

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

ANDERSON CLEITON FERNANDES LEITE

**REALISMOS E ANTI-REALISMOS NA FÍSICA DO SÉCULO XX:
WERNER HEISENBERG, O PENSAMENTO GREGO E
OS DEBATES NA CONSTRUÇÃO DA TEORIA QUÂNTICA**

BRASÍLIA

2008

ANDERSON CLEITON FERNANDES LEITE

**REALISMOS E ANTI-REALISMOS NA FÍSICA DO SÉCULO XX:
WERNER HEISENBERG, O PENSAMENTO GREGO E
OS DEBATES NA CONSTRUÇÃO DA TEORIA QUÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia, Linha de Pesquisa Teoria do Conhecimento e Filosofia da Ciência, Departamento de Filosofia, Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Simon Rodrigues

BRASÍLIA

2008

À Maria Zilma, Maria Ilma, Damísia e Alana. *Wirklichkeit*
do amor, do carinho, da vida e da perfeição.

AGRADECIMENTOS

A meus pais Antônio P. Leite e Maria Ilma, pela dedicação e carinho.

A meus avós maternos Edmundo Fernandes e Maria Zilma, pelo amor e presença constante.

Ao professor Samuel José Simon Rodrigues, pela orientação equilibrada e paciente, marcada por um autêntico entusiasmo pela filosofia.

À Damísia Lima, companheira inigualável, pela compreensão e ajuda inestimável na dissertação – e pelo futuro.

Ao amigo Leonardo Vieira, com o qual partilho a devoção pelos textos homéricos, pelo companheirismo e brilhante ajuda.

Ao amigo Paulo Falcão, interlocutor filosófico de todas as horas, pelo seu detalhado trabalho de revisão.

Aos professores Gabriele Cornelli e Olavo Leopoldino da Silva Filho pelas relevantes orientações no exame de qualificação.

Ao professor Agnaldo Cuoco Portugal, pela abertura permanente ao diálogo e solicitude.

Aos professores José Otávio Guimarães e Sonia Lacerda, do Núcleo de Estudos Clássicos – NEC, e Eleonora Zicari pela decisiva influência acadêmica.

Aos amigos, e irmãos, Marcelo, Cláudio e Maurenilson.

À CAPES, pela apoio financeira concedido

RESUMO

Esta dissertação tem como objeto de pesquisa a relação entre as obras do físico Werner Heisenberg e a filosofia grega. Optou-se por contextualizar tal relação no âmbito dos debates acerca da teoria quântica realizados nas cinco primeiras décadas do século XX. Para tanto, fez-se necessário descrever o desenvolvimento histórico e conceitual da teoria quântica e o papel de Heisenberg nesse processo. Os conceitos filosóficos gregos são utilizados por Heisenberg como uma forma de clarificar problemas da própria mecânica quântica, para legitimar a Interpretação de Copenhague e na desqualificação das interpretações concorrentes. A história da ciência, para Heisenberg, é determinada pelo influxo de duas correntes de pensamento que surgiram na Grécia antiga: o materialismo e o idealismo. A partir de tal clivagem, Heisenberg fundamenta uma crítica aos opositores da Interpretação de Copenhague, assim como justifica filosoficamente suas teses pessoais quanto à mecânica quântica. Afirma-se que, apesar de suas concepções filosóficas não serem passíveis de uma sistematização completa, a relação que Heisenberg estabeleceu entre a filosofia grega e os problemas da teoria dos quanta acabou por resultar numa interpretação da realidade física próxima de um realismo, na qual existem traços de platonismo e de subjetivismo.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica quântica, Werner Heisenberg, filosofia grega, realismo

ABSTRACT

This dissertation discusses the relationship between the physicist Werner Heisenberg's works and ancient Greek philosophy. It aims to present the context of such relationship in the debates around quantum theory, which occurred in the XX Century's first five decades. In order to accomplish this task, it was necessary to describe quantum theory's historical and conceptual development and Heisenberg's part in this process. The Greek philosophical concepts were used by Heisenberg as a way to clarify problems of quantum mechanics itself to legitimate the Copenhagen Interpretation and in disqualification of the rival interpretations. The history of science for Heisenberg is determined by two concurrent influxes of thought that appeared in ancient Greece: materialism and idealism. From such cleavage, Heisenberg founds a criticism against the Copenhagen Interpretation's opponents, as well as philosophically justifies his own thesis regarding quantum mechanics. It is argued that, although his philosophical conceptions are not liable to a complete systematization, the relation that Heisenberg established among Greek philosophy and the problems of the quanta theory ended up in an interpretation of physical reality near to a realism, in which there are traces of Platonism and subjectivism.

KEY WORDS: Quantum Mechanics, Werner Heisenberg, Greek Philosophy, Realism.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
1.1	Considerações iniciais	08
1.2	A teoria dos quanta	09
1.3	O “cisma na física”	10
1.4	A filosofia em Heisenberg	12
1.5	Bibliografia, fontes e citações	14
2	HEISENBERG E A HISTÓRIA DA FÍSICA NO SÉCULO XX: VIDAS PARALELAS	16
2.1	O início da teoria quântica: Max Planck e Albert Einstein	17
2.2	A “antiga” teoria quântica ou o átomo segundo Bohr e Einstein	21
2.3	O Princípio de Correspondência e o colapso da antiga teoria quântica	25
2.4	Os anos de aprendizagem do jovem Werner Heisenberg	27
2.5	Interlúdio I: Louis de Broglie e as ondas de matéria	33
2.6	O artigo Bohr, Kramers e Slater: a tentativa de rejeição ao fóton	35
2.7	A construção e o estabelecimento da Mecânica Quântica	37
2.8	Interlúdio II: Paul Dirac	41
2.9	Erwin Schrödinger e a função χ: interpretação e confronto	43
2.10	O estabelecimento de uma interpretação ortodoxa	49
3	FILOSOFIA E HISTÓRIA DA CIÊNCIA, SEGUNDO WERNER HEISENBERG	59
3.1	Heisenberg e a Filosofia Grega	60
3.1.1	A Formação Cultural de Heisenberg	61
3.1.2	O Contexto Intelectual da Obra de Heisenberg: Os Debates acerca da Mecânica Quântica	62
3.1.3	Os Benefícios da Aproximação entre Ciência e Filosofia	64
3.2	A História da Ciência e da Filosofia, Segundo Heisenberg	66
3.2.1	O materialismo de Demócrito e Leucipo e sua Influência na História da Ciência	67
3.2.2	Diánoia e epistême	73
3.2.3	Os limites do programa materialista na história da ciência: a teoria quântica	78
4	MATERIALISMO, IDEALISMO E OS DEBATES ACERCA DA TEORIA QUÂNTICA	81
4.1	O pós-guerra e as novas interpretações da teoria dos quanta	83
4.1.1	A Teoria de David Bohm	85
4.2	A reação de Heisenberg às novas interpretações	91
4.3	Teoria quântica e idealismo: as simetrias platônicas e a estrutura da matéria	97
4.4	Probabilidades, subjetivismo e Aristóteles	103
4.5	Heisenberg entre Heráclito, Pitágoras e Aristóteles	109
5	CONCLUSÃO	111
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
6.1	Fontes primárias	122
6.2	Bibliografia secundária	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Afirmar a proeminência da tradição clássica na constituição do mundo ocidental tornou-se, sem dúvida, um lugar-comum. Entretanto, tal evidência não retira a veracidade do fato de que a herança helênica e latina conformou – e ainda conforma – grande parte das instituições, práticas e crenças do Ocidente. Ao ponto dessa influência ter se tornado tão enraizada que, por vezes, afigura-se como um elemento inconsciente. Isso não significa que a recepção da tradição clássica tenha sido a prática de uma mera repetição automática dos modelos greco-latinos. Apesar de a palavra tradição remeter a uma acolhida complacente e passiva frente ao legado clássico, esse legado, no decorrer da história, foi objeto de um sem-número de atualizações e reinterpretações. O que, em certa medida, permitiu o surgimento de uma nova Grécia Antiga a cada tradição intelectual que dela se apropriava.

Dado esse contexto, o objeto analisado pela presente dissertação é um pequeno capítulo na longa história da recepção do legado helênico pela cultura europeia. A obra de um dos mais importantes físicos do século XX, Werner Karl Heisenberg (1901-1976), é marcada por referências ao pensamento grego antigo. Conceitos derivados da filosofia de Platão, Aristóteles e dos pré-socráticos são utilizados por Heisenberg como instrumentos que permitiriam uma melhor clarificação dos problemas e dilemas que surgiram na teoria quântica. Nas palavras dele (1952, p. 96):

Para se adquirir uma compreensão dos fundamentos da física atômica nós devemos seguir, passo a passo, as idéias que, dois mil e meio anos atrás, conduziram a filosofia natural grega à teoria atômica, e devemos então tentar encontrar uma conexão com essas idéias fundamentais mesmo nos avanços mais modernos da física atômica.

O objetivo da dissertação, então, é analisar os usos que Heisenberg fez da filosofia grega, e relacioná-los não só com a argumentação presente nos textos do físico alemão, mas também com o contexto histórico de conflitos e debates entre as diversas interpretações da teoria dos quanta. Assim, além de esclarecer mais um episódio na história da influência do pensamento clássico sobre a vida intelectual do Ocidente, pretende-se discutir uma série de questões relativas aos fundamentos filosóficos da física contemporânea. Em outras palavras: ao se compreender a abordagem que Heisenberg fez à obra dos filósofos clássicos, pode-se

esclarecer não só a filosofia de fundo que guiou as escolhas científicas dele, mas também parte do debate que perpassa a criação e a legitimação da Mecânica Quântica no século XX.

1.2 A teoria dos quanta

A Mecânica Quântica trata do comportamento físico da matéria em nível atômico e subatômico, o que faz dela uma das teorias fundamentais da física. Seu poder preditivo é notável e a aplicabilidade da teoria é extremamente vasta, bastando citar, por exemplo, o papel preponderante da mecânica quântica na invenção do diodo e do transistor e o impacto destes sobre a eletrônica, informática e medicina. Para alguns, ela poderia até mesmo solucionar problemas totalmente fora do escopo da física, como o do funcionamento e da natureza da mente (cf. PENROSE, 1989). E apesar de sua aceitação entre a comunidade científica ser inegável, a mecânica quântica, desde sua criação, é marcada por uma série de controvérsias envolvendo sua interpretação. A imagem da natureza que pode ser construída a partir da física dos quanta é incompatível com aquela derivada da Mecânica Clássica e das intuições ordinárias acerca do funcionamento do mundo físico. Ao estabelecer o que “consiste o programa da mecânica quântica”, Luiz Ryff (1992, p. 166) estabelece uma ilustrativa comparação entre ela e a mecânica clássica:

[na mecânica clássica] supomos que o movimento de qualquer partícula pode sempre ser descrito pela segunda lei de Newton, cabendo-nos a tarefa de determinar as forças que atuam sobre a partícula. A mecânica, portanto, nos fornece uma estrutura que nos orienta no processo de criação modelos físicos. A mecânica quântica, por outro lado, nada nos diz sobre o estado real de um sistema físico, nem mesmo se tem algum sentido em se falar num estado real. Ela apenas nos fornece a probabilidade de obter certo resultado ao realizarmos uma medida.

Não é, evidentemente, apenas um aperfeiçoamento teórico. A ruptura instaurada pela mecânica quântica atinge os fundamentos da própria física clássica em seus elementos mais básicos. Tal situação se reflete até mesmo no aparato matemático da teoria, bem diverso daquele utilizado pela mecânica clássica (BOHM, 1951, p. 1). Segundo o físico brasileiro Antônio Piza (2003a, p. 2), “não é possível, (...), deduzir a mecânica quântica de noções ou esquemas anteriores, nem tampouco construí-la como alguma forma de extensão de teorias clássicas”. Portanto, a física dos quanta abrange uma série de conceitos, fenômenos experimentais e pressupostos filosóficos que a distingue de qualquer outro *corpus* teórico surgido anteriormente na história da física. Podem ser citadas inúmeras características que distinguem a física quântica da física clássica, tais como as relações de Heisenberg, o uso de

grandezas que não comutam ou o papel dos números complexos. Nas palavras de Antônio Piza (2003a, p. 1):

Esse processo não se limitou aos mecanismos dinâmicos envolvidos nas teorias clássicas, mas exigiu uma revisão da própria base *cinemática* envolvida na sua formulação. Em outras palavras, não só a estruturação dos fenômenos proposta pelas teorias clássicas se mostrou inadequada, mas até mesmo os termos usados na própria identificação e caracterização dos fenômenos tiveram que ser revistos.

1.3 O “cisma na física”

Dentre os fundadores da mecânica quântica, como Niels Bohr (1885-1962), Paul Dirac (1902-1984) e o próprio Heisenberg, um grupo acabou por aderir à concepção de que a nova física levava necessariamente ao abandono das concepções herdadas da mecânica clássica. Mais que isso: haveria uma profunda inadequação entre a linguagem ordinária, utilizada para descrever o mundo macrofísico, e os fenômenos quânticos. Entretanto, apesar de tal concepção ter se tornado quase hegemônica desde o nascimento da teoria quântica, surgiram opiniões discordantes que não aderiram a ela. Albert Einstein (1879-1955) e Erwin Schrödinger (1887-1961), dentre outros, demonstraram sérias restrições ao modo como o grupo capitaneado por Niels Bohr compreendia a teoria.

Essa situação provocou o que Karl Popper (1989) denominou de “cisma na física” no qual dois grupos se confrontaram:

A Interpretação Ortodoxa, com maior influência entre os físicos – a ponto de ser confundida, por vezes com a própria teoria quântica – foi o produto do trabalho de dois importantes centros de pesquisa: Göttingen na Alemanha, representada por Max Born (1882-1970) e Pascual Jordan (1902-1980), e Copenhague na Dinamarca, sob a liderança de Niels Bohr. Heisenberg serviu como o elo entre os dois pólos, especialmente na década de 1920, período áureo do desenvolvimento da teoria dos quanta. Esse grupo, em função de sua ascendência sobre a comunidade científica e a imagem de uma “escola” liderada sob os auspícios de Bohr, pôde passar a enganosa imagem de unidade de pensamento entre os supracitados personagens. Uma análise mais cuidadosa, contudo, revela uma série de matizes e discordâncias entre os formuladores da Interpretação de Copenhague – epíteto usual quando se trata da produção científica e filosófica desses pesquisadores. Se existe um denominador comum entre eles, seria o anti-realismo presente em todas as variantes individuais dessa corrente interpretativa.

O grupo “cismático”, por assim dizer, não crê que certos parâmetros, herdados das teorias clássicas – como o determinismo, por exemplo – possam ser abolidos da representação dos fenômenos atômicos. A correção empírica da teoria não era colocada em xeque, mas sim a descrição do mundo fornecida por ela. Einstein, em especial, insistiu na tese de que o indeterminismo encontrado na teoria quântica indicaria a incompletude dela, e até mesmo, o seu caráter provisório. Mas o que seria esse indeterminismo? Segundo Silvio Chibeni (1992, p. 147): “a mecânica quântica é uma teoria *indeterminista*, já que os resultados das observações futuras sobre o sistema nunca são todos determinados, mesmo quando presentemente conhecemos perfeitamente o estado quântico do sistema.”

As teses anti-realistas defendidas pelos proponentes da Interpretação de Copenhague podem ser sintetizadas no trecho a seguir, uma resposta às críticas de Einstein – expressos de modo contundente em um artigo apresentado em 1935¹. Nas palavras de Bohr (1981, pp. 98 e 99).

Na verdade a aparente contradição só põe a nu uma inadequação essencial da perspectiva costumeira da filosofia natural em fornecer uma descrição racional dos fenômenos físicos do tipo que estamos interessados na mecânica quântica. Com efeito, a interação finita entre objeto e agentes de medida, condicionada pela própria existência do quantum de ação, implica – devido à impossibilidade de controlar a reação provocada pelo objeto nos instrumentos de medida, se estes devem servir a seus objetivos – a necessidade de uma renúncia final às idéias clássicas de causalidade, e uma revisão radical de nossa atitude perante o problema da realidade física.

O cisma na física, então, estabelece-se em um nível filosófico, e não apenas físico. As diferenças apontadas podem ser descritas como uma divergência quando a ontologia que procede da teoria, ou seja, qual é o “mobiliário” fundamental que compõe o mundo.

Outro ponto, talvez o mais polêmico, refere-se ao papel da observação no estabelecimento dessa ontologia. Nesse caso, as diferenças entre os dois grupos situam-se no plano epistêmico. O grupo de Copenhague-Göttingen defenderia que o ato de medição provocaria distúrbios incontornáveis no sistema físico estudado. Nas palavras de Niels Bohr (1995, p. 113):

Verificou-se que, na descrição dos fenômenos quânticos, o papel da interação dos objetos com os instrumentos de medida era de especial importância (...) a própria descrição do funcionamento dos instrumentos de medida implica que qualquer interação destes instrumentos com os objetos quânticos, decorrente do quantum, é inseparável do fenômeno.

¹ EINSTEIN, PODOLKY & ROSEN, 1981.

Apesar do distúrbio interacional, por si mesmo, ser consistente com um realismo de cunho objetivista, para os opositores de Bohr, essa crença seria a porta de entrada de um subjetivismo que comprometeria a própria cientificidade da teoria quântica. Nas palavras do filósofo Mario Bunge (2000, pp. 211 e 212):

A doutrina de Copenhague especifica essa porção de filosofia empirista da seguinte maneira: “Não há eventos quânticos autônomos mas somente itens quânticos dependentes do observador: as operações de observação ou mensuração geram as entidades em determinados estados”. Mas essa declaração é inconsistente com a própria do físico quântico: de fato, a maioria dos problemas tratados no contexto da MQ diz respeito a sistemas físicos ou químicos que, por hipótese, não interagem com seus aparatos. (...) em suma, a doutrina de Copenhague é inconsistente do ponto de vista lógico e esta jaça deriva do fato de ela adotar uma filosofia subjetivista.

1.4 A filosofia em Heisenberg

Esse breve relato dos conflitos relacionados à mecânica quântica demonstra como o seu desenvolvimento foi marcado por inúmeros debates, não apenas limitados ao âmbito da física, mas também relacionados aos fundamentos da teoria. Daí o fato dos contendores envolvidos adentrarem em questões abertamente filosóficas. Heisenberg desempenhou um papel preponderante nessas duas frentes, tanto pela criação da mecânica matricial – primeira estrutura formal consistente da mecânica dos quanta – como pela elaboração, juntamente com outros cientistas do grupo de Göttingen e Copenhague, da Interpretação de Copenhague².

Heisenberg não se limitou a criar uma estrutura matemática compatível com os dados empíricos existentes. Não. Para ele era necessário enfrentar os problemas filosóficos levantados pela própria teoria:

A física moderna e, em especial, a teoria quântica descoberta por Planck, [...] levantou uma série de questões muito gerais, concernentes não só a problemas estritamente físicos, como também relacionados ao método das ciências naturais exatas e à natureza da matéria. Tais questões levaram os físicos a reconsiderar os problemas filosóficos que pareciam estar definitivamente resolvidos no estreito quadro da física clássica. (HEISENBERG, 2004, p. 10).

² A separação entre formalismo e interpretação utilizada no decorrer do texto é devedora da seguinte distinção, assumida por James Cushing (1994, pp. 09 e 10): “Uma teoria científica pode ser vista como possuindo dois componentes distintos: seu formalismo e sua interpretação. Para simplificar a questão, minhas observações serão restritas às teorias na física moderna. Aqui um formalismo significa uma série de regras de cálculo para fazer predições que podem ser comparadas com experimentos. (...) a interpretação física se refere ao que a teoria nos diz sobre a estrutura subjacente do fenômeno em causa i.e., correspondente ao mobiliário, à equipagem, do mundo – uma ontologia”.

Desse modo, a filosofia surge na obra de Heisenberg sempre relacionada à sua tentativa de esclarecer os problemas da teoria dos quanta. Os conceitos e sistemas filosóficos são instrumentos na tarefa, levada a diante por Heisenberg, de construir uma interpretação da mecânica quântica. O diálogo que o físico alemão estabelece com a filosofia antiga tem como assunto os dilemas da física moderna, não podendo ser avaliado com os mesmos critérios que poderiam ser utilizados caso se tratasse de obra de um filósofo ou historiador profissional. Por isso apenas quando se insere esse diálogo na atribulada história da construção e legitimação da teoria quântica e, conseqüentemente, da Interpretação de Copenhague, é que se pode evitar a mera repetição trivial dos argumentos apresentados pelo próprio Heisenberg.

A estrutura dos capítulos que se seguem é a seguinte:

Heisenberg e a história da física no século XX: vidas paralelas – é a descrição histórica e conceitual do desenvolvimento da teoria quântica. A narrativa inicia-se com a descoberta do quantum de ação por Max Planck em 1900 e prossegue até os anos 30, época do estabelecimento definitivo da mecânica quântica e da Interpretação de Copenhague. O texto se atém às características conceituais envolvidas na teoria, deixando de lado os aspectos do formalismo matemático, mas sem prejuízo para a compreensibilidade do assunto. A natureza deste capítulo justifica-se pela opção, já apontada, de contextualizar a abordagem que Heisenberg faz da filosofia antiga.

Filosofia e a história da ciência, segundo Werner Heisenberg – nesse capítulo analisa-se diretamente os usos que Heisenberg faz da filosofia antiga. A princípio, argumenta-se que a fonte do interesse de Heisenberg pela filosofia helênica deve-se a dois fatores: sua formação humanista baseada, desde sua juventude, no contato direto com os clássicos gregos e latinos, e a própria situação na qual se encontrava a física da época. A crise que a teoria quântica havia instaurado na física tornava o trato com questões filosóficas quase que inevitável para os físicos que trabalhassem, naquela circunstância, com o comportamento dos átomos.

O cerne do capítulo situa-se no exame da concepção de história da ciência defendida por Heisenberg. Para ele, existiriam duas grandes correntes filosóficas que configuraram as escolhas científicas dos últimos séculos: idealismo – de inspiração platônica – e o materialismo – nascido do atomismo de Leucipo e Demócrito. A filosofia moderna de inspiração cartesiana e a física do século XIX são tidas como progênie do materialismo, enquanto a teoria quântica, especialmente quando entendida por intermédio da Interpretação Ortodoxa, é vista uma revivescência do idealismo. Ou seja, para Heisenberg, a história da ciência não é obra de uma série de fatos e descobertas contingentes. As escolhas, teorias e

mesmo os objetos das ciências naturais estariam conformadas por duas tendências filosóficas que surgiram na Grécia Antiga e que ainda influenciam a física. Essa *filosofia da história*³ da ciência é a chave para se compreender o uso que o criador do princípio de incerteza faz da filosofia.

Materialismo, idealismo e os debates acerca da teoria quântica – a partir da clivagem entre idealismo e materialismo, Heisenberg classifica e qualifica as diferentes correntes interpretativas da teoria quântica. Ao legitimar a Interpretação de Copenhague, e desqualificar seus críticos, Heisenberg não se limitou a argumentos puramente científicos e recorreu sistematicamente em seus textos à filosofia grega. O impacto causado pelas novas interpretações que surgiram na década de 1950, especialmente a teoria de David Bohm, e a persistência de Einstein em suas críticas levou Heisenberg a uma reelaboração mais consistente de seus preceitos filosóficos. O exemplo mais notável dessa mudança é o uso da noção aristotélica de *dynamis* como instrumento conceitual para se abordar o problema do colapso do pacote de onda. Nesse capítulo, será possível observar como o físico germânico também lança mão dos conceitos aristotélicos de *morphé* e *hylé* quando explica as relações entre energia, matéria e as partículas elementares. Esse recurso surpreende pelas óbvias diferenças entre uma ciência altamente matematizada e abstrata, como é a teoria quântica, e a filosofia natural dos gregos, que praticamente ignorou a experimentação e o emprego de ferramentas matemáticas no tratamento dos fenômenos naturais.

Conclusão – Serão apresentados os resultados da análise sobre o objeto de pesquisa e poderão ser observados aspectos, tal como o fato de que, apesar do sem-número de referências aos mais variados pensadores, contradições, inconsistências e, por vezes, total ausência de rigor, é possível extrair importantes reflexões de Heisenberg acerca da natureza da matéria no contexto da teoria dos quanta.

1.5 Bibliografia, fontes e citações

Sobre as fontes primárias analisadas, faz-se necessário alguns esclarecimentos. Grande parte da obra de Heisenberg foi publicada em forma de artigos, normalmente transcrições de suas palestras, sendo periodicamente reunidos em livros. Mesmo o livro mais conhecido de

³ Segundo Karl Löwith “O termo ‘filosofia da história’ é empregado com o sentido de uma interpretação sistemática da história universal de acordo com um princípio segundo o qual os acontecimentos e sucessões históricos se unificam e dirigem para um sentido final” (s/d, p. 14). A concepção de Heisenberg sobre o desenvolvimento da história da ciência não apresenta “um sentido final”, mas é pautada “por um princípio comum”, no caso, dois, materialismo e idealismo.

Heisenberg, *Física e filosofia* (1995), é produto de uma série de palestras apresentadas por ele na Escócia na década de 1950. Para fins de citação, o ano de cada texto que aparece no corpo do dissertação e nas notas de rodapé é o da edição do livro consultado, não correspondendo à data de publicação original do texto em questão. As datas de publicação original estarão arroladas nas referências bibliográficas, de modo que, a cada entrada de um texto de Heisenberg, têm-se em primeiro lugar o texto utilizado na dissertação e logo após a referência completa da primeira edição da publicação original.

Quanto aos artigos produzidos pelos fundadores da teoria quântica nas primeiras décadas do século XX, todas as referências remetem à monumental coletânea editada por Bartel Leendert van der Waerden (1903 - 1996): *Sources of quantum theorie* (1967).

No que se refere aos textos clássicos, a referência adotada universalmente para cada autor acompanhará o trecho, e a tradução utilizada na dissertação será indicada no rodapé.

Por fim, todos os textos em língua estrangeira citados sofreram tradução do autor e são acompanhados de sua versão original como nota de rodapé.

2 HEISENBERG E A HISTÓRIA DA FÍSICA NO SÉCULO XX: VIDAS PARALELAS

Desde os *Principia Mathematica* de Isaac Newton (1642-1727), publicado em 1687, até as reformulações introduzidas por William R. Hamilton (1805-1865) no século XIX, a mecânica clássica apresentou em seu desenvolvimento uma série de mudanças que superaram o mero aperfeiçoamento dos instrumentos matemáticos nela utilizados. Contudo, e apesar do alto grau de abstração matemática atingida por esse ramo da física, desde o século XVIII com a publicação de *Méchanique Analytique (Mecânica analítica)* de Joseph Louis Lagrange (1736-1813), na qual “era banido qualquer recurso à geometria e às figuras” (PATY, 1995, p. 138), as noções fundamentais da física permaneciam intactas.

Nos primeiros anos do século XX uma série de descobertas teóricas e experimentais impôs graves restrições a tais noções tradicionais. Parte dos físicos começou a perceber que, em certas áreas, tanto a mecânica newtoniana⁴ como a eletrodinâmica clássica⁵ encontraram limites intransponíveis a sua aplicabilidade e poder preditivo. Essa mudança teve como marco inicial o trabalho de Max Planck (1858-1947) que, em dezembro de 1900, apresentou a solução de certos problemas relacionados à emissão e absorção da radiação térmica para a *Physikalische Gesellschaft* (Sociedade Alemã de Física). Tinha início um tortuoso percurso que levaria os físicos a admitirem que o mundo subatômico era regido por leis diversas daquelas do mundo macroscópico. A partir desse momento, a revolução que nasceu dos trabalhos de Albert Einstein, Werner Heisenberg, Niels Bohr, Paul Dirac, Wolfgang Pauli (1900-1958), Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, dentre outros, não se limitou apenas à recriação ou ao abandono de noções estritamente científicas. A ruptura instaurada era mais profunda, pois atingia os próprios fundamentos da física clássica.

De modo surpreendente, a teoria dos quanta, que nasceu dos trabalhos de Planck, utiliza conceitos que, além de não se coadunarem com os padrões estabelecidos pela física clássica, não encontram correspondentes em nossa experiência ordinária. Na verdade, era como se as noções de matéria, radiação, causalidade ou a distinção evidente entre partícula e onda – intuitivamente bem adaptadas à nossa experiência cotidiana – perdessem seu caráter de

⁴ “Mecânica baseada nas leis de Newton e que pode ser aplicada a sistemas físicos em que é possível desprezar efeitos quânticos” (RODITI, 2005, p. 148).

⁵ “Formulação da eletrodinâmica descrita pelas equações de Maxwell” (RODITI, 2005, p. 75).

familiaridade e não se aplicassem à escala dos objetos subatômicos. Nas palavras de Michel Paty (1995, pp.139 e 140):

Construídos, criticados, reconstruídos, providos de uma formulação abstrata, os conceitos da física clássica possuíam a faculdade de ser, em seguida, rapidamente reinvestidos, com todas as aparências do “natural”, em uma física adaptada à experiência familiar do mundo sensível. Não é o que acontece efetivamente com essas noções, ainda que muito matematizadas, que são a velocidade, a aceleração, a atração, o potencial, o campo, e mesmo a temperatura ou a entropia, que se tornaram tão usuais em nosso universo cotidiano que servem de referência analógica para as considerações de outras ciências? (...) a física quântica aparece, ao contrário, relativa a um domínio completamente diferente.

2.1 O início da teoria quântica: Max Planck e Albert Einstein

A história progressiva à descoberta de Planck inicia-se no século XIX, quando a transmissão do calor começou a ser entendida também como um processo de radiação, assim como a luz. O físico alemão Gustav R. Kirchhoff (1824-1887) formulou as leis sobre o fenômeno da radiação térmica, mais especificamente sobre as relações entre a emissão e a recepção do calor por um corpo aquecido. Esse pesquisador cunhou a expressão *corpo negro*, um “corpo hipotético que absorve totalmente qualquer radiação que sobre ele incida e para qual nenhuma radiação é refletida, permanecendo em equilíbrio em relação à radiação incidente e a por ele emitida a qualquer temperatura dada” (RODITI, 2005, p. 53). Um corpo negro seria, então, um perfeito emissor e um perfeito receptor de calor. Apesar de ser “um corpo hipotético”, é possível a construção de um artefato com características próximas a de um corpo negro. Ele pode ser uma cavidade com uma abertura muito pequena, como por exemplo, a que se observa nos fornos de uma indústria siderúrgica. Este fato tornou o corpo negro a principal fonte de dados experimentais de radiação térmica, especialmente no que diz respeito à análise do espectro dessa radiação.

Contudo, as duas leis que pretendiam descrever a função entre a intensidade da radiação emitida por um corpo negro e a frequência para diferentes temperaturas entraram em completo desacordo com os dados experimentais disponíveis. A lei de Wien, formulada pelo físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), concordava com os dados empíricos apenas para altas frequências. Já a fórmula criada por John Strutt (1824-1919), conhecido como Lorde Rayleigh, e corrigido em 1905 por James Jeans (1877-1946) também não se adequava a todo o espectro da radiação do corpo negro, concordando apenas com os dados experimentais para baixas frequências. Na faixa das frequências mais altas, as previsões se chocavam diretamente com os resultados experimentais, pois, segundo a fórmula, deveria haver uma emissão de

quantidade infinita de energia, fenômeno denominado de “catástrofe ultravioleta”⁶. E, como agravante, ambas partilhavam suas bases na mecânica clássica, na mecânica estatística e na teoria eletromagnética.

A partir dessa situação e dos dados experimentais levantados por Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927), publicados em 1900, Max Planck, sucessor de Kirchhoff na Universidade de Berlim, iniciou a elaboração de uma expressão que, segundo ele mesmo, seria uma versão melhorada da Lei de Wien (KRAGH, 2002, p. 61), “uma fórmula de interpolação entre o comportamento limite da radiação em duas condições contrárias (altas frequências de um lado, baixas frequências e altas temperaturas do outro)” (PATY, 1995, p. 92). Essa formula era adequada aos dados experimentais, mas, para ele, não era teoricamente satisfatória.

Em um artigo apresentado à Academia de Ciências de Berlim, em 14 de dezembro de 1900, Planck apresentou uma hipótese *ad hoc* que explicava a sua nova lei de radiação. Essa hipótese, contrária a toda a física da época, presumia que a radiação tinha que ser emitida em um número inteiro de “pacotes” de energia, os quanta, no qual a energia de cada quantum é dada por uma nova constante física, h , que é igual a $6,63 \times 10^{-34}$ J.s. Mais importante era a impressionante acurácia da teoria frente aos dados experimentais. Entretanto, a *descontinuidade* na emissão e absorção de radiação térmica foi o primeira indicação de que a física clássica apresentava graves limitações em sua capacidade de entender certos fenômenos.⁷ Para Planck, a princípio, a hipótese quântica fora apenas um artifício matemático, e não uma descrição da emissão da radiação térmica (PATY, 1995, p. 91), considerada por ele como “simplesmente um ato de desespero” depois de “seis anos lutando com o problema de equilíbrio entre radiação e matéria”⁸ (KRAGH, 2002, p. 62).

Segundo Helge Kragh (2002, p. 64), para Planck e seus contemporâneos, a descontinuidade não merecia nenhuma atenção séria. Conseqüentemente, nos cinco primeiros anos do século, imperou “o mais completo silêncio”⁹ (KRAGH, 2002, p. 63) sobre a hipótese dos quanta, e, em contrapartida, a lei de radiação foi rapidamente adotada pela

⁶ Termo introduzido por Paul Ehrenfest em 1911 (KRAGH, 2002, p. 64).

⁷ Segundo Michel Paty (1995, p. 90), “a idéia de atomismo, no que se refere aos corpos materiais ponderáveis, era aceitável no quadro das teorias clássicas, e a teoria cinética se apresentava, precisamente, como a teoria que permitia a conciliação dos pontos de vista do atomismo e da termodinâmica, aparecendo essa última como a resultante média, visível, dos fenômenos moleculares e atômicos. Bem diferente era o caso da radiação: a teoria eletromagnética de Maxwell não dava margem alguma a uma descontinuidade qualquer – ou atomismo – da energia”.

⁸ “To summarize, all what happened can be described as simply an act of desperation... [B]y then I had been wrestling unsuccessfully for six years (since 1894) with the problem of equilibrium between radiation and matter”.

⁹ “During the first five years of the century, there was almost complete silence about the quantum hypothesis”.

comunidade científica. Durante anos, Planck esperou por uma explicação adequada para a radiação térmica mais compatível com a mecânica e eletrodinâmicas clássicas, na qual a descontinuidade fosse uma característica dos osciladores¹⁰ atômicos e não da própria energia. Apenas em 1908, Planck se convenceu que o quantum de ação era um fenômeno além da compreensão da física clássica (KRAGH, 2002, pp. 64 e 65).

O próximo passo seria dado pelo jovem Albert Einstein, então com 26 anos. Em um dos seus memoráveis artigos publicados em 1905 – o *annus mirabilis* de Einstein – ele propôs a generalização do conceito de quantum, utilizando-o na descrição do chamado efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico é o fenômeno de emissão de elétrons a partir de superfícies metálicas quando estas são irradiadas por luz ou raios ultravioletas. Um quantum de luz, neste caso, é completamente absorvido por um único elétron, semelhante a uma colisão entre partículas e, por isso, o elétron no metal fica com uma energia adicional (BOHM, 1951, p. 23). No entanto, a característica do efeito fotoelétrico que destoava das previsões das equações de Maxwell era o fato de que a energia cinética dos elétrons emitidos pelo metal era proporcional à frequência da luz irradiada e não à intensidade da radiação, conforme seria descrito pelo modelo ondulatório da luz. Segundo as palavras do próprio Einstein no artigo de 1905, “Sobre um Ponto de Vista Heurístico a Respeito da Produção e da Transformação da Luz” (“Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt”), a solução seria encontrada apenas quando se adotasse a hipótese quântica de Planck para a luz:

A idéia usual, de que a energia de luz é distribuída uniformemente pelo espaço em que se propaga, encontra-se em grandes dificuldades quando tenta explicar o efeito fotoelétrico, como foi demonstrado no artigo pioneiro do Sr. Lenard¹¹. De acordo com a idéia de que a luz incidente consiste de quanta de energia (...) a produção de raios catódicos pode ser entendida do seguinte modo: os quanta de energia penetram na superfície do material e sua energia é, parcialmente, transformada em energia cinética dos elétrons. A imagem mais simples é aquela em que um quantum de luz transfere toda a sua energia a um único elétron¹² (EINSTEIN, 1967, p. 104).

¹⁰ De acordo com a física clássica, a emissão de radiação eletromagnética estava ligada a algo que oscila, por isso, o termo “oscilador” ligado ao “átomo radiante” que ao se agitar origina a radiação eletromagnética que transmite o calor (GUILLEMIN, 2003, p. 49).

¹¹ Philip Eduard Anton Lenard (1862-1947): físico alemão que recebeu, em 1905, o Prêmio Nobel de Física por suas pesquisas sobre os raios catódicos. Estudou também o efeito fotoelétrico, percebendo que o valor do comprimento de onda da luz utilizada modificava a velocidade de emissão dos elétrons. Foi um dos principais propagandistas de uma “ciência ariana” com bases experimentais.

¹² “The usual idea that the energy of light is continuously distributed over the space through which it travels meets with especially great difficulties when one tries to explain photo-electric phenomena, as was shown in the pioneering paper by Mr. Lenard. According to the idea that the incident light consists of energy quanta with energy $R\beta\nu/N$, one can picture the production of cathode rays by light as follows. Energy quanta penetrate into a surface layer of the body, and their energy is at least partly transformed into electron kinetic energy. The

Planck, ao introduzir os quanta na descrição das propriedades do espectro da radiação, optou pela quantização aplicada aos osciladores materiais, o que não atingia a própria radiação¹³. O avanço dado por Einstein é declarado logo no início do artigo, onde se afirma peremptoriamente que “de acordo com a pressuposição aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia¹⁴” (EINSTEIN, 1967, p. 92).

A história das teorias sobre a natureza da luz, desde a época de Newton e Christiaan Huygens (1629-1695), mostra uma disputa contínua entre concepções corpusculares e ondulatórias. No início do século XIX, a luz e outras formas de radiação eletromagnética eram entendidas como ondas e a matéria, por sua vez, seria composta de partículas. Com a formulação das equações de Maxwell que, segundo Emilio Segrè (1987, p. 85), “pareciam quase sobre-humanas em sua força e generalidade”, todos os fenômenos da luz conhecidos foram explicados pela interpretação ondulatória da luz. Deste modo, o conceito de luz como onda eletromagnética contínua diferia radicalmente da transmissão de partes descontínuas de energia proposta por Einstein. Não surpreende, então, o fato de Einstein considerar o artigo sobre o efeito fotoelétrico como sua “única contribuição (...) que ele mesmo chamou de revolucionária” (PAIS, 1995, p. 445). Em função desse caráter revolucionário, os experimentos realizados em 1916 pelo físico americano Robert Millikan (1868-1953) foram vistos pela maioria da comunidade de físicos como uma “confirmação da equação de Einstein e não de sua teoria” que, em contrapartida, “ou era ignorada ou rejeitada igualmente por físicos experimentais e teóricos¹⁵” (KRAGH, 2002, p. 68). Parecia óbvio a todos que a imagem ondulatória da radiação eletromagnética não se harmonizava com os princípios da hipótese quântica. O próprio Einstein levava tal impasse em conta e, até 1916, considerou o

simplest picture is that a light quantum transfers all of its energy to a single electron; we shall assume that happens”.

¹³ Abraham Pais (1995, p. 455) ao se questionar sobre os motivos da resistência às idéias de Einstein acerca dos quanta terem sido bem maiores do que as que sofreram as de Planck, argumenta que “em contrapartida, quando Einstein propôs o *quantum* de luz, ousou mexer nas equações de Maxwell para campos livres, consideradas, com boas razões, como muito bem compreendidas. Por conseguinte, pareceu menos repugnante aceitar os devaneios de Planck do que os de Einstein”.

¹⁴ “According to the assumption considered here, when a light ray starting from a point is propagated, the energy is not continuously distributed over an ever increasing volume, but it consists of a finite number of energy quanta, localized in space, which move without being divided and which can be absorbed or emitted only as a whole”.

¹⁵ “What Millikan had confirmed was Einstein’s equation, not his theory, and there was no one-to-one relationship between theory and equation. [...] This is what happened. Einstein’s theory of light quanta was either ignored or rejected by experimenters and theorists alike”.

quantum de luz um conceito provisório, numa, segundo Michel Paty (1995, p. 98), “posição de espera heurística”.

2.2 A “antiga” teoria quântica ou o átomo segundo Bohr e Einstein

A postura de Einstein frente à natureza descontínua da luz só se modificou – deixando de lado sua espera heurística – depois dos artigos do físico dinamarquês Niels Bohr, publicados entre 1913 e 1915, que apresentavam um modelo estável da estrutura atômica do hidrogênio. A grande realização destes trabalhos seria sintetizar o modelo atômico de Ernest Rutherford (1871-1937) com a hipótese quântica de Planck (VAN DER WAERDEN, 1967, p. 2).

Em 1911, Rutherford, juntamente com seus colaboradores Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), elaborou um experimento que consistia no bombardeio por partículas α (na verdade, núcleos do átomo de hélio) de uma fina placa de metal. Diante do resultado, o espalhamento das partículas α , Rutherford propôs um modelo para o átomo no qual a carga positiva ficava concentrada num pequeno núcleo onde se localizava a maior parte da massa atômica. Os elétrons, portadores de carga negativa, orbitavam em torno do núcleo, como planetas em torno do Sol. Assim, além de explicar os resultados do experimento com as partículas, o modelo planetário justificaria, a princípio, a estabilidade dos átomos, pois a relação dinâmica entre núcleo e elétrons seria análoga à do sistema solar. A interação entre os elétrons das camadas mais externas dos átomos explicava a formação de moléculas por átomos de diferentes substâncias.

Mas o que parecia ser uma solução, mostrou-se a maior falha do modelo: a sua efetiva incompatibilidade com a própria estabilidade dos átomos. De fato, “desde 1905, [Wilhelm] Wien demonstrara que um elétron girando em torno de um centro, que irradia energia, cairia inevitavelmente sobre esse centro, e que tal configuração seria instável” (PATY, 1995, p. 116). Logo, a posição estável dos elétrons não poderia ser deduzida a partir da eletrodinâmica clássica, um dos pilares mais bem assentados da física até aquele momento.

Rutherford, conhecido na história da física pelo seu trabalho como físico experimental, distanciava-se da física teórica desenvolvida pela escola germânica (SEGRÈ, 1987, p. 117). Coube a Niels Bohr, que possuía interesses tanto na física experimental como na teórica, a resolução dos impasses levantados pela proposta de Rutherford, com quem trabalhava desde 1912, ao formular um modelo quântico do átomo de hidrogênio em 1913.

Segundo Victor Guillemin (2003, p. 56), quando Bohr “chegou ao laboratório de Rutherford, as novas idéias sobre fótons e energia quantizada ainda estavam vívidas em sua mente¹⁶”. Para evitar as contradições do modelo planetário, Bohr recorreu às concepções quânticas de Planck. Mas a síntese entre esses dois campos de pesquisa só foi possível após Bohr tomar ciência do espectro do átomo de hidrogênio e da expressão matemática que os descrevia: a fórmula de Balmer¹⁷. Emilio Segrè (1987, p. 125) afirmou que ela havia se tornado a “pedra-de-toque para qualquer teoria sobre o átomo de hidrogênio” e era “obedecida com grande precisão pelo espectro de linhas de hidrogênio”.

