles que colocam em contato a matéria e a radiação e que, portanto, fazem as duas ontologias colidirem entre si. Alguns deles são:

- Difração de Bragg-Laue: ocorre quando a radiação eletromagnética, com comprimento de onda dentro de certo intervalo, ou um feixe de partículas, com o momentum das partículas dentro de certo intervalo, é refletido especularmente por planos de simetria consecutivos do cristal. O intervalo do comprimento de onda, ou do valor dos momenta das partículas, é determinado pela estrutura cristalina do material e suas simetrias⁷⁵;
- Radiação de corpo negro: Robert Kirchhoff, ao analisar as relações existentes entre calor absorvido e calor emitido, propôs duas leis fundamentais para o estudo da radiação térmica. A primeira dizia que a cor da radiação emitida deve depender da frequência da radiação, e que esta frequência depende da temperatura do corpo aquecido, seja qual for sua composição. A segunda lei de Kirchhoff introduz o conceito de corpo negro como sendo um corpo do qual nenhuma radiação escapa⁷⁶. O estudo da radiação de corpo negro foi realizado por inúmeros físicos, mas

⁷⁴ Há ainda uma quarta possibilidade, que seria assumir, pragmaticamente, o modelo dualista, na esperança de que futuros desenvolvimentos da Mecânica Quântica pudessem superar o dualismo e introduzir um monismo ontológico. Voltaremos a isso mais adiante.

⁷⁵ Na descrição, adotamos uma perspectiva anterior ao estabelecimento do Princípio de Dualidade, uma vez que desejamos colocar em relevo exatamente as percepções prévias a tal estabelecimento.

⁷⁶ Evidentemente, trata-se de uma idealização, uma vez que, se não o fosse, um corpo negro jamais poderia ser visto. O corpo negro, em Física, é sempre um corpo no qual há um orifício, pequeno o suficiente para não perturbar a distribuição de energia interna, mas grande o suficiente para se prescrutar tal distribuição experimentalmente a partir do seu exterior.

definitivamente resolvido por Max Planck em 1900, no que é considerado o ano de nascimento da Mecânica Quântica;

- Efeito fotoelétrico: que consiste na emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando incide sobre sua superfície uma radiação eletromagnética de frequência suficientemente alta. A emissão de elétrons depende do material e da frequência da radiação incidente;
- Efeito Compton: é o espalhamento de um fóton por uma partícula carregada, geralmente um elétron preso a um átomo, que resulta em uma diminuição da energia do fóton espalhado, tipicamente na faixa de raios-X ou de raios gama;
- Linhas espectrais dos átomos: o espectro dos átomos é o conjunto de comprimentos de onda presentes na luz que este átomo é capaz de emitir, formando algo como uma impressão digital do átomo. As linhas espectrais do hidrogênio eram amplamente conhecidas, mas não havia uma teoria adequada que as explicasse. Tal explicação foi primeiramente apresentada por Niels Bohr em 1913, com seu modelo usualmente chamado átomo de Bohr;
- Experimento de dupla fenda: o experimento de dupla fenda, já trabalhado por Thomas Young, em 1800, no contexto da luz, consiste em fazer passar um feixe de luz ou um feixe de partículas por um anteparo opaco com dois orifícios (fendas). A depender do comprimento de onda do feixe de luz ou do momentum das partículas que compõem o feixe, aparece em um anteparo de detectores uma figura de interferência;

Em cada um desses experimentos, ou devemos considerar a radiação eletromagnética como tendo uma composição corpuscular (fótons), caso do efeito fotoelétrico, do efeito Compton e, de certo modo, da radiação de corpo negro; ou devemos considerar o feixe de partículas como sendo representado

por algum tipo de onda, caso da difração de Bragg-Laue e do experimento de dupla fenda, dentre outros⁷⁷.

Em 1924, De Broglie (1892 – 1987) apresentou, em sua tese de doutorado, uma antecipação do Princípio de Dualidade. Sua intenção era⁷⁸:

Fazer um esforço para unificar os pontos de vista corpuscular e ondulatório e aprofundar um pouco mais o verdadeiro significado dos quanta. (De Broglie, 1924, pg. 30)

O resultado desse esforço foi a afirmação de que os experimentos físicos apresentavam, em alguns casos, características ondulatórias e, em outros, características corpusculares *de maneira irredutível*. Este é um momento importante, pois, com a afirmação acima, assumia-se que, ao menos momentaneamente, dever-se-ia optar pela atitude 3, de caráter dualista.

Até este ponto, portanto, a solução de De Broglie poderia ser considerada como uma *solução de compromisso* absolutamente necessária para fazer o campo da Física prosperar, a despeito dos comportamentos, no mínimo curiosos, dos sistemas materiais e eletromagnéticos.

É neste momento crucial do desenvolvimento da Mecânica Quântica que Niels Bohr surge, juntamente com Werner Heisenberg, para tornar algo que poderia ser uma *solução de compromisso* em uma *solução de continuidade*⁷⁹. O resultado da interação desses dois grandes cérebros será a construção da Mecânica Quântica Matricial, a enunciação do Princípio de Incerteza (Heisenberg) e do Princípio de Complementaridade (Bohr), dando contornos à

⁷⁷Veja-se que a situação é, portanto, bem diversa daquela que encontramos no século XVII com a Óptica Geométrica, quando ambas as visões, corpuscular e ondulatória, poderiam ser usadas, com maior ou menor eficiência, para resolver as questões da teoria.

⁷⁸“Bref, le moment semblait venu de tenter un effort dans le but d'unifier les points de vue corpusculaire et ondulatoire et d'approfondir un peu le sens véritable des quanta.”

⁷⁹Há um inevitável jogo de palavras aqui: “solução”, em “solução de compromisso”, representa uma resolução temporária e momentânea que possibilita acomodar duas (ou mais) posições, mesmo incompatíveis entre si. Já “solução” em “solução de continuidade” representa uma ruptura, uma dissolução, relativamente ao que lhe precede.

formulação da primeira interpretação sistemática da Mecânica Quântica, apresentada na Conferência Solvay de 1927.

Para o que nos interessa neste trabalho, entretanto, será Niels Bohr que dará os contornos de uma nova ontologia (e epistemologia) da Mecânica Quântica. Sobre o papel de Bohr neste importante momento da criação de uma interpretação da Mecânica Quântica, falaremos no próximo capítulo.

Capítulo 3. O apego a paradoxos: Kierkegaard, Bohr e complementaridade

A tese central deste capítulo é a de que a compreensão de certos elementos da obra do filósofo Søren Kierkegaard permite esclarecer certos elementos das ideias de Bohr, especificamente na formulação de seu Princípio de Complementaridade.

Muito se tem dito sobre uma eventual herança de Kierkegaard a Bohr (JAMMER, 1966; ROSENFELD, 1969; HOLTON, 1970; PAIS, 1991; FAVRHOLDT, 1992; LACKI, 1996, HEILBRON, 2016; GIANNETTO, 2019). Entretanto, faz-se necessário estabelecer primeiro se, de fato, há tal herança e, em seguida, estabelecer a intensidade desta relação, ou seja, em que medida as ideias de Bohr possuem, ou não, filiação em outra abordagem filosófica qualquer e, especificamente, a de Kierkegaard.

Dessa maneira, ao estabelecer a medida de tal relação, buscamos uma melhor compreensão da importância de Bohr para a construção da primeira interpretação da Mecânica Quântica, além de buscar elementos que indiquem que suas ideias vão além do que se chamou de Interpretação de Copenhague, formando um arcabouço conceitual de fundo para esse campo da Física Moderna.

Como a própria existência da relação já mencionada entre os dois autores é um elemento central deste capítulo, e de considerável controvérsia na literatura, faz-se necessário estabelecer de que tipo de relação falamos, evidenciando se a referida controvérsia atinge também nossa compreensão sobre o tema.

3.1 Kierkegaard e Bohr: uma relação?

A questão dos antecedentes filosóficos de Niels Bohr está longe de ser uma unanimidade entre seus estudiosos. Dentre os inúmeros defensores de uma relação estreita entre Søren Kierkegaard e Niels Bohr está o filósofo e historiador da ciência Max Jammer. De fato, Jammer diz que⁸⁰

Não pode haver dúvida de que o precursor dinamarquês do existencialismo moderno e da teologia neo-ortodoxa, Søren Kierkegaard, por meio de sua influência sobre Bohr, afetou também o curso da física moderna até certo ponto. (JAMMER, 1966, p.172)

Jammer, na verdade, acredita que a influência de Kierkegaard sobre Bohr é indireta e que foi mediada pelo filósofo Harald Høffding. De fato, Jammer constrói, entre os escritos de Kierkegaard e os de Bohr, uma estreita analogia como, por exemplo, na passagem em que, sumarizando a perspectiva de Høffding sobre a “dialética qualitativa” de Kierkegaard, diz

Na vida, apenas decisões repentinas, saltos ou solavancos podem levar ao progresso. “Algo decisivo ocorre sempre apenas por um solavanco, por uma virada repentina que não pode ser prevista a partir de seus antecedentes, nem determinada por eles.” Referindo-se à teoria indeterminista de “saltos” de Kierkegaard, Høffding chamou o filósofo dinamarquês de “o único pensador indeterminista que tentou descrever o salto”, mas mais tarde acrescentou: “Parece estar claro que se o salto ocorre entre dois estados ou dois momentos, nenhum olho pode observá-lo e, uma vez que, portanto, nunca pode ser um fenômeno, a descrição deixa de ser uma descrição.” Consequentemente, também “a causalidade não pode ser descrita. (JAMMER, 1966, p. 174)

Em direção similar, mas mais cuidadosa, encontramos Gerald Holton, que pretende encontrar relações relativamente diretas entre o discurso de Bohr e aquele de Kierkegaard.

⁸⁰ “There can be no doubt that the Danish precursor of modern existentialism and neo-orthodox theology, Søren Kierkegaard, through his influence on Bohr, affected also the course of modern physics to some extent.”

Assim, Holton nos diz que⁸¹

O que é essencial para nós notarmos é que uma característica principal da "dialética qualitativa" de Kierkegaard é a aceitação de teses e antíteses, sem passar para outro estágio no qual a tensão é resolvida em uma síntese. (HOLTON, 1970, p.1042)

Por outro lado, escritores como Favrholdt (1992) defendem que simplesmente não há qualquer relação relevante entre os escritos de Søren Kierkegaard, William James ou Harald Høffding nas obras de Bohr. Ele considera, portanto, que as descobertas de Bohr foram resultado do seu próprio gênio e preparo, quando confrontados com os problemas de sua época. Neste sentido, Favrholdt concorda com Leon Rosenfeld (1969) que, em uma resenha sobre o livro de Max Jammer sobre o desenvolvimento conceitual da Mecânica Quântica, escreve que⁸²

objeções mais sérias devem ser levantadas contra o tratamento do autor [Jammer] das questões epistemológicas. Enganado por coincidências superficiais, ele imagina que o pensamento de Bohr foi influenciado, através de Høffding, por Kierkegaard e William James. Não pode haver dúvida de que sua suposição é infundada. Bohr era um pensador totalmente independente; desde tenra juventude, ele desenvolveu suas ideias epistemológicas sozinho e sem mais preparação filosófica do que o curso elementar de Høffding. O que este último, e ainda mais seu pai, encorajou nele foi uma atitude de mente aberta e abordagem sem preconceitos para os problemas, e certamente nenhuma confiança em sistemas filosóficos particulares (...) O autor poderia ter inferido tudo isso (ou a maior parte) de

⁸¹ "What is essential for us to notice is that a main feature of Kierkegaard's "qualitative dialectic" is an acceptance of thesis and antithesis, without proceeding to another stage at which the tension is resolved in a synthesis. Sobre esta afirmação, teremos mais a dizer no que se segue."

⁸² "A much more serious objection must be levelled against the author's handling of the epistemological questions. Misled by superficial coincidences, he imagines that Bohr's thought has been influenced, through Høffding, by Kierkegaard and William James. There can be no doubt that his surmise is unfounded. Bohr was a completely independent thinker; from Early youth, he developed his epistemological ideas single-handed and with no more philosophical preparation than Høffding's elementary course of lectures. What the latter, and still more his father, encouraged in him was an attitude of open-mindedness and unprejudiced approach to the problems, and certainly not any reliance on particular philosophical systems ...The author could have inferred all this (or most of it) from published statements; but he somehow went astray and ponderously built in a complete fictitious "Kierkegaard-Høffding" ideology into the discussion of Bohr's work. This unfortunate error runs through the whole book and spoils the argument wherever it intrudes into it. Moreover, he has failed to realize that Bohr's conception of complementarity in quantum mechanics is not the expression of a "specific philosophical position", but an inherent part of the theory which has the same validity as its formal aspects and is inseparable from it."

declarações publicadas; mas ele de alguma forma se extraviou construiu uma ideologia pesada e completamente fictícia da relação "Kierkegaard-Høffding" na discussão do trabalho de Bohr. Este lamentável erro ocorre em todo o livro e estraga o argumento onde quer que ele se intrometa. *Além disso, ele não conseguiu perceber que a concepção de complementaridade de Bohr na mecânica quântica não é a expressão de uma "posição filosófica específica", mas uma parte inerente da teoria que tem a mesma validade que seus aspectos formais, e é dele inseparável* (grifos meus).

Favrholdt subscreve essa mesma perspectiva⁸³:

Quando as pessoas acreditam seriamente que ele foi inspirado neste trabalho, digamos, pela dialética qualitativa de Kierkegaard, a questão é como essa alegação deve ser entendida. Se deve haver algum sentido para isso, deve significar que no momento em que Bohr, com base em argumentos físicos, percebeu que deve haver estados estacionários e saltos quânticos, ele não se assustou com isso como, por exemplo, Sommerfeld e Einstein. *Pelo contrário, ele se sentiu à vontade com a ideia porque ele, talvez inconscientemente, tinha alguns padrões de pensamento de Kierkegaard que o fizeram reconhecer algo nessa nova situação. Algo semelhante pode ter sido o caso quando Bohr desenvolveu sua ideia de complementaridade, se há alguma verdade nas ideias sobre a inspiração de Høffding ou James. Coloco as coisas desta forma, porque, em minha opinião, complementaridade não é uma interpretação filosófica da mecânica quântica, mas uma decifração dela e, portanto, como o próprio Bohr tantas vezes disse, uma consequência da existência da constante de Planck.* Isso implica que a visão de Bohr foi *determinada* pela "lógica interna" dos problemas e não por qualquer inspiração externa. Portanto, se houvesse alguma inspiração filosófica, isso poderia consistir apenas em que facilitou o caminho para Bohr, pois ele adquiriu alguns padrões filosóficos de pensamento que, *mutatis mutandis*, se

⁸³ "When people seriously believe that he was inspired in this work by, say, Kierkegaard's qualitative dialectics, the question is how this allegation should be understood. If there is to be any sense to it, it must mean that the moment that Bohr, on the basis of physical arguments, realized that there must be stationary states and quantum leaps, he was not frightened by this as, for instance, Sommerfeld and Einstein had been. On the contrary, he felt at home with the idea because he, maybe subconsciously, had some patterns of thought from Kierkegaard which made him recognize something in this new situation. Something similar would have to be the case when Bohr developed his idea of complementarity, if there is to be any truth to the ideas about inspiration from Høffding or James. I put things in this way, because, in my opinion, complementarity is not a philosophical interpretation of quantum mechanics, but a deciphering of it and therefore, as Bohr himself so often said, a consequence of the existence of Planck's constant. This implies that Bohr's view was determined by the 'inner logic' of the problems and not by any external inspiration. So, if there was any philosophical inspiration this could consist only in that it had eased the way for Bohr in that he had acquired some philosophical patterns of thought that, *mutatis mutandis*, fitted in with the physical problem structure."

encaixavam na estrutura do problema físico (FAVRHOLDT, 1992, pp. 131,132) (grifos meus).

Entretanto, seria no mínimo um equívoco imaginar que a complementaridade é uma decorrência natural da estrutura formal da Mecânica Quântica, assim como os saltos quânticos, ao menos da maneira que Bohr os entendia. Não há qualquer relação imanente entre a lógica interna dos problemas e a introdução do Princípio de Complementaridade.

De fato, como vimos na introdução, a mesma “lógica interna” pode levar a interpretações nas quais o Princípio de Complementaridade não cumpre qualquer papel. Essa ideia de *determinação* do aparato semântico pelo aparato sintático não faz qualquer sentido. Se há qualquer relação desse tipo é a de uma enorme *subdeterminação*, que é, justamente, o que engendra o problema que tratamos neste trabalho.

Se eliminamos esse elemento de necessidade das duas citações anteriores, fica claro que essa disposição geral de Bohr a novas interpretações dos fenômenos, que, como já mostramos no capítulo precedente, implicavam um tipo de paradoxo entre as interpretações (somente) ou corpusculares ou ondulatórias, adquire um novo status.

Note-se, ademais, que “ser influenciado” por determinados conceitos ou abordagens circunscritas de um certo filósofo não significa concordar com o referido filósofo. Mesmo assim, não é necessário afirmar que Bohr foi (direta ou indiretamente) influenciado por Kierkegaard na questão dos paradoxos, assim como na sua compreensão de que tais paradoxos são inerentes ao mundo; muito menos estamos, de modo algum, dizendo que Bohr concorda com as soluções dadas por este filósofo (de conteúdo religioso) ao problema dos paradoxos⁸⁴.

Assim, concordamos, qualificadamente, com a afirmação de Favrholt de que

⁸⁴ Mais à frente confrontaremos as “soluções” de Bohr e de Kierkegaard relativas ao problema dos paradoxos.

Em terceiro lugar, realmente não há grande semelhança entre Kierkegaard e as opiniões de Bohr. Kierkegaard era um cristão fanático⁸⁵, enquanto Bohr era um agnóstico calmo e relaxado. Quanto à possibilidade de um ponto de vista angelical, eles tinham opiniões contraditórias. O fato de Kierkegaard ser um porta-voz da descontinuidade e do livre arbítrio não é suficiente para argumentar que ele deve ter inspirado Bohr. Como mencionado antes, já encontramos na física muitas coisas que poderiam inspirar Bohr a ir contra a continuidade da física clássica. Podemos, portanto, concluir que não há razão para acreditar em qualquer influência de Kierkegaard sobre Niels Bohr (FAVRHOLDT, 1992, p. 62).

Entretanto, a relação que buscamos é apenas no sentido de compreender que há uma razoável coincidência *estrutural* entre o discurso de Bohr relativamente à Complementaridade, com aquele de Kierkegaard, relativamente à superação da razão pela fé. Vale ressaltar, como argumentaremos mais adiante, que tanto Bohr, quanto Kierkegaard, deram “soluções” completamente distintas para a ideia de que os paradoxos (cada um em seu contexto de articulação: Física ou existência/Cristianismo) não podem ser eliminados, e nas eventuais consequências dessa concepção para a questão de um eventual irracionalismo em seu discurso. Como mostraremos, ambos concordam com o uso de paradoxos como elementos estruturadores de suas respectivas abordagens, bem como ambos evitam a questão do irracionalismo, ainda que cada um a seu modo⁸⁶.

Assim, estamos longe aqui de uma tentativa de aproximar Bohr e Kierkegaard de tal maneira que as conquistas de Bohr na Mecânica Quântica seriam apenas um tipo de aplicação da perspectiva de Kierkegaard, ou de buscar analogias entre as questões sobre os saltos quânticos de Bohr e a visão angélica de Kierkegaard, que seriam analogias *de conteúdo*. Longe disso, acreditamos mesmo em um inevitável distanciamento radical entre o agnóstico Bohr e o

⁸⁵ Não parece adequada a perspectiva de que Kierkegaard fosse um fanático. Parece-nos que essa passagem tem mais caráter retórico, pelo qual Favrholt busca distanciar Bohr de Kierkegaard o máximo possível.

⁸⁶ A lista de artigos advocando um ou outro lado da questão é grande e não parece levar a qualquer conclusão final. Ver, por exemplo, (HEILBRON, 2016; GIANNETTO, 2019, PAIS, 1991).

profundamente cristão Kierkegaard quanto à análise das consequências da existência concreta de paradoxos.

A perspectiva aqui apresentada, portanto, é muito mais “fraca” que a de Jammer ou Holton, ainda que apresente uma relação estrutural entre os discursos de Bohr e de Kierkegaard. Ao fim, concordamos com Lacki (1996) quando diz que⁸⁷

O resultado final pode ser o seguinte. Em qualquer empreendimento de rastreamento de dívidas intelectuais, o perigo potencial está mais relacionado ao propósito seguido pelo comentarista do que à natureza supostamente intrinsecamente ofensiva da tese que este propõe. Quando a reconstrução histórica é fiel e a análise filosófica sólida, o estabelecimento de analogias (mesmo quando apresentadas como teses de possível influência), a justaposição de vários pontos de vista, só pode ser considerado positivo: pode então servir ao propósito de eventualmente aprofundar-se nas realizações do pensador escolhido e ajudam a analisá-las e compreendê-las melhor. Afinal, não estamos muito dispostos a conhecer as dívidas de Bohr por si mesmas, mas estamos interessados em compreender seu pensamento o mais fielmente possível. Deste ponto de vista, o debate acadêmico externalista-internalista é um tanto secundário (LACKI, 1996, p. 303).

Assim, reconhecemos em Bohr a mesma paixão por paradoxos que podemos reconhecer em Kierkegaard. A maneira *substantiva*, ou seja, articulada no interior de seus contextos de interesse, como cada um desses autores irá lidar com a questão dos paradoxos será o tema das próximas seções.

3.2 Kierkegaard e sua paixão por paradoxos

⁸⁷ “The bottom line could be as follows. In any enterprise of tracing intellectual debts, the potential danger is to be related more to the purpose followed by the commentator than to the supposedly intrinsically offending nature of the thesis the latter proposes. When the historical reconstruction is faithful and philosophical analysis sound, establishment of analogies (even when presented as theses of possible influence), juxtaposition of various points of view, can only be considered positive: it may then serve the purpose of eventually dwelling deeper into the achievements of the chosen thinker and help to analyze and understand them better. We are after all not so much willing to know Bohr's debts for their own sake but are interested to grasp his thinking as faithfully as possible. From this point of view, the academic externalistic internalistic debate is somewhat secondary.”

É amplamente reconhecido o papel que a noção de “paradoxo” cumpre nas obras de Kierkegaard⁸⁸. De fato, dentre outras funções, o paradoxo é crucial para a recusa de Kierkegaard por sistemas filosóficos, como o hegeliano, que visavam abarcar, racionalmente, a totalidade da existência a partir da *incorporação* de cada vez mais elementos descritivos.

Enquanto a filosofia avança seus sistemas “isto e mais também aquilo” Kierkegaard avançou seu “isto ou aquilo”, seu “ou/ou [Enten/eller]” sem *nonsense* e sem acordos. (GOUVÊA, 2006, p. 168)⁸⁹

Assim, diferentemente da lógica dialética hegeliana, que busca a efetiva eliminação dos paradoxos (ou contradições) nos processos de síntese, Kierkegaard afirma a importância fundamental destes para a “transmissão das mais profundas verdades cristãs” (GOUVÊA, 2006, p. 169).

Mais ainda, para Kierkegaard, os paradoxos não implicavam em *nonsense*,

Mas [nas] mais profundas verdades, *verdades que são tão profundas que a linguagem humana não pode expressar adequadamente*. Proposições paradoxais revelam os limites da linguagem, mas os limites da linguagem revelam os limites do pensamento racional, e dizer que estes paradoxos são apenas linguísticos e não conceituais é um engano (GOUVÊA, 2006, p. 173) – grifo meu.

