



Marieta Dantas

Heisenberg e a filosofia Grega

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Filosofia do Departamento de Filosofia da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Filosofia.

Orientador: Carlos Alberto Gomes dos Santos
Co-orientador: Antonio Augusto Passos Videira

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Marieta Tunes Dantas

Heisenberg e a filosofia grega

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Departamento de Filosofia do Centro de Teologia e Ciência Humanas da PUC – Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Carlos Alberto Gomes dos Santos

Orientador

Departamento de Filosofia da PUC – Rio

Prof. Antonio Augusto Passos Videira

Co-orientador

Departamento de Filosofia da UERJ

Profa. Maura Iglésias

Departamento de Filosofia da PUC - Rio

Prof. Paulo Fernando Carneiro de Andrade

Coordenador Setorial do Centro de Teologia e
Ciência Humanas – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 12 de Setembro de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Marieta Tunes Dantas

Graduou-se em filosofia na PUC - Rio em 2002. Desenvolveu pesquisas no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) na área de Filosofia Antiga sob a orientação da professora Maura Iglésias

Ficha catalográfica

Dantas, Marieta

Heisenberg e a filosofia grega / Marieta Dantas ; orientadores: Carlos Alberto Gomes dos Santos, Antonio Augusto Passos Videira. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Filosofia.

105 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Filosofia.

Inclui bibliografia

1. Filosofia – Teses. 2. Mecânica quântica. 3. Filosofia grega. 4. Realidade. I. Santos, Carlos Alberto Gomes dos. II. Videira, Antonio Augusto Passos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Filosofia. III. Título.

Agradecimentos

Ao Carlos Alberto por ter aceitado me orientar nesta dissertação e pela paciência e cuidado que teve comigo.

Ao Antonio Augusto que esteve presente todo o tempo e cuja co-orientação rica e cuidadosa foi decisiva para a elaboração desta dissertação. Sem ele esta pesquisa não poderia acontecer.

À Maura Iglesias por ter despertado há muito meu interesse pelos gregos e pela generosidade com que compartilha o pensamento.

À CAPES pela bolsa concedida.

Ao Departamento de Filosofia da PUC-RJ pela confiança que creio ter sido depositada em mim.

Ao Tunga, dono do primeiro livro do Heisenberg que tive em mãos. Com ele compartilhei, todo o tempo, as questões discutidas nesta dissertação.

Ao Christiano Marques que fez muito mais do que uma revisão do texto e esteve comigo em momentos cruciais.

Ao Daniel Bueno pelas discussões que enriqueceram não só a dissertação como o que eu penso dela.

À Luiza Leite pelo carinho e pela força que deu a mim e ao texto.

Às amigas Dani Saad, Julia Eizirik e Karen Akerman, minhas irmãs, pelo amor.

Resumo

Dantas, Marieta Tunes; dos Santos, Carlos Alberto Gomes; Videira, Antonio Augusto Passos. **Heisenberg e a filosofia grega**. Rio de Janeiro, 2005. 106 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Filosofia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A dissertação tem por objetivo mostrar a importância e a significação da referência à filosofia grega no pensamento de Werner Heisenberg, um dos principais fundadores da mecânica quântica. A referência aos gregos, constante em seus escritos, deve ser primeiramente situada no contexto da crítica à modernidade, uma das diretrizes herdadas de Niels Bohr e uma das características mais fundamentais da filosofia de Heisenberg. Isto é, o pensamento grego é, para Heisenberg, um contraponto aos fundamentos da filosofia moderna, cujos limites são intransponíveis no que diz respeito à compreensão dos problemas apresentados pela física moderna. Acreditamos, no entanto, ser possível afirmar que as constantes referências, sobretudo a Platão e Aristóteles, têm também um papel fundamental no que diz respeito à caracterização do “nível de realidade” próprio à mecânica quântica.

Palavras-chave

mecânica quântica; filosofia grega; realidade.

Abstract

Dantas, Marieta Tunes; dos Santos, Carlos Alberto Gomes; Videira, Antonio Augusto Passos. **Heisenberg and the greek philosophy.** Rio de Janeiro, 2005. 106 p. MSc. Dissertation – Departamento de Filosofia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation has for objective to show the importance and signification of the reference to the greek philosophy in the thought of Werner Heisenberg, one of the main founders of quantum mechanics. The reference to the greek philosophy, constant in his writings, must first be situated in the context of the critics to modernity, one of the inherited lines of direction of Niels Bohr and one of the most basic characteristics of Heisenberg's philosophy. That is, the greek thought is, for Heisenberg, a counterpoint to the beddings of the modern philosophy, whose limits are insurmountable with respect to the understanding of the problems presented for the modern physics. We believe, however, that is possible to affirm that the constant references, especially to Plato and Aristotle, have also a fundamental role with respect to the characterization of the "level of reality" proper to the quantum mechanics.

Keywords

quantum mechanics; greek philosophy; reality.

Sumário

1. Introdução	09
2. Desenvolvimento histórico-conceitual da mecânica quântica	20
3. A crítica à modernidade	47
4. Heisenberg e os gregos	72
5. Conclusão	95
6. Referências bibliográficas	99
7. Glossário	103
8. Apêndices	107

Lista de figuras

Figura 1: Radiação dos corpos negros	108
Figura 2: Modelo atômico de Thomson (pudim de passas)	110
Figura 3: Modelo atômico de Bohr	113
Figura 4: Experimento das duas fendas	114
Figura 5: Padrão de interferência	116

Introdução

A presente dissertação tem por objetivo analisar o pensamento de Werner Karl Heisenberg (1901-1976), um dos grandes físicos do século XX e um dos responsáveis pela criação e posterior desenvolvimento da mecânica quântica, a moderna teoria do átomo. As contribuições ao desenvolvimento da mecânica quântica não são apenas físicas ou matemáticas como se poderia supor e grande parte do esforço empregado por Heisenberg era destinado à clarificação dos fundamentos e conseqüências filosóficas desta teoria. Mais que isso, a ciência, para Heisenberg, desde a sua origem grega, é intrinsecamente ligada à filosofia, o que explica o fato de que para ele havia a necessidade não apenas de uma filosofia natural, neste caso, de uma filosofia da física, como também de uma reflexão rigorosamente filosófica¹, como atesta a seguinte passagem:

De fato eu acredito que certos desenvolvimentos errôneos na teoria das partículas – e temo que estes desenvolvimentos ainda existam – sejam causados pela má compreensão por parte de alguns físicos de que seja possível evitar completamente os debates filosóficos².

Devemos fazer, no entanto, algumas observações. Quando se tem por objeto de estudo a obra filosófica de um físico, em outras palavras, de alguém que nunca reivindicou para si o posto acadêmico de filósofo, uma das primeiras questões levantadas é aquela que diz respeito à relação que este físico, no caso Heisenberg, tem com a filosofia. Ou seja, temos efetivamente o direito de atribuir a Heisenberg uma reflexão filosófica original? No caso em questão a pergunta merece ainda mais atenção pois a filosofia de Heisenberg é, de um modo geral, mal compreendida e cercada de grande confusão. É o que aponta Catherine Chevalley³

¹ Ver Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p. 46.

² Heisenberg, Werner, “The Nature of Elementary Particles” (1975), In: **Physics Today, March 1976**, p. 32.

³ Notar-se-á, ao longo desta dissertação, que são muitas as referências feitas a Catherine Chevalley. Isto se deve ao fato de que há muito poucos comentadores do trabalho de Heisenberg, mas não só isso. Ocorre, de fato, que o trabalho de Chevalley é o mais rico e mais completo no assunto; ela é, de uma maneira geral, a melhor comentadora e, muitas vezes, a única a abordar determinadas temáticas do pensamento de Heisenberg, bem como de outros autores da física quântica.

na sua introdução à tradução francesa de *Das Naturbild der Heutigen Physik*⁴, onde ela critica a opinião, bastante comum nos dias de hoje, segundo a qual Heisenberg (assim como os outros autores da chamada “Interpretação de Copenhague”⁵) não teria feito mais do que tratar de questões que os cientistas chamam de “questões gerais”, e interpretar, fazer ecoar, ou vulgarizar, idéias formuladas ou desenvolvidas por outros, e isso quando muito em seus escritos não técnicos⁶. Há, segundo Chevalley, uma tendência geral a, diante de qualquer dificuldade de interpretar o recurso que Heisenberg faz à filosofia, atribuir a ele a influência de alguma “corrente de pensamento”, isto é, uma tendência a considerá-lo “alguém levado por um fluxo”⁷.

Por exemplo, durante muito tempo julgou-se que Heisenberg era levado pelo fluxo e pela influência de algo que se designava pelo termo “positivismo”. Mais recentemente, afirmou-se ser o irracionalismo – “a tendência intelectual dominante na república de Weimar”⁸ – o fluxo que o teria influenciado. Assim, de acordo com Chevalley, o debate acerca do pensamento filosófico de Heisenberg permaneceu “restrito a uma dicotomia enganosa entre ‘positivismo’ e ‘irracionalismo’, sem que as premissas da formulação destes julgamentos fossem colocadas em questão”⁹. Ainda de acordo com Chevalley, é também comum creditar aos escritos de Heisenberg um tipo de filosofia destinada a embelezar um produto “novo e desconcertante”, a fim de tornar este produto vendável – algo que foi chamado de

⁴ Heisenberg, Werner, **Das Naturbild der Heutigen Physic**, Hambourg, Rowohlt, 1955. O título da edição francesa com a introdução de C. Chevalley é **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, Paris, Éditions Gallimard, 2000. A tradução portuguesa tem o título: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, Lisboa, Editora Livros do Brasil.

⁵ Ver Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, nota 1, p.19. “A situação de Heisenberg no que diz respeito a este ponto é a mesma N. Bohr e W. Pauli: a da formação, nos anos de 1950 de um mito epistemológico, a ficção da ‘Interpretação de Copenhague’, que teve por efeito transformar completamente o discurso filosófico dos fundadores da mecânica quântica e de o substituir por um conjunto de ‘teses’ em grande parte controversas. Para uma análise geral desta substituição, ver Howard, Don, **Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology**”.

⁶ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.18.

⁷ *Ibidem*, p.19.

⁸ Forman, Paul, “A Cultura de Weimar e a Teoria Quântica, 1918-1927: A Adaptação de Físicos a um ambiente Culturalmente Hostil”. Paul Forman é, atualmente, curador da área de física moderna no Smithsonian’s Museum of American History.

⁹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p. 20.

“uma concepção ornamental da filosofia” – e encobrir uma ambição de poder¹⁰.

Segundo Chevalley¹¹:

Heisenberg cai sob suspeita mais do que os outros autores da física quântica, uma vez que Bohr¹² é considerado, afetuosa ou ironicamente de acordo como o caso, irremediavelmente prisioneiro das brumas conceituais nórdicas; Pauli¹³ é ignorado, malgrado a importância essencial de suas idéias epistemológicas, o que também ocorre com Born¹⁴; Dirac¹⁵ se absteve de filosofar, e Schrödinger¹⁶, Einstein¹⁷ e de Broglie¹⁸ são liberados de qualquer suspeita mercantil pela simples circunstância de que suas idéias não se impuseram¹⁹.

Ora, Heisenberg foi não só o principal propagador do “espírito de Copenhague” como um dos físicos mais influentes após o fim da Segunda Guerra Mundial, em função da sua excepcional longevidade como cientista e da sua atividade política na organização internacional da pesquisa²⁰. A despeito da imensa difusão que estas sugestões de interpretação tenham alcançado até os dias de hoje, é preciso, no entanto, que elas sejam explicitamente recusadas²¹. São opiniões que, como veremos, levaram em consideração muito pouco ou mesmo nada do conteúdo dos textos de Heisenberg²².

Como afirma Weizsäcker, muitas pessoas, “incluindo Einstein e filósofos realistas da atualidade²³”, afirmaram ser a filosofia de Copenhague positivista. O filósofo Karl Popper²⁴ foi um dos mais importantes críticos a manifestar sua reprovação a Heisenberg e aos outros fundadores da “interpretação de Copenhague” da mecânica quântica²⁵. Como ele escreve em 1982,

¹⁰ *Ibidem*, p. 34.

¹¹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p. 34.

¹² Niels Henrik David Bohr (1885-1962).

¹³ Wolfgang Ernst Friedrich Pauli (1900-1958).

¹⁴ Max Born (1882-1970).

¹⁵ Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984).

¹⁶ Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961).

¹⁷ Albert Einstein (1879-1955).

¹⁸ Louis Victor Pierre Raymond duc de Broglie (1892 - 1987).

¹⁹ Esta, como as demais traduções encontradas na presente dissertação, foi por mim elaboradas.

²⁰ *Ibidem*, p. 34.

²¹ *Ibidem*, p. 21.

²² *Ibidem*, p. 25.

²³ Weizsäcker, Carl von, “Heisenberg Conception of Physics“, In: **Quantum Theory and the Structures of Time and Space volume 2**, p. 14-15.

²⁴ Sir Karl Raimund Popper (1902-1994).

²⁵ *Ibidem*, p. 19, nota 2: “Ver Karl Popper, **Quantum Theory and the Schism in Physics**, W. W. Bartley ed., Londres, Hutchinson, 1982, Prefácio. O volume reúne três textos diferentes: um manuscrito de 1957; a reedição modificada e comentada de um artigo de 1966, “Quantum mechanics without the “observer””, e um prefácio de 1982. Popper não foi o único a se utilizar de sua autoridade em uma “interpretação histórica” deste gênero; encontraremos as mesmas sugestões

A física está em uma crise. (...) E parte da crise presente – uma revolução quase permanente das suas teorias fundamentais – é, na minha opinião, um estado normal de qualquer ciência madura. Mas também há um outro aspecto da crise presente: é também uma crise de compreensão. Esta crise de compreensão é aproximadamente tão antiga quanto a interpretação de Copenhague da mecânica quântica²⁶.

Para Popper, estes autores teriam se valido de uma mistura diabólica composta de “muitos grandes erros²⁷”, a saber, o “positivismo ou idealismo de Mach (...) e a interpretação subjetivista dos cálculos de probabilidade²⁸”. O argumento utilizado nesta acusação faz recurso, habitualmente, às afirmações de que a filosofia de Ernst Mach²⁹ era a filosofia oficial dos círculos de pensamento dos anos 1920; de que os fundadores da mecânica quântica teriam abertamente se declarado positivistas lógicos; e de que o positivismo seria manifesto no “princípio da redução aos observáveis” dos trabalhos de 1925 a 1927 de Heisenberg sobre a mecânica matricial e as relações de indeterminação. No entanto, ainda segundo Chevalley, é possível mostrar o contrário. Primeiramente, que as teses de Mach não estavam em voga no fim dos anos de 1920, como testemunham os próprios membros do Círculo de Viena³⁰. Em segundo lugar, que Bohr, Heisenberg e Pauli claramente se declararam destacados da corrente do empirismo lógico, como na seguinte passagem de Heisenberg:

Os positivistas têm uma solução simples: o mundo deve estar dividido entre aquilo que podemos ver com clareza e o resto, sobre o qual é melhor silenciar. Nesses casos, dever-se-ia permanecer calado. Não existe filosofia mais despropositada que esta, considerando-se que não existe nada que possa ser dito claramente. Se omitíssemos tudo o que não é claro, provavelmente só nos restariam tautologias desinteressantes e banais³¹.

Ou neste trecho, em que Heisenberg cita Bohr:

Tudo o que os positivistas estão tentando fazer – concluiu Niels - é dar aos métodos da ciência moderna uma base filosófica, ou, se vocês preferirem, uma justificação. Eles assinalam que falta às antigas filosofias a exatidão própria dos conceitos

por exemplo em M. Bunge, **Philosophy of Physics**, Dordrecht, Reidel, 1973 (...). De fato, a tese do positivismo de Bohr e Heisenberg foi tacitamente aceita desde dos anos 1950.”

²⁶ Popper, Karl, **Quantum Theory and the Schism in Physics**, p. 1.

²⁷ *Ibidem*, p. 2.

²⁸ *Ibidem*, p. 2.

²⁹ Ernst Mach (1838-1916).

³⁰ Ver Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p. 21, nota 2.

³¹ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969). Capítulo 17: p. 248.

científicos e acham que muitas das questões levantadas e debatidas pelos filósofos convencionais não têm sentido: são pseudo-problemas e, como tais, mais vale ignorá-los. Endosso a insistência positivista na clareza conceitual, mas sua proibição de qualquer debate sobre as questões mais amplas, apenas por nos faltarem conceitos suficientemente bem definidos nessas áreas, não me parece útil; essa mesma proibição impediria que compreendêssemos a teoria quântica³²”.

E, finalmente, estas passagens, dentre outras³³, nos permitem perceber que a atribuição de um caráter positivista ao “princípio de redução aos observáveis” não era de modo algum justa. Este princípio – que era antes de tudo einsteiniano, de acordo com Heisenberg³⁴ – surgiu de uma necessidade própria da construção da teoria quântica, a saber a de por em caução os conceitos cinemáticos clássicos tais como os de trajetória, órbita ou posição de um elétron, a fim de se liberar das “imagens intuitivas”

Quanto à atribuição de irracionalismo, o argumento principal é o de que a corrente dominante na Alemanha nos anos que se seguiram à Primeira Guerra Mundial, momento da criação da mecânica quântica, era não a do positivismo, mas a de uma filosofia oposta ao racionalismo mecanicista das ciências da natureza. Paul Forman, num artigo de 1971³⁵ que ele julga ser uma “análise causal³⁶” de como fatores sociais determinam o conhecimento científico, alega que a atmosfera intelectual da Alemanha do pós-guerra (a assim chamada república de Weimar) influenciou a interpretação não determinista da mecânica quântica elaborada pela chamada Escola de Copenhague. O lugar e o período eram, de acordo com Forman, “de profunda hostilidade à física e à matemática³⁷”. Consoante Forman:

³² Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 72-73.

³³ Por exemplo, Heisenberg, Werner, **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 43. Ver também Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p. 22, nota 1.

³⁴ Ver a este respeito Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), capítulo 5 (p. 73-85). De acordo com Heisenberg, Einstein se utilizou do princípio da redução a grandezas observáveis em sua teoria da relatividade ao enfatizar “que não se pode falar em tempo absoluto, simplesmente porque o tempo absoluto não é observável; que só as leituras dos relógios, seja no sistema de referência do movimento, seja no sistema em repouso, são importantes para a determinação do tempo.”

³⁵ Forman, Paul, “A Cultura de Weimar e a Teoria Quântica, 1918-1927: A Adaptação de Físicos a um ambiente Culturalmente Hostil”, In: **Cadernos de História e Filosofia da Ciência, suplemento 2**. Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência (CLE), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1983. Este artigo é que é a origem da tese da influência de Weimar. F. Selleri segue a tese de Forman em F. Selleri, **Le grand débat de la théorie quantique**, Paris, Flammarion, 1986, p. 49 : “Os físicos teriam, assim, se alinhado à “tendência intelectual dominante na República de Weimar”, i.e. aquela “de uma filosofia da vida existencialista que se opunha fortemente ao racionalismo” e que correspondia a uma tendência geral da cultura alemã, oposta a qualquer *Weltanschauung* (visão de mundo) racional

³⁶ Forman, Paul, “A Cultura de Weimar e a Teoria Quântica”, p. 6.

³⁷ *Ibidem*, p. 7.

A tendência intelectual dominante no mundo acadêmico de Weimar era uma “filosofia da vida” existencialista e neo-romântica, que se alimentava de crises e se caracterizava pelo antagonismo em relação à racionalidade analítica em geral e às ciências exatas e suas aplicações técnicas em particular”, e o cientista era “implícita ou explicitamente o bode expiatório de incessantes exortações em favor de uma renovação espiritual, enquanto o conceito – ou meramente a palavra – “causalidade” simbolizava tudo aquilo que era odioso na atividade científica³⁸.

Para Forman, quando os cientistas e a atividade por eles exercida gozam de alto prestígio no ambiente social imediato têm também a liberdade para ignorar as doutrinas, simpatias e antipatias específicas do meio cultural correspondente. Quando ao contrário os cientistas e seu trabalho experimentam uma perda de prestígio, vêm-se impelidos a tomar medidas para compensar este declínio³⁹: “Caso o físico desejasse melhorar sua imagem pública, devia, antes de tudo, dispensar a causalidade, o determinismo rigoroso, este aspecto universalmente detestado da descrição física do mundo⁴⁰”. Os físicos alemães teriam, assim, por causa da pressão que sofriam, se disposto a abandonar a causalidade, então identificada com a racionalidade, para se aproximar de uma moda ideológica que lhes empurrava para o que Forman chamou de uma “sede por crises⁴¹”. Forman sugere ainda que esta pressão teria mesmo os levado a procurar por um formalismo matemático que pudesse ser interpretado como não causal, isto é, esta conversão ideológica teria começado antes que se tivesse evidência da não causalidade da teoria quântica. Em outros termos, a interpretação não causal e o aparato matemático a ela associados teriam sido adotados por parecerem ser uma boa estratégia publicitária.