Os elétrons, assim como no modelo proposto por Rutherford, estariam localizados em órbitas ao redor do núcleo – no caso órbitas circulares com o núcleo positivo em um dos focos. Cada uma delas é chamada de estado estacionário, no qual os elétrons não irradiariam energia. A emissão ou absorção de energia por um sistema atômico ocorre quando o elétron efetua a passagem, diga-se, uma passagem descontínua de uma órbita a outra; em outras palavras, um salto de um estado estacionário a outro. A frequência dos fótons emitidos ou absorvidos na transição entre uma órbita e outra é dada pela seguinte relação:

$$E' - E'' = h\nu$$

No qual h é a constante de Planck e E' e E'' são os valores de energia nos dois estados estacionários considerados (VAN DER WAERDEN, 1967, pp. 97 e 98). Quando um átomo recebia ou emitia energia, isto ocorria sob a forma quantizada, ou seja, em pacotes, conforme a teoria de Planck. Por isso os elétrons só poderiam passar de modo descontínuo de uma órbita estacionária a outra, pois a energia recebida era múltiplos inteiros da constante de Planck. A teoria de Bohr, além de ter resolvido o problema da estabilidade do átomo de hidrogênio, adequava-se à descontinuidade expressa pela fórmula de Balmer e também previa novas séries espectrais, além de ter fornecido um sólido fundamento à explicação de inúmeras propriedades químicas. Mas, para outros átomos, a teoria não era tão precisa. Posteriormente,

¹⁶ “When he [Bohr] arrived at Rutherford’s laboratory, the new ideas of photons and quantization of energy were fresh and vivid in his mind”.

¹⁷ A espectroscopia é a “investigação e análise de substâncias ou sistemas físicos pela interação desses com radiação eletromagnética ou pela emissão desta radiação, e que utiliza um conjunto de técnicas e métodos que se baseiam na obtenção de espectros de emissão e absorção dessas radiações eletromagnéticas para diferentes frequências” (RODITI, 2005, p.86). Os dados trabalhados por Bohr eram derivados da espectroscopia, que tem as suas raízes no fenômeno da dispersão da luz com um prisma, descoberto por Newton, e que foi se aperfeiçoando até o século XIX com o desenvolvimento do espectroscópio. A fórmula de Balmer descreve empiricamente o espectro do átomo de hidrogênio, mas não fornecia nenhum tipo de justificativa da relação entre a própria fórmula, a estrutura do átomo de hidrogênio e os dados espectroscópicos.

em 1916, ela foi aperfeiçoada por Arnold Sommerfeld (1868-1951) que introduziu a relatividade especial na mecânica do átomo. Esse desenvolvimento permitiu uma representação mais detalhada de espectros atômicos mais complexos, inclusive uma explicação para a estrutura fina¹⁸ observada nas raias de espectros atômicos, cujo fenômeno não havia sido contemplado pela teoria de Bohr.

Contudo, as idéias postuladas pelo modelo de Bohr contradiziam frontalmente a física clássica, chegando às raias da irracionalidade e do absurdo do ponto de vista da mecânica newtoniana e da eletrodinâmica clássica (HOLTON, 1984, p. 56). Anos depois, Einstein declarou que a descoberta de Bohr sobre as leis das linhas espectrais e camadas eletrônicas era “um milagre”, pois se baseava em fundamento “inseguro e contraditório” (SEGRÈ, 1987, p. 127).

Essa série de contradições abriu caminho para novas dúvidas. Não era conhecido o que ocorria, por exemplo, quando um elétron passava de um estado estacionário a outro, ou, não se sabia porque um átomo não emitia radiação quando estava em um estado estacionário. Uma das críticas mais incisivas às idéias de Bohr foi dada pelo próprio Rutherford ao argumentar que “um elétron tinha que saber de antemão para que órbita saltar” (SEGRÈ, 1987, p. 131). Parte da comunidade científica, especialmente os de uma geração anterior, como Lord Rayleigh, manteve uma profunda suspeita diante da nova física. Alguns, como Otto Stern (1888-1969), chegaram a afirmar que, caso as idéias de Bohr estivessem corretas, abandonariam a física¹⁹ (SEGRÈ, 1987, p. 133). Em contrapartida, a reação de Einstein foi de entusiasmo. Não por acaso, ele parte da teoria de Bohr para deduzir a fórmula de Planck em 1917 no artigo “Sobre a Teoria Quântica da Radiação” (“Zur Quantentheorie der Strahlung”) (VAN DER WAERDEN, 1967, p. 63). Segundo Michel Paty (1995, p. 99):

Esse artigo de Einstein representa a quintessência daquilo a que chegara a então teoria quântica. Não é apenas a reunião da hipótese do quantum de ação de Planck, do conceito de quantum de energia e de radiação de Einstein, e dos espectros quantificados dos níveis atômicos de Bohr, mas sua ligação lógica, expressa numa síntese em profundidade que é aqui importante. A fórmula de Planck aí se encontra *demonstrada*: a relação entre a radiação e as moléculas emissoras e absorventes é, com efeito, compreendida em termos de um mecanismo do qual o estabelecimento do equilíbrio pode ser deduzido.

¹⁸ “Diferença observada, com instrumentos de alta resolução, nas raias de espectros atômicos ou moleculares, devida às transições associadas aos diferentes estados vibracionais ou rotacionais e vista como um desdobramento de uma raia espectral ou de uma banda em outras raias” (RODITI, 2005, p. 88).

¹⁹ Uma experiência realizada pelo próprio Otto Stern e Walter Gerlach, em 1921, na Universidade de Frankfurt, acabou servindo como mais uma confirmação experimental das idéias de Bohr (PESSOA Jr., 2005, pp. 39-41).

No artigo, os fenômenos eletromagnéticos são vistos a partir de leis de natureza estatística, apresentando um tratamento probabilístico da emissão de luz originada de um átomo, o que diferia completamente do enfoque anterior baseado nas equações de Maxwell. Os processos de emissão e de absorção de energia pelos átomos, segundo Einstein, não ocorreriam apenas quando há radiação externa, mas também de forma espontânea e, assim como no caso das desintegrações radioativas, com certa probabilidade²⁰. Desse modo, inseria-se na descrição do átomo um caráter estatístico e não determinista (VAN DER WAERDEN, 1967, pp. 3 e 4). Além disso, o artigo assumia que a emissão de radiação não era simétrica e sim direcional e dotada de energia e momento linear²¹, o que confirmaria o duplo aspecto da luz, corpuscular e ondulatório. O quantum de luz, ou seja, o quantum de energia adquiria por completo o *status* de corpúsculo, ou fóton, conforme seria posteriormente denominado.²²

Para o próprio Einstein estava claro que a existência dos quanta era algo estabelecido e que a cuidadosa “postura heurística” tomada no artigo de 1905 poderia ser abandonada. Entretanto, as novas propriedades dos processos elementares assumidas pelo artigo de 1917, além de exigir a formulação de uma nova teoria da radiação, padeciam, segundo Einstein, de duas fraquezas: não traziam nenhuma conexão com a teoria ondulatória e deixavam “ao ‘acaso’ a duração e a direção dos processos elementares²³” (VAN DER WAERDEN, 1967, p. 76). São os primeiros sinais do “desconforto” diante das implicações da teoria quântica. Ao afirmar que Einstein relacionara a emissão de fótons às transformações radioativas espontâneas, Abraham Pais (1995, pp. 488 e 489) comenta que:

ninguém antes dele [Einstein], em 1917, viu tão claramente a profundidade da crise conceitual gerada pela ocorrência dos processos espontâneos com um bem definido tempo de vida. Einstein expressou isso em termos proféticos: ‘[essas propriedades dos processos elementares], tornam quase que inevitável a formulação de uma verdadeira teoria quântica da radiação’.

No mesmo artigo, Einstein, após revelar seu desconforto para com as duas fraquezas, afirma que “apesar de tudo, tenho plena confiança no caminho que foi traçado” (PAIS, 1995,

²⁰ Segundo Daniel Kleppner (2005, p. 89), “A suposição mais radical foi que se pode descrever a dinâmica de átomos em termos de probabilidades. Um ponto de vista probabilístico é inerente ao conceito de taxa de emissão espontânea. Einstein reconheceu as implicações desta linguagem e justificou sua suposição de taxa de emissão espontânea declarando que ‘a lei estatística considerada aqui corresponde à lei de uma reação radioativa, pressupondo-se que no processo elementar de tal reação apenas raios γ sejam emitidos”.

²¹ “Em mecânica clássica, produto da massa inercial de um corpo por sua velocidade (...) é uma quantidade vetorial (com direção e sentido da velocidade)” (RODITI, 2005, p. 155).

²² O termo “fóton” surgiu em 1926 no título de um artigo do físico Gilbert Lewis.

²³ “The weakness of the theory lies on the one hand in the fact that it does not get us any closer to making the connection with wave theory; on the other, that it leaves the duration and direction of elementary process to ‘chance’”.

p. 489). Ou seja, apesar de seu otimismo, já antevia todas as dificuldades que ele, tão apegado à causalidade, enfrentaria com os futuros desenvolvimentos do caminho que levaria até à mecânica quântica.

2.3 O Princípio de Correspondência e o colapso da antiga teoria quântica

Nos últimos anos da década de 1910, o modelo de Bohr foi aperfeiçoado com a introdução da relatividade no tratamento dos elétrons e dos números quânticos²⁴. Mas era claro para a comunidade de físicos que trabalhavam com a teoria quântica que a relação desta com a física clássica era, no mínimo, ambígua. Algumas características do átomo de Bohr permaneciam atreladas às teorias clássicas, mas outras, como a quantização das órbitas eletrônicas e os saltos quânticos, não se coadunavam com nada anteriormente visto na física. A dúvida mais geral seria a de como distinguir as fronteiras de aplicabilidade entre uma descrição clássica e uma descrição quântica na análise de um sistema físico. Heisenberg (1995, p. 32) fez um listagem das questões suscitadas pela teoria de Bohr:

Como pode ser que a mesma radiação que produz figuras de interferência e que, portanto, deve consistir de ondas também produza o efeito fotoelétrico e deva, conseqüentemente, consistir de partículas em movimento? E, também, como pode ser que a frequência do elétron, em seu movimento orbital no átomo, não coincida com a frequência da radiação emitida?

Segundo Mara Beller (1999, p. 246), em um problema dessa espécie, um físico matemático recorreria a instrumentos matemáticos e físicos como operadores, autovalores, observáveis, projeções no espaço de Hilbert e suas conexões com os dados empíricos. Mas, Bohr, a partir dessa época, tentava clarificar os problemas da teoria quântica de modo mais conceitual, menos apegado ao formalismo matemático. “Para Bohr, como para um filósofo natural pré-newtoniano, ‘qualquer explicação ou análise significa apenas o uso de analogias a partir da simples experiência’”²⁵ (BELLER, 1999, p. 246).

O primeiro exemplo desse modo de fazer física é encontrado no princípio de correspondência. Segundo ele, os resultados apresentados pelas teorias clássica e quântica devem divergir para números quânticos pequenos – o raio da órbita do átomo de hidrogênio

²⁴ “Para um sistema quântico, um número que identifica um dos possíveis valores de uma grandeza física observável. O estado de um sistema quântico fica caracterizado pelo conjunto de seus números quânticos” (RODITI, 2005, p. 163).

²⁵ “For Bohr, as for a pre-Newtonian natural philosopher, ‘any explanation or analysis only means to use analogies from simple experience’”.

no estado fundamental, por exemplo – e concordarem nos casos de números quânticos grandes. Segundo Michel Paty (1995, p. 141),

O princípio de correspondência é precisamente o que permite expressar a passagem necessária das leis quânticas às leis clássicas, a continuidade, passagem ao limite do microcosmos ao macrocosmos. Para os grandes números de corpos, as grandes dimensões, os “grandes números quânticos”, o caráter discreto do quantum se desvanece, as trajetórias – “indeterminadas” em razão das relações de Heisenberg –, de vagas que eram, redesenham-se nitidamente, os conceitos clássicos tornam-se novamente adequados, a “objetividade” no sentido clássico retoma seus direitos, as ondas são de novo verdadeiramente ondas, e o mesmo acontece com os corpúsculos.

Um exemplo experimental da aplicação do princípio de correspondência é dado por Heisenberg (1995, p. 34):

Na teoria de Bohr, a discrepância observada entre as frequências calculadas dos elétrons e da radiação emitida teve que ser interpretada como uma limitação do conceito de órbita eletrônica, conceito que já levantara suspeitas desde o começo. Todavia, para os estados de energia mais alta, os elétrons mover-se-iam a uma grande distância do núcleo da mesma maneira como o fazem quando os vemos atravessar uma câmara de Wilson. Fazia então sentido falar-se em órbitas eletrônicas. Foi, assim, deveras satisfatória a constatação de que, para as órbitas mais exteriores, as frequências da radiação emitida se aproximavam cada vez mais da frequência orbital e de seus harmônicos mais altos.

A importância histórica do princípio de correspondência decorre do fato de haver conformado as investigações acerca da interação entre radiação e matéria de 1919 até o surgimento da mecânica quântica em 1925. Seria um modo de Bohr conciliar a mecânica clássica com a quântica, no qual ambas se sobrepõem em casos limítrofes. Em uma carta dirigida a A.A. Michelson (1852-1931), em 1924, Bohr chega a afirmar que “de fato, baseando-se no princípio da correspondência, parece possível conectar os processos descontínuos que ocorrem nos átomos com o caráter contínuo no campo da radiação de certa maneira mais adequada do que até agora fora percebido” (HOLTON, 1984, p. 57).

Essa tentativa de reconciliação entre os dois campos da física seria deixada de lado depois. Vários físicos, Sommerfeld e Pauli dentre eles, apresentaram restrições ao papel pretensamente fundamental do princípio de correspondência (BELLER, 1999, p. 56). A própria constituição de uma mecânica propriamente quântica, na qual “se constroem operadores, correspondendo a quantidades que se revelam, tanto quanto as outras, ‘observáveis’, mas que não possuem nenhum análogo clássico” (PATY, 1995, p. 142), contribuiu para um uso cada vez mais atenuado do princípio de correspondência.

Para Einstein, conforme visto anteriormente²⁶, era inevitável a formulação de uma nova teoria da radiação devido a introdução do “acaso” na descrição dos processos atômicos. Mas essa proposta era acompanhada pela percepção que a teoria quântica havia lançado o física numa crise. Essa percepção não ficou restrita a Einstein. Inúmeros físicos, tais como Hendrik A. Lorentz (1853-1928) e o próprio Max Planck, por exemplo, formados intelectualmente na *Belle Époque* da física clássica, partilhavam tal sensação de mal-estar devido ao acúmulo de dificuldades, especialmente quanto às trajetórias do elétron dentro do átomo. Ainda fazia sentido acreditar na existência de órbitas eletrônicas? Segundo Mara Beller (1999, p. 53),

Quando os físicos questionavam a adequação das noções de orbitais, suas dúvidas se detinham mais nas falhas teóricas das órbitas do que na impossibilidade delas serem observadas experimentalmente. As suposições acerca das órbitas falharam no domínio da interação entre luz e matéria (...) além disso, no domínio da constituição de átomos e moléculas (com todo o preço de suposições *ad hoc*), todas as modificações de modelos mecânicos de órbitas falharam em fazer justiça à descrição dos eventos dada pelos experimentos²⁷.

O passo decisivo na construção de uma nova teoria física que superasse os desafios colocados pelos fenômenos quânticos foi dado por uma geração que, além de ter sofrido os abalos de uma guerra mundial, já havia nascido no contexto de uma física transformada pela teoria da relatividade e pela descoberta do quantum por Planck no início do século XX. Werner Heisenberg foi um dos mais brilhantes integrantes dessa nova geração.

2.4 Os anos de aprendizagem do jovem Werner Heisenberg

“Você está completamente perdido para a matemática”. Com essa frase, o professor de matemática da Universidade de Munique, Ferdinand von Lindemann (1852-1939), orientador de David Hilbert (1862-1943) e famoso no mundo da matemática por ter solucionado o problema da quadratura do círculo, finalizou uma breve e desastrosa entrevista com Werner Karl Heisenberg. A entrevista, marcada pelo pai de Heisenberg, August Heisenberg (1831-1913) – professor da cadeira de Grego Bizantino na Universidade de Munique – tinha como

²⁶ Supra p. 24.

²⁷ “When physicists questioned the adequacy of orbital notions, their doubts had more to do with the theoretical failure of orbits than with their experimental unobservability. Orbital assumption failed in the domain of the interaction of light with matter; they could not be reconciled with the fact that dispersion of light occurs with spectroscopic rather than orbital mechanical frequencies. Moreover, in the domain of the constitution of atoms and molecules (with full price of *ad hoc* assumptions), all modifications of orbital mechanical models failed to do justice to the experimental state affairs”.

assunto a possibilidade do jovem Werner, recém egresso da escola secundária, frequentar os seminários de Lindemann. Quando perguntado sobre quais livros havia lido recentemente, Heisenberg mencionou dois: *Zahlentheorie (Teoria dos números, de 1892)*, de Paul Bachmann (1837-1920), e *Raum-Zeit-Materie (Espaço, tempo e matéria)*, do matemático alemão Hermann Weyl (1885-1955), publicado em 1918. A obra de Weyl, uma das primeiras tentativas em se unificar eletrodinâmica e a relatividade geral, foi tão importante para Heisenberg ao ponto dele afirmar que, “embora não a conseguisse entender por completo”, ela o ajudou a confirmar “a decisão anterior de estudar matemática na Universidade de Munique” (HEISENBERG, 1996, p. 25). Mas, assim que o livro de Weyl foi mencionado, Lindemann terminou a entrevista.

Ao conversar com seu pai, o decepcionado Werner Heisenberg recebeu como conselho estudar física matemática. Uma nova entrevista surgiu, agora com um amigo de juventude de August, Arnold Sommerfeld. Ele, como visto anteriormente, aperfeiçoou o modelo atômico de Bohr, e seu livro *Atombau und Spektrallinien (Estrutura atômica e linhas espectrais de 1919)* foi, durante muito tempo, o texto de referência para toda uma geração de físicos interessados na teoria atômica. Sommerfeld também ficou notório por seu genuíno interesse na formação de novos físicos²⁸. De modo que não surpreende que a acolhida dada por ele a Heisenberg tenha sido bem diferente daquela oferecida por Lindemann.

Ao ficar ciente das últimas leituras de Heisenberg, Sommerfeld reagiu de maneira cuidadosa e simpática: “você está sendo muito exigente, não pode começar pela parte mais difícil e esperar que a mais fácil caia em seu colo”. A orientação dada a Heisenberg foi que devesse iniciar seus estudos de modo “modesto, mas minucioso, da física tradicional”. “O senhor deve lembrar-se do que disse Schiller sobre Kant e seus intérpretes: ‘quando os reis constroem, os carroceiros têm mais trabalho’”. Logo após, Sommerfeld deu ao jovem neófito sugestões de estudo, prometendo-lhe um pequeno problema relacionado com a Física Atômica, de modo que “assim ficava decidida minha participação na escola de Sommerfeld nos anos seguintes”, remata Heisenberg a narração de sua entrada no mundo acadêmico (HEISENBERG, 1996, pp. 26 e 27). Vale destacar que na Alemanha da época, o seminário de Sommerfeld era um dos poucos onde se pesquisava a teoria quântica.

²⁸ Em uma carta dirigida a Sommerfeld, Einstein tece inúmeros elogios a ele: “O que especialmente me impressiona é que você tenha produzido tantos jovens talentos como se fosse mágica. Isso é algo único” (“What I particularly admire about [...] is the fact that you have produced so many talented young-scientists as if by magic. That is really unique”) (HERMANN, 1976, p. 15). Isso pode ser confirmado observando-se que alguns dos físicos mais importantes do século XX que foram orientados por Sommerfeld: Peter Debye (1884-1966), Alfred Landé (1888-1976), Wolfgang Pauli, Hans Bethe (1906-2005) e, claro, Heisenberg.

Dias depois desse encontro, Heisenberg foi apresentado a Wolfgang Pauli que acabaria se tornando um de seus principais interlocutores – um “crítico severo” nas palavras do próprio Heisenberg – e amigo pessoal. Sommerfeld o descreveu como um de seus alunos mais talentosos, com quem Heisenberg poderia aprender muito. Pauli, mesmo sendo apenas um ano e meio mais velho que Heisenberg, já se encontrava no quinto semestre do curso, sendo designado por Sommerfeld à função de aluno assistente. Em 1921, Pauli publicou uma exposição da teoria da relatividade em forma de artigo para a *Enciclopédia das Ciências Matemáticas (Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften)* editada por Sommerfeld, que até hoje é considerado uma das melhores exposições do assunto. Sobre seus dois primeiros anos de estudo na Universidade de Munique, Heisenberg chegou a considerar que “as conversas com Wolfgang Pauli eram a parte mais importante de meus estudos nos seminários de Sommerfeld” (HEISENBERG, 1996, p. 39). Destes dois anos, apenas durante dois semestres ambos conviveram como estudantes, pois, em meados de 1921, Wolfgang Pauli completou seu doutorado, com a distinção *summa cum laude*²⁹, e partiu de Munique para Göttingen, para trabalhar com Max Born.

Em dezembro de 1921, cursando apenas o terceiro semestre na Universidade de Munique, Heisenberg envia para a revista *Zeitschrift für Physik* seu primeiro artigo científico. Ao analisar uma série de dados experimentais relacionados à luz emitida por átomos submetidos a campos magnéticos³⁰, Heisenberg propôs a admissão de números quânticos semi-inteiros além dos números quânticos inteiros do modelo Bohr-Sommerfeld. Nas palavras de Heisenberg, tal proposta “contrariava o espírito da teoria quântica” (HEISENBERG, 1996, p. 48). A reação de Bohr, que havia lido uma cópia do manuscrito do artigo, não foi das melhores, frente às idéias do jovem pupilo de Sommerfeld (CASSIDY, 1991, p. 126).

No verão daquele ano, Bohr iria apresentar uma série de palestras na cidade de Göttingen e Sommerfeld, ao ser convidado, propôs a Heisenberg que também fosse assistir ao físico dinamarquês. Seria o primeiro encontro entre ele e Bohr. Anos depois, ele se referiria a esse fato como o verdadeiro início de sua carreira científica (HEISENBERG, 1996, p. 51).

Göttingen foi um dos primeiros centros a ensinar e desenvolver a teoria atômica de Bohr. A assim chamada “escola de Göttingen”, liderada por Max Born e James Franck (1882-1964), era um dos três pólos de pesquisa em física teórica mais importantes da época,

²⁹A mais rara e elevada das distinções acadêmicas germânicas, significa: “Com a maior das honras”.

³⁰O chamado Efeito Zeeman: “Efeito que consiste na subdivisão de raias de um espectro quando os átomos da fonte de emissão absorvem e emitem radiação em presença de um campo magnético moderadamente forte” (RODITI, 2005, p. 73).

juntamente com Munique e Copenhague. As palestras de Bohr em Göttingen permitiram o encontro entre os participantes dessas três linhas de pesquisa distintas.

O Seminário de Sommerfeld praticava, segundo Heisenberg (HEISENBERG, 1989, p. 38), um estilo fenomenológico “que tentava unir novas observações experimentais de modo inteligível, apresentando suas conexões por meio de fórmulas matemáticas que pareciam ser, em certo grau, plausíveis, do ponto de vista da física vigente”. A escola de Göttingen, por sua vez, baseava-se no “esforço em representar os processos naturais mediante um formalismo matemático cuidadosamente trabalhado, que também satisfazia em certo grau as exigências dos matemáticos por rigor” (HEISENBERG, 1989, p. 38). Tal estilo de se fazer física não surpreende, pois antes de se tornar referência em física teórica, a Universidade de Göttingen já tivera em seus quadros matemáticos como Johann Gauss (1777-1855), Bernhard Riemann (1826-1866) e Felix Klein (1849-1925) que, em fins do século XIX, iniciou o projeto de transformar Göttingen em um centro de referência em pesquisas matemáticas (CASSIDY, 1991, p. 137). Já a terceira escola, Copenhague, liderada por Bohr, “que pode ser chamada de conceitual ou filosófica, tenta, acima de tudo, clarificar os conceitos por meio dos quais, em última estância, os eventos naturais são descritos³¹” (HEISENBERG, 1989, p. 38).

As conferências apresentadas por Bohr em Göttingen, lembradas anos depois como “Festival Bohr”, deixavam um amplo espaço para o debate com os ouvintes. Na terceira delas, Heisenberg, conforme suas palavras, “se atreveu [...] a tecer uma observação crítica” (HEISENBERG, 1996, p. 51). Após o debate, o jovem estudante recebeu um convite de Bohr para uma caminhada, na qual ambos poderiam examinar de modo mais profundo o problema apresentado por Heisenberg. A conversa resultou numa longa explanação de Bohr, entremeada por incisivas perguntas por parte de Heisenberg, sobre os problemas filosóficos envolvendo a teoria atômica, os limites epistemológicos no uso dos conceitos da física clássica e o significado do termo “compreensão” na física. Esses temas iriam reaparecer constantemente nas páginas escritas por Heisenberg a partir de então, seja em artigos de natureza puramente científica, seja nos textos de caráter mais filosófico. Muitos dos argumentos utilizados posteriormente na construção da Interpretação de Copenhague já

³¹ “If we compare the three centers, Copenhagen, Munich and Göttingen, where the subsequent development primarily took place, we can relate them to three lines of work in theoretical physics which are still clearly distinguishable even today: the phenomenological school attempts to unite new observational findings in an intelligible fashion, to present their connection by means of mathematical formulae which appear to some degree plausible from standpoint of current physics; the mathematical school endeavors to represent natural process by means of a carefully worked-out mathematical formalism, which also satisfies to some extent the mathematicians’ demand for rigor; the third school, which may be called conceptual or philosophical, tries above all clarify the concepts by means of which events in nature are ultimately to be described”.

surgiram neste diálogo com Bohr. Sobre a elaboração da antiga teoria quântica, Bohr teria afirmado que:

Meu ponto de partida não foi, em absoluto, que o átomo seria um sistema planetário em pequena escala e como tal, regido pelas leis da astronomia. Nunca entendi as coisas dessa maneira. Meu ponto de partida foi, antes, a estabilidade da matéria, um perfeito milagre, quando considerado do ponto de vista da física clássica. Por “estabilidade”, refiro-me ao fato de as mesmas substâncias terem sempre as mesmas propriedades, de os mesmos cristais se reproduzirem, os mesmos compostos químicos, etc. Em outras palavras, mesmo depois de inúmeras alterações decorrentes de influências externas, um átomo de ferro continua a ser um átomo de ferro, com as mesmas propriedades de antes (HEISENBERG, 1996, p. 52).

Sobre os limites dos conceitos herdados da física clássica:

Na física atômica, porém, todos os conceitos anteriores revelaram-se insuficientes. A estabilidade da matéria nos mostra que a física newtoniana não se aplica ao interior do átomo; quando muito, ela pode oferecer-nos uma orientação ocasional. Decorre daí que não há como existir uma descrição intuitiva da estrutura do átomo; todas essas descrições têm que se basear, necessariamente em conceitos clássicos, que, como vimos, já não são aplicáveis. Qualquer um que tente desenvolver uma teoria assim estará tentando o impossível. Pretendemos dizer algo da estrutura do átomo, mas falta-nos uma linguagem em que possamos nos fazer entender (HEISENBERG, 1996, pp. 53 e 54).

Heisenberg, que havia sido treinado em moldes mais tradicionais por Sommerfeld, parece ao mesmo tempo fascinado e inquieto com as proposições apresentadas por Bohr. Tanto que não deixa de interrogá-lo:

“Se a estrutura interna do átomo é tão vedada às descrições intuitivas como o senhor diz, se realmente nos falta uma linguagem para lidar com ela, como podemos ter esperança de um dia compreender os átomos?” Bohr hesitou um instante. E disse: “Penso que ainda seremos capazes de fazê-lo. Mas, nesse processo, teremos que aprender o que significa a palavra ‘compreender’”. (HEISENBERG, 1996, p. 55).

Ao fim da conversa, Bohr convidou Heisenberg a visitar Copenhague, “onde poderia eventualmente ficar por um semestre, de modo que poderiam ‘fazer um pouco de física juntos’” (PIZA, 2003b, p. 84). Além disso, Bohr também sugeriu que Heisenberg estudasse com o grupo de físicos e matemáticos de Göttingen.

Entre outubro de 1922 e maio do ano seguinte, o convite acabou se concretizando, pois no período em que Sommerfeld visitava os Estados Unidos como professor convidado da Universidade de Wisconsin, Heisenberg ficou um semestre em Göttingen. Juntamente com Pauli, Pascual Jordan e Enrico Fermi (1901-1954), participou de um seminário de matemática da física atômica ministrado por Max Born. Ao contrário de Munique, o princípio de

correspondência ocupava uma posição central nas aulas de Born, reflexo da proximidade intelectual do grupo de Göttingen com as idéias defendidas em Copenhague. Além do seminário sobre física atômica, Heisenberg teve aulas com dois dos grandes matemáticos da época: David Hilbert e Philip Franck (1884-1966).

Voltou a Munique em tempo de defender sua tese de doutoramento, que não versava sobre física atômica³², mas sobre a estabilidade do fluxo laminar nos fluidos. A partir de outubro de 1923, trabalhou como professor assistente de Max Born em Göttingen, colaborando em alguns artigos nos quais tentaram generalizar o modelo de Bohr a sistemas com vários elétrons, como o átomo de hélio. Tentaram aplicar métodos utilizados por astrônomos na descrição do sistema solar, mas os resultados, entretanto, não concordaram com os dados experimentais. É a partir desse período que, segundo Heisenberg (1996, p. 74), “nos seminários conduzidos por Max Born (...), havíamos começado a falar de uma nova mecânica quântica, que um dia destronaria a antiga mecânica newtoniana e cujos vagos contornos já eram discerníveis aqui e ali”. Não por acaso, o termo *Mecânica Quântica* (*Quantenmechanik*) surge pela primeira vez no título de um artigo de Born escrito no verão de 1924 (VAN DER WAERDEN, 1967, p. 181).

Nas férias da Páscoa de 1924, finalmente Heisenberg se dirigiu à Copenhague, onde passaria apenas duas semanas, tendo poucas oportunidades de conversar com Bohr. Ao voltar, concluiu sua habilitação ainda em julho, tornando-se livre-docente na Universidade de Göttingen.

De setembro de 1924 a maio de 1925, Heisenberg recebeu uma bolsa da Fundação Rockefeller para voltar a Copenhague. Lá trabalha com Hendrik Kramers (1894-1952), assistente de Bohr, e as primeiras idéias, que já haviam surgido de maneira embrionária em seus estudos em Göttingen (HEISENBERG, 1989, pp. 41-43) – que acabariam fundamentando a mecânica de matrizes e o princípio de incerteza – começavam a tomar forma: “Em suas discussões com Kramers, fora se convencendo de que era necessário afastar-se das idéias da Física Clássica que ainda permaneciam na teoria de Bohr, substituindo-as por quantidades que pudessem ser diretamente observadas”. (PIZA, 2003b, pp. 90 e 91). Tal preceito acompanharia Heisenberg por toda sua carreira.

³² “Aparentemente concluindo que seu pupilo deveria preencher as lacunas em seu conhecimento de física clássica [...], Sommerfeld encorajou Heisenberg a escrever a sua tese de doutorado não sobre espectroscopia quântica, mas num campo da hidrodinâmica mais tradicional e menos controverso” (Apparently concluding that his pupil should fill the gaps in his knowledge of classical physics as displayed in his model, Sommerfeld urged Heisenberg to write his doctoral thesis not on quantum spectroscopy but in the more traditional and less controversial field of hydrodynamic”) (CASSIDY, 1991, p. 127). Outro problema que interferiu diretamente no doutoramento de Heisenberg foi seu desinteresse na prática de física experimental durante sua vida universitária (*ibidem*, pp. 149-152).

O período de seis semanas de estudo em Copenhague completou os anos de formação de Heisenberg como físico. Décadas depois, em conversa com Carl F. von Weizsäcker (1912-2007), Heisenberg afirmava que: “Eu aprendi otimismo com Sommerfeld, matemática com as pessoas em Göttingen e física com Bohr” (HERMANN, 1976, p. 26).

A construção da teoria quântica nos anos 20, em contraste com a relatividade – praticamente obra de um homem só – surgiu do esforço concentrado de inúmeros pesquisadores situados, conforme visto anteriormente, em três grandes centros: Munique, Göttingen e Copenhague. Heisenberg foi o elemento comum a todos os três, especialmente em função de seus deslocamentos constantes, levando “idéias de um lado para o outro” (VARELA, 1996, p. 93). A aproximação mais efetiva, contudo, foi entre os grupos de Göttingen e Copenhague, que acabou resultando, em grande medida, no estabelecimento das fundações da mecânica quântica no período entre 1925 e 1927. Mara Beller (BELLER, 1999, p. 38) ao compará-los a outros centros de pesquisa em física quântica chega a afirmar que

Os físicos do eixo Göttingen-Copenhague se apresentavam, em contraste, como uma frente unida. Eles cooperavam intimamente, e cada qual contribuiu amplamente para a emergência da nova filosofia. Bohr e Born lideraram a mais prestigiada escola de física teórica da época, e promissores físicos ficavam ávidos para trabalhar com eles. Em pouco tempo Pauli e Heisenberg ocupariam seus próprios postos.³³

Os outros núcleos de pesquisa, de suma importância para a física quântica nesse período, foram Zurique, onde Erwin Schrödinger formalizou a mecânica quântica a partir da noção de função de onda com a equação que leva seu nome, e Cambridge, onde Paul Dirac produziu uma equação que introduzia a relatividade especial na equação de Schrödinger.

2.5 Interlúdio I: Louis de Broglie e as ondas de matéria

Em setembro de 1923, o nobre francês Louis Victor de Broglie apresentou à Academia Francesa de Ciências duas comunicações resultado de, nas palavras dele, um longo período de “reflexão em isolamento” (PAIS, 1995, p. 518). O cômputo final seria a assunção de que, assim como os fótons, os elétrons também estariam associados a uma onda, ou seja, uma generalização da dualidade onda-partícula, considerada anteriormente apenas para a luz, para um corpúsculo. Na sua ousada tese de doutorado, *Pesquisas sobre a Teoria dos Quanta*

³³ “The Göttingen-Copenhagen physicists, in contrast, presented a united front. They cooperate intimately, and each contributed extensively to the emergence of the new philosophy. Bohr e Born headed the era’s most prestigious schools of theoretical physics, and promising physicists were eager to work with them. Soon Pauli and Heisenberg would occupy important chairs of their own”.

(*Recherches sur la Théorie des Quanta*), defendida na Sorbonne em novembro de 1924, de Broglie propõe a noção de ondas de matéria, relacionando o momento linear de uma partícula com o comprimento de onda (RODITI, 2005, p. 59). Em função do conteúdo revolucionário de sua tese e de sua posterior confirmação experimental, de Broglie recebeu o Prêmio Nobel em 1929.

Na tese, a analogia efetuada aproximava os níveis discretos de energia do átomo com os níveis discretos de vibração estacionária de uma corda sob tensão. Estando essa corda fixa em suas extremidades, em um determinado intervalo, existirão vários pontos de vibração nula e outros de vibração máxima. Seriam ondas estacionárias dentro do limite estabelecido pelo intervalo. Do mesmo modo, as propriedades dos espectros dos átomos deveriam se originar das ondas estacionárias confinadas dentro do átomo. Segundo esta hipótese, um elétron seria acompanhado por uma onda estacionária (onda piloto) que oscilaria por toda a trajetória. Assim, as únicas trajetórias eletrônicas permitidas são as que contêm o número exato de longitudes da onda definida por de Broglie, quantizando o movimento do elétron assim como na teoria de Bohr³⁴ (VARELA, 1996, pp. 80 e 81).

De Broglie reforçava a imagem dual do elétron a partir da distinção entre dois ramos da óptica: a *geométrica* e a *ondulatória* ou *física*. Para essa última, interessa o caráter ondulatório da luz em conformidade às leis da eletrodinâmica clássica. Já a óptica geométrica baseia-se no princípio da propagação retilínea da luz e possui grandes similaridades com a mecânica clássica das massas puntiformes. Analogicamente, de Broglie pretendeu “construir uma mecânica que tenha a mesma relação com a mecânica ordinária que a óptica ondulatória possui em relação com a óptica geométrica” (SEGRÈ, 1987, pp.155 e 156). Mas a tese do físico francês foi mais longe ainda: os resultados que valeriam para os elétrons também seriam válidos para elétrons livres e para todos corpúsculos³⁵. Estabelecia-se, então, uma perfeita simetria entre partículas e ondas, pois a teoria de Louis de Broglie associava ondas ao

³⁴ “Por meio de analogias com os quanta de luz, de Broglie propôs que o comprimento da ‘onda de matéria’ associada a uma partícula deveria ser tal que, multiplicado pela massa m e pela velocidade v da partícula, desse um resultado igual à constante de Planck, h , isto é, $\lambda mv = h$. Para uma determinada partícula de uma determinada massa (um elétron, por exemplo), quanto menor a velocidade, menor o comprimento de onda associado a ela. Essa regra curiosa permite interpretar de forma sugestiva as regras de Bohr: as órbitas permitidas do átomo de hidrogênio resultavam ser justamente aquelas cujo comprimento correspondia a um número inteiro de ondas de matéria desse tipo” (PIZA, 2003, pp. 36 e 37).

³⁵ Se existe um comprimento de onda relacionado à uma partícula das dimensões de um elétron, o que se pode afirmar acerca dos objetos macroscópicos? Segundo Victor Guillemin (2003, p. 73): “para um objeto com a massa de 1 g e velocidade de 1 cm/s, λ [o comprimento de onda] tem o valor numérico de h [constante de Planck], algo em torno de 10^{-26} cm, um valor absurdamente pequeno, milhões de vezes menor que um núcleo atômico”.

movimento das partículas, ondas de matéria capazes de gerar, obviamente, todos efeitos relacionados aos fenômenos ondulatórios, como a difração, por exemplo.

A confirmação experimental da natureza ondulatória do elétron veio dos experimentos de Clinton J. Davisson (1881-1958) e de Lester Germer (1896-1971) e, independentemente, de George P. Thomson (1892-1975), filho de J.J. Thomson (1856-1940), que descobrira o elétron em 1895.³⁶

Apesar da teoria de de Broglie “ter sido ignorada pela maioria dos físicos fora de Paris”, pois “a física teórica francesa tinha uma péssima reputação entre os físicos atômicos, a ponto de ninguém esperar que algo de interessante pudesse vir de Paris³⁷” (KRAUGH, 2002, p. 174), ela impressionou Einstein, ao ponto dele considerá-la como “o primeiro raio tênue de luz sobre o pior dos nossos enigmas em física” (PAIS, 1995, p. 518). Mas a influência mais direta foi sobre as pesquisas de Erwin Schrödinger que resultaram, poucos anos depois, na Mecânica Ondulatória. Além disso, entre 1924 e 1927, de Broglie desenvolveu uma série de artigos que seriam retomados 25 anos depois por David Bohm (1917-1992) na formulação de sua teoria das variáveis ocultas³⁸.

2.6 O artigo Bohr, Kramers e Slater: a tentativa de rejeição ao fóton

Em 1924 foi publicado um artigo³⁹ assinado por Niels Bohr, Hendrik Kramers e John Slater (1900-1976) que, apesar da descoberta do efeito Compton⁴⁰, ainda defendia uma descrição contínua da emissão de radiação livre. Ou seja, o artigo BKS, como ficou conhecido, rejeitava os fótons. As características típicas do quantum de luz que davam a ele características corpusculares – momento e conservação de energia – não deveriam ser consideradas verdadeiras em processos individuais, mas sim “apenas em termos estatísticos, como uma média de muitos desses processos” (PAIS, 1995, p. 498). O dualismo onda-partícula era resolvido pela introdução do conceito de onda de probabilidade, cuja “intensidade determinaria, em um dado ponto do espaço, a probabilidade associada à absorção (ou à emissão induzida) de um quantum de luz por um átomo localizado naquele ponto”

³⁶ “[George Thomson] realizou experiências para verificar como os elétrons se comportavam ao atravessarem filmes metálicos, e mostrou que, apesar de serem partículas, os elétrons apresentavam também um comportamento de ondas, de acordo com a relação de de Broglie” (RODITI, 2005, p. 224).

³⁷ “The theory was not received favorably and was ignored by most physicists outside Paris. French theoretical physics had low reputation among atomic physicist, and it was not expected that anything interesting could come from Paris”.

³⁸ Cf. infra pp. 86 – 93.

³⁹ “Über die Quantentheorie der Atrahlung”, *Z. Phy.* 24 (1924), pp. 69-87.

⁴⁰ “Fenômeno que consiste na redução de energia de fótons de alta energia e no subsequente desvio angular de suas trajetórias, ao serem espalhados por elétrons livres que absorvem esta energia” (RODITI, 2005, p. 71).

(HEISENBERG, 1995, p. 36). Todavia, além de ignorar os quanta de luz, o artigo BKS tinha como conseqüência o abandono de “alguns dos mais apreciados princípios da física – a conservação de energia e *momentum* e a conexão causal entre eventos em átomos distantes⁴¹” (CASSIDY, 1991, p. 175). Mas, logo após a publicação de uma série de experimentos realizado por Walther Bothe (1891-1957) e Hans Geiger, a teoria foi, em parte, abandonada⁴². Não obstante, o malogro da proposta BKS acabou por “indicar a Bohr que a completa renúncia dos métodos espaço-temporais usuais de visualização dos fenômenos físicos era algo necessário para progressos ulteriores⁴³” (CUSHING, 1994, p. 109). Esta convicção atingiu praticamente todos os outros físicos que estavam sob a influência de Bohr, tornando-se um componente essencial nos trabalhos posteriores de Heisenberg e Born⁴⁴. Este último retomaria a idéia de probabilidade na interpretação da equação de onda de Schrödinger e a mecânica matricial de Heisenberg “providenciaria o tipo de renúncia que Bohr reclamava⁴⁵” (CUSHING, 1994, p. 110).

Para Heisenberg, que havia escutado pessoalmente de Einstein “uma centena de objeções [à BKS]⁴⁶” (CASSIDY, 1991, p. 179), apesar do fracasso, a proposta de Bohr, Kramers e Slater

Revelava uma característica essencial da correta interpretação da teoria quântica. Esse conceito introduzido por eles de onda de probabilidade era algo inteiramente novo na física teórica desenvolvida desde Newton. Probabilidade, em matemática ou na mecânica estatística, significa uma afirmação sobre nosso grau de conhecimento acerca de uma situação concreta. (...) A onda de probabilidade de Bohr, Kramers e Slater, todavia, significava mais que isso: ela correspondia a uma tendência para alguma coisa (HEISENBERG, 1995, p. 36).

Um desenvolvimento notável na constituição da mecânica quântica foi a formulação, por parte de Pauli, em fins de 1924, do Princípio de Exclusão: dois elétrons idênticos, com os mesmos números quânticos, não podem ocupar simultaneamente o mesmo estado quântico.

⁴¹ “It demanded the additional conservation of energy and momentum and the causal connection between events in distant atoms”.