Assim, um paradoxo, para Kierkegaard, ao menos aqueles prenhes de significação cristã, não podem ser “resolvidos” em uma conceitualização mais elevada e não-paradoxal. Assumir isso é justamente assumir a crença tipicamente iluminista na supremacia da razão. Não se trata, entretanto, de irracionalismo, mas da simples compreensão de que a própria compreensão humana tem seus limites, na medida em que permanece humana. De fato, a

⁸⁸ O termo “paradoxo” aparece cento e trinta e uma vezes na Obra Reunida de Kierkegaard (GOUVÊA, 2006, p. 181).

⁸⁹ Em certa medida, pode-se dizer que a noção de paradoxo (irresolúvel pela razão) cumpre a função de quebrar esse processo cumulativo pelo qual os sistemas abarcariam a totalidade da existência, justamente reconhecendo os próprios limites da razão, como veremos mais adiante.

teologia kierkegaardiana defende que seria de fato irracional não conceber os limites da razão (GOUVÊA, 2006, p. 187).

É neste contexto que a fé cumpre seu papel, qual seja, de evitar o irracionalismo. Para Kierkegaard, a fé está *acima* da razão, e não *contra* ela (GOUVÊA, 2006, p. 177). Se há uma tensão entre fé e razão é porque esta última, considerada em caráter absoluto, não admite seus limites, e tenta desbordar destes, adentrando um espaço no qual funcionaria muito mal, precisamente aquele onde vicejam os paradoxos. Para Kierkegaard, o uso correto da razão implica no reconhecimento das limitações da razão. Assim,

o conceito do absurdo é precisamente perceber o fato de que ele não pode e não deve ser compreendido. Este é um conceito determinado negativamente, mas é tão dialético quanto qualquer positivo. O absurdo, o paradoxo, é composto de tal forma que a razão não tem nenhum poder para dissolvê-lo em *nonsense* e provar que ele é *nonsense*; não, ele é um símbolo, um enigma, um enigma composto sobre o qual a razão deve dizer: Eu não posso resolvê-lo, ele não pode ser entendido, mas não segue daí que ele seja *nonsense*. Mas, é claro, se a fé é completamente abolida, toda a esfera é derrubada, e então a razão fica arrogante e talvez conclua que, ergo, o paradoxo é *nonsense*. (KIERKEGAARD, JP 1, 7 *apud* GOUVÊA, 2006, p. 178).

Dessa maneira, o paradoxo se tornou a chave conceitual para o seu afastamento das duas principais doutrinas filosóficas de sua época: o kantismo e o hegelianismo, que, cada um a seu modo, desejavam manter a fé nos limites da simples razão. De fato, para Kierkegaard, qualquer sistema de pensamento baseia-se sobre certos postulados que, entretanto, por serem fundacionais, não podem encontrar compreensão *no interior* do próprio sistema⁹⁰. Não significa, evidentemente, uma forma de irracionalismo, mas apenas que certos paradoxos, estabelecidos pela fé, não podem ser eliminados por sistemas filosóficos fundamentados no uso irrestrito, e único, da razão.

⁹⁰ Até certo ponto, Kant admite isso na sua Crítica da Razão Pura (KANT, 1994, pg. 388-418) ao se referir às “antinomias da razão pura”, mas no contexto da extensão da razão para além dos limites de uma experiência possível.

Kierkegaard encontra na fé cristã um paradoxo originário, que é a possibilidade de Deus ter existido como um indivíduo particular, tendo nascido, crescido e, finalmente, morrido nesta forma. Seria este, de fato, o paradoxo absoluto (GOUVÊA, 2006, p. 196).

Como acessar algo assim? Para Kierkegaard, o paradoxo nascido na fé só pode ser nela compreendido, quando então pode ser compreendido *como paradoxo*, e não resolvido em alguma instância superior ou posterior⁹¹.

3.3 Bohr e os paradoxos da mecânica quântica

Pelo trajeto descrito no capítulo 2, vimos que a Física do século XIX encaminhou ao século XX problemas persistentes quanto à possível percepção do que o Mundo é – de uma eventual ontologia sua. A abordagem da matéria pela via atomista imprimiu nos físicos da época uma convicção quase absoluta de que o mundo material deveria ser composto por elementos fundamentais que se movimentavam em um vazio.

Por sua vez, a abordagem da luz, com suas sucessivas postulações de meios contínuos imponderáveis (éter), que seriam o suporte das oscilações dos campos eletromagnéticos transversais, apontava em direção a uma ontologia oposta e incompatível com a ontologia atomista.

Os fenômenos de espectroscopia, que vinculavam a radiação à matéria, como os efeitos fotoelétrico, Compton, de radiação de corpo negro, dentre muitos outros, colocaram em contato essas duas abordagens e, *ipso facto*, suas duas ontologias fundamentais.

Resultou desse encontro uma completa desorganização das antigas convicções, uma vez que, *em certos experimentos*, aqueles sistemas anteriormente concebidos como corpusculares apresentavam comportamento

⁹¹ Aqui se poderia contrastar as perspectivas de Kierkegaard com as de um Santo Agostinho, em particular quando trata da questão da Trindade segundo seu *fido quia intelligans*.

ondulatório, ao mesmo tempo que, *em outros experimentos*, era a luz, anteriormente concebida como fenômeno eminentemente ondulatório, que apresentava, necessariamente, comportamento corpuscular.

Ao menos naquele momento histórico, não pareceu minimamente possível estabelecer uma ontologia monista – seja ela fundamentada em uma perspectiva ondulatória, seja fundamentada em uma visão corpuscular.

A físicos como Heisenberg e, principalmente, Bohr, certa dualidade de caráter ontológico (e não apenas aparente) se impunha *objetivamente*, através dos resultados experimentais. Sua estrutura era, pois, a de um OU/OU que não se deixava dissolver em alguma instância conceitual superior, permanecendo paradoxal, uma vez que entidades ondulatórias possuem características muito diversas (e irredutíveis) relativamente a entidades corpusculares⁹².

Frente ao problema da dualidade, portanto, o recurso *estrutural* de Bohr à perspectiva de Kierkegaard não deve ser afastado. Neste sentido, adotamos uma perspectiva como a que Favrholt diz expõe, que mitiga a influência de Kierkegaard, sem que, entretanto, a afastemos, inserindo-a em uma perspectiva puramente estrutural, quando este diz (já citado) que

Quando as pessoas acreditam seriamente que ele foi inspirado neste trabalho, digamos, pela dialética qualitativa de Kierkegaard, a questão é como essa alegação deve ser entendida. Se deve haver algum sentido para isso, deve significar que no momento em que Bohr, com base em argumentos físicos, percebeu que deve haver estados estacionários e saltos quânticos, ele não se assustou com isso como, por exemplo, Sommerfeld e Einstein. Pelo contrário, ele [Bohr] se sentiu à vontade com a ideia porque ele, talvez inconscientemente, tinha alguns padrões de pensamento de

⁹² Não deixa de ser curioso encontrar, em tantos textos de Mecânica Quântica, uma tentativa de dissolver o paradoxo com o uso dos chamados “pacotes de onda”, que representariam ondas ainda, mas suficientemente localizadas no espaço para possuir características corpusculares. No plano meramente discursivo, tais perspectivas se mostram sedutoras, justamente por reafirmar o reino da razão e a superação do paradoxo. Ocorre que não apresentam relação direta com os níveis fundamental e narrativo da teoria, uma vez que não permitem verdadeiramente explicar os fenômenos que, justamente, estabelecem o paradoxo. Assim, por exemplo, o recurso a “pacotes de onda” não resolve o problema da dupla fenda, nem tampouco aquele do efeito fotoelétrico, pelo simples fato de que pacotes de onda são construídos com o concurso de inúmeros comprimentos de onda (infinitos, em geral), enquanto tais experimentos são realizados no contexto de feixes monocromáticos.

Kierkegaard que o fizeram reconhecer algo nessa nova situação. Algo semelhante pode ter sido o caso quando Bohr desenvolveu sua ideia de complementaridade, se há alguma verdade nas ideias sobre a inspiração de Høffding ou James. (FAVRHOLDT, 1992, pp. 131,132)

Não se tratou, pois, de adesão aos princípios da filosofia cristã de Kierkegaard, pois jamais foi uma relação de conteúdo, mas a percepção de que ali, naquele discurso, tão imbricado com a noção de paradoxo, poderia haver uma saída para a própria Física, na qual uma mesma ideia emergia, distinta daquela religiosa, mas estruturalmente idêntica a ela. Isso é particularmente importante na questão da evitação do irracionalismo, que Bohr, como qualquer outro físico praticante, buscava empreender.

3.3.1 A Complementaridade e a evitação do irracionalismo em Bohr

O Princípio de Complementaridade surge, portanto, da necessidade de se dar inteligibilidade a uma *teoria física*, quando esta se defronta com um suposto paradoxo, que é, no caso em questão, estabelecido pela dualidade onda-partícula. Sua origem já identifica a intenção precípua de não se dar azo a irracionalismos, ainda que alguma concessão se deverá fazer aos ditames racionalistas de que a Física Clássica vinha se imbuindo.

A *chave interpretativa* de Bohr é especificamente a linguagem, mas conectada, agora, com novos elementos trazidos pelo contexto quântico. Sua intenção era conceber uma maneira pela qual os enunciados físicos poderiam fazer sentido, mesmo em um contexto perpassado pelo paradoxo da dualidade.

A solução, portanto, não poderia dissolver o paradoxo, que estaria, assim ele supõe, no nível semântico profundo (ver capítulo 1), ao mesmo tempo que não poderia deixá-lo dissolver a própria Física, como elemento que estaria no nível discursivo, no contexto quântico. A noção de Complementaridade, que Bohr, posteriormente, busca transplantar para outros contextos de enunciação, é tributária dessas duas condicionantes.

Bohr, portanto, volta-se para a linguagem e se pergunta como tal linguagem é constituída. Entende que a constituição da linguagem se dá no contexto das existências particulares de seres com propriedades particulares, como tamanho muito grande comparado com entidades subatômicas, que se movem em velocidades muito menores do que aquelas associadas à velocidade da luz, dentre outras. Tal linguagem, segundo Bohr, poderia não ser adequada para dar significação estrita a eventos que recaem em outros contextos de aplicação, nos mesmos moldes que o faz em seus contextos de aplicação precípua. *À limitação da razão, em Kierkegaard, Bohr faz corresponder uma limitação da linguagem*, ao mesmo tempo que assume o papel constitutivo (e positivante) do paradoxo, como quando nos diz:

Que maravilha que nos deparamos com este paradoxo. Agora temos alguma esperança de fazer progresso⁹³.

A linguagem, portanto, poderia continuar a ser utilizada, *desde que* reconhecesse seus próprios limites, fruto da limitação da existência humana como existência particular.

Assim, tomando os resultados dos diversos experimentos, e tendo-se em mente que a dualidade onda-partícula jamais ocorre *em um mesmo experimento*, Bohr compreende que uma saída para o paradoxo que, entretanto, não o dissolve, é precisamente a percepção de que a experimentação, pela qual estabelecemos nossa relação com o mundo, faz emergir características *complementares* das entidades quânticas, cuja constituição efetiva desconhecemos (e sequer poderíamos expressar).

Trata-se, pois, do reconhecimento dos limites da linguagem humana em geral, decididos pelo seu ser no mundo, concreta e especificamente dado. Mas um reconhecimento não obliterante *por completo* da razão que, dentro dos limites de sua concretização na linguagem, ainda pode acessar *consistentemente* os fenômenos do mundo e explicá-los.

⁹³ Citado em: Bill Becker, "Pioneer of the Atom", *New York Times Sunday Magazine* (20 de outubro de 1957), pg. 52.

De fato, dado o caráter complementar dessa existência paradoxal, que a linguagem humana não é capaz de acessar, o que se pode fazer, no máximo, é revelar, com diferentes experimentos, visadas igualmente complementares.

O Princípio de Complementaridade, assim, não é de fato *um princípio físico*, mas uma hipótese forte sobre os limites da linguagem humana. *É um princípio linguístico*. Sua formulação é essencial para que se possa assumir o Princípio de Dualidade sem se recair em um irracionalismo selvagem. Essa característica não o colocaria jamais no plano semântico profundo, como talvez desejasse Bohr, mas naquele discursivo.

De fato, de modo geral, é feita uma relação do Princípio de Complementaridade com a sintaxe profunda da teoria, ao associá-lo às relações de indeterminação de Heisenberg, interpretando-as, como já assinalado no capítulo 1, em termos da impossibilidade de se medir certos pares de grandezas simultaneamente. Entretanto, isso é feito lançando mão de elementos semânticos, como o Observador (O-maiúsculo) e toda uma teoria da medida, que não se encontram refletidos nesse mesmo aparato sintático, mas que são introduzidos apenas no plano discursivo da teoria, como já ressaltado.

O Princípio de Complementaridade desobstrui o concurso da razão para as análises de experimentos físicos na medida em que *circunscreve temporalmente* sua ocorrência, da mesma forma que a condiciona à forma de construção do aparato experimental. Assim, o paradoxo jamais se torna contradição lógica. Mantém-se no plano ontológico como paradoxo, mas permite que se construa, a partir de cada realização experimental concreta, uma cadeia de raciocínios (inferências) perfeitamente válidos, levando a desdobramentos concretamente adequados. É, pois, nesse sentido específico que o paradoxo, no contexto da Física, jamais se torna *nonsense*, mesmo mantendo-se como paradoxo.

Ocorre que isso é feito, como visto, com uma hipótese forte sobre os limites de *toda linguagem humana*. Nessa hipótese, a linguagem precisa conviver com o paradoxo ontológico que não consegue superar. Não há

absolutamente motivo para, frente a novas proposições paradoxais, também de caráter ontológico, algumas eminentemente absurdas, acanhar-se. Eis aqui uma das razões de se ter tantos físicos qualificados admitindo tantas interpretações desconcertantes.

O absurdo, entendido aqui como o encontro entre o paradoxo ontológico e a linguagem, já não constitui motivo suficiente para a desqualificação de qualquer teoria física que se coloque em um contexto de enunciação *para além dos limites da linguagem* (muitos mundos? Totalidades?).

Qual estudante de Física, ou que tenha tido contato com a Mecânica Quântica, não ouviu de seu professor, quando de uma pergunta exasperada com as interpretações inusuais da teoria, que a Mecânica Quântica “é estranha assim mesmo”, que

A dificuldade é realmente psicológica e existe no tormento perpétuo que resulta de você dizer a si mesmo: “Mas como pode ser assim?”, o que é um reflexo do desejo descontrolado, mas totalmente vão, de ver isso em termos de algo familiar. Não vou descrevê-lo em termos de analogia com algo familiar; Vou simplesmente descrevê-lo. Houve um tempo em que os jornais diziam que apenas doze homens entendiam a teoria da relatividade. Não acredito que tenha existido tal época. Pode ter havido um tempo em que apenas um homem a compreendia, porque ele foi o único que a percebeu antes de escrever seu artigo. Mas depois que as pessoas leram o artigo, muitas pessoas entenderam a teoria da relatividade de uma forma ou de outra, certamente mais de doze. Por outro lado, acho que posso dizer com segurança que ninguém entende a mecânica quântica. Portanto, não leve a palestra muito a sério, achando que você realmente precisa entender em termos de algum modelo o que vou descrever, mas apenas relaxe e aproveite. Vou lhe contar como a natureza se comporta. Se você simplesmente admitir que talvez ela se comporte assim, você a achará uma coisa encantadora e fascinante. Não fique dizendo a si mesmo, se puder evitá-lo: “Mas como pode ser assim?”, porque você irá “pelo ralo”, em um beco sem saída do qual

ninguém escapou. Ninguém sabe como pode ser assim. (Richard P. Feynman, *The Messenger Lectures*, 1964, MIT)⁹⁴

Trata-se da tese do “silêncio” wittgensteiniano frente “aquilo de que não se pode falar” (figurativamente) (WITTGENSTEIN, 2017)⁹⁵, mas agora no contexto de uma teoria da natureza, não mais naquele da ética, por exemplo.

Ocorre que, no contexto de uma semântica fundamental, os referentes dos símbolos que comparecem em suas proposições axiomáticas (vide Mecânica Newtoniana e Teoria Eletromagnética) decorrem da consideração e *modelagem* de inúmeras situações particulares, em que uma ontologia se constitui juntamente com a própria semântica. Ao instalarmos (equivocadamente), como Bohr o faz, o conceito de paradoxo *nesse mesmo nível fundamental*, somos obrigados a reposicionar a importância e força dos modelos como propositores de uma ontologia de fundo.

Assim, a partir dessas considerações, como devemos compreender o posicionamento (ou reposicionamento) da noção de modelo em Física, e como isso se conecta com a noção de uma interpretação (ampla) da Mecânica Quântica?

No próximo capítulo, abordaremos a noção de modelos físicos no contexto da Mecânica Quântica para, em capítulo subsequente, tratar da

⁹⁴ “The difficulty really is psychological and exists in the perpetual torment that results from your saying to yourself, ‘But how can it be like that?’ which is a reflection of uncontrolled but utterly vain desire to see it in terms of something familiar. I will not describe it in terms of an analogy with something familiar; I will simply describe it. There was a time when the newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. There might have been a time when only one man did, because he was the only guy who caught on, before he wrote his paper. But after people read the paper a lot of people understood the theory of relativity in some way or other, certainly more than twelve. On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics. So do not take the lecture too seriously, feeling that you really have to understand in terms of some model what I am going to describe, but just relax and enjoy it. I am going to tell you what nature behaves like. If you will simply admit that maybe she does behave like this, you will find her a delightful, entrancing thing. Do not keep saying to yourself, if you can possibly avoid it, ‘But how can it be like that?’ because you will get ‘down the drain’, into a blind alley from which nobody has escaped. Nobody knows how it can be like that.”

⁹⁵ “Os limites da minha linguagem são os limites de meu mundo” (WITTGENSTEIN, aforismo 5.6, 2017) e “Naquilo que não se pode falar, deve-se ficar em silêncio.” (WITTGENSTEIN, aforismo 7, 2017).

questão de uma interpretação ampla da Mecânica Quântica, em ambos os casos os correlacionando ao princípio de Complementaridade.

Capítulo 4. O papel de modelos físicos na Mecânica Quântica

4.1 Modelos e a semântica de teorias físicas

O século XX foi pródigo em desenvolver abordagens epistemológicas que serviam como um meta-discurso para as ciências naturais, em particular a Física. Surgiram inúmeras abordagens, para além daquela relacionada a um realismo ingênuo, que justamente apresentavam dúvidas quanto às proposições articuladas naquele contexto.

Grosso modo, a perspectiva realista ingênuo pretende que uma teoria científica seja uma descrição literal da natureza. Essa perspectiva, historicamente característica de estágios científicos menos elaborados, vicejou nesse contexto pelo fato de que as descrições feitas dos fenômenos se apresentavam muito próximas das observações experimentais. A Mecânica Newtoniana oferece inúmeros exemplos desse tipo de descrição.

À medida que as teorias se tornaram mais abstratas (e complexas), ficou fácil notar que diversas proposições feitas em seu arcabouço teórico não poderiam ser submetidas a qualquer tipo de teste experimental imediato. Isso pode se dar porque os eventos descritos são “muito pequenos” para serem observados (e.g. a maioria dos fenômenos quânticos), porque a própria estrutura do objeto sendo estudado impede tal observação direta (e.g. buracos negros), exigindo observações *indiretas* do fenômeno etc.

É fato que o realista pode contra-argumentar, afirmando que, em qualquer situação em que haja uma teoria, o significado das proposições não se restringe apenas a elementos observáveis dela, mas se constitui a partir das exigências teóricas juntamente com requisitos metafísicos (em geral relacionados com a

Matemática) que possam garantir que o “conteúdo de verdade” dessa descrição não é descontinuado apenas por não se poder acompanhar cada passo da formulação teórica subjacente.

De fato,

É bem conhecido que muitos físicos [do século XIX] compreendiam a mecânica como a teoria física básica, e a explicação em outros campos, como por exemplo, [quanto ao] calor, luz, eletricidade e magnetismo, era pensada ser incompleta a menos que pudesse ser dada em termos da mecânica de corpos rígidos, elásticos ou fluidos. Mas o que não é muito frequentemente compreendido é que esses modelos mecânicos muito dificilmente eram considerados como descrições de entidades existentes na natureza. Em muitos casos teria sido fantástico considerá-los dessa maneira (HESSE, 1962, p. 4).

Nesse sentido, Maxwell (1873, p. 416) afirmava explicitamente que os modelos mecânicos não deveriam ser considerados como estruturas existentes na natureza, sendo apenas uma maneira de mostrar que poderiam ser feitos “equivalentes” às estruturas eletromagnéticas pressupostas para o éter (PURRINGTON, 1997). O modelo mecânico de campo eletromagnético do próprio Maxwell (Figura 4-1) seria um exemplo perfeito desse tipo de pensamento.

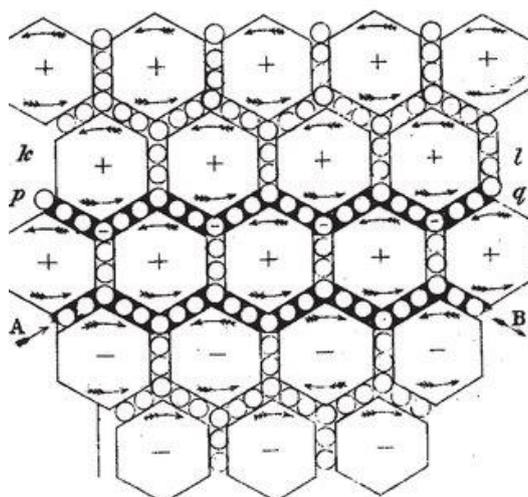


Figura 4-1. Modelo mecânico de Maxwell para o campo eletromagnético. Fonte: Maxwell (1862).

De fato, Maxwell afirma que, dado um fenômeno, é possível divisar um número virtualmente infinito de modelos mecânicos (HESSE, 1992). Tais modelos, portanto, não são postulados corresponder fielmente ao fenômeno, nem tampouco serem únicos. O que se exige, de fato, é que *algumas das suas propriedades matemáticas*, que definem o comportamento dos entes propostos, sejam mapeadas nas propriedades do fenômeno em questão. O advento da Mecânica Quântica tornou esse ponto ainda mais crucial, uma vez que, em certas interpretações, afirma-se que tal modelo sequer estaria *disponível* (como é o caso do spin semi-inteiro, por isso mesmo dito não possuir correspondente clássico).

Com o surgimento, no início do século XX, da Mecânica Quântica e das teorias da relatividade, outras abordagens sobre a epistemologia da Física se mostraram necessárias, como forma de abarcar novas complexidades do conhecimento físico trazidas por tais avanços teóricos. Muitas dessas novas propostas tinham como ponto central a questão dos termos teóricos envolvidos nas teorias físicas – e sua possível eliminação.

O *operacionalismo* foi uma sugestão nesse sentido. Eddington, em seu livro *Mathematical Theory of Relativity*, de 1923, deu uma definição precisa do que se buscava com essa proposta: “uma quantidade física é definida por uma série de operações e cálculos da qual é o resultado” (Eddington, 1923, p. 3). As várias abordagens acerca do operacionalismo seguiram mote similar, com pequenas modificações. A ideia seria expressar os conceitos teóricos explicitamente em termos de operações de laboratório necessárias para que se obtivesse seu valor experimental.