O artigo de Forman é, de acordo com J. Hendry,

amplamente reconhecido como sendo de máxima importância: como a primeira tentativa de analisar as dramáticas mudanças ideológicas que acompanharam o desenvolvimento da mecânica quântica e também como o principal marco miliário na historiografia da ciência⁴².

Contudo, prossegue Hendry, embora dificilmente se possa duvidar da caracterização do meio intelectual de Weimar identificada por Forman, uma

³⁸ *Ibidem*, p. 7.

³⁹ *Ibidem*, p. 8.

⁴⁰ *Ibidem*, p. 9.

⁴¹ *Ibidem*, p. 51.

⁴² Hendry, John, “Weimar Culture and Quantum Causality”, p. 155.

conexão causal entre esta caracterização e a tese central do artigo não pode ser sustentada. Cito Hendry:

Devemos nos lembrar que a história das idéias raramente é tão direta, e que mesmo no que diz respeito a uma atitude geral no ambiente da matemática, física e causalidade, dever-se-ia distinguir uma sutileza que Forman não distinguiu. Pois embora muitos ataques a matemáticos e físicos partindo de ambientes exteriores a estas disciplinas de fato fossem feitos, estes ataques eram, em todos os casos, ataques ao seu *valor*, e não ao seu *conteúdo*. (...) Não havia qualquer concepção de física e matemática que pudesse se adaptar aos novos ideais. (...) Física e causalidade estavam equacionadas e, enquanto a física sobrevivesse na presente civilização, ela continuaria a ser caracterizada pelo seu tema peculiar nesta civilização, isto é, pela causalidade⁴³.

A renúncia à causalidade não significava, assim, a transformação da física, mas sim o seu fim. A existência da equação física = causalidade, e da distinção entre o valor e o conteúdo das ciências exatas, não afeta o fato de que ambas, a física e a causalidade, estivessem sob forte ataque e de que os cientistas em alguma medida reagissem a isto adaptando o seu conteúdo. No entanto, a distinção entre valor e conteúdo é útil para que se perceba, ao olhar as atitudes dos físicos, que estes eram antes excluídos do meio intelectual do que por ele atacados.

Se, afirma Hendry⁴⁴, os físicos e matemáticos usavam naturalmente em seus discursos a linguagem do meio intelectual em questão, e justificavam os objetivos das suas atividades em termos que poderiam ser compreendidos e apreciados por aqueles que estavam questionando seu valor cultural, isto indica, por certo, que havia da parte deles uma consciência das críticas que vinham deste meio, e até mesmo uma certa acomodação de valores, mas não implica, de modo algum, que houvesse qualquer tipo de adaptação no que diz respeito ao conteúdo das ciências. Além disso, ainda seguindo Hendry, embora Forman tenha sido bem sucedido na tentativa de mostrar que os físicos e matemáticos estavam conscientes dos valores do meio, e de que este meio era realmente hostil ao princípio de causalidade, ele não foi capaz de justificar as afirmações de que havia na física uma ampla difusão da rejeição à causalidade e de que não havia razões internas para esta rejeição.

Pois existiam fortes razões internas para a rejeição da causalidade, e quando estas razões são levadas em consideração, e a suposta “conversão à não causalidade” de Forman é reexaminada criticamente, percebe-se que a reação dos físicos ao desafio

⁴³ *Ibidem*, p. 157-158.

⁴⁴ *Ibidem*, p. 159-160.

da causalidade estava longe de ser uma acomodação e que podia mesmo ser uma tendência ao isolamento⁴⁵.

Outra questão ressaltada por Hendry é a de que mesmo que considerássemos todos os casos de conversão à não causalidade como produto direto da ação do meio social, estes casos representariam apenas uma minúscula proporção da totalidade dos físicos alemães. E, ainda que não seja claro se a reação da vasta maioria foi a de isolamento ou da neutralidade, certamente nenhuma destas opções é próxima a um desejo ardente ou a uma procura ativa por uma mecânica quântica não causal⁴⁶. Como afirma Chevalley, a tese de Forman se choca com afirmações explicitamente contrárias a ela dadas por Bohr e Heisenberg, cujo holismo nunca está associado a um irracionalismo ou à reivindicação de uma não causalidade de princípio⁴⁷. Cabe indicar também que a tese de Forman ignora o fato de que a aparição do modo de pensar estatístico em física é muito anterior à moda irracionalista e à crise engendrada pela derrota alemã na primeira grande guerra. Nas palavras de Chevalley,

a defesa desta tese também se utiliza consideravelmente da ambigüidade do próprio termo “causalidade”, de que é preciso distinguir ao menos três significados diversos: aquele do determinismo matemático da física clássica que é de fato por eles abandonado (ou ao menos limitado), aquele de um conceito geral da teoria do conhecimento ligado a uma noção de inferência válida em uma argumentação, de que Bohr afirma a manutenção como uma evidência em um texto de 1931 no qual ele se espanta com a confusão ocorrida nos debates; e aquele do conceito físico de conservação da energia e da impulsão, igualmente mantidos em 1927. Sem tais distinções, a atribuição de um acausalismo irracionalista aos fundadores da mecânica quântica se sustenta apenas num argumento de autoridade⁴⁸.

No que diz respeito à causalidade propriamente dita, questão em que o artigo de Forman se baseia fundamentalmente, é ainda mais importante, para Hendry, ressaltar o fato de que

o critério da causalidade era apenas um aspecto da ideologia científica dominante (...). Para a maioria daqueles que estavam ocupados com os problemas das teorias quântica e da relatividade, ele era claramente uma questão secundária em relação àquela do critério de uma descrição consistente dos fenômenos no espaço e tempo

⁴⁵ *Ibidem*, p. 160.

⁴⁶ *Ibidem*, p. 168.

⁴⁷ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 23.

⁴⁸ *Ibidem*, p. 23-25. Ver Chevalley, Catherine, “Glossaire”, in Niels Bohr, **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 385-396.

ordinários e àquela de uma teoria objetiva (isto é, independente do observador); e isto era particularmente verdadeiro no que diz respeito aos físicos mais intimamente envolvidos com o desenvolvimento de uma nova mecânica quântica, isto é, no que concerne a Pauli, Heisenberg e Bohr. (...) Sutilezas como estas concernentes ao conceito de causalidade fazem zombaria da tentativa de Forman de uma análise “causal” dos fenômenos com os quais ele está preocupado. Mas mesmo sem estas sutilezas, a tentativa teria soçobrado pela sua completa falta de informação⁴⁹.

É preciso, portanto, como sugere Chevalley, que se abandone não só a solução de atribuir ao conteúdo dos escritos de Bohr e Heisenberg a influência de correntes de idéias, mas também que se pratique

uma certa suspensão de opinião no que diz respeito aos julgamentos “psicológicos” usualmente conectados a Heisenberg: diletante, oportunista, determinado a utilizar seus conhecimentos filosóficos como estratégias para obter poder, que só teria filosofado superficialmente e com objetivos precisos e extrínsecos à filosofia mesma. (...) Ainda aqui tudo se passa como se o público de hoje em dia – generalizando a todo o século XX a separação drástica das culturas filosófica e científica instaurada depois de 1945 – não esperasse de um intelectual, em matéria de filosofia, mais que visões livres, julgamentos sem rodeios ou retóricas enganosas. Ora, apesar de ser possivelmente fácil encontrar exemplos atuais de tal situação, o hábito de se projetar seus efeitos sobre o início do século XX constitui um anacronismo. Um tal hábito reflete, possivelmente, também a dificuldade que existe hoje em dia de pensar o conhecimento científico em termos filosóficos⁵⁰.

Como foi dito, apenas a desinformação justifica a difusão dos contra-sensos mais comuns no que diz respeito às posições de Heisenberg. Afirma-se que ele teria negado a realidade física afirmando que “somente o que é passível de medição é real”; que ele teria privilegiado constante e exclusivamente as matemáticas abstratas⁵¹; que ele teria afirmado autoritariamente que a mecânica quântica era o “fim do caminho⁵²”; que ele teria pregado a incompreensibilidade de uma teoria como uma verdade, etc., embora os textos de Heisenberg contenham, sobre cada um destes pontos, repetidas indicações contrárias.

Faz-se necessário, pois, adotar uma outra perspectiva que leve em consideração o corpo real dos textos. A partir de uma tal perspectiva é possível

⁴⁹ Hendry, John, “Weimar Culture and Quantum Causality”, p. 169.

⁵⁰ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la Physique Contemporaine**, p. 25.

⁵¹ Ver por exemplo, Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo**, capítulo 3, “O conceito de “compreensão” na física moderna”: “O aparato da teoria da relatividade não me causava nenhuma dificuldade, mas isso não significava, necessariamente, que eu houvesse “compreendido” por que um observador em movimento, ao usar a palavra “tempo”, referia-se a algo diferente de um observador em repouso. Aquilo me intrigava e me parecia incompreensível. (...) Sinto-me meio ludibriado pela lógica implícita nesse arcabouço matemático. Talvez você possa até dizer que apreendi a teoria com o cérebro, mas não ainda com o coração.”

⁵² Popper, Karl, **Quantum Theory and the Schism in Physics**, p. 6.

apresentar uma interpretação da relação que tem Heisenberg com a filosofia, eliminando, com isso, a tese da influência ideológica e a reprimenda ao diletantismo⁵³. Prosseguiremos, deste modo, com a consideração deste corpo real dos textos nos capítulos que se seguem.

Apesar de privilegiarmos a obra filosófica de Heisenberg, para compreendê-la nos seus pontos principais devemos antes nos voltar, em nosso primeiro capítulo, para uma breve descrição histórico-conceitual da teoria quântica, pois é da especificidade desta teoria que se origina o pensamento filosófico de Heisenberg. Esta especificidade é caracterizada por uma modificação fundamental na definição de observação. A mecânica quântica inaugurava uma nova forma de objetividade assinalada pela renúncia à unidade clássica de uma descrição simultaneamente espaço-temporal e causal dos fenômenos e pela característica estatística que dela era consequência. Esta renúncia tem por resultado a justaposição de duas linguagens, a linguagem dos conceitos clássicos e a do formalismo matemático da mecânica quântica.

Devemos apontar, ainda nesta introdução, que a aparição da mecânica quântica levou seus inventores a um reexame crítico dos conceitos fundamentais da tradição filosófica moderna, concomitante a um reexame dos conceitos fundamentais da física clássica, a herdeira destes conceitos. Este reexame resultou, como veremos, na conclusão de que a divisão do universo entre processos objetivos no espaço e no tempo de um lado e a alma que reflete estes processos, de outro, não podiam aplicar-se à física moderna.

A ciência já não é um espectador colocado em frente da natureza, mas reconhece-se a si mesma como parte da interação entre homem e natureza. O método científico, consistindo em abstrair, explicar e ordenar os fenômenos, adquiriu consciência das limitações que lhe impõe o fato de a sua intervenção modificar e transformar o seu objetivo a tal ponto que o método não pode separar-se do objetivo.

Estas questões serão examinadas em nosso segundo capítulo, e, no entanto, este não é o objetivo central do presente trabalho. A hipótese em que aqui nos baseamos é aquela de que é possível compreender melhor a interpretação da mecânica quântica e a filosofia de Heisenberg caso se examine o papel que o recurso ao pensamento grego desempenha em sua obra, o que será efetuado apenas no terceiro capítulo desta dissertação. A hipótese de que partimos parece ser, antes

⁵³ Chevalley, Catherine, "Introduction", In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la Physique Contemporaine**, p. 27.

de tudo, uma hipótese do próprio Heisenberg, que chega a fazer da filosofia grega uma condição para a compreensão da física atômica como se pode perceber na passagem que se segue: “De qualquer modo, convenci-me [ainda em 1919] de que dificilmente podemos ocupar-nos de física atômica sem conhecermos a filosofia grega da natureza⁵⁴”.

⁵⁴ Heisenberg, Werner, “Relações entre Cultura Humanística, Ciência e Ocidente” (1949), **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p.60.

2

Desenvolvimento histórico-conceitual da mecânica quântica

Parece necessário para a compreensão do pensamento de Heisenberg que façamos, primeiramente, uma descrição do desenvolvimento histórico-conceitual da mecânica quântica. Seguimos aqui o próprio Heisenberg, na afirmação de que “a melhor maneira de se entrar nos problemas científicos e filosóficos da física moderna pode ser através de uma descrição histórica do desenvolvimento da teoria quântica¹”. Este desenvolvimento histórico-conceitual é marcado, no que nos concerne aqui, sobretudo pelo pensamento do físico dinamarquês Niels Bohr, uma vez que Bohr foi de fundamental importância para a reflexão posterior de Heisenberg como ele próprio afirmou muitas vezes. Cabe ressaltar, como o fez Chevalley, que “a obra de Bohr, como freqüentemente se observou, é ao mesmo tempo a de um físico e a de um filósofo. Entre estes dois aspectos, não há, no entanto, uma justaposição, mas uma imbricação e uma referência permanente de uma à outra²”. Os elementos característicos do método de Bohr são formados, ainda de acordo com Chevalley³, ao curso do período mais complicado da história da mecânica quântica, quando a ruptura com a física clássica ainda não havia sido operada e era preciso proceder em se tateando no escuro. Como veremos, Bohr se esforçou por definir um modo de constituição da objetividade que diferirá em pontos essenciais daquele que a física adotou durante três séculos. Seu pensamento, que não se apresenta sob uma forma sistemática, deve antes ser considerado como construído em torno de uma questão, questão esta que se desenvolve lentamente à medida que surgem os problemas durante a elaboração da teoria quântica. Para compreender esta evolução é preciso, então, compreender como se dá a passagem dos paradoxos da antiga teoria quântica na direção de uma clarificação da questão geral, a saber a das condições de coerência ao mesmo tempo formal e filosófica de uma física dos fenômenos atômicos. Devemos, portanto, retomar o percurso da teoria quântica desde seu início.

¹ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy**, p.16.

² Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 19.

³ *Ibidem*, p. 34-35.

Em 1900 Max Planck⁴ formulou, inicialmente de modo apenas empírico, uma lei para o fenômeno da radiação⁵, resultado do seu estudo sobre radiação térmica⁶ de corpos negros⁷. O fenômeno em questão é bem conhecido e não pertencia, até então, às partes centrais da física atômica⁸. Um corpo negro perfeito é “um corpo que absorve toda a radiação que nele incide e, conseqüentemente, (...) é também o mais poderoso emissor de radiação⁹”. Ele pode ser descrito como qualquer pedaço de matéria de superfície negra, por exemplo uma bola, que seja ôca e que tenha um pequeno furo. Devemos lembrar que aquecer um corpo significa, basicamente, aumentar a agitação dos átomos que o constituem (quanto maior a temperatura, maior a agitação dos átomos). A partir de uma determinada temperatura, qualquer pedaço de matéria emite radiação visível, cuja natureza muda de acordo com a temperatura: ele se torna incandescente, depois vermelho, e quando a altas temperaturas, branco, o que independe da cor ou superfície do material, e a radiação emitida é estudada para diferentes temperaturas do sistema¹⁰. Até então pensava-se que a energia emitida por um corpo aquecido se comportava como onda eletromagnética¹¹, sendo emitida e absorvida de modo contínuo pelas menores partículas radiantes, os átomos¹² e o fenômeno deveria poder ser explicado de acordo com as leis da radiação e do calor conhecidas. Porém, a tentativa de se obter esta explicação, no fim do século XIX por Lord Rayleigh¹³ e James Jeans¹⁴, não havia sido bem sucedida¹⁵. Planck iniciou suas

⁴ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 - 1947).

⁵ Ver no Glossário a entrada “Radiação”.

⁶ Ver no Glossário a entrada “Radiação térmica”.

⁷ Planck, Max, “On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum” (“Para a teoria da lei de distribuição de energia no espectro normal”), *Annalen der Physik* vol. 4, p. 553 ff (1901). Disponível para consulta online na página “Classic Papers from the History of Chemistry”: <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Classic-Papers-Menu.html>, mais precisamente no endereço <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Planck-1901/Planck-1901.html>.

⁸ Heisenberg, Werner, *Physics and Philosophy* (1955), p. 18.

⁹ Heisenberg, Werner, *Nuclear Physics* (1948), p. 31.

¹⁰ Uma explicação um pouco mais detalhada se encontra no apêndice 1.

¹¹ Já se havia observado na luz fenômenos tais como interferência, difração e dispersão (ver as respectivas entradas no glossário), isto é, fenômenos que apenas uma onda poderia apresentar, e em suporte à interpretação ondulatória estava a bem sucedida teoria do eletromagnetismo de Maxwell. Ver a entrada “Eletromagnetismo” no Glossário.

¹² No interior de um átomo não há luz: os átomos só emitem luz após serem excitados, ou seja, para que um átomo comece a irradiar luz é necessário que lhe seja transmitida uma determinada quantidade de energia. Ao irradiar, o átomo perde a energia que adquiriu.

¹³ Lord John William Strutt Rayleigh (1842-1919).

¹⁴ Sir James Hopwood Jeans (1877-1946).

¹⁵ A “Lei Rayleigh-Jeans da radiação” se aplicava aos dados experimentais nas regiões de frequência extremamente baixa mas não se aplicava às altas frequências. Jammer, Max, *The*

pesquisas com uma hipótese que se utilizava de medidas muito precisas do espectro da radiação térmica, feitas por Ferdinand Kurlbaum¹⁶ e Heinrich Rubens¹⁷. Ela era matematicamente simples e se mostrou em total concordância com os dados experimentais.

A nova fórmula não tinha, no entanto, ainda, uma interpretação física, o que iniciou um período de intenso trabalho teórico para Planck. É provável que não tenha demorado até que ele percebesse que sua fórmula, se traduzida em termos do átomo radiante (o assim chamado oscilador¹⁸), revelava que a única conjetura possível era a de que o oscilador só poderia emitir *quanta* com energias discretas. Nas palavras de Heisenberg,

ele percebeu que sua lei só poderia se estabelecer nas bases da notável hipótese de que as menores partículas radiantes, os átomos, não poderiam assumir os valores de uma seqüência contínua de todos os valores possíveis de energia das suas vibrações (como seria de se esperar de acordo com o nosso conhecimento prévio) mas apenas uma série de certos valores específicos, definidos, de energia. Parecia mesmo – e a pesquisa subsequente o provou – que a radiação emitida manifestava esta qualidade de descontinuidade, e que a luz, vista então como um processo ondulatório, deveria também consistir de quantas discretos de energia¹⁹.

Os átomos só poderiam, assim, emitir e absorver radiação em quantidades definidas, como se fossem “pacotes” de energia. De acordo com a lei de Planck, a luz não tinha mais as características das ondas que se propagam no espaço em todas as direções, mas era uma grande quantidade de partículas atravessando o espaço em linhas retas. Embora Planck tivesse achado necessário quantizar a emissão e recepção de energia, este resultado era tão diferente de tudo que se conhecia na física clássica que ele hesitou em estender o conceito de quantização de energia à radiação eletromagnética, afinal, a eletrodinâmica de James Maxwell²⁰, que havia sido extremamente bem sucedida, se baseava na idéia de que campos eletromagnéticos transportavam qualquer quantidade de energia de forma contínua. Mas Planck, depois de um período de árduo trabalho, finalmente convenceu-se de que não havia como escapar de sua conclusão. Cito Heisenberg:

Conceptual Development of Quantum Mechanics, op. cit. p. 17. Para um maior esclarecimento a respeito do experimento de Rayleigh e Jeans, e da descoberta de Planck, ver o apêndice 2.

¹⁶ Ferdinand Kurlbaum. (1857-1927).

¹⁷ Heinrich Leopold Rubens (1865-1922).

¹⁸ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p.19.

¹⁹ Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics** (1948), p. 31.

²⁰ James Clerk Maxwell (1831-1879).

Conta o filho de Planck que seu pai falou com ele a respeito de suas novas idéias, durante uma longa caminhada pelo Grunewald, um bosque nos subúrbios de Berlim. Nesta caminhada ele explicou que sentia ter talvez feito uma descoberta de primeira grandeza, comparável somente às de Isaac Newton. Assim, Planck deve ter, nesse tempo, compreendido que sua fórmula vinha abalar os fundamentos de nossa descrição da natureza, e de que estes fundamentos um dia iriam começar a se mover da sua locação tradicional presente na direção de uma nova e ainda não conhecida posição de estabilidade. Planck, que era um conservador na sua maneira de ver as coisas, não gostou nada dessas conseqüências, mas mesmo assim, publicou sua hipótese quântica em dezembro de 1900²¹.