⁴² “De fato, vários físicos, antes de 1924, tinham investigado a possibilidade de abandonar, nesse sentido, o princípio de conservação. Um deles, Einstein, havia apresentado uma lista devastadora de objeções à teoria de Bohr *et al.*, antes mesmo da sua refutação empírica em 1925 pelas experiências de Compton e Simon, e de Bothe e Geiger” (BROWN, 1981, p. 57).

⁴³ “The failure of the Bohr-Kramers-Slater theory [...] indicated to Bohr that a complete renunciation of the usual space-time methods of visualization of the physical phenomena would be necessary for further progress”.

⁴⁴ Nem todos que estudaram em Copenhague abraçaram os pressupostos filosóficos de Bohr: John Slater demonstrou sérias restrições à filosofia defendida pelo físico dinamarquês (CUSHING, 1994, pp. 109 e 110).

⁴⁵ “Heisenberg’s matrix mechanics provided just the type of renunciation that Bohr had demanded”.

⁴⁶ “The next day, a disappointed Werner reported to Pauli and his parents that ‘Einstein has a hundred objections [to BKS]’.

Esse princípio permitiu entender não só a organização dos elétrons nos átomos, mas também as propriedades dos elementos químicos.

Apesar desse avanço, no início de 1925, todos os esforços em busca da sonhada mecânica quântica, que superasse a clássica e suas contradições, haviam fracassado. Um comentário de Pauli ao físico Ralf Kronig, em maio de 1925, reflete bem o nível da crise que a teoria quântica havia chegado à época: “A física está novamente muito confusa; a ponto das dificuldades serem tantas que chego a desejar que eu fosse um comediante de filmes ou algo do tipo e nunca tivesse escutado qualquer coisa sobre física. Mas eu espero que Bohr nos salve com uma nova idéia⁴⁷” (HERMANN, 1976, p. 27).

2.7 A construção e o estabelecimento da Mecânica Quântica

Em fins de maio de 1925, aproximadamente na mesma época do comentário de Pauli, Heisenberg foi acometido por uma crise de febre do feno, que o forçou a deixar o continente e se refugiar na ilha de Helgoland. Além de tentar dirimir os efeitos da alergia ao pólen, Heisenberg também tentava procurar isolamento para melhor desenvolver suas idéias acerca de uma mecânica quântica consistente e definitiva. A grande quantidade de dados experimentais e inconsistências teóricas relativas à estrutura do átomo já chegavam a um ponto intolerável. Como certo, havia o sentimento que a física clássica se mostrava inadequada para resolver os impasses do mundo quântico. Segundo Antônio Piza (2003b, p. 28):

Consolidou-se em Heisenberg o sentimento de que os próprios ingredientes básicos das teorias clássicas que eram preservados na nova teoria atômica já não faziam sentido, e que a verdadeira saída poderia estar em substituí-los por algo diferente, que tivesse pelo menos o mérito de levar a uma teoria atômica consistente, sem a necessidade de regras especiais para disciplinar situações problemáticas.

A idéia que Heisenberg procurava desenvolver seria construir uma teoria que se utilizasse apenas de propriedades diretamente observáveis do átomo, ou seja, características do sistema atômico – uma grandeza ou quantidade específica, como energia, frequência e intensidade, por exemplo – que pudessem ser mensuráveis. A consequência direta era abolir completamente qualquer imagem do átomo que recorresse à noção de órbita. Não só o modelo planetário criado por Rutherford, mas também o modelo Bohr-Sommerfeld, com seus estados

⁴⁷ “For the moment, physics has very much lost its way again [...] for me at any rate, it is much too difficult, and I wished I were a film comic or something like that and had never heard of physics. But now I hope that Bohr will save us with a new idea”.

estacionários, estavam fadados a perderem completamente o sentido na teoria. Os elementos constitutivos dessas teorias, especialmente as órbitas, não se encaixavam no que se poderia denominar de “diretamente observável”⁴⁸.

Antes de partir para seu retiro em Helgoland, o jovem físico, com apenas 23 anos na época, tinha ensaiado uma primeira tentativa de “conjecturar que fórmulas permitiriam expressar as intensidades das linhas espectrais do hidrogênio, usando mais ou menos os mesmos métodos” que haviam sido úteis em seu trabalho com Kramers em Copenhague (HEISENBERG, 1996, p. 75). Ao iniciar à tarefa de formular uma mecânica do átomo nessas bases, Heisenberg se encontrou em meio a tarefa de deslindar dificuldades matemáticas que pareciam insolúveis àquela altura. Contudo, foi a partir de então que ele se convenceu da necessidade de ignorar as órbitas eletrônicas e todos os conceitos da mecânica clássica que as estruturavam, como, por exemplo, velocidade e posição do elétron. Sua teoria incluiria apenas as frequências e amplitudes associadas às intensidades das linhas espectrais; isto é, no lugar de supor órbitas com trajetórias bem definidas no espaço, a teoria se remeteria aos termos das séries do espectro de hidrogênio. Em vez de saltos entre *órbitas*, uma imagem que possuía o atrativo de ser visualizável, haveria saltos entre dois *valores* possíveis de energia. Anulava-se, então, qualquer possibilidade de se visualizar, a partir da mecânica criada por Heisenberg, o que ocorre de fato com os elétrons dentro do átomo. Segundo Mara Beller (1999, pp. 20 e 21):

Heisenberg admitiu posteriormente que ele tencionava eliminar não apenas as órbitas dos elétrons confinados, mas também as trajetórias experimentalmente observáveis dos elétrons, apesar da comprovação deste último fornecida pela câmara de Wilson. Os autores da mecânica matricial inicialmente sugeriam que não só a representação do elétron em movimento é desprovida de sentido, mas também é impossível relacionar posição a um elétron num dado instante. Espaço-tempo existe apenas nos domínios macroscópicos – nos domínios atômicos “pontos espaciais num sentido comum não existem”⁴⁹.

⁴⁸ Segundo Helge Kragh (2002, p. 162), a idéia de que a teoria quântica deveria ser construída apenas com quantidades observáveis tem suas raízes no princípio de correspondência de Bohr, que balizou o trabalho de Heisenberg durante a constituição da nova mecânica, e a intensa troca de idéias entre ele, Heisenberg e Pauli, que já havia recorrido a essa idéia desde 1919. É corriqueiro interpretar tal opção de Heisenberg como uma prova da influência premente do positivismo de Ernst Mach sobre ele. Filósofos como Karl Popper (1989, p. 179) e Bunge (2000, p. 215) defendem claramente essa opinião em suas críticas às Escolas de Copenhague e Göttingen (Cf. infra. p. 113).

⁴⁹ “Heisenberg admitted later that he intended to eliminate not only the orbits of bound electrons but even the experimentally observable paths of free electrons, despite Wilson’s experimental substantiation of the latter. The authors of matrix mechanics initially implied not only that it is meaningless to represent electron motion as a change of position in time but also that it is impossible to ascribe position to an electron at a given instant. Space-time exists only in the macroscopic domain – in the atomic domain “space points in the ordinary sense do not exist (Born)”.

As novas “distâncias”, que não são mais as distâncias entre as órbitas do átomo, são determinadas pelas diferentes relações entre os níveis de energia. Ou seja, não havia sentido descrever o movimento dos elétrons em função da posição deles em cada instante do tempo. Os saltos quânticos deixaram de ser saltos entre diferentes órbitas e passaram a ser saltos entre os índices de energia. Os elementos da mecânica clássica que permaneciam no modelo atômico de Bohr – no caso, as órbitas e o movimento dos elétrons, que se chocavam com as “condições quânticas” herdadas da teoria de Planck – foram abolidos, permanecendo apenas os saltos quânticos, isentos de contradições (HEISENBERG, 1995, pp. 32-35). Segundo Jagdish Mehra (1987, p. 472):

A importância da idéia de utilizar apenas quantidades observáveis nas teorias físicas fora discutida diversas vezes em Göttingen, desde sua introdução por Mach, Einstein e Minkowski. Born, Pauli, Jordan e Heisenberg tinham todos discutido-a detalhadamente no contexto da teoria quântica. Mas Heisenberg fez da idéia de recorrer apenas quantidades observáveis o princípio filosófico norteador de sua reinterpretação quântica das variáveis cinemáticas.⁵⁰

Um problema mais agudo a ser resolvido era aquele acerca das intensidades associadas aos termos de cada uma das séries espectrais. Sem dúvida, elas escapariam ao corte da navalha de Ockham infligido ao átomo por Heisenberg, pois eram grandezas mensuráveis. Mas, calculá-las, segundo a teoria clássica, levava em conta a distância do elétron ao núcleo, e em termos matemáticos, a intensidade é proporcional ao quadrado do raio da órbita. O artifício utilizado foi preservar a forma matemática do cálculo da intensidade associada a uma certa frequência, mas substituir a distância, um dado não-observável, por “um conjunto de distâncias dependentes de duas energias, cujo quadrado serviria para determinar as intensidades associadas às diferentes frequências” (PIZA, 2003b, p. 93).

Com base apenas nos dados espectroscópicos, os observáveis, Heisenberg buscou simplificar ao máximo eventuais complicações matemáticas e acabou por optar por um sistema mecânico matematicamente mais simples: um pêndulo, “cujas oscilações podiam servir de modelo para as vibrações tratadas pela física atômica” (PIZA, 2003b, p. 93). Ele descreve sua opção matemática para a nova teoria e as conseqüências dela para a compreensão da mecânica atômica da seguinte forma:

⁵⁰ “The importance of the idea of employing only observable quantities in physical theories had been discussed often in Göttingen ever since Mach, Einstein and Minkowski had introduced it. Born, Pauli, Jordan and Heisenberg had all discussed it at length in the context of quantum theory. But Heisenberg made the idea of employing only observable quantities as the guiding philosophical principle of his quantum-theoretical reinterpretation of kinematical variables”.

A radiação emitida – por intermédio de suas frequências e intensidades – propicia uma imagem das órbitas eletrônicas que deriva do que os matemáticos denominam de expansão de Fourier da órbita. A idéia trazia consigo a sugestão de que se deveria tratar as leis mecânicas, não por equações para as posições e velocidades dos elétrons mas, sim, por equações para as frequências e amplitudes da expansão de Fourier. Partindo-se, então, dessas novas equações e modificando-as ligeiramente, poderíamos esperar obter relações para as grandezas que correspondem às frequências e intensidades da radiação emitida mesmo para o caso de órbitas pequenas e para o *estado fundamental* (ou normal) do átomo (HEISENBERG, 1995, p.35).

O principal temor do jovem físico durante o desenvolvimento de seus cálculos era, no entanto, não possuir a certeza de que o princípio de conservação de energia fosse aplicável ao esquema que estava se desenhando perante ele. Em suas memórias, escritas mais de quarenta anos depois, Heisenberg (1996, p. 76) reconstrói assim o ápice de seu processo criativo:

Assim, concentrei-me em demonstrar que o princípio [de conservação] se aplicava e, certa noite, cheguei a um ponto em que estava apto a determinar os termos individuais na tabela de energia ou, como se diz atualmente, na matriz de energia, através do que hoje seria considerado uma série extremamente complicada de cálculos. Quando os primeiros termos pareceram harmonizar-se com o princípio de conservação da energia, fiquei muito agitado e comecei a cometer erros de aritmética. Só quase às 3:00h da manhã o resultado final de meus cálculos surgiu diante de mim. O princípio da conservação se mantivera em todos os termos. Não pude mais duvidar da consistência e coerência matemáticas do tipo de mecânica quântica para o qual meus cálculos apontavam.

Ao voltar a Göttingen, Heisenberg de imediato escreveu uma carta a Pauli na qual dizia: “Tudo ainda está vago e pouco claro para mim, mas parece que os elétrons não mais se moverão em órbitas” (PIZA, 2003b, p. 31). E, ao contrário de seu contumaz tom crítico, Pauli o incentivou a prosseguir suas pesquisas por aquele caminho. A reação de Max Born, que recebeu uma versão escrita, não foi menos efusiva. Ele se dizia “fascinado”, a ponto de passar um dia todo pensando nas idéias de Heisenberg (MEHRA, 1987, p. 474).

Nascia a mecânica de matrizes, considerada a primeira estrutura teórica formal da mecânica quântica, que associa matrizes às propriedades da matéria. Em 29 de julho de 1925, a *Zeitschrift für Physik* aceitou o artigo de Heisenberg, o qual apresentava a nova mecânica, que em resumo era uma

reformulação cinemática segundo a qual coordenada e momento devem ser representados por matrizes não comutantes, [resultado] da opção de exprimir a dinâmica dos processos de emissão e absorção de radiação à escala atômica estritamente em termos de ‘quantidades observáveis’ (PIZA, 2003b, p. 29)

Posteriormente, Max Born e seu aluno Pascual Jordan, num artigo⁵¹ publicado em novembro do mesmo ano, utilizaram-se explicitamente da álgebra de matrizes, que aparecia de modo íncio no trabalho de Heisenberg (VAN DER WAERDEN, 1967, pp. 277-305) na forma de valores não comutantes; isto é, o produto de duas quantidades dependia da ordem de multiplicação. A forte tradição em física matemática da “Escola de Göttingen” permitiu que Born e Jordan, que já conheciam os cálculos de matrizes desde seus tempos de estudante, desenvolvessem as idéias de Heisenberg com maior propriedade. A versão mais influente da teoria foi consolidada em 1926, num artigo⁵² apelidado de “Drei-Männer Arbeit” (“o artigo dos três homens”) (VAN DER WAERDEN, 1967, pp. 321-385); no qual Born, Jordan e Heisenberg a completaram e deram maior consistência teórica à mecânica de matrizes. Pauli, posteriormente, aplicou com sucesso a mecânica matricial ao átomo de hidrogênio, “conseguindo, pelo novo método, os resultados que Bohr tinha conseguido em 1912, fazendo uso de hipóteses inconsistentes” (SEGRÈ, 1987, p. 161).

Mas o nível técnico exigido na aplicação da álgebra de matrizes e seu caráter altamente abstrato provocaram um certo distanciamento da comunidade de físicos quanto à Mecânica Matricial. Em uma carta dirigida a Pauli, Heisenberg confidenciou que:

Algumas pessoas – como [David] Hilbert – falam do grande sucesso atingido pela introdução do cálculo de matrizes na física, enquanto outros, como [James] Franck, dizem que essas matrizes não podem ser entendidas. Sempre fico com raiva quando escuto a teoria ser chamada de nada mais que física matricial, e cheguei a considerar seriamente remover a palavra ‘matriz’ do artigo e trocá-la por outra. – e.g. quantidade teórica quântica. Matriz é realmente uma das mais estúpidas palavras matemáticas que existem⁵³ (HERMANN, 1976, p. 33).

Contudo, e de maneira surpreendente, na mesma época, um jovem físico inglês, Paul Adrien Maurice Dirac, doutorado pela Universidade de Cambridge em 1926 e futuro laureado com o prêmio Nobel de 1933, também trabalhava em uma versão da mecânica quântica.

2.8 Interlúdio II: Paul Dirac

No início de novembro de 1925, Paul Dirac enviou à *Proceedings of the Royal Society* um artigo que seria publicado em dezembro: “The fundamental equations of quantum

⁵¹ Born, M. e Jordan, P. Zur Quantenmechanik. *Z. Phys.* 34, 1925, pp. 858-888.

⁵² Born, M., Heisenberg, W. a Jordan, P. Zur Quantenmechanik II. *Z. Phys.* 35, 1926, pp. 557-615.

⁵³ “Some people – like Hilbert (or Weyl in a letter to Jordan) – talk of the great success achieved through the introduction of matrix calculus into physics, and others, like Franck, say that these matrices can never be understood. I am always angry when I hear the called nothing but matrix physics, and for a time seriously considered completely removing the word ‘matrix’ from the study and replacing it by another – e.g. quantum-theoretical quantity. Matrix is also certainly one of the most stupid mathematical words in existence.”

mechanics” (VAN DER WAERDEN, 1967, pp. 307-320). Muitos resultados encontrados por Born, Heisenberg e Jordan foram obtidos independentemente por Dirac que, em sua versão da mecânica quântica, não recorreu às matrizes. Do mesmo modo, conseguiu formular, de acordo com a mecânica quântica e independente de Pauli, um tratamento não-relativístico do átomo de hidrogênio.

O interesse de Dirac na mecânica quântica se intensificou após a visita de Heisenberg a Cambridge em 1925. Ele foi um dos primeiros a tomar contato com o artigo de Heisenberg sobre a mecânica matricial, tendo acesso às provas do artigo quando ele ainda estava sendo submetido à *Zeitschrift für Physik*. Segundo Jagdish Mehra (1987, p. 476): “Nesta época, Dirac estava muito enamorado do formalismo Hamiltoniano como base da física atômica [...] durante as semanas seguintes, Dirac tentou conectar a reinterpretação quântica das variáveis cinemáticas de Heisenberg” com a equação de Hamilton-Jacobi. Sua pesquisa centrou-se na noção de não-comutação que caracterizava as matrizes da teoria de Heisenberg, ao ponto dele distinguir entre *q-numbers*, relativos a grandezas atômicas que não-comutam ($AB \neq BA$), e os observáveis, dados experimentais – *c-numbers* – que comutam ($AB = BA$) (CASSIDY, 1991, p. 206). Dirac percebeu que os parênteses (*brackets*, conforme a notação criada por Dirac) de Poisson⁵⁴, utilizados na mecânica clássica em sua forma hamiltoniana, eram semelhantes aos produtos não-comutativos de duas quantidades quânticas na mecânica matricial. Seu trabalho foi, a partir daquele momento, “traduzir para a linguagem quântica os resultados obtidos em dinâmica clássica um século antes⁵⁵” (MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 135). Heisenberg tratava essa característica como um obstáculo a ser superado pelo desenvolvimento ulterior da teoria (BELLER, 1999, p. 86). Em contraponto, Dirac afirmava que “isso dava uma relação muito estreita entre a mecânica clássica comum a que as pessoas estavam acostumadas e a nova mecânica que envolvia as quantidades não-comutativas introduzidas por Heisenberg” (SÉGRE, 1987, p. 163).

Segundo Mara Beller (1999, p. 66), o contato com as teorias de Dirac influenciaram diretamente Heisenberg na formulação e interpretação do princípio de incerteza. Como interpretar uma teoria sem noções espaço-temporais visualizáveis? As matrizes **p** e **q** não possuíam nenhum significado cinemático. A influência de Dirac surge do fato dele “ter destacado a relação comutativa básica $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = (h/2\pi i)\mathbf{1}$ como o foco de uma análise espaço-

⁵⁴ Siméon Denis Poisson (1781-1840), matemático e físico francês.

⁵⁵ “All he had to do was to translate into quantum language the results obtained in classical dynamics a century before”.

temporal”⁵⁶ apesar da posição inicial da mecânica de matrizes não depender de uma interpretação visualizável. Dirac não considerava a não-comutatividade como um sinal da impossibilidade de uma visualização ou interpretação geométrica dos fenômenos quânticos. Para ele “a não-comutatividade não era contraintuitiva, pois poderia ser apreendida em formas geométricas” (BELLER, 1999, p. 87). De fato, Dirac possuía uma sólida formação em geometria o que lhe permitiu certa familiaridade com “geometrias ‘não-pascalinas’, nas quais as ‘coordenadas’ de um ponto não comutam⁵⁷” (BELLER, 1999, p. 87).

No artigo sobre a incerteza, Heisenberg introduziu uma interpretação cinemática, essencial no seu artigo, da relação $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = (h/2\pi i)\mathbf{1}$, baseado nas idéias de Dirac acerca da possibilidade de uma interpretação geométrica das relações não-comutativas. O que não significa que ambos acreditassem em uma representação tradicional, pautada nos parâmetros da física clássica.

Outra contribuição fundamental de Dirac foi a teoria da transformação⁵⁸: um formalismo geral e unificado que permitia uma transição entre a mecânica ondulatória e a mecânica matricial. Alguns dos instrumentos matemáticos fundamentais para a derivação das relações de Heisenberg advém desse trabalho de Dirac (CHIBENI, 2005, p. 182).

2.9 Erwin Schrödinger e a função X: interpretação e confronto

Em 1925, um professor da Universidade de Zurique, o físico austríaco Erwin Schrödinger, a pedido de um colega, Peter Debye, tomou contato com a tese de doutoramento de Louis de Broglie. Debye, que havia trabalhado com Sommerfeld em Munique, pediu que Schrödinger preparasse um seminário sobre as idéias de de Broglie. Ao perceber que “o conteúdo matemático” da tese que ele tinha em mãos era muito similar a um trabalho seu, escrito anos antes, intitulado “Sobre a propriedade notável das órbitas quantizadas de um único elétron”, Schrödinger resolveu se debruçar seriamente sobre as conclusões apresentadas por de Broglie (PIZA, 2003b, pp. 333-339). Esse foi o ponto de partida do que seria um dos pilares da teoria quântica: a mecânica ondulatória. Assim como Heisenberg e Dirac, ele buscava criar uma teoria que conseguisse descrever o comportamento do elétron no átomo. Schrödinger declara, em uma carta de 27 de dezembro de 1925, dirigida ao físico Wilhem

⁵⁶ “Dirac singled out the basic commutation relation $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = (h/2\pi i)\mathbf{1}$ as the focus of a space-time analysis”

⁵⁷ “In Dirac’s view, noncommutativity was not counterintuitive, because it could be apprehended in geometrical forms. Dirac was familiar with ‘non-Pascalian’ geometries, in which the ‘coordinates’ of a point did not commute”.

⁵⁸ Também desenvolvida de maneira independente por Pascual Jordan (CASSIDY, 1991, p. 231).

Wien: “Acho que posso especificar um sistema vibrante cujas frequências características dos termos do [espectro de] hidrogênio, e de um modo relativamente natural, sem suposições *ad hoc*” (PIZA, 2003b, p. 42). O que Schrödinger descreve nesse trecho é uma reformulação do modelo Bohr-Sommerfeld, na qual ele substituiu a noção de movimento das partículas por *funções de onda*⁵⁹ ou função X. Em termos mais técnicos, ela pode ser descrita do seguinte modo:

Segundo esse modelo, os estados estacionários de uma camada eletrônica são comparados às oscilações estacionárias de um sistema – por exemplo, de uma corda vibrante –, exceto pelo fato de que todas as grandezas normalmente consideradas como energias dos estados estacionários são tratadas como frequências das oscilações estacionárias (HEISENBERG, 1996, p. 88).

Schrödinger apresentou seu trabalho em quatro artigos, publicados em 1926 na *Annalen der Physik*, todos com o título “Quantização como um problema de autovalores” (“Quantisierung als Eigenwertproblem”). A equação de onda formulada por Schrödinger é, em resumo, o meio para determinar a função X que possibilita, por sua vez, descrever o comportamento dinâmico de um sistema quântico no decorrer do tempo (VARELA, 1996, pp. 134-140). Ao contrário da álgebra de matrizes, desconhecida da grande maioria dos físicos, as equações relacionadas às ondas eram bem conhecidas: a física clássica trabalhava com a descrição de ondas mecânicas desde o século XVIII e as equações de Maxwell para o campo eletromagnético faziam parte da bagagem intelectual mínima de qualquer físico. Jagdish Mehra (1987, p. 482), afirma que a recepção favorável ao trabalho de Schrödinger por parte de pesquisadores como Planck, Einstein, Lorentz, Sommerfeld e Wien deve-se, em grande parte, à “restauração do uso de equações diferenciais na teoria quântica” sem o recurso a instrumentos “esotéricos como matrizes ou números *q*”.

Além disso, os resultados obtidos se harmonizavam com a mecânica matricial e o próprio Schrödinger provou que ambas teorias, apesar de utilizarem instrumental matemático bem distinto, eram equivalentes⁶⁰.

No artigo no qual Schrödinger demonstra a equivalência matemática entre as duas teorias, ele se refere à mecânica de matrizes nos seguintes termos:

⁵⁹ Na tese de doutorado de de Broglie, as ondas de matéria “serviam apenas para fornecer padrões de comprimento para medir órbitas, como se estas fossem cordas fechadas em círculo (...) na realidade essas ondas deveriam se propagar no espaço, segundo os ditames de uma *equação de onda*, como as ondas eletromagnéticas” (PIZA, 2005, p.96).

⁶⁰ Equivalentes do ponto de vista matemático e não, obviamente, físico. Provas de equivalência foram atingidas independentemente por Carl Eckart nos Estados Unidos e por Pauli (KRAGH, 2002, p.166). Mara Beller (1999, p.18) argumenta que a equivalência entre as duas teorias só surgiu de fato após a formalização da teoria da transformação de Dirac e Jordan por von Neumann.

minha teoria foi inspirada por de Broglie e por observações breves mas infinitamente perspicazes de Einstein (...). Eu não tinha nenhuma idéia de qualquer relação genética com Heisenberg. Naturalmente, eu sabia de sua teoria, mas devido aos métodos de álgebra transcendental, que para mim pareciam muito difíceis, e por causa da falta de visualizabilidade [*lack of visualizability* (trad. ing) e *Anschaulichkeit* no original alemão], senti-me inibido, para não dizer repellido por ela” (KRAGH, 2002, p. 164).

O grupo de Göttingen/Copenhague também demonstrou sérias reservas, não só quanto à mecânica ondulatória, mas também quanto à interpretação que o próprio Schrödinger extraía dela⁶¹. Pauli a considerou “verrückt” (tola, louca em alemão), Jordan chegou a afirmar que ela seria “destituída de qualquer significado físico⁶²” (BELLER, 1999, p. 33). Em carta dirigida a Pauli, Heisenberg afirmou que: “quanto mais pondero sobre a parte física da teoria de Schrödinger, mais detestável ela me parece [*desto abscheulicher*]” (HOLTON, 1984, p. 58). Para Jagdish Mehra (1987, p. 482), essa reação agressiva de Heisenberg era fundamentada na crença que existiria apenas um único esquema matemático capaz de responder aos problemas da física quântica. Mas a característica que mais incomodava Heisenberg, a ponto de motivá-lo a buscar um maior aprofundamento da mecânica de matrizes, era quanto ao que “Schrödinger escreve sobre a visualizabilidade [*anschauliche*] de sua teoria... eu acho uma asneira” (MEHRA, 1987, p. 483).

Anos depois, Heisenberg, de modo mais equilibrado, assim reconstituiu a época de contato com a mecânica ondulatória (1996, pp.88 e 89),

A interpretação física do esquema matemático [de Schrödinger} trouxe-nos graves problemas. Schrödinger acreditava que, associando partículas e ondas materiais, havia descoberto um meio de eliminar os obstáculos que, por tanto tempo, vinham dificultando a compreensão da teoria quântica. Segundo ele, essas ondas materiais eram plenamente comparáveis a processos que se desenvolviam no espaço e no tempo, como ondas eletromagnéticas ou ondas sonoras. Idéias obscuras, como saltos quânticos e coisas parecidas, desapareceriam por completo. Eu não tinha confiança numa teoria que contrariava inteiramente nossa concepção de Copenhague, e fiquei perturbado ao ver que inúmeros físicos saudavam precisamente essa parte da doutrina de Schrödinger, com um sentimento de liberdade (...) ainda estávamos longe de uma completa interpretação física da mecânica quântica, mas tínhamos certeza de que era preciso nos afastar da representação objetiva de processos no tempo e no espaço.

⁶¹ A única exceção foi Max Born.

⁶² “In a review of Schrödinger’s collected paper on wave mechanics, Jordan declared Schrödinger’s theory to be devoid of any physical meaning”.

O caráter descontínuo dos processos atômicos, tidos por Heisenberg (1996, p. 89) como “uma característica autêntica da realidade”, eram negados⁶³. Os saltos quânticos – e a conseqüente emissão de radiação – perdiam o sentido e eram substituídos por um processo de “excitação simultânea de duas oscilações materiais estacionárias, cuja interferência dava origem à emissão de ondas eletromagnéticas” (HEISENBERG, 1996, p. 89).

Não obstante as reservas apresentadas por Heisenberg, mesmo uma interpretação literal da mecânica ondulatória apresentava dificuldades notáveis. A primeira delas é que “a não ser para o caso de uma única ‘partícula’, as funções de onda não são descritíveis em espaços com três dimensões. Que realidade seria essa, que ‘existe’ em espaços com inúmeras (e até mesmo infinitas) dimensões?” (CHIBENI, 2005, p. 187). Outra dificuldade é que, para Schrödinger, as partículas elementares, como o elétron, eram fenômenos puramente ondulatórios e, assim, as manifestações corpusculares detectadas seriam conseqüência dos “pacotes de onda”.⁶⁴

Tal situação, ainda caótica, é melhor compreendida quando se entende que os poucos anos da década de 1920 que viram o nascimento da mecânica quântica comportam diferentes momentos na criação da teoria. Segundo Reichenbach (1998, p. v), o desenvolvimento teórico da física quântica foi, durante os anos de 1925 e 26, dominado pelo uso de sofisticadas técnicas matemáticas que fundamentavam e possibilitaram o manejo dos fenômenos relacionados ao mundo microfísico. São destes anos, a criação da mecânica matricial e da equação de Schrödinger. Contudo, já em 1926, iniciou-se o processo de interpretação física dos resultados obtidos, pois “tal formalismo não vinha acomodado em nenhum quadro ontológico claro” (CHIBENI, 2005, p. 181).

Conforme o próprio Heisenberg, em 1927, a interpretação física da teoria ainda estava “repleta de discrepâncias internas, que se manifestavam nos argumentos sobre continuidade *versus* descontinuidade, e partícula *versus* onda” (HEISENBERG, 1927, p. 29 *apud* CHIBENI, 2005, p. 181). Em resumo, o aparato matemático formal da teoria, de reconhecido poder preditivo, antecedeu à compreensão efetiva sobre o conteúdo, ou seja, o seu significado.

Tal movimento, que parte da criação do formalismo e se dirige à busca por uma interpretação, é compreendido quando se leva em conta o impacto da entrada de Schrödinger

⁶³ No primeiro encontro entre Heisenberg e Schrödinger, em 1926, o físico alemão chegou a argumentar que a mecânica ondulatória segundo a interpretação de Schrödinger “não ajudaria a explicar nem mesmo a lei da radiação de Planck”. A resposta do físico austríaco foi que essas objeções seriam superadas em pouco tempo (HEISENBERG, 1996, p. 90).

⁶⁴ “Schrödinger (...) relacionou a cada elétron um ‘pacote de ondas’, isto é, um grupo de oscilações que, devido à interferência, se fortalecem reciprocamente dentro de uma pequena região e se aniquilam reciprocamente fora dessa região” (POPPER, 2000, p. 244).

em cena. A concorrência de uma nova teoria quântica, a aceitação dela por grande parte dos físicos, o apoio aberto de figuras do vulto como Sommerfeld (HEISENBERG, 1996, p. 90) e Einstein forçaram uma reformulação da mecânica matricial e a busca por uma interpretação mais nítida e coerente. Esse novo contexto, quase que inóspito às teses do grupo de Bohr, Heisenberg e Born, fica evidenciado pelo seguinte trecho de uma carta de Einstein a Schrödinger: “estou convencido de que o senhor contribuiu com um avanço decisivo na formulação da condição quântica, da mesma forma que estou convencido de que o método de Heisenberg-Born é enganoso⁶⁵” (PIZA, 2003b, pp. 103 e 104).

Para Beller (1999, p. 19) o conflito entre as duas teorias pode ser entendido da seguinte forma:

Alguns meses antes da publicação da mecânica de Schrödinger (...) a mecânica de matrizes estava eivada por dificuldades de tal magnitude que ninguém, incluindo os próprios autores, a considerava algo mais que um primeiro passo num longo caminho em direção à teoria correta. Essa foi a principal razão para a entusiástica recepção à teoria de Schrödinger: a aprovação da teoria de Schrödinger não foi restrita aos grupos conservadores da comunidade de físicos⁶⁶.

Na verdade, a interpretação da mecânica de matrizes ainda passou por uma série de ajustes e mudanças motivadas pelo surgimento da mecânica ondulatória de Schrödinger. O artigo de Heisenberg sobre o princípio de incerteza já possuía inúmeras diferenças, especialmente quanto ao problema da possibilidade de visualização (*Anschaulichkeit*⁶⁷) dos elementos constituintes do mundo microfísico. Segundo Beller (1999, p. 22):

O artigo sobre o princípio de incerteza representa uma notável reviravolta epistemológica na primeira interpretação filosófica da mecânica matricial. Se no artigo de reinterpretação Heisenberg alega que as magnitudes observáveis ditam a estrutura da teoria, seu artigo sobre a incerteza estabelece que a teoria determina o que pode ser observado⁶⁸. Em 1925, Heisenberg eliminou o espaço-tempo clássico e

⁶⁵ Schrödinger era completamente refratário à noção de saltos quânticos: por vezes descreveu o modelo de Bohr de emissão de luz como “monstruoso” “quase que inconcebível” (KRAGH, 2002, p. 164). Em certa altura de um intenso debate com Bohr sobre a mecânica quântica, Schrödinger chegou a afirmar que: “se esses malditos saltos quânticos realmente tiverem vindo para ficar, vou lamentar muito ter-me envolvido com a teoria quântica” (HEISENBERG, 1996, p. 93).

⁶⁶ “A few months before the publication of Schrödinger’s mechanics and its use in transformation theory, matrix mechanics was beset by difficulties of such magnitude than no one, including the authors themselves, considered it be more than a first step on a long path toward the ultimately correct theory. This was the main reason for the enthusiastic acceptance of Schrödinger theory: acclaim for Schrödinger theory was not limited to the conservative quarters of the physical community”.

⁶⁷ “As equações da nova mecânica indicavam que os elétrons atômicos não poderiam ser descritos utilizando-se conceitos e imagens descritivas do cotidiano, como posição, velocidade e órbita. Os elétrons não seriam *anschauliche* – literalmente, ‘visualmente descritíveis’” (CASSIDY, 1991, p. 227).

⁶⁸ Heisenberg (1996, pp. 77-85) reproduz um diálogo dele com Einstein em 1926, no qual este último demonstra suas primeiras restrições à mecânica quântica do modo como estabelecida pelos grupos de Göttingen e Copenhague. Segundo Heisenberg, ao defender que só “grandezas observáveis devem entrar numa teoria física”,

a *Anschaulichkeit*; em 1927, ele os restaurou. Em 1925, Heisenberg considerou as posições do elétron não-observáveis; em 1927, ele descreveu um experimento mental em que posição de um elétron dentro de um átomo pode ser medido. [Tais mudanças] foram uma resposta direta à mecânica ondulatória de Schrödinger⁶⁹.

Essa mudança pode ser confirmada indiretamente numa entrevista concedida ao filósofo Thomas Kuhn, onde Heisenberg afirma que a mecânica matricial foi formulada e apresentada sem nenhum comentário interpretativo:

Eu sempre senti que isso [i.e. o significado dos níveis e amplitudes energéticos em seu primeiro artigo sobre mecânica quântica (1925)] já deveria ser suficiente para dar a interpretação em todos os outros casos (...) eu senti “bem, agora é só uma questão de fazer as coisas corretamente”⁷⁰ (CUSHING, 1994, p. 115).

Ou seja, quando da criação da mecânica matricial, Heisenberg acreditava que a interpretação seria imanente ao formalismo, não necessitando ser explicitada – o que, pelo menos no que tange à criação da mecânica de matrizes, corrobora o esquema defendido por Reichenbach apresentado anteriormente (cf. supra p. 46).

Pauli, em carta a Ralf Kronig de outubro de 1925, demonstrava desconforto com a situação: “Deve-se livrar a mecânica criada por Heisenberg um pouco mais do dilúvio de erudição formal de Göttingen, e revelar seu núcleo físico⁷¹” (HERMANN, 1976, p. 33). Silvio Chibeni (2005, p. 181) assim descreve o problema que a nova mecânica colocava naquele momento:

Por mais que Bohr já viesse procurando justificar, por meio de argumentos diversos, a ruptura com a perspectiva realista típica da ciência até então, sentia-se difusamente que a elucidação do conteúdo físico da nova teoria não se poderia restringir ao mero fornecimento de regras de correspondência com os fenômenos, requerendo, ao menos a título de apoio heurístico, a introdução de elementos ontológicos mínimos.

Einstein teria objetado que “em princípio é um grande erro tentar fundamentar uma teoria apenas nas grandezas observáveis. Na realidade, dá-se exatamente o inverso. É a teoria que decide o que podemos observar” (*ibidem*, p.78). A influência dessa conversa com Einstein na formulação do princípio de indeterminação é admitida pelo próprio Heisenberg (*ibidem*, p.95).

⁶⁹ “The uncertainty paper represents a striking epistemological about-face to the original philosophical interpretation of matrix mechanics. If in the reinterpretation paper (1925) Heisenberg claimed that observable magnitudes dictate the structure of a theory, his uncertainty paper stated that the theory determines what can be observed. In 1925 Heisenberg eliminated classical space-time and *Anschaulichkeit*; in 1927 he restored them. In 1925 Heisenberg considered the position of the electron unobservable; in 1927 he described a thought experiment by which electron position within an atom could be measured. Heisenberg’s reversal was a direct response to Schrödinger’s wave mechanics”

⁷⁰ “I always felt that this [i.e., the meaning of the energy levels and amplitudes from Heisenberg’s (1925) first quantum mechanics paper] should already be sufficient to get the interpretation in all other cases, I knew that it had not been carried out, but I felt, ‘Well, that is now just a matter of doing things properly, then you will find out’...”

⁷¹ “The attempt must be made [...] to free Heisenberg’s mechanics somewhat more from Göttingen deluge of formal learning and to reveal its physical core even better”.

Segundo James Cushing (1994, p. 111) foi a “colisão” entre a mecânica matricial do grupo de Copenhague e Göttingen (e.g., Bohr, Born, Heisenberg, Pauli, juntamente com Dirac, uma espécie de “membro honorário”) e seus críticos (Einstein, Schrödinger, Planck e de Broglie) que forneceu o ímpeto para a construção de uma interpretação física consistente da mecânica quântica. A “revelação” do núcleo físico, ou seja, uma interpretação da teoria de Heisenberg, ansiada por Pauli, seria o produto desse confronto⁷². E, em pouco tempo, ela tomaria forma com base em um tripé formado pela interpretação probabilista da equação de onda realizada por Max Born; a reinterpretção da mecânica matricial, levada a cabo pelo próprio Heisenberg e que resultou no princípio de incerteza e, por fim, o princípio de complementaridade formulado por Bohr. Assim nasceu a Interpretação de Copenhague, a mais influente codificação da mecânica quântica.

2.10 O estabelecimento de uma interpretação ortodoxa

Na busca por uma interpretação adequada, Heisenberg chega a afirmar que as “longas discussões com Bohr, até altas horas da noite, (...) acabavam quase em desespero” (HEISENBERG, 1995, p. 37). Ele mesmo chegou a questionar se “pode a Natureza ser tão absurda como nos tem parecido nessas experiências com os átomos?” (HEISENBERG, 1995, p. 37). Já se deslindava no horizonte dessas discussões as diferenças na abordagem entre os dois físicos. “Bohr”, nas palavras de Heisenberg, “tentava admitir a existência simultânea de partículas e ondas, afirmando que, embora os dois conceitos fossem mutuamente excludentes, ambos eram necessários para uma descrição completa dos processos atômicos” (HEISENBERG, 1996, p. 94). Surgia de modo mais explícito a idéia de complementaridade. Já Heisenberg atacava o problema por outro viés: “eu queria partir do fato de que a mecânica quântica, tal como a conhecíamos na época, já impunha uma interpretação física singular de certas grandezas que nela ocorriam (...) de modo que já não tivéssemos nenhuma liberdade no que dizia respeito a essa interpretação” (HEISENBERG, 1996, p. 94). Heisenberg insistia em seu distanciamento da mecânica ondulatória e adotava como pontos de partida apenas a mecânica quântica e a teoria de transformação de Dirac (MEHRA, 1987, p. 494).

⁷² Segundo Mara Beller (1999, p. 195): “desde o início, a interpretação ortodoxa e seu formalismo foram desenvolvidos para defender o passado de façanhas que Schrödinger ameaçava solapar e, através de sua legitimação filosófica, proteger o programa de pesquisa do eixo Göttingen-Copenhague de qualquer objeção ou alternativa” (“From the beginning, the orthodox interpretation and formalism itself were developed to defend the past achievements that Schrödinger threatened to undermine and, through its philosophical legitimation, to protect the Göttingen-Copenhague research program against any challenge or alternative”).

Em Göttingen, Max Born propôs que a função de onda fornecia uma densidade de probabilidade de localização da partícula, isto é, a localização de uma partícula não seria mais determinável por valores bem definidos em cada instante, como era na mecânica newtoniana. A probabilidade de detectar a partícula seria proporcional ao quadrado da amplitude da onda associada a uma dada região do espaço. “Essa onda não era tridimensional, como as elásticas e de rádio, mas uma onda em um espaço de configuração multidimensional e, portanto, uma quantidade matemática um tanto abstrata” (HEISENBERG, 1995, p. 36). Schrödinger desde o início da mecânica ondulatória tentou dar uma interpretação realista da função χ , por isso rejeitou o trabalho de Born. A princípio, o físico austríaco chegou a julgar que $|\chi|^2$ representava um tipo de densidade da carga elétrica distribuída pelo átomo. Mas, essa imagem do elétron não pareceu compatível com o que se observava nos experimentos. Contudo, sua tendência realista permaneceu no decorrer dos anos. James Cushing (1994, p. 105) a resume como a postura de quem “toma a compreensibilidade dos processos externos na natureza como sendo um axioma⁷³”.

Os intensos debates em Copenhague só se arrefeceram em fevereiro de 1927. Os dois contendores, Heisenberg e Bohr, viam-se diante de um sem número de problemas, a princípio, insolúveis. Bohr decidiu afastar-se, partindo para a Noruega. Heisenberg persiste em seus trabalhos:

Concentrei meus esforços na representação matemática da trajetória do elétron na câmara de nuvem [câmara de Wilson], e logo percebi que os obstáculos diante de mim eram mesmo insuperáveis. Comecei a me indagar se não estávamos fazendo o tipo errado de pergunta o tempo todo. Mas, onde teríamos errado? O percurso do elétron na câmara de nuvem obviamente existe; podia-se observá-lo. O esquema matemático da mecânica quântica também existia, e era convincente demais para admitir qualquer mudança. Deveria ser possível estabelecer uma ligação entre os dois, mesmo que isso contrariasse as aparências externas (HEISENBERG, 1996, p.95).

A saída só surgiu quando Heisenberg se lembrou de seu diálogo com Einstein, em 1926 (cf. supra, p. 48, nota 70): “é a teoria que decide o que podemos observar”, afirmou Einstein naquela ocasião. É deste ponto que Heisenberg deriva as primeiras relações de incerteza, expressões matemáticas que exprimem quantitativamente o *Princípio de Incerteza* (HEISENBERG, 1995, p. 37): uma formulação quantitativa do problema da interação entre o aparato que realiza a medida e os objetos quânticos, como um elétron.

⁷³ “He took the comprehensibility of the external process in nature to be an axiom.”

Assim Heisenberg (1996, p. 96) descreve *ex post facto* o raciocínio que o levou ao princípio de indeterminação:

Sempre disséramos, com um fácil desembaraço, que a trajetória do elétron na câmara de nuvens podia ser observada. Mas o que realmente observamos talvez fosse muito menos que isso. Talvez víssemos apenas uma série de pontos distintos e mal definidos, pelos quais o elétron havia passado. Na verdade, tudo o que víamos na câmara de nuvem eram gotículas de água isoladas, elas mesmas muito maiores que o elétron. As perguntas corretas, portanto, seriam: pode a mecânica quântica representar o fato de que um elétron se encontra aproximadamente (ou seja, com uma certa imprecisão) num determinado lugar e se move aproximadamente (de novo, com uma certa imprecisão) com determinada velocidade? Podemos tornar essas aproximações tão estritas que elas não provoquem dificuldades experimentais?