Essa abordagem se imiscuiu na própria interpretação da Mecânica Quântica, que se concretizou nesse período (a primeira Interpretação de Copenhague é de 1927). De fato, assume-se, até hoje, que o operador hamiltoniano é, de fato, o que concretiza, no formalismo quântico, o ato de medida da energia do estado de um sistema, representado pela função de onda. Assim, o autovalor obtido da aplicação do hamiltoniano à função de onda é

concebido como o valor experimental da energia obtido desse hamiltoniano que, por sua vez, pode ser expresso em termos experimentais⁹⁶.

Ocorre que Ramsey (1931), dentre outros (BRAITHWAITE, 1953; HESSE, 1952) demonstraram que *não é possível* definir todos os conceitos de uma teoria científica em termos de operações. O exemplo da função de onda, para ficar apenas no contexto da Mecânica Quântica, demonstra bem essa ideia. Ademais, essa questão da tradução necessária dos termos teóricos em termos observacionais, do ponto de vista da ação dos próprios físicos, não é vista como de grande relevância para sua atuação.

Mas a terceira e mais danosa objeção [ao operacionalismo] quanto à sua aplicabilidade geral é que se definições explícitas de conceitos teóricos em termos observacionais fosse possível, a teoria se tornaria inútil por não ser mais capaz de crescer. Teorias devem ter uma “textura aberta” (...) uma parte de seus significados não definidos por observação pois, de outro modo, todo o significado da teoria mudaria sempre que fosse desejável incorporar nas observações algum tipo novo, e é precisamente a função de teorias assimilar tais novas observações sem que o significado completo da teoria seja alterado (HESSE, 1962, p. 8).

Dado o abandono, quase geral, dessa perspectiva operacionalista, novas tentativas foram feitas. Uma delas, de grande relevo, foi a abordagem falseacionista, associada à perspectiva hipotético-dedutiva, proposta por Popper (2018). Nessa abordagem, já se assume de antemão que nem todas as proposições teóricas podem ser interpretadas como afirmações experimentais, nem sequer podem ser confirmadas ou refutadas por experimentos. A mudança importante de perspectiva foi a passagem de uma noção verificacionista de ciência para uma na qual não se busca verificar uma teoria, mas sim refutá-la.

A ideia, portanto, é que proposições teóricas relevantes devem gerar consequências empíricas (mesmo que as próprias proposições não possam ser escritas como procedimentos empíricos). Como a estrutura lógica formal das

⁹⁶ É dessa noção que decorre, por exemplo, a ideia de que um autovalor do hamiltoniano representa uma medida sem dispersão, ou a noção do “conjunto completo de observáveis”, representado pelos autovalores de todos os operadores que podem ser simultaneamente diagonalizados em determinado sistema físico.

asserções teóricas passa a ser considerada como similar às proposições lógicas de caráter universal, o que se pode fazer não é mais verificá-las experimentalmente, mas sim refutá-las com eventuais contraexemplos. Além disso, a ideia seria eliminar proposições que não apresentem consequências empíricas testáveis.

Essa perspectiva se aproximava consideravelmente das intuições dos físicos em particular (e cientistas em geral), relativamente à inclusão, por exemplo, de afirmações *ad hoc* com vistas a “salvar uma teoria” de eventos que lhe são desfavoráveis. Mais ainda, estabelecia um critério importante de reconhecimento de teorias científicas, uma vez que uma teoria que fosse criada com a simples razão de *descrever* apenas as consequências empíricas conhecidas seria não falseável e, portanto, cientificamente irrelevante. Ou seja, teorias cientificamente relevantes são aquelas capazes de *prever* novos eventos, justamente o momento em que se tornam passíveis de falseamento. Nesse sentido, a possibilidade de falseamento serviria, também, como critério de demarcação quanto à cientificidade de teorias.

Ocorre que, a despeito de sua clara especificação nesses termos gerais (AYER, 2021), sua aplicabilidade concreta, em teorias físicas específicas, se mostrou muito complexa. A partir de tais requisitos lógicos gerais, não foi possível desenvolver um conjunto de condições necessárias e suficientes para que se pudesse afirmar, de um sistema de proposições teóricas, seu caráter cientificamente significativo (HEMPEL, 1950). O problema aqui era que os critérios formalizados ou deixavam de fora teorias aceitas por todos como claramente científicas, ou as incluía, com a consequente inclusão de abordagens claramente não científicas.

Chegou-se, assim, à conclusão de que critérios formais poderiam se apresentar como necessários, mas não suficientes para a aceitação do caráter científico, ou de existência de significado empírico, de determinada abordagem sobre o mundo.

Mais ainda, as teorias mais modernas em Física estão expressas de forma extremamente abstrata, por proposições contendo termos não observáveis e que sequer guardam relação direta com os termos de observação.

Assim, novas abordagens se mostraram necessárias. Uma dessas abordagens propostas foi aquela da Teoria do Dicionário, que representava uma extensão mais forte da formulação hipotético-dedutiva.

Nessa perspectiva, as teorias físicas são concebidas como um sistema formal que não precisa estar totalmente interpretado, pois o significado de proposições e termos teóricos desse sistema é dado pela sua interconexão com outros termos do próprio formalismo. Por outro lado, os termos e proposições observacionais possuem significado independente dos termos teóricos, como não poderia deixar de ser, para que o sistema não se trivialize.

Assim, termos teóricos não possuem uma semântica associada a eles, mas apenas uma sintaxe, e adquirem significado físico a partir de conexões com termos observacionais, realizadas através de uma relação do tipo “dicionário”. Como um exemplo,

De acordo com essa perspectiva, por exemplo, a teoria quântica poderia ser desenvolvida em termos puramente matemáticos sem qualquer interpretação dada aos símbolos usados, até que certas fórmulas fossem encontradas no esquema dedutivo que poderiam ser traduzidas diretamente em proposições testáveis. Considere a equação

$$\left(1 + \frac{h\nu}{mc^2}\right) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = \cot(\theta).$$

Ela é obtida por um processo dedutivo dos axiomas formais da teoria quântica, e pode ser traduzida segundo o “dicionário” da seguinte maneira:

- ν é a frequência de radiação X em determinado experimento de câmara de Wilson (cujo aparelho experimental pode ser exhaustivamente descrito em termos não técnicos);
- ϕ e θ são certos ângulos entre duas linhas brancas que não se interseccionam, desenhadas sobre a fotografia da câmara de nuvens, e uma terceira linha desenhada do final de uma ao final da outra;
- h , m e c são constantes físicas.

A equação com esta interpretação pode, agora, ser testada experimentalmente (HESSE, 1962, pg. 14).

Assim, se os físicos ainda mantêm sua prática de expressar seus sistemas em termos visualizáveis, a partir de modelos, isso seria, segundo defensores dessa perspectiva, um maneirismo dispensável. Segundo essa perspectiva, tais modelos, uma vez atingida a consecução da teoria, poderiam ser abandonados.

Uma objeção a essa abordagem se volta para a noção de que proposições empíricas podem gerar testes a hipóteses mesmo que as hipóteses, elas mesmas, não possuam significado em si, ou, ao menos, se as proposições empíricas forem independentes desse significado. Na equação apresentada anteriormente, como saber se a interpretação ali apresentada é, de fato, relevante para a teoria física de fundo? Se os símbolos ali apresentados são apenas símbolos matemáticos indeterminados, eles podem ser interpretados de inúmeras formas diferentes, e sua conexão com a teoria de fundo, uma vez que tal interpretação é independente dessa teoria, será, no mínimo, arbitrária.

O fato é que as interpretações das variáveis que ocorrem na equação já têm seu campo semântico possível circunscrito pela teoria; o dicionário não é arbitrário, e os símbolos das hipóteses já são interpretados em termos *de um modelo* associado à Mecânica Quântica, de tal modo que já se sabe de antemão, quais tipos de fenômenos serão relevantes para sua aplicação. Há, pois, uma inversão de prioridade entre modelos e dicionários que explicita a importância dos modelos para as nossas interpretações de teorias físicas. Nessa perspectiva, *são os modelos que carregam a semântica da teoria física*, estabelecendo, precisamente, as conexões formais (principalmente se são modelos matematizáveis, como é o caso usual na Física) entre proposições empíricas e proposições teóricas. Nesse sentido, levando-se em conta o que dissemos no capítulo 1, *os modelos são os elementos essenciais para a explicitação da semântica profunda que será expressa, sistemicamente, pelos postulados da teoria*.

O que o modelo busca garantir é a *relevância* daquele experimento, que concretiza a expressão matemática em questão, para a teoria subjacente.

4.2 Modelos em Física

Os modelos em Física são construídos a partir de processos que envolvem conhecimentos já bem estabelecidos, como, por exemplo, o modelo de bola de bilhar, cujas propriedades e interconexões sintáticas e semânticas são bem desenvolvidas no contexto da mecânica de partículas⁹⁷. Isso significa que eles proveem aquele contexto teórico que pretendem modelar com os elementos que, afinal, devem ser buscados em eventuais testes⁹⁸. Assim, no contexto do efeito fotoelétrico, em que se observou que a transmissão de energia entre o feixe de luz e a placa metálica era imediata e com um caráter quantizável, o modelo de partículas se chocando foi chamado a contribuir. Ocorreu o mesmo com o efeito Compton, em que o espalhamento de elétrons por alvos atômicos foi completamente descrito em termos de choques entre partículas, envolvendo as equações de conservação de momentum e energia.

⁹⁷ O campo da Filosofia da Ciência relacionado com a análise e conceituação de modelos é imensamente rico. De fato, models have attracted philosophers' attention and there are now sizable bodies of literature about various aspects of scientific modeling. A tangible result of philosophical engagement with models is a proliferation of model types recognized in the philosophical literature. *Probing models, phenomenological models, computational models, developmental models, explanatory models, impoverished models, testing models, idealized models, theoretical models, scale models, heuristic models, caricature models, exploratory models, didactic models, fantasy models, minimal models, toy models, imaginary models, mathematical models, mechanistic models, substitute models, iconic models, formal models, analogue models, and instrumental models* are but some of the notions that are used to categorize models. While at first glance this abundance is overwhelming, it can be brought under control by recognizing that these notions pertain to different problems that arise in connection with models. Models raise questions in semantics (how, if at all, do models represent?), ontology (what kind of things are models?), epistemology (how do we learn and explain with models?), and, of course, in other domains within philosophy of science (Stanford Encyclopedia of Philosophy, *Models in Science*. Internet: <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/#ModeOtheDebaPhilScie> (consultado em: 03/05/2020)).

⁹⁸ Do ponto de vista deste trabalho, modelos são úteis, do ponto de vista ontológico, para individuar objetos físicos relevantes para determinada descrição de um experimento ou teoria; do ponto de vista epistemológico para caracterizar, explicar e compreender fenômenos ou teorias físicas; e do ponto de vista semântico como representacionais de fenômenos ou teorias. Assim, por exemplo, o *modelo estocástico representa* (semântica) a teoria quântica como consistindo em partículas (ontologia) que se movem de maneira aleatória e mecânica e são o fundamento da Interpretação Estocástica da Mecânica Quântica (epistemologia) que, claro, possui outros modelos mais específicos, atrelados a situações particulares.

Nesse processo de modelagem, não é de modo algum necessário que o modelo seja considerado como uma representação *literal* da natureza – o que nos levaria de volta ao realismo ingênuo – mas sua contribuição para dar ao contexto teórico sendo modelado não apenas inteligibilidade, como testabilidade, ao mesmo tempo que aponta para possibilidades de extensão desse contexto (relativas à riqueza do modelo, mas também seu escopo de aplicabilidade). São esses fatores que fornecem aos modelos sua dimensão propriamente semântica e assim, dada a sua precedência lógica e estando no nível narrativo, se tornarem capazes de evidenciar a semântica profunda.

Essas propriedades dos modelos decorrem de apresentarem uma *analogia* com o fenômeno que desejam explicar. Evidentemente, a analogia é sempre um elemento intralinguístico, de modo que ela se dá entre as expectativas de medição de propriedades que o modelo sugere e as efetivas medições que são realizadas no fenômeno. Tal analogia é, pois, de caráter estrutural, uma vez que as testagens físicas são feitas, na maioria absoluta dos contextos experimentais, com a fixação dos inúmeros elementos intervenientes e a comparação entre alguns poucos, cuja variação de alguns valores se deseja ver correlacionada com a variação dos demais. A esse controle experimental, representado pela inter-relação concreta entre as variáveis pertinentes de um contexto teórico, corresponde homomorficamente, uma inter-relação formal entre os símbolos dessas variáveis e o cálculo *matemático* formal subjacente, como na expressão de um homomorfismo⁹⁹, dada por

$$f(a * b) = a \supset b,$$

⁹⁹ Note que definimos a relação como um homomorfismo, não um isomorfismo, como em Suppes (1967, pg. 59), que afirma que: “We cannot literally take a number in our hands and apply it to a physical object. What we can do is to show that the structure of a set of phenomena under certain empirical operations is the same as the structure of some set of numbers under arithmetical operations and relations. The definition of isomorphism of models in the given context makes the intuitive idea of same structure precise. The great significance of finding such an isomorphism of models is that we may then use all our familiar knowledge of computational methods, as applied to the arithmetical model, to infer facts about the isomorphic empirical model.” Tal questão deriva do fato de não concebermos uma teoria física como uma teoria semântica nos mesmos termos de Suppes, como já ressaltado.

em que * representa as realizações experimentais concretas que, por meio de f geram números que, por sua vez, podem ser comparados com os números das operações \sqsupset , realizadas no âmbito formal associado ao contexto teórico *que o modelo já fixou*. Assim, por exemplo, no modelo planetário de Kepler temos, da perspectiva teórica, um conjunto de inter-relações simbólicas (e.g. a conservação do momento angular no contexto de forças centrais) que garantem que o vetor que une os dois planetas considerados varre áreas iguais em tempos iguais. Isso poderia ser escrito como

$$\sqsupset \left(\frac{d\vec{L}}{dt} = 0 \right),$$

enquanto o conjunto de operações “*” pode ser associado a processos de realização de experimentos que efetivamente medem essas distâncias ($\vec{d}(t_1), \vec{d}(t_2)$, simplifadamente), as trajetórias dos planetas e as áreas varridas.

O fato de ser um *homomorfismo*, e não um isomorfismo (ou seja, de não ser uma relação um-para-um), é justamente o indicativo de que não é esperada uma representação literal, mas passível de correções, extensões ou mesmo abandono. Essa descrição, ademais, está incrustada no próprio fundamento do que sejam teorias físicas, desenvolvido a partir de Galileu segundo sua metafísica da Matemática e da experimentação, e que persiste até os dias atuais, fornecendo os critérios de verdade ou adequação de tais teorias.

Nesse sentido, o modelo não é, de modo algum, algo dispensável à inteligibilidade de um contexto experimental, pois fornece a possibilidade de ser estendido, testado e modificado, algo que uma teoria puramente formal e dedutiva não é capaz de fazer em si mesma. O modelo, ademais, provê *perguntas* que podem ser feitas significativamente no contexto abarcado. De fato:

o comportamento de uma coleção de partículas movendo-se de maneira aleatória em um recipiente fechado é descrito na teoria dinâmica independentemente dos resultados experimentais sobre gases, com os quais se deseja compará-lo, e isso significa que ramificações ulteriores da teoria de partículas colidindo

entre si podem ser usadas para estender e testar a teoria dos gases. Novas questões podem ser feitas, como: 'As moléculas dos gases são, de fato, como esferas rígidas ou como elásticas?', 'Qual é o diâmetro delas?', e assim por diante, e a teoria é testada e desenvolvida tendo em vista esses experimentos para responder questões como estas, sugeridas pelo modelo (HESSE, 1962).

Para funcionar da maneira prescrita anteriormente, como um tipo de analogia ou homomorfismo, os modelos devem ser construídos a partir de propriedades já conhecidas, descritas preferivelmente em termos de linguagem matemática e devem ser passíveis de modificações e eventuais extensões, mas, obviamente, não precisam ser modelos *mecânicos*.

Como veremos mais adiante, a Mecânica Quântica estabeleceu uma relação conflituosa com a questão da proposição de modelos, ao pressupor que não poderia haver *um único modelo*, exprimível na linguagem ordinária, ou com conceitos associados aos âmbitos clássicos, como aqueles de partículas carregadas ou ondas.

Tal é o conteúdo semântico do Princípio de Dualidade e da superveniência a este do Princípio de Complementaridade. Historicamente, em consequência disso, assumiu-se a dispensabilidade (e, de fato, a impossibilidade) de modelos visualizáveis, devendo o físico se conformar com a apresentação das construções matemáticas que não tematizam essas questões e nos quais os paradoxos de representação, envolvidos na tentativa de se usar uma ou outra abordagem, não ocorrem.

É um engano assumir que teorias físicas são estruturas formais não interpretadas, concebendo-as apenas como uma coleção de símbolos combinados por axiomas arbitrários¹⁰⁰. Se assim fosse, sua relação com os contextos experimentais de teste jamais seria estabelecida, ou o seria de forma apenas descritiva, em que do cálculo é esperado apenas que acompanhe os

¹⁰⁰ Vemos referências a essa perspectiva surgirem em vários momentos da história da Mecânica Quântica, em particular com Heisenberg, como se verá a seguir. Um exemplo moderno dessa perspectiva é o tratamento do spin semi-inteiro, para o qual se assume não haver modelo físico correspondente. Essa questão permeia toda a discussão entre Bohr e Schrödinger sobre o papel da visualização (representatividade de modelos, um aspecto semântico) em Mecânica Quântica.

resultados experimentais. Tais *regras semânticas* só podem ser articuladas a partir de um cálculo já interpretado. Isso é feito usualmente, mesmo na Mecânica Quântica, uma vez que, para construir o operador hamiltoniano associado a algum fenômeno particular, faz-se necessário pensá-lo em termos de um modelo subjacente (como no átomo de hidrogênio).

O caso do spin semi-inteiro de entidades quânticas mostra uma peculiaridade importante: a estrutura formal do cálculo matricial permite expressar as equações sem um modelo físico particular – assume-se, muitas vezes na literatura que, de fato, isso seria impossível, o que mostraria a incompatibilidade entre os âmbitos ontológicos clássico e quântico. Trata-se, pois, de um modelo matemático que, entretanto, ainda possui regras semânticas relativas à energia etc. Essa é, de fato, a razão para que a análise dessa área da Mecânica Quântica seja feita em termos do cálculo matricial, e não do formalismo hamiltoniano. Em muitos contextos quânticos, esse é o tipo de modelo utilizado.

No que se refere particularmente à Mecânica Quântica, a questão fundamental é aquela sobre a maneira em que consideramos tais modelos, se os levamos mais a sério quanto às suas capacidades semântico-ontológicas (e mesmo compreensivas), ou se os consideramos apenas como escadas de que podemos nos livrar sem grandes perdas de compreensão física, após termos chegado a uma descrição matemática satisfatória. O problema aqui pode ser colocado em termos das questões associadas ao caráter homomórfico da relação entre modelos e fenômenos, ou seja, à possibilidade (quase certeza) de haver, em cada aplicação de um modelo, uma *analogia positiva* (em que o modelo corretamente expressa as relações experimentais buscadas) e uma *analogia negativa* (em que o modelo físico falha em fazê-lo, ou simplesmente não abarca tais relações)¹⁰¹.

¹⁰¹ Essas noções são quase uma trivialidade: uma analogia que não se degenera em identidade já pressupõe, necessariamente, uma dimensão positiva e uma dimensão negativa. Entretanto, por razões expositivas, não faz mal explicitá-las terminologicamente.

A abordagem estritamente *lógica* da epistemologia terminou por colocar, e permanece colocando, excessivo peso na questão da verdade, em sentido estrito, uma vez que é através desse conceito que a Lógica estabelece sua semântica.

A passagem para uma análise de teorias físicas a partir da noção de modelo pretende justamente *superar* as dificuldades que uma abordagem estritamente lógica termina por impor em função de suas próprias características, que não parecem adequar-se totalmente à maneira como as teorias físicas são tratadas pelos próprios físicos. Termina-se, pois, por se concluir que a insistência (óbvia, diga-se) dos físicos em se manter usando modelos é um mero *maneirismo* evitável, um mau hábito epistemológico, que poderia ser eliminado.

A abordagem semântica de teorias físicas em termos de modelos¹⁰², na qual o conceito de analogia é perfeitamente articulável, com seus aspectos de positividade e negatividade, supera a abordagem lógica (em que se busca sempre falar em verdade aproximada, por exemplo), na medida em que reconhece que, da existência de uma analogia negativa, não se segue que as relações propostas pela analogia positiva não trazem elementos de realidade. Não se articula, nesse contexto semântico dos modelos, a ideia de que “modelos estão sempre errados”, ou “teorias físicas são sempre falsas” (ou “aproximadamente verdadeiras”), mas sim que tais modelos são sempre análogos, um conceito que abarca as noções de verdade (aproximada, se quiserem), mas que é imensamente mais rico que ela (HESSE, 1962).

Assim, o peso essencial que a epistemologia moderna, de caráter lógico formal, coloca sobre a dimensão posta pela analogia negativa, se dissipa nesse contexto, ou, ao menos, é mitigado, estabelecendo paridade de forças entre a analogia positiva e aquela negativa. Uma abordagem *linguístico-semântica* das

¹⁰² Lembrando que nossa descrição, neste trabalho, se distancia daquela de Suppes (1967) em pontos importantes, como na definição do aparato sintático como estando relacionada à Matemática e não à Teoria dos Conjuntos.

teorias físicas permite, ademais, estabelecer noções importantes, como aquela de *contexto descritivo*.

Assim, um modelo deveria ser percebido como a descrição factual de um fenômeno se ele apresentar uma analogia positiva testável com este, e nenhuma analogia negativa *até então testada*. O termo “até então”, que temporaliza esse conceito de modelo, é justamente o que fornece a ele sua textura aberta, atualizável, que permite definir, de maneira semanticamente precisa, a noção de *contexto descritivo*. Essa temporalização, perfeitamente articulável no contexto linguístico-semântico, é muito mais demandante no contexto da semântica lógico-formal, pela ligação que esta última estabelece entre as proposições e seus possíveis valores de verdade (em um eterno presente, mesmo que ainda não acessado).

A discussão anterior mostra que a aceitação do Princípio de Complementaridade incide de maneira negativa na posição que os modelos cumprem no processo de geração de sentido – basicamente enviando-os do nível fundamental (se for modelo *da teoria*) ou narrativo (se for modelo de um fenômeno particular) ao nível discursivo – e servem como mais um passo na nossa compreensão da Interpretação de Copenhagen relativamente a essa noção.

4.3 A Interpretação de Copenhagen e Modelos Físicos

Do que foi apresentado até aqui, neste capítulo, podemos retomar algumas conclusões sobre a efetividade e necessidade de modelos para a compreensão de teorias físicas.

No contexto da Física, com vistas à construção de uma interpretação mais ampla e voltada para toda uma teoria física, o desenvolvimento de modelos é essencial. De fato, não raro, a própria teoria pode se basear em um modelo – a

Interpretação Estocástica faz precisamente isso – o que coloca o modelo no plano semântico profundo.