Em 1905 Einstein operou um importante desenvolvimento conceitual que levou a uma generalização da concepção de quanta, ao estender a hipótese da presença do quanta de ação a outros fenômenos que não estavam imediatamente ligados à radiação térmica²². Einstein reviveu a hipótese de Planck para explicar o efeito fotoelétrico²³ (a emissão de elétrons a partir de metais sob a influência da luz)²⁴. O experimento mostrava que a energia dos elétrons emitidos não dependia da intensidade da luz, mas apenas da sua cor, em outras palavras, da sua frequência²⁵. Einstein sugeriu que a radiação se comportava como se fosse composta de um número finito de quantas $h\nu$ de energia, ou “fótons”, como eles vieram a ser chamados posteriormente²⁶. A idéia da distribuição descontínua da energia radiante no espaço, de uma estrutura granular da radiação, era bastante diferente da teoria eletromagnética da luz e de seus bem estabelecidos e indiscutíveis resultados experimentais²⁷. A luz poderia, então, ser interpretada como constituída de ondas eletromagnéticas, como na teoria de Maxwell, ou como sendo constituída de *quanta* de luz, isto é, pacotes de energia se propagando pelo espaço a uma velocidade muito elevada. Não se sabia, assim, de que natureza era a luz.

Nos anos que se seguiram, a pesquisa continuou e a procura por um modelo mecânico, que explicasse o funcionamento dos quanta de luz, era um assunto bastante discutido. Esperava-se que a construção de um modelo fosse particularmente útil para a clarificação do real sentido da constante h de Planck²⁸. A questão que se colocava era a de se determinar que tipo de estrutura atômica

²¹ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p.19.

²² *Ibidem*, p. 20.

²³ Mais detalhes no apêndice 3.

²⁴ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 20.

²⁵ Ver a entrada “Frequência” no glossário.

²⁶ Isto é, $E = h\nu$, onde h é a, então nova, constante de Planck e ν é a frequência da luz

²⁷ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 30.

²⁸ *Ibidem*, p. 39.

poderia dar conta dos dados experimentais conhecidos, especialmente o da estabilidade apresentada pelos átomos do ponto de vista de suas propriedades químicas e físicas. O átomo tinha se tornado, desde o aparecimento do elétron²⁹, um composto de partículas e, a partir daí, toda representação da estrutura do átomo deveria ser capaz de explicar as propriedades conhecidas tendo como base uma teoria dos movimentos dos elétrons no interior dos átomos. De acordo com Chevalley, “é isto que abre o problema da constituição elétrica da matéria. A aparição deste problema “dessubstanciou” a química e a fez depender do comportamento de um número, e não mais da disposição de constituintes individuais³⁰.”

Dentre os modelos microscópicos baseados no conhecimento disponível acerca da estrutura do átomo, o modelo, então amplamente discutido, era o de J.J. Thomson, chamado de pudim de passas (“plum cake”)³¹. Neste modelo, proposto em 1904, o átomo era descrito como uma esfera positivamente carregada, de densidade uniforme, dentro da qual estava um grande número de elétrons. Em 1911, Ernst Rutherford³² criou um modelo atômico a partir de experimentos baseados na mecânica clássica, a saber, o bombardeamento de raios α em uma fina folha de ouro³³. Este modelo era semelhante a um sistema planetário. Nele, o átomo consistia de um núcleo positivamente carregado e de elétrons que, atraídos pela carga positiva do núcleo, circulavam em torno dele como planetas ao redor do Sol. A ligação química entre átomos de diferentes elementos era explicada como sendo uma interação entre os elétrons mais externos de átomos vizinhos e não tinha relação direta com o núcleo. O núcleo determinava o comportamento químico do átomo através da sua carga que, por sua vez, determinava o número de elétrons em um átomo neutro, isto é, de um átomo não carregado positiva ou negativamente. O modelo de Rutherford apresentava, contudo, alguns problemas. De acordo com as leis da mecânica de Newton, nenhum sistema planetário retornaria à sua condição inicial após a colisão com um outro sistema planetário como acontece com os

²⁹ O elétron foi descoberto por Sir Joseph John Thomson (1856-1940) em 1897, no laboratório Cavendish, na Universidade de Cambridge.

³⁰ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 42.

³¹ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 39. Há uma imagem do modelo de Thomson no apêndice 4.

³² Lord Ernest Rutherford of Nelson (1871 - 1937).

³³ Ver apêndice 5.

átomos quando interagem com outros³⁴. Além disso, esperar-se-ia que os elétrons emitissem radiação em todos os comprimentos de onda, mas era sabido, através dos estudos dos espectros de emissão, que quando os átomos emitem radiação, eles o fazem somente em certos comprimentos de onda, específicos de cada elemento, e não em todos os comprimentos de onda³⁵. E por fim, o modelo de Rutherford não explicava a característica mais fundamental do átomo, a saber, sua estabilidade: de acordo com a lei de Maxwell, qualquer partícula acelerada emite radiação, perdendo energia. Ao perder energia, o elétron cairia no centro do átomo, o que provocaria o seu colapso³⁶. “Ora, - afirma Chevalley - os átomos longe de desaparecerem voluntariamente, apresentam, ao contrário, uma notável estabilidade de seu comportamento físico e químico³⁷”. A física clássica não dava conta, deste modo, da existência dos átomos e da estabilidade da matéria³⁸.

Em 1913, Bohr, percebendo que a estabilidade do átomo não poderia ser reconciliada com os princípios da mecânica newtoniana e da eletrodinâmica de Maxwell, criou um modelo atômico³⁹ que abriu o espaço no qual se formaria a mecânica quântica. Diante da evidência experimental do desvio dos raios α , Bohr tomou a decisão de conservar o modelo planetário de Rutherford⁴⁰: o átomo deveria ter um núcleo e os elétrons descreveriam seus movimentos sobre as órbitas. Estas órbitas, no entanto, eram diversas das de Rutherford: elas eram órbitas “estacionárias”. Bohr pensou que o fato, descoberto por Planck, de o átomo só poder trocar sua energia em quantas discretos deveria significar que ele só poderia existir em estados estacionários discretos, sendo o de energia mais baixa o estado em que ele geralmente é encontrado⁴¹. O átomo foi representado, então,

³⁴ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p.21.

³⁵ Ver apêndice 6.

³⁶ Ver apêndice 7.

³⁷ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 42.

³⁸ Ver Cushing, James T., **Philosophical Concepts in Physics**, p. 276 e Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 75.

³⁹ Ver apêndice 8.

⁴⁰ De acordo com Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 69, “O trabalho de Bohr era intimamente ligado ao problema de encontrar um modelo consistente do átomo. Mesmo as circunstâncias externas da sua vida estavam conectadas a isto. Quando Bohr deixou o laboratório de J. J. Thomson em Cambridge e foi se juntar à equipe de Rutherford em Manchester, em março de 1912, foi por causa do desacordo com Thomson no que dizia respeito ao seu modelo atômico do “pudim de passas”.”

⁴¹ Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics** (1948), p.22.

como um minúsculo sistema planetário, cuja massa estava quase toda concentrada em um núcleo central, consideravelmente menor do que o próprio átomo. Em torno desse núcleo giravam elétrons muito leves, equiparados aos planetas. Entretanto, enquanto as órbitas dos planetas eram determinadas por forças conhecidas e pela história passada do sistema – e estavam sujeitas a perturbações –, dizia-se que as órbitas dos elétrons requeriam postulados adicionais de um tipo especial, que não tinha nada a ver com a mecânica e a astronomia clássicas. Tais postulados ajudavam a explicar a singular estabilidade da matéria quando exposta a influências externas. Desde que Planck publicara seu famoso trabalho em 1900, esses postulados adicionais eram conhecidos como condições quânticas. (...) Certas grandezas calculáveis a partir de uma órbita, segundo se dizia, eram múltiplos inteiros de uma unidade fundamental, a saber, o *quantum* de ação de Planck⁴².

Os elétrons neste modelo atômico, ao receber ou ao emitir energia sob a forma de um “pacote” de luz ou um quantum de radiação, isto é, em múltiplos da constante de Planck ($h\nu$), saltavam de uma órbita à outra. Este salto era, evidentemente, descontínuo. Sua teoria era uma combinação de mecânica clássica para o movimento dos elétrons e condições quânticas. Arnold Sommerfeld⁴³ foi o responsável por dar uma formulação matemática consistente para estas condições⁴⁴. Este modelo explicava, além da estabilidade do átomo, a linha espectral emitida pelos átomos após serem excitados através de descarga elétrica ou calor. No caso de um único átomo de apenas um elétron como o de hidrogênio, era possível calcular, em perfeito acordo com os experimentos, as frequências da luz emitidas pelo átomo, mas, para átomos diferentes deste, o modelo não funcionava.

A idéia das órbitas “estacionárias” resolvia a questão da estabilidade mecânica: se os elétrons “saltavam” de uma órbita à outra eles eram indiferentes a colisões. Para respeitar a condição da estabilidade radioativa, Bohr fez a hipótese suplementar de que os elétrons em movimento sobre as órbitas não emitiam radiação, o que estava em franca contradição com os princípios da termodinâmica clássica. A hipótese de uma descontinuidade nos fenômenos atômicos deveria ser aplicada ao modelo de Rutherford, não para que a significação física do modelo fosse elucidada, mas para que a estabilidade do átomo pudesse ser explicada⁴⁵. O

⁴² Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 47.

⁴³ Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951).

⁴⁴ *Apud* Jammer: Sommerfeld, A. J. W., “Zur Theorie der Balmerischen Serie,” **Münchener Berichte** **1915**, pp.459-500; “Zur Quantentheorie der Spektrallinien,” **Annalen der Physik** **51**, 1-94, 125-167 (1916).

⁴⁵ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 75 e Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics** (1948), p.32.

modelo de Bohr consistia, assim, de um núcleo positivo circundado por diversas órbitas eletrônicas⁴⁶.

A representação da estrutura atômica que dá Bohr em 1913 não é, deste modo, nenhuma teoria nova, nem uma representação figurativa. É um agregado híbrido que liga os conceitos classicamente definidos por uma equação incompatível com as leis da física clássica⁴⁷. O átomo, por exemplo, parece assemelhar-se a um sistema planetário, mas é, no entanto, impossível crer que as leis unificadas anteriormente para o céu e a terra não foram aqui extrapoladas⁴⁸.

Bohr estava ciente das profundas brechas do esquema conceitual da sua teoria, mas estava convencido de que nenhum progresso na teoria quântica seria obtido a menos que se insistisse na questão de saber que relação a teoria quântica mantinha com a física clássica. Seu objetivo não era dar uma resposta satisfatória para uma questão definida, mas procurar pela formulação correta da questão⁴⁹. De fato, falar de “teoria” quântica naquele momento seria antecipar uma coerência ainda por vir, uma vez que o “quantum de ação” de Planck, os “quanta de luz” de Einstein e o modelo atômico de Bohr ainda não formavam um sistema conceitual ordenado e bem definido.

Contudo, - ressalta Chevalley -, uma dificuldade maior já aparecia claramente. Se a teoria quântica não era nem totalmente uma expressão, nem totalmente um repúdio ao eletromagnetismo e à mecânica [clássica], era preciso encontrar um meio de descrever esta relação estranha que definiria uma situação “sem precedentes” na história da física⁵⁰.

De acordo com Heisenberg,

o conceito de estado estacionário discreto (...) era o conceito central na sua teoria do átomo, e o objetivo dele foi deste modo descrito por Bohr: “Deve ficar claro que esta teoria não tem por objetivo explicar os fenômenos no sentido em que a palavra ‘explicar’ foi usada na física clássica. Ela tem por objetivo combinar os vários fenômenos que parecem não estar conectados e mostrar que eles estão conectados”⁵¹.

⁴⁶ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 77.

⁴⁷ A saber, $E' - E = h \nu$. Ver Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 43.

⁴⁸ *Ibidem*, p. 44.

⁴⁹ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 87.

⁵⁰ Ver Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 20.

⁵¹ Heisenberg, Werner, **Encounters With Einstein and Other Essays on People, Places, Particles**, p.20.

Bohr afirmava que apenas após esta conexão ser estabelecida poder-se-ia dar uma explicação no sentido em que as explicações eram usadas na física clássica. A relação da mecânica quântica com a física clássica veio a se evidenciar como uma relação de ruptura, como veremos a seguir e foi definida no período subsequente pelo termo “correspondência”.

Para elucidar a repercussão das investigações de Bohr, cabe-nos, primeiramente, situá-lo no cenário da física naquele momento. Cito Heisenberg:

A teoria quântica de Planck era, naqueles dias, não uma teoria, mas um estorvo. Ela trouxe idéias que levaram, em muitos pontos, dificuldades e contradições ao bem fundado edifício da física clássica, e, conseqüentemente, não havia muitas universidades onde houvesse algum desejo de lidar com esses problemas seriamente. Além de Copenhague, a teoria de Bohr foi primeiramente ensinada e desenvolvida em Munique por Sommerfeld, e foi apenas em 1920, com a escolha de Franck⁵² e Born, que a faculdade de Göttingen decidiu se juntar a este movimento científico. Se observarmos estes três centros onde se deu primeiramente o desenvolvimento subsequente da teoria, Copenhague, Munique e Göttingen, podemos relacioná-los a três linhas de pesquisa⁵³.

A escola de Munique tinha uma “linha fenomenológica e tentava unir as descobertas em uma forma inteligível e apresentar a sua conexão por meio de fórmulas matemáticas que pareciam em certa medida plausíveis do ponto de vista da física em vigor”, a escola matemática de Göttingen “se esforçava por representar os processos naturais por meio de um formalismo matemático cuidadosamente trabalhado”, e o grupo de Copenhague, tinha, sob a direção de Bohr, um tendência predominantemente filosófica que tentava, “acima de tudo, clarificar os conceitos com os quais os eventos na natureza seriam em última instância descritos”. As transições entre estas três escolas eram, contudo, naturalmente fluidas.

De acordo com Chevalley,

pode-se distinguir dois períodos na evolução da ruptura com a física clássica. A dificuldade está primeiramente em se encontrar o momento desta ruptura. Quando teriam os conceitos destas teorias se tornado inaplicáveis e contraditórios com os

⁵² James Franck (1882-1964).

⁵³ Heisenberg, Werner, “The Beginnings of Quantum Mechanics in Göttingen” (1975), **Encounters With Einstein and Other Essays on People, Places, Particles**, p. 38. É preciso ressaltar que seguimos neste capítulo de muito perto a descrição histórica apresentada por Heisenberg, isto é, sua versão dos fatos. Não podemos pretender estar fazendo uma descrição “objetiva” da história, posto que isto não seria coerente com o pensamento do próprio Heisenberg.

dados experimentais? De 1913 a 1924 é, antes de tudo, um problema de cartografia o que preocupa Bohr e este período é dominado pela clarificação daquilo que será chamado, a partir de 1920, “princípio de correspondência”. Em seguida, uma vez obtidos todos os resultados que se sucedem entre 1925 e 1927, a dificuldade se torna aquela de compreender *como* se articula a ligação entre as teorias clássicas e a nova mecânica quântica⁵⁴.

No período que se segue à teoria de 1913, a idéia de correspondência tem por função traduzir, de maneira cada vez mais precisa, a necessidade de esclarecer as dificuldades da teoria quântica ao se determinar o que realmente a ela diz respeito, de modo que “até 1925, a maior parte, senão a totalidade das publicações saídas do Instituto de Copenhague é chamada de ‘considerações de correspondência’⁵⁵”. O “princípio de correspondência”, é, segundo Chevalley,

ao mesmo tempo um princípio de orientação, uma ‘política conceitual’, um instrumento de cálculo e uma maneira de regular, a cada momento, a evolução das relações de uma teoria quântica ainda incerta de seus fundamentos com as teorias clássicas da mecânica e da eletrodinâmica. O manuseio da ‘correspondência’ é, na prática, reservado a Bohr: somente Hendrik Kramers⁵⁶ e Heisenberg se arriscaram [a utilizá-lo] com sucesso. L. de Broglie, que lhe deu uma das melhores descrições contemporâneas, falou dele como um ‘princípio muito curioso’, que ‘desempenhou um papel considerável e muito benéfico na evolução da teoria quântica’⁵⁷. Esta fecundidade se deve em grande parte à flexibilidade da idéia de ‘correspondência’ e às ‘analogias formais’ que ela permite desenvolver graças à determinação de constrangimentos mínimos⁵⁸.

A noção de correspondência parece vaga e não é por acaso: a física quântica se encontrava em uma situação paradoxal com a física clássica, a de uma ruptura com a mecânica e a eletrodinâmica que não era uma refutação. Era difícil, naquele tempo, pensar na sua autonomia pois, se por um lado a teoria quântica apresentava um rompimento claro com as idéias da eletrodinâmica clássica com a introdução de descontinuidades nas leis da natureza, por outro, a descrição dos processos naturais deveria ser fundada sobre as idéias introduzidas e definidas pela teoria clássica. A função do princípio de correspondência era, deste modo, primeiramente, encontrar, de uma maneira ou de outra, uma relação com os resultados das teorias clássicas. Em segundo lugar, tentar determinar se seria possível representar os princípios da teoria quântica de modo que a sua aplicação

⁵⁴ Ver Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 37.

⁵⁵ *Ibidem*, p. 39.

⁵⁶ Hendrik Anthony Kramers (1894-1952).

⁵⁷ De Broglie, Louis, **La Physique Nouvelle et les Quanta**, Paris, Flammarion, 1937, p. 127.

⁵⁸ Chevalley, Catherine, “Glossaire”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 414.

fosse livre de contradições. Esperava-se, assim, encontrar, a longo prazo, uma “generalização racional” da situação. Como nenhuma explicação parecia ao alcance, era preciso organizar o maior número possível de hipóteses disponíveis sem se fixar precipitadamente na manutenção ou rejeição dos conceitos clássicos, e a correspondência permitia isso a Bohr. É por isso que

cada etapa da história da antiga teoria quântica terá, (...) do ponto de vista de Bohr, uma nova formulação da questão da sua relação com as teorias clássicas. Isto explica o trabalho obstinado de análise e de multiplicação dos conceitos que Bohr fornece durante os dez anos posteriores⁵⁹.

O princípio de correspondência era, assim, uma

maneira flexível e sem ilusões de dizer que qualquer coisa das relações fundamentais da física clássica parece transferível aos fenômenos quânticos, mas que a unidade sintética que existia na origem entre a definição dos conceitos e o aparelho formal utilizado foi deslocada, distanciada, transformada: a harmonia, perdida⁶⁰.

No início da década de 1920, a teoria quântica foi sendo elaborada e clarificada, mas seus paradoxos não desapareceram:

As dificuldades e as contradições internas que barravam o acesso a uma compreensão dos átomos e de sua estabilidade não foram eliminados e nem sequer reduzidas, ao contrário, tornaram-se ainda mais agudas. Todas as tentativas de superá-las usando os instrumentos conceituais da física antiga pareciam de antemão condenadas ao fracasso⁶¹.

De qualquer modo, a teoria de Bohr permitiu que dados experimentais da espectroscopia coletados por décadas e muitos experimentos da química pudessem ser utilizados no estudo do estranho movimento dos elétrons nos átomos. Foi, segundo Heisenberg, realmente a partir daí que os físicos aprenderam a colocar as questões corretas⁶², quase todas concernentes aos resultados contraditórios dos experimentos:

Mas quais eram essas questões? Praticamente todas tinham a ver com as estranhas contradições que pareciam persistir entre resultados de diferentes experiências.

⁵⁹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 45.

⁶⁰ *Ibidem*, p. 47.

⁶¹ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p.73.

⁶² Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 23.

Afinal, 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? (...) A tentativa de descrever os fenômenos atômicos dentro dos conceitos da física tradicional, conduzia a contradições⁶³.

Cito Jammer:

Uma decisão entre as duas teorias sobre a natureza da radiação competidoras não poderia ser forçada. Para a interpretação dos processos ópticos que envolviam a interação entre luz e matéria, a visão quântica corpuscular parecia indispensável, ao passo que fenômenos como a interferência e a difração pareciam requerer o aparato conceitual da teoria ondulatória da luz. Este estado de coisas foi bem caracterizado por Sir William Bragg quando ele disse estarem os físicos usando, Segundas, Quartas e Sextas, a teoria clássica, e Terças, Quintas e Sextas, a teoria quântica da radiação⁶⁴.