A ligação entre as informações experimentais e a matemática da mecânica quântica foi então estabelecida. As relações de incerteza puderam, então, ser expressas como a impossibilidade em especificar simultaneamente a posição e a velocidade exatas de uma partícula. A maior precisão nos resultados de medida de uma das grandezas implica a menor precisão na medida da outra grandeza. Nas palavras de Heisenberg (1995, p. 37):

contrariamente ao que ocorre na mecânica de Newton, não se pode medir simultaneamente aquelas grandezas com alta precisão arbitrariamente. De fato, o produto das duas imprecisões em suas medidas resultou não ser menor que a constante de Planck dividida pela massa da partícula. (...) e assim aprendeu-se que os velhos conceitos não se adequam à Natureza de maneira exata⁷⁴.

Heisenberg especificou um limite para se definirem com exatidão certas propriedades dinâmicas dos objetos em questão, pois eles apresentariam aspectos ondulatórios que dificultam a mensuração de certas grandezas:

A relação de incerteza especifica limites para a aplicação de imagens corpusculares. Qualquer uso das palavras ‘posição’ e ‘velocidade’ com uma precisão que exceda a dada pela equação $\Delta x \Delta p_x \geq h$ é tão sem sentido como palavras no qual o significado não é definido⁷⁵ (HEISENBERG, 1949, p. 15).

Assim que Bohr voltou da Noruega, ele e Heisenberg voltaram a uma nova série de discussões. Bohr, em prosseguimento a intuições que vinham de longa data, mostrou maior

⁷⁴ Na visão de mundo determinista da física clássica, é necessário conhecer exatamente a posição e o momento de uma partícula para prever sua futura evolução. Já para a mecânica quântica, segundo David Bohm, o indeterminismo é inerente à estrutura da matéria, o que impossibilita uma descrição determinista da realidade (BOHM, 1951, pp.99 –101).

⁷⁵ “This uncertainty relation specifies the limits within which the particle picture can be applied. Any use of the words ‘position’ and ‘velocity’ with an accuracy exceeding that given equation $\Delta x \Delta p_x \geq h$ is just meaningless as the use of words whose sense is not defined.”

clareza em suas idéias acerca do dualismo onda-partícula. Nas palavras de Heisenberg (1996, p. 97) era central no pensamento de Bohr

o conceito de complementaridade que ele acabara de introduzir para descrever a situação em que é possível apreender um mesmo acontecimento por dois modos de interpretação distintos. Esses dois modos são mutuamente excludentes, mas também complementam um ao outro, e é somente através de sua justaposição que o conteúdo preceptivo de um fenômeno revela-se em sua plenitude.

Heisenberg, por sua vez, apresentou o princípio de incerteza, que acabou por receber uma série de objeções por parte de Bohr. Apenas posteriormente Bohr acabou aceitando, segundo Heisenberg, que “não havia nenhuma divergência séria entre as duas interpretações” (HEISENBERG, 1996, p. 97).

Segundo Gerald Holton (1984, p. 58), a complementaridade seria uma conciliação entre a Mecânica Matricial – que privilegiava as discontinuidades, o caráter corpuscular e não fornecia nenhum tipo de visualização do mundo atômico – e a Mecânica Ondulatória que, por sua vez, enfatizava os aspectos ondulatórios e contínuos dos processos atômicos, além de trabalhar com possibilidade de visualização deles. Ambas são consideradas “como representações válidas da natureza” (HOLTON, 1984, p. 58), sem que uma fosse redutível a outra. Essas representações “não seriam encontradas no mesmo plano de foco num dado momento” e nem deveriam ser “transformados em alguma nova entidade”. Faz-se uma escolha entre os dois a partir “da questão experimental ou teórica pela qual alguém se decide” (HOLTON, 1984, p. 58).

No outono de 1927, o assunto foi debatido para um público mais amplo no Congresso Internacional de Física, em Como na Itália – onde Bohr apresentou a Complementaridade⁷⁶ – e em Bruxelas, no Quinto Congresso de Solvay. Este último, cujo tema era “Elétrons e Fótons”, contou com a presença de todos os fundadores da teoria quântica: Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Heisenberg, Schrödinger e Dirac. Foi o primeiro fórum onde as idéias desenvolvidas pelo eixo Göttingen-Copenhague estariam expostas às críticas de físicos que não partilhavam dos mesmos pressupostos. Como resultado, o Quinto Congresso de Solvay acabou marcado pelos intensos debates entre Bohr e Einstein que “tiveram lugar, não só no salão de conferências, mas também às refeições” (HEISENBERG, 1996, p. 97). Era o confronto entre as duas figuras mais proeminentes da física na época, ambas com opiniões opostas acerca da interpretação correta da teoria quântica. A base da

⁷⁶ A conferência foi publicada no ano seguinte, após Bohr rescrevê-la, com o título de “O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica”. Foi reimpressa em **Atomic theory and the description of Nature**, de 1934. Nesta dissertação foi utilizada a tradução de Osvaldo Pessoa Jr. (BOHR, 2000).

discordância de Einstein com a mecânica quântica ainda não é um ponto pacífico na literatura especializada. Para Harvey Brown (1981, p. 69), desde o início da disputa, Einstein tinha como objetivo demonstrar a incompletude da nova mecânica. Já para Abraham Pais (1995, p. 533), só a partir de 1931 Einstein questiona a completeza da teoria, isto é, ela não estaria errada, mas não poderia ser considerada acabada, isenta de desenvolvimentos futuros. Antes de 1931, ele a considerava como inconsistente.

A interpretação probabilista dos fenômenos quânticos – na qual as probabilidades não são meramente epistêmicas, como na termodinâmica, e sim uma característica inerente aos objetos quânticos – levou Einstein a acreditar que a mecânica quântica era uma teoria inconsistente. “Assim, ele se recusou a aceitar o princípio da incerteza e procurou pensar em casos em que este não fosse válido” (HEISENBERG, 1996, p. 98). Tradicionalmente, a Conferência de Solvay é vista como o estabelecimento da hegemonia do grupo de Copenhague como o portador da única interpretação correta da teoria quântica⁷⁷. Desse ponto de vista, Bohr é apontado como o vitorioso na contenda com Einstein. Não surpreende, então, que Heisenberg (1996, p. 113) se refira aos cinco anos que se seguiram ao Congresso de Solvay como

[...] a fase áurea da física atômica. Os grandes obstáculos que nos anos anteriores haviam ocupado os nossos esforços foram eliminados (...) além disso, a nova física parecia ser imensamente superior à antiga sob muitos aspectos, inclusive o filosófico; em sentidos que precisavam ser investigados mais de perto, parecia muito mais ampla e mais rica.

A *Interpretação de Copenhague*, segundo Heisenberg, é consolidada nessa época. Ela, sem dúvida, pode ser considerada a mais influente das interpretações da teoria quântica, tendo ares de filosofia oficial quando se trata do mundo dos quanta. Sua influência é tão grande que ultrapassou em muito os limites da física, a ponto de muitos confundirem a interpretação ortodoxa (outra maneira de designá-la) com a própria teoria quântica. Não é possível encará-la como uma doutrina monolítica, com teses fixas e bem sistematizadas. Por uma questão de simplicidade, ela pode ser considerada como o conjunto de preceitos formulados por Bohr, Heisenberg, Born, Dirac, Pauli e Léon Rosenfeld (1904-1974). Tais nuanças não significam que eles não comungassem, em diversos graus, certos princípios básicos, dentre eles podemos destacar (PESSOA Jr., 2005, pp. 97 e 98):

⁷⁷ Entre 1924 e 1927, de Broglie desenvolveu uma teoria dualista dos fenômenos quânticos que, “apesar de sua elegância e visualização” (PESSOA Jr., 2006, p. 235) acabou sendo abandonada após as críticas apresentadas por Pauli em Solvay.

- a) *O postulado quântico*: Em sua apresentação em Como, Bohr insistiu na diferença profunda entre a física clássica, na qual a descrição de um estado físico sofre uma pequena interferência por parte do observador, e a física dos quanta, em que, por outro lado, não se pode desconsiderar que o estado de um sistema não pode ser descrito sem se levar em conta a própria observação. A interação entre os átomos observados e o instrumento utilizado na observação segue o postulado quântico. Segundo o físico dinamarquês, em sua apresentação em Como, em 1927:

Apesar das dificuldades que, portanto, estão envolvidas na formulação da teoria quântica, parece (...) que sua essência pode ser expressa no chamado postulado quântico, que atribui a qualquer processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade, completamente estranha às teorias clássicas e simbolizada pelo quantum de ação de Planck (BOHR, 2000, p. 136).

- b) *É impossível controlar os distúrbios provocados nos objetos quânticos pela observação*: No nível macroscópico, um sistema em observação pode ser considerado fechado, pois a interação entre ele e o aparato utilizado na observação é insignificante. Por sua vez, na descrição de um fenômeno quântico não pode se ignorar tal interação. Em consonância com essa tese, para Heisenberg (1995, p. 46)

O ato de observação, por si mesmo, muda a função de probabilidade de maneira descontínua; ele seleciona, entre todos os eventos possíveis, o evento real que aconteceu. Visto que, pela observação, nosso conhecimento do sistema mudou descontinuamente, sua representação matemática também sofreu essa descontinuidade. E falamos, então, de um “salto quântico”.

Tal afirmação, de tom instrumentalista, acaba por fazer eco a outra, de Bohr (2000, p. 136);

De fato, nossa descrição usual de fenômenos físicos é baseada inteiramente na idéia de que os fenômenos envolvidos podem ser observados sem que se provoque um distúrbio apreciável sobre eles (...) Agora, o postulado quântico implica em que qualquer observação de fenômenos atômicos envolverá uma interação com o agente da observação que não deve ser desprezada.

A experiência mental do microscópio de raios gama, elaborada por Heisenberg, ilustra perfeitamente a interação entre “o sistema em observação” – o objeto – e a “operação ou equipamentos usados para fazer a observação” (HOLTON, 1984, p.50).

- c) *A Complementaridade*: nas palavras de seu criador (BOHR, 2000, p. 138):

Os dois pontos de vista sobre a natureza da luz [corpúscular e ondulatório] devem ser considerados, mais exatamente, como tentativas diferentes de se interpretar a evidência experimental, nas quais a limitação dos conceitos clássicos é expressa de maneiras complementares (...) Exatamente como no caso da luz, temos conseqüentemente, no caso da natureza da matéria, enquanto aderimos a conceitos clássicos, que enfrentar um dilema inevitável que tem que ser considerado como a própria expressão da evidência experimental. De fato, estamos aqui novamente tratando não de representações contraditórias dos fenômenos, mas representações complementares, que somente juntas oferecem uma generalização natural do modo clássico de descrição.

Desde os artigos de Einstein e de Planck no início do século XX, existia um grande mal-estar entre a comunidade dos físicos quanto à real natureza da luz. A expectativa era que uma das duas descrições antitéticas seria, inevitavelmente, reduzida a outra, resolvendo o dilema. Para Bohr esse não seria o caminho a seguir. Sua opinião é melhor compreendida quando se conhece sua noção de fenômeno como “a descrição daquilo que deve ser observado e do equipamento usado para obter a observação” (HOLTON, 1984, p. 51). A partir disso, e somando-se o dado de que diferentes arranjos dos aparatos de observação fornecem diferentes representações dos eventos observados, chega-se à noção de complementaridade. Bohr propõe que essas diferentes descrições dos fenômenos quânticos não devem ser simplificadas ou dissolvidas uma na outra, mas sim vistas como *complementares*, tendo em vista uma unidade essencial, ou nas palavras dele mesmo:

Os dados obtidos em diferentes condições experimentais não podem ser compreendidos dentro de um quadro único, mas devem ser considerados complementares, no sentido de que só a totalidade dos fenômenos esgota as informações possíveis sobre os objetos (BOHR, 1995, p. 51).

Apenas em 1935, em resposta às críticas de Einstein, Bohr aprofundou suas idéias acerca do que seria um fenômeno no nível quântico. Surge a noção de totalidade, que considera como fenômeno não só objeto quântico, mas também toda a aparelhagem de medição utilizada. Desse modo, diferentes arranjos experimentais provêm diferentes resultados, o que não significa que exista um deles que seja mais real ou adequado que o outro⁷⁸. Gerald Holton, em seu artigo sobre as raízes intelectuais da complementaridade, assim sintetiza a solução de Bohr para a incompatibilidade entre as diferentes representações dos objetos quânticos:

⁷⁸ “Um sistema quântico ou exibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo” (PESSOA Jr., 2005, p. 18).

Não se pode realizar um experimento que simultaneamente mostre aspectos da partícula e da ondulação da matéria atômica. Um determinado experimento sempre mostrará somente uma visão ou representação de objetos em nível atômico (...) portanto, condições experimentais diferentes resultam em diferentes visões da “natureza” (HOLTON, 1984 pp. 51 e 52).

d) *Completeza*: O caráter estatístico da teoria quântica não implica que ela seja incompleta. Não existe a necessidade de se pensar na existência de “variáveis ocultas” que “determinariam o resultado da experiência à maneira clássica causal” (HEISENBERG, 1995, p. 100). No livro *Mathematical foundations of quantum mechanics*, de 1932, John von Neumann (1903-1957) apresentou uma forma axiomatizada da mecânica quântica. Uma de suas conclusões foi a impossibilidade matemática de completar a descrição do mundo dada pela teoria quântica:

Não se trata, portanto, como é muitas vezes suposto, de uma questão de reinterpretação da Mecânica Quântica, – o sistema atual da Mecânica Quântica teria de ser objetivamente falso, para que outra descrição dos processos elementares que não a estatística fosse possível (VON NEUMANN, 1955, p.325 apud CUSHING, 2000, p.3).

Em 1935, Hermann Grete, estudante orientada por Heisenberg, apresentou um artigo no qual argumentava que a “prova” de von Neumann era falha. Até mesmo Pauli defendeu que não existia uma prova de impossibilidade do uso de variáveis ocultas (BELLER, 1999, p. 213). Contudo, a força dos argumentos apresentados por von Neumann e sua pronta aceitação entre a maioria dos físicos acabaram por garantir o estabelecimento definitivo da interpretação de Copenhague como a “filosofia” oficial da teoria quântica nos 20 anos seguintes. Além disso, serviu como argumento definitivo contra a formulação de teorias que utilizassem variáveis ocultas, reforçando, para grande parte dos físicos, a idéia de que era impossível uma teoria determinista para a Mecânica Quântica. Apenas na década de 1950, com as críticas de físicos soviéticos como Dimiitri Blokhintsev (1908-1979) e da criação de uma teoria de variáveis ocultas por David Bohm foi que a prova de von Neumann começou a ser problematizada.

Outras características da Interpretação de Copenhague (PESSOA Jr., 2005, pp. 97 e 98), seriam: o recurso exclusivo à grandezas observáveis,⁷⁹ o indeterminismo como fator

⁷⁹ “Não podemos observar as órbitas dos elétrons no átomo (...), mas a radiação que um átomo emite durante as descargas permite-nos deduzir as frequências de oscilação de seus elétrons e as amplitudes correspondentes. Afinal, até na física antiga os números de onda e amplitudes podiam ser considerados substitutos das órbitas dos elétrons. Ora, como uma boa teoria deve basear-se em grandezas diretamente observáveis, achei mais apropriado restringi-me a estas, tratando-as, por assim dizer, como representantes das órbitas dos elétrons” (HEISENBERG, 1996, p. 78).

inerente ao mundo subatômico⁸⁰ e a inadequação do esquema espaço-temporal clássico na descrição dos fenômenos quânticos.⁸¹ Pode-se considerar que um caráter fortemente anti-realista⁸² perpassa os princípios anteriores. Ele é resumido numa frase de Bohr (2000, p. 136): “Uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes da observação”.

Para muitos, e especialmente Einstein, a renúncia a um quadro conceitual clássico para os eventos reais fazia da teoria algo inaceitável. Em 1930, no Sexto Congresso de Solvay, Einstein volta à carga e, assim como em 1927, os debates mais intensos ocorreram fora das seções oficiais (BROWN, 1981, p. 67). Um aprofundamento das críticas foi exposto em 1935, no artigo “A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?”, assinado por Einstein juntamente com dois colegas: Boris Podolsky (1896-1966) e Nathan Rosen (1909-1995) e conhecido pela sigla “EPR”. É emblemática a frase de abertura do artigo, de forte cunho realista:

Qualquer consideração séria a respeito de uma teoria física deve levar em conta a diferença entre a realidade objetiva, que independe de qualquer teoria, e os conceitos físicos com os quais a teoria opera. Pretende-se que tais conceitos tenham correspondência com a realidade objetiva, e por meio deles construímos uma imagem dessa realidade (EINSTEIN, PODOLSKY e ROSEN, 1981, p. 90).

O fulcro do texto era demonstrar que o formalismo quântico, apesar de correto e consistente, era incompleto, pois ele contradizia a localidade, ou seja, a idéia de que “elementos concernentes a um sistema não podem ser afetados por medições realizadas ‘a distancia’ em outro sistema” (REDHEAD, 1987, p. 70). Defender a completeza da mecânica quântica teria como consequência, estando o argumento EPR correto, a volta do conceito de simultaneidade na troca de informação entre dois sistemas físicos que, apesar de restrita a

⁸⁰ “Na Teoria Quântica é o princípio de causalidade, ou mais precisamente o do determinismo, que dever ser abandonado e substituído por outra coisa (...) temos agora *uma nova forma* de lei de causalidade (...) é a seguinte: se em um certo processo as condições iniciais forem determinadas tão acuradamente quanto o permitido pelas relações de incerteza, então as probabilidades de todos os estados subsequentes possíveis são governados por leis exatas” (BORN, 1951, pp. 155, 163 e 164) (“Here in the quantum theory it is the *principle of causality*, or more accurately that of *determinism*, which must be dropped and replaced by something (...) We now have *a new form* of the advantage of explaining the objective validity of statistical laws. It is as follows: if in a certain process the initial conditions are determined as accurately as the uncertainty relations permit, then the probabilities of all possible subsequent states are governed by exact laws”)

⁸¹ “Por contraste com a mecânica ordinária, a nova mecânica quântica não lida com uma descrição espaço-temporal do movimento das partículas atômicas. (...) as dificuldades [de se construírem representações de interações entre átomos e radiação] parecem requerer justamente aquela renúncia de modelos mecânicos no espaço e tempo que é um aspecto tão característico na nova mecânica quântica” (BOHR, 2000, p. 99).

⁸² Sobre a adoção de teses anti-realistas por parte da comunidade dos físicos, vale ressaltar a opinião de Silvio S. Chibeni (1992, p. 143) sobre o assunto: “Simpatizo com a tese de que tais concessões anti-realistas raramente são efetivamente levadas em conta quando os cientistas estão fazendo *hard work*”.

magnitudes microscópicas, inaccessíveis para o experimentador, era algo inadmissível após a relatividade restrita (BROWN, 1981, p. 73). Por isso, os autores rematam o artigo com a seguinte afirmação: “Somos forçados a concluir que a descrição quântica da realidade física através das funções de onda não é completa” (EINSTEIN *et al*, 1981, p. 90).

O próximo capítulo será dedicado a uma exposição minuciosa dos argumentos e idéias referentes às doutrinas e termos advindos da filosofia grega segundo às concepções de Werner Heisenberg. A análise deverá se ater às relações, analogias, semelhanças e diferenças por ele estabelecidas entre os conceitos filosóficos gregos e a física quântica. O que pode parecer um recorte mínimo (e de fato o é) na extensa obra do físico alemão, oferece, quando contextualizado no dinâmico desenvolvimento histórico da mecânica quântica, a possibilidade de se compreender como a Interpretação de Copenhague foi construída e legitimada por um de seus principais artífices.

3 FILOSOFIA E HISTÓRIA DA CIÊNCIA SEGUNDO WERNER HEISENBERG

É inegável a influência que o discurso de Bohr e Heisenberg teve sobre a comunidade dos físicos a partir de fins da década de 1920. Segundo eles e vários outros, notadamente Leon Rosenfeld, a teoria quântica estava completa, apesar do rompimento com certos parâmetros dos mais caros à física clássica. O processo de disseminação das idéias de Bohr e de seu grupo, tendo como marco o Congresso de Solvay em 1927, estendeu-se até a década de 1930, sendo reforçado com a leva de físicos norte-americanos que chegava até os centros difusores da ortodoxia na Europa: Copenhague, Göttingen e Cambridge. O estilo pragmático dos físicos americanos e seu distanciamento, até mesmo desprezo, frente a questões filosóficas, só contribuíram ainda mais para uma aceitação passiva da interpretação *standard* da teoria quântica (CUSHING, 1994, pp. 121 e 123).

O papel de Heisenberg nesse processo de consolidação do “espírito de Copenhague” a partir de Solvay é notável. Sua confiança é demonstrada numa carta datada do último dia do Congresso: “No que diz respeito aos resultados científicos, estou completamente satisfeito. Os pontos de vista meus e de Bohr têm sido geralmente aceitos; ao menos objeções sérias não têm sido mais feitas, nem mesmo por Einstein ou Schrödinger⁸³” (citado por CASSIDY, 1991, p. 254). Com a ampla aceitação de seus preceitos entre a comunidade de físicos da Europa, Bohr e Heisenberg iniciaram a propagação de suas idéias em outros campos. Bohr, durante a década de 1930, ministrou palestras para os públicos dos mais variados, relacionando a complementaridade com um sem-número de temas. Em 1933, ele proferiu a palestra “Luz e vida” na abertura do Congresso Internacional sobre Terapias através da Luz. Já em 1937, participou do Congresso de Física e Biologia em Bolonha e, um ano depois, discursou no Congresso Internacional de Ciências Antropológicas e Etnológicas, em Copenhague, discorrendo sobre “Filosofia natural e culturas humanas”⁸⁴.

Heisenberg, por sua vez – e a princípio para platéias mais especializadas – seguiu os rumos de Bohr, e, em 1929, realizou uma série de palestras pelos Estados Unidos, Japão, China e Índia. As preleções na Universidade de Chicago serviram como base para seu primeiro livro, *The physical principles of Quantum Mechanics* (HEISENBERG, 1949).

⁸³ “I am very satisfied in every respect with the scientific result. Bohr’s and my views have been generally accepted. At least serious objections are no longer being made, not even by Einstein and Schrödinger.”

⁸⁴ Todos os referidos artigos foram publicados em *Atomic physics and human knowledge*, de 1957 (BOHR, 1995).

Segundo David Cassidy, além de ser um dos textos mais influentes na disseminação do “Kopenhagener Geist der Quantumtheorie“ – sendo este o propósito do livro, nas palavras do próprio autor – ele é marcado pelo peso da influência de Bohr (CASSIDY, 1991, p. 265). Foi o ponto de partida da prolífica carreira de Heisenberg como palestrante, o que gerou grande parte de sua obra de caráter filosófico. Tal atividade, que atingiu desde públicos dos mais especializados em física até outros praticamente leigos, permaneceu como uma constante para Heisenberg até seus últimos anos de vida. Os artigos filosóficos daí resultantes carecem de certa sistematicidade, pois são “sempre feitos sob medida para o consumo público, sendo deste modo motivados pelos objetivos pessoais [de Heisenberg] perante cada audiência particular⁸⁵” (CASSIDY, 1991, p. 255). Apesar dessa patente assistematicidade, o efeito propagandístico dessas palestras e artigos é imenso. Sem dúvida, foi uma das bases para o estabelecimento da hegemonia do “espírito de Copenhague” não entre os físicos, mas principalmente entre públicos mais amplos que acabaram por identificar a Interpretação de Copenhague com a física quântica.

3.1 Heisenberg e a filosofia grega

Nesse *corpus* textual, a referência à cultura clássica, especialmente aos filósofos gregos, é uma constante. Segundo o próprio cientista, desde jovem ele havia se convencido de que dificilmente “podemos ocupar-nos de física atômica sem conhecermos a filosofia grega” (HEISENBERG, 1962, p. 60). Sua crença nessa afirmação pode ser facilmente corroborada com alguns exemplos. Inúmeras páginas do conhecido livro *Física e filosofia* são dedicadas à comparação entre o desenvolvimento filosófico grego do conceito de átomo e as modernas teorias atômicas (HEISENBERG, 1995, pp. 49-60). De analogias gerais e vagas, como aproximar o conceito de “energia” na física moderna com o “fogo” de Heráclito (HEISENBERG, 1995, p. 52), até comparações notáveis do ponto de vista heurístico, como o vínculo estabelecido entre a *potencia* aristotélica e as ondas probabilistas de Born, Kramers e Slater (HEISENBERG, 2004, p.16), a filosofia helênica surge em profusão nos textos de Heisenberg. O aspecto mais instigante dessa reverência frente aos clássicos, é que a filosofia grega constantemente é relacionada com algum problema da ciência contemporânea. Pode-se encontrar uma comparação entre a teoria platônica dos sólidos geométricos apresentada no

⁸⁵ “Some readers have not fully appreciated that Heisenberg’s systematic philosophical pronouncements were always tailored for public consumption and were thus informed and motivated to a great extent by his personal aims in addressing each particular audience”

Timeu e a moderna teoria das partículas elementares. E, em contraponto, Heisenberg aproxima o atomismo de Leucipo e Demócrito ao materialismo, imediatamente anterior à teoria quântica (HEISENBERG, 1995, pp. 49 – 60). A intuição do jovem Heisenberg relativa às ligações entre filosofia antiga e ciência moderna o acompanhou durante toda sua vida, como a própria obra dele evidencia.

No entanto, antes de se abordar os textos de Heisenberg, faz-se necessário esclarecer as fontes do seu interesse nos pensadores gregos de mais de dois mil anos. A formação cultural de Heisenberg, assim como o contexto intelectual no qual se situa sua obra científica, podem fornecer dados que esclareçam o porquê dos pensadores gregos serem, em muitos trechos de sua obra, seus principais interlocutores.

3.1.1 A formação cultural de Heisenberg

No dia 13 de julho de 1949, Heisenberg retornou à instituição na qual havia cursado o liceu, o *Maxmilians Gymnasium* em Munique, e proferiu uma palestra intitulada “Naturwissenschaft und humanistische Bildung” – “Ciência Natural e formação cultural humanista”. A palestra pretendia defender que, mesmo num mundo marcado pelo predomínio da ciência e da técnica, uma formação humanística baseada no estudo da história antiga e das letras clássicas, assim como foi a de Heisenberg, não poderia ser descartada como “um luxo, que só podem permitir-se uns poucos para quem o destino tornou a luta pela vida mais fácil do que para os outros” (HEISENBERG, 1962, p. 62). O que poderia ser apenas um panegírico dedicado à escola onde passara sua juventude, torna-se a oportunidade para Heisenberg defender que “a ciência pode tirar benefícios da cultura humanística”, pois

Quem queira chegar até ao fundo das coisas em qualquer especialidade (...) se chocará com aquelas fontes antigas e daí tirará grandes benefícios para o seu próprio trabalho, por ter aprendido com os gregos a pensar de uma maneira geral, a transportar os problemas para o plano teórico (HEISENBERG, 1962, p. 63).

O currículo do *Maxmilians Gymnasium* – que era dirigido por Nicolaus Wecklein, avô materno de Heisenberg –, no início do século XX, incluía o ensino do Grego e do Latim Clássicos. O último ano de estudos, por exemplo, era pautado pela leitura de Sófocles, Homero e de alguns diálogos platônicos: *Apologia de Sócrates* e trechos do *Fédon* e do *Banquete* (HERMAN, 1976, p. 12).

O contato de Heisenberg com textos clássicos não se limitava às obrigações estudantis. Em seu livro de memórias, *A parte e o todo*, as reminiscências de uma conversa com colegas sobre átomos e filosofia são entremeadas pelo relato da primeira leitura de Heisenberg, utilizando-se de seus “modestos conhecimentos de Grego” (HEISENBERG, 1996, p. 16), do *Timeu* de Platão e da teoria sobre a estrutura fundamental da matéria.

Concomitante a esse contato intensivo com a cultura clássica, o currículo do *Gymnasium* oferecia matemática e física. Assim como nos estudos clássicos, o interesse de Heisenberg ultrapassava os limites do currículo escolar. Segundo Antônio Piza, Heisenberg, com 19 anos e antes de iniciar os estudos universitários, já “havia aprendido por conta própria o Cálculo Diferencial e Integral, que não fazia parte do currículo regular (...) e gostava de montar aparelhos, o que fazia com considerável habilidade” (PIZA, 2003b, pp. 73 e 74).

Essa conjunção rara de interesses humanísticos, técnicos e matemáticos pode ser explicada, em parte, pela família de Heisenberg. Seu pai, August Heisenberg, tornou-se, em 1910, o único a ocupar uma cadeira de Filologia Bizantina em toda Alemanha. Sua produção acadêmica abrangia desde trabalhos de paleografia até estudos acerca da literatura e história do Império Bizantino. O avô, além de diretor do *Gymnasium* em Munique, chegou a ser um reconhecido especialista em Tragédia grega, mas fracassou nas suas tentativas de ingressar definitivamente na carreira acadêmica (CASSIDY, 1991, p. 8).

Para além do âmbito familiar, pode-se situar a formação cultural do jovem Heisenberg no contexto intelectual da Alemanha anterior à Grande Guerra, um caso raro de convergência de duas das mais significativas forças acadêmicas do século XIX. De fato, em Heisenberg, a filologia clássica germânica do século XIX (fundada por Friedrich August Wolf (1759-1824) e consolidada pelos trabalhos monumentais de Wilamowitz-Moellendorff (1848–1931)) e a física alemã (representada por nomes como Hermann von Helmholtz (1821-1894), Max Planck e Gustav Kirchhoff) fundiram-se na formação de uma única pessoa.

3.1.2 O contexto intelectual da obra de Heisenberg: os debates acerca da mecânica quântica

O segundo fator que pode esclarecer o interesse de Heisenberg pela filosofia grega é a situação da física da época. Conforme visto no capítulo anterior, o desenvolvimento da mecânica quântica nas primeiras décadas do século XX abriu espaço para a elaboração de um sem-número de interpretações possíveis para ela. Mas o que levou a essa circunstância?

Uma das maneiras de se entender esse movimento inflacionário de interpretações discordantes acerca da mecânica quântica é a partir da noção de *crise* apresentada por Thomas Kuhn em *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Segundo ele,

é sobretudo nos períodos de crises reconhecidas que os cientistas se voltam para a análise filosófica como um meio para resolver as charadas de sua área de estudos (...) Não é por acaso que a emergência da física newtoniana no século XVII e da Relatividade e da Mecânica Quântica no século XX foram precedidas e acompanhadas por análises filosóficas fundamentais da tradição de pesquisa contemporânea (KUHN, 2000, pp.119 e 120)

Não interessa, no escopo deste trabalho, avaliar se a concepção de história da ciência defendida por Kuhn se adequa como um todo aos desenvolvimentos da física do século XX. Entretanto, sua noção de crise parece refletir a atitude de inúmeros cientistas diante da ruptura que os trabalhos de Planck e Einstein instauraram nos fundamentos da física no século XX.

A crença geral dos cientistas quanto ao estágio de desenvolvimento da física em fins do século XIX pode ser ilustrada pelas palavras de Albert Michelson (1852-1931): “é provável que a maior parte dos grandes princípios básicos [da física] tenha sido firmemente estabelecida⁸⁶ e os próximos avanços sejam encontrados, sobretudo na rigorosa aplicação destes princípios a todos os fenômenos dos quais tenhamos notícia⁸⁷” (KRAGH, 2002, p. 3).

Pouco mais de 30 anos depois, Heisenberg, um dos líderes de uma nova geração de físicos, parecia não partilhar desse otimismo. Ele se refere ao ano de 1925 nos seguintes termos: “A teoria quântica de Planck era, naqueles dias, não uma teoria mas um estorvo. Ao bem fundado edifício da física clássica, ela trouxe idéias que levaram, em muitos pontos, a dificuldades e contradições⁸⁸” (HEISENBERG, 1989, p. 37 e 38). Para Niels Bohr, dezesseis anos mais velho que Heisenberg, a situação dos alicerces da física clássica também não ficaram mais tão “firmemente estabelecidos” após a descoberta de Planck. Segundo Heisenberg, a opinião de Bohr, sobre a situação da física clássica naquele momento era a seguinte:

A existência de substâncias uniformes, de corpos sólidos, depende da estabilidade dos átomos; é por isso que uma válvula eletrônica, enchida com determinado gás, sempre emite luz de uma mesma cor, com um espectro que tem exatamente as

⁸⁶ A ironia de tal observação é óbvia: o próprio experimento Michelson–Morley, que rendeu a Michelson o prêmio Nobel de 1907, foi crucial no desenvolvimento da teoria da relatividade restrita.

⁸⁷ “It seems probable that most of the grand underlying principles have firmly established and that further advances are to be sought chiefly in rigorous application of these principles to all phenomena which come under our notice.”

⁸⁸ “Planck’s quantum theory, in those days, was really not a theory, but an embarrassment. Into the well-founded edifice of classical physics it brought ideas that led, on many points, to difficulties and contradictions”.

mesmas linhas. Tudo isso, longe de ser evidente, é inexplicável em termos do princípio fundamental da física newtoniana, segundo o qual todos os efeitos têm causas precisamente determinadas, e segundo o qual o estado atual de um fenômeno ou processo é inteiramente determinado pelo que o precedeu imediatamente, e apenas por ele. Essa contradição me perturba há muito tempo (HEISENBERG, 1996, p. 53).

Bastaram trinta anos, cerca de uma geração, para que a situação da física mudasse drasticamente. A afirmação de Michelson, feita em 1894, apesar de cautelosa, assume tacitamente que as questões fundamentais da física já estariam resolvidas e, assim, o trabalho dos físicos seria aplicar uma série de princípios bem estabelecidos aos problemas vindouros. Em contrapartida, os comentários de Heisenberg e Bohr caminham em uma direção oposta: certos princípios fundamentais da física, como a causalidade, não conseguem mais explicar características básicas da matéria. A teoria quântica, até aquele ponto, era uma “terra de ninguém”, pois apresentava contradições e dificuldades tão grandes que poucos pesquisadores se aventuravam trabalhar naquela área (HEISENBERG, 1996, p. 53).

Desse modo, Heisenberg apresentava, além das habilidades matemáticas e criativas necessárias para o trabalho com física teórica, interesse e intimidade com temas filosóficos, especialmente com a filosofia grega. A “humanistische Bildung” de Heisenberg, que poderia ser considerada inútil em sua carreira científica, tornou-se um instrumento intelectual que o permitiu enfrentar a crise no qual se encontrava a física de sua época.

3.1.3 Os benefícios da aproximação entre ciência e filosofia

A ênfase na defesa da cultura humanística, defendida no *Maxmilians Gymnasium* é algo recorrente em inúmeros textos de Heisenberg. Mais de duas décadas depois, em um artigo escrito no ano de 1976, ele chega a afirmar que muitos equívocos acerca da teoria das partículas elementares, seriam decorrentes da distância que os cientistas mantêm frente às questões filosóficas envolvidas no tema. Conseqüentemente, “boa física é inadvertidamente prejudicada por uma filosofia ruim⁸⁹” inconscientemente adotada pelos físicos (HEISENBERG, 1989, p. 82). Essa separação entre a atuação científica e as formulações teóricas gerais teria origem no esquecimento, por parte dos cientistas, de uma das principais características do pensamento grego: “a estreita ligação entre formulações teóricas e atuação prática (...) e a aptidão em ordenar a policroma multiplicidade da experiência, tornando-a acessível ao pensamento humano” (HEISENBERG, 1962, pp. 52 e 53).

⁸⁹ “That today in the physics of elementary particles, good physics is unconsciously being spoiled by bad philosophy”.

Na raiz de todas as conquistas da ciência encontra-se, para Heisenberg, essa inestimável contribuição dos filósofos gregos. Logo, o cientista que tenta se desvincular da filosofia comete um duplo erro. Primeiro, torna-se incapaz de detectar e analisar o discurso filosófico que seu trabalho, veladamente, carrega. Com isso, limita sua compreensão dos problemas da própria física. Segundo, o cientista contemporâneo, ao negar a possibilidade de aproximação entre ciência e filosofia, ignora o quinhão da herança helênica para a humanidade, a qual permitiu, justamente, o progresso da ciência atual. A filosofia, então, forneceria instrumentos conceituais mais sofisticados para o cientista compreender melhor seu trabalho e objeto de estudo, aperfeiçoando o próprio desenvolvimento científico.

Como exemplo disso, pode-se citar um texto de 1959, em que Heisenberg afirma enfaticamente que

no futuro, as ciências exatas incluirão em seus fundamentos o conceito de probabilidade ou possibilidade – a noção de *potentia* – e, por conseguinte, certos problemas da filosofia antiga surgirão em uma nova luz, e o entendimento da teoria quântica será aprofundado pelos estudos destes primeiros problemas (HEISENBERG, 2004, p. 17).

Para Heisenberg, o fato da filosofia e da ciência possuírem um mesmo berço nas ilhas do Egeu e nas *póleis* costeiras da Anatólia Ocidental, há mais de dois mil e quinhentos anos, não é apenas uma contingência histórica. Apesar da atual separação acadêmica entre filósofos e cientistas, suas histórias estariam intimamente ligadas, pois certas escolhas conceituais surgidas na filosofia antiga determinaram os caminhos da ciência em seu desenvolvimento nos séculos posteriores.

As conquistas dos tempos modernos, de Newton e dos seus sucessores, apareceram-me como continuação imediata da obra em que tinham trabalhado matemáticos e filósofos gregos; o desenvolvimento completo da ciência parecia-me um todo único, e não me passou pela cabeça a idéia de considerar a ciência e a técnica como um mundo radicalmente diferente do da filosofia de Pitágoras ou de Euclides (HEISENBERG, 1962, p. 57).

Logo, nem os últimos cinco séculos, marcados pelo progresso extraordinário da técnica e da ciência, em praticamente todos os âmbitos da vida humana, ficaram livres de tal influência:

O grande rio da ciência, que atravessa a nossa época, brota de *duas fontes situadas no terreno da antiga filosofia* [grifo nosso], e, embora mais tarde muitos outros afluentes tenham desaguado neste rio, contribuindo para engrossar o seu fecundo

caudal, a sua origem é, não obstante, sempre claramente reconhecível (HEISENBERG, 1962, p. 62).

Portanto, para se analisar o uso específico que Heisenberg fez de conceitos herdados do pensamento grego antigo, é necessário compreender a visão dele acerca das relações entre as histórias da ciência e da filosofia. Heisenberg propôs uma visão extremamente pessoal da história da ciência, na qual a herança intelectual helênica se manifestava em *duas correntes antagônicas: o materialismo e o idealismo*, fontes do “grande rio da ciência”.

3.2. A história da ciência e da filosofia segundo Heisenberg

Desde um artigo de 1932, o primeiro do físico alemão a se referir diretamente a filosofia grega (HEISENBERG, 1952, pp. 29 e 31), passando por uma palestra dada em Genebra em 1958 (HEISENBERG, 2004, pp. 11 e 12) e até um discurso de 1964 proferido em grego na colina da Pnix⁹⁰ em Atenas (HEISENBERG, 1974, pp. 107-111), a suposta oposição entre materialismo e idealismo é tratada. O trecho a seguir demonstra por si, e com uma incrível força retórica, o modo como Heisenberg via a história da ciência e da filosofia ser perpassada pela presença de duas idéias dominantes:

A ciência moderna tem seguido algumas tendências da filosofia natural grega, pois tem reconsiderado uma série de problemas com que a filosofia havia se debatido em seus inícios (...) Existem, especificamente, duas idéias da antiga filosofia grega que na atualidade ainda determinam o curso da ciência e que são, por essa razão, de especial interesse para nós: a convicção de que a matéria consiste de pequenas unidades indivisíveis, os átomos, e a crença na força de estruturas matemáticas⁹¹ (HEISENBERG, 1952, p. 53).

Segundo Heisenberg, na tentativa dos gregos de buscar “um entendimento unificado dos fenômenos naturais”, surgiram “dois conceitos opostos”: o idealismo e o materialismo. Ambos prescreviam diferentes respostas ao problema das menores partículas da matéria (HEISENBERG, 2004, p. 11). A teoria atômica criada por Leucipo (fl. 450-420 a.C.) e Demócrito (c.460-c.370 a.C.) é considerada o marco fundador do materialismo. A outra corrente, o idealismo, seria representada pelo Pitagorismo e por Platão, sendo encontrada mais

⁹⁰ Local onde os cidadãos se reuniam para debater os assuntos relativos à condução política da Atenas antiga.

⁹¹ “Modern science has followed many trends of early Greek natural philosophy by reconsidering the problems with which that philosophy had grappled in a first attempt to understand the surrounding world. Hence it may be well worth considering which of those early ideas have retained their creative power in modern physics, and what shape they have acquired by absorbing the scientific experiences of intervening two thousand years. There are, especially, two ideas of early Greek philosophy which to-day still determine the course of science, and which are therefore of special interest to us: the conviction that matter consist f minute indivisible units, the atoms, and the belief in the purposely directive power of mathematical structures”.

especificamente no diálogo *Timeu*. Ambas as tendências, afirma Heisenberg, não são apenas duas vetustas doutrinas de interesse restrito a historiadores da filosofia. Para ele, a descoberta de Planck não se limitou a resolver um problema relacionado à emissão de radiação térmica. Uma de suas conseqüências foi reviver o debate entre Demócrito e Platão acerca dos constituintes últimos da matéria (HEISENBERG, 1974, p.10).

Portanto, é com vistas a essa concepção dos liames entre as histórias da ciência e da filosofia que se pode compreender a interpretação do pensamento grego realizada por Heisenberg. Por isso, faz-se necessário um aprofundamento nesse tópico.

3.2.1. O materialismo de Demócrito e Leucipo e sua influência na história da ciência

Tradicionalmente, reconhece-se Leucipo (de Mileto ou de Eléia) como o fundador do atomismo. Seu discípulo, Demócrito de Abdera, ampliou as teses atomistas, aplicando-as não só na física, como também na ética e na epistemologia⁹². Durante o período helenístico, o atomismo foi retomado por Epicuro (341-270 a.C.) e Lucrécio (99/94-55/51 a.C.)⁹³.

O atomismo grego pode ser considerado uma tentativa de refutar os argumentos apresentados pela Escola Eleática, isto é, por Parmênides e seus seguidores, como Zenão e Melisso. Em resposta à antítese “Ser” e “Não-Ser” de Parmênides, os atomistas propõem os conceitos de “átomo” e “vazio”. Aristóteles assim descreve o atomismo:

Leucipo pensou ter argumentos que defenderiam o que é compatível com a percepção sensorial e não aboliriam o nascimento e a morte ou o movimento ou a pluralidade das coisas existentes. Concorda com as aparências até este ponto, mas aos que defendem o Uno [Parmênides], concede-lhes que não haveria movimento sem o vazio, e afirma que o vazio é não-ser e que nenhuma parte do que é é não-ser – já que o que é no verdadeiro sentido, é um ser totalmente cheio. Mas um tal ser, diz ele, não é uno; há um número infinito, e são invisíveis devido à pequenez das partículas. Estas movem-se no vazio (pois o vazio *existe*), e quando se juntam dão origem ao nascimento, e quando se separam, causam a destruição. (Aristóteles, *de gen. et corr.*, 325a 23-32 (DK A67)).⁹⁴

Haveria uma tentativa, segundo Aristóteles, da teoria de Leucipo conciliar os dados dos sentidos em sua infinita variedade com a metafísica de Parmênides. Mas, ao contrário do monismo eleático, Leucipo defendia que o não-ser, no caso, o Vazio, teria tanta existência

⁹² Deve-se ter claro que tais distinções não faziam sentido para os fisiólogos.