Os modelos particulares, que se localizam no nível narrativo da teoria, compõem a massa de resultados parciais, não raro assistemáticos, que estabelecem, paulatinamente, um enquadramento ontológico da teoria que está por se interpretar (e que, muitas vezes, ainda nem existe *como teoria*). Tais modelos “originários” (por se referirem ao nascimento da teoria) interagem com o nível semântico mais profundo da teoria por sugerir, em particular, a atribuição de referentes para seus símbolos, ao menos aqueles principais – excetuados aqui os chamados termos teóricos. Uma vez constituída a ontologia profunda da teoria, é a partir desses modelos que tal teoria faz “propagar”, via cálculo formal e no plano narrativo, as infinitas interpretações possíveis de suas consequências matemáticas e, em alguns casos, justifica-se como a investidura de um modelo em nível teórico e, pois, profundo.

Como já dissemos, a Mecânica Quântica contou com tais modelos originários e já os citamos aqui (radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, efeito Compton, calor específico dos sólidos, átomo de Bohr, efeito Compton, difração de raios X, espectroscopia de dupla fenda, dentre outros). Ao contrário do que se viu ocorrer em outras teorias físicas (clássicas), o concurso desses inúmeros modelos originários *não contribuiu* para o afunilamento de uma ontologia de base – precisamente aquilo que emerge de uma semântica fundamental. Ao contrário, manteve em seu seio, *a partir de princípios*, essa duplicidade interpretativa em termos de ondas e corpúsculos que, por ensejar um paradoxo, exigiu outros princípios e construtos ontológicos como forma de não se deixar inundar por um irracionalismo selvagem.

Assim, o Princípio de Dualidade onda-partícula *exige* os outros dois princípios (Indeterminação e Complementaridade), mormente o último, que visam dar inteligibilidade àquele¹⁰³. Esses princípios exigiram, por sua vez, a

¹⁰³ Poder-se-ia afirmar que nas teorias físicas é assim mesmo, mas isso não é verdade. Nas teorias clássicas do Eletromagnetismo e da Mecânica, os princípios gerais (e.g. conservação da

interposição de construtos ontológicos sem espelhamento na sintaxe da teoria – o observador é um desses. Mais adiante, historicamente, viu-se que, para além desses princípios fundamentais, haveria a necessidade da criação de um Princípio de Redução do Pacote de Ondas (para a Interpretação de Copenhague), de modo a fazer com que os resultados experimentais fossem compatíveis com a interpretação que se forjou (em particular a que afirma que a função de onda se refere a *um único* sistema físico).

Estabeleceu-se, no interior da ontologia da teoria um *paradoxo ontológico*, que só pode ser “superado” a partir do Princípio de Complementaridade, invertendo-se a ordem usual: ao invés de irmos da semântica de fundo à ontologia subjacente, foi a (suposta) ontologia “verificada” nos experimentos – a dualidade – que implicou em um *reposicionamento semântico*, contido naquele princípio, afirmando a insuficiência da capacidade humana de interpretar um mundo ao qual a existência humana é alheia. Assim, o dito paradoxo ontológico foi superado linguisticamente sem ter sido debelado ontologicamente.

Não é preciso dizer que uma interpretação que inclui como um de seus princípios semânticos fundamentais a impossibilidade de certos graus interpretativos (“por nossa natureza ‘macroscópica’”), além de compor com uma ideia de paradoxo, introduz, em seu seio, considerável liberalidade interpretativa – da qual já falamos rapidamente. De fato, disso decorre a afirmação aceita quase universalmente de que “a Mecânica Quântica é estranha assim mesmo” – como não haveria de o ser: uma teoria que recepiona em sua ontologia profunda um paradoxo e que, com isso, limita, por princípio, nossa capacidade

carga, conservação da energia, dentre outros) estão *sempre* espelhados no formalismo e, de fato, decorrem de sua interpretação. Assim, a conservação da carga *decorre*, formalmente, das equações de Maxwell, assim como a conservação da energia, e se sabe que a equação obtida é de conservação da carga exatamente por já se ter, das equações de Maxwell, a interpretação dos elementos constituintes da equação. Mesmo a Primeira Lei de Newton (um princípio), se *traduz* na equivalência dos referenciais inerciais e, através das transformações de Galileu, se *expressa* no cálculo formal, ou seja, na sintaxe da teoria. O Princípio de Complementaridade sequer é um princípio físico, uma vez que tem por objeto a linguagem humana (ainda que na conexão desta com o mundo subatômico).

de interpretar (lembramos aqui da citação feita anteriormente na palestra apresentada por Feynman)?

Lembrando dessa mesma citação de Feynman, é mister reconhecer que nada disso foi realizado no âmbito das teorias da relatividade, que também são teorias contemporâneas da Física. Tais teorias *também* tratam de situações muito apartadas das nossas experiências cotidianas – velocidades próximas à da luz, dilatações temporais e contrações espaciais, espaços curvos, singularidades gravitacionais, dentre muitas outras. No entanto, mesmo com tal argumento, não foi inserida em sua semântica de fundo uma inadequação semântica qualquer. Parafraseando Feynman, depois de Einstein, todos (os envolvidos) compreendem adequadamente as teorias relativísticas, mesmo divergindo em questões de modelagem mais específicas (como a existência ou não de “matéria escura”), mas a Mecânica Quântica segue não sendo verdadeiramente compreendida por ninguém (no sentido de que não há concordância nos seus elementos interpretativos mais básicos).

Muito do que observamos aqui pode ser referido à maneira como a Mecânica Quântica surgiu e às discussões havidas em suas origens.

4.4 Modelos físicos e o nascimento da Mecânica Quântica

A questão do uso dos modelos físicos em Mecânica Quântica pode ser historicamente datada, se nos voltarmos, principalmente, para as discussões havidas entre Bohr e Schrödinger na década de 1920. Nelas, a questão da visualizabilidade¹⁰⁴ (do ponto de vista de Schrödinger) e de sua superação (pela perspectiva de Bohr), se mostram centrais.

De fato, Schrödinger era muito afeito a questões de interpretação. Sua principal crítica contra a abordagem matricial foi a incapacidade desta em

¹⁰⁴ Traduzimos assim o termo alemão *Anschaulichkeit*, que também pode ser traduzido por “clareza”.

fornecer uma *visualização* clara dos fenômenos quânticos, se constituindo, segundo ele, em mero esquema formal.

Na quarta parte de suas comunicações que levaram à formulação da equação que leva seu nome, ele desenvolveu uma interpretação para a função $\psi(x, t)$, chamada de função de onda. Sua interpretação tem inclinações eletromagnéticas, uma vez que, segundo Schrödinger, a densidade da carga elétrica, no caso de muitos sistemas de partículas, poderia ser pensada como dada por $e\psi^*(\vec{r}, t)\psi(\vec{r}, t)$:

[que] é uma espécie de função de peso no espaço de configuração do sistema. A configuração mecânica de ondas é uma superposição de muitas, estritamente falando de todas as configurações pontuais-mecânicas cineticamente possíveis. Assim, cada configuração ponto-mecânica contribui para a configuração mecânica de ondas verdadeiras com um certo peso, que é dada precisamente por $\psi^*\psi$. (MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 797)

Assim, segundo Schrödinger, enquanto para sistemas e movimentos macroscópicos a função-peso ocuparia uma região muito pequena do espaço, e seria irrelevante para a descrição do comportamento físico de tais sistemas, a distribuição da densidade sobre alguma região microscópica haveria de desempenhar papel fundamental. Concluía, então, que essa quantidade poderia fazer a diferença para problemas mecânico-quânticos, ao mesmo tempo que seria irrelevante para situações clássicas.

É importante notar que, de acordo com essa abordagem, a noção de partícula dependeria da noção de ondas, uma vez que o *comportamento* das partículas seria a manifestação de uma *natureza* ondulatória subjacente, definida em escalas menores (dada pela função de onda).

Schrödinger foi, posteriormente, forçado a mudar suas perspectivas, assumindo que as vibrações representadas por $\psi(\vec{r}, t)$ devem estar ligadas às "flutuações eletrodinâmicas muito eficazes da densidade elétrica espacial". Certamente, essa nova interpretação enfraqueceu seu argumento para a questão da visualização, mas Schrödinger em uma carta a Wien disse que

isso não importa realmente. Se só se pode controlar, com sua ajuda [ou seja, das vibrações ψ], distribuições e flutuações da eletricidade, que são reais no sentido mais alto, então pode-se chamá-los de conceito substituto no mesmo sentido que se fala dos potenciais eletrodinâmicos, dos quais apenas as derivadas podem ser observadas. (Ver carta de Schrödinger para Wien, 18 de junho de 1926, Wien Collection, Deutsches Museum, Munique. Citado em (MEHRA & RECHENBERG, 1982))

As ideias de Schrödinger foram recebidas mais favoravelmente por Planck, Einstein, Lorenz, Sommerfeld e Wien, entre outros. Eles consideraram realmente importante o uso de equações diferenciais para abordar a Mecânica Quântica. Heisenberg, por outro lado, acreditava que deveria haver um único esquema formal para a solução de problemas na Mecânica Quântica e, uma vez que este esquema foi encontrado com a proposição do cálculo matricial, não deveria haver espaço para qualquer outro.

Heisenberg estava muito angustiado com a teoria de Schrödinger e esperava que algo nela estivesse errado. Quando, em junho de 1926, Born aplicou o método de Schrödinger a problemas de colisões atômicas (levando-o à interpretação da função de onda em termos estatísticos), Heisenberg o repreendeu. Heisenberg, em 1968, lembrou muito vividamente uma palestra de Schrödinger da qual participou. Segundo ele,

em julho de 1926, Schrödinger foi convidado a Munique por Wilhelm Wien para relatar sua teoria. Os físicos experimentais em Munique, liderados por Wien, estavam entusiasmados com a possibilidade de que agora talvez esse "mistério quântico da física atômica" pudesse ser tratado, e seria capaz de retornar aos conceitos clássicos de campos honestos, como aprendido com a teoria de Maxwell. Eu ouvi esta palestra de Schrödinger, pois eu estava então ficando com meus pais em Munique para as férias; e eu estava bastante horrorizado com sua interpretação, porque eu simplesmente não podia acreditar. Eu me opus [na discussão] que, com tal interpretação, não se seria capaz de explicar a lei de radiação de Planck. Mas a opinião geral naquela época era extremamente hostil à minha objeção. Wien me respondeu muito duramente que ele podia entender como eu me sentia sobre o fato de que todo o salto quântico, as matrizes e tudo mais tinha se tornado supérfluo; De qualquer forma, seria melhor para mim deixar o campo para Schrödinger,

que certamente resolveria todas as dificuldades no futuro [próximo]. Isso não foi muito encorajador; Eu não tive a menor chance de apresentar meu ponto de vista na discussão (MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 803).

E, em uma carta a Wolfgang Pauli em junho, Heisenberg escreveu:

quanto mais penso na parte física da teoria de Schrödinger, mais detestável eu a acho. Deve-se imaginar o elétron rotativo, cuja carga é distribuída por todo o espaço e que tem um eixo em uma quarta dimensão. O que Schrödinger escreve sobre a visualizabilidade de sua teoria... Eu acho lixo. A grande conquista da teoria de Schrödinger é o cálculo dos elementos matriciais (PAULI, 1979, vol I).

Bohr convidou Schrödinger, por meio de uma carta de 11 de setembro de 1926, para viajar até Copenhague, convite ao qual ele aquiesceu, chegando lá em outubro do mesmo ano. Sua chegada era tão esperada que, de acordo com Heisenberg,

as discussões de Bohr com Schrödinger começaram na estação ferroviária e continuaram diariamente no início da manhã até tarde da noite. Schrödinger ficou na casa de Bohr para que nada interrompesse as conversas. (HEISENBERG, 1971, pp. 73-75)

Heisenberg lembrou que a principal linha de ataque de Schrödinger era contra a noção de "saltos quânticos". Ele apresentou uma série de problemas contra essa ideia tentando mostrar que surgiriam muitas contradições se fôssemos usar conceitos comuns em conexão com tais noções de saltos quânticos.

Bohr então concordou com Schrödinger, mas argumentou que esta não era uma prova contra saltos quânticos, mas apenas uma afirmação de que eles não podem ser imaginados por nós usando os conceitos que desenvolvemos para entender nossa vida cotidiana e experimentos em Física Clássica. Nesse sentido, deveriam ser esses conceitos que precisariam de reformulação — outra manifestação clara, seminal, das inclinações de Bohr para promover uma ruptura conceitual entre os mundos clássico e quântico.

Schrödinger continuou a resistir a se livrar desses conceitos usuais e argumentou que sua abordagem permitia uma visualização adequada do

fenômeno sem apelar para saltos quânticos. Bohr, no entanto, discordou e refutou dizendo que tanto Einstein quanto Planck tinham usado a descontinuidade na energia que deveria implicar que o átomo deveria assumir apenas certos valores discretos para esta variável e, além disso, o átomo deve mudar o valor desta variável apenas de forma descontínua de tempos em tempos¹⁰⁵.

O próprio Schrödinger aceitou que essas relações não são totalmente compreendidas, mas também argumentou que Bohr e seus seguidores também falharam em apresentar uma interpretação satisfatória para a Mecânica Quântica. Bohr concordou, dizendo que as inconsistências persistiam. Ele, entretanto, continuou sustentando o papel fundamental do conceito de saltos quânticos para a interpretação da Mecânica Quântica, levando Schrödinger ao ponto de exasperação, quando este afirmou que

se todo esse salto quântico estivesse aqui para ficar, eu deveria me arrependeu de ter me envolvido com a teoria quântica.

Ao que Bohr respondeu:

mas o resto de nós é extremamente grato por você tê-lo feito, pois sua mecânica de ondas contribuiu muito para a clareza matemática e a simplicidade da teoria, representando um avanço gigantesco sobre todas as formas anteriores de mecânica quântica. (HEISENBERG, 1971, pp. 73-75)

Heisenberg também lembrou que as discussões contínuas esgotaram Schrödinger:

depois de alguns dias, Schrödinger adoeceu, talvez como resultado de seu enorme esforço; em qualquer caso, ele foi forçado a manter-se de cama com um resfriado febril. Enquanto a Sra. Bohr cuidava dele e trazia chá e bolo, Niels Bohr continuou sentado na beira da cama falando com Schrödinger: "Mas você certamente deve admitir isso..." (...) [comportando-se como] um fanático quase implacável. (HEISENBERG, 1971, pp. 73-75)

¹⁰⁵ Confrontar essa ideia com a interpretação estocástica da Mecânica Quântica.

Heisenberg descreveu Bohr como quase um "fanático sem remorsos", e disse que Bohr sentia como sua obrigação convencer seu convidado de que a abordagem que estava sendo desenvolvida em Copenhague era a mais adequada. No entanto, como Heisenberg disse,

nenhum entendimento real poderia ser esperado, uma vez que, naquela época, nenhum dos lados era capaz de oferecer uma interpretação completa e coerente da mecânica quântica. Por tudo isso, nós, em Copenhague, nos sentimos convencidos no final da visita de Schrödinger de que estávamos no caminho certo, embora tenhamos percebido o quão difícil seria convencer até mesmo os principais físicos *de que eles deveriam abandonar todas as tentativas de construir modelos visualizáveis de processos atômicos*. (HEISENBERG, 1971, pp. 73-75, grifos meus)¹⁰⁶

A posição de Schrödinger após seu encontro com Bohr ficou clara nesta carta a Wien:

certamente, o ponto de vista [usando] imagens visualizáveis, que de Broglie e eu assumimos, não foi levado longe o suficiente para fazer um relato dos fatos mais importantes [da teoria atômica]. É claro que é provável que aqui e ali um caminho errado tenha sido tomado, e que agora deva ser abandonado. Mas que, mesmo que um Niels Bohr diga neste momento: 'as imagens de ondas visualizáveis funcionam tão pouco quanto os modelos de ponto visualizável [partícula]; há algo nos resultados da observação que não pode ser compreendido pela nossa maneira de pensar'; nisso eu não acredito. Acredito ainda menos, pois para mim *a compreensão dos processos externos na natureza é um axioma*, digamos, no seguinte sentido: compreender a experiência não significa nada mais do que estabelecer a melhor organização possível entre os diferentes fatos da experiência. (Ver carta de Schrödinger para Wien, 21 de outubro de 1926, na Coleção Wien, Museu Deutsches, Munique. Grifos meus.)

Schrödinger considerou prematuro abandonar conceitos tão gerais como espaço, tempo e causalidade; conceitos que haviam sido preservados na Teoria

¹⁰⁶ Esta citação de Heisenberg coloca claramente a negação do valor semântico dos modelos físicos, ao negar sua capacidade de representação.

Geral da Relatividade, embora a Mecânica Quântica fosse completamente nova e surpreendente. Schrödinger escreveu para Wien:

só posso dizer que não me importo com todo esse jogo de ondas, se este não for nada mais do que um dispositivo computacional confortável para avaliar elementos matriciais. (Ver Coleção Wien, Museu Deutsches, Munique.)

No final, o que Schrödinger não estava disposto a deixar de lado era o papel da interpretação (seu desdobramento ontológico e o conseqüente poder de visualização) dos modelos físicos para a nossa compreensão do mundo natural - modelos que só podiam ser pensados com o concurso de nossa maneira comum de pensar. Na perspectiva de Schrödinger, são esses modelos que permitem ao físico conhecer o mundo, compreendê-lo, para além de uma mera manipulação cega (de compreensão) de um dispositivo matemático.

Assim, a recusa de, ou, ao menos, a desconfiança relativa a, modelos físicos, sejam eles vinculados a campos específicos da teoria, sejam eles uma compreensão mais ampla da própria teoria, ou sejam eles a interpretação da própria teoria, já encontravam aqui sua formulação, ainda que nessa forma embrionária, porque anterior à própria formulação do Princípio de Complementaridade.

4.5 Complementaridade e interdição ontológica a modelos físicos

De modo geral, em Física, a ontologia de uma área específica se estabelece a partir de um período de maturação considerável. Nesse período, os diversos fenômenos, ainda dispersos por não terem sido referidos à área por surgir, vão sendo interpretados (nível narrativo) com o recurso a alguma escolha de construtos ontológicos que irão, posteriormente, moldar a ontologia *da área* (nível profundo), superando a interpretação de modelos individuais, ao mesmo tempo que os incorpora em uma ontologia mais abrangente. Já caracterizamos isso como os desdobramentos (preliminares) do nível narrativo alimentando a

dimensão sintática e semântica do nível fundamental (fluxo que se inverte, no processo de maturação da teoria física), quando é o nível fundamental que subsidiará o nível narrativo da teoria, tanto sintática, como semanticamente, e aí não mais de forma preliminar.

Assim, para citar o exemplo da Mecânica Newtoniana, levou-se aproximadamente dois mil anos para que o conceito de espaço (como um vazio) se sedimentasse como parte de seu *corpus* teórico. Associados a esse desenvolvimento histórico do conceito, vieram outros conceitos importantes, como aquele de inércia, intermediado pelo conceito de *impetus*. Conceitos cinemáticos, como aqueles de aceleração, e sua matematização, cumpriram também papel essencial para o estabelecimento da Nova Física. Vários desses desenvolvimentos levaram a uma ontologia completamente diversa daquela proposta por Aristóteles em sua Física (na Meteorologia e no Tratado sobre o Céu, também). Em particular, a noção de espaço vazio elimina a possibilidade da finitude do Mundo, assim como bloqueia a ideia de lugares naturais, ou impede a divisão das regiões cosmológicas entre sublunar e supralunar.

Esse movimento histórico não foi, evidentemente, coordenado, voltado para algum tipo de finalidade da qual o devir estaria prenhe. Entretanto, salta aos olhos o fato de que foi um processo convergente, do qual a Mecânica Newtoniana foi, em seu tempo, o produto final.

No Eletromagnetismo não foi diferente. Neste caso, conceitos centrais como aquele de “campo” foram introduzidos (as linhas de força de Faraday e o atomismo de Boscovitch seriam sua origem embrionária) e foram sendo paulatinamente lapidados, até a sua inserção no corpo da Teoria Eletromagnética por meio das equações de Maxwell. Nesse contexto, como vimos, uma nova ontologia se delineou, fortemente fundamentada em uma perspectiva ondulatória e, de modo geral, fazendo recurso a noções de éter luminífero como um meio que pervadiria todo o espaço (de resto tornando-o *não vazio*).

Seja como for, também no interior desses desdobramentos, quase todos realizados no decurso do século XIX, foi-se convergindo para uma visão de mundo particular, com uma ontologia específica, toda ela haurida dos inúmeros experimentos (e modelos a eles apensados) que foram sendo desenvolvidos para abordar situações específicas. As equações de Maxwell não fariam *qualquer sentido* sem que esses modelos tivessem atribuído significação e referenciamento aos símbolos que nelas ocorrem.

Esse ponto é importante. As equações fundamentais dessas teorias clássicas – Mecânica e Eletromagnetismo – são tais que incorporam os símbolos que já participavam de seus modelos originários. Assim, para o caso particular da Mecânica, momento linear, massa, gravidade, força são construtos que já estavam presentes nos diversos modelos que vinham sendo construídos à época (ainda que com maior ou menor clareza). As equações de Newton *incorporam* esses construtos e, *ipso facto*, suas delineações ontológicas – ainda que possam ir além delas, devido à genialidade de Newton. O mesmo se pode dizer para o Eletromagnetismo: campos, velocidades, índices de refração, ondas, são conceitos que já perpassavam os modelos originários da teoria.

Isso *não ocorreu com a Mecânica Quântica*, em particular na sua formulação ondulatória via equação de Schrödinger. A equação conta com um elemento novo, que não esteve presente em nenhum dos modelos que aqui chamamos de originários; *a função de onda*, cuja interpretação foi (e é) motivo de enorme disputa.

Nos dois exemplos anteriores, das teorias clássicas, e em tantos outros que se poderia mencionar no contexto da Física (como na Termodinâmica, com os fluidos imponderáveis), diversas possibilidades alternativas foram surgindo e sendo descartadas com base em inúmeros argumentos, alguns de natureza experimental (por não preverem certos resultados), outros de natureza metadiscursiva, baseados, por exemplo, em noções de simplicidade, coerência, consistência, dentre outros.

Entretanto, como já ressaltamos, com a Mecânica Quântica ocorre algo diverso. De fato, justamente por duas grandes áreas de conhecimento na Física possuírem, por ocasião do final do século XIX, ontologias não apenas diferentes, mas contraditórias, seu desenvolvimento não pode, historicamente, convergir para uma interpretação monista do mundo. Os experimentos de espectroscopia, que colocavam em contato sistemas materiais, com ontologias corpusculares, e sistemas eletromagnéticos, com ontologias ondulatórias, ao invés de promoverem uma convergência a uma ou outra visão monista do mundo, aprofundaram seu caráter dual e, em sentido ontológico, paradoxal.

Isso não significa que não tenha havido convergência ontológica, entretanto. Assim como nos exemplos anteriores, tais experimentos particulares e seus modelos específicos foram indicando a suposta necessidade¹⁰⁷ de se desenvolver a Física sobre fundamentos radicalmente novos, tendo por princípio ontológico fundamental a dualidade onda-partícula e a contradição ontológica (se dispensarmos o Princípio de Complementaridade) que ela traz consigo.