Em 1924, foi elaborada a teoria que, para Heisenberg, “contribuiu mais do que qualquer outro trabalho naquele tempo para a clarificação da situação na teoria quântica⁶⁵”, a teoria “BKS⁶⁶”, descrita por ele como

a primeira tentativa séria de resolver os paradoxos da radiação em uma física racional. (...) Eles, [Bohr, Kramers e Slater], afirmaram, - continua Heisenberg -, primeiramente, que a propagação ondulatória da luz de um lado, e sua absorção e emissão em quanta de outro, são fatos experimentais que deveriam ser a base de qualquer tentativa de clarificação. (...) Eles então introduziram a hipótese de que as ondas tinham a natureza de ondas de probabilidade: de que elas representam não a realidade no sentido clássico, mas antes a “possibilidade” de uma tal realidade. A hipótese era de que as ondas definiam a probabilidade de que, em cada ponto, um átomo que estivesse lá presente emitisse ou absorvesse um quanta ($h\nu$) de luz. Esta idéia levou à conclusão de que as leis da conservação da energia⁶⁷ e momento⁶⁸ não deveriam ser verdadeiras para um evento singular, mas apenas para uma média estatística. Ainda que esta conclusão estivesse incorreta (as conexões entre os aspectos ondulatório e corpuscular da radiação eram ainda mais complicadas), a tentativa de interpretação feita por Bohr, Kramers e Slater⁶⁹ continha características

⁶³ *Ibidem*, p.54.

⁶⁴ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 165.

⁶⁵ Werner Heisenberg, “Die Entwicklung der Quantentheorie 1918-1928” (1929), **Gesammelte Werke/Collected Works**, multiple vols., ed. W. Blum et al., Berlin, Springer-Verlag, and Munich, Piper-Verlag, 1985, volume B, 109-115, *Apud* Cassidy, David C., **Uncertainty: The Life and Work of Werner Heisenberg**, p. 174.

⁶⁶ O programa da teoria BKS foi publicado por Bohr, Kramers e Slater, em um artigo intitulado “The Quantum Theory of Radiation”, **Philosophical Magazine**, 47 (January 1924), 785-802, “Über die Quantentheorie der Strahlung, **Zeitschrift für Physik** 24, 69-87 (1924). (Niels Bohr, **Collected Works**, vols 5., 101-118, ed. Léon Rosenfeld et al; English version in B. L. van der Waerden, ed. e trad., **Sources of Quantum Mechanics**, pp.159, New York, Dover, 1967; Kramers, **Nature**, 133 (25 March 1924), 673-676.

⁶⁷ Ver a entrada “Lei da conservação de energia” no glossário.

⁶⁸ Ver a entrada “Momento” no glossário.

⁶⁹ John Clarke Slater (1908-1976).

importantes da interpretação posterior correta. A mais importante delas foi a introdução da probabilidade como um novo tipo de realidade física “objetiva”⁷⁰.

Embora em 1924 a dualidade da radiação fosse, como dissemos, uma contradição, a pretensão de Bohr com a teoria “BKS” não era resolver esta dualidade em proveito exclusivo de uma imagem contínua. A procura era antes por uma analogia formal que permitisse compreender, ao mesmo tempo, o aspecto descontínuo das transições e o aspecto contínuo da eletrodinâmica clássica. De acordo com Chevalley⁷¹, a teoria “BKS” respeitava as orientações do princípio de correspondência, a saber: a colocação à prova dos conceitos ordinários para determinar o alcance e o domínio de validade de cada um dos princípios fundamentais da física clássica, a técnica de evidenciação das contradições destinada a isolar o que deve concernir propriamente à teoria quântica e a multiplicação de conceitos e de perspectivas: “O campo virtual e a idéia de uma conservação apenas estatística são empregados em 1924 como os instrumentos de medida do território da física quântica⁷²”. No entanto, por causa deste aspecto tático que caracteriza o princípio de correspondência desde seu início, as ondas virtuais foram, naquele tempo (como vimos acima), a causa do abandono da causalidade estrita, isto é, do princípio de conservação estrita da energia e da impulsão nas trocas individuais. Cito Chevalley:

Por meio dos conceitos que servem em física clássica para determinar uma “realidade” física, podemos citar, em uma enumeração não ordenada, a localização espaço-temporal do objeto, a conservação de sua energia, a continuidade de sua evolução e a independência de seu comportamento no que diz respeito à observação. A mecânica quântica não deixará intacto nada além do princípio de conservação. Mas, em 1924, Bohr vai considerar a localização e conciliar continuidade e descontinuidade. A conservação da energia é menos fundamental a seus olhos do que a continuidade da radiação. (...) O malogro da teoria “BKS”, em convergência com outras dificuldades conduziu, em seguida, não ao abandono da noção de correspondência, mas ao deslocamento da questão da relação com os conceitos clássicos em uma direção próxima daquela na qual Pauli e Born já estavam engajados em 1923. Se não é a conservação de energia que está em questão, são as “imagens intuitivas espaço-temporais”⁷³.

⁷⁰ Heisenberg, Werner, “The development of the interpretation of the Quantum Theory” (1955), in **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 12-13.

⁷¹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 56.

⁷² *Ibidem*, p. 54-55.

⁷³ *Ibidem* p. 55.

Ainda em 1924 um outro importante passo foi dado por Louis de Broglie, que introduziu a hipótese de que a matéria (por exemplo um elétron) poderia ser descrita em termos de partícula e de onda, isto é, estendeu à matéria o dualismo onda-partícula que parecia impedir uma explicação racional para o fenômeno da luz⁷⁴, afirmando que partículas, quando sob determinadas condições, se comportam como ondas de matéria. Nas palavras de Heisenberg:

Ele mostrou que uma certa onda de matéria poderia “corresponder” a um elétron em movimento, assim como uma onda de luz corresponde a um quanta de luz em movimento. Não era claro, naquele tempo, o que a palavra “corresponder” significava nesta conexão. Mas de Broglie sugeriu que a condição quântica na teoria de Bohr deveria ser interpretada como uma colocação sobre as ondas de matéria. Uma onda que circula ao redor de um núcleo pode apenas ser, por razões geométricas, uma onda estacionária; e o perímetro da órbita deve ser um múltiplo inteiro do comprimento de onda. Desta forma, a idéia de de Broglie conectou a condição quântica, que sempre havia sido um elemento estranho na mecânica dos elétrons, ao dualismo entre ondas e partículas⁷⁵.

Observa-se, ao fim de 1924, a aproximação de uma virada decisiva do ponto de vista de Bohr. Já no início de 1925, Bohr estava convencido de um “malogro essencial das imagens espaço-temporais”, em outros termos, do fato de que não se pode representar os processos atômicos nos termos da geometria ordinária. Parecia evidente que o que estava em questão era, realmente, a relação entre as representações dos objetos e, conseqüentemente, o problema da univocidade do discurso da física. Bohr sugere, em 1925, que é preciso “se preparar para a idéia (...) de uma revolução *radical nos conceitos*”, revolução esta que se dá pelo confronto e “não por uma modificação das teorias eletrodinâmicas e mecânicas descritíveis nos termos dos conceitos das físicas ordinárias, ou seja, por uma *insuficiência essencial das representações espaço-temporais*”⁷⁶. Segundo Chevalley:

No início de 1925, Bohr renuncia a todas as imagens utilizadas na antiga teoria quântica: órbitas eletrônicas dos estados estacionários, quanta de luz corpuscular e campo virtual, trajetórias dos elétrons. Levando em conta a prudência extrema de que é testemunha a manutenção do princípio de correspondência deste período, é preciso ressaltar a que ponto o abandono das teorias clássicas foi progressivo. A

⁷⁴ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 88.

⁷⁵ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 25. Ver também Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics**, p. 32.

⁷⁶ Bohr, Niels, Addendum, In **Bohr Collected Works 5**, ed. L. Rosenfeld, J. Rud Nielsen, seguido de E. Rüdinger, seguido de F. Aaserud, Amsterdam, North-Holland Publishing Company e New York, American Elsevier Publishing Company, 1972-...

ruptura é considerada por Bohr como inevitável desde 1913, mas não é senão a partir de 1918 que ele abandona gradualmente a mecânica na explicação das interações entre elétrons. Ele resiste em 1923 à crítica radical das imagens mecânicas colocada a ele por Pauli. E somente a convergência entre o malogro da teoria dos osciladores virtuais e dos impasses que se multiplicam na questão dos átomos lhe convencem da impossibilidade das representações espaço-temporais ordinárias⁷⁷.

A renúncia a um modo de explicação causal e espaço temporal foi, assim, uma decisão teórica necessária, e foi levada a cabo no início de 1925. No entanto, a contradição entre os conceitos clássicos e os postulados quânticos não desapareceu, tornando-se mesmo insuportável⁷⁸.

Não é um exagero descrever este período como o de um tempo de suspense no que diz respeito à constituição do objeto físico. O solo falta e mesmo a direção onde olhar. “Nós estamos completamente desorientados”, “nós estivemos por vezes próximos do desespero”, escreve Bohr⁷⁹.

O momento é assim relatado por Heisenberg:

Quando rememoro o estado da teoria atômica naqueles meses, sempre me lembro de uma caminhada da montanha com alguns amigos (...). No vale, o tempo estava ruim e as montanhas, envoltas em nuvens. Durante a subida, a neblina começara a se adensar em torno de nós e, passado algum tempo, vimo-nos numa confusa mistura de pedras e vegetação rasteira, sem nenhum sinal da trilha. Decidimos continuar subindo, embora nos sentíssemos bastante inquietos quanto à decida, se alguma coisa desse errado. De repente, a cerração tornou-se tão densa que nos perdemos de vista; só conseguíamos manter contato uns com os outros aos gritos. Ao mesmo tempo, a parte mais alta foi ficando mais límpida, e subitamente a luz mudou de cor. Era óbvio que estávamos envoltos em uma nuvem de neblina em movimento. Depois, num relance, pudemos ver a borda da face de um penhasco, bem à nossa frente, banhada pela brilhante luz do Sol. A névoa tornou a se adensar no momento seguinte, mas tínhamos visto o suficiente para reconhecer nossa localização pelo mapa. Após mais uns dez minutos de árdua subida, estávamos de pé sob o Sol, centímetros acima do mar e da neblina. Ao sul, podíamos ver os picos da cordilheira de Sonnewend e, mais além, os topos cobertos de neve dos Alpes Centrais. Não tivemos nenhuma dúvida no restante da nossa subida. Também na física atômica, o inverno de 1924-25 nos levava a um terreno em que a neblina era densa. Mas um

⁷⁷ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 62.

⁷⁸ *Ibidem*, p. 61.

⁷⁹ Carta de Bohr a C. W. Ossen em 29 de janeiro de 1926 (In **Bohr Collected Works 5**, 405/238, ed. L. Rosenfeld, J. Rud Nielsen, seguido de E. Rüdinger, seguido de F. Aaserud, Amsterdam, North-Holland Publishing Company e New York, American Elsevier Publishing Company, 1972-...) e Carta de Bohr a Rosseland em 6 de janeiro de 1926 (In **Bohr Collected Works 5**, 485/484, ed. L. Rosenfeld, J. Rud Nielsen, seguido de E. Rüdinger, seguido de F. Aaserud, Amsterdam, North-Holland Publishing Company e New York, American Elsevier Publishing Company, 1972-...)

pouco de luz começara a se infiltrar, trazendo a promessa de paisagens novas e excitantes⁸⁰.

Para Heisenberg, a formulação matematicamente precisa⁸¹ da mecânica quântica foi o resultado de dois diferentes desenvolvimentos: o primeiro deles derivado do princípio de correspondência de Bohr (1923), em 1925, e o segundo da idéia de de Broglie das ondas materiais (1924), em 1926⁸². Heisenberg foi o responsável pelo primeiro desenvolvimento: ele propôs em julho de 1925 uma “reinterpretação” das relações da cinemática e da dinâmica, se baseando apenas no que chamou de “grandezas observáveis⁸³”. Se Heisenberg, como também o fez Bohr, qualifica sua teoria como derivada do princípio de correspondência é porque nela ele “faz, com efeito, a síntese de tendências que estavam em concorrência desde 1923-24, de um lado aquela de perseguir as analogias com as teorias clássicas, de outro lado aquela da redefinição dos conceitos fundamentais⁸⁴”. De fato, eles viam, na mecânica matricial, uma possibilidade de superação das contradições existentes entre os postulados quânticos e os princípios da física clássica, e a restrição às “grandezas observáveis” que Heisenberg põe em obra para chegar a um esquema matemático novo e que significava uma restrição crucial na teoria⁸⁵ é o meio de tal superação. Em alguns meses, a idéia de Heisenberg foi elaborada por Max Born, Pascual Jordan⁸⁶ e pelo próprio Heisenberg, dando origem ao que veio a ser conhecido como a mecânica matricial⁸⁷. A teoria era, em resumo,

Um cálculo matemático, envolvendo quantidades não comutativas e regras computacionais raramente antes encontradas, que resistia a qualquer interpretação pictorial; era uma proposta algébrica que, a partir do caráter discreto observado de linhas espectrais, enfatizava o elemento da descontinuidade (foi chamada de uma “verdadeira teoria do descontínuo” por Born e Jordan⁸⁸); apesar da sua renúncia a

⁸⁰ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 74.

⁸¹ Devemos ressaltar que o que nos interessa aqui não é exatamente o desenvolvimento matemático da mecânica quântica. Concentramo-nos, neste primeiro capítulo, na descrição físico-conceitual da mecânica, isto é, a preocupação é tentar analisar de que modo os conceitos da física moderna que diferem dos da física clássica implicam em transformações filosóficas.

⁸² Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 26-27.

⁸³ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), *op. cit.* p. 75.

⁸⁴ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 61-62.

⁸⁵ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p.76.

⁸⁶ Ernst Pascual Jordan (1902-1980).

⁸⁷ Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 21.

⁸⁸ M. Born e P. Jordan, “Zur Quantenmechanik,” **Zeitschrift für Physik** 34, 879.

uma descrição clássica no espaço e no tempo, ela era, em última instância, uma teoria cuja concepção básica era a de corpúsculo⁸⁹.

No entanto, a mecânica matricial de Heisenberg, não era senão uma solução incompleta das dificuldades e não podia pretender, ao fim de 1925, substituir inteiramente a física clássica no domínio atômico⁹⁰. Durante os seis primeiros meses de 1926, Schrödinger, a partir da idéia fundamental de de Broglie, fez um progresso imenso ao inventar a chamada mecânica ondulatória, que conduziu à formulação da “equação de Schrödinger”. Sua orientação era, contudo, completamente diferente daquela adotada por Heisenberg, Born e Jordan: “Schrödinger, que não pertence à tradição dos espectroscopistas, parte, com efeito, da analogia entre óptica e mecânica perseguida por Einstein e de Broglie⁹¹”. Cito Heisenberg:

Schrödinger levou essa idéia [de de Broglie] mais longe e, com uma nova equação de ondas formulou a lei que rege a propagação das ondas materiais sob a influência de um campo eletromagnético. Segundo esse modelo, os estados estacionários de uma camada atômica são comparados com as 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 estacionárias⁹².

A teoria de Schrödinger fornecia um método matematicamente consistente e conveniente para a solução de uma grande variedade de problemas e não poderia haver dúvidas de que ela representava um enorme avanço em relação à teoria anterior (com a exceção de poucos casos, ela era uma teoria mais fácil de ser empregada que a mecânica matricial, uma vez que os físicos estavam bastante habituados ao tipo de matemática nela contido)⁹³. 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 física quântica⁹⁴”. Sua intenção era obter uma representação contínua e “intuitiva” dos fenômenos atômicos e, sobretudo, desembaraçar a física dos conceitos descontínuos, isto é, estados estacionários e saltos quânticos.

⁸⁹ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 271.

⁹⁰ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 62.

⁹¹ *Ibidem*, p. 62-63.

⁹² Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p.88.

⁹³ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 281.

⁹⁴ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p.88.

Descobriu-se, logo em seguida, que, apesar das disparidades de suas assunções básicas, aparato matemático e teor geral⁹⁵, o cálculo matricial de Heisenberg e a função de onda de Schrödinger eram matematicamente equivalentes.

Em 1926, o formalismo matemático da mecânica quântica atingiu sua compleição⁹⁶. No entanto, não estava claro em que sentido o novo formalismo matemático descrevia a estrutura atômica.⁹⁷ O que havia no meio do ano de 1926 eram duas teorias quânticas que, embora diferentes em tudo (ponto de partida, concepção, método, matemática), levavam aos mesmos resultados. Ainda que ambas se afastassem da mecânica clássica, elas caminhavam em direções opostas, a do contínuo e a do descontínuo. Isto era, tanto para Schrödinger, como para Heisenberg, o que mais as diferenciava⁹⁸.

Schrödinger foi o primeiro, como se disse, a atribuir uma interpretação à mecânica quântica a partir do seu próprio formalismo, isto é, da sua função de onda. Sua interpretação era bastante intuitiva: era causal, contínua e visualizável. Ele pensava a teoria quântica como uma teoria clássica de ondas simples, considerava sua função de onda análoga a uma onda clássica. De fato, Schrödinger acreditava ser a realidade física constituída de ondas e somente de ondas. Ele negava categoricamente a existência de níveis discretos de energia e de saltos quânticos (claramente demonstrados, por exemplo, na resolução de Planck para a experiência do corpo negro e na de Einstein para o efeito fotoelétrico)⁹⁹. “Permanecer na descontinuidade conduziria, claramente, para Schrödinger, a um desmoronamento cognitivo¹⁰⁰”. Cito Heisenberg:

A interpretação física do esquema matemático trouxe-nos graves problemas. Schrödinger acreditava que, associando partículas e onda materiais, havia descoberto um meio de eliminar os obstáculos que por tanto tempo vinham dificultando a compreensão da teoria quântica. Segundo ele, as ondas materiais

⁹⁵ *Ibidem*, p. 271: “É difícil encontrar, na história da física, duas teorias feitas para cobrir a mesma área de experiência que sejam diferentes entre si de modo mais radical que essas duas.”

⁹⁶ Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 22.

⁹⁷ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 28; Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 24.

⁹⁸ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 64.

⁹⁹ Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 27 e 29; Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 88-89. Para Schrödinger, o conceito de energia era derivado da experiência macroscópica e deveria, na física quântica, ser substituído pelo de frequência.

¹⁰⁰ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 62.

eram plenamente comparáveis a processos que se desenvolviam no espaço e no tempo, como as ondas eletromagnéticas ou as 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 libertação. Ao longo dos anos, as conversas que eu tivera com Niels Bohr, Wolfgang Pauli e outros tinham-me convencido de que era impossível construir um modelo descritivo espaço-temporal dos processos atômicos – o elemento descontínuo que (...) [era] um traço característico dos fenômenos atômicos não permitia que se fizesse isso. Tratava-se, é claro, de uma característica negativa. 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 espaço¹⁰¹.

Embora seu tratamento às questões quânticas fosse, de acordo com Jammer¹⁰², mais elegante e superior ao da mecânica matricial, a explicação física de seu formalismo e, em particular, sua interpretação da função de onda não foram tão bem sucedidos. A insuficiência de sua interpretação se explicitou quando, em sua ida a Copenhague¹⁰³, em setembro de 1926, Schrödinger teve que enfrentar uma série de problemas¹⁰⁴, dentre eles um concernente à dimensionalidade do espaço de configuração de Ψ : não se tratava de processos ocorridos no espaço tridimensional ordinário, mas de um espaço de configuração abstrato¹⁰⁵. A

¹⁰¹ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p.88-89.

¹⁰² Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 281.

¹⁰³ Schrödinger havia sido convidado por Sommerfeld para falar sobre sua mecânica ondulatória em um seminário em Munique, no qual também estava presente Heisenberg. Sua interpretação para o formalismo da mecânica ondulatória estava sendo favoravelmente aceita pela maior parte dos participantes do seminário e as objeções feitas por Heisenberg foram vistas como pedantes. Heisenberg escreveu, então, uma carta a Bohr, que decidiu convidar Schrödinger para os visitar em Copenhague por uma ou duas semanas para discutir o assunto. (Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 56.) Cito Heisenberg, “Schrödinger pôde, nas longas discussões acerca dos fundamentos da teoria quântica que duravam vários dias, apresentar uma convincente imagem das novas e simples idéias de mecânica ondulatória, enquanto Bohr explicava a ele que nem mesmo a lei de Planck poderia ser compreendida sem os saltos quânticos. “Se vamos ficar presos a estes malditos saltos quânticos eu me arrependo de tudo que eu fiz que tenha a ver com a teoria quântica,” Schrödinger finalmente exclamou em desespero, a que Bohr respondeu: “Mas o resto de nós está muito agradecido por você ter feito isso porque você contribuiu em muito para a clarificação da teoria quântica.” Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory”, in **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 14.

¹⁰⁴ Ver Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 31-33, também Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 283.

¹⁰⁵ Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory”, in **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 13; Schrödinger estava ciente desta característica, ver Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 267: “Foi repetidamente ressaltado o fato de que a função ψ por si mesma não pode e não deve ser interpretada, de uma maneira geral, diretamente em termos de um espaço tridimensional – embora o problema com apenas um elétron pareça sugerir tal interpretação – porque ela é, em geral uma função num espaço de configuração e não em um espaço real.” (Schrödinger, Erwin, “Quantisierung als Eigenwertproblem,” **Annalen der Physik** **79**, 361-376 (4th communication; 1926), p. 135; **Collected Papers on Wave Mechanics**, Traduzido da Segunda edição alemã de

interpretação de Schrödinger não convenceu Bohr e Heisenberg, mas a sua ida a Copenhague evidenciou a necessidade de uma clarificação da relação entre sua concepção da mecânica quântica e os dados experimentais de que se dispunha¹⁰⁶.