⁹³ Em suas referências ao atomismo antigo Heisenberg cita nominalmente apenas Demócrito e Leucipo, e não menciona em nenhum momento Epicuro ou Lucrécio. Heisenberg, também, não estabelece uma distinção clara a quem ele se refere quando se utiliza do termo “atomismo antigo”, se a Demócrito ou a Leucipo. De qualquer maneira, além de tal distinção ser uma espinhosa querela historiográfica, tal fato não prejudica seu argumento acerca da natureza do materialismo, nascido na Grécia, e de seu destino histórico a partir daí.

⁹⁴ KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 1994, pp. 430 e 431.

quanto os átomos que nele se movem. E mesmo admitindo “a força dos argumentos de Zenão” sobre a divisibilidade infinita, Leucipo, segundo Burnet (2006, p. 352), teria dotado cada um dos átomos de “todos os predicados do Uno eleático”.

Os átomos, deste modo, são caracterizados como invisíveis devido ao tamanho minúsculo, apesar de possuírem grandezas como tamanho e posição, além de serem fisicamente indivisíveis por não existir neles espaço vazio⁹⁵. Como são formados pela mesma substância, não haveria entre eles uma diferenciação qualitativa. As únicas propriedades intrínsecas dos átomos são: forma, tamanho e disposição no vazio. Os átomos provocariam atração ou repulsão entre eles mesmos, gerando movimento. Essa movimentação no vazio é aleatória, sem finalidade e eterna e, juntamente com as formas e os arranjos dos átomos entre si, explica toda a variedade de objetos e seres observados no mundo. (TAYLOR, 1997, p. 204).

Um dos fragmentos mais conhecidos de Demócrito afirma que “Por convenção doce e por convenção amargo, por convenção quente, por convenção frio, por convenção cor; na realidade, porém, átomos e vazio” (Demócrito fr. 10 e 6-8, Sexto *adv. math.* VII, 136 (DK B9))⁹⁶. As aparências são reduzidas a epifenômenos, derivados da atividade dos átomos no vazio, ou segundo a terminologia aristotélica: “os dois juntos [átomos e vazio] são as causas materiais das coisas existentes” (Aristóteles, *Met. A* 4, 985 b 4 (DK 67 A 6))⁹⁷. Além de explicar a constituição dos corpos e das sensações, os átomos também estão na origem de atividades ditas espirituais: “a alma consiste em átomos esféricos espalhados pelo corpo, e, muito provavelmente, o espírito era considerado uma concentração destes átomos-alma” (KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 1994, p. 453). Os átomos constituintes da alma se diferenciariam dos outros apenas pela forma redonda, o que, comparado a outros átomos com formas mais estáveis, facilitaria sua movimentação. Mas as colisões e os agrupamentos entre eles no vazio ainda seriam a origem do movimento, assim como nos outros tipos de átomos (CORNFORD, 1957, p. 156). A doutrina atomista, dessa forma, além de materialista⁹⁸, era

⁹⁵ “Em grego, *atomon* etimologicamente significa uma entidade que não podia ser cortada ou dividida, *a-tomon*. A noção de indivisibilidade poderia ser mais conceitual que física, mas, ao menos alguns relatos sobre a teoria de Demócrito, os *atoma* em questão são descritos em termos físicos como ‘plenos’ (D/K A44, 45, 46)” (CARTLEDGE, 2001, p.13).

⁹⁶ KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 1994, p. 434.

⁹⁷ *Ibidem*, p. 436.

⁹⁸ “Por materialismo entende-se toda visão de mundo que considera a matéria física como o único modo de existência ou, no mínimo, como o modo último de existência da realidade e que a tudo sustenta” (RICKEN, 2002, p.169).

marcada pela ausência de finalidade ou desígnio⁹⁹ e, por isso, pode ser considerada o primeiro sistema mecanicista da história da filosofia.

A descrição que Heisenberg fez da teoria atômica antiga não difere do apresentado até aqui:

A teoria atômica fundada por Leucipo e Demócrito considerava as menores partículas de matéria como “aquilo que existe” no sentido mais estrito. Tais partículas foram consideradas indivisíveis e imutáveis. Eram eternas e unidades últimas, não possuíam outras propriedades que não as geométricas. Segundo os filósofos, os átomos eram dotados de uma forma definitiva. Estavam separados entre si pelo espaço vazio e, graças às diferentes posições e movimentos neste espaço vazio, podiam produzir uma ampla variedade de fenômenos, mas não tinham cor, nem cheiro ou sabor, e muito menos temperatura ou outras propriedades físicas que nos são familiares. As propriedades das coisas por nós percebidas eram provocadas indiretamente pelos arranjos e movimentos diversos dos átomos (...) esses átomos constituíam, portanto, o verdadeiro núcleo objetivamente real da matéria e assim de todos os fenômenos. Eram (...) “aquilo que existe” no sentido mais estrito, enquanto a grande variedade de fenômenos só indiretamente decorria dos átomos. Por essa razão tal conceito era chamado de materialismo (HEISENBERG, 2004, pp. 11 e 12).

A especificidade da interpretação de Heisenberg do atomismo grego, na verdade, reside na influência que, segundo ele, a idéia de materialismo teve na história subsequente da ciência. Antes dessa interpretação ser analisada mais detidamente, um breve excuro histórico acerca do destino histórico do atomismo faz-se necessário para melhor compreender às idéias de Heisenberg.

Na Antigüidade, a idéia de átomo, apesar de duramente rechaçada por Platão e Aristóteles, foi adotada, conforme citado anteriormente, por Epicuro. Lucrécio, epicurista romano, expôs a filosofia de seu mestre no poema *De rerum natura*, retomando as idéias de Demócrito com algumas modificações. A mais notável dessas mudanças foi a noção de *clinamem*¹⁰⁰, que introduziu certa indeterminação no rigoroso mecanicismo do atomismo original e explicou a colisão entre os átomos, que, do contrário, cairiam indefinidamente por causa do peso (BLACKBURN, 1997, pp. 28, 62 e 118). Com o colapso das filosofias não-cristãs a partir do século IV, efeito da institucionalização do cristianismo em Roma, o atomismo, seja o originário ou a releitura epicurista, entrou num progressivo ocaso. Só no Renascimento (sécs. XV-XVI), devido ao renovado interesse em Epicuro, o atomismo voltou a influenciar a vida intelectual européia. O epicurismo se tornou uma importante alternativa à escolástica aristotélica que dominava as universidades da época. Pierre Gassendi (1592-1655),

⁹⁹ “Também Demócrito, quando sustenta que um turbilhão de toda espécie de formas separou-se do todo, sem, contudo, mencionar como e porque, parece considerar que tenha surgido espontaneamente e ao acaso” Simplicio, *Comentário à Física*, 327.23-26 (DK A67), *apud* BARNES, 2003, p. 292).

¹⁰⁰ “Clinamen: (lat., inclinação): No atomismo de Epicuro, é a ‘guinada’ dos átomos, responsável pela introdução da indeterminação num sistema que, de outra forma, seria indeterminista” (BLACKBURN, 1997, p. 28).

autor das “Quintas Objecões” às *Meditações* de Descartes, criticou as doutrinas aristotélicas recorrendo a Epicuro, herdando deste o atomismo e o mecanicismo (ROVIGHI, 2002, p. 122). Apesar do renascimento do materialismo helênico na modernidade, filósofos como Leibniz e Descartes demonstraram restrições à idéia de um universo composto por átomos e vazio, sendo esse último inconcebível para eles (POPPER, 1989, p. 175).

O atomismo, por fim, só se estabeleceria entre os cientistas posteriormente, com os avanços da química no *Settecento*. Segundo Mario Bunge (2002a, p. 37), “o atomismo antigo era qualitativo e totalmente especulativo. Tornou-se quantitativo e testável somente depois dos trabalhos de Dalton, Avogrado e Cannizaro na química, e de Boltzmann na física”.¹⁰¹

Para Heisenberg, o século XVIII é crucial na trajetória histórica da idéia de materialismo, pois

a partir do século XVIII, viu-se que as experiências químicas podiam ser ordenadas e interpretadas satisfatoriamente por intermédio da hipótese atômica herdada da Antigüidade, se o átomo fosse considerado como o verdadeiro e realmente existente elemento imutável constituinte da matéria. Tal como já sucedia na filosofia de Demócrito, também aqui as qualidades sensíveis da matéria foram tidas como simples aparências: o aroma e a cor, a temperatura (...) não eram verdadeiras propriedades da matéria, mas resultavam das ações recíprocas entre esta e os nossos sentidos e deviam explicar-se mediante a disposição e o movimento dos átomos e o efeito desta disposição sobre os nossos sentidos (HEISENBERG, 1962, p.11).

O texto se refere à divisão entre qualidades primárias e secundárias, tão comum na obra de inúmeros filósofos e cientistas a partir do século XVII, tais como Galileu, Descartes, Locke e Boyle. Para eles, as modificações qualitativas em nível macroscópico, percebidas pelos sentidos, podem ser reduzidas às variações quantitativas: a forma, tamanho e localização dos objetos. Essas últimas, as qualidades primárias, são objetivas e, portanto, suscetíveis de serem apreendidas pela razão. As qualidades secundárias, por outro lado, existiriam apenas na experiência perceptual do sujeito (LOSEE, 2000, p. 84). E, conforme visto na citação anterior, Heisenberg afirma que essa distinção seria originária da teoria dos atomistas gregos, na qual os dados sensíveis seriam redutíveis a átomos e vazio.

Para Heisenberg, a influência do materialismo chegou até os séculos XIX e XX. Para ele, o materialismo do século XIX teria criado uma imagem “simplista” do mundo (HEISENBERG, 1962, p. 11), sustentada tanto pelos avanços da química e da física da época, como pelo surgimento do materialismo dialético (HEISENBERG, 1974, p. 9). Já no século

¹⁰¹ Segundo Simon Blackburn (1997, p. 28), “os desenvolvimentos posteriores do atomismo foram obstruídos pela ausência de uma química que pudesse oferecer um critério funcional para a diferença entre elementos e compostos, o que só veio a ser desenvolvido pelos químicos Lavoisier e Dalton”.

XX, ele considera que muitos físicos, envolvidos nas pesquisas sobre as partículas elementares, estariam sob a influência “mais ou menos inconsciente” de Demócrito:

Durante os últimos cem anos, a idéia democriteana do átomo tornou-se parte integrante da visão do mundo material dos físicos; ela era prontamente inteligível e intuitiva, a ponto de determinar o pensamento de muitos dentre os físicos que procuravam manter distância da filosofia.¹⁰² (HEISENBERG, 1989, p. 82).

Contudo, Heisenberg não identificava por completo o materialismo antigo com o que dominou as ciências naturais até as descobertas de Planck. Para ele, “a palavra ‘materialismo’ assumiu no século XIX um significado muito unilateral que não se adapta de modo algum ao desenvolvimento da filosofia grega da natureza” (HEISENBERG, 1962, p. 61). A nova concepção de materialismo, nascida da revolução científica do século XVI, e que atingiu o auge com a publicação dos *Principia* de Newton em 1687, sofreu o influxo da filosofia cartesiana e da “cisão entre realidade material e realidade espiritual” (HEISENBERG, 1962, p. 61) preconizada por Descartes.

A antiga filosofia grega procurava um princípio que unificasse todos os fenômenos observados no mundo, uma espécie de “matéria cósmica, vale dizer, uma substância universal que passaria por todas as transformações, da qual todas as coisas emergiriam para depois a ela retornar” (HEISENBERG, 1995, p. 113). De Tales, passando por Demócrito e até Aristóteles, o conceito de matéria ligava-se a essa tentativa de compreender a totalidade do mundo por meio de um princípio fundamental de unificação. Séculos depois, Descartes funda uma filosofia baseada na oposição entre matéria e espírito e, assim, o conceito de matéria sofre uma nova transformação: no lugar da totalidade unificada, a ruptura.

A preocupação central da filosofia passa a ser a fundamentação de um saber legitimamente verdadeiro e não a busca pelo princípio fundamental da realidade. Nas palavras de Heisenberg,

Alicerçado na dúvida e no raciocínio lógico, ele [Descartes] tenta encontrar uma base completamente nova e, à sua maneira de ver, firme, para erigir um sistema filosófico. Descartes não admite a Revelação como tal base, nem uma aceitação não crítica do que é percebido pelos sentidos. Assim, ele começa com seu método da dúvida, levantando suspeitas sobre aquilo que nos contam os sentidos sobre os resultados de nosso raciocínio e chega, finalmente, à sua famosa sentença: *cogito ergo sum* (...) essa base da filosofia cartesiana é radicalmente diferente daquela dos antigos filósofos gregos. Para Descartes, o ponto de partida não é um princípio

¹⁰² “During the last hundred, the Democritean idea of the atom had thus become an integrating component of the physicist’s view of the material world; it was readily intelligible and to some extent intuitive, and determined physical thinking even among physicists who wanted to have nothing to do with philosophy”.

fundamental ou substância primeira, mas sim a tentativa de se chegar a um conhecimento fundamental. (HEISENBERG, 1995, p. 62).

Contudo, essa mudança – marcada por uma *démarche* que, a princípio, resultou num privilégio dado a epistemologia em detrimento das questões acerca dos primeiros princípios – ainda não é considerada por Heisenberg como o principal impacto do cartesianismo sobre o materialismo redivivo na modernidade. Foi a distinção radical entre *res cogitans* e *res extensa* que teria modificado profundamente o conceito de matéria herdado da Antigüidade Clássica:

A antiga filosofia grega tentara achar uma ordem, na infinita variedade de coisas e fenômenos, pela procura de algum princípio fundamental de unificação. Já Descartes procurou estabelecer a ordem por meio de uma divisão (i.e., separação) fundamental. Todavia, as três partes que resultam dessa divisão [Deus-Mundo-Eu] perdem algo de sua natureza se cada qual for considerada separadamente das demais. Se quisermos mesmo fazer uso dos conceitos fundamentais cartesianos é essencial que Deus se encontre no mundo e no ‘Eu’, e é também essencial que o ‘Eu’ não possa ser realmente separado do mundo. Descartes, certamente, sabia da inegável necessidade dessa ligação, mas a filosofia e ciência natural no período seguinte desenvolveram-se com base na polaridade entre *res cogitans* e *res extensa*, com a ciência natural se detendo apenas na ‘coisa extensa’ (HEISENBERG, 1995, pp.62 e 63).

Nesse momento da história, a escolha estabelecida, ou seja, a mistura entre o atomismo antigo e a metafísica cartesiana, *determinou* o desenvolvimento das ciências nos séculos posteriores. A partir daí, se começou a desconsiderar qualquer tipo de “força espiritual” como explicação plausível para os fenômenos concretos. Esse novo materialismo entenderia a matéria como “proveniente de uma cadeia causal de interações mecânicas; o conceito de matéria perdeu sua ligação com a ‘alma vegetativa’ da filosofia de Aristóteles” (HEISENBERG, 1995, p. 114). A consequência dessa nova imagem de ciência e de mundo foi um saber empírico que “poderia ser formulado sem qualquer menção a Deus ou a nós mesmos e vinha a favorecer a separação dos três conceitos fundamentais, Deus, Mundo e Eu, ou a separação entre ‘coisa pensante’ e ‘coisa extensa’” (HEISENBERG, 1995, p. 63).

Resta, ainda, descrever outra característica do moderno materialismo que, além de diferenciá-lo do atomismo grego, é, para Heisenberg, uma das causas de sua visão de mundo “unilateral” e “simplista”¹⁰³.

¹⁰³ “Importante para a imagem materialista do mundo, é apenas a possibilidade de se considerarem estes mais pequenos constituintes das partículas elementares como a última realidade objetiva. Nesta base repousava, por isso, a sólida construção da imagem do mundo do século XIX e, graças à sua simplicidade, ela conservou intacta, durante muitos decênios, a sua força de persuasão” (HEISENBERG, 1962, p. 13). Deve-se destacar que a crítica de Heisenberg ao materialismo moderno repousa em sua impossibilidade de tratar adequadamente dos problemas levantados pela Teoria Quântica e não implica uma desqualificação total das idéias de Newton, Galileu ou Descartes.

Em um texto publicado em 1933, após descrever as transformações sofridas pelo conceito de matéria no decorrer da história, de Tales até chegar a Demócrito e Platão, Heisenberg se detém em um problema conceitual:

[nessas discussões acerca] dos conceitos de matéria e espaço nós já encontramos o problema geral de qual é o real significado do termo “compreensão” da natureza. A teoria atomística de Demócrito levou a uma compreensão das qualidades da matéria ou acabou por prescindir de tal compreensão? Em que sentido a teoria “explica” o comportamento geométrico dos corpos? ¹⁰⁴ (HEISENBERG, 1952, p. 31).

O problema, em outras palavras, era se o materialismo em seu curso histórico, com sua ênfase nas qualidades primárias e objetivas, abriu mão de certos aspectos essenciais da realidade. Na avaliação de Heisenberg, haveria uma gradativa substituição do termo “Naturerklärung”, interpretação da natureza, por “Naturerbeschreibung”, descrição da natureza, que seria “mais modesto” e acarretaria o abandono de um “conhecimento imediato e direto” e o predomínio de um “entendimento analítico”¹⁰⁵ (HEISENBERG, 1952, p. 34).

Ao contextualizar essa questão no âmbito mais amplo da história da ciência, Heisenberg recorre a Platão e à análise que o filósofo grego fez dos tipos de conhecimento no Livro VI da *República*. A distinção entre *diánoia* e *epistéme*, presente no texto platônico é utilizada por Heisenberg como um instrumento heurístico que permite compreender melhor a dinâmica entre o materialismo e o idealismo na história da física. Se no texto platônico os dois termos partilham atribuições epistemológicas e ontológicas, o físico alemão os emprega de maneira peculiar. *Dianoia* e *episteme* seriam dois instrumentos conceituais que permitiriam uma melhor avaliação tanto da *Naturerklärung* – de matriz idealista, qualitativa e baseada em um conhecimento direto e imediato – e da *Naturerbeschreibung*, quantitativa e analítica e de raiz materialista.

3.2.2 *Diánoia e epistéme*

Segundo o texto platônico, no percurso que a alma teria que realizar, das percepção das sombras e imagens dos objetos até a contemplação do Ser supremo, existem inúmeras

¹⁰⁴ “In these two discussions of the concepts of matter and space we already meet the quite general problem of the real meaning of the term ‘understanding’ of nature. Did Democritus’ atomic theory lead to an understanding of the qualities of matter or had it done without such an understanding? In what sense did the theory ‘explain’ the geometrical behavior of bodies?”

¹⁰⁵ “The more new fields are opened up by physics, chemistry and astronomy, the more we are in the habit of replacing the words ‘intepretation of nature’ (Naturerklärung) by the more modest expression ‘description of nature’ (Naturerbeschreibung). It becomes more and more clear that we are dealing, in this progress, not with immediate and direct knowledge but with analytical understanding”.

etapas. No texto da *República* (509c5/511e5), utiliza-se a analogia da “linha dividida” na qual cada trecho corresponde a um tipo de objeto e ao processo de conhecimento correspondente. Ou seja, os significados relativos a cada trecho destacado na linha apresentam duas facetas: uma ontológica e outra gnosiológica, conseqüência do princípio platônico segundo o qual “o conhecimento é proporcional ao ser” (REALE, 1994, p. 161).

Segundo David Ross (1976, p. 45), a linha é dividida em dois segmentos principais: um representa o mundo visível (*tópos horatós*) e o outro o mundo inteligível (*tópos noetós*). Ambos os segmentos correspondem, respectivamente, ao discurso fundado em meras opiniões (*dóxa*)¹⁰⁶ e à verdade baseada nos conhecimentos legítimos (*epísteme*). O segmento de reta correspondente ao mundo visível se subdivide em outros dois: o inferior correspondente a todas as imagens derivadas de objetos sensíveis como sombras, reflexos em espelhos e na água. O outro segmento corresponderia a objetos sensíveis naturais e aos objetos fabricados pelos homens, que originariam os objetos do primeiro segmento.

Do ponto de vista gnosiológico, o primeiro segmento, das sombras, corresponderia à mera ilusão, conjecturas ou imaginação (*eikasía*), e o segundo, a crença, a convicção (*pístis*). A *eikasía* seria um conhecimento incompleto, parcial e, no máximo, útil para o dia-a-dia do homem comum. Já a *pístis* seria um “conhecimento” relativamente mais estável, porém incapaz de se sustentar por conta própria, pois sua referência seriam os instáveis objetos do mundo material.

O segundo segmento de reta principal corresponde, conforme dito, ao reino da verdade, da investigação propriamente científica. É, quanto ao conhecimento, a *epísteme*, cujo objeto é o supra-sensível. A primeira metade desse trecho da linha corresponderia aos objetos matemático-geométricos¹⁰⁷ e aos conhecimentos acerca deles: a *diánoia*. Segundo Jaeger (2003, p. 881) as *diánoiai* são conhecimentos que

Por abstraírem do sensível e aspirarem a averiguar o que são em si próprios os objetos matemáticos, círculos, triângulo, ângulos etc., têm maior afinidade com o supremo método filosófico do conhecimento. Por outro lado, estão vinculados ao mundo dos sentidos e à fase do conhecimento que lhe é própria, a *dóxa*.

¹⁰⁶ “Sabendo que existe também uma *realidade intermediária* [grifo do autor] entre ser e não-ser, isto é, o sensível [...] Platão conclui que desse ser intermediário há exatamente um conhecimento intermediário entre a ciência e a ignorância, um conhecimento que não é conhecimento próprio e verdadeiro e cujo nome é ‘opinião’, *doxa*” (REALE, 1994, p. 162).

¹⁰⁷ A existência ou não dessa classe de objetos é objeto de dissensão entre os platonistas: “Mas não vale o critério pelo qual aquilo que participa em igual medida do ser, tanto é verdade que ‘só o que plenamente é é plenamente conhecível?’ Então: não deduz da ‘comparação da linha’ a existência de uma realidade inteligível ‘de segundo grau’ em relação às Idéias, como objeto das ciências matemáticas? [Entretanto] Platão, em todos seus escritos, deixa de dizer explicitamente se existe ou não uma realidade inteligível ‘intermediária’, que seja objeto da *dianoia* matemática” (CATTANEI, 2005, pp. 254 e 255).

Ou seja, a *diánoia* ainda seria um conhecimento intermediário¹⁰⁸, mero pensamento, pois apesar da referência às Idéias, a *diánoia* ainda parte de “hipóteses estabelecidas com base em intuições sensoriais de figuras visíveis” (JAEGER, 2003, p. 881). Segundo Giovanni Reale (1995, p. 74) esse discurso sobre os objetos matemáticos é “o pensamento que procede passo a passo, dis-correndo (*dia-noeîn*), a saber, mediatamente e não imediatamente”¹⁰⁹.

A última parte do segmento referente ao mundo inteligível das formas (*noetá*) é o domínio do saber dialético, livre das imagens sensíveis, rejeitando sucessivamente hipóteses até atingir o verdadeiro e autêntico *lógos*. Reale (1994, p. 164) descreve desse modo a atividade dialética que está além da *diánoia*:

O intelecto e a intelecção, deixadas as sensações e o sensível e qualquer elemento ligado ao sensível, captam, com um proceder que é ao mesmo tempo discursivo e intuitivo, as Idéias puras, seus nexos positivos e negativos, isto é, todos os liames de implicação e exclusão, e sobem de Idéia em Idéia até intuir a Idéia suprema (que é o primeiro e supremo Princípio, ou seja, o Bem/Uno), o Incondicionado.

A *nóesis* – intelecção pura ou intuição intelectual – seria, por conseguinte, o conhecimento mais elevado, pois seria independente de qualquer tipo de hipótese. Os princípios últimos da realidade identificam-se “no plano metódico, com o *antipotético*, com o que não exige hipótese. Como ele dá a razão de tudo, dele mesmo não se poderia dar razão” (ROGUE, 2005, p. 103).

Eis a descrição de Heisenberg da linha dividida:

¹⁰⁸ “Desvinculadas da pura contingência, mas não plenamente necessárias, as matemáticas são ‘conhecimentos medianos’ (Platão, *Rep.* 533 D6) que, como tais, se colocam no ponto central e angular do caminho da ciência e da vida, do qual Platão era o promotor. A meio caminho e como costura entre o que é sensível e o que é inteligível, elas são uma passagem obrigatória na via dialética que do mundo em devir, ao qual não competem jamais pleno ser, plena verdade, bondade e beleza, leva a contemplar valores absolutos, e em última análise o ‘princípio não hipotético’ do Bem em si”. Assim observa Elisabetta Cattanei (2005, p. 33), deixando claro, no trecho citado, que a *diánoia* não pode ser considerada um saber inferior e dispensável. A célebre máxima “Quem não for geômetra, não entre!” que havia no frontão da Academia é mais um fato – pitoresco, é claro – que corrobora a importância que o conhecimento dos objetos matemáticos tinha para Platão.

¹⁰⁹ Na *República* (510 B 4-9) a separação entre *diánoia* e a intelecção pura é descrita do seguinte modo: “Na primeira parte desse segmento, a alma, utilizando as imagens dos objetos [sensíveis] que no seguimento precedente eram os originais, é obrigada a estabelecer suas análises partindo de hipóteses seguindo um caminho que a leva, não a um princípio, mas a uma conclusão. No segundo segmento, a alma parte da hipótese para chegar ao princípio absoluto, sem lançar mão das imagens, como no caso anterior, e desenvolve a sua análise servindo-se unicamente das idéias” (*República*, 510 a-e, PLATÃO, 1997, p. 222). Edward Halper, no verbete “Diánoia” do *Dicionário de filosofia de Cambridge* (AUDI, 2006, p. 232), utiliza a seguinte comparação para explicar o termo em questão e seu caráter mediato e analítico: “usaremos a *diánoia* para elaborar uma prova matemática; ao contrário, um ser – se existe tal ser, ele deverá ser um deus – que pudesse simplesmente intuir a verdade do teorema usaria a faculdade da intuição intelectual, *noûs*”.

Ele [Platão] distingue quatro estágios da percepção: o mais alto deles é chamado de *epistème* e corresponde ao conhecimento das coisas reais, à percepção e ao reconhecimento da sua natureza, como descrito na analogia [o mito da caverna]. O segundo estágio é conhecido como conhecimento discursivo – *diánoia* – e pode ser alcançado pelo estudo das ciências. Os dois últimos estágios relacionam-se com os dois primeiros assim como a crença o faz com a compreensão. Elas são chamadas de fé e crença (*pístis*) e conjectura (*eikasía*) (HEISENBERG, 1952, p. 32).

Talvez por ser a transcrição de uma palestra, o texto apresenta uma confusão canhestra entre os conceitos de *epistème* e *nóesis*. Segundo Catherine Chevalley “Na *República* (VI, 511 d-e), Platão distingue não exatamente a *epistème*, mas a *nóesis* da *diánoia*, da *pístis* e da *eikasía*. Para compreender a interpretação de Heisenberg, podemos nos remeter à passagem 508e, onde Platão associa *epistème* à verdade, em oposição à opinião (*dóxa*)” (CHEVALLEY, 1992, p.172). Para todos os efeitos, tal confusão não altera substancialmente o argumento a ser analisado. Apenas deve-se considerar que quando Heisenberg cita *epistème*, ele na verdade refere-se à *nóesis*.

O interesse de Heisenberg é centrado apenas nas noções de *epistème* e de *diánoia*. O trecho a seguir revela como ele compreendia ambas:

Epistème é precisamente o estado de consciência no qual se pode parar e para além do qual não é preciso mais pesquisar. *Diánoia* é a habilidade de analisar em detalhes o resultado da dedução lógica. Ao que parece, em Platão, apenas a *epistème* fornece uma conexão com o verdadeiro, o essencialmente real, enquanto a *diánoia*, por mais que forneça de fato conhecimento, é um conhecimento desprovido de valores (HEISENBERG, 1974, p. 137).

O trecho seguinte trata especificamente da *diánoia*:

Platão explica em detalhes a natureza do segundo estado de percepção e entendimento e como nós podemos alcançar este nível através do estudo da natureza. As leis matemáticas da natureza encontradas na base dos fenômenos naturais são, para ele, de importância primordial, comparada com a variedade de mudanças dos próprios fenômenos. (...) é importante e característico que Platão enfatize apenas este aspecto da ciência, aquele que nós ocasionalmente agora chamamos de ‘formal’. (...) mas a percepção e entendimento da natureza que pode ser obtido pelo estudo das estruturas matemáticas é, para Platão, apenas o prelúdio para a melodia que é nosso real propósito aprender (HEISENBERG, 1952, p. 33).

De que modo esses dois conceitos servem de parâmetros heurísticos para uma melhor compreensão da dinâmica entre o materialismo e o idealismo no transcorrer da história? Para ele, além da influência da Metafísica cartesiana sobre o materialismo moderno, este também se distingue do atomismo antigo, e de toda a filosofia grega, pelo fato de seu grande bastião, a

ciência moderna, ter abandonado a *epistême* como objetivo último e haver se limitado à descrição matemática do mundo, ou seja, ao campo da *diánoia*.

Como foi visto, Heisenberg se refere a Platão para tratar de questões acerca do “significado real do termo ‘compreensão’ da natureza” (cf. supra 73). A compreensão da natureza, durante os últimos cinco séculos, limitou-se a afastar os dados da experiência imediata e, subjacente a eles, descobrir estruturas matemáticas. O ápice dessa postura epistêmica – marcada pela ênfase no quantitativo, em detrimento de outras propriedades dos objetos naturais – é encontrado no alto nível de abstração que Newton inaugurou nos *Principia Mathematica*:

pela primeira vez, surgiu a possibilidade de se unificar a infinita riqueza dos fenômenos num formalismo matemático. Por meio de cálculos, o complexo processo individual pode ser compreendido como uma consequência de leis básicas e, portanto, ‘explicado’ (HEISENBERG, 1974, p. 40).

Para Heisenberg, o materialismo dominante na ciência moderna, anterior à descoberta de Max Planck, herdou de Demócrito a separação entre qualidades primárias e secundárias, com ênfase nas primeiras. Agregou-se a isso, a cisão cartesiana entre *res extensa* e *res cogitans* que, além de esvaziar o ideal helênico de busca por uma fundamentação, uma ordem no cosmos, privilegiou a análise, a separação. Pior, desconsiderou por completo a subjetividade como algo a ser considerado na ciência. Conseqüentemente, para o físico alemão, a ciência moderna limita-se a ser apenas uma *Naturerbeschreibung*, apenas uma descrição da natureza, esvaziando a compreensão dos fenômenos por ela estudados de qualquer tipo de *Naturerklärung* – interpretação da natureza. Daí, o recurso à oposição entre a *diánoia* e *nóesis* (*epistême*, nos textos de Heisenberg): o materialismo moderno se limita a *diánoia*, o conhecimento mediano, intermediário, analítico, que no lugar da intuição intelectual auto-suficiente, procede de modo analítico, mediato, passo a passo. Concomitante a isso, o alto poder preditivo e as inumeráveis aplicações tecnológicas geradas pela nova ciência legitimaram o predomínio da *diánoia* em detrimento da *epistême*.

3.2.3 Os limites do programa materialista na história da ciência: a teoria quântica

A influência do programa materialista é inegável. Nos últimos séculos, houve um desenvolvimento sem igual na capacidade humana de controlar e modificar a natureza e a sociedade. Heisenberg jamais nega o óbvio. Entretanto, a junção entre o materialismo de

Demócrito, a metafísica cartesiana e a ênfase na descrição matemática da natureza iniciada por Galileu no século XVI, acabou por encontrar seu limite. Ora, mas como explicar o soçobrar do materialismo depois de séculos de sucesso?

Heisenberg afirma, peremptoriamente, que – a partir da descoberta do quantum de energia em 1900, até os subseqüentes experimentos relacionados às partículas elementares – a concepção da estrutura atômica da matéria revela uma transição de Demócrito a Platão, ou seja, do materialismo ao idealismo (HEISENBERG, 1974, p. 18). A mecânica quântica e a física de partículas elementares, por exemplo, tornaram insustentável a concepção do átomo como uma entidade eterna, imutável e indivisível. Nas palavras de Heisenberg:

Historicamente, a palavra “átomo” – utilizada em física e químicas modernas – foi associada ao objeto errado, durante o renascimento da ciência no século XVII, pois as menores partículas pertencentes a um elemento químico são ainda, como se sabe, sistemas um tanto complexos de unidades ainda menores. Em física, essas unidades menores correspondem, hoje em dia, às chamadas partículas elementares (HEISENBERG, 1995, p. 56).

Mas as partículas elementares poderiam ser comparadas com o átomo de Demócrito e Leucipo? Não. Por mais que o atomismo antigo prive o átomo de uma série de atributos – restando apenas sua forma, movimento e arranjo espacial –, a atual descrição de uma partícula elementar exclui até mesmo esses aspectos mais abstratos do átomo de Demócrito. “Se quisermos oferecer uma descrição precisa de partícula elementar – e, aí, a ênfase está no termo ‘precisa’ – a única coisa que poderemos apresentar é uma função de probabilidade” (HEISENBERG, 1995, p. 56). Ou seja, uma partícula elementar não pode ser identificada com um ponto material e sim com uma forma matemática. Com isso, não só o atomismo antigo, mas também suas herdeiras modernas – a química e a termodinâmica do século XIX – tornaram-se incapazes de tratar do mundo subatômico. As aporias que a teoria quântica parece impor à aplicabilidade dos conceitos clássicos são decorrentes de escolhas filosóficas que fundamentam a ciência moderna. Só com a superação desse modelo recebido seria possível uma compreensão efetiva dos fenômenos microfísicos.

Um exemplo disso é a influência cartesiana no materialismo moderno, que acabou por contribuir para a retração do materialismo na física atual. A divisão entre *res extensa* e *res cogitans* seria incompatível com as exigências da teoria quântica. Heisenberg critica essa divisão, denominada “realismo metafísico” por ele, e a primazia dada à *res extensa* frente à “coisa pensante”. Primazia essa que acarretou o nascimento de um ideal de ciência puramente objetiva, sem referência ao “Eu”. Ele não deixa de reconhecer que, na base dos sucessos da

ciência moderna anterior à Teoria Quântica, a “hipótese de que se pode descrever o mundo sem fazer qualquer menção a Deus ou a nós mesmos” (HEISENBERG, 1995, p. 64) pareceu ser a condição necessária para o desenvolvimento de qualquer ciência natural. Contudo, após as descobertas de Planck e o subsequente desenvolvimento da teoria quântica, o realismo metafísico foi incapaz de compreender as novas situações colocadas. Para Heisenberg (1995, p. 64):

Na interpretação de Copenhague da teoria quântica, podemos proceder sem nos mencionarmos como indivíduos, embora não possamos ignorar que a ciência natural é feita por homens. A ciência natural não se restringe simplesmente a descrever e explicar a Natureza, ela resulta da interação entre nós mesmos e a Natureza, e propicia uma descrição que é revelada pelo nosso método de questionar. Essa foi uma possibilidade que não poderia ter ocorrido a Descartes, mas que torna impossível uma separação bem nítida entre o mundo e o ‘Eu’

Nesse trecho, Heisenberg contrapõe a metafísica cartesiana, e sua separação rigorosa entre o “Eu” e o “Mundo”, a certas teses da Interpretação de Copenhague. Dentre essas teses estaria aquela sobre o distúrbio interacional do aparelho de medição sobre o objeto microscópico e a noção de totalidade. Segundo essa tese, devida a Bohr, um fenômeno quântico só é adequadamente compreendido quando se considera “não só objeto quântico, mas também todo o aparelho experimental, incluindo partes localizadas à distância” (PESSOA Jr., 2005, p. 98). Assim, para Heisenberg, a objetividade cartesiana torna-se uma impossibilidade científica no contexto do mundo quântico.

Esse ideal de uma objetividade total é identificado por Heisenberg como sintoma do privilégio dado à *diánoia* em detrimento da *epistème* na ciência moderna. Essa mudança é concretizada, na prática científica moderna, em experiências que isolam “determinadas partes do processo natural”, tentando, de modo estritamente objetivo, “compreender sua regularidade” para “formular matematicamente as relações descobertas e chegar a ‘leis’ de validade incondicionada em todo o universo” (HEISENBERG, 1962, p. 9). Conforme dito, compreender a natureza reduziu-se a afastar os dados da experiência imediata e descobrir, para além desses, estruturas matemáticas.

Para melhor compreender esse processo histórico, Heisenberg empregou um termo retirado da filosofia de Fichte: “autolimitação”¹¹⁰. Esse conceito demonstraria que o predomínio da *diánoia* na história da ciência teria levado “ao fato de que praticamente todo

¹¹⁰ Autolimitação do ego, ou *Selbstbeschränkung des Ich*, significa que “em cada ato de percepção nós selecionamos uma percepção dentre infinitas outras, o que limitaria o número de possibilidades futuras” (“It means that in every act of perception we select one of the infinite number of possibilities and thus we also limit the number of possibilities for the future” (HEISENBERG, 1952, p. 28).

progresso e conhecimento [da ciência] foi obtido pelo sacrifício de importantes formulações anteriores de questões e idéias” (HEISENBERG, 1952, p. 27). A autolimitação na história da ciência seria, desse modo, o abandono da busca por princípios gerais da natureza e sua substituição por uma análise dos fenômenos, concretizada pela ênfase no quantitativo, na busca de condições experimentais precisas, de medições exatas e de “uma terminologia livre de ambigüidades¹¹¹” (HEISENBERG, 1974, p. 216).

Mas, frente aos desafios erigidos pela Mecânica Quântica, especialmente durante os anos que se seguiram à formulação da Mecânica de Matrizes e da Equação de Schrödinger, uma ciência que se limitasse à *diánoia* seria incapaz de solucionar novos problemas.

A revolução quântica, derivada da revolução galileana e de sua abordagem formalista e abstrata dos fenômenos naturais, levou a física a um ponto no qual apenas o formalismo matemático puro e simples não alcançava o que estava em jogo no mundo subatômico.¹¹² Ao constatar isso, Heisenberg se perguntava se a filosofia materialista de Demócrito, uma das matrizes distantes da ciência moderna, trouxe alguma *compreensão* de fato das qualidades da matéria. Para ele, a ciência havia atingido os limites da *diánoia* e deveria, a partir da crise, buscar uma *epistême*.

É nessa reviravolta que se pode entender plenamente a seguinte frase de Heisenberg (1990, p. 91): “tal como Copérnico e Galileu abandonaram, nos seus métodos, a ciência descritiva de Aristóteles, assim seremos forçados a abdicar do materialismo atômico de Demócrito e a retomar as idéias de simetria da filosofia de Platão”. A compreensão dos fenômenos subatômicos exigia uma volta da ciência segundo o idealismo: o que significa estabelecer um distanciamento do materialismo, do cartesianismo e do predomínio de um pensamento estritamente formal e matematizado, a *diánoia*.

¹¹¹ “Unambiguous terminology”.

¹¹² Para ilustrar a situação da física nestes anos, cita-se Silvio Chibeni (2005, p. 181): “Embora a nova teoria tenha ganhado aceitação imediata, sua interpretação física ainda estava repleta de discrepâncias internas, que se manifestavam nos argumentos sobre continuidade versus descontinuidade, e partícula versus onda. Essas discrepâncias eram as mesmas que vinham assolando a física desde o início do século, agravadas agora pelo novo formalismo – cujo poder preditivo se reconhecia prontamente – não contribuir para a solução, muito pelo contrário. Numa situação aparentemente ímpar na história da física, tal formalismo não vinha acomodado em nenhum quadro ontológico claro (...) sentia-se difusamente que a elucidação do conteúdo físico da nova teoria não se poderia restringir ao mero fornecimento de regras de correspondência diretas com os fenômenos, requerendo, ao menos à título de apoio heurístico, a introdução de elementos ontológicos mínimos”.

4.0 MATERIALISMO, IDEALISMO E OS DEBATES ACERCA DA TEORIA QUÂNTICA

Antes de analisar o idealismo platônico e seu ressurgimento na física, mais um aspecto da noção de materialismo, segundo Heisenberg, deve ser abordado. Em um texto de meados dos anos 50, Heisenberg polemiza com alguns críticos da Interpretação de Copenhague. Tais correntes interpretativas são criticadas por serem herdeiras de uma “ontologia do materialismo”:

Todos os oponentes da Interpretação de Copenhague estão de acordo sobre um ponto. Segundo eles, seria desejável retornar-se ao conceito de realidade da física clássica ou, para fazermos uso de um termo filosófico mais geral, à *ontologia do materialismo* [grifo do autor]. Eles prefeririam voltar à idéia de um mundo real objetivo, em que mesmo as partes mais diminutas existissem objetivamente (HEISENBERG, 1995, pp. 99 e 100).

No texto “O desenvolvimento das idéias filosóficas, após Descartes, em comparação com a nova situação da teoria quântica”, Heisenberg (1995, pp. 61-72) desenvolve suas idéias sobre a filosofia moderna e a relação desta com o pensamento antigo e a teoria quântica. Heisenberg apresenta três formas de realismo: prático, dogmático e metafísico. Todas partilham da crença segundo a qual “nós ‘objetivaremos’ uma afirmação se mantivermos que seu conteúdo independe das condições sob as quais ela possa ser verificada” (HEISENBERG, 1995, p. 64). Logo, o realismo se opõe à Interpretação de Copenhague, pois essa, segundo o próprio Heisenberg, defende que “não podemos objetivar completamente o resultado de uma observação experimental, e não temos como descrever o que ‘acontece’ entre uma observação e outra” (HEISENBERG, 1995, p. 43).

O *realismo prático* se limita a assumir afirmações que podem “ser objetivadas” e que a maior parte de nossas experiências, na vida cotidiana, “consistam em tais asserções”, o que faz dele um pressuposto necessário da prática da ciência natural (HEISENBERG, 1995, p. 65). Já o *realismo dogmático* defende “não haver assertiva que diga respeito ao mundo material que não possa ser objetivada”. A física clássica estaria alicerçada nele, mas após a teoria quântica ficou óbvio a possibilidade de haver ciência exata fora dos preceitos do realismo dogmático. A “dificuldade” de Einstein em “entender e aceitar” a Interpretação de Copenhague se deve a ele tomar o realismo dogmático como base única da ciência natural (HEISENBERG, 1995, p. 65).

O *realismo metafísico* é definido, sucintamente, como a posição que surge da “partição cartesiana” e que identifica o mundo com a coisa extensa (HEISENBERG, 1995, p. 64). Para um realista metafísico, a questão de se nossas asserções podem ou não ser “objetivadas” nem se coloca, é certo e seguro que elas existem (HEISENBERG, 1995, pp. 64 e 65).

Interessa aqui ressaltar alguns pontos que revelam outros usos para a filosofia nos escritos de Heisenberg. A repartição da história da ciência em uma tendência atomista/materialista em contraposição a uma platônica/idealista serve não apenas a uma melhor compreensão da mesma, mas também funciona como uma estratégia de desqualificação de interpretações concorrentes.