Isso, entretanto, coloca no centro da nova física um elemento potencialmente destrutivo de todo seu discurso que, se não regulado (ou enquadrado), pode levar à sua própria desconstrução – o problema do irracionalismo. Trata-se de evitar, no plano semântico, do problema lógico do *ad falsum quod libitum* (da contradição, segue-se qualquer coisa). O instrumento semântico que foi divisado por Bohr para fazer essa contenção foi o princípio *linguístico* da Complementaridade. Assim, com tal princípio, Bohr compartimentaliza as manifestações ondulatórias e corpusculares segundo o experimento realizado, indicando que não deve ocorrer que ambas sejam possíveis *em um único experimento*.

Tal princípio resolve o problema *epistêmico* de não se ter que lidar com duas manifestações fenomênicas (daí epistêmico) contraditórias (em sua ontologia, mas também na sua forma de interpretação) em uma mesma situação

¹⁰⁷ Dizemos “suposta” porque há, atualmente, diversas interpretações da Mecânica Quântica que não admitem o Princípio de Dualidade, da maneira que é comumente compreendido, ou seja, como a síntese de um paradoxo interpretativo.

experimental. Por outro lado, mantém intacta a dificuldade ontológica de se dizer *a que mundo a Mecânica Quântica* se refere. De fato, se, por um lado, o Princípio de Complementaridade estabelece uma dimensão ontológica ao *afirmar* a pertinência do princípio baseando-se em uma compreensão particular do funcionamento da língua e da elaboração de conceitos, por outro, e por isso mesmo, não consegue remeter a discussão a um nível ontológico mais profundo, que estaria *interditado* justamente pela nossa incapacidade estrutural de acessá-lo conceitualmente.

Tais reflexões são essenciais para se compreender a maneira como os modelos particulares passaram a ser compreendidos no contexto da Mecânica Quântica. É importante ter uma percepção clara quanto a isso: quando alguém escreve o hamiltoniano do átomo de hidrogênio, já está assumindo para ele um modelo inicial (corpuscular, individual etc.) – entretanto, assume-se que a equação de Schrödinger é superveniente a este modelo e, com a ideia de onda que ela veicula (clara e formalmente), *dissolve* as possibilidades ontológicas desse modelo inicial, substituindo-o não por outro modelo *físico*, mas por princípios que incorporam elementos (tendo Copenhague em mente) de indeterminação, complementaridade, papel do observador, redução do pacote de ondas, dentre outros.

Voltemos ao átomo de hidrogênio, agora visto a partir do modelo de Bohr. Tal modelo usa uma perspectiva corpuscular para o sistema atômico, mas o faz desconsiderando o fato de que os elétrons acelerados em tais sistemas emitiriam radiação eletromagnética continuamente (segundo a Teoria Eletromagnética) e tenderiam a colapsar, quase que instantaneamente, no núcleo¹⁰⁸. Assim, o modelo só se sustentaria sob um argumento equivocado. Para as interpretações que admitem o Princípio de Complementaridade, esse argumento se torna equivocado precisamente por estar assentado em uma ontologia monista, de

¹⁰⁸ Tais questões já foram consideradas sob outras perspectivas que evitam a aparente inobservância da Teoria Eletromagnética na hipótese da estabilidade das órbitas dos elétrons atômicos. Para um exemplo, ver Olavo (2000).

caráter exclusivamente corpuscular. Outros exemplos podem ser facilmente apresentados.

Ocorre, assim, que o Princípio de Complementaridade não *impede* que se usem modelos (corpusculares, ondulatórios etc.) para o estudo de sistemas particulares. O que ele exige é que *não se dê relevância ontológica ou semântica* a eles, em particular no contexto mais amplo da teoria, pois isso implicaria em forçar uma interpretação monista (de caráter corpuscular, por exemplo) em uma teoria que não admite (assim sustenta o Princípio de Dualidade) tal possibilidade. Se essa interdição age nos níveis mais profundos dos modelos particulares, age ainda com mais força no contexto da teoria, considerada como o *locus* de referência de cada um destes modelos.

De fato, com a condicionante, introduzida pelo Princípio de Complementaridade, de que é o experimento que define qual das ontologias é mais adequada ao fenômeno, inverte-se a ordem interpretativa usual. Nesta, o modelo é proposto, o experimento é montado com base em seus delineamentos, e os resultados experimentais adquirem força epistêmica para o afastamento do modelo específico *da teoria*, se necessário. Como, nas interpretações mais usuais (dualistas) da Mecânica Quântica, supõe-se que a falência eventual de um modelo particular (corpuscular ou ondulatório) apenas aponta na direção da adoção do outro, modelos que são contraditos em algum experimento *permanecem no seio da teoria*, sem que seja possível eliminá-los (até por já terem mostrado sua relevância na interpretação de outros fenômenos).

Isso, entretanto, só faz sentido no interior de uma interpretação que pressupõe, exatamente, a superveniência da equação de Schrödinger e dos construtos que lhe foram apensados a partir de 1927 na constituição de interpretações como a de Copenhagen. Há alternativas para essa perspectiva (a Interpretação Estocástica é uma delas) que, entretanto, não ocupam o *mainstream* interpretativo da Mecânica Quântica.

Neste ponto consideramos que já estamos em condições de apresentar um enquadramento da Interpretação de Copenhagen da Mecânica Quântica a

partir da estrutura de níveis de Greimas e Courtés. É importante notar que esse enquadramento precisou de toda a investigação anterior para que pudesse ser adequadamente realizado, para que o posicionamento que faremos dos diversos construtos da interpretação se visse justificado.

Faremos esse enquadramento no capítulo seguinte.

Capítulo 5. Enquadramento da Interpretação de Copenhague no esquema de Greimas e Courtés

Neste capítulo, estamos interessados em reconstruir (em suas características mais gerais) a Interpretação de Copenhague da Mecânica Quântica com vistas ao seu enquadramento no esquema semiótico de Greimas e Courtés. Para tanto, consideraremos a sua formulação em termos da equação de Schrödinger. Não pretendemos, portanto, fazer uma abordagem histórica, mas sim estabelecer, no contexto citado, o percurso gerador de sentido que se estabelece com a referida interpretação.

Assim, em seu nível *sintático* mais fundamental, situa-se a equação de Schrödinger obtida através das seguintes *identificações*:

- à *função* momentum clássico \vec{p} deve corresponder o *operador* quântico $\hat{p} = -i\hbar\nabla$
- à *função* posição clássica \vec{x} deve corresponder o *operador* quântico $\hat{x} = x$.

Com isso, deve corresponder, à função hamiltoniana clássica, o operador hamiltoniano

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(x).$$

A equação de Schrödinger é, pois, obtida construindo-se a aplicação do operador hamiltoniano a uma função $\psi(x; t)$ de tal forma que¹⁰⁹

¹⁰⁹ Há duas questões interessantes relacionadas a esse processo de construção do hamiltoniano quântico a partir daquele clássico: a primeira é sintática e se refere à construção do hamiltoniano e, portanto, da equação de Schrödinger, em coordenadas generalizadas (GRÜBER, 1971, 1972). Nesses casos, a forma de identificação falha, no sentido de que temos que *primeiro* fazer a identificação *em coordenadas cartesianas*, para *depois* usar a forma de operadores do momentum e da posição para escrever o operador nessas coordenadas. Se usarmos a representação (e.g. em coordenadas esféricas) dada por $\vec{p} = (p_r, p_\theta, p_\phi) = -i\hbar\left(\nabla_r, \frac{1}{r}\nabla_\theta, \frac{1}{r\sin(\theta)}\nabla_\phi\right)$ não obteríamos o operador laplaciano na forma correta. A segunda é que se define um sistema quântico que tem análogo clássico justamente como aqueles que possuem um Hamiltoniano associado; e isso leva a Interpretação de Copenhague a assumir que alguns

$$\hat{H}\psi(x; t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(x; t) + V(x; t)\psi(x; t) = \frac{i\hbar\partial\psi(x; t)}{\partial t};$$

para casos em que se tem um problema em que o potencial é independente do tempo ($V(x; t) = V(x)$) é matematicamente possível reduzir essa equação à forma

$$\hat{H}\phi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\phi(x) + V(x)\phi(x) = E\phi(x),$$

de modo que $\psi(x; t) = \phi(x) \exp\left(\frac{iEt}{\hbar}\right)$. Dessa equação surge um conjunto, geralmente infinito, de triplas $(E_n, \phi_n(x; t), n)$, em que n representa um conjunto de números quânticos associados ao sistema em apreço.

Assim, temos a equação de Schrödinger, mas introduzimos uma função $\psi(x; t)$ cuja interpretação *precisa ser feita*, para que tenhamos uma semântica profunda (ou seja, uma semântica que corresponda à sintaxe profunda). O processo de obtenção da equação de Schrödinger não dá dicas da interpretação da função $\psi(x; t)$ e, como vimos, os desdobramentos históricos da Mecânica Quântica estiveram, em boa medida, situados no entorno da atribuição de tal interpretação. Seguindo *parcialmente* a proposta de Max Born, obtida através dos experimentos de espalhamento¹¹⁰, pela qual a função $\psi(x; t)$ deve ser interpretada como uma *amplitude de probabilidade*, de tal forma que o produto $\psi(x; t)^*\psi(x; t) = \rho(x; t)$ deve ser interpretado como uma *densidade de probabilidade*.

Veja-se que a interpretação acima cumpre apenas *parte* dos requisitos de uma interpretação física. Devemos ainda indicar o *referente* das funções interpretadas (basicamente, responder à pergunta: densidade/amplitude de probabilidade *de quê?*). Max Born defendia que deveria ser uma densidade de

sistemas quânticos *não possuem* análogo clássico. Voltaremos a ambos os pontos no próximo capítulo.

¹¹⁰ Já dissemos que os experimentos podem se tornar fonte inestimável de construção de uma interpretação da semântica fundamental. Assim, apoiar-se em experimentos para construir tal interpretação não nos retira do nível fundamental da teoria.

probabilidade associada a um *ensemble* de sistemas físicos¹¹¹. A interpretação de Copenhague rejeita essa identificação e atribui o referente da função $\psi(x; t)$ (doravante denominada *função de onda*, já que a equação de Schrödinger é uma equação de onda) a um *sistema individual*. Essa interpretação está fundada na ideia de que é possível tomar um único sistema físico (e.g. um átomo de hidrogênio) e realizar sobre ele medidas sucessivas para constatar que o valor, único, segundo esta interpretação, que se obtém para E é o valor da energia do sistema. Evidentemente, se E corresponde à energia de cada sistema de um ensemble, corresponderá à energia de todo o ensemble. Temos, pois, a interpretação dos símbolos $\psi(x; t)$ e E , que comparecem na equação de Schrödinger. Em virtude da interpretação de E como a energia de cada sistema individual em um dado instante t , interpreta-se o operador hamiltoniano \hat{H} como o agente sintático que corresponde ao próprio ato experimental¹¹². Essa interpretação, por sua vez, no instante em que apresenta o operador hamiltoniano como o representante sintático do ato experimental e afirma, igualmente, que cada sistema de um ensemble deverá ter a mesma medida para a energia E , estabelece *ipso facto* que tais medidas devem ser *sem dispersão*.

Finalmente, os experimentos mostram que, em alguns casos, a explicação deve ser fornecida em termos de partículas (e.g. efeito fotoelétrico, efeito Compton), enquanto, em outros casos, ela deve ser dada em termos de ondas (e.g. dupla-fenda, difração de Bragg-Laue), de modo que se interpreta que os sistemas físicos devem possuir, *em sua natureza*, ambas as características. Isso enseja, evidentemente, o Princípio de Dualidade, que assim se estabelece, supostamente, no nível fundamental da teoria. Pelas razões já apresentadas em capítulos pregressos, uma vez que essa dualidade leva a um paradoxo, a Interpretação de Copenhague introduz um segundo princípio, baseada no fato de que as características mencionadas não aparecem simultaneamente *em um único arranjo experimental*, sendo que este parece selecionar ou uma

¹¹¹ Em parte isso decorre do próprio contexto experimental do espalhamento, pois no espalhamento a densidade de probabilidade é constituída a partir de sucessivas realizações de um mesmo delineamento experimental.

¹¹² Lembrar, neste ponto, das ideias do operacionalismo, já apresentadas em capítulo anterior.

característica ou outra (ou-exclusivo). Trata-se do Princípio de Complementaridade¹¹³. O Princípio de Indeterminação decorre de não se ter coordenação espaço-temporal na teoria, uma vez que a noção de estado passou a ser atribuída ao descritor função de onda.

Com as interpretações apresentadas nos parágrafos anteriores, temos todos os símbolos do nível fundamental da teoria interpretados, e seus princípios. Como vimos, a partir desse ponto o aparato sintático, por seus desdobramentos formais, permitirá a interpretação de novos aspectos da teoria. Apresentaremos aqui apenas alguns que consideramos os mais importantes. Como afirmamos, no capítulo 1, todas essas interpretações estão localizadas no nível narrativo.

Um primeiro resultado é obtido da ideia de que devemos formar (segundo a Interpretação de Copenhagen) o operador relativo à E^2 a partir da aplicação do operador hamiltoniano na forma $\hat{H} \cdot \hat{H}\phi(x) = E^2\phi(x)$ ¹¹⁴. Assim, temos o resultado $\bar{E} = E$, $\overline{E^2} = E^2$ e, portanto,

$$\Delta E = \overline{E^2} - \bar{E}^2 = 0,$$

indicando, de fato, um ensemble sem dispersão. Em princípio, esse resultado poderia ser generalizado para qualquer operador. *Entretanto*, não são todos os operadores que comutam entre si, ou seja, que podem ser simultaneamente diagonalizados (na sua representação matricial) e que, assim, podem levar a um esquema de *medidas* sem dispersão. Neste caso, apenas os operadores que comutam com o hamiltoniano (de modo geral) devem ser considerados como aqueles que implicam em medidas sem dispersão, todos os outros devendo ser considerados como operações experimentais que implicam em dispersões necessariamente (e não apenas por razões de precisão experimental concreta –

¹¹³ No nível fundamental, o Princípio de Complementaridade afirma apenas isto: que as características corpusculares e ondulatórias não comparecem simultaneamente em um mesmo arranjo experimental.

¹¹⁴ Esse é o chamado método de Von Neumann de construção de operadores. Esse método é *ambíguo* por não se referir ao problema do ordenamento dos operadores (SHEWELL, 1959), de modo que sua adoção é, no mínimo, questionável, uma vez que, sendo assim, não se poderia identificar certos operadores univocamente com funções clássicas.

que de resto estão também nas medidas sem dispersão teórica, ou seja, ideal, do operador hamiltoniano e naqueles que com ele comutam—, mas por razões mais profundas, de que falaremos mais adiante). Para esses *operadores* que comutam com o hamiltoniano, se não houvesse os erros experimentais usuais, seria possível medir suas saídas experimentais sem qualquer erro.

Assim, como os operadores \hat{p} e \hat{x} não comutam com o hamiltoniano (no caso mais geral, quando há um potencial que depende da posição), nem entre si, devemos ter para eles dispersões não nulas Δp e Δx . Deriva-se da estrutura sintática profunda da teoria quântica (seja pela própria equação, seja pela relação de operadores) que devemos ter o resultado

$$\Delta p_i \cdot \Delta x_i \geq \frac{\hbar}{2},$$

que, portanto, deve valer *para qualquer sistema analisável pela Mecânica Quântica*¹¹⁵ – essas são as chamadas relações de Heisenberg. A Interpretação de Copenhague então afirma, com base no que já foi interpretado, que p e x devem ser medidos de tal forma (pela aplicação de seus respectivos operadores) que a dispersão experimental mínima, obtida para um arranjo experimental qualquer para cada um deles deve ser tal que seu produto verifica as relações de Heisenberg apresentadas anteriormente.

Assim, no nível narrativo, a Interpretação de Copenhague afirma que os arranjos experimentais devem ser tais que as medidas de momentum e de posição, feitas simultaneamente com aquelas, por exemplo, de energia, devem produzir dispersões fundamentais, ou seja, nem mesmo um esquema ideal de medida poderia obter tais valores sem dispersão. Evidentemente, “dispersão” é uma noção estatística, que não se pode atribuir a resultados individuais. Assim, o que se está afirmando é que tais medidas dispersivas *não possuem* um valor objetivo (que seria o resultado, idêntico, dos sucessivos atos de medida considerados idealmente) a elas associados – para além de erros experimentais

¹¹⁵ Retiramos de nossas considerações sistemas de partícula livre, para os quais $\Delta p = 0$. Há todo um método para reinserir tais sistemas no formalismo quântico que não iremos retomar aqui.

concretos, ou seja, em nível ontológico. É nesse sentido que se considera o Princípio de Indeterminação¹¹⁶ de Heisenberg como componente essencial da interpretação.

Dessas considerações, conclui-se que as posições e os momenta, por seus operadores não comutarem com o operador hamiltoniano, não representam características objetivas do sistema que, desse modo, não podem mais ser referidos a elas, como ocorria no contexto clássico – é a ausência de “coordenação espaço-temporal” à qual Heisenberg sempre se refere, estabelecida aqui como um princípio da Interpretação de Copenhagen.

Assim, há um seccionamento semântico, na Interpretação de Copenhagen, entre os operadores que comutam com o hamiltoniano (que formam o conjunto de operadores que comutam), e que representam certos tipos de medidas sem dispersão – e, portanto, passíveis de serem objetivas, para determinado contexto experimental; e aqueles que não comutam, e que têm, associadas a eles, medidas que devem apresentar, necessariamente, dispersão (que se ajusta às relações de Heisenberg), e que não podem ter, associados a elas, dimensões objetivas (sempre indexadas pelo arranjo experimental em questão).

Dessas considerações fica claro que não devemos dar relevância *ontológica* aos modelos clássicos pelos quais “montamos” o operador hamiltoniano (usando a identificação mencionada), uma vez que todos esses modelos são baseados nessa coordenação espaço-temporal.

Uma vez que associamos o operador hamiltoniano a operações experimentais, podemos identificá-lo com um *observador*, essencialmente aquele que realiza tais operações concretamente.

Até este ponto, de nível profundo, o *observador* é apenas isto: o referente do operador relacionado à maneira pela qual certo sistema quântico está sendo objeto de medidas experimentais (e.g. \hat{p} representa atos de medida experimental

¹¹⁶ Não mais simplesmente um princípio de dispersão.

que têm por objetivo medir o valor do momentum do sistema físico sob consideração).

Entretanto, a interpretação de $\psi(x; t)$ como referindo-se a sistemas individuais impõe certas características a esse observador. Tomemos, por exemplo, o caso do experimento da dupla-fenda e suponhamos o lançamento de um único sistema físico em sua direção. Uma vez que $\psi(x; t)$ representa esse sistema físico, dessa representação deveria surgir o *efeito* de interferência (induzido pelas fendas) e, no anteparo de medida, deveria surgir *uma figura* de interferência – a explicação do fenômeno parece exigir a consideração do sistema quântico individual como onda, mas o arranjo experimental e o resultado para cada sistema individual parece exigir sua consideração como partícula.

De fato, o surgimento de uma figura de interferência para o lançamento de um único sistema quântico não é o que ocorre. O que se observa *sempre* é o surgimento de um único ponto no anteparo de medida (detector).

Desnecessário dizer que esse resultado *experimental* poderia ser usado para *contestar* a interpretação do referente da função de onda como sendo *um único* sistema físico. A questão, entretanto, é mais complexa. O ponto é: se considerássemos o sistema como uma partícula, como explicar o resultado final (depois de sucessivos lançamentos), como representando uma figura de interferência? Há aqui uma decisão a ser tomada: privilegiamos o *resultado experimental* e consideramos que devemos buscar uma *explicação* corpuscular para a interação com as fendas, que gerasse, com a repetição do experimento, a figura de interferência, de modo que *a natureza* corpuscular do sistema quântico poderia ser mantida durante todo o fenômeno? Ou privilegiamos a *explicação teórica*, em termos de uma natureza ondulatória, que justifica a figura de interferência final, com o ônus de termos que explicar por que a figura de interferência não aparece para um único sistema quântico? A Interpretação de

Copenhagen *escolhe* essa última¹¹⁷. Como veremos, a interpretação Estocástica *adota* a primeira¹¹⁸.

Assim, fica-se por justificar a “transição” entre uma estrutura de interferência, ocasionada pelas fendas e pelo caráter ondulatório do sistema quântico *individual*, e sua medida como um único ponto.

Para realizar essa compatibilização, a Interpretação de Copenhagen¹¹⁹ introduziu aquele que é, certamente, o mais contestado de seus princípios: trata-se do *Princípio de Redução do Pacote de Ondas*. Segundo esse princípio, essa transição se dá pela atuação do observador.

Neste ponto, a noção de observador, *na Interpretação de Copenhagen*, ganha uma nova dimensão. De fato, tal princípio não deriva de qualquer elemento do nível profundo, nem semântico, nem muito menos sintático¹²⁰. Não se refere ao plano profundo, nem mesmo ao plano narrativo, sendo, pois, da ordem do nível discursivo. É simplesmente algo que se deve, segundo as decisões anteriores de interpretação, inserir na interpretação da teoria para que ela faça sentido. Assim, enquanto podemos localizar o Princípio de Dualidade e parte do Princípio de Complementaridade (a parte que simplesmente diz que os comportamentos ondulatório e corpuscular não aparecem conjuntamente) no nível profundo, e localizar o Princípio de Indeterminação de Heisenberg no nível narrativo, o Princípio de Redução do Pacote de Ondas é, necessariamente, relativo ao nível discursivo – não admira que seja alvo de tantas críticas.

¹¹⁷ É importante ressaltar que, à época, não estava disponível uma explicação corpuscular para a interação com as fendas, enquanto a explicação ondulatória já era amplamente conhecida de contextos relativos à Ótica e ao Eletromagnetismo.

¹¹⁸ A diferença entre “escolher” e “adotar” é importante aqui: no momento histórico em que a Interpretação de Copenhagen foi desenvolvida, tratava-se de uma escolha que, além de não ter uma explicação à disposição, ainda implicaria o abandono de uma de suas escolhas interpretativas – de que a função de onda se referiria a um sistema individual. Entretanto, permanecia uma escolha, ainda que com uma resposta racional relativamente óbvia. No caso da interpretação Estocástica, essas questões *derivam*, como veremos, sintática e semanticamente, das relações no nível profundo, de modo que não se pode falar em escolha.

¹¹⁹ Essa foi, de fato, uma escolha de físicos ligados a Princeton, pois Bohr não subsidiava uma interpretação com base em redução de pacotes de onda. Sabemos que não há uma única interpretação de Copenhagen e, de fato, apresentamos aqui algo como seu espírito geral (HOWARD, 2022, JACOBSEN, 2022).

¹²⁰ Veja-se, por exemplo, as críticas de Everett (1957).

As considerações acima, feitas no contexto mais concreto do experimento de dupla-fenda podem ser generalizadas. Toda essa questão pode ser retraçada ao fato de que qualquer combinação linear do tipo

$$\Psi(x; t) = \sum_n c_n \psi_n(x; t),$$

deve ser uma solução da equação de Schrödinger, assumindo-se que cada $\psi_n(x; t)$ o é¹²¹. Assim, a densidade de probabilidade resulta em

$$P(x; t) = \sum_n |c_n|^2 \rho_n(x; t) + \underbrace{\sum_{n,m} c_n c_m^* \psi_n(x; t) \psi_m^*(x; t)}_{\text{termos de "interferência"}}.$$

Nessa configuração, a questão é saber o que “seleciona” um estado particular (um valor de n) de outros estados, em determinado sistema físico submetido a determinada configuração experimental¹²².