Ainda em 1926, Max Born teve a intuição de que a função de onda deveria ser interpretada em termos de probabilidades. Para Einstein, a noção de probabilidade era, mesmo quando utilizada por ele próprio, concebida tradicionalmente de acordo com os parâmetros da física clássica, isto é, como sendo uma objetivação da deficiência humana com relação a um conhecimento completo ou exato, mas que era, em última instância, uma criação da mente humana¹⁰⁷. Contudo, para Born, a probabilidade, pelo menos quando ligada à função ψ , não era meramente uma ficção matemática, mas algo dotado de uma realidade física, uma vez que ela evoluía no tempo e se propagava no espaço de acordo com a equação de Schrödinger. Para Heisenberg, esta realidade física não era, no entanto, a mesma encontrada na mecânica clássica, mas um mesmo “tipo intermediário de realidade” de que ele falara a propósito da teoria de Bohr, Kramers e Slater¹⁰⁸. As leis na natureza, daqui em diante, não eram mais determinadas pela ocorrência de um evento, mas pela probabilidade da ocorrência. A interpretação probabilística de Born da função ψ afirma, em resumo, que ela mede a densidade de probabilidade de se encontrar uma partícula dentro de certos limites, sendo a partícula concebida no sentido clássico, isto é, como um ponto de massa que possui, a cada instante, posição e momento definidos¹⁰⁹. A idéia é que

Abhandlungen por J.F. Shearer e W.M. Deans (Blackie & Son, London, Glasgow, 1928). In Jammer, Max, **The Conceptual development of Quantum Mechanics**, p. 267.

¹⁰⁶ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 30.

¹⁰⁷ A probabilidade passou a ter um papel muito importante na interpretação de Copenhague, o que significava conceder ao acaso um papel fundamental nas leis da natureza, para o descontentamento de Schrödinger e Einstein. Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 286: “Para Einstein, a noção de probabilidade, mesmo quando a ele utilizou na conciliação da sua hipótese do quanta de luz com a teoria das ondas eletromagnéticas de Maxwell, era a concepção tradicional da física clássica, uma objetivação da deficiência humana de um conhecimento completo ou exato, mas que era, em última instância, uma criação da mente humana.”

¹⁰⁸ *Ibidem*, p. 286. “Para Born, a probabilidade, quando relacionada à função de onda, não era meramente uma ficção matemática, mas algo dotado de uma realidade física, uma vez que evoluía no tempo e se propagava no espaço de acordo com a equação de Schrödinger. Ela diferia, no entanto, dos agentes físicos tradicionais em um aspecto fundamental: ela não transmitia energia ou momento. Uma vez que na física clássica, seja ela a mecânica de Newton ou a eletrodinâmica de Maxwell, apenas o que transmite energia ou momento (ou ambos) pode ser considerado como algo fisicamente “real”, o estatuto ontológico de ψ tinha que ser considerado como algo intermediário. Ela tinha (...) precisamente o mesmo “tipo intermediário de realidade” que, como enfatizou Heisenberg, se mostrava no trabalho de Bohr, Kramers e Slater em 1924.”

¹⁰⁹ *Ibidem*, p. 42-43.

quando em um experimento é medida, por exemplo, a posição de um elétron, a probabilidade de encontrá-lo em uma região determinada depende da magnitude da função de onda nessa região. A interpretação de Born se mostrou, todavia, insuficiente para explicar os fenômenos de difração, tais como a difração de elétrons que aparece, por exemplo, no famoso *experimento das duas fendas*¹¹⁰, experimento que, segundo Richard Feynman¹¹¹, está no “coração da mecânica quântica”¹¹².

Nos meses que se seguiram à visita de Schrödinger a Copenhague, lá se iniciou um estudo intensivo de todas as questões sobre a interpretação da teoria quântica que haviam sido discutidas¹¹³, estudo que, para Heisenberg, levou

a uma clarificação completa e, como muitos físicos acreditam, satisfatória da situação. Mas, não era uma solução que se pudesse aceitar facilmente. Eu me lembro de discussões com Bohr que duravam muitas horas, até tarde da noite, e que terminavam quase em desespero; e quando, ao fim de uma discussão saí sozinho para uma caminhada pelo parque vizinho, fiquei repetindo a mim mesmo a mesma pergunta: pode a Natureza ser tão absurda como tem nos parecido nesses experimentos atômicos¹¹⁴?

Ainda de acordo com Heisenberg¹¹⁵,

a solução final foi abordada de duas maneiras. Uma foi uma reviravolta da questão. Ao invés de perguntar: como se pode, no esquema matemático conhecido, demonstrar uma dada situação experimental?, uma outra pergunta seria feita: é verdade que talvez ocorram na Natureza apenas as situações experimentais que podem ser demonstradas pelo formalismo matemático? A hipótese de que isto fosse realmente verdade levou a limitações no uso daqueles conceitos que tinham sido a base da física clássica desde Newton¹¹⁶.

Reconhecendo tal impasse e reconhecendo também que seria impossível construir um aparato conceitual independente que proporcionasse uma descrição intuitiva dos fenômenos quânticos, Heisenberg, durante a ausência de Bohr, que partira para uma viagem¹¹⁷, se concentrou em tentar compreender a observação da trajetória de um elétron numa câmara de nuvem, o fenômeno aparentemente mais

¹¹⁰ *Ibidem*, p. 43.

¹¹¹ Feynman, Richard, **The Feynman Lectures on Physics**, vol. III., p. 1-1 a 1-3.

¹¹² Ver apêndice 9.

¹¹³ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 30.

¹¹⁴ *Ibidem*, p. 30.

¹¹⁵ *Ibidem*, p. 30.

¹¹⁶ Ver também Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 325.

¹¹⁷ Mais precisamente em fevereiro de 1927. Ver Jammer, Max, **The Philosophy of Quantum Mechanics**, p. 57.

simples de que se poderia partir. Na mecânica matricial, o conceito de órbita (trajetória) de um elétron não é imediatamente definido, enquanto que na mecânica ondulatória qualquer pacote de onda se dispersaria rapidamente em seu movimento por uma extensão incompatível com as dimensões laterais de uma trajetória possível¹¹⁸. Nas palavras de Heisenberg,

conceitos como trajetórias ou órbitas não existiam na mecânica quântica, e a mecânica ondulatória só poderia harmonizar-se com a existência de um feixe de matéria densamente compacto se o feixe se propagasse por áreas muito maiores que o diâmetro de um elétron. Ora, a situação experimental apresentava-se de outra maneira¹¹⁹.

Em outras palavras, embora o conceito de trajetória não existisse na mecânica quântica, parecia ser possível observar a trajetória de um elétron na câmara de Wilson. Qual seria a ligação entre o esquema matemático, por demais bem sucedido para ser abandonado, e os dados que não se adequavam? Ponderando acerca desta dificuldade e se valendo do pressuposto de que é a teoria que decide o que devemos observar, Heisenberg concluiu que o que se via na câmara de nuvem não era realmente uma trajetória, mas muito menos que isso: “uma série de pontos distintos e mal definidos, pelos quais o elétron havia passado. Na verdade, tudo que víamos na câmara de nuvem eram gotículas de água isoladas, elas mesmas muito maiores que um elétron”. Daí ele inferiu que as perguntas corretas a serem feitas não seriam a respeito de qual seria a órbita ou trajetória do elétron, mas sim a respeito da possibilidade de a mecânica quântica poder “representar o fato de que um elétron se encontra aproximadamente (ou seja, com uma certa imprecisão) num determinado lugar e se move rapidamente (de novo, com uma certa imprecisão) com determinada velocidade¹²⁰”. O conceito de órbita eletrônica deveria ser eliminado. É baseado nisto que ele desenvolve suas relação de incerteza¹²¹. Heisenberg não viu outra saída que não a de conservar as noções intuitivas da mecânica clássica através de uma limitação da sua aplicabilidade. Cito novamente Heisenberg:

Podia-se falar de posição e de velocidade de um elétron da mesma maneira que na mecânica newtoniana e podia-se observar e medir estas grandezas. Não era possível,

¹¹⁸ *Ibidem*, p. 56.

¹¹⁹ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 95-96 .

¹²⁰ *Ibidem*, p. 95 e 96

¹²¹ Ver a entrada “Princípio de incerteza” no glossário e também o apêndice 10.

no entanto, fixar ambas as grandezas simultaneamente com um alto grau de precisão arbitrariamente. De fato, o produto destas duas imprecisões mostrou não ser menor que a constante de Planck dividida pela massa da partícula. Relações similares puderam ser formuladas para outras situações experimentais. Elas são usualmente chamadas relações de incerteza ou princípio de indeterminação. Aprendeu-se, assim, que os velhos conceitos se adequam à natureza apenas de modo inexato¹²².

Ainda segundo Heisenberg,

todos os conceitos que são usados na teoria clássica para a descrição de um sistema mecânico também podem ser definidos com exatidão para os processos atômicos. No entanto, os experimentos que levam a tais definições carregam consigo uma incerteza se eles envolvem a determinação simultânea de duas quantidades canonicamente conjugadas¹²³.

As relações de incerteza podem ser compreendidas, de acordo com Cushing, como uma formulação quantitativa do problema de que, na mecânica quântica, existe um limite inerente à precisão do poder de observação¹²⁴. Elas são, por assim dizer, o reconhecimento da interação inevitável entre o objeto e o aparato medidor¹²⁵.

A outra maneira de abordar o problema foi, segundo Heisenberg, o princípio de complementaridade de Bohr¹²⁶:

Era central em seu pensamento o conceito de complementaridade, que ele acabara de introduzir para descrever uma 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 da sua justaposição que o conteúdo perceptivo de um fenômeno revela-se em sua plenitude¹²⁷.

Schrödinger havia descrito o átomo não como um sistema composto de um núcleo e elétrons, mas sim de um núcleo e ondas de matéria. Esta descrição das ondas de matéria continha, certamente, um elemento de verdade. Bohr, por sua vez, considerou as duas descrições – a de partícula e a de onda - como duas descrições complementares da mesma realidade. Qualquer uma destas descrições pode ser

¹²² Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 30.

¹²³ Heisenberg, Werner, **Archive for the History of Quantum Physics**, interview on Feb. 11, 1963, p. 179. In Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 329.

¹²⁴ Cushing, James T., **Philosophical Concepts in Physics**, p. 298; Ver também Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 329.

¹²⁵ Jammer, Max, **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, p. 330. Voltaremos a esta questão no capítulo 2.

¹²⁶ Cabe notar, como faz Chevalley, que, ao contrário do que frequentemente foi dito, as relações de incerteza de Heisenberg não constituem a base do raciocínio de Bohr no que diz respeito à complementaridade. Ainda que elas tenham um papel importante na versão final do artigo sobre a complementaridade, fornecendo um critério rigoroso para a necessidade da renúncia à causalidade no domínio onde não se pode negligenciar a intervenção da constante de Planck, a base do pensamento acerca da complementaridade começa a se formar na ocasião da conversa com Schrödinger.

¹²⁷ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 97.

apenas parcialmente verdadeira, deve haver limitações para o uso do conceito de partícula como para o de onda, pois, de outro modo, não seria possível evitar as contradições. Se levarmos em conta essas limitações que podem ser expressas pelo princípio de incerteza, as contradições desaparecerão¹²⁸.

É preciso dizer que Bohr afirma, já em 1926, a existência de uma relação explícita entre o pressuposto da “univocidade” do discurso que é característico da física clássica, e a origem das contradições que eram então observadas. A univocidade do discurso repousa, para Bohr, sobre a não-ambigüidade da definição das palavras, não-ambigüidade esta que se baseia, por sua vez, sobre a continuidade das representações espaço-temporais dos fenômenos (como dissemos Bohr estava, desde o início de 1925, convencido de um “malogro essencial das imagens espaço-temporais”) e sobre a fixidez da separação entre o que é fenômeno e aquele que observa o fenômeno. O objeto da física clássica estava, deste modo, construído sobre a conjunção de todas estas condições.

Os processos atômicos lá escapavam. Os conceitos clássicos se tornavam então ambíguos e era preciso redefinir o próprio termo do fenômeno. Ao fim deste caminho, Bohr encontra a questão sob a sua forma epistemológica: como falar de objeto em física quântica se não temos senão uma totalidade de manifestações fenomenais únicas – irreversíveis – em que todas as descrições por meio dos conceitos clássicos – os únicos disponíveis – levam a contradições¹²⁹?

Assim, se podemos utilizar tanto o conceito de onda, como o conceito de corpúsculo, se há aí uma “ambigüidade”, é por causa da natureza do domínio de objetos aos quais eles se referem.

Nos processos atômicos, não se pode mais pressupor a continuidade dos fenômenos. Ora, todo emprego unívoco (não ambíguo) de um conceito exige a continuidade das representações espaço-temporais. Conseqüentemente, o emprego dos conceitos ondulatórios e corpusculares é um emprego equívoco e não ambíguo; logo as teorias de Heisenberg e Schrödinger são teorias de correspondência¹³⁰.

Em 1927-28, Bohr chega à conclusão de que para evitar esta contradição é necessário então renunciar à univocidade e admitir uma “ambigüidade” essencial dos conceitos clássicos no domínio quântico.

¹²⁸ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 31.

¹²⁹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: **Niels Bohr, Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p.37.

¹³⁰ *Ibidem*, p.68.

A objetividade não pode mais receber a mesma definição que na física clássica e a noção de complementaridade tem a tarefa de exprimir esta situação dizendo como continua a ser possível se utilizar dos conceitos clássicos sem equívoco nem contradição na descrição dos fenômenos atômicos¹³¹.

Assim, é entre 1927 e 1929 que Bohr propõe as principais orientações filosóficas que serviram de referência constante à reflexão ulterior de Heisenberg. Podemos distinguir, ainda de acordo com Chevalley¹³², três grupos de enunciados nestas orientações que, apesar de aparentemente simples, são o resultado dos 15 anos de dificuldades anteriores que descrevemos neste capítulo.

O primeiro grupo concerne à descrição da situação que se apresenta na mecânica quântica, a de que “todos os processos atômicos possuem um caráter de descontinuidade, ou antes, de individualidade, completamente estranho às teorias clássicas e caracterizado pelo quantum de ação de Planck¹³³”. Este postulado implica em uma modificação fundamental na definição de observação, na medida em que o ato de observar é, na mecânica quântica, acompanhado de uma interação finita e incontrolável do sistema observado com o instrumento de observação. É a natureza distinta do ato de observação que funda, para Bohr, a especificidade da teoria quântica, e também a idéia de que existem escalas de fenômenos e regiões de experiência que se diferenciam segundo o tipo de percepção que temos¹³⁴.

O segundo grupo de enunciados consiste em derivar desta situação três problemas da teoria do conhecimento. O primeiro é que mecânica quântica obriga a renunciar à idéia de uma descrição dos fenômenos “simultaneamente espaço-temporal e causal”, o que tem por conseqüência a transformação da definição de objetivação. O segundo é que o domínio de aplicabilidade dos conceitos clássicos deve ser limitado, ao mesmo tempo que continua a ser utilizado na leitura dos resultados das experiências. A física quântica questiona, como dissemos, o problema da “univocidade dos conceitos” e conseqüentemente da univocidade da linguagem ordinária à qual a linguagem das teorias clássicas está estreitamente

¹³¹ *Ibidem*, p.21.

¹³² Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.40-45.

¹³³ Bohr, Niels, “The Quantum Postulate and The Recent Development os Atomic Theory”, In: **Atti del Congresso Internazionali de Fisici, Como, 1927**, Bologne, N. Zanichelli, 1928. In Chevalley, Catherine, “Introduction” , In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.40: “Trata-se do artigo fundador da posição comum a Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Jordan e Dirac no momento do V Congresso Solvay”.

¹³⁴ Chevalley, Catherine, “Introduction” , In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.41.

ligada. E em terceiro lugar, a física quântica requer que se introduza, necessariamente, na própria definição de um fenômeno, a especificação das condições de observação. Cai por terra “a pressuposição tácita segundo a qual o conhecimento depende, bem no fundo, de uma divisão fixa entre sujeito e objeto. Em outras palavras, a física quântica requer, ou supõe, uma nova concepção de linguagem e uma nova caracterização do sujeito¹³⁵”.

O terceiro grupo de enunciados diz respeito às conseqüências destas transformações, isto é, à situação geral do conhecimento¹³⁶. Cito Chevalley:

Em 1929, (...) Bohr fala de um abalo “dos fundamentos do edifício conceitual que forma a armadura da representação clássica da física, e mesmo de todo o nosso modo habitual de pensar”. (...) Do ponto de vista da física o que aparece é “um aspecto novo do problema da objetividade dos fenômenos”: determinação espaço-temporal e princípio de causalidade (...) não podem mais ser reunidos em uma mesma descrição homogênea, a descrição adquire um caráter estritamente estatístico (que não é apenas uma causalidade enfraquecida pelas circunstâncias, moléculas demais a contar, etc.) e existe uma “lei quântica geral” que é usada como o marco de referência para a passagem do clássico ao quântico (as relações de indeterminação de Heisenberg)¹³⁷.

Assim, os fenômenos não correspondem mais a uma essência do objeto de modo não especificado: eles representam um “todo de regularidades estatísticas¹³⁸”, que nos aparece dependendo do procedimento de observação utilizado e que caracteriza nossa interação com a natureza. Esta característica leva à impossibilidade de se estabelecer uma “separação definitiva entre sujeito e objeto¹³⁹”, o que tem por conseqüência que “todos os conceitos, ou ainda mais, todas as palavras, não têm mais do que um sentido relativo, dependente da escolha arbitrária do nosso ponto de vista¹⁴⁰”, que não é universal. Bohr refere-se ao modo de descrição característico das ciências exatas que elimina tudo o que concerne às condições de observação do resultado obtido. Em outras palavras, o mito galileano da física como sendo a “leitura do livro da natureza” parece não mais se sustentar a partir do momento em que a física torna necessária a introdução do observador como parte do fenômeno descrito, o que se dá com a relatividade e, como vimos,

¹³⁵ *Ibidem*, p.42.

¹³⁶ *Ibidem*, p.42.

¹³⁷ *Ibidem*, p.42-43.

¹³⁸ Bohr, Niels, “Wirkungsquantum und Naturbeschreibung”, **Die Naturwissenschaften** 17 (1929), p. 483-486., *Apud* Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.43.

¹³⁹ *Ibidem*.

¹⁴⁰ *Ibidem*.

de maneira ainda mais radical, com a física quântica. Não é possível, deste modo, creditar à ciência da natureza o monopólio da descrição do real¹⁴¹.

¹⁴¹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.45.

3

A crítica à modernidade

No primeiro capítulo, voltamos nossa atenção para uma breve descrição dos problemas da história da mecânica quântica que julgamos mais relevantes, bem como para a posição filosófica tomada por Bohr diante destes problemas. A tarefa que nos é colocada, agora, é a de mostrar como estas questões tomam forma na obra filosófica de Heisenberg.

A preocupação em fazer, juntamente à descrição histórica da teoria quântica, um breve quadro da filosofia de Bohr se deve ao fato de que esta foi, como dissemos, de fundamental importância para a carreira e o pensamento de Heisenberg – como ele próprio pontuou em diversas passagens de seus escritos. A profunda inadequação da teoria quântica à resolução de problemas experimentais se patenteava quando Heisenberg entrou na Faculdade de Física Teórica da Universidade de Munique¹, em 1920. Lá foi muito bem recebido pelo seu “diretor e um dos mais brilhantes professores”, Arnold Sommerfeld, como relata Heisenberg:

Após ter estudado alguns livros populares eu comecei a me interessar pelo ramo da ciência que tratava dos átomos e queria formar uma opinião acerca das colocações peculiares que estavam sendo feitas a respeito de espaço e tempo na teoria da relatividade. Desta forma eu vim a assistir as aulas daquele que veio a ser meu professor, Sommerfeld, que demonstrava bastante seu interesse e de quem eu aprendi (...) como uma nova e profunda compreensão dos átomos havia se desenvolvido como resultado das pesquisas de Röntgen, Planck, Rutherford, e Bohr. Eu vim a saber que o dinamarquês, Niels Bohr, e o inglês Lord Rutherford, imaginaram ser o átomo um sistema planetário em miniatura e parecia que todas as propriedades químicas dos elementos iriam, no futuro, ser preditas com a ajuda da teoria de Bohr, pelo uso das órbitas planetárias dos elétrons. Naquele tempo, no entanto, isto ainda não havia sido alcançado. Este último ponto me interessava mais e cada novo trabalho de Bohr era discutido no seminário de Munique com vigor e paixão².