Merece atenção que, na discussão sobre os limites da filosofia cartesiana em fornecer instrumentos conceituais capazes de tratar adequadamente os problemas suscitados pela teoria quântica, Heisenberg se remeta aos cientistas com “dificuldades” em “entender e aceitar a Interpretação de Copenhague” (HEISENBERG, 1995, p. 64). Einstein, único cientista nomeado, além de classificado como um “realista dogmático”, é tido como um herdeiro da “divisão cartesiana”, ou seja, da separação radical entre *res extensa* e *res cogitans* (HEISENBERG, 1995, p. 64). Assim, o retrato apresentado de Einstein o identifica como um cientista reacionário, preso a um realismo ingênuo ou, até mesmo, “pateticamente incapaz de compreender a nova física¹¹³” (MURDOCH, 1994, p. 303). É a imagem tradicional do “dogmático” Einstein, derrotado no debate com Bohr durante o Quinto Congresso de Solvay, em 1927.

Mas a retórica da desqualificação não se limitou a Einstein. Os adversários da interpretação ortodoxa são todos eles tidos como defensores dos “singelos pontos de vista do materialismo¹¹⁴ que prevaleceu, durante o século XIX, na ciência natural” (HEISENBERG, 1995, p.99). Ou seja, as críticas contra o materialismo, expostas anteriormente, não são apenas uma avaliação histórica do desenvolvimento da ciência natural desde Demócrito a Platão. Elas fundamentam os ataques de Heisenberg contra os representantes de um retorno à “ontologia do materialismo” e da “idéia de um mundo real objetivo, em que mesmo as partes mais diminutas existissem objetivamente, no mesmo sentido que existem pedras e árvores – independente de se as observamos ou não” (HEISENBERG, 1995, p. 100).

Na revisão histórica empreendida por Heisenberg, os herdeiros de Demócrito e Descartes, são, além de Einstein, David Bohm, Louis de Broglie, Max von Laue (1879-1960)

¹¹³ “Einstein is pictured as wilfully oblivious to reason, or naive and reactionary, or pathetically unable to grasp the new physics, or all three”.

¹¹⁴ “Simple materialist views”, no original.

e Erwin Schrödinger que, além de taxados como representantes de uma filosofia ultrapassada, são acusados de sacrificarem “propriedades essenciais de simetria que a teoria quântica exhibe” (HEISENBERG, 1995, p. 111).

Durante a década de 1950, houve um renascimento de certas críticas à Interpretação de Copenhague, que a essa altura já era hegemônica. Se até esse momento os críticos se limitavam a alguns poucos oponentes, o pós-guerra trouxe algo que não havia vingado antes: não apenas críticas, mas a elaboração de uma interpretação concorrente ao modelo que, desde os fins dos anos 20 havia se tornado a ortodoxia entre a comunidade de físicos.

4.1 O pós-guerra e as novas interpretações da teoria dos quanta

Um dos temas mais freqüentes nas palestras e textos filosóficos de Heisenberg era a causalidade na física. Para ele, uma das maiores contribuições da nova física foi estabelecer uma nova noção de causalidade ou mesmo o abandono desta. Sua opinião era de que

[o] princípio da incerteza tinha desafiado a noção de causalidade nos processos atômicos, fazendo da causalidade, ou a ausência dela, seu maior tema público. Suas declarações [sobre a causalidade], assim como as de Bohr acerca da complementaridade, encaminhavam-se para além do estreito mundo da Mecânica Quântica¹¹⁵ (CASSIDY, 1991, pp. 255 e 256).

Conseqüentemente, teorias que tentassem introduzir algum tipo de causalidade, como as que utilizavam variáveis ocultas¹¹⁶, eram consideradas incompatíveis com a nova física. Segundo Franco Selleri (SELLERI, 1986, p. 58):

A defesa dessa filosofia não-causal foi levada adiante por J. von Neumann, que propôs em 1932, seu famoso teorema, em que *se declarava a impossibilidade* [grifo nosso] de completar de modo causal a mecânica quântica, a partir de considerações muito gerais acerca da estrutura matemática das teorias físicas. Bohr, Pauli, Heisenberg e Jordan acentuaram energicamente a importância do teorema; e a grande autoridade deles, junto com a complexidade matemática do teorema de von Neumann, teve o efeito prático de proscriver a idéia de variáveis ocultas.

¹¹⁵ “His uncertainty principle was a challenge to the notion of causality in atomic process, and causality, or lack of it, became his major public theme. His claims, like Bohr’s for complementarity, went far beyond their narrow quantum-mechanical significance”.

¹¹⁶ “Uma teoria de variáveis ocultas (TVO) ou ‘escondidas’ (em inglês: *hidden*) para a Mecânica Quântica considera que a descrição de um sistema físico por meio de um vetor de estado $|\chi\rangle$ é incompleta, havendo a necessidade de se considerarem variáveis adicionais λ ” (PESSOA Jr., 2006, p. 225). Ou seja, a descrição de um estado de um sistema quântico é incompleta, sendo necessário a introdução de variáveis ocultas como posições, momento e velocidade bem determinadas. Em outras palavras, um sistema pode ser descrito “por uma função de onda e pela velocidade e posição de todas as partículas” (“In Bohm’s theory a system at any time is described by a wavefunction *and* by the positions and velocities of all particles”) (SQUIRES, 1986, p. 79).

Ou seja, a interpretação elaborada pelos físicos de Copenhague e de Göttingen seria intrínseca à própria teoria quântica. Tal crença pode ser localizada em vários artigos de Heisenberg e de outros físicos pertencentes ao grupo de Bohr. Segundo James Cushing (1994, pp. 76 e 77), Leon Rosenfeld, num artigo publicado em 1961 na *Nature*, afirmava que as tentativas de se colocar em dúvida a interpretação padrão da teoria quântica eram fúteis, pois as leis da mecânica quântica não eram meros inventos humanos, mas sim um aspecto da natureza que fora descoberto. Esse tipo de afirmação – típica de diversos integrantes do círculo de Bohr – em favor dos princípios centrais da versão “ortodoxa” da mecânica quântica, é marcado por “um ar de finalidade, como se elas constituíssem provas da *impossibilidade* ou argumentos de que visões alternativas seriam insustentáveis logicamente e em princípio” (CUSHING, 2000, p. 4).

Além disso, o intenso e formidável sucesso na aplicação da teoria às mais diferentes áreas da física fez com que a maioria dos físicos ignorasse os problemas epistemológicos que a teoria quântica trazia consigo. Segundo Max Jammer (1974, pp. 247–251 *apud* FREIRE Jr., 2003, p. 573), até os anos 40 houve o estabelecimento de uma “monocracia de Copenhague” na qual seus preceitos não eram praticamente desafiados pela grande maioria dos físicos. A dissensão de figuras como Einstein e Schrödinger era tida como “expressões de uma disputa estritamente filosófica (...) sem implicações para o desenvolvimento da física” (FREIRE Jr., 2003, p. 575).

No caso do ataque a Einstein, nem mesmo seu mais contundente argumento contra as idéias de Copenhague – o argumento EPR – é expressamente citado por Heisenberg nas fontes consultadas. As críticas estabelecem-se devido a uma *diferença filosófica* entre os lados envolvidos. A ciência moderna materialista e seus apologistas não devem ser combatidos no terreno científico. Este, no que tange a mecânica quântica, já não se problematiza mais – os esforços do grupo liderado por Bohr já estabeleceu os novos fundamentos desse campo. A batalha deve ser travada no campo filosófico, pois apenas nele é que as idéias concorrentes poderiam ser desqualificadas, independente de seus argumentos científicos, como “metafísicas” ou “ideológicas”.

Esse credo só se modificaria décadas depois, nos fins da década de 1970, com o “reconhecimento e a legitimação da existência de uma controvérsia científica relativa à interpretação da física quântica” (FREIRE Jr., 2003, p. 576). A viragem entre esses dois períodos deu-se após a Segunda Grande Guerra e tem como marco o ano de 1952 com a publicação de dois artigos de David Bohm (1917-1994): “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of ‘Hidden’ Variables, I and II” (BOHM, 1952). Neles, o físico

norte-americano propõe aquilo que o teorema de von Neumann havia impossibilitado: uma teoria que permitia as mesmas predições da mecânica quântica sem abrir mão da causalidade.

A elaboração da Teoria das Variáveis Ocultas – TVO (ou Interpretação causal) de Bohm não foi um movimento isolado durante o pós-guerra. O contexto da Guerra Fria enxertou um conteúdo ideológico no debate acerca da mecânica quântica com as críticas e propostas de Dimitrii Blokhintsev que, no compasso dos ideais de Andrei Zhdanov e de Trofim Lyssenko¹¹⁷, contribuiu para o “banimento da complementaridade da URSS” (FREIRE Jr., 1999, p. 45). Outro fator importante e que, assim como o contato com os críticos soviéticos da física de Copenhague, influenciou diretamente Bohm,¹¹⁸ foi a postura persistente de Einstein em suas críticas à Interpretação Ortodoxa, apesar da duradoura hegemonia dela durante mais de duas décadas.

Se esses três elementos não estremeceram o *status* das idéias do grupo de Copenhague na comunidade científica, ao menos fizeram com que Heisenberg se voltasse novamente para as bases epistemológicas da física quântica de modo a estabelecer, assim como foi feito em reação à mecânica ondulatória na década de 1920 (cf. supra pp. 47-49), a prioridade da interpretação da complementaridade sobre possíveis concorrentes.

4.1.1 A Teoria de David Bohm

Em 1951, Bohm publica *Quantum Theory* (1951), livro referencial até hoje na apresentação da teoria quântica. Além de introduzir o argumento EPR, diferindo de grande parte da literatura especializada da época, o autor, apesar de não romper em muitos pontos da com a interpretação ortodoxa, defendeu uma ontologia para a mecânica quântica que se distanciava da proposta de Bohr. Nas palavras de Freire Jr. (1999, p. 48)

[Bohm] combinou, em uma interpretação própria, a interpretação da complementaridade, devida a Niels Bohr, com uma ontologia realista. Como se sabe, a complementaridade bohriana não se dirige para a elaboração de um ontologia, (...) voltando-se antes para designar as condições pelas quais podemos

¹¹⁷ Andrei Zhdanov, membro do Comitê Central do PCURSS, responsável pela rigorosa cartilha ideológica que estabeleceu o cânon cultural da União Soviética durante o governo de Stálin. Já Lyssenko foi o responsável pelo expurgo da genética da ciência oficial soviética.

¹¹⁸ Segundo Pessoa Jr. (PESSOA Jr., 2006, p. 231) “Foi na União Soviética que surgiu o interesse pelas TVOs no início dos anos 50, devido às pressões oficiais (a partir de 1947) contra ‘a influência burguesa na ciência soviética’, e contra o idealismo da interpretação da complementaridade. Dimitrii Blokhintsev, que passava a defender a interpretação dos coletivos da Teoria Quântica, também considerou em 1951 a plausibilidade de uma TVO que escaparia da prova de impossibilidade de von Neumann por não satisfazer o formalismo da Mecânica Quântica. Foi talvez lendo um artigo dele que David Bohm se inspirou (além de suas discussões com Einstein) no projeto de sua TVO”.

conhecer o mundo das experiências em física atômica e molecular. Bohm não considerou a complementaridade como um impeditivo para afirmações de natureza ontológica, dedicando atenção a “uma tentativa de construir uma representação física da natureza quântica da matéria” (...) podemos afirmar que neste livro Bohm combinou, explicitamente, complementaridade com realismo, falando de um mundo que tem existência independente das teorias físicas, e que pode ser conhecido por essas mesmas teorias.

Deste modo, as opções filosóficas apresentadas por Bohm em seu livro contrariavam o instrumentalismo e subjetivismo dominante na época. Um exemplo dessa discrepância pode ser constatado logo no início do último capítulo de *Quantum Theory*. O físico norte-americano afirma que através de todo seu livro ele havia tentado “*desenvolver uma descrição qualitativa* das propriedades da matéria implicadas pela teoria quântica¹¹⁹” (BOHM, 1951, p. 624, grifo nosso).

O trecho a seguir demonstra como Bohm distancia-se do subjetivismo típico das idéias de Bohr:

[As] transformações entre os aspectos ondulatórios e corpusculares da matéria [...] podem ser induzidas não tão somente através da interação com um aparato de medição, mas também através de qualquer interação com qualquer sistema material, quer faça parte de um aparato de medição ou não. [...] Se, por exemplo, um elétron é transmutado em um objeto do tipo ondulatório quando entra em interação com um cristal inserido num aparelho laboratorial, ocorre o mesmo caso ele interagir com um cristal no fundo do mar ou na espaço interestelar (BOHM, 1951, p. 133).¹²⁰

O contraste é evidente: não há resquício das preocupações epistemológicas de Bohr relativas ao “limite absoluto à possibilidade de falarmos de um comportamento dos objetos atômicos que independa dos meios de observação” e a condenação do pressuposto “de que é possível traçar uma distinção nítida entre o comportamento dos objetos e os meios de observação” (BOHR, 1995, p. 32).¹²¹

¹¹⁹ “Throughout this book, we have tried to develop a qualitative description of the properties of matter implied by the quantum theory”.

¹²⁰ “Transformations between wave and particle aspects of matter [...] can be brought about not only through interaction with measuring apparatus, but also through interaction with any material system, whether it is part a measuring apparatus or not. [...] If, for example, an electron is transformed into a wave-like object when it interacts with a metal crystal inside a piece of laboratory apparatus, it will also do the same if it apparatus, it will also do the same if it interacts with similar crystal at the bottom of the sea, or in interstellar space”.

¹²¹ Mara Beller (1999, p. 256) faz a seguinte comparação entre as teorias de Bohr e Bohm: “Bohr, distanciando-se da matemática, fala de uma ‘impossibilidade essencial em se analisar’ a interação que ocorre durante a medição. Bohm considera a medição como um caso especial do processo quântico, sujeitando-o à detalhada análise matemática. Bohr, utilizando a noção de totalidade, negou a possibilidade de uma descrição espaço-temporal do experimento das duas fendas ou das transições energéticas no átomo. Bohm forneceu descrições causais e espaço-temporais de ambos. Bohr baseou suas conclusões na ruptura com a idéia clássica de movimento e na alegada impossibilidade de trazê-la de volta com novas idéias. Bohm construiu uma nova ferramenta conceitual para descrever o comportamento espaço-temporal não-clássico – o potencial quântico. A totalidade para Bohm é uma ferramenta matemática para a exploração do mundo quântico. Para Bohr é uma

A ruptura completa com a interpretação usual da mecânica quântica ainda não seria atingida em *Quantum theory*. Em entrevista a Rocha Barros, em 1983, Bohm afirmou que o livro de 1951 fora uma tentativa de tentar entender as idéias de Niels Bohr, para ele nem sempre expostas de modo claro devido ao “estilo de Bohr, que não fazia afirmações definitivas, positivas” (ROCHA BARROS, 1990, p. 190). Apesar de haver recebido entusiásticas respostas ao livro, especialmente de Pauli e Einstein (Bohm recebeu um exemplar enviado pelo autor, mas não respondeu), Bohm ainda não estava satisfeito com o resultado.

O próximo passo rumo à ruptura com a interpretação ortodoxa nasceu de uma série de discussões com Einstein motivadas pela recepção calorosa deste para com *Quantum theory*. O conteúdo dessas conversas seria resumido por Bohm nos seguintes termos

Ele achou que o livro refletia o ponto de vista de Bohr, mas que ainda não estava convencido. Discutimos suas objeções, que são basicamente as que ele dá no estudo do paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen, mas eu diria isso de uma forma ligeiramente diferente: a teoria está incompleta, não no sentido de que uma teoria completa explicaria tudo a respeito do universo, mas no sentido de que um relógio está incompleto se uma peça importante estiver faltando... ele achava que uma peça importante da Teoria Quântica estava faltando, uma peça que a faria ter sentido... Bem, comecei a sentir a mesma coisa; a questão com que estava começando a me defrontar, aquela da *onda indo e vindo*, era uma discussão sobre o real, um real independente do observador, ao passo que, do modo usual, o real ficava dependendo do observador (ROCHA BARROS, 1990, pp. 190 – 191).

Para Bohm, havia ficado claro que as idéias do grupo de Copenhague eram dotadas de um caráter subjetivista que acabava limitando o manejo da teoria em termos realistas, ou seja, “de um real independente do observador”. Em 1952, David Bohm publica dois artigos na *Physical Review* (BOHM, 1952) que, além de retornarem a um tipo de realismo¹²² o qual havia ficado em descrédito entre os físicos desde a disseminação do “espírito de Copenhague” mais de 20 anos antes, foram marcados pela introdução de variáveis (ou parâmetros) ocultas

arma de proibição”. (“Bohr, turning away from mathematics, talked about the ‘essential unsurveyability’ of the measurement interaction. Bohm considered measurement to be a special case of the quantum process and subjected it to detailed mathematical analysis. Bohr, using the notion of wholeness, denied the possibility of a space-time description of energetic transitions in the atom. Bohm provided causal, realistic space-time descriptions of both. Bohr based his conclusions on the breakdown of the classical idea of motion and on the alleged impossibility of coming up with entirely new ideas. Bohm construed a new conceptual tool for describing nonclassical space-time behavior – the quantum potential. Bohm’s wholeness is a mathematical tool for the exploration of the quantum world. Bohr’s wholeness is a weapon of prohibition”).

¹²² Para o filósofo e matemático finlandês Ilkka Niiniluoto, Bohm pode ser classificado como defensor – assim como Hegel, Peirce e Whitehead – de uma “*ontology process*”, um ontologia que contrastando com as “*thing ontologies*” (...) “toma os conceitos dinâmicos de eventos e processos como mais básicos do que o conceito de objeto” (NIINILUOTO, 1999, p. 31). Freire Jr. (1999, p. 42) corrobora essa classificação quando afirma que “o mundo bohmiano, quando da redação de *Quantum Theory*, era um mundo indivisível (não-local, diríamos hoje), flexível, sempre mutante, mas também um mundo probabilístico, no qual o conceito de ‘determinismo completo’ é substituído pelo de causalidade como uma ‘tendência estatística’; um mundo no qual o espaço-tempo comparece como um requisito à descrição deste mundo mas não como constitutivo intrínseco do mundo quântico”.

na teoria quântica. Apesar de irem além da mecânica quântica na atribuição de valores às grandezas físicas, coincidem com ela nas previsões probabilistas. O uso das variáveis ocultas restabeleceria o determinismo, e o aspecto corpuscular das partículas¹²³. Nas palavras de James Cushing (1994, pp. 43 e 44):

Colocando todos os detalhes matemáticos de lado, o que Bohm fez foi tomar a equação de Schrödinger, em sua forma de equação de onda e que então pede naturalmente uma interpretação ondulatória (ou corpuscular-ondulatória), e a reescreveu numa forma similar a segunda lei de Newton, que naturalmente pede uma interpretação corpuscular em termos de trajetórias¹²⁴.

Além disso, a TVO de Bohm modificava o modo como probabilidade se situava no âmbito dos fenômenos quânticos:

Na interpretação usual, contudo, a necessidade de uma descrição probabilista é tida como inerente à estrutura da matéria (...) em nossa interpretação, o uso de *ensembles* estatísticos é (assim como no caso da mecânica clássica) apenas uma necessidade prática [...] o uso de estatística não é inerente à estrutura conceitual, mas meramente uma consequência de nossa ignorância das condições iniciais precisas da partícula¹²⁵ (BOHM, 1952, p. 171 *apud* CUSHING, 1994, p. 44 e 45).

A utilização de variáveis ocultas numa descrição causal dos fenômenos microfísicos não era uma novidade absoluta na história da física quântica. Louis de Broglie publicou quatro artigos, entre os anos de 1924 e 1927, que tentavam inserir causalidade na explicação do mundo quântico com a introdução de parâmetros ocultos. O físico francês abandonou suas idéias após uma série de críticas apresentadas por Wolfgang Pauli no Congresso de Solvay em 1927¹²⁶. Bohm, quando da publicação da primeira parte de seu artigo em 1952, não tinha conhecimento nem das críticas feitas por Pauli nem mesmo da teoria de de Broglie. Na

¹²³ O que não excluí o dualismo da teoria de Bohm, pois além dos corpúsculos há o potencial quântico.

¹²⁴ “Mesmo com a recuperação da noção de ‘trajetória de partículas’, seria um erro dizer que a teoria Broglie-Bohm é um retorno à Mecânica Clássica. Isso porque o potencial quântico tem uma série de propriedades inusitadas [...] isso fica claro em experimentos envolvendo duas partículas correlacionadas, como no paradoxo EPR: a escolha do observável a ser medido para uma partícula afeta instantaneamente o potencial quântico associado à outra partícula. O potencial quântico é *não-local*” (PESSOA Jr. 2006, pp. 238 – 239). (Original do trecho: “All of the mathematical details aside, what Bohm did was take the Schrödinger equation, which has form of a wave equation and hence naturally invites a wave (or, perhaps, a wave-particle) interpretation, and reexpressed it in a form similar to Newton’s second law of motion, which naturally invites a particle interpretation in terms of trajectories”).

¹²⁵ “In the usual interpretation, however, the need for a probability description is regarded as inherent in the very structure of matter, whereas in our interpretation, it arises [...] in our interpretation, the use of a statistical ensemble is (as the case of classical mechanics) only a practical necessity, and not a reflection of an inherent limitation on the precision with which it is correct for us conceive of the variables defining the state of the system [...] the use of statistics is, however, not inherent in the conceptual structure, but merely a consequences of our ignorance of the precise initial conditions of the particle”.

¹²⁶ Louis de Broglie só adotaria novamente um programa causal nos anos 50, quando da publicação dos artigos de Bohm.

segunda parte do artigo, após a análise de Pauli da primeira parte, foram incorporados, além de referências ao trabalho de de Broglie, saídas que tentavam fazer frente às críticas do criador do princípio de exclusão.

Segundo Olival Freire Jr. (1999, pp. 49 e 50), as características epistemológicas e científicas dos artigos seminais de Bohm são as seguintes:

1. Trata-se da construção de um modelo físico capaz de reproduzir todos os resultados que podem ser obtidos com a teoria quântica, na sua interpretação usual [...] esta concordância está restrita, no artigo, aos resultados da teoria quântica não-relativista.
2. Esta reprodução é obtida, contudo, através de um “quadro conceitual mais amplo do que aquele da interpretação usual”, o qual, com o auxílio de parâmetros adicionais (*hidden variables*), aos usados pela teoria quântica, torna possível uma descrição precisa e contínua de todos os processos, mesmo no nível quântico”, ou, de forma equivalente, “permite uma descrição contínua, detalhada e causal de todos os processos”. Obtém-se com isto, uma recuperação do determinismo e das trajetórias próprios à física clássica. [...]
3. O modelo construído reproduz resultados básicos da teoria quântica, mas [...] conforme Bohm “a formulação matemática usual parece levar a dificuldades insolúveis quando ela é extrapolada para o domínio de distâncias da ordem de 10^{-13} cm ou menos. É por isso que a interpretação aqui sugerida possa ser necessária para a resolução dessas dificuldades”.

Os objetivos de Bohm iam além de uma teoria que apenas reproduzisse todos os resultados do modelo usual. Mesmo já sendo notável, em vista às restrições colocadas pela prova de von Neumann, a TVO de Bohm ambicionava mais que isso. Ela pretendia abarcar um campo no qual a interpretação usual enfrentava diversos problemas: o domínio da ordem de 10^{-13} cm, associado ao núcleo e às partículas elementares. A física de partículas elementares vivia um período de ebulição no pós-guerra com a descoberta, na expressão jocosa de Emilio Segrè (1987, p. 256), “de uma horda de novas partículas”, e nenhuma teoria que pudesse organizá-las. Se as partículas elementares eram os constituintes fundamentais da matéria, deveria existir uma lei que permitisse satisfazer a “idéia, ou talvez mais propriamente o dogma, de que o mundo em que vivemos, aparentemente complexo e imprevisível, pode ser reduzido a um pequeno número de ‘elementos’ governados por leis fundamentais” (VARELA, 1996, p. 208).

Do ponto de vista epistemológico, a teoria de Bohm, com a adoção de um “quadro conceitual mais amplo do que aquele da interpretação usual”, rompia com os dogmas filosóficos que estavam inseridos na teoria quântica segundo o “espírito de Copenhague”. James Cushing (2000, p. 08) caracteriza a “matriz conceitual” da TVO de Bohm nos seguintes termos:

No que tange à ontologia, ela fornece uma estória de imagens num cenário espaço-temporal (ou seja, haveria a cada instante partículas que de fato existem e que seguem trajetórias definidas). Esta teoria é completamente determinista e sustenta uma realidade objetiva, independente do observador. O processo de medição, cuja natureza envolve inerentemente muitos corpos, é basicamente um ato de descoberta – *não* há um “problema de medição quântico”. Há um critério bem definido para um limite clássico, de forma que não há uma incompatibilidade conceitual entre os domínios clássico e quântico.

Praticamente todos os pilares da interpretação de Copenhague eram atacados pela teoria de Bohm: a impossibilidade de visualização (*anschauliche*) do mundo atômico, o abandono do determinismo e da causalidade em moldes clássicos, a referência incontornável ao observador na descrição dos sistemas quânticos e o problema da medição. Os artigos de Bohm rompiam com os argumentos que afirmavam de maneira incontestável a impossibilidade de teorias causais e de interpretações da teoria quântica que não partilhassem do credo de Copenhague.

Nas palavras de John Bell (BELL 1987, p. 160 *apud* CUSHING, 2000, pp. 10), “em 1952 eu vi o impossível ser feito. Estava nos artigos de David Bohm [...] mais importante, em minha opinião, é que a subjetividade da versão ortodoxa, a referência necessária ao ‘observador’ poderia ser eliminada”. Na continuação do texto, John Bell expressa como a retórica que construiu a hegemonia da interpretação de Copenhague funcionava não apenas em ataques diretos, mas também com o silenciamento relativo a hipóteses concorrentes:

Mas então por que Born não havia me falado sobre essa “onda piloto”? nem que fosse para apontar o que ela tinha de errado? Por que von Neumann não a considerou? E de forma mais extraordinária, por que as pessoas continuavam produzindo provas de “impossibilidade”, após 1952, e tão recentemente quanto 1978? Quando mesmo Pauli, Rosenfeld e Heisenberg não faziam uma crítica mais devastadora da versão de Bohm do que rotulá-la de “metafísica” e “ideológica”? (BELL 1987, p. 160 *apud* CUSHING, 2000, pp. 11).

A recepção ao programa causal de Bohm foi bem mais variada do que o texto de Bell pode transparecer. Em um artigo onde se estudou tal recepção na comunidade científica, Freire Jr, Michel Paty e Alberto Barros (2000, pp. 125 - 128); estabeleceram as seguintes distinções:

a) Quanto a críticas estritamente científicas, Pauli foi um dos primeiros analisar e reconhecer a consistência lógica do modelo proposto. Entretanto, mesmo após a versão definitiva dos artigos terem incorporado soluções para as críticas de Pauli (as mesmas que foram apresentadas contras as idéias de Louis de Broglie na década de 1920), ela ainda padecia pelo fato de possuir um caráter não-relativista. Nas palavras de Pauli: “[...] Eu não

posso considerar como profundo um argumento que prega a reforma da Teoria Quântica no domínio relativista, mas só trata efetivamente da sua parte não relativista, a qual está correta” (PAULI, 1951, p. 436 *apud* FREIRE Jr., PATY e ROCHA BARROS, 2000, p. 126).

b) Houve, em contrapartida, adesões que aprofundaram o programa causal de Bohm no terreno científico. Jean-Pierre Vigier e Louis de Broglie lideraram o grupo de jovens físicos na França que estabeleceram como metas “uma maior justificativa conceitual do modelo original, a sua generalização relativista e a possibilidade de abordagem do domínio de campos e partículas” (FREIRE Jr., PATY e ROCHA BARROS, 2000, p. 128). Se, por um lado, a tentativa de obter uma generalização relativista do modelo causal fracassou, por outro, a abordagem das partículas elementares e de uma classificação delas nos moldes do programa causal foi bem mais frutífera, mesmo que relativamente desconhecida (FREIRE Jr., PATY e ROCHA BARROS, 2000, p. 128).

c) Muitos daqueles que apoiaram as idéias de Bohm, como Hans Freistadt nos Estados Unidos, o fizeram tendo em vista a recuperação da causalidade e do determinismo quanto à teoria quântica. Seria um apoio eminentemente filosófico.

d) Em contrapartida, inúmeros cientistas centraram suas críticas nos pressupostos filosóficos da proposta de Bohm. Segundo Freire Jr. (1999, p. 76), sob a rubrica de “críticas epistemológicas”, encontram-se considerações de ordem filosófica que desempenharam “um papel mais importante que a análise crítica dos detalhes técnicos da proposição em debate”. Leon Rosenfeld e T. Takabayasi recusavam o determinismo e a possibilidade de se elaborar para o mundo quântico uma representação do espaço-tempo em termos clássicos. “Para esses críticos a interpretação causal era vista como um passo atrás face às aquisições conceituais e epistemológicas da teoria quântica” (FREIRE Jr., PATY e ROCHA BARROS, 2000, p. 125).

4.2 A reação de Heisenberg às novas interpretações.

As considerações de Heisenberg sobre a TVO de Bohm encaixam-se perfeitamente nas do último grupo descrito. Mas ele não se limitou ao físico norte-americano. Suas mais ásperas e diretas críticas contra as interpretações concorrentes vieram a lume durante uma palestra apresentada na Universidade de St. Andrews, na Escócia, durante os anos de 1955 e 1956. Em 1958, seriam publicadas num único livro, *Physics and Philosophy: The revolution in modern science* (HEISENBERG, 1995), uma espécie de suma das opiniões de Heisenberg sobre ciência, filosofia e história da ciência. O capítulo VIII, “Críticas e contrapropostas à Interpretação de Copenhague da Teoria Quântica” (HEISENBERG, 1995, pp. 99 – 111), é

dedicado exclusivamente ao detalhamento de suas restrições frente às propostas de Bohm, de Imre Fényes¹²⁷, A. D. Alexandrov, D. I. Blokhintsev, Schrödinger, Einstein e Max von Laue.

De início, Heisenberg declara que a Interpretação de Copenhague provocou o afastamento entre a física e o materialismo (1995, p. 99) que prevaleceu durante o século XIX. Mas a influência do materialismo foi esmagadora: abrangeu desde o pensamento filosófico, passando pela ciência natural e chegando até “o homem da rua” (1995, p. 99). Em função dessa profunda ascendência das teses materialistas sobre os mais variados pontos de vista é que se explica “que muitas tentativas tenham sido feitas para criticar a interpretação de Copenhague” (1995, p. 99). Por mais que Heisenberg até mesmo estabeleça, como será visto adiante, uma diferenciação entre os críticos da Interpretação de Copenhague, todos os opositores são vistos como materialistas nostálgicos, que não perceberam, ou se perceberam, não aceitaram, a revolução introduzida de modo inexorável pelo grupo de Copenhague e Göttingen.

A cada momento que Heisenberg formula uma crítica contra seus opositores, ele o faz num movimento duplo. Ao denegrir posições contrárias a suas, ele também reforça a elaboração daquilo que a história da física no século XX considerou como a Interpretação de Copenhague, mobilizando todo um aparato conceitual herdado da filosofia grega.

Para Heisenberg, os opositores podem ser divididos em três grupos. O primeiro seria caracterizado pelo fato de não tentar mudar a Interpretação de Copenhague no que diz respeito a suas predições empíricas. Seu foco seria, antes, modificar a linguagem da teoria quântica de modo a aproximá-la da física clássica. Para Heisenberg (1995, p. 99), esse grupo que “tenta mudar a filosofia sem tocar na física” teria como participantes David Bohm, Imre Fényes, A. D. Alexandrov e D. I. Blokhintsev.

Seria impossível, segundo Heisenberg (1995, p. 100), refutar tais concepções no campo experimental, “pois elas somente repetem a interpretação de Copenhague em linguagem diferente”. Elas não chegariam nem mesmo a se configurar como contrapropostas a ela.¹²⁸ Tais assertivas apenas reforçam o modo costumeiro da argumentação de Heisenberg, restringindo o debate ao âmbito filosófico e reforçando a concepção de que a Interpretação de Copenhague era uma verdade natural que havia sido descoberta e, portanto, um fato científico incontornável.

¹²⁷ Físico húngaro, (1917 – 1977).

¹²⁸ Mario Bunge (2002b, p. 86) discorda frontalmente dessa opinião, pois a teoria de Bohm “trata-se de uma nova teoria, pois contém conceitos e fórmulas adicionais”.

A teoria de Bohm, nas palavras do criador do Princípio da Incerteza, consideraria as partículas elementares como “objetivamente reais” (HEISENBERG, 1995, p. 100), do mesmo modo como eram considerados os pontos materiais na física newtoniana. As ondas também seriam “objetivamente reais, como os campos elétricos” (HEISENBERG, 1995, p. 100). A primeira crítica direta seria quanto ao estatuto do termo “real” no mundo quântico:

Aqui encontramos a primeira dificuldade: que significa a afirmação de que as ondas no espaço de configuração são “reais”? Esse espaço é um espaço assaz abstrato. A palavra “real” remonta à palavra latina *res* que significa “coisa”; mas as coisas residem no espaço tridimensional ordinário e não em um espaço de configuração abstrato (HEISENBERG, 1995, p. 100).

O tipo de argumento remonta às restrições levantadas por Heisenberg com a mecânica ondulatória de Schrödinger ainda na década de 1920¹²⁹: um retorno à construção de uma *anschauliche* do mundo subatômico, ou seja, um retorno às representações objetivas do espaço-tempo em nível subatômico seria incompatível com a teoria quântica. Heisenberg continua:

As ondas, em um espaço de configuração, podem ser classificadas de “objetivas” se com isso se quer dizer que essas ondas são independentes de qualquer observador, mas dificilmente se poderá chamá-las de “reais”, a menos que se queira mudar o sentido do termo (1995, p. 101).

Ora, Heisenberg parece ceder em seu recorrente subjetivismo e concede que as ondas existam “independentes de qualquer observador”, mas que não é possível admitir que elas sejam reais no mesmo sentido que os objetos cotidianos, conformados num espaço tridimensional.

O uso de variáveis ocultas viola a economia de grandezas estabelecida por Heisenberg desde 1925, quando da criação da Mecânica Matricial, revelando-se um tipo de “‘superestrutura ideológica’ que pouco tem a ver com a realidade física imediata” (HEISENBERG, 1995, p. 101). Não fica claro o que um crítico do realismo materialista quer dizer com “realidade física imediata” – seriam dados sensíveis? Dados experimentais? Tal tipo de imprecisão não é rara nos escritos de Heisenberg. Apesar disso, para ele, a adoção dos parâmetros ocultos só pode entrar na descrição dos processos quânticos caso a própria teoria fosse modificada (HEISENBERG, 1995, p. 101).

A questão, como Heisenberg já havia ressaltado, resumia-se a uma diferença quanto à linguagem utilizada:

¹²⁹ Cf. supra pp. 45-47.

Portanto, o problema que resta se refere à conveniência da linguagem por ele adotada. Além da objeção já feita que, ao falar de trajetórias de partículas, nos defrontamos com uma “superestrutura ideológica” supérflua, fazemos questão especial de mencionar aqui que a linguagem utilizada por Bohm destrói a simetria entre posição e velocidade, implícita na teoria quântica: nas medidas de posição, Bohm aceita a interpretação usual, rejeitando-a, todavia, mas que dizem respeito à velocidade ou momento linear. Visto que as propriedades de simetria englobam sempre o que há de mais essencial em uma teoria, é difícil se perceber o que se ganharia ao omiti-las da linguagem correspondente (1995, p. 102).

Destaca-se, nesse trecho, a importância que Heisenberg dá às simetrias presentes nas teorias. Mais a frente¹³⁰, quando se analisará o idealismo platônico e sua importância na história da ciência e, em especial, na física do século XX, tornar-se-á evidente o *status* que o físico alemão dá à noção de simetria. A última palavra dele acerca do recurso às variáveis ocultas remete à própria estrutura da teoria quântica e às suas simetrias:

As leis quânticas são tais que as “variáveis ocultas”, inventadas *ad hoc*, jamais poderão ser observadas. Caso introduzamos essas variáveis, como entidades fictícias, na interpretação da teoria, teremos destruído aquelas propriedades de simetria decisivas (HEISENBERG, 1995, p. 104).

Após criticar as propostas dos físicos soviéticos Alexandrov e Blokhintsev, especialmente a tentativa de se extirpar o observador da teoria quântica em nome do materialismo dialético (HEISENBERG, 1995, pp. 104-106), Heisenberg finaliza sua análise do primeiro grupo de opositores da interpretação usual.

Para o segundo grupo, o objetivo seria modificar a teoria quântica em suas estruturas matemáticas, “de maneira a chegar a uma interpretação filosófica diversa” (HEISENBERG, 1995, p. 108). Como integrante desse grupo, Heisenberg cita apenas o físico húngaro Janossy Lajos (1912-1978) que procurou “modificar a mecânica quântica de tal maneira que, embora muitos de seus resultados sejam mantidos, sua estrutura fique mais próxima da física clássica” (HEISENBERG, 1995, p. 108). Heisenberg defende que, com base nas experiências, não há razão para se efetuar tais mudanças e que, além disso, “ainda restariam algumas conseqüências alarmantes de tal interpretação que o próprio Janossy levanta” (HEISENBERG, 1995, p. 108): reversão de causa e efeito na ordem do tempo e infração aos limites impostos pela Relatividade Restrita, por exemplo.

O último grupo, e o primeiro segundo a ordem cronológica, é composto por fundadores da teoria quântica, como Einstein e Schrödinger, juntamente com Max von Laue.

¹³⁰ Cf. *infra* pp. 98-105.

Eles expressam sua “insatisfação generalizada com os resultados da interpretação de Copenhague e especialmente com suas conclusões filosóficas, sem, todavia, fazer contrapropostas definidas” (HEISENBERG, 1995, p. 99). O criador da mecânica matricial volta a carga contra Einstein mais uma vez. Segundo ele, os argumentos de Einstein seriam estes (HEISENBERG, 1995, p. 109):

O esquema matemático da teoria quântica parece propiciar uma descrição perfeitamente adequada no que diz respeito aos atributos estatísticos dos fenômenos atômicos. Mas [...] a interpretação usual não permite a descrição do que realmente acontece independente das observações, ou entre duas delas. Mas alguma coisa deve ter acontecido, sobre isso não há dúvida; essa “alguma coisa” precisa ser descrita, seja em termos de elétrons, ondas ou *quanta* de luz, mas, a menos que ela seja descrita de alguma maneira, a tarefa da física não está terminada. Não se pode admitir que essa “alguma coisa” diga respeito somente ao ato de observação. O físico deve postular, em sua ciência, que ele está estudando um mundo que não construiu, o qual estará sempre presente e basicamente inalterado, mesmo em sua ausência.

Por mais que o texto contenha trechos que lembram a profissão de fé realista que abre o artigo onde se elabora o argumento EPR¹³¹, não se faz nenhuma referência a ele. Contra a exigência por uma “descrição do que realmente acontece independente das observações”, Heisenberg argumenta que devido ao fato de utilizarmos a linguagem da física clássica – um refinamento de nossa linguagem cotidiana – para se descrever os fenômenos quânticos, haveria um limite intransponível na efetivação de tal tarefa:

Toda a interpretação elaborada acerca da história da ciência moderna, centralizada nos eixos materialismo/idealismo e *diánoia/epistême*, serve como moldura filosófica que sustenta essas críticas. Bohm e Einstein representam, em seus propósitos, o retorno a um materialismo objetivista que não consegue se desvencilhar dos limites da *diánoia*; um materialismo que não consegue se adequar ao fato de que “a ciência natural não se restringe simplesmente a descrever e explicar a Natureza, ela resulta da interação entre nós mesmos e a Natureza, e propicia uma descrição que é revelada pelo nosso método de questionar” (HEISENBERG, 1995, p. 64).

O que resta então? Após todas as interdições epistemológicas, existe algum mínimo rastro de uma ontologia do mundo quântico na visão de Heisenberg? No que se refere ao texto analisado, parece que sim. Ao distinguir a Interpretação de Copenhague do positivismo, que “toma as percepções sensoriais do observador como elementos básicos da realidade” (1995, p. 110), o físico alemão afirma que a interpretação de Copenhague “considera as coisas e

¹³¹ Cf. supra p. 57.

processos (passíveis de uma descrição clássica), isto é, o real, como o fundamento de toda a interpretação física” (HEISENBERG, 1995, p. 110). O real, que parecia ter sido renegado em absoluto quando da crítica a Bohm, retorna. É ele, e não as percepções sensoriais, que fundamentam as interpretações físicas. Esse real, contudo, não é aquele do materialismo: além de “coisas”, ele é composto por *simetrias matemáticas*. O fato de nosso conhecimento ser incompleto “por si mesmo” (HEISENBERG, 1995, p. 110), em função das leis quânticas, não evita a possibilidade de se postular a existência desse real.

Nessa nova perspectiva, o trecho a seguir, em parte já citado anteriormente¹³², mostra uma gama de intenções e significados que, a princípio, não aparentava ter:

Se o próton não é uma partícula elementar, então em que consiste? Em matéria, será a resposta; mas matéria consiste em partículas, e conseqüentemente o próton é constituído por um número e espécie arbitrários de partículas, e assim por diante. Vê-se facilmente deste exemplo que não se consegue nenhuma resposta sensata a estas questões, que foram e continuarão a ser indagadas segundo uma tradição que já tem 2500 anos, ou seja, desde o tempo de Demócrito; e não se pode deixar de fazer tais perguntas, dado que nossa linguagem se enraíza nesta tradição. (...) Na realidade, é necessária uma mudança nos conceitos fundamentais. Teremos de abandonar a filosofia de Demócrito e os conceitos das partículas fundamentais elementares, e em seu lugar, devemos aceitar o conceito das simetrias fundamentais, um conceito derivado da filosofia de Platão. Tal como Copérnico e Galileu abandonaram, nos seus métodos, a ciência descritiva de Aristóteles, assim seremos forçados a abdicar do materialismo atômico de Demócrito e a retomar as idéias de simetria da filosofia de Platão (1990, p. 91).

Desta forma, para completar a reconstrução do pensamento de Heisenberg acerca da filosofia grega, faz-se necessário analisar a outra idéia que se contrapôs ao materialismo no decorrer da história. Em lugar da desqualificação de seus oponentes e de um discurso basicamente negativo, na análise da fortuna do idealismo no decorrer das histórias da filosofia e da ciência, o tom adotado por Heisenberg muda. Têm-se uma abertura a proposições de caráter mais positivas e ontológicas, mas, que ainda insistem em se afastar do materialismo de ascendência democritiana. No lugar dos pontos materiais, do império da *res extensa* – Heisenberg vê simetrias fundamentais, tidas por ele como “uma característica genuína da Natureza” (1995, p. 111). É com o nascimento da teoria quântica que a revolução copernicana preconizada pelo pai do Princípio da Incerteza se efetiva com o abandono do materialismo e o retorno do idealismo platônico.

¹³² Infra p. 80.