Para a Interpretação de Copenhagen, isso é feito pelo observador, já localizado no nível discursivo, através do aparelho de medida, segundo o Princípio de Redução do Pacote de Ondas. Como forma de justificar esse ponto, toda uma *teoria da medida* é construída. Assim, no contexto dessa interpretação, toda a teoria da medida se encontra no nível discursivo.

Como é sabido, a questão da redução do pacote de ondas levou à interposição, por Schrödinger, do paradoxo do gato de Schrödinger, que faz um sistema microscópico (no qual vale a superposição) se conectar com um sistema macroscópico relacionado aos estados de “vivo” e “morto”, de maneira que a superposição (antes da medida) no sistema microscópico leva à superposição entre “vivo” e “morto”, com a eventual “interferência” entre estes estados, seja lá o que isso significar. Esse paradoxo *também* se localiza no plano discursivo, obviamente.

¹²¹ Os coeficientes c_n são tais que $|c_n|^2$ representa a probabilidade de o estado $\psi_n(x; t)$ ser selecionado pelo observador em algum ato experimental de medida.

¹²² Em uma interpretação de ensemble, a explicação é bastante óbvia (BALLETINE, 1970).

O observador também é usado, pela Interpretação de Copenhague, para dar sentido às relações de Heisenberg. Segundo essa interpretação, as relações de Heisenberg decorrem do caráter não-objetivo (em sentido ontológico) das trajetórias, ou seja, da impossibilidade, segundo a interpretação, da especificação completa da posição e do momentum do sistema físico em cada instante; mas isso se dá, no plano epistêmico, pelo fato de que, ao observar um dado fenômeno, o observador interfere neste de maneira inescapável, de modo a implicar nessas relações (que passam a ser de incerteza, portanto)¹²³. Assim, vale compreender que as relações de Heisenberg estão no plano *sintático* narrativo da Interpretação, pois são decorrência trivial do sistema formal da teoria, mas sua interpretação, vinculada a observadores, no sentido apresentado aqui, se localiza no plano discursivo.

Já mostramos, em capítulo anterior, como essa interpretação se mostra completamente equivocada, mas isso não é importante para este capítulo, que visa apenas enquadrar a Interpretação de Copenhague no esquema semântico de Greimas e Courtés.

Outro elemento interessante de se ressaltar é aquele referente ao caráter indeterminista da teoria. A pergunta que se pode fazer é: de qual elemento sintático se pode deduzir que a teoria possui um caráter indeterminista? E qual seria a origem desse caráter indeterminista? A pergunta ganha relevo quando notamos que a representação de estado na Mecânica Quântica se dá através da função $\psi_n(x; t)$, uma vez que não temos à disposição os elementos de coordenação espaço-temporal $(x, p; t)$. Ora, a equação de Schrödinger provê um esquema formal (sintático) pelo qual fica óbvio que a evolução da função de onda é *determinista* (um sistema é determinista se a conexão entre dois de seus estados pode ser prevista de antemão). *Nesse sentido*, a teoria quântica é determinista.

¹²³ Esse é o conteúdo do famoso “experimento” (trata-se de um experimento mental) do microscópio de Heisenberg. Com esse passo, a interpretação pode evitar falar em termos ontológicos e se colocar apenas no plano epistêmico.

Por outro lado, é patente, dos resultados experimentais, que a teoria se refere a algum tipo de indeterminação. Considerando, novamente, o exemplo concreto da dupla-fenda, é evidente que não se pode prever em qual ponto do anteparo de medida o ponto irá aparecer, fruto do envio de um único sistema quântico ao anteparo em que estão as duas fendas.

Ora, esse elemento, já vimos, é interpretado como sendo devido à redução do pacote de ondas, feita pelo observador. Assim, é nesse nível de articulação que o indeterminismo da Mecânica Quântica pode ser estabelecido, segundo a Interpretação de Copenhagen. Resumindo, o indeterminismo da Mecânica Quântica, segundo a interpretação de Copenhagen, só pode ser estabelecido *no nível discursivo*, por ser tributário de elementos interpretativos que só são estabelecidos *nesse nível*.

Finalmente, muitos físicos *assumem* que a Mecânica Quântica se refere a sistemas com flutuações estocásticas; entretanto, isso, na Interpretação de Copenhagen, só pode ser assumido no nível discursivo, pois não há qualquer indício sintático (com a semântica correspondente) que permita tal afirmação.

A seguir apresentamos, na forma de um quadro, as especificações dos elementos, sintáticos e semânticos, da Interpretação de Copenhagen, quando vista pelo esquema semântico de um percurso gerador de sentido. Os elementos apresentados se referem às questões que foram tratadas anteriormente. Evidentemente, muitos outros elementos poderiam ser ali incluídos, mas consideramos que os que ali estão são os que melhor delineiam a Interpretação de Copenhagen.

Uma vez estabelecido esse quadro, é possível localizar, na teoria e segundo a interpretação em questão, seus níveis sintáticos e semânticos segundo o modelo de níveis de Greimas e Courtés. Assim, levando em consideração o que já foi dito sobre tais níveis, ou seja:

- que o nível discursivo é o mais fraco epistemologicamente de todos, justamente por não estar ancorado nos dois outros níveis;

- que o nível narrativo é aquele em que as confirmações experimentais são feitas;
- que o nível fundamental da interpretação é aquele em que são estabelecidos os princípios da teoria (axiomatizada ou não), assim como o referenciamentos dos principais símbolos desta,

torna-se possível, em princípio, *comparar* essa interpretação com outras existentes, verificando, em cada caso, as ocorrências em cada nível sintático/semântico.

Nível	Componente sintático	Componente semântico
Fundamental	Equação de Schrödinger; Regra de composição de operadores;	<ul style="list-style-type: none"> • Estado do sistema: $\psi(\vec{x}; t)$; amplitude de probabilidade; • $\psi(\vec{x}; t)$ representa uma onda; • Densidade de probabilidade $\rho(x; t) = \psi^*(x; t)\psi(x; t)$; • $\psi(x; t)$ se refere a um sistema individual; • Determinismo (evolução determinista da $\psi(x; t)$); • O referente de um operador é a medida que ele representa; <ul style="list-style-type: none"> ○ Estados sem dispersão ○ Conjunto Completo de Operadores que Comutam • Princípio de Dualidade; • Princípio de Complementaridade (em sentido fraco);
Narrativo	$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ $\Delta x_n \Delta p_n = f(n) \hbar$ Eq. de Ehrenfest	<ul style="list-style-type: none"> • Não há posição e momentum objetivos; <ul style="list-style-type: none"> ○ Não é possível definir estado a partir de (x, p); ○ A equação de Ehrenfest é para valores médios; ○ Modelos clássicos não possuem peso ontológico; • Princípio de Dispersão (em sentido fraco)¹²⁴;
Discursivo	Efeito Túnel (expressão formal)	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio de Redução do Pacote de Ondas; • Observador (em sentido forte)¹²⁵; • Princípio de Complementaridade (em sentido forte); • Princípio de Incerteza (em sentido forte); • Indeterminismo; • Teoria da Medida; • Gato de Schrödinger...

Quadro 5-1. Percurso gerador de sentido da Interpretação de Copenhagen.

¹²⁴ Estabelece apenas que as dispersões quânticas devem obedecer à especificação sintática.

¹²⁵ Ou seja, incluindo a ideia de que é o observador que produz a redução do pacote de ondas. As demais atribuições de um “sentido forte” são todas relativas a essa ideia. Assim, a Complementaridade, em sentido forte, é a afirmação que faz menção à capacidade linguística humana (dos observadores humanos), e não apenas à mera constatação de que características ondulatórias e corpusculares não aparecem em um mesmo arranjo experimental (que mantém o princípio no plano fundamental).

No próximo capítulo, apresentaremos a Interpretação Estocástica Estendida e buscaremos seu enquadramento no percurso gerador de sentido da mesma maneira que fizemos neste capítulo para a Interpretação de Copenhagen, como forma de concretizar a referida comparação.

Capítulo 6. Construção da Interpretação Estocástica Estendida e seu enquadramento no esquema de Greimas e Courtés

Na literatura encontramos outra interpretação, que chamamos aqui de Interpretação Estocástica Estendida, que diverge em inúmeros pontos da Interpretação de Copenhagen e que, por isso, é um bom ponto de partida para o tipo de análise que estamos buscando neste trabalho. Essa interpretação foi desenvolvida por este autor nos últimos trinta anos de pesquisa e baseia-se, em grande medida, nos desenvolvimentos da Interpretação Estocástica iniciada por Nelson (1966) e que se desenvolveu, em grande parte, nas décadas de 1950 e 1960 (WEIZEL, 1953, 1954; KERSHAW, 1964, DE LA PEÑA-AUERBACH, 1969, 1970, 1971), mas que, desde então, permanece como campo profícuo de estudos (DE LA PEÑA-AUERBACH, 1982; LINDGREN & LIUKKONEN, 2019).

A abordagem do que referenciamos neste trabalho como abordagem *estendida* é axiomatizada e se desenvolve a partir de novidades, tanto no componente sintático, quanto semântico da Mecânica Quântica¹²⁶. Assim, Olavo (1999a) mostrou que é possível *deduzir matematicamente* a equação de Schrödinger a partir dos seguintes axiomas:

Axioma 1: à densidade de probabilidade conjunta no espaço de fase, está associada a função característica

$$Z(x, \delta x; t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, p; t) e^{ip\delta x/\hbar} dp,$$

que pode ser escrita na forma

$$Z(x, \delta x; t) = \psi^* \left(x - \frac{\delta x}{2}; t \right) \psi \left(x + \frac{\delta x}{2}; t \right)$$

¹²⁶ A abordagem também se apropria de muitos resultados de Takabayasi (1954). Uma versão distinta dessa interpretação pode ser encontrada em Santos (2022).

que deve ser expandida até segunda ordem em δx ¹²⁷.

Axioma 2: para um sistema isolado, a densidade de probabilidade conjunta, definida sobre o espaço de fase, relacionada a qualquer sistema quântico, obedece à equação de Liouville (integrada nos momenta) (OLAVO, 1999a)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{ip\delta x}{\hbar}\right) \frac{dF(x, p; t)}{dt} dp = 0.$$

Essa axiomatização, que obviamente se insere no nível fundamental da interpretação, traz inúmeras características importantes para a construção do percurso gerador de sentido. Mencionamos algumas:

- As variáveis que aparecem na equação de Schrödinger são imediatamente interpretadas, uma vez que “herdam” tal interpretação das variáveis que aparecem nos axiomas. Assim, por exemplo, é fácil ver que $\psi(x; t)$ é uma amplitude de probabilidade, uma vez que, tomando o limite $\delta x \rightarrow 0$ na função característica, temos, do axioma 1, que¹²⁸

$$\lim_{\delta x \rightarrow 0} Z(x, \delta x; t) = \psi^*(x; t)\psi(x; t) = \int F(x, p; t) dp = \rho(x; t),$$

como esperado para uma função característica do tipo introduzido¹²⁹. Da mesma maneira, é fácil *mostrar* que o operador momentum deve ser escrito como $\hat{p} = -i\hbar\partial_x$ e que a integral $\int \psi(x; t)^* \hat{p}\psi(x; t) dx$ representa o momentum *médio* do sistema;

- O *referente* da função $\psi(x; t)$ ou da função $\rho(x; t)$ é, *primariamente*, um ensemble, já que isso decorre imediatamente do uso da função $F(x, p; t)$ e da equação de Liouville;

¹²⁷ Note que o axioma se refere à forma de se escrever a função característica, em termos das funções ψ , e que deve ser expandida apenas até segunda ordem em δx . A relação entre Z e F não é uma imposição, de fato, uma vez que sempre se pode definir uma função característica para uma função densidade de probabilidade por meio de uma transformada do tipo mostrado.

¹²⁸ Se algo assim existisse por volta da época da proposição da equação de Schrödinger, é razoável inferir que toda a discussão sobre a interpretação da função $\psi(x; t)$ e da função $\rho(x; t)$ não ocorreria (pensando logicamente, evidentemente, já que aqui se faz um “se” histórico).

¹²⁹ O uso de funções características é tradicional em Estatística (independentemente de seu uso nessa ou naquela teoria física), como uma forma de trabalhar com os momentos estatísticos da densidade de probabilidade, ao invés de trabalhar com esta.

- Sendo uma axiomatização, é absolutamente necessário que, ao escrever os axiomas em determinado sistema de coordenadas, e ao se repetir o processo de derivação nesse sistema, se chegue à equação de Schrödinger no referido sistema¹³⁰, o que, de fato ocorre (OLAVO, 1999a).
- Deve ser imediata a generalização relativística do problema, uma vez que também deve decorrer, da generalização relativística dos axiomas, uma equação de Schrödinger relativística (OLAVO, 2014; OLAVO, 2016);
- É possível conectar, quase que diretamente, essa derivação (feita no espaço de fase e usando-se a hamiltoniana) com a derivação de Feynman usando-se as integrais de trajetória (feita no espaço de configuração e usando-se a lagrangeana), que é uma derivação universalmente aceita¹³¹;
- É possível mostrar que as regras de Bohr-Sommerfeld devem valer (para os máximos das amplitudes de probabilidade), *nos casos em que houver simetrias espaciais associadas*¹³² (OLAVO, 1999b);
- As regras de Bohr-Sommerfeld generalizadas, obtidas por derivação, fornecem uma teoria da interação de partículas com fendas e cristais, de modo que a interpretação de fenômenos de interferência e difração podem ser feitas apenas em termos corpusculares (OLAVO, 1999b), compatível com a exigência imposta pelo *modelo estocástico da teoria*;
- É imediato referir as relações de Heisenberg (não de incerteza) a um vínculo entre *os desvios quadráticos médios* Δx e Δp que, neste ponto, são interpretados a partir da amplitude de probabilidade como *referida a ensembles*¹³³. Tal interpretação implica que essas dispersões estatísticas

¹³⁰ Vimos que essa questão era bastante problemática, se buscada a partir da abordagem adotada pela Interpretação de Copenhague (e, nesse caso, por qualquer outra interpretação que use a identificação entre funções e operadores ali apresentada).

¹³¹ Em Feynman & Hibbs (1969), o parâmetro δx , definido no espaço de configuração, aparece como δt , definido no tempo. Há, nessa obra, uma suposição equivalente à expansão até segunda ordem em δx , lá identificada como a tomada de um $\delta t \rightarrow 0$.

¹³² O que coloca a “antiga teoria quântica” (PAULING & WILSON, 1963) sob nova perspectiva.

¹³³ Mas veja mais adiante como isso se relacionará com sistemas individuais.

são *objetivas* do sistema e não possuem qualquer relação com Observadores¹³⁴;

- Os axiomas usados implicam um ordenamento de operadores bem definido (não ambíguo) que, por sua vez, implicam que *qualquer descritor físico*, sendo ele um autovalor ou não de um operador que comuta com o Hamiltoniano, *terá uma dispersão* a ele associada (OLAVO, 2016)¹³⁵;
- A função densidade de probabilidade conjunta no espaço de fase (normalizada e em uma dimensão) deve ser escrita como

$$F(x, p; t) = \frac{\rho(x; t)}{\sqrt{2\pi\sigma(x; t)}} \exp\left(-\frac{(p - p(x; t))^2}{2\sigma(x; t)}\right),$$

que é positivo-definida, em que

$$\sigma(x; t) = \lim_{(\delta x \rightarrow 0)} -\frac{\hbar^2}{4m} \frac{\partial \ln Z(x, \delta x; t)}{\partial(\delta x)}$$

é o desvio quadrático médio tomado em cada ponto x do espaço de fase (OLAVO 1999b, OLAVO 2004, KINCHIN, 1949);

- A Mecânica Quântica está associada ao Teorema do Limite Central, para cada valor de x . Ou seja, fixando-se fibras no espaço de fase, tomadas a partir de pontos x , e paralelas ao eixo p , deve valer, sobre cada uma dessas fibras, o Teorema do Limite Central¹³⁶ (OLAVO, 2004);
- A Mecânica Quântica, compreendida através da equação de Schrödinger, está relacionada à equação de Langevin (OLAVO *et al.*, 2012)

$$\begin{aligned} \dot{p} &= -\gamma p - \frac{\partial V(x)}{\partial x} + \sqrt{2\gamma\sigma(x; t)}\zeta(t), \\ \dot{x} &= \frac{p}{m} \end{aligned}, \quad (7.1)$$

¹³⁴ Mas é evidente que, uma vez que existem objetivamente, implicarão que qualquer observação experimental concreta (em sentido clássico usual) de um sistema quântico deverá se adequar a ela.

¹³⁵ O que remove a importância relativa dada ao conjunto de operadores que comutam, como visto na Interpretação de Copenhague, o que se coaduna com a questão da inexistência de um Observador (de nível discursivo) nessa abordagem.

¹³⁶ Isso decorre diretamente do fato de impormos que a função característica deve ser expandida até segunda ordem em δx (LEVY, 1976).

em que deve valer, para o termo de flutuação $\zeta(t)$ as igualdades: $\langle \zeta(t) \rangle = 0$ (média nula) e $\langle \zeta(t) \cdot \zeta(t') \rangle = \delta_D(t - t')$ (correlação por uma distribuição delta), em que $\delta_D(t - t')$ é a distribuição delta de Dirac;

- As flutuações *nos sistemas isolados* da Mecânica Quântica decorrem da separação destes em sistema corpuscular e sistema de campos (usualmente eletromagnético), em que a descrição se foca no sistema corpuscular, os campos servindo como “reservatório térmico” (esquema canônico)¹³⁷;
- Disso decorre que a equação de Schrödinger é uma *teoria de campo médio* para o sistema estocástico associado à equação de Langevin, de modo que toda teoria deve ser enquadrada no contexto de uma teoria estocástica (ver também Olavo (2000))¹³⁸;
- A Mecânica Quântica *admite* coordenação temporal, ou seja, descrições a partir de (x, p) que, entretanto, são variáveis estocásticas e que, portanto, se referem, para *cada sistema*, a uma *realização* de uma trajetória dele¹³⁹;
- O teorema de flutuação-dissipação deve valer na Mecânica Quântica (OLAVO *et al.*, 2012).
- Vale, para sistemas quânticos estacionários, o *princípio ergódico*, que relaciona médias tomadas em ensembles com médias tomadas *em um único sistema*, ao longo do tempo¹⁴⁰;

¹³⁷ Como descrito, para sistemas termodinâmicos usuais, em Callen (1985). Essa interpretação implica uma diferença importante para as Interpretações Estocásticas usuais, que associam as flutuações à radiação eletromagnética de fundo, fazendo os sistemas quânticos serem sistemas *abertos*, em contradição com sua expressão formal como sistemas *isolados*. Essa é a razão de nos referirmos à presente interpretação como “estendida”.

¹³⁸ O que significa que toda a Mecânica Quântica (relacionada à equação de Schrödinger) é *modelada* a partir de sistemas estocásticos – daí o nome da interpretação.

¹³⁹ De modo que “indeterminação” aqui não tem qualquer relação com observadores, mas é uma característica direta (e objetiva) do fato de o sistema ser estocástico, e não se refere à impossibilidade de coordenação espaço-temporal.

¹⁴⁰ Esse é o elemento de vínculo que falta à Interpretação Estatística, proposta por Ballentine (1970).

- Para os sistemas quânticos em que valer o princípio ergódico, as abordagens de ensemble e de sistemas individuais *se equivalem*¹⁴¹. E para os sistemas em que o princípio ergódico não valer, deve-se interpretar o problema a partir de ensembles¹⁴², que se organiza no nível fundamental da teoria e, portanto, é primária;
- Para sistemas em que vale o princípio ergódico, deve-se, para sistemas individuais, considerar que a *natureza* dos objetos quânticos é *corpuscular*, enquanto seu *comportamento* deve ser descrito por meio da função de onda – em que “*natureza*” existe em cada instante de tempo t , enquanto “*comportamento*” existe, como ensemble, em um instante de tempo t , ou, como sistema individual, em um intervalo de tempo Δt ;
- A Mecânica Quântica *não tem*, associada a ela, uma noção de dualidade, visto que há a distinção entre natureza (corpuscular, por construção) e o comportamento (ondulatório, por derivação da equação de Schrödinger), sendo a primeira relacionada às variáveis (estocásticas) de estado (x, p) , com trajetórias (realizações) em sentido usual, e o último relacionado à função de onda $\psi(x; t)$ ¹⁴³ (OLAVO *et al.*, 2012);
- Uma vez que não possui a noção de dualidade, a Interpretação Estocástica Estendida não precisa do Princípio de Indeterminação (versão forte), nem do Princípio de Complementaridade¹⁴⁴, em qualquer de suas versões – o que se coaduna com a volta da importância dada aos

¹⁴¹ Isso pode ser verificado por simulações, facilmente implementáveis pelo fato de se ter *um modelo* (estocástico) para a teoria.

¹⁴² O problema de dupla-fenda não representa um problema ergódico, uma vez que cada resultado experimental implica na destruição do sistema (a absorção da entidade quântica, que aqui é uma partícula – visto ser a interpretação estocástica de caráter corpuscular—, pelo anteparo de medida). Ou seja, ele deve ser interpretado a partir da noção de ensembles, não de sistemas individuais – o mesmo pode ser dito para o problema do “paradoxo” do gato de Schrödinger, que, nessa perspectiva, deixa de ser um paradoxo (ele só o é quando adotamos a ideia de que a função de onda se refere a *um único sistema num instante t*).

¹⁴³ Essencialmente, os descritores de corpúsculos e de onda se referem a diferentes dimensões ontológicas. A dualidade só comparece quando fazemos essas duas dimensões colapsarem em uma só (aquela da *natureza*). Essa distinção pode ser *visualizada* a partir de simulações (OLAVO *et al.*, 2012).

¹⁴⁴ Este último pela diferenciação entre natureza e comportamento já aludida.

modelos físicos (OLAVO, 2022). Muito menos há a necessidade de um Princípio de Redução do Pacote de Ondas;

- A Mecânica Quântica é uma teoria local¹⁴⁵;
- A Mecânica Quântica, assim como qualquer outra teoria física conhecida, não possui paradoxos.

Os resultados anteriores se espalham pelos níveis fundamental e narrativo. No nível discursivo, é importante ressaltar alguns resultados, que apresentamos na próxima seção.

6.1 Alguns argumentos de nível discursivo

Como vimos, o nível discursivo é usado, na grande maioria das vezes, como forma de justificar certas afirmações que são feitas nos níveis fundamental e narrativo. Esse nível funciona, pois, como uma maneira de incrementar a credibilidade das associações já realizadas, em particular aquelas que soam menos intuitivas.

A Mecânica Quântica, em seu desenvolvimento histórico, apresentou inúmeros arrazoados voltados a mostrar que haveria um abismo conceitual entre ela e a Física Clássica. Isso abriria espaço para a inserção de seus princípios, mormente na forma forte, justamente para dar conta dos fenômenos que apareciam, para os físicos da época (e para muitos, ainda hoje), como perpassados pela estranheza ou pelo paradoxo.

Nas próximas subseções, apresentamos alguns desses argumentos e, de modo compatível com o nível discursivo, desenvolvemos argumentos contra as teses a que serviram.

¹⁴⁵ O que se considera como comportamento não-local (associado a forças ou potenciais) na Mecânica Quântica é, nesta interpretação, relacionado com a ideia de *correlações estatísticas* em sistemas estacionários (que, evidentemente, podem ter caráter não-local, mas que não decorre disso que haja *interação* não local).