O primeiro encontro entre Heisenberg e Bohr se deu em 1922, quando Heisenberg foi, a convite de Sommerfeld, assistir a uma série de palestras feitas

¹ . Lá Heisenberg conheceu, ainda, o então estudante Wolfgang Pauli – que “pelo resto da vida, enquanto viveu, foi um bom amigo, embora muitas vezes um crítico severo” – e com ele estabeleceu um diálogo que era, de acordo com seu relato, a parte mais importante dos seus estudos nos seminários de Sommerfeld.

² Heisenberg, Werner, “Science as a Means of International Understanding” (1946), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 110.

por Bohr em Göttingen. As primeiras impressões sobre o físico dinamarquês foram por Heisenberg assim descritas:

Bohr falava com suavidade, com um leve sotaque dinamarquês. Ao explicar cada um dos pressupostos de sua teoria, escolhia as palavras com muito cuidado, muito mais do que Sommerfeld costumava fazer. E cada uma de suas frases, cuidadosamente formuladas, revelava uma longa cadeia de pensamentos subjacentes e reflexões filosóficas insinuadas, mas nunca expressas em sua totalidade. Achei essa abordagem muito instigante; o que ele dizia parecia-me, ao mesmo tempo, novo e não muito novo. Todos havíamos aprendido com Sommerfeld a teoria de Bohr e sabíamos a que ela se referia. Mas tudo soou muito diferente, vindo da boca do próprio Bohr. Pudemos sentir claramente que ele havia chegado a seus resultados, não tanto mediante cálculos e demonstrações, mas por intuição e inspiração, e que achava extremamente difícil justificar suas descobertas pela famosa escola de matemáticos de Göttingen³.

Como observa Chevalley, “Heisenberg será profundamente impressionado, em 1922, por este modo de proceder, não habitual a alguém que vinha da escola fenomenológica e matemática de Sommerfeld⁴”. Às palestras de Bohr se seguiam longos debates; e, ao fim da terceira, o próprio Heisenberg fez uma observação crítica. Bohr, percebendo o interesse de Heisenberg pela teoria quântica, convidou-o para uma caminhada naquela mesma tarde. “Essa caminhada teve repercussões profundas em meu desenvolvimento científico posterior. Talvez seja mais correto dizer que minha carreira científica começou naquela tarde⁵”, rememora Heisenberg. Ainda nas suas palavras:

Eu compreendi que (...) a sua percepção a respeito da estrutura da teoria não era resultado de uma análise matemática das pressuposições básicas, mas antes uma intensa ocupação com os fenômenos atuais, uma vez que era possível para ele perceber a relação intuitivamente mais do que derivá-la formalmente. Assim, eu compreendi: o conhecimento da natureza era primeiramente obtido desta forma, e apenas no próximo passo podia-se fixar o conhecimento em uma forma matemática e sujeitá-lo a uma análise racional completa. Bohr era, antes de tudo, um filósofo, não um físico, mas ele entendia que a filosofia natural em nosso tempo tinha peso apenas se pudesse ser sujeita, em todos os seus detalhes, ao inexorável teste experimental⁶.

Para Chevalley, Heisenberg aprendeu, junto a Bohr, a “filosofar” em dois sentidos distintos:

³ *Ibidem*, p. 51.

⁴ Chevalley, Catherine, Introdução a Bohr Niels, **Physique Atomique et Connaissance Humaine**, p. 35.

⁵ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo**, p. 51.

⁶ Heisenberg, Werner, “Quantum Theory and It’s Interpretation”, In: **Niels Bohr: his Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues**, p. 95.

Ele aprendeu (...) em primeiro lugar, uma certa maneira de fazer a física, pela oscilação entre a experiência e a reflexão sobre os limites da validade dos conceitos fundamentais. Como ele dirá a T.S. Kuhn em 1962, “(...) É bastante fácil falar das experiências; aqui você tem um raio espectral, você tem tal intensidade; o problema é encontrar as conexões, como a relação da dispersão está ligada à posição do raio etc. Eu percebi realmente pela primeira vez esta nova forma da física teórica quando da minha primeira conversa com Bohr”⁷.

Em segundo lugar, ainda de acordo com Chevalley, esta exigência de ter sempre juntos o empírico e o conceitual é perseguida por Heisenberg já a partir de 1925, com a tomada da convicção da

... necessidade de uma reflexão rigorosamente filosófica – e não apenas de uma filosofia natural (...). Esta necessidade de uma reflexão filosófica é (...) realizada pelo desejo de compreender e de fazer compreender a física quântica, pelo desejo de perseguir a física tanto quanto a própria filosofia. Nem Bohr, nem Heisenberg, nem Pauli jamais reivindicaram uma posição profissional de filósofos, mas permanece [entre eles] a convicção de que é necessário fazer "a verdadeira filosofia" enraizada na idéia de que é preciso criar uma nova linguagem, o que os conduz a definir um projeto que não é o decalque de nenhuma tradição anterior e que, no entanto, está situado em uma relação clara a esta tradição⁸.

Cabe-nos, portanto, tentar tornar mais explícita esta relação com a tradição a que Chevalley se refere. Nos escritos de Heisenberg são duas as referências filosóficas maiores. A primeira delas é a referência ao desenvolvimento da filosofia moderna (“ou mais precisamente, da reflexão filosófica que se inicia, para Heisenberg, com os ‘Tempos Modernos’⁹”). A outra é a referência à filosofia grega, que está presente desde bem cedo e toma progressivamente uma amplitude cada vez maior nos escritos ditos “gerais” de Heisenberg. A referência à filosofia grega, que é a questão central deste estudo, será examinada no terceiro capítulo. É metodologicamente mais interessante para este trabalho nos concentrarmos, por enquanto, na referência à modernidade.

Como se dá então, nos textos de Heisenberg, a referência à filosofia moderna? Quais são seus pontos principais? Como dissemos, a referência à modernidade – uma das questões centrais do pensamento de Heisenberg – tem suas raízes no projeto filosófico de Bohr, cuja diretriz central é “compreender e clarificar o acabamento da filosofia moderna de que o nascimento da mecânica

⁷ Chevalley, Catherine, Introdução a Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 45.

⁸ *Ibidem*, p. 46.

⁹ *Ibidem*, p. 29: “sendo os tempos modernos inaugurados por três eventos invisivelmente associados que são a descoberta de Colombo, o debate de Lutero e Zwingli e a formulação da doutrina de Copérnico.”

quântica, dentre outros desenvolvimentos do pensar, é testemunha¹⁰”. As diretrizes deste projeto foram, afirma Chevalley¹¹, fixadas no já citado artigo de 1929, cujas características essenciais nos cabe retomar. A primeira delas é que a mecânica quântica inaugurava uma nova forma de objetividade, caracterizada pela “renúncia à unidade ‘clássica’ de uma descrição simultaneamente espaço-temporal e causal dos fenômenos, e pela característica estatística que dela era consequência¹²”. Esta renúncia tem por consequência um segundo ponto a que voltaremos mais tarde, aquele de

uma justaposição de duas linguagens, a linguagem dos conceitos ditos ordinários ou clássicos e a linguagem do formalismo matemático da teoria quântica, justaposição que remetia à diferença entre “regiões da experiência”. E enfim, o problema filosófico mais geral que se coloca é aquele de compreender o que se tornou a idéia filosófica tradicional de uma “divisão fixa e definitiva entre sujeito e objeto”¹³.

O que se apresenta é, doravante,

uma ruptura, não com as teorias físicas clássicas – mantidas nos seus respectivos domínios da experiência -, mas com as hipóteses filosóficas que haviam sido formuladas no momento do nascimento da física matemática no século XVII, e, conseqüentemente, com a filosofia moderna¹⁴.

Tentaremos expor adiante, de modo mais detalhado que no capítulo anterior, em que consiste esta especificidade da teoria quântica que leva Bohr e Heisenberg à conclusão da necessidade da crítica à Modernidade.

Como dissemos anteriormente, a mecânica quântica parte de uma modificação fundamental na definição de observação. É esta natureza distinta do ato de observação que funda, para Bohr, a especificidade da teoria quântica¹⁵.

Qualquer medição em física envolve a interferência do aparelho de medição no objeto a ser medido. Se, por exemplo, um raio de luz for lançado sobre o objeto, uma parte da luz refletida pelo objeto pode ser absorvida pelo aparelho de medição. Qualquer troca de energia desse tipo altera o estado do objeto: este, após ter sido medido, encontrar-se-á em uma condição diferente da anterior. Nesses termos, a medida proporciona o conhecimento acerca de um estado que acabou de

¹⁰ *Ibidem*, p. 52.

¹¹ *Ibidem*, p. 50.

¹² *Ibidem*, p. 50.

¹³ *Ibidem*, p. 51.

¹⁴ *Ibidem*, p. 51.

¹⁵ *Ibidem*, p.41.

ser destruído pelo processo de medição. A interferência do processo de medição no objeto medido pode ser ignorada quando se trata de objetos macroscópicos, o que já não é possível no caso de objetos atômicos, pois estes são fortemente influenciados, seguindo o exemplo, pela irradiação luminosa. Se quiséssemos prosseguir com a experiência de observar um elétron em um átomo, precisaríamos emitir ao menos um quantum de luz, o que faria com que ele saísse da posição em que supostamente estava. Se usássemos a terminologia ondulatória, não veríamos um pacote de ondas se movendo em torno do núcleo, mas sim ondas se afastando dele, uma vez que o primeiro quantum seria suficiente para afastar o elétron do átomo. A questão é resumida de modo claro por Dirac:

Os objetos pertencentes ao domínio atômico, os objetos ditos 'pequenos', são (...) definidos como aqueles cuja observação provoca uma interferência que não pode ser negligenciada, enquanto os objetos pertencentes ao domínio clássico, os objetos ditos 'grandes', se definem como aqueles cuja observação provoca uma interferência que pode ser desprezada¹⁶.

Assim, na mecânica quântica, os efeitos dos meios de observação no corpo observado não podem ser negligenciados. O ato de observar é em mecânica quântica acompanhado de uma interação finita e incontrolável do sistema observado com o instrumento de observação. Esta impossibilidade de conhecermos a natureza objetiva do fenômeno observado não se deve, no entanto, à incapacidade humana de construir um equipamento experimental adequado como, por exemplo, “um microscópio do futuro, idealmente perfeito, que pudesse efetivamente nos mostrar a imagem de uma molécula real¹⁷”. Ainda que seja fundamentalmente impossível observar, digamos, a órbita de um elétron em um átomo, “esta impossibilidade não se deve a nenhuma falha (ainda remediável) daquele postulado microscópio ideal, pretensamente tão perfeito como as leis naturais o permitissem ser, mas [é] antes uma consequência destas mesmas leis¹⁸”. É muito difícil obter um conceito visual de um átomo e “nós, neste ponto, evidentemente atingimos o limite das possibilidades de visualização¹⁹”. Conforme atesta Heisenberg, “estas limitações impostas à representação visual podem ser

¹⁶ Dirac, P.A.M. (1958) **The Principles of Quantum Mechanics**, 4th edition, Oxford University Press, Oxford, *apud* Cushing, James T., **Philosophical Concepts in Physics**, p. 297-298.

¹⁷ Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics** (1948), p. 18

¹⁸ *Ibidem*, p. 29.

¹⁹ *Ibidem*, p. 35.

formuladas com uma maior acuidade com a ajuda de uma relação chamada *princípio de incerteza*²⁰”.

Na física clássica, afirma Heisenberg,

a medição servia como o meio de se estabelecer estados objetivos dos acontecimentos que eram independentes da medição. Estes estados objetivos dos acontecimentos podiam ser matematicamente descritos e ter, por meio disso, sua conexão causal rigorosamente afirmada. Na teoria quântica a medição é, como na física anterior, em si mesma um estado objetivo dos acontecimentos; mas a interferência da medição no curso objetivo da ocorrência atômica a ser medida se torna problemática, uma vez que a medição interfere na ocorrência e não pode ser completamente separada da própria ocorrência²¹.

Vemos, deste modo, que na mecânica quântica o ideal de que o objeto experienciado não seja alterado pela observação é impraticável por definição porque a distinção entre o estado de um sistema e o instrumento de medida já não pode ser feita. Em outras palavras, é impossível separar o aparelho de medição do objeto a ser medido, o que implica, como veremos mais à frente, em mudanças no que diz respeito à imagem que se tem da natureza. Prossigo com Bohr, citado por Heisenberg:

A natureza nos ensina que a palavra "fenômeno" não pode ser aplicada aos processos atômicos, a menos que também especifiquemos o arranjo experimental e os instrumentos de observação que estão envolvidos. Quando se define um determinado arranjo experimental e dele decorre uma observação particular, é lícito falarmos de fenômeno, mas não de sua perturbação pela observação. E, embora os resultados das diferentes observações já não possam ser tão diretamente correlacionados entre si, quanto eram possíveis de o ser pela física clássica, isso, ainda assim, não significa que os fenômenos tenham sido perturbados pela observação: significa, simplesmente, que não podemos objetivar os resultados observacionais à maneira da física clássica ou da experiência cotidiana²².

Em qualquer experimento em física atômica, as questões são colocadas à natureza com a ajuda de aparatos experimentais mais ou menos complicados. Estas questões são necessariamente formuladas com o recurso aos conceitos comuns da física clássica, e, mais especificamente, com a utilização dos conceitos de espaço e de tempo, “pois nós certamente possuímos apenas uma forma de falar [que é]

²⁰ *Ibidem*, p. 35.

²¹ Heisenberg, Werner, “Planck’s Discovery and the Philosophical Problems of Atomic Theory” (1958), **Across the Frontiers**, p. 16.

²² Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 125.

adaptada aos objetos do nosso meio ambiente diário e capaz de descrever a estrutura dos aparatos de medição²³”.

A interpretação de Copenhague da teoria quântica parte de um paradoxo. Qualquer experimento em física, refira-se ele a fenômenos da vida cotidiana ou a eventos atômicos, deve ser descrito nos termos da física clássica. Os conceitos da física clássica formam a linguagem através da qual descrevemos o aparato de nossos experimentos e enunciamos os resultados. Não podemos, e nem devemos substituir estes conceitos por quaisquer outros. Ainda assim, a aplicação destes conceitos é limitada pelas relações de incerteza. Devemos ter em mente este alcance limitado da aplicabilidade dos conceitos clássicos enquanto os usamos, mas não podemos e não devemos tentar melhorá-los²⁴.

Embora a linguagem clássica tenha sido construída para o estabelecimento de processos objetivos no espaço e tempo²⁵, em mecânica quântica “as expressões matemáticas adequadas à representação da realidade experimental são funções de onda em espaços de configurações multidimensionais que não permitem nenhuma compreensão fácil e intuitiva²⁶”. De acordo com Heisenberg, se levanta, a partir de então, a necessidade da colocação de uma linha divisória. De um lado, o aparato que é usado como uma forma de apresentar a questão e que deve, conseqüentemente, ser tratado como “uma parte de nós mesmos²⁷”, do outro, os sistemas físicos que se deseja investigar.

Um sistema atômico individual pode ser representado por uma função de onda, como dissemos, ou, de acordo com a situação, por uma mistura estatística de tais funções, isto é, por um conjunto²⁸. Quando este sistema interage com o mundo externo, a única representação possível é a mistura estatística das funções, uma vez que nós não conhecemos em detalhes o sistema “mundo externo”.

Se o sistema é fechado podemos em algumas circunstâncias ter, pelo menos aproximadamente, um “caso puro”, e o sistema é então representado por um vetor no espaço de Hilbert. A representação é, neste caso particular, completamente “objetiva”, i.e. não contém características conectadas com o conhecimento do observador; mas ela é também completamente abstrata e incompreensível, uma vez que as várias expressões matemáticas $\psi(q)$, $\psi(p)$, etc., não se referem ao espaço real

²³ Heisenberg, Werner, “Recent Changes on the Foundations of Exact Science” (1934), In: **Philosophic Problems of nuclear Science**, p. 15.

²⁴ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 32.

²⁵ Heisenberg, Werner, “Questions of Principle in Modern Physics” (1935), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 49.

²⁶ *Ibidem*.

²⁷ *Ibidem*.

²⁸ *Ibidem*.

ou a uma propriedade real; ela, conseqüentemente, não contém, por assim dizer, nada de física. A representação se torna uma parte da descrição da Natureza apenas quando ligada à questão de como experimentos reais ou possíveis podem ter resultado²⁹.

Dito de outra forma, em mecânica quântica não é possível chegar a um resultado definido se o aparato de medição e o sistema atômico, tratados como um todo, são isolados do resto do mundo. Consoante Heisenberg, “é o caráter factual de um evento descritível em termos dos conceitos da vida diária, que não está automaticamente contido no formalismo da teoria quântica, que aparece na interpretação de Copenhague pela introdução do observador³⁰”. Esta introdução do observador não deve, todavia, ser compreendida como implicando em algum tipo de característica subjetiva que venha a ser trazida para a descrição da natureza.

O observador tem apenas a função de registrar decisões, i.e., processos no espaço e tempo, e não importa se o observador é um aparato ou um ser humano; mas o registro, i.e. a transição do possível para o atual, é absolutamente necessária aqui, e não pode ser omitida da interpretação da teoria quântica³¹.

A partir deste ponto a interação do sistema com o aparato de medição deve ser, sobremaneira, levada em consideração. Uma mistura estatística é neste momento utilizada para representar um sistema maior – composto do sistema atômico e do aparato de medição. Embora possa parecer que isto poderia ser evitado, em princípio, caso houvesse a possibilidade de separar completamente o sistema e o aparato de medição (considerados como um único sistema composto) do mundo externo, a conexão com o mundo externo é, como dissemos, uma das condições necessárias para o aparato de medição exercer a sua função. O comportamento do aparato deve poder ser registrado como algo atual, logo deve ser descrito em termos de conceitos simples:

O sistema composto do sistema [atômico] e do aparato de medição é então descrito matematicamente por uma mistura, e a descrição contém, por conseguinte, além das características objetivas, também colocações (...) a respeito do conhecimento do observador. Se o observador registra depois um certo comportamento do aparato de medição como atual, ele conseqüentemente altera a representação matemática de modo descontínuo, porque apenas uma dentre as várias possibilidades prova ser a real. A “redução dos pacotes de onda” descontínua, que não pode ser derivada a

²⁹ Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 26.

³⁰ *Ibidem*, p. 22.

³¹ *Ibidem*, p. 22.

equação de Schrödinger, é assim, (...) uma passagem do possível ao atual. É claro que é inteiramente justificado imaginar esta transição, do possível ao atual, movida para um ponto anterior no tempo, uma vez que o observador não produz a transição; mas ela não pode ser movida para um momento anterior quando o sistema composto estava ainda separado do mundo externo, porque uma tal hipótese não seria compatível com a validade da mecânica quântica para o sistema fechado³².

Para melhor compreender a citação acima é mister retomar alguns de seus pontos. A função de onda de Schrödinger é, como dissemos, uma expressão matemática em configurações de espaços multidimensionais: “Esta função, de acordo com a teoria, consiste em uma equação diferencial que determina qualquer estado futuro do presente estado da função³³”. Ela não representa um curso de eventos no correr do tempo, mas um conjunto de eventos possíveis³⁴, uma tendência para a ocorrência de eventos. Enquanto um experimento não é feito, como por exemplo a observação de um elétron, a função de onda deste elétron evolui segundo a equação de Schrödinger, uma evolução contínua e uniforme, na qual as funções podem descrever combinações de diferentes estados. Em outras palavras, a função de onda descreve o conjunto de probabilidades de valores (características) que o elétron possa vir a ter, ou seja, seus possíveis modos de ser, o que corresponde a uma superposição de estados, algo inobservável no mundo de que temos experiência direta³⁵. Sigamos a descrição de Heelan da teoria quântica de medição como explicada por Heisenberg:

Antes da interação de instrumento e objeto, (...) o objeto isolado é chamado de um caso *puro*, e o estado é representado no espaço abstrato de Hilbert por uma raio que é comumente tomado como uma função de onda $\Psi(x)$. A função de onda é essencialmente relacionada a um conjunto de processos de medição possíveis ou, como Heisenberg o expressa, ele representa a potencialidade a ser atualizada pelo processo de medição. Ele é um caso *puro*, e como tal denota algo individual com propriedades, algumas das quais são precisas e tem valores numéricos definidos, como massa em repouso, carga elétrica, etc., e outras são imprecisas, mas potencialmente precisas, uma vez que o valor preciso depende da escolha da subsequente execução de algum processo de medição. Estas propriedades potenciais ocorrem em pares conjugados. Elas são potenciais visto que valores exatos não

³² Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 27.

³³ Heisenberg, Werner, “Questions of Principle in Modern Physics” (1935), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 49.

³⁴ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 42.