4.3 Teoria quântica e idealismo: as simetrias platônicas e a estrutura da matéria

Para Heisenberg, o idealismo é derivado das doutrinas platônicas acerca da estrutura da matéria, conforme descritas no *Timeu*. Ao contrário do materialismo de Demócrito, no qual os constituintes últimos da matéria eram inalteráveis e indestrutíveis partículas materiais, o idealismo platônico considera que “as menores partículas de matéria são, por assim dizer, apenas formas geométricas” (HEISENBERG, 2004, p. 12), no caso, os sólidos regulares da geometria. Esses sólidos, diferente dos átomos, podem ser divididos em partes ainda menores. Os sólidos geométricos podem ser decompostos em triângulos que, segundo Heisenberg (HEISENBERG, 2004, p. 12), “deixam de ser matéria, pois não possuem dimensões espaciais”. A forma geométrica, uma das poucas características intrínsecas aos átomos, deixa de ser um atributo destes, como o era em Demócrito, e se torna a estrutura subjacente da matéria.

Assim, em Platão, no limite mais baixo das séries das estruturas materiais, não existe efetivamente algo material, mas uma forma matemática. A raiz última a partir da qual o mundo pode ser uniformemente inteligível é, segundo Platão, a simetria matemática, a imagem, a idéia; esse conceito é, portanto, denominado idealismo (HEISENBERG, 2004, p. 12).

O idealismo em Heisenberg – longe de ser uma revivescência de um *idealismo subjetivo*, no qual “as idéias existem, por exemplo, apenas nas mentes dos indivíduos” – seria um *idealismo objetivo*, pois sustenta que “as idéias existem por si mesmas e que nós apenas as aprendemos ou as descobrimos” (BUNGE, 2002a, p. 179).

A descoberta de Planck, em 1900, tornou-se uma oportunidade para reintroduzir o idealismo após séculos de predomínio materialista, pois o quantum de ação

Conduziu à idéia de que a descontinuidade, assim como a existência do átomo, poderiam ser manifestações conjuntas de uma lei fundamental da natureza, de uma estrutura matemática na natureza, e que a sua formulação poderia conduzir a uma compreensão unificada da estrutura da matéria, que os filósofos gregos haviam procurado. A existência dos átomos, por conseguinte, não constituía, talvez, um fato último, incapaz de explicação ulterior. Essa existência poderia ser atribuída, assim como em Platão, à ação de leis da natureza matematicamente formuláveis, isto é, ao efeito de simetrias matemáticas (HEISENBERG, 2004, p. 13).

Logo, a física contemporânea é contrária a Demócrito, favorecendo Platão e, por conseguinte, os pitagóricos. Para se compreender a vitória platônica sobre o materialismo

antigo, faz-se necessário analisar o *Timeu*, um dos mais influentes diálogos de Platão. Nele, trata-se abertamente dos constituintes últimos da matéria.

O diálogo pode ser descrito como uma tentativa de explicar a origem da ordem e da beleza do cosmos e como esses princípios regem, também, o ser humano. O estilo é mais pesado e narrativo, deixando de lado a agilidade do estilo dialogado, comum a outros textos platônicos, talvez por ser um texto endereçado aos discípulos da Academia, já iniciados nos princípios do Pitagorismo. *Timeu*, o personagem título do diálogo, é originário de Locres, na Magna Grécia, e, tudo indica, que seria um integrante da escola pitagórica.

Mas não só a influência do pitagorismo é perceptível, pois Platão tenta estabelecer um isomorfismo entre os sólidos regulares (tetraedro, octaedro, icosaedro e cubo) e os quatro elementos materiais herdados da filosofia de Empédocles: fogo, ar, água e terra. As propriedades desses últimos seriam explicadas pelos primeiros.¹³³

Eis o trecho no qual se inicia a descrição de como os quatro elementos foram criados:

Até esse momento, *tudo carecia de proporção e medida*. Quando o universo começou a ser posto em ordem, a princípio o fogo, a água, a terra e o ar revelaram traços de sua própria natureza, mas se encontraram no estado em que é de esperar que esteja o que carece de presença de Deus. Constituído naturalmente dessa maneira, começou a divindade a dar-lhe uma configuração distinta *por meio de formas e de números* [grifos nossos]. (*Timeu*, 53 a-b)¹³⁴.

Diferente de Empédocles, Platão descreve a função de cada um dos elementos na ordem criada pelo Demiurgo. O fogo, relacionado com os céus, é necessário para tornar o universo visível e a terra para que o universo seja tateável:

Ora tudo o que foi feito terá de ser corporal, visível e tangível; porém sem fogo, nada seria visível nem tangível sem alguma coisa sólida, e nem sólida sem carecer de terra. Por isso mesmo, quando a divindade principiou a formar o corpo do universo, recorreu primeiro ao fogo e à terra (*Timeu*, 31 b)¹³⁵.

Por sua vez, o ar e a água têm a função de mediar e unificar o fogo e a terra:

Ora, se o corpo do universo apresentasse apenas uma superfície plana, sem profundidade, bastaria um meio para ligar seus dois termos com ele mesmo; mas, como o mundo tinha de ser sólido e como os sólidos são sempre ligados por duas

¹³³ Essa teoria chegou até a Idade Média, fundamentando não só a física, mas também disciplinas biológicas, médicas e psicológicas (ERICKSON, 1990, p. 85). Segundo John Loose (2000, p. 29), “a orientação pitagórica tornou-se influente no ocidente cristão principalmente como resultado do casamento do *Timeu* de Platão com a Sagrada Escritura”. A influência da teoria platônica dos sólidos regulares é percebida, até mesmo, no início da Idade Moderna, na astronomia de Kepler.

¹³⁴ PLATÃO, 2001, p. 94.

¹³⁵ PLATÃO, 2001, p.68

mediedades, não por uma, a divindade pôs a água e o ar entre o fogo e a terra (*Timeu*, 31 b)¹³⁶.

Platão, contudo, agrega à doutrina das “quatro raízes” elementos pitagóricos que contribuem para a especificidade de sua teoria. Ele sugere, como afirmado acima, que os cinco elementos básicos do universo – quatro terrestres e um celeste¹³⁷ – estão ligados aos cinco sólidos regulares. A terra, devido à sua estabilidade, deve ter a forma de um cubo que é o sólido mais estável, sendo o “único sólido cujas faces são compostas de triângulos isósceles” (ERICKSON, 1990, p. 90). O fogo é relacionado ao tetraedro, que é o sólido regular de ângulos mais agudos, e é o mais móvel e penetrante dos elementos. O ar, de menor mobilidade que o fogo, é o octaedro que é maior e menos agudo do que o tetraedro. Por fim, a água e o icosaedro seguem o mesmo raciocínio. Propriedades como *secura*, *umidade*, *quente* e *frio* também são explicadas por características geométricas dos sólidos regulares.

Até agora, a tese platônica não se distancia muito do afirmado por Leucipo e Demócrito, pois, em ambas as teorias, as propriedades geométricas das unidades últimas da matéria explicam as qualidades secundárias dos corpos macroscópicos. Nesse caso, sendo as teorias equivalentes, a tese de Heisenberg, acerca da oposição entre materialismo e idealismo, estaria invalidada.

Mas a teoria platônica não cessa seu percurso em busca dos fundamentos da matéria nas “quatro raízes”. Platão vai além e introduz um argumento francamente pitagórico que o distancia definitivamente do materialismo antigo (TAYLOR, 1962, p. 88 e 368). Assim como os átomos, terra, fogo, água e ar, e seus respectivos sólidos regulares, possuem “proporções tão reduzidas, que cada um deles, considerado isoladamente em cada gênero, escapa à nossa vista, por causa de sua pequenez; [e] só percebemos as massas formadas por uma multidão deles” (*Timeu*, 56 b – c).¹³⁸ Entretanto, diferentemente dos átomos de Leucipo, os átomos de Platão não podem ser considerados os efetivos elementos últimos da matéria:

é claro para todo mundo que o fogo, a terra, a água e o ar são corpos. Ora, todos os corpos apresentam profundidades, sendo de necessidade forçosa que a profundidade esteja encerrada na natureza da superfície e que toda superfície retilínea seja composta de triângulos (...) esta é a origem que atribuímos ao fogo e aos demais corpos, de acordo com o método que concilia a necessidade com probabilidade (*Timeu*, 53 c – d).¹³⁹

¹³⁶ PLATÃO, 2001, p.68

¹³⁷ O dodecaedro não foi relacionado como um dos corpos primordiais, já que há cinco sólidos geométricos, mas somente quatro corpos primordiais. A opção de Platão foi reservar o dodecaedro para a forma geométrica do universo (ERICKSON, 1990, p. 89).

¹³⁸ PLATÃO, 2001, p. 98.

¹³⁹ PLATÃO, 2001, pp. 94 e 95.

Cada um dos sólidos regulares, como já afirmado, é composto por triângulos que possibilitam que o fogo, a água e o ar¹⁴⁰ possam ser transformados entre si, de modo que “através de um processo de decomposição dos primeiros três sólidos nos seus triângulos componentes e a recombinação destes, podemos transformar qualquer um dos três em qualquer outro” (ERICKSON, 1990, p. 96). Tal processo explica “como podem formar-se os mais belos corpos, quatro ao todo, dessemelhantes entre si, porém de tal maneira que uns podem ser gerados dos outros, por dissolução” (*Timeu*, 53 d – e).¹⁴¹

No lugar dos átomos materiais, plenos de matéria, sem vestígios de vazio, Platão propõe que a estrutura fundamental da matéria, aquilo que permanece e fundamenta todas as transformações e permanências percebidas no mundo, são os imateriais triângulos que compõem os quatro elementos. Giovanni Reale (1994, p. 148) sintetiza do seguinte modo o “atomismo” platônico:

A criação e a racionalidade dos corpos sensíveis em geral dependem exatamente da estrutura *geométrica e matemática*. O corpóreo físico-sensível espelha a estrutura do corpóreo inteligível (geométrico), ou seja, é “a mistura de uma combinação de necessidade e inteligência” (*Timeu*, 47e – 48a). Ponto, linha, estrutura tridimensional, no plano dos seres intermediários e ideais, são puramente inteligíveis; mas, sinteticamente combinados ou “misturados” com o Princípio material sensível, dão origem aos corpos que vemos e tocamos, por meio de uma *penetração capilar* que “refreia” o Princípio material sensível, por si só caótico, até *nos mínimos pormenores*, segundo a estrutura atomística e fundando-se nos sólidos geométricos regulares.

Dito isso, por qual razão Heisenberg relaciona a doutrina platônica com a estrutura da matéria segundo a física moderna? O trecho a seguir pode servir como introdução ao modo como Heisenberg interpreta a física platônica:

Quando duas partículas elementares de elevada energia colidem, originam-se várias partículas no processo de desintegração, mas os fragmentos resultantes não são necessariamente menores do que as partículas iniciais. (...) o conceito de divisibilidade perdeu assim o seu significado, e, conseqüentemente, o mesmo aconteceu com o conceito de partícula mínima. Se a energia se converte em matéria, isso acontece porque a energia adota a forma equivalente de partículas elementares. Esta forma aparece como a representação de um grupo de transformação, tal como a rotação no espaço ou a transformação de Lorentz. (...) elas são as entidades menores, autênticos blocos construtores da matéria, ou são elas meramente representações matemáticas dos grupos de simetria pela qual a matéria é construída? (HEISENBERG, 1990, p. 47)

¹⁴⁰ A terra fica fora do ciclo de transformações, pois o cubo é o único formado por triângulos isósceles, enquanto os outros elementos o são por triângulos escalenos, impossibilitando a combinações da terra com os outros.

¹⁴¹ PLATÃO, 2001, p. 95.

Para ele, inclusive, “no começo era a simetria’ é, certamente, uma expressão melhor do que ‘no começo era a partícula’ de Demócrito (...) nossas partículas elementares são comparáveis aos corpos regulares do *Timeu* de Platão. São modelos originais, as idéias da matéria” (HEISENBERG, 1996, pp. 278 e 279). A substituição do materialismo tradicional pelo platonismo seria conseqüência das partículas elementares não mais se adequarem a uma imagem dos átomos como “indestrutíveis” e “eternos”. Os experimentos realizados nos aceleradores de partículas demonstram que uma partícula pode ser transformada em um sem-número de outras partículas:

O transformar-se é uma das características das partículas elementares. Um fóton pode ser transformado em um elétron mais um pósitron, e, reciprocamente, um fóton pode ser originado de um elétron e de um pósitron. Mas seria no mínimo inadequado, dizer que o fóton é uma combinação de um elétron e de um pósitron. (...) todas elas são partículas elementares cuja conversibilidade é uma das propriedades principais (HEISENBERG, 1953, p. 57)

Do mesmo modo que os quatro elementos platônicos são redutíveis a princípios puramente matemáticos – os triângulos – que, além de dotá-los com seus atributos específicos, permitem a conversibilidade entre três dos quatro elementos, as partículas elementares são regidas por simetrias matemáticas¹⁴². Essas últimas seriam estruturas matemáticas da natureza, (HEISENBERG, 1989, p. 83), propriedades ou equações caracterizadas pela sua invariância frente às transformações (conversões) das próprias partículas umas nas outras. Nas palavras do próprio Heisenberg,

Tal como os corpos elementares regulares de Platão, as partículas elementares da física moderna são definidas por condições matemáticas de simetria; não são eternas nem invariáveis e, portanto dificilmente podem ser chamadas “reais” na verdadeira acepção da palavra. São antes representações daquelas estruturas matemáticas fundamentais a que se chegam nas tentativas de continuar subdividindo a matéria; representam o conteúdo das leis fundamentais da natureza. Para a ciência natural moderna não há mais, no início, o objeto material, porém a simetria matemática (HEISENBERG, 2004, p. 26).

Um dos efeitos nefastos que o materialismo moderno havia introjetado na ciência foi a ruptura do discurso científico platônico apresentado na *República*. Segundo Heisenberg, o desenvolvimento das ciências como um todo levou “os dois tipos de percepção, *epistème* e *diánoia*” a uma “relação de exclusão mútua” (HEISENBERG, 1952, p. 34). Contudo, em seu

¹⁴² O termo simetria significa que “a lei natural que determina o espectro de partículas e interações é invariante sobre certos grupos de transformação” (HEISENBERG, 1989, p.105).

contexto original, as duas noções eram interdependentes. Esse ponto pode ficar mais bem esclarecido com as palavras de Elisabetta Cattanei (2005, p. 284):

É verdade que, para Platão, a dialética “supera” a matemática, como fundamento último de seu objeto. Mas é também verdade que o caminho dialético de fundamentação do ser é matematicamente estruturado. Assim como o matemático fixa as hipóteses e os postulados que põe no início de seu raciocínio e, a partir desses princípios, vai descendo, de consequência em consequência, até demonstrar o que havia prefixado, da mesma forma o dialético sobe desde os postulados até um “princípio de tudo”, primeiro e não-hipotético, para daí vir descendo, “de Idéia em Idéia”, “em direção ao termo”. Portanto, parece que Platão, por um lado, relaciona a matemática à dialética, porque o modo de proceder de uma modela-se pelo da outra.

Quando Heisenberg aproxima as simetrias matemáticas das estruturas geométricas e matemáticas do *Timeu*, ele não apenas tenta expurgar o materialismo moderno da física, mas, talvez de modo insciente, reaproxima o “conhecimento intermediário” da “intelecção pura”. Do mesmo modo que os objetos sensíveis são decorrentes da mistura entre as formas geométricas e o princípio material sensível (REALE, 1994, p. 148), a *diánoia* apresenta-se como uma ciência ambígua, intermediária, que, no entanto, permite uma descrição do mundo físico. Novamente Elisabetta Cattanei (2005, pp. 280 e 281) pode servir de apoio:

Nas ciências matemáticas, e em particular na geometria, Platão capta uma ambigüidade, refletindo talvez sobre a situação da pesquisa sobre axiomas em seu tempo: trata-se de formas de saber intelectual que, contudo, não se desvinculam totalmente do visível, em si continuam hipotéticas. Nossa passagem do *Timeu* fornece uma imagem viva dessa ambigüidade. Dela, Platão não deixa de sublinhar o aspecto que a epistemologia contemporânea chamou de “perda da certeza”, mas, por outro lado, explica seu poder de medição: o limite à pura intelectualidade da matemática, na medida em que a aproxima do sensível, a torna instrumento plausível de explicação do mundo físico. Em outras palavras, uma explicação da natureza intelectual, científica, mesmo que seja somente verossímil, se dá por força da continuidade que subsiste entre o mundo físico e matemática graças à duplicidade desta.

O retorno do idealismo, devido à revolução quântica e à física das partículas elementares, não significa uma supressão da *diánoia* – algo de resto impossível para a ciência moderna altamente matematizada. A se levar às idéias de Heisenberg até seu desfecho lógico, pode-se considerar que o idealismo nas ciências naturais contemporâneas promoveu um reequilíbrio entre as duas noções. Contudo, essa foi uma conclusão que Heisenberg nunca expressou. Catherine Chevalley (1992, p. 127) expressa do seguinte modo esse problema na obra do físico alemão:

Como compreender que Heisenberg possa sugerir uma ontologia das estruturas matemáticas sem deixar de ler a história da física como um processo de autolimitação do conhecimento? [...] Heisenberg não oscilaria entre a epistemologia e a ontologia, com o risco de cair num ecletismo pouco convincente?

A oscilação entre epistemologia e ontologia na obra de Heisenberg, também pode ser descrita como uma tensão entre as restrições epistemológicas que o acompanham desde a invenção da mecânica quântica e a sua busca por um conteúdo ontológico que não recorresse às imagens do materialismo. Tal conflito só se resolve quando, ao recorrer a Aristóteles, Heisenberg estabelece o equilíbrio entre *dianoia* formalista e a crença *realista* em estruturas matemáticas, como as descritas no *Timeu*. O argumento é o seguinte: o nível de abstração atingido pela mecânica quântica não permite uma visualização do mundo microfísico. Descrever os fenômenos neste nível da realidade é possível apenas com o recurso a instrumentos matemáticos extremamente abstratos. Ou seja, é o domínio do “conhecimento intermediário, analítico e formal”. Um exemplo disso é dado por Chevalley (1992, p. 128):

a equação de Schrödinger, sendo determinista, não pode receber nenhuma interpretação física direta a não ser uma interpretação estatística. Pois bem, este caráter estatístico não entra como a medida do grau de imperfeição de nosso conhecimento do estado real do sistema considerado, se não como um aspecto intrínseco dos processos quânticos. A partir disso, Heisenberg pode afirmar que a mecânica quântica “introduz a probabilidade como uma nova realidade física objetiva”.

Para lidar com esse novo nível da realidade e conciliar as restrições epistemológicas que a mecânica quântica impôs à física clássica com uma ontologia mínima, Heisenberg propõe essa “nova realidade física objetiva” seja descrita em termos aristotélicos e, de maneira surpreendente, probabilista.

4.4 Probabilidades, subjetivismo e Aristóteles

Aristóteles surge na obra de Heisenberg tardiamente. Platão, e até mesmo Descartes, são citados por ele desde a década de 1930. O Estagirita só perto do fim dos anos 50. Nesse período a produção do criador da mecânica matricial possuía dois temas contumazes: a elaboração daquilo que a *received view* da história da teoria quântica considerou como sendo a “Interpretação de Copenhague” e as questões levantadas pela inflação de partículas elementares a partir do pós-guerra.

As referências a Aristóteles são acompanhadas pelo uso dos conceitos de *dýnamis* e *enérgeia* – tradicionalmente traduzidos como potência¹⁴³ e ato¹⁴⁴, respectivamente. No *corpus* aristotélico eles surgem como a resposta frente ao desafio de se compreender a mudança, questão que já havia sido abordada por Parmênides, Heráclito e Platão. Nas palavras do Estagirita:

Depois de haver tratado da potência considerada em relação ao movimento, devemos agora definir o ato e determinar a sua essência e propriedades. Avançando nessa análise, ficará mais claro, ao mesmo tempo, também o ser em potência, na medida em que dizemos que é em potência não somente o que por natureza pode mover outro ou então pode ser movido por outro (seja simplesmente, seja de determinado modo), mas dizemos que uma coisa é em potência também segundo outra significação: e foi justamente para procurar essa significação que tratamos também das outras. O ato é o existir da coisa, não porém no sentido em que dizemos que é em potência: e dizemos em potência, por exemplo, uma estátua de Hermes na madeira, a semi-reta na reta, porque se poderia atuar a partir deles, e chamamos de pensador aquele que não está especulando, mas tem a capacidade de especular; e ao outro modo de existir da coisa nós o designamos como o ser em ato. [...] E o ato está para a potência como, por exemplo, quem constrói está para quem pode construir, quem está acordado para quem dorme, que vê está para quem tem os olhos fechados, mas é dotado de visão, e o que é tirado da matéria para a matéria, e o que já está elaborado para o que não está elaborado (*Metafísica*, 6, 1048a25 ss., *apud* REALE, 2005, pp. 83 e 84).

Heisenberg interpretou esses dois conceitos¹⁴⁵ do seguinte modo:

Na filosofia de Aristóteles, a matéria foi imaginada na relação entre forma e matéria. Tudo o que percebemos no mundo dos fenômenos, à nossa volta, é matéria que encontrou sua forma. A matéria não é uma realidade por si mesma, mas só uma possibilidade, uma *potentia*; somente a forma lhe dará existência. Em um processo natural, a “essência” (para usar a expressão aristotélica) passa de mera possibilidade à realidade, pela presença da forma. A matéria aristotélica certamente não é uma matéria específica, como água ou ar, nem tampouco o vazio; ela é um tipo de substrato corpóreo indefinido, que tem em si a possibilidade de vir-a-ser ao se consubstanciar na forma (HEISENBERG, 2004, p. 14).

¹⁴³ Segundo Lucas Angioni, em seus comentários à *Metafísica*: “A opção mais tradicional para traduzir ‘*dýnamis*’ é ‘potência’ – afinal, a oposição entre ‘ato e potência’ é assim reconhecida como aristotélica pelo homem de cultura geral. No entanto, ‘potência’ é, para nós, uma noção muito mais abstrata e de uso muito mais restrito do que a noção proposta por Aristóteles. Há vários usos mais específicos de ‘*dýnamis*’, os quais devem ser traduzidos, de acordo com o contexto, por ‘poder’, ‘força’. Para além desses usos restritos, parece-me mais adequado exprimir a noção aristotélica com o termo ‘capacidade’ – seja a noção de ‘*dýnamis*’ restrita ao movimento, seja a *dýnamis* ‘mais importante’ para a investigação metafísica – esta última também poderia ser traduzida, de acordo com o contexto, por ‘potencialidade’ ou ‘possibilidade’” (ARISTÓTELES, 2004, pp. 93 e 94)”.

¹⁴⁴ Para Lucas Angioni: “Enérgeia: de acordo com a especificidade de cada contexto, traduzi por: (i) ‘efetividade’ [...] (ii) ‘atividade’ [...] nos contextos que não se trata da noção trivial de atividade, disponível na experiência do homem comum, mas sim da noção metafísica especificamente elaborada por Aristóteles, dei preferência à primeira opção” (ARISTÓTELES, 2004, pp. 95 e 96).

¹⁴⁵ As querelas acadêmicas em torno desses termos foram ignoradas no texto. Partilha-se aqui da opinião de Catherine Chevalley (1992, p. 129) de que “é mais interessante insistir sobre esta revolução [no caso, a emergência de “nova realidade física objetiva] que numa comparação precisa – que poderia resultar problemática – com o par *dynamis-energeia* tal como aparece nos textos de Aristóteles”

Ao analisar os resultados do artigo BKS, Heisenberg (1995, p. 36) argumenta que, apesar do seu fracasso quase que total, um de seus legados resultou em “algo inteiramente novo na física teórica desenvolvida desde Newton”: a onda de probabilidade que foi posteriormente retomada por Max Born¹⁴⁶. Probabilidade, na física clássica, significava apenas “uma afirmação sobre o nosso grau de conhecimento acerca de uma situação concreta”, a medida de nossa ignorância quanto a todos os elementos de um sistema físico; mas, após o trabalho de Born, ela acabou significando “uma tendência para alguma coisa” (HEISENBERG, 1995, p. 36). Dessa virada na noção de probabilidade, Heisenberg deduz que ela significa a retomada do “velho conceito de potência da filosofia aristotélica” em uma “versão quantitativa” (HEISENBERG, 1995, p. 36).

O caminho na direção de “uma nova realidade física objetiva” ou, em outras palavras, a busca por um conteúdo ontológico nas estruturas matemáticas da teoria quântica fica nítida quando Heisenberg afirma que as ondas de probabilidade introduziam “algo entre a idéia de evento e o evento real, um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade” (HEISENBERG, 1995, p. 36).

Ao postular esse novo nível de realidade, Heisenberg não abre mão de seu subjetivismo. Quando ele analisa o colapso de onda, o papel do observador é reinserido na ontologia desse “tipo estranho de realidade intermediária”. Segundo Osvaldo Pessoa Jr. (1992, pp. 177 e 178),

A mecânica quântica (MQ) pode ser estruturada da seguinte maneira. Um sistema fechado é descrito por um “estado” que evolui no tempo de maneira *determinista* (de acordo com a equação de Schrödinger). Ao contrário da mecânica, este estado geral fornece apenas as “probabilidades” de se obter diferentes resultados de uma medição. Após a medição, o sistema passa a se encontrar em um novo estado, estado este que depende do resultado obtido. Assim, pode-se dizer que no decorrer da medição o sistema evolui de maneira indeterminista. Esta transição tem sido chamada de “colapso do pacote de onda” ou “redução de estado”, sendo descrita pelo “postulado de projeção” de von Neumann.

O problema gerado pela admissão do colapso do pacote de onda, o chamado problema da medição, pode ser sintetizado na seguinte questão: como ocorre o colapso? Desde a segunda metade da década de 1920, a resposta para esse problema, entre os físicos integrantes do eixo Göttingen-Copenhague, foi, de diferentes maneiras, concebida em torno do papel central dado à observação. Já em 1927, Heisenberg defendeu abertamente que o ato de observar causaria um distúrbio incontornável no sistema quântico observado. Sua declaração se deu na seguinte circunstância:

¹⁴⁶ Cf. supra p.50.

No 5º Congresso de Solvay que se realizou em Bruxelas em outubro de 1927, Born pôde responder ao paradoxo da quantidade que Einstein assim formulara: “Agora, se uma onda esférica é associada a cada processo de emissão, como compreender que a trajetória de cada partícula aparece como uma linha (quase) reta?” Born explicou “como o caráter corpuscular do fenômeno pode ser reconciliado com a representação ondulatória”, fazendo uso da “redução do pacote de probabilidade” que não ocorre enquanto “qualquer ionização não tenha sido observada”. Para descrever o que ocorre após a observação, deve-se “reduzir o pacote de onda para a vizinhança imediata da gotícula”. Dentro dessa interpretação “ondulatório-probabilística” da MQ, o paradoxo onda-partícula foi resolvido atribuindo-se ao ato da observação o poder de reduzir uma onda de probabilidade extensa para um pacote de onda estreito (PESSOA Jr., 1992, p. 181).

Tal solução foi proposta por Heisenberg, ao rebater a idéia de Dirac relativa a “escolhas da natureza” (PESSOA Jr., 2005, p. 38). Suas palavras foram as seguintes:

Não estou de acordo com o Sr. Dirac quando ele diz que no experimento descrito a natureza faz uma escolha [...] Eu diria, preferencialmente, conforme fiz em meu último artigo, que o próprio observador faz a escolha, pois é só no momento em que a observação é feita é que a “escolha” se torna uma realidade física e que a relação das fases nas ondas, o poder de interferência, é destruída (PESSOA Jr., 2001, p. 152).

Em consonância com esse privilégio dado ao observador, Heisenberg formulou a famosa experiência de pensamento do microscópio de raios gama (HEISENBERG, 1949, p. 21) na qual se tenta determinar a posição de um elétron a partir desse hipotético aparelho. A interação entre o feixe de fótons gama gerado pelo microscópio e o elétron acaba afetando a própria possibilidade de se averiguar com precisão ilimitada a posição do elétron.

Outros tratamentos posteriores do problema da medição foram ainda mais longe no estabelecimento de uma interferência inevitável da observação nos sistemas quânticos. Partindo do trabalho de John von Neumann, no qual o colapso de onda só ocorre “quando um ser inteligente faz uma observação” (PESSOA Jr., 1992, p. 185), Fritz London e Edmond Bauer elaboraram a interpretação da *consciência legisladora*. Nela, o colapso do pacote de onda seria impossível de ser explicado sem se levar em conta a consciência do próprio observador com sua “faculdade de introspecção” (PESSOA Jr., 1992, p. 185). Outras interpretações, assim como a de London & Bauer, aprofundaram-se em posições claramente idealistas ou subjetivistas: o *observador participante* de John Wheeler, o *amigo solipsista* de Eugene Wigner (PESSOA Jr., 2006, p. 300) e até mesmo uma interpretação declaradamente kantiana foi defendida por Carl von Weizsäcker, aluno de Heisenberg, nos anos 40 (PESSOA Jr., 1992, p. 185).

Heisenberg relaciona o papel do observador na teoria quântica com a função de probabilidade ao defender que “a função de probabilidade combina em si elementos objetivos e subjetivos” (HEISENBERG, 1995, p. 45). Na explicação, faz-se recurso a instrumentos conceituais aristotélicos:

[A função de probabilidade] contém asserções sobre possibilidades ou tendências mais propícias (*potentia*, na filosofia aristotélica) e tais asserções são completamente objetivas, por não dependerem de observador algum; ademais, contém ela afirmações acerca de nosso conhecimento do sistema que, é claro, são subjetivas, no sentido de poderem diferir de um experimentador a outro (HEISENBERG, 1995, p. 45).

De um lado, a função de probabilidade mostra um caráter objetivo advindo da *ontologização da probabilidade* defendida por Heisenberg, distinta de uma ontologia reificada do tipo newtoniano, por centrar-se em “acontecimentos possíveis”. Seria a introdução de uma probabilidade *epistêmica* e a entronização de uma probabilidade de acabamento *aristotélico*. Nas palavras de Heisenberg (HEISENBERG, 1995, p. 46): “A função de probabilidade não descreve – em oposição à mecânica clássica – um certo evento mas, pelo menos durante o processo de observação, um conjunto de acontecimentos possíveis” (HEISENBERG, 1995, p. 46). Em contrapartida, a função de onda ainda tem marcas subjetivas, pois, de modo similar à sua exposição de 1927 em Solvay, o físico alemão defende que “o ato de observação, por si mesmo, muda a função de probabilidade de maneira descontínua; ele seleciona, entre todos os eventos possíveis, o evento real que ocorreu” (HEISENBERG, 1995, p. 46).

A transição aristotélica entre potência e ato ocorre pela observação, pois é ela que seleciona o evento que realmente ocorre dentre um leque de eventos possíveis. Por vias tortas, Heisenberg acabou por justificar filosoficamente, sem recorrer a nenhum argumento de feitiço positivista, o porquê da mecânica quântica necessariamente tratar apenas com grandezas observáveis e da impossibilidade de se ter “descrição alguma do que ocorre no sistema, do instante em que foi feita a observação inicial ao instante em que for efetuada a próxima medida” (HEISENBERG, 1995, p. 41). Se a transição entre o possível e o efetivo é decorrente da observação, “o termo ‘ocorre’ pode somente ser aplicado à observação, e não ao estado de coisas durante duas observações consecutivas” (HEISENBERG, 1995, p. 46), pois entre duas observações, existe apenas um conjunto de eventos possíveis.

Heisenberg salienta que o ato de observação ao qual ele se refere não é uma intrusão de uma componente psíquica na física, mas tão só “a interação do objeto com o instrumento

de medida (e, portanto com o resto do mundo)” (HEISENBERG, 1995, p. 46). Desse modo, ele se afasta de certo subjetivismo mais radical, como o de von Neumann e London & Bauer. A subjetividade que emerge é de outro tipo, pode-se até mesmo dizer de um tipo mais fraco:

Qualquer experiência em física, refira-se ela a fenômenos da vida comum ou a eventos atômicos, tem que ser descrita na terminologia da física clássica. Os conceitos da física clássica propiciam a linguagem por meio da qual descrevemos os arranjos experimentais e enunciamos seus resultados. [Entretanto] a utilização de conceitos clássicos é, afinal, uma consequência da maneira geral do ser humano pensar. Mas isso já constitui uma referência a nós mesmos e isso na medida em que nossa descrição não é completamente objetiva (HEISENBERG, 1995, p. 47).

Esse subjetivismo “fraco”, sem nenhum elemento psíquico, tem, a princípio, seu terreno limitado ao campo lingüístico, pois se assenta no pressuposto de que os conceitos da física clássica são versões refinadas de conceitos cotidianos¹⁴⁷ e que, por isso mesmo, são limitados quanto à descrição do mundo microfísico. Contudo, dois fatores podem reforçar o conteúdo subjetivista das idéias de Heisenberg acerca do ato de observação. Primeiro, como destacou Pessoa Jr., logo após explicitar o significado *objetivista* de “ato de observação” (HEISENBERG, 1995, p. 46) o cientista alemão teria dado um passo atrás não bem explicado:

A frase que se segue a esta citação, porém interpreta χ de maneira claramente *epistêmica*, nos deixando em dúvida se as potencialidades são objetivas ou não; “A mudança descontínua na função de probabilidade, no entanto, tem lugar com o ato de registro, pois é essa mudança descontínua do nosso conhecimento, no instante do registro, que tem por imagem a mudança descontínua da função de probabilidade” (PESSOA Jr., 2005, p. 97).

Outro fator que acaba por enxertar mais subjetivismo nas declarações de Heisenberg é consequência de um argumento, já apresentado anteriormente¹⁴⁸, de David Bohm dirigido a Bohr: se o colapso de onda é induzido pela interação com o aparato de medição, o mesmo deve valer para qualquer tipo de interação envolvendo um sistema material, seja ele um

¹⁴⁷ Feyerabend (1971, p.255) critica tal suposição nos seguintes termos: “é pouco razoável admitir que os termos observacionais sejam dotados de estabilidade maior que a dos termos teóricos. Usualmente, se os termos observacionais são termos de alguma teoria que se fizeram familiares, por terem sido empregados repetidamente [...] verificou-se no passado, que certos termos observacionais, como os utilizados na física de Aristóteles, eram inadequados e exigiam substituição. Sem tal substituição, teria sido impossível a passagem da Física Clássica para a de Galileu e de Newton. É portanto, possível abandonar dada terminologia observacional e substituí-la por outra. E essa asserção põe em evidência, incidentemente, o absurdo do argumento de alguns físicos de nosso tempo, em especial Heisenberg e von Weizsaecker, desenvolvido no sentido de sustentar que, tendo os físicos recebido um vocabulário observacional clássico, estarão para sempre incapacitados de contemplar o observável de maneira diferente. Não há dúvida de que a aplicação desse princípio ao tempo de Galileu teria sido muito agradável para os aristotélicos”.

¹⁴⁸ Cf. supra p. 87.

microscópio de raios de tunelamento num laboratório ou um cristal localizado numa outra galáxia. Ora, se o argumento for aceito, por qual razão Heisenberg enfatiza apenas o ato de observação e ignora outras eventualidades no qual o colapso pode ocorrer?

4.5 Heisenberg entre Heráclito, Pitágoras e Aristóteles

O outro uso que Heisenberg faz de Aristóteles tenta responder à seguinte questão: qual seria o fundamento último da matéria? A resposta sugere um tipo de hibridismo entre o platonismo (para o qual os números, no caso as simetrias, seriam parte desse fundamento) e o aristotelismo. Ao recorrer ao Estagirita, o físico germânico encontra outro suporte ontológico para a matéria além das simetrias: a energia.

Todas as partículas elementares são compostas da mesma substância, isto é, energia. Constituem as várias formas que a energia deve assumir a fim de se tornar matéria. No caso, reaparece o par de conceitos “conteúdo e forma” ou “substância e forma” da filosofia aristotélica. Energia não é apenas a força que mantém o “todo” em movimento contínuo; é também – como o fogo na filosofia de Heráclito – a substância fundamental de que é feito o mundo. A matéria origina-se quando a substância energia é convertida na forma de uma partícula elementar. Segundo os nossos conhecimentos atuais, há muitas formas desse tipo. Conhecemos cerca de 25 tipos de partículas elementares, e temos boas razões para crer que todas essas formas são manifestações de certas estruturas fundamentais, isto é, de uma lei fundamental matematicamente exprimível da qual as partículas elementares são a solução, assim como os vários estados energéticos do átomo de hidrogênio representam a solução da equação diferencial de Schrödinger. As partículas elementares são, pois, as formas fundamentais que a substância energia deve assumir a fim de converter-se em matéria, e tais formas básicas precisam de algum modo ser determinadas por uma lei fundamental exprimível em termos matemáticos (HEISENBERG, 2004, p. 23).

A estrutura fundamental do mundo não seria puramente matemática. Haveria uma substância, a energia, sendo ela um suporte para as simetrias e leis matemáticas. Além de Platão e Aristóteles, essa concepção aproxima-se do pensamento de Heráclito. É recorrente, nos textos de Heisenberg, a comparação entre energia, essa “substância universal”, e o Fogo dos fragmentos heraclíticos. Heisenberg chega a ponto de afirmar que, se substituirmos a palavra “fogo” por “energia” nos escritos do filósofo de Éfeso, “podemos repetir suas afirmações, palavra por palavra, segundo nosso ponto de vista moderno” (HEISENBERG, 1995, p.52).

A energia, nesse caso, teria a função que o conceito de *arché* tem nos pré-socráticos: “matéria original constitutiva das coisas, que persiste como substrato e na qual elas se convertem e perecem” (KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 1994, p. 87). Segundo Barnes (2003,

p. 22), *arché* pode significar tanto “começo”, “princípio” como “poder” ou “comando”, não sendo apenas um princípio originário, mas também regulador do cosmos. A energia, para Heisenberg:

é, de fato, substância da qual são feitas todas as partículas elementares, átomos e, portanto, todas as coisas e é também aquilo que as move. A energia é uma substância porque sua quantidade total não muda, e as partículas elementares podem de fato ser formadas dessa substância, conforme se observa em muitas experiências sobre a criação dessas partículas (HEISENBERG, 1996, p. 52).

Além da simetria, que regeria as transformações entre as partículas, existiria um outro aspecto fundamental da natureza que seria invariante: *a substância energia*. Apesar da referência explícita a Heráclito, o contexto conceitual mais adequado para se entender o que Heisenberg quer dizer com “substância” e “forma” é a própria filosofia aristotélica. Substância em Aristóteles, segundo Lucas Angioni, é *ousia*, ou seja “entidade auto-subsistente (...) aquilo que faz com que algo seja precisamente o que é, independente da categoria em que deva ser classificado” (ARISTÓTELES, 2006, p. 204). Na *Metafísica*, são propostos quatro significados para o termo substância: a essência, o universal, o gênero e o substrato. Na obra de Heisenberg, *ousia* é utilizada no sentido de substrato. Nas palavras de Aristóteles:

Substrato é aquilo de que outras coisas são predicadas, enquanto ele mesmo não é predicado por nenhuma outra coisa. Portanto, devemos primeiro determinar a sua natureza, pois o substrato primeiro parece ser a substância. E chama-se substrato primeiro, em certo sentido, a matéria, noutro sentido a forma e num terceiro sentido o que resulta do conjunto matéria e forma. Por matéria eu entendo, por exemplo, o bronze, por forma a configuração que a ela reveste e, pelo composto dos dois, a estátua, a coisa concreta (ARISTÓTELES, Z, 1028b 33 – 1029a 5)¹⁴⁹.

A conjugação entre energia – o substrato – e as estruturas matemáticas fundamentais – as formas – seria comparável à ligação entre o bronze e a configuração descrita acima, sendo as partículas elementares o “composto dos dois”, ou seja, a “coisa concreta”. De sorte que nem a energia, nem as simetrias matemáticas seriam isoladamente o nível ontológico último da realidade, pois as partículas elementares só seriam possíveis na articulação de ambas.

¹⁴⁹ “The substrate is that of which the rest are predicated, while it is not itself predicated of anything else. Hence we must first determine its nature, for the primary substrate is considered to be in the truest sense substance. Now in one sense we call the *matter* the substrate; in another, the *shape*; and in a third, the combination of the two. By matter I mean, for instance, bronze; by shape, the arrangement of the form; and by the combination of the two, the concrete thing: the statue. Thus if the form is prior to the matter and more truly existent, by the same argument it will also be prior to the combination” (ARISTÓTELES, 2007)

5 CONCLUSÃO

As mais corriqueiras opiniões acerca das idéias filosóficas de Heisenberg, especialmente entre seus críticos, são as que o taxam de positivista ou de instrumentalista, fazendo dele cientista ingênuo que se deixou contaminar pelas filosofias da moda na Europa das décadas de 1920 e 1930. Filósofos conceituados, tais como Karl Popper e Mario Bunge, adotam por inteiro essa interpretação. Um trecho do primeiro (POPPER, 2000, p. 242) chega a mostrar a aprovação entusiástica de Moritz Schlick pelas idéias de Heisenberg:

Qualquer teste que se faça com o objetivo de verificar a trajetória entre os dois experimentos perturbará tanto essa trajetória que os cálculos de trajetória exata tornam-se ilegítimos. A propósito desses cálculos exatos, Heisenberg diz: "... é pura questão de gosto querer alguém atribuir qualquer realidade física à calculada história passada do elétron". Com essa palavras, Heisenberg pretende claramente dizer que esses cálculos de trajetória, insuscetíveis de teste, são, do ponto de vista do físico destituídos de significação. Schilick comenta essa passagem dizendo: "eu me expressaria de maneira ainda mais incisiva, manifestando completo acordo com as concepções fundamentais, tanto de Bohr quanto de Heisenberg, que acredito serem incontestáveis. Se um enunciado concernente à posição de um elétron, em dimensões atômicas, não é verificável, não podemos atribuir-lhe qualquer sentido; torna-se impossível falar da 'trajetória' de uma partícula entre dois pontos em que foi observada".

Mario Bunge (2002b, p. 79) segue o mesmo viés:

Por volta de 1935, Bohr e Heisenberg, juntamente com Born, Pauli e outros, propuseram a chamada Interpretação de Copenhague, com a benção do Círculo de Viena. Segundo ela, a medição de uma variável não apenas perturba seu valor, como a cria. Dito de maneira negativa: enquanto não é medido, o *quanton*¹⁵⁰ carece de propriedades. Desse modo, ele nem sequer existe, a não ser como constituinte de uma não-analisável e selada unidade: sujeito (experimentador) – objeto (*quanton*) – aparato [...] obviamente, esta hipótese é antropomórfica e, inclusive, mágica.

Opiniões como essas não são completamente destituídas de sentido. Desde o artigo de 1925 que expõe a mecânica de matrizes, até as palestras de 1958 que resultaram no livro *Física e filosofia*, Heisenberg insiste que a física só trata com grandezas observáveis no que se refere ao mundo quântico. O artigo de 1925 é finalizado com o seguinte parágrafo (VAN DER WAERDEN, 1967, p. 276):

¹⁵⁰ "Qualquer uma das entidades físicas de que a física quântica dá conta adequadamente e a física clássica não o faz" (BUNGE, 2002a, p. 322).

Se um método para determinar dados quânticos teóricos utilizando relações entre grandezas observáveis, tal como proposto aqui, pode ser tido como satisfatório em princípio, ou se este método, após tudo, acabar por representar uma aproximação por demais grosseira para o problema físico de se construir uma mecânica quântica teórica [...] só pode ser decidido com investigações matemáticas mais intensas do método que foi superficialmente empregado aqui.