6.1.1 O problema da dualidade

Como já vimos, a concepção da existência de uma dualidade foi ensejada pelos resultados experimentais. Simplesmente mostrou-se ser, à época, impossível encontrar uma perspectiva monista (seja ela corpuscular, seja ondulatória) que pudesse dar conta dos fenômenos conhecidos. Desse impasse experimental emergiu a suposta necessidade de se conceber uma ontologia dual, ou seja, a necessidade de se inscrever a dualidade na própria natureza.

Assim, se for possível mostrar que os experimentos associados aos efeitos que apresentam caráter ondulatório podem ser interpretados à luz de uma ontologia corpuscular, a perspectiva ontológica monista (de natureza corpuscular) voltaria a ser uma possibilidade.

Evidentemente, o mesmo pode ser dito quanto a se mostrar, eventualmente, ser possível interpretar os experimentos de caráter corpuscular à luz de uma ontologia ondulatória, ensejando, pois, uma ontologia monista (de natureza ondulatória).

Se, ainda, for possível fazer ambas as reduções ontológicas, então não se tratará mais de uma questão ontológica, como não o é para a Óptica Geométrica, como visto em capítulos anteriores. Se tratará, simplesmente, da constatação de que as duas formas de descrição não podem ser discernidas, seja pelo formalismo, seja pelos experimentos.

A perspectiva da Interpretação Estocástica Estendida é, pelo que já afirmamos anteriormente, de redução monista de caráter corpuscular (a equação de Langevin, no nível fundamental, *impõe* isso). Assim, deve-se poder mostrar que os experimentos mais usuais que apresentam comportamento ondulatório devem ser interpretáveis em termos corpusculares. Nesse contexto, é importante separar dois tipos de experimento:

- experimentos não-destrutivos, como, por exemplo, medir sucessivamente o estado fundamental de um átomo de hidrogênio, sem que ele se ionize, esperando um tempo de relaxamento para que, caso o elétron sofra transição para um estado excitado, que ele possa voltar ao estado fundamental¹⁴⁶. Esse tipo de situação pode, como já ressaltamos, ser analisada tanto do ponto de vista de sistema individual, como de ensemble, graças ao princípio ergódico;
- Experimentos destrutivos, como, por exemplo, o experimento de dupla-fenda, em que o sistema físico em análise é absorvido por um detetor, de modo que se deve repetir o experimento para outro sistema físico equivalente. Essa situação só pode ser analisada sob a perspectiva de ensemble¹⁴⁷.

Olavo (1999b, 2016) mostra que a validade das regras de Bohr-Sommerfeld, para máximos da densidade de probabilidade quântica, decorre de simetrias do problema¹⁴⁸. Essas regras estabelecem, matematicamente, a forma (quantizada) como se dá a troca de momenta (OLAVO, 1999b, 2016) entre o sistema quântico incidente (sempre uma partícula) e aquele em que a partícula incide¹⁴⁹ (no caso da dupla fenda, o anteparo com as fendas).

Assim, no caso do experimento de difração de Bragg-Laue, tem-se as simetrias dos planos cristalinos, no caso do experimento de interferência por dupla-fenda, tem-se a simetria associada às fendas. Nesses experimentos, vale apenas uma interpretação de ensemble. Cada saída experimental é apenas um ponto, que representa a detecção *da partícula* pelo anteparo com os detetores,

¹⁴⁶ Evitando-se, por exemplo, interveniência de efeitos como o Efeito Zenão.

¹⁴⁷ Mais adiante, para o caso do “Paradoxo” do Gato de Schrödinger, mostraremos que tomar situações assim e tentar explicar com uma perspectiva de sistema individual é exatamente o que dá origem ao comportamento pouco usual.

¹⁴⁸ Essa perspectiva, relativa a simetrias, supera os problemas apresentados com finalidades similares por Landé (1955, 1965), em que se assumia a necessidade de se ter as fendas impressas sobre um sistema cristalino – o que não é necessário.

¹⁴⁹ Duane (1923) e Compton (1923) já haviam apresentado explicações similares para o caso específico de redes cristalinas.

e o que se mede é o *comportamento* do ensemble – mostrando a relevância de se dissociar *comportamento* de *natureza*.

Por outro lado, em experimentos não destrutivos, pode-se medir um único sistema, mas isso deve ser feito *ao longo do tempo* (que, para sistemas estacionários, equivale a medir o ensemble), de modo que, novamente, o elemento ondulatório se refere ao *comportamento* ao longo do tempo de uma *natureza* que é, essencialmente, corpuscular.

Finalizamos lembrando que essas afirmações podem ser *visualizadas* em simulações estocásticas relacionadas à equação de Langevin, como mostrado em Olavo *et al.* (2012) e Olavo (2016).

6.1.2 O “Paradoxo” do Gato de Schrödinger

O famoso experimento mental¹⁵⁰ do gato de Schrödinger tem sido usualmente adotado como forma de mostrar quão absurda é a interpretação de Copenhagen. Já vimos como o experimento é construído e como é feita sua interpretação a partir dos princípios da Interpretação de Copenhagen. Vejamos, agora, como se daria sua interpretação a partir da perspectiva da Interpretação Estocástica Estendida.

Em primeiro lugar, notamos que se trata, muito obviamente, de um experimento destrutivo, uma vez que (a Interpretação Estocástica Estendida *assume*), não se pode “voltar” dos mortos. Isso, de fato, decorre do fato (ou é implicado por ele) de que o problema *não é estacionário*. Se deixarmos um material radioativo, com pequena meia-vida, e esperarmos algum tempo com o sistema gato-caixa-material hermeticamente fechado, quanto mais tempo

¹⁵⁰ Vale dizer, neste ponto, que *todo* experimento mental só pode ser articulado no nível discursivo. A já usual recomendação de cautela com tais experimentos, que podem trazer muitas preconceções embutidas, é aquela que se estende por todo o nível discursivo de uma interpretação, seja ela qual for.

esperarmos, mais provável será encontrar o gato morto. Assim, na decomposição

$$\psi(v, m; t) = c_v(t)\phi(v) + c_m(t)\phi(m),$$

em que “ v ” representa “vivo” e “ m ” representa “morto”, os coeficientes dependem do tempo e os estados são ortogonais.

Mas não são ortogonais porque “vivo” é ortogonal a “morto” (ainda que sejam), mas porque a própria fonte associada a tais estados apresenta ortogonalidade em: “emitiu radiação em t ” e “não emitiu radiação em t ”, que é, igualmente um fenômeno destrutivo (com relação à emissão) e precisa ser analisado na forma de ensemble. Note que o ponto do “paradoxo” é exatamente esse: supõe-se que há superposição no estado da fonte radioativa (por considerá-la a partir de uma representação de sistema individual), e conclui-se, “paradoxalmente” pela superposição dos estados de “vivo” e “morto”. Removida a ideia de que a representação de um sistema quântico individual esteja associada à função de onda *em um instante*, pelas razões aduzidas anteriormente, reduz-se a análise àquela de ensemble, na qual o paradoxo se esvai. Assim, *em cada* realização do ensemble, temos, em certo instante t , certo número de sistemas em que houve o decaimento (e o gato *está morto*), enquanto, em outros sistemas não houve o decaimento radioativo (e o gato *está vivo*). Os valores $|c_v(t)|^2$ e $|c_m(t)|^2$ medem, em cada instante t , apenas essa frequência relativa e os “estados” vivo e morto são tão objetivos quanto os estados decaído e não-decaído.

6.1.3 Sobre partículas de spin semi-inteiro

É interessante notar uma característica usual dos manuais (KUHN, 1962) voltados ao ensino da Mecânica Quântica. Via de regra, apresentam todos os seus capítulos a partir da formulação de Schrödinger, iniciando com a equação e resolvendo-a, seja analiticamente, seja numericamente.

Entretanto, há uma ruptura nessa apresentação quando se chega àquela associada a sistemas quânticos de spin semi-inteiro. O que se afirma, nesses casos, é que não há um análogo clássico para esse tipo de sistema. Ora, “ter um análogo clássico” é simplesmente se poder escrever o problema via equação de Schrödinger, obtida a partir de um *modelo clássico* – é por isso, por exemplo, que *não* se afirma que “o átomo de hidrogênio não tem um análogo clássico”.

Ocorre que Olavo (1999c) mostrou que tal modelo é possível e que a solução da equação de Schrödinger resultante fornece as funções de onda esperadas, quais sejam, aquelas que geram os elementos de matriz associados ao spin semi-inteiro sob escrutínio.

De fato, a assunção da causa da ruptura na apresentação como sendo da não existência de uma equação de Schrödinger para esse tipo de sistema quântico implicaria *não haver equivalência entre a abordagem via equação de Schrödinger e a abordagem matricial de Heisenberg* (Olavo 1999c, 2016), o que permanece sendo assumido usualmente. É interessante ressaltar também que o *modelo* permitiu esclarecer a questão das rotações por 4π , uma vez que um dos operadores envolvidos na descrição do fenômeno é um operador tensorial simétrico de segunda ordem, que possui tal característica (OLAVO, 2015). Essa propriedade relativa a rotações, tecnicamente relativa ao grupo SU(2) de simetria, aos quais os operadores envolvidos aderem, também é comumente usada em manuais, no nível discursivo, para argumentar por um abismo conceitual entre a Mecânica Quântica e a Mecânica Clássica.

Neste ponto, cabe mais uma vez ressaltar a importância de se “liberar”, epistemologicamente, o caminho para o uso (em sentido ontológico forte) dos modelos físicos. A partir desse resultado, não é mais possível se argumentar, tendo o spin semi-inteiro por construto, que há um abismo conceitual entre o domínio clássico e o quântico, ainda que se aceite, obviamente, que há diferenças importantes entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica (e.g. a primeira é determinista e a segunda, na presente interpretação, indeterminista de caráter estocástico, definido já no nível fundamental).

Tal ponto nos leva a outra questão de relevo no domínio discursivo, que apresentamos a seguir.

6.1.4 O limite newtoniano

Há considerável dificuldade em se articular a ideia de “limite newtoniano” na Mecânica Quântica usual (não interpretada a partir do modelo estocástico). De fato, nem sempre faz muito sentido se tomar $\hbar \rightarrow 0$ nos resultados quânticos. Menos sentido ainda faz tomar esse limite *nas equações*, já que a própria função $\psi(x; t)$ depende da constante de Planck.

Olhando a questão a partir da Interpretação Estocástica Estendida, tal dificuldade é superada. Trata-se de buscar correlacionar equações que se articulam em níveis distintos de análise. Do ponto de vista da Interpretação Estocástica Estendida, o limite newtoniano deve ser realizado no âmbito *da equação de Langevin*, no qual, aliás, se torna óbvio. Assim, basta colocar, nas equações de Langevin, $\gamma = 0$, para obter o limite newtoniano (e, de modo geral, fazer $\gamma \rightarrow 0$ é o mesmo que fazer $\hbar \rightarrow 0$).

Novamente, isso pode ser *visualizado* por meio de simulações do sistema estocástico (OLAVO, 2016). De fato, cada sistema quântico e, de fato, cada nível energético de um sistema quântico, tem um valor da constante γ relacionado a ele, dado pelo teorema da flutuação-dissipação (OLAVO, 2012). Assim, podemos variar, na simulação, os valores de γ , partindo daquele que resulta na distribuição quântica exata, até $\gamma = 0$, mostrando que é possível transitar, continuamente, de um sistema quântico (em que aparecem flutuações estocásticas) para um sistema clássico, no qual tais flutuações estão absolutamente ausentes (assim como se pode fazer com c na Relatividade Restrita).

Tal é a força argumentativa do limite newtoniano (e essa é uma das razões de não se usar aqui o termo “limite clássico”). Trata-se apenas de se passar de

uma teoria estocástica a uma teoria determinística por meio (eis aqui a beleza!) de apenas um parâmetro de caráter universal (a constante de Planck). Sob tal perspectiva, fica muito difícil se argumentar pelo “abismo conceitual” entre a Mecânica Quântica e a Mecânica Clássica, principalmente se tendo em mãos os critérios para diferenciá-las (flutuações estocásticas)¹⁵¹.

6.1.5 Estatística e contagem de níveis energéticos

Outro tema em que é comum se articular um abismo conceitual entre a Mecânica Quântica e a Física Clássica é aquele em que são contadas as entidades quânticas e as partículas clássicas.

Sob o argumento de que é possível, de um modo ou de outro, “rastrear” partículas clássicas, adota-se, para elas, a ideia de uma contagem segundo a permutação com repetição (OLAVO, 2016, 2022); enquanto, para as entidades quânticas, adota-se uma contagem segundo o modelo de combinações com repetições¹⁵². É sabido (OLAVO, 2016, 2022) que a contagem clássica, que gera o peso de Boltzmann, gera uma entropia errada por um fator de $n!$, em que n é o número de partículas – é o chamado “paradoxo” de Gibbs.

Entretanto, Olavo (2016, 2022) mostrou que o argumento do “rastreamento” é completamente equivocado e que se deve usar exatamente o mesmo critério de contagem para partículas clássicas e quânticas (de spin inteiro). O peso de Boltzmann correto, *com a ausência do termo $n!$ a mais*, aparece quando se faz, simplesmente, as degenerescências clássicas tenderem ao infinito (como esperado classicamente) (OLAVO, 2016, 2022), indicando que o problema não seria aquele de um “abismo” entre as duas descrições, mas de uma *escolha equivocada da forma de contar*, baseada em uma ideia, ainda mais

¹⁵¹ Não duvido que o leitor, neste ponto, se mostre incomodado. Com raras exceções, fomos moldados no interior da perspectiva de que tal abismo conceitual era inevitável. Aqui mostra-se que tudo não passa de uma escolha interpretativa.

¹⁵² As repetições estão, do ponto de vista físico, associadas aos graus de degenerescência em cada uma das perspectivas de contagem.

equivocada, de que nossa habilidade de “rastrear” partículas clássicas (via suas trajetórias, por exemplo) implicaria nessa diferença na forma de contar.

6.1.6 Átomo de Bohr-Sommerfeld

Como já apresentamos, Bohr apresentou um *modelo* para o átomo de hidrogênio que permitiu calcular, com boa precisão, seus níveis energéticos. Posteriormente, Sommerfeld relacionou as ideias de Bohr às variáveis de ângulo-ação da Mecânica Clássica. Finalmente, Sommerfeld generalizou novamente o problema para o caso relativístico, encontrando a estrutura fina do átomo de hidrogênio.

Essa abordagem é comumente chamada de “velha teoria quântica” e considerada ultrapassada, afirmando-se ter ela sido suplantada pela Mecânica Quântica baseada na equação de Schrödinger (PAULING & WILSON, 1963). Uma das críticas, já apresentadas à época da proposta de Bohr, era aquela de que o modelo seria incompatível com a Teoria Eletromagnética, uma vez que corpos acelerados devem emitir radiação, ao contrário da estabilidade proposta pelo modelo¹⁵³.

Esse tipo de afirmação poderia estar presente no nível narrativo da teoria, uma vez que fosse uma decorrência imediata da Teoria Eletromagnética. O que o coloca no nível discursivo, entretanto, é a forma pouco elaborada ou sem cuidado com que é feito, de modo que sua enunciação passa a funcionar mais como argumento em favor de determinada posição, do que uma *conclusão* acurada de uma sintaxe e semântica fundamentais.

De fato, a afirmação em questão aqui decorre diretamente da forma diferencial das equações de Maxwell. O elemento de sutileza (formal),

¹⁵³ Não deixa de ser curioso notar que se usa a *mesma hipótese* de estabilidade na equação de Schrödinger, já que o problema é elaborado a partir do potencial *eletrostático*. A equação de Schrödinger não “mostra” que o átomo é estável, ela *usa* a hipótese de estabilidade para mostrar que a energia é quantizada.

entretanto, refere-se à equivalência entre as equações de Maxwell na forma diferencial e integral. As equações de Maxwell foram desenvolvidas, originalmente, para circuitos, correntes etc., dos quais os campos derivariam. Assim, sua forma original é de caráter integral (sintaxe profunda), dada por

$$\iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}; \quad \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\int_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \left(\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)$$

$$\int_{\ell} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \left(\iint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} \right) + \mu_0 i$$

em que Q e i são a carga e a corrente, respectivamente, S é superfície fechada, A é superfície aberta, ℓ é caminho fechado, c , ϵ_0 e μ_0 são constantes físicas.

Com a *aplicação* dos teoremas integrais (nível narrativo), é fácil mostrar que as equações tomam a forma diferencial e se tornam

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0; \quad \nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J}$$

Dessas equações, se obtém imediatamente a necessidade de emissão por uma partícula acelerada (que é o contexto de um elétron em um átomo, por exemplo).

Ocorre que a *aplicação* dos teoremas integrais exige que sejam satisfeitas certas condições, e a passagem da forma integral para a forma diferencial não é isenta de sutilezas matemáticas. A sutileza que nos importa aqui é a seguinte: para se chegar à equação

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

é necessário tomar a equação integral

$$\int_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \left(\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)$$

e *assumir* que se pode passar a derivada para dentro da integral, de forma a se escrever

$$\int_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \left(\iint_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \right)$$

e, assim, aplicar o teorema de Stokes. Ora, essa passagem está longe de ser trivial. De fato, há situações em que o fluxo magnético

$$\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint_{\ell} \vec{A} \cdot d\vec{\ell} = \text{const.}$$

pode ser um *invariante adiabático*, ou seja, se comportar de tal maneira que seu valor, *em um ciclo*, é constante. Nesse caso, devemos ter (OLAVO, 2000), obviamente

$$\int_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \left(\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \right) = 0$$

implicando que

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \rightarrow \vec{E} = -\nabla\phi,$$

em que ϕ é um potencial *eletrostático*. Nesse caso, as equações de Maxwell se desacoplam e não obtemos as equações diferenciais da eletrodinâmica, mas equações da eletrostática e da magnetostática. Como se sabe, o potencial vetor \vec{A} se comporta como um *momentum*. Se, além de dizermos que o fluxo magnético é um invariante adiabático, dissermos também que é *quantizado*, poderíamos escrever algo do tipo

$$\frac{e}{c} \oint_{\ell} \vec{A} \cdot d\vec{\ell} = n\hbar,$$

que nada mais é que uma regra de Bohr-Sommerfeld para o potencial vetor.

Assim, ainda que não seja *errado* afirmar uma equivalência entre as equações integrais e diferenciais, é, certamente, *açodado*, pois tal equivalência tem qualificações¹⁵⁴. É esse *açodamento* que coloca a afirmação sobre emissão de energia eletromagnética por partículas carregadas no nível discursivo.

Quando a Mecânica Quântica, expressa via equação de Schrödinger, *usa* apenas o potencial eletrostático, *se está supondo* que o potencial vetor é um invariante adiabático (quantizado ou não) e que, portanto, em tal situação *não haverá emissão de energia eletromagnética*.

Assim, o argumento de que um elétron girando em torno de um núcleo certamente emitirá energia eletromagnética, rapidamente colapsando para o núcleo, *não é universal*, nem muito menos consequência direta das equações de Maxwell, caso em que se colocaria no nível narrativo da Teoria Eletromagnética. O *açodamento* da afirmação, como mostrado acima, coloca o argumento no nível discursivo das interpretações que o aceitarem, a menos que se demonstre que o argumento da invariância adiabática *não se aplica* na abordagem em questão.

Discursivamente, do ponto de vista da Interpretação Estocástica Estendida, o movimento do elétron (lembramos que temos partículas e campos, sempre) em torno do núcleo, para ficar no exemplo de um átomo, se dá com contínuas trocas energéticas entre as partículas (elétrons, prótons, nêutrons), por meio de fótons virtuais. A emissão de um fóton (com velocidade finita c) implica na passagem de energia do subsistema de partículas para o subsistema de campos. Se estamos considerando em detalhes apenas o sistema de partículas, vemos sua energia *flutuar* estocasticamente¹⁵⁵. O que se assume, pois, discursivamente, é que tais flutuações ocorrem de tal modo a tornar o

¹⁵⁴ Se poderia, ainda, afirmar que dizer, por exemplo, que, para uma partícula com velocidade \vec{v} , $e\vec{v}$ representa uma *corrente* elétrica é uma *analogia* que se faz entre circuitos eletromagnéticos, com cargas e correntes trafegando em estruturas contínuas e partículas se movendo no vazio (GRIFFITHS, 1999) e que, portanto, como analogia, tem suas limitações (o que convoca, novamente, o nível discursivo).

¹⁵⁵ Sendo este o sentido em que se pode dizer que a Mecânica Quântica é uma teoria de campo médio (e que o campo eletromagnético funciona como um reservatório térmico em um sistema canônico – para o qual a função característica ocupa a posição de uma função de partição).

potencial vetor uma variável adiabática e, portanto, garantidora da estabilidade do átomo sendo considerado¹⁵⁶.

Isso se correlaciona com as regras de Bohr-Sommerfeld se considerarmos que o momentum que deve aparecer nessas regras é o momentum canônico, de modo que se deve ter

$$\oint_{\ell} \left(\vec{p} - \frac{e}{c} \cdot \vec{A} \right) \cdot d\vec{r} = \text{quantizado}$$

de modo que, supor

$$\oint_{\ell} \vec{p} \cdot d\vec{r} = n \hbar$$

é supor que o fluxo magnético também é quantizado. Isso justificaria que tais regras valessem (e.g. para o átomo de hidrogênio), apoiando os resultados extremamente precisos da aplicação de tais regras, tanto no contexto não-relativístico, com a obtenção das séries de Balmer, Paschen, Lyman etc., quanto no contexto relativístico, com a obtenção da estrutura fina do átomo de hidrogênio.

6.2 Representação da Interpretação no quadro de geração de sentido

A partir das considerações feitas anteriormente, é possível apresentar, ainda que não exaustivamente, um enquadramento da Interpretação Estocástica Estendida no esquema de níveis sintáticos e semânticos relacionados à perspectiva de Greimas e Courtés. Para tanto, confira o Quadro 6-1 mostrado a seguir.

¹⁵⁶ Isso é consistente com a situação usual de um *movimento browniano* de uma partícula leve (um grão de pólen) suspenso em um coloide. Ao se fixar a análise *no movimento do grão de pólen*, verifica-se seu comportamento “errático”, representado formalmente por flutuações em sua trajetória.