³⁵ Para Schrödinger, isto era muito problemático, pois ele pensava que se objetos atômicos podiam ficar em estranhas superposições, os objetos macroscópicos também deveriam ficar nestas estranhas configurações, uma vez que são feitos de átomos. Em função disso ele descreveu o famoso experimento mental no qual um dispositivo mata um gato caso um átomo radiativo se desintegre. Ao entrar em uma superposição dos estados "não desintegrado" e "desintegrado", o átomo radiativo produziria um gato que estaria ao mesmo tempo vivo e morto.

podem ser simultaneamente atribuídos a ambos os membros de um par de variáveis conjugadas e, no caso geral, nenhum valor preciso deve ser atribuído a nenhum dos membros do par. Eles são também potenciais no que diz respeito ao formalismo matemático, dado que o valor é obtido apenas pela transformação matemática do caso puro original – no qual vários valores são potenciais – em um novo caso puro que é auto-estado de um valor preciso. (...) As únicas predições feitas pela teoria são estatísticas, e conseqüentemente, o caso puro é, de uma certa forma, incompleto e impreciso. O caso puro também descreve um conjunto estatístico de casos concretos, cada um caracterizado pela mesma função de onda³⁶.

Desta maneira, a função de onda não nos permite prever, entre os resultados possíveis, qual será observado ou produzido no experimento. O ato da observação desencadeia uma mudança na função de onda chamada de colapso e o observador passa a ver o elétron em um estado clássico. O elétron tem, a partir de então, uma característica definida, logo, a parte da função de onda que corresponde ao que está sendo observado permanece³⁷. “Uma vez que, através da observação, nosso conhecimento do sistema mudou descontinuamente, sua representação matemática também sofre uma mudança descontínua, e fala-se, então, de um ‘salto quântico’³⁸”. A mudança do nosso conhecimento no instante do registro tem, por assim dizer, a sua imagem na mudança descontínua da função de probabilidade³⁹. Isto não significa, contudo, que tenhamos, ao fazer a medição, mudado o objeto observado como se ele já estivesse lá, porque, de acordo com Heisenberg, não podemos dizer que ele realmente estivesse em algum lugar antes da medição. É como se, com as probabilidades determinadas pela função de onda, a natureza escolhesse um estado ao acaso. E ela o faz apenas diante da presença do observador, responsável pela atualização da potência.

Ainda segundo Heisenberg, “o conceito de função de probabilidade não permite uma descrição do que acontece entre duas observações⁴⁰”.

É, certamente, tentador dizer que o elétron deve ter estado em algum lugar, no intervalo de tempo entre essas duas observações, e que, portanto, o elétron deveria

³⁶ Heelan, Patrick A., **Quantum Mechanics and Objectivity, A Study of the Physical Philosophy of Werner Heisenberg**, p. 71-73.

³⁷ O problema da indeterminação do colapso é o maior problema de uma interpretação como a de Schrödinger. Esta indeterminação não pode ser descrita pela equação de Schrödinger e tampouco por qualquer outra equação determinista. Este é o aspecto descontínuo da teoria quântica. Não é possível prever qual das possibilidades realmente vai se atualizar a cada vez e é necessário que um experimento seja efetuado um grande número de vezes para que haja uma previsão, por sua vez, também em termos de probabilidade.

³⁸ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 42.

³⁹ *Ibidem*, p. 43.

⁴⁰ *Ibidem*, p. 40.

ter descrito algum tipo de trajetória ou órbita, mesmo que seja impossível saber-lhe qual. Esse seria um argumento razoável em física clássica. Em teoria quântica, porém, teria sido um abuso de linguagem que (...) não poderia ser justificado.

Como podemos perceber, um sistema separado do mundo exterior é potencial, mas não atual, já que ele não pode ser descrito em termos dos conceitos clássicos. “Podemos dizer que o estado do sistema fechado representado pelo vetor de Hilbert é, certamente, objetivo, mas não real, e que a idéia clássica de coisas objetivamente reais deve aqui, nesta medida, ser abandonada⁴¹”. Esta caracterização de um sistema pelo seu vetor de Hilbert é, conforme afirma Heisenberg, “complementar à sua descrição nos termos dos conceitos clássicos⁴²”, isto é, as duas descrições são mutuamente excludentes, mas ambas igualmente necessárias para a compreensão da totalidade do experimento. De fato Bohr advoga, de acordo com Heisenberg, o conceito de “complementaridade” em muitas partes da interpretação da teoria quântica:

O conhecimento que obtemos a respeito da posição de uma partícula é complementar ao conhecimento da sua velocidade ou momento. Se soubermos um deles com grande exatidão não podemos saber o outro com grande exatidão; ainda assim, precisamos saber ambos para determinar o comportamento do sistema. A descrição espaço-temporal dos eventos atômicos é complementar à sua descrição determinista. A função de probabilidade obedece a uma equação de movimento da mesma forma que as coordenadas faziam na mecânica newtoniana; sua mudança ao longo do tempo é completamente determinada pela equação da mecânica quântica, mas ela não permite uma descrição no espaço e tempo. A observação, por outro lado, obriga a uma descrição no espaço e tempo, mas rompe com a continuidade determinada da função de probabilidade ao mudar nosso conhecimento do sistema⁴³.

“O conhecimento do ‘atual’ é, deste modo, do ponto de vista da mecânica quântica, sempre um conhecimento incompleto pela sua própria natureza. Pela mesma razão, o caráter estatístico das leis da física microscópica não pode ser evitado⁴⁴”.

As conexões físicas podem, como afirma Heisenberg, ser formuladas de modo não ambíguo em ambos os lados da linha divisora: é somente *na* linha divisora que as leis da mecânica quântica assumem seu caráter estatístico. Esta possibilidade de interconexões estatísticas é criada apenas no que concerne ao efeito do aparato medidor no sistema a ser medido, como uma perturbação

⁴¹ Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 22.

⁴² *Ibidem*, p. 22.

⁴³ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 37.

⁴⁴ Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 27-28.

incontrolável em princípio. “Conseqüentemente, o único lugar para um suplemento determinista à mecânica quântica seria esta linha divisora⁴⁵”.

Como pudemos notar, esta perturbação incontrolável em princípio é importante de várias maneiras. Na medida em que é impossível conhecer o objeto em sua totalidade, esta perturbação é, primeiramente, a razão da existência das leis estatísticas na mecânica quântica. Em segundo lugar, ela impõe um limite na aplicação de conceitos clássicos necessários para uma descrição inteligível da natureza, visto que estes conceitos têm sua exatidão limitada, de saída, pelas chamadas relações de incerteza ou indeterminação de Heisenberg. Em outras palavras, as relações de incerteza são uma “lei quântica geral” que é usada como referência para a passagem do clássico ao quântico⁴⁶. Ela permite que se coloquem juntos, nesta linha divisória, os domínios das leis clássicas e da teoria quântica. Como dissemos anteriormente, ainda que os conceitos clássicos continuem a ser utilizados na leitura dos resultados das experiências, a determinação espaço-temporal e o princípio de causalidade não podem mais ser reunidos em uma mesma descrição homogênea. Rigorosamente falando, não há mais um objeto, mas um conjunto de regularidades estatísticas que nos aparece de acordo com o meio de observação utilizado, meio este que caracteriza nossa interação com a natureza. É esta a impossibilidade de se estabelecer a separação definitiva entre sujeito e objeto a que nos referimos anteriormente. A mecânica quântica inaugura uma nova forma de objetividade; e a justaposição da linguagem dos conceitos clássicos à linguagem do formalismo da teoria quântica remete à noção de regiões ou níveis de realidade⁴⁷.

Mas por que estas especificidades da teoria quântica têm por implicação um rompimento com a filosofia moderna? Primeiramente,:

O fato de considerar a divisão sujeito-objeto como uma hipótese essencialmente problemática equivale a romper com o que estava identificado correntemente como

⁴⁵ Heisenberg, Werner, “Questions of Principle in Modern Physics” (1935), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 49.

⁴⁶ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.42.

⁴⁷ Muito embora se trate de uma das questões mais ricas e instigantes do pensamento filosófico de Heisenberg, entregar-se a esse assunto, nesta dissertação, é tarefa que muito nos afastaria de nossos objetivos atuais e ulteriores.

a posição característica da metafísica moderna desde Descartes, do cogito ao sujeito transcendental e para além⁴⁸.

Em realidade, consoante Heisenberg:

O grande desenvolvimento da ciência natural a partir dos séculos XVI e XVII foi precedido e acompanhado por um desenvolvimento de idéias filosóficas que estavam conectadas de um modo muito próximo aos conceitos fundamentais da ciência. (...) O primeiro grande filósofo deste novo período da ciência foi René Descartes⁴⁹.

Mas o que define, para Heisenberg, os tempos modernos? É interessante apontar aqui que nos escritos não técnicos de Heisenberg encontramos, além da física, a presença de outros três grandes domínios: o da história das religiões, da literatura alemã e o da música. Cito Chevalley:

Formado no protestantismo, Heisenberg não é cristão e avalia ser o cristianismo, hoje em dia, sem sentido, com a exceção de algumas de suas prescrições éticas⁵⁰; mas ele avalia, igualmente, que a nossa cultura é ininteligível sem o conhecimento da história das religiões. A referência à literatura alemã – Goethe e Hölderlin, Stefan George e Gottfried Keller - e à experiência da música – Heisenberg é um pianista notável e pensa a música também matematicamente – formaram, além disso, a moldura de pensamento na qual Heisenberg refletiu. Ciência, história das religiões (e de uma maneira mais geral, das civilizações), literatura alemã, música: pode-se notar que esta mistura é perfeitamente tradicional para um sábio alemão do início do século XX e que resume a formação humanista (humanistische Bildung) dada no ginásio. Heisenberg é um produto típico desta formação⁵¹.

No que nos concerne aqui, a seguinte passagem do próprio Heisenberg é de especial interesse:

Embora eu agora esteja convencido de que a verdade científica seja incontestável no seu próprio domínio, eu nunca achei possível pôr de lado o conteúdo do pensamento religioso simplesmente como uma parte de uma fase fora de moda da consciência humana, uma parte da qual nós devemos desistir daqui em diante. Deste modo me vi, ao longo da minha vida, repetidamente compelido a ponderar acerca da relação entre estas duas regiões do pensamento, posto que nunca fui capaz de duvidar da realidade daquilo para que elas apontam⁵².

⁴⁸ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p.42.

⁴⁹ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 65.

⁵⁰ Ver, por exemplo, a este respeito, Heisenberg, Werner, “Scientific and Religious Truth” (1973), In: **Across the Frontiers**, p.219.

⁵¹ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 27.

⁵² Heisenberg, Werner, “Scientific and Religious Truth” (1973), In: **Across the Frontiers**, p.213.

A citação acima nos permite perceber que o papel exercido pela região do saber que corresponde ao campo religioso é de fundamental importância para Heisenberg em sua tentativa de compreensão histórica do desenvolvimento do pensamento humano. Sua caracterização da ciência moderna é fiel a esta linha de raciocínio, como testemunham as passagens que se seguem:

1. Quando no século XVII esta ciência foi fundada (...), na sua base encontrava-se ainda a imagem medieval da natureza, que via nesta, acima de tudo, a criação de Deus. A natureza era imaginada como obra de Deus e às pessoas daquele tempo teria parecido absurdo pôr o problema do mundo material independentemente de Deus⁵³.
2. Não pode haver dúvidas de que nesta fase inicial da ciência moderna, a recém descoberta conformidade [dos fenômenos] com a lei matemática tornou-se a verdadeira base do seu poder persuasivo. Estas leis matemáticas, como as lemos em Kepler, são a expressão visível da vontade divina, e Kepler demonstra seu entusiasmo com o fato de ter sido o primeiro a reconhecer a beleza dos trabalhos de Deus. Deste modo esta nova maneira de pensar não era, certamente, nada próxima a um afastamento da religião. Se as novas descobertas de fato contradiziam os ensinamentos da Igreja em alguns pontos, isto era pouco significativo, visto que era possível perceber de modo muito imediato os trabalhos de Deus na natureza⁵⁴.

Entretanto, ao longo de algumas décadas, a atitude do homem em relação à natureza mudou radicalmente⁵⁵. Percebeu-se, “como Galileu tinha começado a fazer⁵⁶”, que, à medida que o investigador adentrava nos detalhes dos processos individuais podia descrevê-los matematicamente e, assim, “explicá-los” sem que fosse necessário fazer nenhuma referência explícita a Deus em sua explicação. “Neste período havia, em alguns casos, um acordo explícito entre os pioneiros da ciência empírica, de que o nome de Deus ou de uma causa fundamental não deveria ser mencionado em suas discussões⁵⁷”. Galileu compreendeu, como confirma Heisenberg, que se afastando da experiência imediata, era possível descobrir estruturas matemáticas nos fenômenos. “Este novo método não almejava uma descrição do que é visível, mas antes a invenção de experimentos e a

⁵³ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 7.

⁵⁴ Heisenberg, Werner, “Scientific and Religious Truth” (1973), In: **Across the Frontiers**, p.215.

⁵⁵ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 8.

⁵⁶ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 8.

⁵⁷ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 67-68.

produção de fenômenos que não podem ser vistos normalmente [, bem como] o seu cálculo nas bases de uma teoria matemática⁵⁸”.

Pode-se dizer que a ciência da natureza iniciou neste período um intenso processo de abstração e que, a partir do *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, a opus magna de Newton, “se desenvolveu de uma maneira perfeitamente linear e consecutiva⁵⁹”. Newton “simplesmente queria explicar os processos da mecânica⁶⁰” e, embora reconhecesse estar esta tarefa bastante além das possibilidades de conclusão daquele tempo, imaginou que, por meio dos conceitos e leis básicas por ele estabelecidos, uma “explicação deste tipo poderia ser possível, pelo menos no futuro⁶¹”. Ele uniu estes conceitos em um grupo de axiomas que podia ser traduzido na linguagem matemática, o que abria “pela primeira vez, a possibilidade de se reunir uma infinita gama de fenômenos em um formalismo matemático⁶²”. Por meio do cálculo, cada processo individual pôde ser compreendido como uma conseqüência das leis básicas por ele postuladas e, deste modo, “explicado”. Ainda que os processos não pudessem em si mesmos ser bem observados, seus resultados poderiam ser preditos a partir das condições iniciais e dos pressupostos da física. O sucesso na explicação do esquema matemático e as aplicações práticas da mecânica pareciam justificar convenientemente esta nova forma de ciência.

Entretanto, Heisenberg considerava que a aproximação da realidade por meio dos conceitos newtonianos era uma restrição, ou, se se preferir, uma estilização da imagem da realidade⁶³. Tratava-se de peneirar, da desconcertante complexidade das aparências, os processos simples da natureza:

Mas o que é simples? Desde Galileu e Newton a resposta tem sido: Um processo é simples quando sua ocorrência regular pode ser representada quantitativamente, em todos os seus detalhes, de uma maneira matematicamente consistente. O processo simples não é, conseqüentemente, aquele que a natureza nos apresenta imediatamente; pelo contrário, o físico deve primeiramente, muitas vezes pelo uso de aparatos extremamente complexos, dividir a rica mistura de fenômenos,

⁵⁸ Heisenberg, Werner, “Tradition in Science” (1973), In: **Encounters with Einstein and Other Essays, on People, Places and Particles**, p. 8.

⁵⁹ Heisenberg, Werner, “Goethe’s View of Nature and the World of Science and Technology” (1967), In: **Across the Frontiers**, p. 125.

⁶⁰ Heisenberg, Werner, “The Notion of a “Closed Theory” in Modern Science” (1948), In: **Across the Frontiers**, p. 40.

⁶¹ *Ibidem*, p. 40.

⁶² *Ibidem*, p. 40.

⁶³ Heisenberg, Werner, “The End of Physics?” (1970), In: **Across the Frontiers**, p. 185-186.

libertando o que é importante do indesejado tumulto, até que um “simples” processo emerja claramente por si mesmo, precisamente na medida em que ele possa prescindir de - isto é, abstrair a partir de - todos os fenômenos acessórios⁶⁴.

E assim, o mundo consistia em coisas no espaço e tempo, as coisas consistiam em matéria, e a matéria, por sua vez, podia produzir e sofrer a ação de forças. Os eventos se seguem da interação entre matéria e forças e cada evento é o resultado e a causa de outros eventos⁶⁵. A ciência natural tinha, por assim dizer, uma imagem clara e ampla do mundo material e, contudo, “as primeiras grandes formulações compreensivas das leis naturais, tais como foram possíveis em Newton, tratavam de idealizações da realidade, e não da realidade em si mesma⁶⁶”. Nas palavras de Heisenberg:

A física clássica, que chegou à sua conclusão há uns trinta anos atrás, foi construída sobre algumas suposições fundamentais que pareciam pontos de partida óbvios de toda a ciência exata e pareciam não requerer prova ou discussão: a física lidava com o comportamento da matéria no espaço e com a sua mudança no tempo. Ainda que isto caracterizasse originalmente apenas as experiências que formavam a base da física, algumas propriedades da matéria foram inferidas destas experiências e pareciam ser [por elas] determinadas ao mesmo tempo. Era-se levado à tácita assunção de que existia um curso objetivo dos eventos no espaço e no tempo, independente da observação; além disto, aquele espaço e tempo eram categorias de classificação de todos os eventos, completamente independentes um do outro, e representavam desta maneira uma realidade objetiva, que era a mesma para todos os homens⁶⁷.

Para Heisenberg, é possível afirmar que a mecânica atingiu a sua compleição na teoria newtoniana e que ela é, e será (“pelo menos por uns bons milhões de anos a partir de agora⁶⁸”) vigente no que concerne à região da realidade de que ela trata. “Dentro de sua própria estrutura, a mecânica newtoniana não pode ser melhorada. Mas nós não podemos, de forma alguma, afirmar que todos os fenômenos possam ser descritos em termos destes conceitos⁶⁹”.

⁶⁴ Heisenberg, Werner, “The Notion of a “Closed Theory” in Modern Science” (1948), In: **Across the Frontiers**, p. 42.

⁶⁵ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 184.

⁶⁶ Heisenberg, Werner, “The End of Physics?” (1970), In: **Across the Frontiers**, p. 185-186.

⁶⁷ Heisenberg, Werner, “Recent Changes in the Foundations of Exact Science” (1934), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 11.

⁶⁸ Heisenberg, Werner, “Recent Changes in the Foundations of Exact Science” (1934), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 11.

⁶⁹ Heisenberg, Werner, “The End of Physics?” (1970), In: **Across the Frontiers**, p. 185-186.

A aparição de uma ciência matemática marca uma mudança de posição no que diz respeito à atitude do homem diante da natureza⁷⁰. Esta mudança da posição do investigador pode, segundo Heisenberg, ser compreendida caso se considere que o pensamento cristão daquela época havia se desenvolvido de modo que “Deus parecia tão distante da terra, no alto do céu, que fazia sentido considerar a terra independentemente d’Ele⁷¹”:

Pode se dizer que certas tendências na filosofia cristã levaram a um conceito muito abstrato de Deus, que elas colocaram Deus tão acima do mundo que se passou a considerar o mundo sem ao mesmo tempo ver Deus nele. A divisão cartesiana pode ser considerada um passo final neste desenvolvimento. (...) Ao longo deste período, apareceu uma nova autoridade que era completamente independente da religião ou filosofia cristã ou da Igreja, a autoridade da experiência, do fato empírico⁷².

A filosofia de Descartes é, para Heisenberg, assim como todos os grandes sistemas filosóficos do século XVII, o resultado da transformação introduzida com a nova ciência da natureza, aquela de Kepler e de Galileu, cuja característica central é a de que seu ponto de partida essencial não é mais uma substância ou princípio, mas um conhecimento fundamental a ser encontrado no entendimento⁷³. Trata-se, no caso do cartesianismo, da tentativa de estabelecer fundamentos sólidos e duradouros sobre os quais se possa construir o “edifício” da ciência⁷⁴, o que seria feito a partir da dúvida e do raciocínio lógico, como vemos na seguinte passagem:

Há muito tempo eu notara que, quanto aos costumes, por vezes é necessário seguir, como se fossem indubitáveis, opiniões que sabemos serem muito incertas (...); mas como então desejava ocupar-me somente da busca da verdade, pensei que precisava fazer exatamente o contrário, e rejeitar como absolutamente falso tudo em que pudesse imaginar a menor dúvida, a fim de ver se depois disso não restaria em minha crença alguma coisa que fosse inteiramente indubitável. Assim, porque nossos sentidos às vezes nos enganam, quis supor que não havia coisa alguma que fosse tal como eles nos levam a imaginar. E porque há homens que se enganam ao raciocinar (...), julgando que eu era tão sujeito ao erro quanto qualquer outro, rejeitei como falsas todas as razões que antes tomara como demonstrações. E, finalmente, considerando que todos os pensamentos que temos quando acordados também nos podem ocorrer quando dormimos, sem que nenhum seja tão verdadeiro, resolvi fingir que todas as coisas que haviam entrado em meu espírito não eram mais verdadeiras que as ilusões dos meus sonhos. Mas logo depois atentei que, enquanto

⁷⁰ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 71

⁷¹ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 8.