O que iniciou como uma atitude quase que desesperada do jovem Heisenberg diante do emaranhado de dados experimentais e inconsistências teóricas relativas à estrutura do átomo¹⁵¹ acabou por se desenvolver nos anos subseqüentes. Já em 1927, quando da elaboração do princípio de incerteza, as grandezas observáveis já são tidas como a única fonte de significado físico para os fenômenos quânticos:

Quando queremos ter clareza sobre o que se deve entender pelas palavras ‘posição do objeto’, por exemplo, do elétron (relativamente a um dado referencial), então é preciso especificar experimentos definidos com o auxílio dos quais se pretenda medir a ‘posição do elétron’; caso contrário, a expressão não terá nenhum significado (HEISENBERG, 1927, p. 172 *apud* CHIBENI, 2005, p. 183).

Quase três décadas depois, em 1958, os mesmos argumentos, num tom assumidamente filosófico:

De um ponto de vista muito geral, não há maneira alguma de se descrever o que acontece entre duas observações consecutivas. É, certamente, tentador dizer-se que o elétron deve ter estado em algum lugar, no intervalo de tempo entre essas duas observações e que, portanto, o elétron deveria ter descrito algum tipo de trajetória ou órbita, mesmo que seja impossível saber-se qual. Esse seria um argumento razoável em física clássica. Em teoria quântica, porém, teria sido um abuso de linguagem que, como veremos depois, não pode ser justificado [...] se quisermos descrever o que ocorre em um evento atômico, deveremos compreender que o termo “ocorre” pode somente ser aplicado à observação, e não ao estado de coisas durante duas observações consecutivas (HEISENBERG, 1995, pp. 42 e 46).

No entanto, pode-se corroborar a tese de Popper e Bunge de que Heisenberg foi tão somente um êmulo do positivismo? Ao que parece não, por duas razões¹⁵².

Primeiro, a obra de Heisenberg é inegavelmente perpassada por idéias similares às dos positivistas lógicos. Mas ela não se limitou a isso. Seu diálogo com as filosofias grega e moderna inseriu uma série de noções e conceitos que afastam Heisenberg de um positivismo “puro”. Mesmo a influência de Ernst Mach – uma das referências fundamentais do

¹⁵¹ Cf. supra pp. 37-40.

¹⁵² Além das duas razões apontadas, Heisenberg criticou o positivismo algumas vezes (cf. HEISENBERG, 1995 e 1996).

positivismo lógico – é rejeitada por Heisenberg¹⁵³, que afirmou que nunca ter o lido seriamente, tendo contato com a obra dele muito tempo depois da concepção da mecânica matricial (HERMANN, 1976, p.28). Sua opção de utilizar apenas grandezas observáveis foi, segundo ele mesmo admitiu, inspirada pela teoria especial da relatividade (HEISENBERG, 1996, pp. 78 e 79).

Outro motivo que distancia Heisenberg das “bênçãos do Círculo de Viena” pode ser aduzido a partir do seguinte trecho de Sílvio Chibeni (1997, p. 31): “Embora o movimento positivista lógico vivesse seu apogeu quando a mecânica quântica se desenvolveu, as formas de anti-realismo que comparecem na interpretação ‘ortodoxa’ dessa teoria não se identificam com o reduativismo positivista estrito”. Bohr e Heisenberg não advogavam que as proposições teóricas deveriam ser reduzidas “a proposições observacionais através de certas convenções lingüísticas (regras de correspondência) para que seu verdadeiro conteúdo empírico e significado se evidenciem”¹⁵⁴.

Mas, então, é possível deduzir algum tipo de filosofia consistente da obra de Heisenberg? É possível uma reconstrução racional de suas idéias filosóficas? Ao se levar em conta as fontes a que se teve contato e a análise precedente a resposta é *não*. Não existiria um sistema subjacente ou um desenvolvimento intelectual com um sentido logicamente determinado que permitisse afirmar algo como “Heisenberg defendia uma concepção X_1 que foi se desenvolvendo no decorrer de sua carreira e, por fim, desaguou numa concepção X_2 ”. No entanto, se observa alguns temas recorrentes que foram incorporando teses filosóficas das mais diversas. Heisenberg, em diferentes momentos e em função do contexto de estabelecimento e construção da teoria quântica, foi buscar na filosofia elementos teóricos que, se não fossem capazes de resolver, pelo menos poderiam legitimar suas convicções científicas – especialmente no que diz respeito à Interpretação de Copenhague.

De fato existiu uma interpretação de Copenhague, no sentido de uma escola, de um grupo, que partilhasse crenças e práticas homogêneas? A leitura de, por exemplo, *Física e filosofia* leva a crer na existência de uma Interpretação de Copenhague. Talvez os próprios textos de Heisenberg possam esclarecer a questão.

¹⁵³ Um detalhe deve ser levantado, e mesmo estudado com maior vagar: apesar da rejeição da influência de Mach, Pauli, declarada influência de Heisenberg, era afilhado do filósofo austríaco. Haveria uma influência de Mach sobre Pauli e, conseqüentemente, sobre Heisenberg?

¹⁵⁴ A considerar as análises de Sílvio Chibeni (1997, p. 16) e de Luiz Henrique Dutra (2003, pp. 42 e 43) sobre os argumentos anti-realistas acerca da subdeterminação das teorias pelas observações, a insistência de Heisenberg em declarar a Interpretação de Copenhague como a única variante da teoria quântica correta, pois só ela levaria em conta certas características genuínas da natureza, acabaria por aproximá-lo de um certo realismo, o que o distancia ainda mais do positivismo lógico.

No já referido *A parte e o todo*, o físico alemão utiliza um recurso estilístico que remete aos textos de duas matrizes do pensamento helênico: o supracitado Platão e o historiador Tucídides. O estilo dialogado platônico se fundiria com o artifício que Tucídides utilizou na sua *História*: o de fazer cada orador falar “como, em minha opinião, ele o teria feito naquelas circunstâncias, atendo-me o mais estritamente possível à linha de pensamento que norteou sua fala” (TUCÍDIDES, *Historiae*, 1, 22, 1, 5 *apud* HEISENBERG, 1996, p. 7).

A parte e o todo é um texto de recriação de uma série de diálogos entre o autor e outras personalidades importantes em sua vida, Einstein e Bohr, por exemplo, numa forma textual denominada “condensação livre” (HEISENBERG, 1996, p. 7). Nele encontramos um trecho que, fora do contexto, parece não dizer muito: “Sinto-me fascinado pela idéia de que a simetria seja algo muito mais fundamental do que a partícula em si. *Isso se enquadra no espírito da teoria quântica, tal como Bohr sempre concebeu. Também se enquadra na filosofia de Platão, mas isso não interessa agora*” (HEISENBERG, 1996, p. 193, *grifo nosso*).

Além de recriar diálogos de seu passado segundo sua opinião, Heisenberg reconstruiu, sob uma ótica estritamente pessoal, a história da física no século XX. A estratégia da “condensação livre” de seu livro de memórias, foi utilizada por ele desde a década de 1950. O trecho destacado é típico: relaciona “simetria”, “Bohr” e “Platão”: a teoria quântica é identificada com as idéias de Bohr e relacionada ao platonismo. Apesar do tom despretensioso, o trecho representa bem como se elaborou a criação daquilo que se convencionou chamar de Interpretação de Copenhague. Ela seria a única interpretação legítima da teoria quântica, além de ser a única filosoficamente aceitável, pois reintroduzia o idealismo na física.

Ora, mais do que uma estratégia filosófica ou retórica para os adversários, o uso que Heisenberg fez da filosofia grega pode ser considerado um dos principais elementos na construção daquela doutrina homogênea e unitária que se convencionou chamar de “Interpretação de Copenhague”.

Segundo Mara Beller (1996, p. 184), as opiniões filosóficas dos fundadores da Interpretação de Copenhague são caracterizadas pela inconsistência e mudanças, em função das circunstâncias teóricas e sociopolíticas. O próprio Bohr mudou suas idéias sobre a mecânica quântica com o passar dos anos (RÖSENBERG, 1994, pp. 325 e 326). Beller (1996, p. 183) elaborou uma lista das inúmeras tentativas de pesquisadores em enquadrar o pensamento de Niels Bohr sob um único termo. O resultado foi uma série de interpretações conflitantes, todas elas com “boa evidência textual” (BELLER, 1996, p. 183), e que inclui desde a avaliação de um Popper, que considera Bohr um subjetivista, até Feyrerabend que o

considera um defensor do objetivismo. Pesquisadores recentes se dividem: para Murdoch, Bohr seria um realista, enquanto para Jan Faye, ele seria um anti-realista.

Diante desse cenário, a opção metodológica de Mara Beller (1996, p. 183), consoante à opção adotada aqui frente às inconsistências da filosofia de Heisenberg, é evitar a ambição de “eliminar as inconsistências”:

Enquanto estudiosos têm investido competência e ingenuidade em fornecer a Bohr uma posição consistente, adoto uma atitude diferente e aceito que as opiniões conflitantes de realismo e positivismo (nas versões instrumentalistas de Bohr e operacionalistas de Heisenberg) são ambas inegavelmente presentes. Meu objetivo não é curar essa “esquizofrenia”[...] eliminando as inconsistências, mas analisar as fontes, usos e propósitos de tais desvios nas posições filosóficas¹⁵⁵.

Para ela, a análise histórica deve evitar “reconstruções racionais” que esconderiam, no caso, as contradições e conflitos na construção da mecânica quântica. A partir de uma análise mais detalhada, revela-se que “a” interpretação de Copenhague não possui a consistência e homogeneidade sugerida pelos relatos de Heisenberg

o paradigma de ‘Copenhague’ não mostra nem coerência, muito menos estabilidade, não obstante a massiva retórica de sua ‘inevitabilidade’ devida a Bohr e seus seguidores. A filosofia de Copenhague, pode, portanto, ser vista como um composto contingente de diferentes linhas filosóficas, cuja imagem pública esconde competições e constantes diferenças entre seus fundadores¹⁵⁶ (BELLER, 1996, pp. 184 e 185).

Um exemplo dessas diferenças é discutido por Osvaldo Pessoa Jr. (2005, p. 97):

Tem-se explorado pouco, na literatura, as posições filosóficas dos outros físicos próximos à corrente ortodoxa. Pauli se mantinha bastante próximo a Bohr, ao contrário de Max Born, que, a exemplo de Heisenberg parece ter flertado com a idéia de uma “realidade intermediária: “(...) Eu [Born] pessoalmente gosto de considerar uma onda de probabilidade, mesmo no espaço 3N-dimensional, como uma coisa real, como certamente mais do que um instrumento para cálculos (...)”. Heisenberg parecia concordar com isso, porém preferia considerar a onda χ como algo “objetivo” mas não “real”.

¹⁵⁵ “While scholars have invested competence and ingenuity to render Bohr’s position consistent, I will adopt a different attitude and accept that the conflicting opinions of realism and positivism (in Bohr’s instrumentalistic or Heisenberg’s operationalistic versions) are both undeniably present. My aim is not to cure this ‘schizophrenia’ [...] by eliminating the inconsistencies, but analyze the sources, uses and aims of such shifting philosophical positions”.

¹⁵⁶ “Under closer scrutiny the ‘Copenhagen’ paradigm has neither coherence nor stability, despite the massive rhetoric of its ‘inevitability’ by Bohr and his followers. The ‘Copenhagen’ philosophy can this be seen as a contingent composite of different philosophical strands, whose public face hides competing and constantly shifting differences among its founders”.

Don Howard (2004) vai mais longe e, além de localizar o momento histórico da emergência da Interpretação de Copenhague, ele indica seu criador. Ela seria uma construção histórica tardia do próprio Heisenberg, de modo que

aquilo que é chamado de interpretação de Copenhague corresponderia apenas em parte ao ponto de vista de Bohr (...) muito do que é tido como interpretação de Copenhague é encontrada nos escritos de Werner Heisenberg, mas não em Bohr. De fato, Bohr e Heisenberg discordaram de modos importantes e profundos. A idéia de que existiria um ponto de vista unitário, é uma invenção do pós-guerra, de responsabilidade, em grande parte, de Heisenberg¹⁵⁷ (HOWARD, 2004, pp. 669 e 670).

Don Howard (2004, p. 675) chega a afirmar que nos escritos de Bohr não se endossa grande parte do que é considerado como Interpretação de Copenhague: “Não há colapso do pacote de onda, não há anti-realismo, nem subjetivismo. A interpretação da complementaridade de Bohr não é o que passou a ser posteriormente considerado como a Interpretação de Copenhague¹⁵⁸”. A concepção de um ponto de vista unitário relativo aos físicos do eixo Copenhague–Göttingen seria um “mito pós-guerra”, uma criação de Heisenberg em 1955, com a introdução do termo “interpretação de Copenhague” (HOWARD, 2004, p. 675). Todavia, o “mito” acabou sendo incorporado por outros autores que, mesmo quando se colocavam como críticos, reforçavam-no. Foi o caso de Bohm, Feyerabend, Hanson e Popper (HOWARD, 2004, p. 670).

O texto no qual se teve a gênese da “Interpretação de Copenhague” (HEISENBERG, 1955) foi a participação de Heisenberg em um volume em homenagem a Bohr, de 1955, organizado por Pauli e Rosenfeld. Segundo Don Howard (2004, p. 676):

a caracterização que Heisenberg faz dessa interpretação é, em parte, uma apresentação perspicaz de algumas sutilezas presentes na interpretação da Complementaridade de Bohr e, em parte, uma insinuação de seus próprios e divergentes pontos de vista [ou seja] sua leitura subjetivista da mecânica quântica¹⁵⁹.

¹⁵⁷ “What is called the Copenhagen interpretation corresponds only in part to Bohr’s view (...) much of what passes for the Copenhagen interpretation is found in the writings of Werner Heisenberg, but not in Bohr. Indeed, Bohr and Heisenberg disagreed in deep and important ways. The idea that there was a unitary Copenhagen point of view on interpretation was, it shall be argued, a postwar invention, for which Heisenberg was chiefly responsible”.

¹⁵⁸ “No wave packet collapse. No antirealism. No subjectivism. Bohr’s complementarity interpretation is not at all what came to be regarded as the Copenhagen interpretation”.

¹⁵⁹ “Heisenberg’s characterization of this interpretation is, in part, a perceptive presentation of some of the subtleties in Bohr’s complementarity interpretation and, in part, an insinuation of his own rather different views [...] his subjectivist reading of quantum mechanics”.

Nesta época, o subjetivismo apregoado por Heisenberg não era nenhuma novidade. A diferença foi que, além de gerar esse amálgama de idéias suas e de Bohr, sob a denominação de “Interpretação de Copenhague”, havia uma “filosofia” clara e unificada acerca do mundo microfísico.

Como explicar isso? Nas palavras de Don Howard (2004, p. 677), a situação vivida por Heisenberg no pós-guerra pode fornecer a explicação:

A pessoa que havia sido o favorito de Bohr nos anos 20 vivia um exílio moral do círculo de Copenhague desde o fim da guerra, sobretudo pela ruptura no relacionamento entre Heisenberg e Bohm durante sua malfadada visita a Copenhague em setembro de 1941, após se tornar líder do projeto atômico alemão. Qual poderia ser o melhor caminho, para um orgulhoso e outrora ambicioso Heisenberg, na busca de seu ingresso na família Copenhague do que fazer de si mesmo a voz da Interpretação de Copenhague?¹⁶⁰

Além disso, não se deve ignorar na criação da interpretação de Copenhague, o fator relacionado com o surgimento de interpretações concorrentes, como é o caso da teoria de David Bohm. O retorno de uma teoria ligada aos parâmetros da física clássica, tão similar, em seus pressupostos filosóficos, à mecânica ondulatória – a ponto de permitir o retorno de trajetórias e de uma visualização¹⁶¹ que se considerava perdida – não pode ser descartada como uma das motivações de Heisenberg no estabelecimento de um *corpus* de teses bem estabelecidas acerca da teoria quântica. Mais do que uma forma de combater as críticas frente à interpretação ortodoxa, o uso que Heisenberg fez da filosofia seria uma maneira de fornecer uma legitimidade e consistência filosófica e histórica à sua própria criação: a Interpretação de Copenhague.

O uso que Heisenberg faz de algumas noções da filosofia grega no decorrer de sua carreira parece endossar a seguinte tese: até os anos 40, as idéias acerca dos termos platônicos *diánoia*, *epistème* e a oposição entre materialismo e idealismo limitam-se a uma crítica à ciência anterior a descoberta do quantum de ação. Apenas no pós-guerra é que esses termos são utilizados num outro contexto, no caso, de legitimação da recém criada Interpretação de Copenhague e desqualificação das teses opostas.

¹⁶⁰ “it helps to recall Heisenberg’ situation in 1955, especially the fact that the person who was Bohr’s favorite in the 1920’s had become a moral exile from the Copenhagen inner circle in the postwar period, mainly because of the bitter rupture in Heisenberg’s relationship with Bohr during his ill-fated visit to Copenhagen in September 1941 after taking over the leadership of the German atomic bomb project. What better way for a proud and once ambitious Heisenberg to reclaim membership in the Copenhagen family than by making himself the voice of the Copenhagen interpretation?”

¹⁶¹ “Antes da mecânica quântica, se olharmos para as teorias bem sucedidas da Física, todas eram suscetíveis – apesar disso não ser exigido – a uma “estória causal de figuras” [casual pictures story] (para falar de modo figurado). E tradicionalmente dizia-se que a Mecânica Quântica mostrava que isso não poderia mais ser feito. Mas aí veio Bohm e mostrou que poderia sim!” (CUSHING, 2000, p. 17).

Independente desses diferentes contextos terem motivado importantes mudanças no uso da filosofia na obra de Heisenberg – o que produziu a “esquizofrenia” anteriormente referida por Mara Beller – considera-se possível extrair de cada uma dessas fases certos dados relacionados a filosofia grega que indiquem quais elementos básicos constituem a(s) ontologia(s) defendida(s) por Heisenberg no decorrer de sua carreira.

Década de 1930: O texto “Zur Geschichte der physikalischen Naturklärung” (trad. em HEISENBERG, 1952, pp. 27 – 40) é do ano de 1933, produto de uma preleção dada no ano anterior. É um texto típico do período de divulgação da teoria quântica e não existe nenhuma menção a *uma* Interpretação de Copenhague. Mas o texto todo é perpassado por uma crítica direta à ciência moderna, seu viés materialista e à adoção de uma “descrição da natureza” em detrimento de uma “interpretação da natureza”.¹⁶² A relação de “exclusão mútua” entre a *diánoia* e a *epistéme* no decorrer da história da ciência moderna também já se apresenta nele.¹⁶³ No entanto, não se faz menção a uma Interpretação específica da mecânica quântica que se ligue a um desses termos platônicos.

Mesmo que de maneira negativa¹⁶⁴, existe uma ontologia que indiretamente pode ser extraída desse texto, pois a crítica que surge dessas páginas não é contra o realismo¹⁶⁵, mas sim contra uma de suas variedades: o realismo classicista, “a tese de que a realidade tem uma estrutura próxima às nossas concepções e intuições clássicas a respeito do mundo” (PESSOA Jr., 2005, p. 104). Era esse o realismo que posteriormente foi taxado de “ontologia do materialismo” por Heisenberg e que foi superado com o nascimento da teoria quântica. Pessoa Jr. (2005, p. 104) cita uma série de “suposições classicistas que são violadas por alguma interpretação da Teoria Quântica” e que são criticadas por Heisenberg nesse texto: o *corpuscularismo* seria uma herança do atomismo helênico; *a tese de que o mundo existe em quatro dimensões* não tem sentido no mundo quântico em função do caráter abstrato da função de onda. O texto traz em seu bojo imagens de uma ontologia que não tem mais validade para Heisenberg – uma espécie de ontologia negativa, decorrente da austeridade epistêmica do eixo Copenhague-Göttingen.

¹⁶² Cf. supra p. 73.

¹⁶³ *Idem.*

¹⁶⁴ Nesta época, Heisenberg ainda estava sob a direta influência de Bohr (CASSIDY, 1991, p. 265) e de seus interditos epistemológicos, o que explica a ausência de imagens “positivas” quanto ao que se pode falar acerca do mundo quântico.

¹⁶⁵ “Em um sentido amplo, o termo realismo denota uma determinada posição filosófica acerca de certas classes de objetos, ou de proposições sobre esses objetos. Consideram-se, por exemplo, os objetos matemáticos, os universais, os objetos ordinários, as entidades não-observáveis postuladas pelas teorias científicas, etc. Em uma formulação puramente metafísica, o realismo sobre os objetos de uma dessas classes se caracteriza pela afirmação de que os objetos em questão ‘realmente existem’, ou ‘desfrutam de uma existência independente de qualquer cognição, ou ‘estão entre os constituintes últimos do mundo real’” (CHIBENI, 1997, p. 11).

Um grande movimento em direção a proposições “positivas” quanto à ontologia surge alguns anos depois. É somente em 1937, no texto “Gedanken der antiken Naturphilosophie in der modernen Physik” (trad. em HEISENBERG, 1952, pp. 53 - 59), que Heisenberg estabelece a oposição entre o materialismo dos atomistas gregos e o pitagorismo do *Timeu*, inclusive aproximando este último à idéia de átomo que surgiu na física moderna. O foco do texto reside apenas na inadequação da imagem tradicional do átomo herdado de Leucipo e Demócrito frente ao átomo segundo a física moderna e, como já foi afirmado, sua semelhança com as estruturas matemáticas platônicas. Entretanto, a separação entre as restrições epistemológicas em estilo instrumentalista¹⁶⁶, pedra de toque da filosofia do eixo Copenhague-Göttingen, e tais observações realistas permaneciam. Só com o recurso posterior a Aristóteles e a noção de *dýnamis* é que elas se coadunariam.

Década de 1940: Sem muitas variações, apenas com o acréscimo de referências aos pré-socráticos em textos de fins dos anos 40 em função do início da proliferação de partículas elementares, Heisenberg acrescenta um argumento que se tornaria recorrente a partir dessa época: a relação entre a energia e a *arché* dos pré-socráticos¹⁶⁷. Mais um reforço ao realismo de Heisenberg: as partículas elementares, tijolos últimos da matéria, são a combinação das simetrias com a energia, o mais próximo de um substrato material que Heisenberg propôs. Mas o fantasma do materialismo é mantido a distância fazendo-se recurso ao conceito de *arché* aliado a Aristóteles e Platão. Energia e simetrias se coadunam do mesmo modo que matéria e forma se conjugam, segundo o Estagirita. (HEISENBERG, 1952, pp. 95 – 108).

Em meio às turbulências da Segunda Guerra Mundial, entre maio de 1941 e o fim de 1942, o manuscrito *Ordnung der Wirklichkeit* (A Ordem da Realidade) só foi publicado em 1984. Se os textos filosóficos do físico alemão sempre foram pautados pela brevidade e por uma certa falta de compromisso com a sistematicidade de suas idéias, o mesmo não se aplica a *Philosophie* – outro título dado ao manuscrito. Ao contrário da maioria de seus artigos, derivados de palestras e seminários para públicos não-especializados, *Ordnung der Wirklichkeit* foi escrito com fins pessoais, uma maneira de se fazer entender como a obra de sua vida “se harmoniza com o todo” (CASSIDY, 1991, p. 448). As palavras de Catherine Chevalley (1998, p. 11) já justificam o valor de *Philosophie* e sua importância: “O manuscrito de 1942 é acima de tudo um escrito filosófico e constitui a elaboração mais densa e sintética

¹⁶⁶ O instrumentalismo sustenta que “as proposições teóricas da ciência são na verdade instrumentos de cálculo ou predição, ou ainda regras de inferência, que auxiliam a conexão e a estruturação das proposições sobre coisas e processos observáveis” (CHIBENI, 1997, p. 14).

¹⁶⁷ Cf. supra p. 110.

das idéias de Heisenberg sobre a significação epistemológica da física contemporânea e sobre o problema do conhecimento em geral¹⁶⁸”.

Dois princípios estruturam os argumentos de *Philosophie*: a divisão em Níveis de Realidade relacionados e um esvaziamento do papel dos conceitos de espaço e tempo em suas acepções clássicas (CHEVALLEY, 1998, p. 240). Apesar de sua importância, *Ordnung der Wirklichkeit* praticamente não se refere à filosofia helênica, o que retira grande parte de sua relevância para esta dissertação. Entretanto, a idéia de níveis de realidade seria retomada mais a frente.

Década de 1950: Iniciava-se um novo período de turbulência para os defensores do “espírito de Copenhague”. Einstein mantinha-se irredutível em suas reservas quanto à teoria quântica nos moldes de Copenhague. Físicos do outro lado da Cortina de Ferro, além de tecerem críticas contra a interpretação usual, propunham modelos alternativos inspirados no materialismo dialético. Por fim, o jovem David Bohm elabora uma teoria que parece ir de encontro a todos os preceitos e restrições duramente elaborados e divulgados desde o fim dos anos 20.

É nesse período que o uso que Heisenberg faz da filosofia grega sofre sua grande estruturação. Os ataques aos antigos e novos opositores da Interpretação de Copenhague tornam-se explícitos. A noção de “ontologia do materialismo”, que articula a filosofia de Descartes com o atomismo de Demócrito – ambas desaguando no materialismo do século XIX, também surge nessa época. É a imagem acabada do realismo classicista que adquire uma dupla função nos escritos de Heisenberg: por um lado, representa o materialismo ultrapassado pelas conquistas da teoria quântica; e, por outro, serve de instrumento retórico contra os adversários da Interpretação de Copenhague.

Como não bastava apenas atacar os opositores, e sim legitimar a Interpretação de Copenhague, elabora-se a visão segundo a qual a história da ciência é perpassada pela oposição entre duas filosofias de matriz grega – o materialismo e o idealismo (cf. supra pp. 66-82). Este último, nomeado assim pela primeira vez num texto de 1958 (HEISENBERG, 2004, p. 14), liga-se ao pitagorismo e à concepção de matéria apresentada no *Timeu*. O idealismo só retornou à ciência após 1900, com a descoberta do quantum de ação por Planck, sendo ele a única filosofia capaz de abarcar os fenômenos peculiares da nova física.

¹⁶⁸ “Le manuscrit de 1942 se presente avant tout comme un écrit philosophique e til constitue l’élaboration la plus synthétique dès idées de Heisenberg sur la signification épistemologique de la physique contemporaine et sur le problème de la connaissance em general”.

Mas a grande conquista ontológica veio com a introdução do aristotelismo na filosofia de Heisenberg . Ao tratar de um dos problemas mais espinhosos da mecânica quântica, o problema da medição e do colapso do pacote de onda, Heisenberg consegue harmonizar duas tendências em seu pensamento que se mostravam incomunicáveis. Suas restrições epistemológicas acerca da possibilidade do uso de grandezas que não fossem observáveis acabaram por se coadunar com sua busca por uma ontologia não-materialista e sua rejeição do realismo classicista, — e passam a receber um tratamento aristotélico a partir da década de 1950.

Surge uma ontologia *realista*, pois crê na existência de um fundamento da matéria baseado na coadunação entre estruturas matemáticas – uma herança platônica – com a energia – análoga à *arché* dos pré-socráticos. Entretanto, é um realismo atípico, pois apresenta um alto grau de subjetivismo, em função da relação entre os níveis de realidade quântico e clássico e seus regimes nomológicos diversos. Como uma forma de mediar esses dois níveis e de enxertar o ato de observação nesse cenário, Heisenberg recorre à noção aristotélica de potência. A consequência é a proposta de um novo nível de realidade fundamentado em probabilidade. Heisenberg chega, assim, a um realismo estrutural, probabilista, próximo do energetismo, e subjetivo.

Não surpreende que no texto que cunhou o termo “Interpretação de Copenhague” (HEISENBERG, 1955, p. 16), também se proclame o fato de que a teoria quântica, na verdade, trata de uma “nova realidade física objetiva” – realidade essa apreendida em conceitos aristotélicos. Na década de 1950, o físico alemão estabeleceu em alguns textos (HEISENBERG, 1974, 1995 e 2004) um novo nível da realidade, juntamente com a interpretação oficial e unitária da teoria que trata deste novo aspecto do real.

Mas se o percurso filosófico de Heisenberg é povoado por incoerências, ecletismos peculiares e mesmo pela ausência de rigor num grau intolerável a leitores filosoficamente exigentes, tal constatação invalidaria *a priori* as teses de Heisenberg acerca da natureza da matéria? Não. A elaboração de *um pensamento coerente e sistemático* é uma exigência que grande parte dos filósofos fazem para si mesmos e seus pares. Heisenberg, apesar de seus interesses na filosofia, nunca pretendeu ser um filósofo, pelo menos não no sentido que essa palavra possui na Academia. Por mais que seu discurso filosófico fosse subdeterminado pelos seus interesses científicos, isso não impossibilita que se extraia dele reflexões importantes sobre o estatuto da matéria no contexto da teoria quântica.

6 Referências Bibliográficas

6.1 Fontes primárias:

HEISENBERG, W. “Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanic relations” in VAN DER WAERDEN, B. **Sources of quantum mechanics**. Nova Iorque: Dover, 1967, pp. 261-276, (trad. de “Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen” **ZP** 33, 879-893. Recd. 29 Jul, 19).

_____. The physical content of quantum kinematics and mechanics, traduzido por J.A. Wheeler e W.H. Zurek. In: Wheeler, J.A. & Zurek, W.H. (eds). **Quantum Theory and Measurement**. Princeton: Princeton University Press, 1983, p. 62-84 (originalmente publicado em **Zeitschrift fur Physik** 43, 172 (1927)).

_____. **The physical principles of the quantum theory**. Chicago: University of Chicago; Nova Iorque: Dover, 1949, (trad. de **Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie**. Leipzig: S. Hirzel, 1930).

_____. **Philosophic problems of nuclear science**. New York: Pantheon; London: Faber and Faber, 1952 (trad. de **Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft**. 8. ed. Leipzig: S. Hirzel, 1935).

_____. **Nuclear physics**. New York: Philosophical Library; London: Methuen, 1953 (trad. de **Die Physik der Atomkerne**. Elaborated by Wilhelm Westphal and Dr. Jorges. Braunschweig: Vieweg und Sohn. *Die Wissenschaft 100. 1943*).

_____. The development of the interpretation of the quantum theory. In W. Pauli, L. Rosenfeld, V. Weisskopf, eds. **Niels Bohr and the development of physics. Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday**. London: Pergamon; New York: McGraw-Hill. Pp. 12—29. 1955.

_____. **A Imagem da natureza na física moderna**. Lisbon: Livros do Brasil, 1962. (trad. de **Das Naturbild der heutigen Physik**. Hamburg: Rowohlt. Rowohlts deutsche Enzyklopädie 8, 1955).”

_____. **Across the frontiers**. New York: Harper & Row, 1974 (trad. de **Schritte über Grenzen. Gesammelte Reden und Aufsätze**. Munich: R. Piper, 1973).

_____. **Encounters with Einstein: and other essays on people, places, and particles.** Princeton: Princeton University Press, 1989. (trad. de **Tradition in der Wissenschaft. Reden und Aufsätze.** Munich: R. Piper, 1977).

_____. **Páginas de reflexão e auto-retrato.** Lisboa: Gradiva, 1990.

_____. **Física e Filosofia.** Brasília: Editoria Universidade de Brasília, 1995 (trad. de **Physics and philosophy. The revolution in modern science.** New York: Harper and Row. (World perspectives 19) Gifford lectures at University of St. Andrews, winter term, 1955—1956, 1958).

_____. **A Parte e o todo.** Rio de Janeiro: Contraponto, 1996 (trad. de **Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik.** Munich: R. Piper, 1969).

_____. **Philosophie: Le manuscrit de 1942.** Paris: Éditions du Seuil, 1998 (trad. de “Ordnung der Wirklichkeit” in W. Blum, H.-P. Dürr, H. Rechenberg, (eds.) **Werner Heisenberg: Gesammelte Werke /Collected Works.** Series C / vol. I: Physik und Erkenntnis 1927-1955. Munich: Piper, pp. 217-306, Previously unpublished manuscript, titled “Philosophie,” completed ca. 1942).

_____. “A descoberta de Planck e os problemas filosóficos da física atômica” in BORN, M. *et al.* **Problemas da física moderna.** São Paulo: Perspectiva, 2004. (trad. de “Die Plancksche Entdeckung und die philosophischen Probleme der Atomphysik” in **L’homme et atome.** Neuchatel: Editions de la Baconnière. Pp. 37—53. (Histoire el société d*aujourd’hui.) 13th conference of the Rencontres Internationales de Genève, 4 Sep, 1958).

6.2 Bibliografia secundária:

ARISTÓTELES. **Metafísica:** livros IX e X. Trad., intro. e notas de Lucas Angioni. Campinas: IFCH/UNICAMP, novembro de 2004.

_____. **Metaphysics.** Trad. de Hugh Tredennick. Disponível em: <http://www.perseus.tufts.edu/cgi-bin/ptext?lookup=Aristot.+Met.+7.1029a>. Acesso em: 12 de agosto. 2007.

AUDI, R. (Dir.). **Dicionário de filosofia Cambridge.** São Paulo: Paulus, 2006.

BARNES, J. **Filósofos pré-socráticos.** São Paulo: Martins Fontes, 2003.

BELL, J. S. **Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics.** Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

BELLER, M. The Rhetoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit. **Philosophy of science,** 63, pp. 183-204, 1996.

- _____. **Quantum dialogue** – the making of a revolution. Chicago: The University of Chicago Press, 1999.
- BLACKBURN, S. **Dicionário de filosofia Oxford**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1997.
- BOHM, D. **Quantum theory**. New York: Dover Publications, 1951.
- _____. A Suggested Interpretation Of The Quantum Theory In Terms Of ‘Hidden Variables’, I & II - **Phys Rev**, 85(2), 166-179 & 180-193, 1952.
- BOHR, N. A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa? **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, 2, pp. 97-106, 1981 (original de 1935).
- _____. **Física atômica e conhecimento humano**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995 (original de 1958).
- _____. O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica. In: PESSOA JR., O. (org.). **Fundamentos da física 1** – Simpósio David Bohm. São Paulo, Editora Livraria da Física, pp. 135 – 159, 2000.
- BORN, M. **The restless universe**. Nova Iorque: Dover, 1951.
- BUNGE, M. **Física e filosofia**. São Paulo: Perspectiva, 2000.
- _____. **Dicionário de filosofia**. São Paulo: Perspectiva, 2002a.
- _____. **Ser, saber, hacer**. Cidade do México: Paidós, 2002b.
- BURNET, J. **A aurora da filosofia grega**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.
- BROWN, H. O Debate Einstein – Bohr sobre a Mecânica Quântica. **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, n. 2, pp. 51-89, 1981.
- CARTLEDGE, P. **Demócrito**. São Paulo: Editora UNESP, 2001.
- CASSIDY, C. **Uncertainty: the life and science of Werner Heisenberg**. Nova Iorque: W.H. Freeman, 1991.
- _____. **Werner Heisenberg: a bibliography of his writings**. Nova Iorque: Whitier Publications, 2001.
- CATTANEI, E. **Entes matemáticos e metafísica: Platão, a Academia e Aristóteles em confronto**. São Paulo: Loyola, 2005.
- CHEVALLEY, C. La physique quantique et les grecs. In: CASSIN, B. (org.) **Nos grecs et leurs modernes** - Les stratégies contemporaines d’appropriation de l’antiquité. Paris, Éditions Gallimard, 1992.
- _____. “Avant-propos” & “Introduction”. In HEISENBERG, W. **Philosophie: Le manuscrit de 1942**. Paris: Éditions du Seuil, 1998.

CHIBENI, S. Implicações filosóficas da microfísica. **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, Série 3, 2 (2), p.141-164, jul.-dez. 1992.

_____. **Aspectos da descrição física da realidade**. Campinas, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, 1997.

_____. Certezas e Incertezas sobre as Relações de Heisenberg. **Revista brasileira de ensino de física**, v. 27, n.2, p.181-192, 2005.

CORNFORD, F. M.. **From religion to philosophy: a study in the origins of the western speculation**. Princeton University Press, 1957.

_____. **Plato's cosmology: the *Timaeus* of Plato**. Indianapolis/Cambridge: Hackett Publishing Company, 1997.

CUSHING, J. **Quantum mechanics – historical contingency and the Copenhagen hegemony**. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

_____. A Visão de Mundo da Mecânica Quântica: Determinista ou Indeterminista? In: PESSOA JR. (org.). **Fundamentos da física 1 – Simpósio David Bohm**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2000. p. 1 – 13.

ERICKSON, G. e FOSSA, J. Os sólidos geométricos na antigüidade. **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, Série 2, 2(1), pp. 85-101, jan.-jun., 1990.

EINSTEIN, A. On a heuristic point of view about the creation and conversion of light. In: HARR, D.T. **The old quantum theory**. Oxford: Pergamon Press, 1967.

_____; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. A descrição da realidade física fornecida pela Mecânica Quântica pode ser considerada completa? **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, n. 2, pp.90-96, 1981.

FEYERABEND, P. Problemas da microfísica. In: MORGENBESSER, S. (org.) **Filosofia da ciência**. São Paulo: Cutrix, 1971, pp. 245-258.

FLEMING, H. Max Planck e a idéia do quantum de energia Disponível em: <http://www.fma.if.usp.br/~flaming/planck/planck.html>. Acesso em: 11 de setembro. 2007.

FREIRE JR., O. **David Bohm e a Controvérsia dos Quanta**, Coleção CLE, Vol. 27, Centro de Lógica Epistemologia e História da Ciência, Campinas, 1999.

_____. A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950–1970. **Science & Education** 12: pp. 573–586, 2003.

_____. ; Paty, M.; Rocha Barros, A. L. da. Sobre a recepção do programa causal de David Bohm. In Pessoa Jr., O. (org.). **Fundamentos da Física I – Simpósio David Bohm**. São Paulo: Livraria da Física, 2000, pp. 123-134.

GUILLEMIN, V. **The story of quantum mechanics**. Nova Iorque: Dover, 2003.

- HERMANN, A. **Werner Heisenberg: 1901-1976**. Bonn: Inter Naciones, 1976.
- HOLTON, G. As raízes da complementaridade. **Humanidades**, vol. II no. 9, outubro/dezembro 1984 Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1984.
- HOWARD, D. Who invented the ‘Copenhagen Interpretation’? A Study in Mythology. **Philosophy of science**, 71, 2004, p. 669–82.
- JAEGER, W. **Paidéia: a formação do homem grego**. São Paulo: Martins Fontes, 2003.
- JAMMER, M. **The philosophy of quantum mechanics - The interpretations of quantum mechanics in historical perspective**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1974.
- KIRK, G.S.; RAVEN, J.E. e SCHOFIELD, M. **Os filósofos pré-socráticos**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1994.
- KLEPPNER, D. Relendo Eintein sobre a radiação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol.27 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2005.
- KRAGH, H. **Quantum generations - a history of physics in the twentieth century**. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- KUHN, T. A estrutura das revoluções científicas. São Paulo: Perspectiva, 2000.
- LOSEE, J. **Introdução histórica à filosofia da ciência**. Belo Horizonte: Editora Itatiaia, 2000.
- LÖWITH, K. **O sentido da história**. Lisboa: Edições 70, s/d.
- 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.**, vol. 17, 5, 1987, pp. 461-506.
- MEHRA, J. & RECHENBERG, H. **The historical development of quantum theory**. New York: Springer, 1982. v. 4.
- MURDOCH, D. The Bohr-Einsten dispute. In: Faye, J. e Folse, H.J. (eds.) **Niels Bohr and contemporary philosophy**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- NIINILUOTO, I. **Critical Scientific Realism**. New York: Oxford University Press, 1999.
- PAIS, A. **Sutil é o Senhor: a ciência e a vida de Albert Einsten**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- PATY, M. **A matéria roubada: a apropriação crítica do objeto da física contemporânea**. São Paulo: EdUSP, 1995.
- PAULI, W. carta a David Bohm de 3 de dezembro de 1951, In Pauli, W. **Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, and others**, vol. IV, part I. Nova York: Springer, pp. 436-41, 1951.
- PENROSE, R. **A Nova mente do rei: computadores, mentes e as leis da Física**. Rio de Janeiro: Campus, 1989.

- PESSOA JR., O. O problema da medição m mecânica quântica: um exame atualizado. **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, Série 3, 2 (2), pp. 177-217, jul.-dez. 1992.
- _____. (org.). **Fundamentos da física 1**: Simpósio David Bohm. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2000.
- _____. (org.) **Fundamentos da física 2**: Simpósio David Bohm. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2001.
- _____. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. Volume I.
- _____. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. Volume II.
- PIZA, A. **Mecânica quântica**. São Paulo: Editora Universidade São Paulo, 2003a.
- _____. **Schrödinger e Heisenberg**. São Paulo: Odysseus Editora, 2003b.
- PLATÃO. **A República**. São Paulo: Nova Cultural, 1997.
- _____. **Timeu, Crítias, O segundo Alcebiades e Hípias menor**. Tradução de Carlos Alberto Nunes. Belém: EDUFPA, 2001.
- POPPER, K. **A teoria dos quanta e o cisma na física: pós escrito à *Lógica da descoberta científica***. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1989.
- _____. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 2000.
- REALE, G. **História da filosofia antiga**. São Paulo: Loyola, 1994, v. 2.
- _____. **História da filosofia antiga**. São Paulo: Loyola, 1995, v. 5.
- REDHEAD, M. **Incompleteness, non-locality and realism**. Oxford: Clarendon, 1987.
- REICHENBACH, H. **Philosophic foundations of quantum mechanics**. Nova Iorque: Dover, 1998.
- ROCHA BARROSA, L. da (entrevistador). O aparente e o oculto: entrevista com David Bohm. **Estudos Avançados** 4 (8): 188-98, 1990.
- RODITI, I. **Dicionário Houaiss de física**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2005.
- ROGUE, C. **Compreender Platão**. Petrópolis: Vozes, 2005.
- ROVIGHI, S. V. **História da filosofia moderna**. São Paulo: Loyola, 2002.
- ROSENBERG, U. Hidden historicity: the challenge of Bohr's philosophical thought. In: FAYE, J. e FOLSE, H.J. (eds.) **Niels Bohr and contemporary philosophy**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- ROSS, D. **Plato's theory of ideas**. Oxford: Clarendon Press, 1976.
- RYFF, L.C.B. Implicações filosóficas da microfísica. **Cadernos de história e filosofia da ciência**, Campinas, Série 3, 2 (2), p.165-176, jul.-dez. 1992.

- SÈGRE, E. **Dos raios x aos quarks** : físicos modernos e suas descobertas. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987.
- SELLERI, F. **El Debate de la teoria cuantica**. Madrid : Alianza, 1986.
- SQUIRE, E. **The mystery of the Quantum World**. Bristol: Adam Hilger, 1986.
- TAYLOR, A. E. **A comentary on Plato's Timaeus**. Oxford: Clarendon Press, 1962.
- TAYLOR, C.C.W. **Routledge history of philosophy: from beginning to Plato**. London: Routledge, 1997.
- VAN DER WAERDEN, B. **Sources of quatum mechanics**. Nova Iorque: Dover, 1967.
- VARELA, J. **O século dos quanta**. Lisboa: Gradiva, 1996.
- VON NEUMANN, J. **Mathematical foundations of quantum mechanics**. Princeton: Princeton University Press, 1955.