Nível	Componente sintático	Componente semântico
Fundamental	Equação de Langevin	<ul style="list-style-type: none"> • Estado: $(\vec{x}; \vec{p})$ se refere a <i>natureza (corpuscular)</i>; • Teorema da Flutuação-Dissipação; • Teoria Estocástica (modelo); • Trajetórias (estocásticas: realizações); • Indeterminismo (evolução indeterminista de cada partícula); • Localidade; • Flutuações decorrem da divisão do sistema em corpuscular e de campos (que funcionam como reservatórios térmicos – esquema canônico);
	Equação de Schrödinger	<ul style="list-style-type: none"> • Estado: $\psi(\vec{x}; t)$; amplitude de probabilidade; • Construção de Operadores: não existem estados sem dispersão; • Onda se refere a <i>comportamento</i>; • Densidade de probabilidade se refere à frequência estatística de ocupação do espaço de fase; • Determinismo (evolução determinista da $\psi(x; t)$); • Natureza local implica que o não-local são correlações estatísticas;
Narrativo	$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ $\Delta x_n \Delta p_n = f(n) \hbar$ Eq. de Ehrenfest	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio Ergódico; <ul style="list-style-type: none"> ○ Ensemble; ○ Sistema Individual; • Não há dualidade; <ul style="list-style-type: none"> ○ Natureza Corpuscular (eq. de Langevin); ○ Comportamento Ondulatório (eq. de Schrödinger); • Objetividade; <ul style="list-style-type: none"> ○ Desvio quadrático médio (não incerteza); • Não há observador (no sentido de Copenhagen); • Não necessita da Complementaridade; • Não há Teoria da Medida; • Não há Redução do Pacote de Ondas; • Relação com o Teorema do Limite Central;
Discursivo	Interpretação de sistemas quânticos particulares, a questão do Spin, Contagem Estatística de Estados.	<ul style="list-style-type: none"> • Limite Newtoniano • Interpretação (exemplos fundamentais) • Teoria de Campo Médio; • Salto Quântico; • Análogo clássico do Spin e rotação por 4π; • Interpretação (sintética) dos experimentos fundamentais <ul style="list-style-type: none"> ○ Radiação de Corpo Negro; ○ Efeito Fotoelétrico; ○ Efeito Compton; ○ Spin; ○ Dupla-Fenda; ○ Átomo de Bohr-Sommerfeld; <ul style="list-style-type: none"> ▪ Estabilidade das órbitas dos átomos;
		<ul style="list-style-type: none"> • Novos resultados (acordo experimental); • Experimentos de Aspect (Não Localidade/Correlação); • Gato de Schrödinger...

Quadro 6-1. Percurso gerador de sentido da Interpretação Estocástica.

No Quadro 6-1, em que inserimos as principais considerações feitas anteriormente. Note-se que seria igualmente possível fazer a mesma coisa para qualquer outra interpretação da Mecânica Quântica, como a Interpretação de Bohm de Variáveis Escondidas ou a Interpretação de Muitos Mundos, entre outras.

A partir deste quadro e daquele em que estabelecemos o enquadramento da Interpretação de Copenhagen, torna-se muito mais simples estabelecer uma *comparação entre tais interpretações* e, com base nos critérios já apresentados no capítulo 1, proceder a uma *hierarquização* dessas interpretações.

Fica, pois, claro, que a Interpretação Estocástica Estendida estabelece seus princípios fundamentais no nível fundamental (sintático e semântico); que ela deriva seus principais resultados a partir desse nível, estabelecendo os resultados apresentados no nível narrativo e que coloca, no plano discursivo, apenas argumentos contrários à assunção de que a Mecânica Quântica apresenta um abismo conceitual relativamente a uma Teoria Clássica.

A comparação entre as Interpretações, feita a partir dos quadros, fornece um pano de fundo em que tais interpretações podem ser hierarquizadas, mesmo havendo entre elas subdeterminação experimental e formal.

Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi o de mostrar que é possível encontrar esquemas conceituais que permitem que se faça uma hierarquização de interpretações de teorias físicas mesmo em situações de subdeterminação experimental e formal. Assim, não *decorre* do fato de haver subdeterminação que as diferentes interpretações, pelo simples fato de possuírem (quando possuem) consistência interna, tenham o mesmo estatuto em relação umas às outras.

Para a obtenção desse resultado, foi adotado o esquema de geração de sentido de Greimas e Courtés, mas já perpassado com a abordagem denotacional da linguística adaptada para a Física, considerada como linguagem. Isso foi feito a partir da consideração de que qualquer interpretação de teoria física pode ser considerada como um texto, sujeito às divisões por níveis propostas pela abordagem de Greimas e Courtés.

A partir da perspectiva denotacional, foram erigidos critérios de importância epistemológica que colocam os níveis fundamental e narrativo em proeminência, em contraposição ao nível discursivo. Isso permite, uma vez “localizadas” as diferentes proposições de determinadas interpretações nesse esquema de três níveis, estabelecer uma comparação relativamente à força epistêmica relativa de cada uma delas.

Como estudo de caso, foram apresentados os enquadramentos da Interpretação de Copenhague e da Interpretação Estocástica Estendida. Seria possível considerar quaisquer outras, mas essas duas foram adotadas porque a primeira tem valor seminal para todas as interpretações posteriores, enquanto a segunda foi objeto de desenvolvimento por este autor ao longo de muitas décadas. Ficou claro que a construção do processo gerador de sentido de uma interpretação envolve um mergulho de considerável profundidade em seus modos expressivos, inclusive quanto aos seus desdobramentos históricos relativos às intenções de seus idealizadores.

Subsidiariamente, restou aparente que a profusão de interpretações para a Mecânica Quântica decorre da pouca clareza dessa possibilidade de hierarquização, pela qual algumas interpretações poderiam ser simplesmente rejeitadas, não apenas, e nem principalmente, pelo seu caráter de profunda estranheza, mas principalmente porque tais interpretações se articulam quase que exclusivamente no plano discursivo (e.g. a noção de “muitos mundos”, que não encontra qualquer correlato sintático/semântico fundamental, muito menos e por conseguinte, narrativo).

Tal resultado, ainda que subsidiário, traz maior relevância ao que se buscou originariamente neste trabalho, qual seja, a introdução de um esquema de comparação entre interpretações subdeterminadas experimentalmente. De fato, à medida em que as teorias físicas se tornam mais e mais abstratas, é de se esperar que essa condição de subdeterminação se torne mais e mais frequente.

Assim, estar municiado com um esquema de distinção e hierarquização de tais instrumentos interpretativos pode se tornar crucial para que a Física cumpra seu objetivo precípua, que é a compreensão do mundo natural que compõe o Universo.

Referências

ACHINSTEIN, P. **Concepts of Science: a philosophical analysis**. Maryland: Johns Hopkins University Press, 1968.

ASSIS, A. K. T. **Eletrodinâmica de Weber**. Editora da Unicamp: Campinas, 1995.

ASSIS, A. K. T. **Mecânica Relacional**, Centro de lógica, Epistemologia e História das Ciências: Campinas, 1998.

AYER, A. J., **Language, truth and logic** Penguin Modern Classics. London, England: Penguin Classics, 2021.

BACH, A. **Indistinguishable Classical Particles**. Springer: Berlin, 1997.

BACON, F. **Novo Organon** (*Instauratio Magna*). São Paulo: Edipro, 2014.

BALLENTINE, L. E. The statistical interpretation of Quantum Mechanics. **Rev. Mod. Phys.** 42, 358, 1970.

BARRETT, J. A. Pure Wave Mechanics, Relative States and Many Worlds. In: **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Freire Jr., O. (org), 2022, p. 987-1005.

BENVENISTE, É. **Problemas de linguística geral I**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2005.

BLOOR, D. **Knowledge and Social Imagery**, Chicago: University of Chicago, 2nd edition, 1981.

BOHM, D. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables I. **Phys. Rev.**, v. 85, 166, 1952.

BOHM, D. e HILEY, B.J. **The Undivided Universe**. Routledge: London, 1993.

BRAITHWAITE, R. B., **Scientific Explanation: a study of the function theory, probability and law in science**, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1953.

BUB, J. Hidden Variables. In: **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Freire Jr., O. (org), 2022, p. 957-985.

- BUNGE, M. **Philosophy of Physics**. Dodrecht: Springer, 1972.
- BURTT, E. A. **As Bases Metafísicas da Ciência Moderna**. Brasília: EdUnB, 1991.
- CALLEN, H. B. **Thermodynamics: an introduction to thermostatistics**. New York: John Wiley & Sons, 2 Ed., 1985.
- CAMARGO, J. S. A inferência abdutiva em Pierce. **DIAPHONÍA**, v. 7, n. 2, 2021
- CERQUEIRA, J. L. C. A Teoria das Descrições de Bertrand Russell. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ed. 09, v. 1, pp. 17-34, 2018.
- CLAGETT, M. **Science of Mechanics in the Middle Ages**. Oxford University Press: London, 1961.
- CHIBENI, S. S. A inferência abdutiva e o realismo científico. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 6 (1): 45-73, 1996.
- CHIERCIA, G. **Semântica**. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.
- COELHO, P. M. F; COSTA, M. R.; FONTANARI, R. **O parecer do sentido: a perspectiva semiótica**. Razón y Palabra, v. 20, n. 1, p. 1065–1082, 2016.
- COHEN-TANNOUJDI, C., DIU, B. & LALOË, F. **Quantum Mechanics**, v. 1, New York: Wiley, 1977.
- COLLINS, H., 1992, **Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice**. Chicago: University of Chicago Press, 2nd edition, 1992.
- COMPTON, A. H., **Physical Review**, v. 2, 330, 1918.
- COPÉRNICO, N. **As Revoluções das Orbes Celestes**. 3ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2014.
- CORNFORD, F. M., **Plato's Cosmology**. Cambridge: Hackett Publishing Company, 1997. Reimpresão da versão de 1935 pela Editora Routledge.
- COSTA, M. R. M. Da imanência à transcendência: reflexões semióticas. **Estudos Semióticos**, v. 10, n. 1, p. 89-99, 2014.

DE BROGLIE, L. **Recherches sur la théorie des quanta**, Tese de Dougorado (Paris), 1924; L. de Broglie, **Ann. Phys.** (Paris) **3**, 22, 1925. Republicado em: **Ann. Found. Louis de Broglie** **17**, 1992, p. 22.

DE LA PEÑA-AUERBACH, L. **J. Math. Phys.** v. 10, 1620, 1969.

DE LA PEÑA-AUERBACH, L. **Phys. Lett.** v. 31A, 403, 1970.

DE LA PEÑA-AUERBACH, L. **J. Math. Phys.** v. 12, 453, 1971.

DE LA PEÑA-AUERBACH, L. **Found. Phys.** v.12, 1017, 1982.

DUANE, W. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA** v. 9, 158, 1923. COMPTON, A.H. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA** v. 9, 359, 1923.

DUVAL, R. Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. **Annales de Didactiques et de Sciences Cognitives**, IREM de Strasbourg, v. 5, p. 37-65. 1993.

EHRENFEST, P. Welche Züge der Lichquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle? (1911). **Annalen der Physik**, 36, 91-118. Reprinted in Bush, (ed.), P. Ehrenfest, *Collected Scientific Papers* (North-Holland, Amsterdam, 1959).

EVERETT, H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics. **Reviews of Modern Physics**, v. 29, n. 3, 454–462, 1957.

EVERETT, H.; WHELLER, J. A.; DEWITT, B.S.; COOPER, L.N. VAN VECHTEN, D.; GRAHAM, N. **The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics**, DEWITT, B. & GRAHAM, R. N. (eds): Princeton Series in Physics, Princeton University Press, New Jersey, 1973.

FAVRHOLDT, D., **Niels Bohr's philosophical background**, Historisk-filosofiske Meddelelser 63, The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Munksgaard-Copenhagen, 1992.

FAYE, J. **Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics**. In Zalta, E. N. (ed). Stanford Encyclopedia of Philosophy. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019.

FEYNMAN, R.P. & Hibbs, A.R. **Quantum Mechanics and Path Integrals**. New York: McGraw-Hill, 1965.

FLORES, C. R.; MORETTI, M. T. A articulação de registros semióticos para a aprendizagem: analisando a noção de congruência semântica na matemática e na física. **Perspectivas da educação matemática**, v. 1, n. 1, p. 25-40, jan/jun. 2008.

FREIRE Jr., O. (org.) **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Oxford: Oxford University Press, 2022.

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano**. São Paulo: Discurso Editorial, 2001.

GIANNETTO, E. Something Is Rotten in the State of Denmark. Søren Kierkegaard, Niels Bohr e La Nascita Della Fisica Quantistica. **Altre Modernità**, 2019, p. 179-97.

GOLDSTEIN, H., POOLE, C. & SAFKO, J. **Classical Mechanics**. San Francisco: Addison Wesley, 3a ed. 2002.

GOUVÊA, R. Q. **Paixão pelo paradoxo: uma introdução a Kierkegaard**. São Paulo: Editorial, 2006.

GRANT, E. **Physical Science in the Middle Ages**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

GREIMAS, A. J.; COURTÉS, J. **Dicionário de semiótica**. Tradução de Alceu Dias et al. São Paulo: Contexto, 2008.

GRICE, P. **Studies in the Way of Words**. Cambridge: Harvard University Press, 1991.

- GRIFFITHS, D. J. **Mecânica Quântica**. 2 ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. 3a ed. London: Prentice-Hall, 1999.
- GIBBS, J. W. **Elementary Principles in Statistical Mechanics**. New Haven: Yale University Press, 1902.
- GRUBER, G.R. **Foundations of Physics** v. 1, 227, 1971.
- GRUBER, G.R. **Prog. Theo. Phys.** v. 6, 31, 1972.
- HEILBRON, J. L. The Mind that Created the Bohr Atom. In: Darrigol O., Duplantier B., Raimond JM., Rivasseau V. (eds) Niels Bohr, 2016, p. 1913-2013. **Progress in Mathematical Physics**, v. 68. Birkhäuser, Cham.
- HEMPEL, G. G. Problems and changes in the empiricist criterion of meaning, **Revue Internationale de Philosophie XI**, p. 41, 1950.
- HESSE, M. B. Operational definition and analogy in physical theories, **British Journal for the Philosophy of Science**, 1952.
- HESSE, M. B. **Forces and Fields**: the concept of action at a distance in the history of physics. New York: Dover, 1962.
- HEISENBERG, W. **Physics and Beyond**. New York: Harper and Row, 1971.
- HOLTON, G. The Roots of Complementarity. **Daedalus** v. 99, 1970.
- HOWARD, D. The Copenhagen Interpretation. In: **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Freire Jr., O. (org), 2022, p. 521-542.
- HUTTEN, E. H. On Semantics and Physics. **Proceedings of the Aristotelian Society**. New Series, v. 49 (1948 - 1949), pp. 115-132.
- JACOBSEN, A. S. Copenhagen and Niels Bohr. In: **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Freire Jr., O. (org), 2022, p. 544-565.

JAMMER, M. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.

KANT, I. **Crítica da Razão Pura**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1994.

KARAM, R. A. S. matemática como estruturante e física como motivação: uma análise de concepções sobre as relações entre matemática e física. **ANAIS do VI ENPEC Florianópolis**, SC. 2007.

KERSHAW, D. **Phys. Rev.** v. 138, B1850, 1964.

KEYNES, I. (1952). **Z. Phys.** v. 132, 81.

KHINCHIN, A. I. **Mathematical Foundations of Statistical Mechanics**. New York: Dover, 1949.

KOSSOVSKY, A. E. Galileo's Work on Sound and Speed of Light. In: **The Birth of Science**. Springer: Springer Praxis Books, 2020.

KOYRÉ, A., **Do Mundo Fechado ao Universo Infinito**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 3ª edição, 2001.

KOYRÉ, A. **Estudos Galilaicos**. São Paulo: Dom Quixote, 1986.

KRAUSE, D.; BUENO, O. Scientific Theories, Models, and the Semantic Approach. **Principia**, v. 11(2) (2007), pp. 187—201.

KUHN, T. **The Structure of Scientific Revolutions**. Chicago: University of Chicago Press, 1962.

LACKI, J. Review: Niels Bohr's Philosophical Background. **Dialectica** v. 50, No. 4, 1996, pp. 291-303.

LANDÉ, A. **From Dualism to Unit in Quantum Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1960.

LANDÉ, A. **Foundations of Quantum Theory**. New Haven: Yale University Press, 1955.

LANDÉ, A. **New Foundations of Quantum Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1965.

LEVY, P. Théorie des erreurs. La loi de Gauss et les lois exceptionnelles. In: **Oeuvres de Paul Levy**. France: Ecole Polytechnique, 1976.

LINDGREN, J., LIUKKONEN, J. Quantum Mechanics can be understood through stochastic optimization on spacetimes. **Sci Rep** v. 9, 19984, 2019.

LONGINO, Longino, H. **Science as Social Knowledge**, Princeton: Princeton University Press, 1990. LONGINO, H. **The Fate of Knowledge**, Princeton: Princeton University Press, 2002.

LOPARIC, Z. Andreas Osiander: prefácio ao “De Revolutionibus Orbium Coelestium”, de Copérnico. **Cadernos de História e Filosofia das Ciências**, Campinas v. 18, n. 1, p. 253-257, 2008.

LOTMAN, I. **La semiosfera**. Madrid: Ediciones Cátedra, 1996.

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. New York: Dover, 1954.

MAXWELL, J. C. On Physical Lines of Force, **Phil. Mag.**, XXI, pp. 161-175, 281-291, 338-348, 1861 (Parts I and II).

MEHRA, J., RECHENBERG, H. **The historical development of Quantum Mechanics**. New York: Springer-Verlag Vols 1-6, 1982.

MEHRA, J. 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, 5, 1987.

NELSON, E. **Phys. Rev.** v. 150, 1079, 1966.

NETO, J. B. **Teoria Eletromagnética: parte clássica**. São Paulo: Livraria da física, 2015.

NEWTON, I. **The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy**. London: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. **Óptica**. São Paulo: Edusp, 1996.

OLAVO, L. S. F. Foundations of quantum mechanics: non-relativistic theory. **Physica A** v. 262, 127, 1999a.

OLAVO, L. S. F. Foundations of quantum mechanics (II): equilibrium, Bohr-Sommerfeld rules and duality. **Physica A** v. 271, 260, 1999b.

OLAVO, L.S.F., FIGUEIREDO, A. D. The Schrödinger eigenfunctions for the half-integral spins. **Physica A** v. 262, 1999c.

OLAVO, L. S. F. Foundations of quantum mechanics: connection with stochastic processes. **Physical Review A** v. 61, 052109, 2000.

OLAVO, L. S. F. Foundations of Quantum Mechanics: the connection between QM and the Central Limit Theorem. **Foundations of Physics** v. 34, 891, 2004.

OLAVO, L. S. F., FIGUEIREDO, A. D., LAPAS, C. Foundations of Quantum Mechanics: the Langevin equations of QM. **Annals of Physics** 327 (5), 1391-1407, 2012.

OLAVO, L.S.F.. Foundations of Quantum Mechanics: Special and General Relativistic Extensions. In: Zoheir Ezziane. (Org.). **Contemporary Research in Quantum Systems**. 1ed. New York: Nova Publishers, 2014, p. 1

OLAVO, L.S.F. Foundations of Quantum Mechanics: on rotations by 4π for half-integral spin particles. **Foundations of Physics** 45, 1483-1494, 2015.

OLAVO, L. S. F. **Quantum Mechanics: Principles, New Perspectives, Extensions, and Interpretation**. New York: Nova Publishers, 2016.

OLAVO, L. S. F. A questão dos modelos no ensino de Mecânica Quântica: a equação de Schrödinger para partículas de spin semi-inteiro. **Revista Brasileira de Ensino de física** v. 44, e20220109-2, 2022.

PAIS, A., **Niels Bohr's Times, In Physics, Philosophy, and Polity**. Oxford: Clarendon Press, 1991.

PAULI, W. **Scientific correspondence**. New York: Springer-Verlag, v. I, 1971.

PAULING, L., AND WILSON, E.B. **Introduction to Quantum Mechanics**, with applications to chemistry. New York: Dover, 1963.

POPPER, K. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 1972.

POPPER, K. **Conjecturas e refutações**. São Paulo: Edições 70, 2018.

PEIRCE, C. S. **Semiótica**. 4. ed., São Paulo: Perspectiva, 2010.

PRIEST, G. Na introduction to non-classical logic. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

PTOLOMEU, **Ptolomy's Almagest**. New Jersey: Princeton University Press, 1998. Tradução e anotações de Toomer, G. J.

PULLMAN, B., **The Atom in the History of Human Thought**. New York: Oxford University Press, 1998.

PURRINGTON, R. **Physics in the Nineteenth Century**. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997.

QUINE, W. V. O. **Two Dogmas of Empiricism**, Reprinted in *From a Logical Point of View*, 2nd Ed., Cambridge, MA: Harvard University Press, 1951, pp. 20–46.

RAMSEY, F. P., **Foundations of Mathematics**, Londres: Routledge & Kegan, 1931.

REDHEAD, M. Models in Physics. **British Journal for the Philosophy of Science** v. 31, 145, 1980.

REITZ, J. R., MILFORD, F. J., CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1988.

ROCHA, G. R., RICKLES, D. & BOGE, F. J. A brief historical perspective on the consistent histories interpretation of quantum mechanics. In: **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Freire Jr., O. (org), 2022, p. 1175-1196.

ROSENFELD, L. **Book Review. Max Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics**. Nuclear Physics v. A126, (1969), p. 696.

SABRA, A.I. **Theories of Light: From Descartes to Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.

SAKURAI, J. J.; NAPOLITANO, J. **Mecânica Quântica Moderna**. 2ed Porto Alegre: Bookman, 2013.

SANTOS, E. Stochastic Interpretations of Quantum Mechanics. In: **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Freire Jr., O. (org), 2022, p. 1247-1262.

SAUSSURE, F. **Curso de Linguística Geral**. 28. ed. São Paulo: Cultrix, 2012.

SHAPIN, S.& SHAFFER, S. **Leviathan and the Air Pump**, Princeton: Princeton University Press, 1985.

SHEWELL, J. R. On the formation of quantum mechanical operators. **Amer. J. Phys.** v. 27, 5, 1959.

SCHIFF, L. I., **Quantum Mechanics**. 3ª ed. Singapore: McGraw-Hill, 1968.

SHIMONY, A. Role of the observer in Quantum Theory. **American Journal of Physics** v. 31, 755, 1963.

SHEWELL, J. R. On the formation of quantum mechanical operators. **American Journal of Physics** v. 27, 16-21, 1959.

SILVA FILHO, O. L. *Sub species aeternitatis*. **Revista Humanidades**, nº 58. Brasília: EdUnB, p. 98 - 107, 2011.

SILVA F. S.; CATELLI, F. Os modelos na ciência: traços da evolução histórico-epistemológica. **Revista Brasileira de Ensino de física** v. 41, 4, 2019.

SIMON, H.; NEWELL, A. Models: their uses and limitations. Disponível em https://digitalcollections.library.cmu.edu/node/35201?search_api_fulltext=Models. Acessado em 10/10/2021.

SMITH, G. Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. In: ZALTA, E. N. (ed.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Stanford: Stanford University, 2008.

STANFORD, K. "Underdetermination of Scientific Theory", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2023 Edition), Edward N. Zalta & Uri

Nodelman (eds.), URL=<https://plato.stanford.edu/archives/sum2023/entries/scientific-underdetermination/>: visitado em 31/03/2024.

STECIAG, M. **Linguistics and Physics**: mutual relations and fascination. Proceedings of the 1st Annual International Interdisciplinary Conference, AIIC 2013, 24-26 April, Azores, Portugal.

SUPPES, P. What is a semantic theory. In Sidney Morgenbesser (Ed.), **Philosophy of Science Today**. New York: Basic Book; Inc., 1967, pgs. 55 - 67.

TAKABAYASI, T. **Prog. Theoret. Phys.** v. 11, 341, 1954.

TAYLOR, A.E. **A commentary on Plato's Timaeus**. Oxford: Clarendon, 1928.

TOULMIN, Resoning in theory and practice. **Informal logic**. v. 24 (2), 2004, pp. 111-114.

WEIZEL, W. **Z. Phys.** v. 134, 264 (1953). WEIZEL, W. **Z. Phys.** v. 136, 582 (1954).

WIMMEL, H. **Quantum Physics and Observed Reality: A Critical Interpretation of Quantum Mechanics**. Singapore: World Scientific, 1992.

WITTGENSTEIN, L. **Tractatus Logico-Philosophicus**. São Paulo: Edusp, 3ª Edição, 201.