⁷² Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 183.

⁷³ *Ibidem*, p. 66.

⁷⁴ Por exemplo, Descartes, René, **O Discurso do Método**, p.12, 15, ou **Meditações**, p. 250.

queria pensar assim que tudo era falso, era necessariamente preciso que eu, que o pensava, fosse alguma coisa. E, notando que esta verdade – penso, logo existo – era tão firme e tão certa que todas as mais extravagantes suposições dos cépticos não eram capazes de a abalar, julguei que podia admiti-la sem escrúpulo como o primeiro princípio da filosofia que buscava⁷⁵.

A passagem precedente merece ser citada não apenas para que vejamos claramente o método a que nos referimos, mas porque chegamos, junto com Descartes, à sua primeira (e célebre) certeza: “penso, logo existo” (“*cogito ergo sum*”).

Devemos ter em vista que, segundo Heisenberg, “Descartes percebe que o que sabemos sobre a nossa mente é mais certo do que o que sabemos sobre o mundo externo⁷⁶”. Após o estabelecimento da evidência do cogito, Descartes avança mais um pouco afirmando que é possível ter certeza da existência de uma coisa que pensa, em latim, *res cogitans*: “Mas o que sou eu então? Uma coisa que pensa. Que é uma coisa que pensa? É uma coisa que duvida, que concebe, que afirma, que nega, que quer, que não quer, que imagina também e que sente⁷⁷”. Ainda assim, este fato não é suficiente para garantir, nos afirma Descartes, a existência de nada além do que a própria substância pensante. Ocorre que Descartes está interessado, como dissemos, em dar fundamentos sólidos para o conhecimento científico, isto é, garantir a possibilidade de que os objetos “reais”, em outros termos, os objetos do mundo (*res extensa*), sejam conhecidos. Isto é garantido pela prova da existência de Deus⁷⁸ que é feita por Descartes “essencialmente na linha da filosofia escolástica⁷⁹”. Não nos cabe retomar os meandros desta prova, mas apenas uma passagem que parece resumir seus objetivos:

É preciso concluir obrigatoriamente que pelo simples fato de que eu existo e de que a idéia de um ser perfeito, ou seja, Deus, é em mim, a existência de Deus está muito claramente provada. (...) E toda a força do argumento de que aqui me servi para demonstrar a existência de Deus consiste em que reconheço que seria impossível que minha natureza fosse tal como é, isto é, que eu tivesse em mim a idéia de um Deus, se Deus não existisse de fato; esse mesmo Deus do qual existe uma idéia em mim, ou seja, que possui todas essas altas perfeições de que nosso espírito pode

⁷⁵ Descartes, René, **O Discurso do Método**, p. 37-38.

⁷⁶ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 66.

⁷⁷ Descartes, René, **Meditações**, p. 262.

⁷⁸ Descartes, René, **Meditações**, p. 288.

⁷⁹ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 66.

imaginar, sem, contudo compreendê-las a todas, que não é sujeito a necessidade alguma e que nada possui de todas as coisas que indicam alguma perfeição⁸⁰.

Ora, se sou munido de sentidos que me fazem crer na existência de um mundo exterior a mim⁸¹, e se Deus é, por definição, perfeito:

... é impossível que ele me engane, visto que em todo embuste há alguma imperfeição. E embora pareça que poder enganar seja um sinal de esperteza ou de poder, querer enganar testemunha, sem dúvida alguma, fraqueza ou malícia. E, logo, isso não pode existir em Deus⁸².

Para Heisenberg, a caracterização do novo método em filosofia inaugurado por Descartes é importante, na medida em que é possível ver nele a formulação de uma tendência do pensamento humano também observada ao longo da Renascença na Itália e na Reforma:

O crescente interesse na matemática favorecia um sistema filosófico que começava com um raciocínio lógico e que tentava por este método chegar a uma verdade que era certamente uma conclusão matemática. A insistência na religião pessoal separou o Eu e sua relação com Deus do resto do mundo. O interesse na combinação do conhecimento empírico com a matemática como vista no trabalho de Galileu era talvez em parte devida à possibilidade de se chegar, desta forma, a algum conhecimento que pudesse ser completamente afastado das disputas teológicas levantadas pela Reforma. Este conhecimento empírico pôde ser formulado sem que se falasse de Deus ou de nós mesmos e favorecia a separação Deus-Mundo-Eu ou a separação entre “res cogitans” e “res extensa”.⁸³

Heisenberg tornou, em muitos textos, a “divisão” entre *res cogitans* e *res extensa*, encontrada na filosofia de Descartes, o alvo principal de sua crítica. De fato, para ele, “a bifurcação do mundo expressa neste par de conceitos teve a mais poderosa influência no pensamento dos séculos seguintes⁸⁴”. Esta “divisão” fundamental postulada por Descartes é a origem, para Heisenberg, do conceito moderno de objetividade⁸⁵, cuja particularidade é a desconsideração, na constituição do fenômeno observado, das condições de observação. O cartesianismo expõe, pela primeira vez, um “realismo metafísico” que confere à

⁸⁰ Descartes, René, **Meditações**, p. 288-289.

⁸¹ Por exemplo Descartes, René, **Meditações**, p. 266-267.

⁸² Descartes, René, **Meditações**, p. 292.

⁸³ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 67.

⁸⁴ Heisenberg, Werner, “Planck’s Discovery and the Philosophical Problems of Atomic Theory” (1958), In: **Across the Frontiers**, p. 16.

⁸⁵ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 30.

res extensa o estatuto de o “real” por excelência⁸⁶ e que é, conforme Heisenberg, o responsável pelo enrijecimento da imagem da ciência ao longo dos séculos XVIII e XIX⁸⁷.

Deste modo, o êxito representado pela mecânica newtoniana e pelas outras partes da física clássica construídas a partir deste modelo vem acompanhado “da crença – ou dever-se-ia dizer, ilusão?⁸⁸” – de que era possível descrever o mundo ou, pelo menos, partes dele, sem a menor referência a “Deus ou a nós mesmos. Esta possibilidade logo pareceu ser uma condição quase necessária para a ciência natural em geral⁸⁹”. Assim, afirma Heisenberg, se é o caso de que estes conceitos cartesianos sejam utilizados, é essencial, em qualquer circunstância, “que Deus esteja no mundo e no Eu e é também essencial que o Eu não possa estar realmente separado do mundo”. Embora Descartes soubesse da completa necessidade de uma conexão entre “Deus-Mundo-Eu”, a ciência natural se desenvolveu, desde então, nas bases da polaridade entre *res cogitans* e *res extensa*, tendo suas atenções voltadas unicamente para a segunda⁹⁰.

As dificuldades do “realismo metafísico” foram, de acordo com Heisenberg, rapidamente sentidas, após Descartes, pela filosofia empirista de Locke, Berkeley e Hume, mas é em Kant que a crítica de Heisenberg à modernidade encontra o seu segundo momento essencial. A filosofia de Kant, o fundador do idealismo alemão⁹¹, representa “a combinação entre essas duas linhas de pensamento que começaram com Descartes, por um lado, e Locke e Berkeley, por outro⁹²”. Uma vez que encontramos, em *Physics and Philosophy*, “uma análise precisa dos diferentes elementos da teoria kantiana do conhecimento⁹³” tal como estão expostos na *Crítica da Razão Pura*, julgamos necessário apontar algumas de suas características para que se examine com mais clareza as críticas que Heisenberg faz a algumas de suas partes.

⁸⁶ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 69-71.

⁸⁷ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 30.

⁸⁸ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 43.

⁸⁹ *Ibidem*, p. 69.

⁹⁰ *Ibidem*, p. 67.

⁹¹ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p.71.

⁹² *Ibidem*, p.71- 74.

⁹³ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans la physique Contemporaine**, p. 31. Esta análise precisa dos elementos da teoria do conhecimento kantiana está em Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 74-77.

A filosofia de Kant tem, como ponto de partida, a faculdade de julgar, sendo os juízos compreendidos como funções da unidade das nossas representações. De acordo com Kant, podemos “reduzir todos os atos do entendimento a juízos⁹⁴”, os quais podem ser analíticos ou sintéticos:

Em todos os juízos em que for pensada a relação de um sujeito com o predicado (...), essa relação é possível de dois modos. Ou o predicado B pertence ao sujeito A como algo contido (ocultamente) nesse conceito A, ou B jaz completamente fora do conceito A, embora esteja em conexão com o mesmo. No primeiro caso denomino juízo analítico, no outro sintético. Juízos analíticos (...) são, portanto, aqueles em que a conexão do predicado com o sujeito for pensada por identidade; aqueles, porém, em que essa conexão for pensada sem identidade, devem denominar-se juízos sintéticos. (...) Com efeito, [os primeiros] por meio do predicado nada acrescentam ao conceito do sujeito, mas somente o dividem por desmembramento em seus conceitos parciais que já eram (embora confusamente) pensados nele, enquanto os últimos, ao contrário, acrescentam ao conceito do sujeito um predicado que de modo algum era pensado nele nem poderia ter sido extraído dele por desmembramento algum⁹⁵.

Os juízos analíticos são, assim, aqueles em que os predicados estão contidos no conceito do sujeito, podendo ser dele extraídos por análise (“juízos de *elucidação*⁹⁶”) e cuja negação não pode ser pensada sem contradição⁹⁷. Os juízos sintéticos são, por sua vez, aqueles que ampliam o conteúdo do conhecimento (“juízos de *ampliação*⁹⁸”), são juízos de experiência⁹⁹, e podem ser *a priori* ou *a posteriori*. É sobre a possibilidade da existência de juízos sintéticos *a priori* que se concentra Kant na *Crítica da Razão Pura*, pois ele julga serem os juízos sintéticos *a priori* “as condições de *possibilidade da experiência* em geral [e] (...) ao mesmo tempo [as] condições de *possibilidade dos objetos da experiência*¹⁰⁰”. Em outras palavras, os juízos sintéticos *a priori* são juízos que só podem existir em relação aos objetos de que se pode ter experiência, mas são também os princípios de possibilidade dessa própria experiência¹⁰¹.

Nos juízos sintéticos *a priori* estão contidos os conceitos *a priori* puros e as intuições *a priori* puras. É necessário ressaltar que Kant denomina “*puras* (em

⁹⁴ Kant, Immanuel, *Crítica da Razão Pura*, segunda edição (1787), *Apud*, Caygill, Howard, **Dicionário Kant**, p. 205.

⁹⁵ Kant, Immanuel, *Crítica da Razão Pura*, segunda edição (1787), p. 58.

⁹⁶ *Idem*, p. 58.

⁹⁷ Um bom exemplo de juízo analítico é “Todo homem solteiro é não casado”.

⁹⁸ Kant, Immanuel, *Crítica da Razão Pura*, segunda edição (1787), p. 58.

⁹⁹ Kant, Immanuel, *Crítica da Razão Pura*, segunda edição (1787), p. 58: “Juízos de experiência como tais são todos sintéticos”.

¹⁰⁰ Kant, Immanuel, *Crítica da Razão Pura*, segunda edição (1787), p. 154.

¹⁰¹ Ver Caygill, Howard, **Dicionário Kant**, p. 211.

sentido transcendental) a todas as representações nas quais não podemos encontrar nada que pertença à sensação¹⁰²”. “A forma *pura* de intuições sensíveis em geral, na qual todo múltiplo dos fenômenos é intuído em certas relações, será encontrada *a priori* na mente¹⁰³”. Ela não pode, portanto, ser abstraída da experiência.

As formas *a priori* puras da intuição são espaço e tempo; formas que, como dissemos, antecedem todo e qualquer ato de pensamento. “Espaço e tempo são intuições puras que contêm *a priori* a condição da possibilidade dos objetos como fenômenos, e a sua síntese nos mesmos possui validade objetiva¹⁰⁴”. Sua função é “coordenar os objetos da sensibilidade antes da sua unificação num juízo pelos conceitos do entendimento. Para fazê-lo, eles devem ser distintos dos conceitos espontaneamente produzidos do entendimento, embora organizem, ao mesmo tempo, a matéria da sensibilidade de um modo que se harmoniza com eles¹⁰⁵”. Espaço e tempo são, doravante, “aspectos da receptividade ou passividade da mente, em contraste com o trabalho ativo e espontâneo do entendimento que, não obstante, organizam a matéria da sensação¹⁰⁶”:

Ora, espaço e tempo contêm um múltiplo da intuição pura *a priori* e, não obstante, fazem parte das condições da receptividade da nossa mente, unicamente sob as quais esta pode acolher representações de objetos que, portanto, têm sempre que afetar o conceito de tais objetos. Todavia, a espontaneidade do nosso pensamento exige que tal múltiplo seja primeiro e de certo modo perpassado, acolhido e ligado para que se faça disso um conhecimento. Denomino esta ação síntese¹⁰⁷.

Esta síntese é feita por meio de um determinado número de conceitos *a priori* puros espontaneamente produzidos no entendimento e estes conceitos são denominados categorias. Elas são as formas de acordo com as quais os objetos da experiência são estruturados e ordenados. As categorias são, deste modo,

... o elenco de todos os conceitos puros originários de síntese que o entendimento contém em si *a priori* e somente devido aos quais ele é, além disso, um entendimento puro na medida em que unicamente por tais conceitos pode compreender algo do múltiplo da intuição, isto é, pensar um objeto dela¹⁰⁸.

As categorias são separadas em quatro grupos.

¹⁰² Kant, Immanuel, **Crítica da Razão Pura**, segunda edição (1787), p. 72.

¹⁰³ *Ibidem*, p. 72.

¹⁰⁴ *Ibidem*, p. 116.

¹⁰⁵ Caygill, Howard, **Dicionário Kant**, p. 123.

¹⁰⁶ *Ibidem*, p. 123.

¹⁰⁷ Kant, Immanuel, **Crítica da Razão Pura**, segunda edição (1787), p. 107.

¹⁰⁸ *Ibidem*, p. 109.

Da quantidade: unidade, pluralidade, totalidade.

Da qualidade: realidade, negação, limitação.

Da relação: inerência, subsistência (*substantia et accidens*), causalidade e dependência (causa e efeito), comunidade (ação recíproca entre agente e paciente).

Da modalidade: possibilidade / impossibilidade, existência / não-ser, necessidade / contingência¹⁰⁹.

Após terem sido feitas estas considerações acerca de algumas características da teoria de Kant, é hora de voltamos nossas atenções para a comparação desta teoria com a física moderna, tal como formulada por Heisenberg. De acordo com Heisenberg, pode-se dizer logo de início que o conceito central de “julgamentos sintéticos a priori” da teoria kantiana é aniquilado pelas descobertas do nosso século:

A teoria da relatividade e a teoria quântica revelaram certas estruturas básicas da natureza que eram desconhecidas até então. Na teoria da relatividade trata-se da estrutura do espaço e tempo; na teoria quântica com as conseqüências do fato de que toda medição no campo atômico requer um ato de intervenção¹¹⁰.

Einstein foi, como afirma Heisenberg, o primeiro a atacar a suposição fundamental da física clássica de que existe um mundo objetivo que segue seu rumo no tempo e no espaço absolutos, isto é, em um tempo e espaço que são os mesmos para tudo que existe no universo, independentemente da posição e do movimento do observador¹¹¹. Os conceitos fundamentais de tempo e espaço da teoria relativística e a relação destes com a matéria trazem uma profunda mudança em relação à mecânica newtoniana, de tal modo que a idéia de objetos completamente independentes do modo como os observamos parece não mais corresponder à realidade. Einstein verifica que “dois eventos que parecem simultâneos a um observador em repouso não são necessariamente simultâneos para um observador em movimento” de maneira que, ao penetrarmos em domínios que envolvem velocidades enormes, “verificamos, por exemplo, que o relógio de um observador em movimento parece andar mais devagar que o de um observador

¹⁰⁹ *Ibidem*, p. 109.

¹¹⁰ Heisenberg, Werner, “Planck’s Discovery and the Philosophical Problems of Atomic Theory” (1958), In: **Across the Frontiers**, p. 19.

¹¹¹ Heisenberg, Werner, “Recent Changes on the Foundations of Exact Science” (1934), In: **Philosophic Problems of nuclear Science**, p. 12.

em repouso¹¹²”. Em outras palavras, diferentes observadores vão medir, para um mesmo evento, intervalos de tempo diferentes¹¹³. “A teoria da relatividade revelou, assim, características inteiramente novas do espaço e tempo, que não podem ser vistas nas formas *a priori* da intuição de Kant¹¹⁴”.

Ainda no que concerne à teoria da relatividade e à crítica por ela feita ao pensamento kantiano, Heisenberg comenta:

Não há dúvidas de que a teoria da relatividade mudou profundamente nossa visão a respeito da estrutura de espaço e tempo. O mais excitante destas mudanças é, talvez, não sua natureza especial, mas o fato de que elas foram possíveis. A estrutura de espaço e tempo que foi definida por Newton como a base da sua descrição matemática da natureza era simples e consistente e correspondia de modo muito próximo aos conceitos espaço e tempo na vida diária. Esta correspondência era de fato tão próxima que as definições de Newton poderiam ser consideradas formulações matemáticas precisas destes conceitos. Antes da teoria da relatividade, parecia completamente óbvio que eventos poderiam ser ordenados no tempo independentemente da sua localização no espaço. Nós sabemos agora que esta impressão é criada na vida diária pelo fato de que a velocidade da luz é muito mais alta do que qualquer outra velocidade que ocorra na nossa experiência prática; mas esta restrição, é claro, não era percebida naquele tempo. E mesmo se nós conhecemos a restrição agora nós não conseguimos imaginar muito bem que a ordem temporal dos eventos deva depender da sua localização¹¹⁵.

Embora a filosofia de Kant tenha apontado para o fato de que os conceitos de espaço e tempo pertencem à nossa relação com a natureza, e não à natureza em si, de que nós não podemos descrever a natureza sem usar estes conceitos, acreditava-se, na medida em que eles eram a condição da experiência, que eles não poderiam ser afetados por novas experiências. Quanto a isso, Heisenberg reitera:

As teorias físicas podem ter uma estrutura diferente da física clássica apenas quando seus objetivos já não são aqueles das percepções sensoriais imediatas, isto é, apenas quando eles deixam o campo da experiência comum dominada pela física clássica. É desta forma que a física moderna tem definidos de modo mais acurado os limites da idéia dos *a priori* nas ciências exatas do que era possível no tempo de Kant¹¹⁶.

¹¹² Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo**, p. 117.

¹¹³ Cabe ressaltar que embora a teoria da relatividade especial introduza um elemento de subjetividade, ela não abole a separação radical entre objeto e sujeito, uma vez que as relativizações do tempo-espaço são englobadas por um critério de objetividade: embora as medidas de tempo e espaço dependam do observador, diferentes observadores podem calcular as medidas uns dos outros se dispuserem dos dados necessários. De fato, Einstein acreditava que toda teoria fundamental deveria permitir a descrição dos objetos e processos individuais independentemente dos atos e condições de observação.

¹¹⁴ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 76.

¹¹⁵ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 114-115.

¹¹⁶ Heisenberg, Werner, “Recent Changes in the Foundations of Exact Science” (1934), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 22-23.

A necessidade de uma mudança nos conceitos de espaço e tempo foi, por isso, uma grande surpresa, e os cientistas aprenderam pela primeira vez, de acordo com Heisenberg, o quão cautelosos deveriam ser ao aplicar conceitos da vida diária a experiências refinadas como as da ciência moderna experimental:

“Mesmo formulações consistentes e precisas destes conceitos [espaço e tempo] na linguagem matemática na mecânica de Newton ou a sua análise cuidadosa na filosofia de Kant não ofereceram proteção contra a análise crítica possibilitada pelas medições extremamente acuradas [da física moderna]¹¹⁷”.

Prometemos, ao princípio deste capítulo, mostrar como a obra de Heisenberg, intrinsecamente ligada à história da física quântica, dialogou com a tradição filosófica e científica. Nesse diálogo tivemos de perscrutar a relação de seu pensamento com “Os tempos modernos” – aquilo a que nos referimos como “crítica à modernidade”. Nos guiamos, isto é certo, por aqueles problemas que nos pareceram mais relevantes ao entendimento sobre a reflexão filosófica de Heisenberg. Sabemos, entretanto, que o diálogo que manteve com a tradição se estende a outro período da história do pensamento. No próximo capítulo, tentaremos expor como alguns problemas da física quântica dialogam com a tradição filosófica grega no pensamento científico-filosófico de Heisenberg.

¹¹⁷ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 115.

Heisenberg e os Gregos

Vimos trabalhando nesta dissertação no sentido de empreender uma leitura do diálogo que Heisenberg estabeleceu com a tradição filosófica e científica. Se, no capítulo anterior, detivemo-nos naquilo que recebeu, de seu próprio punho, o nome de “Tempos Modernos”, no presente momento nos impomos a tarefa de percorrer de modo ora geral, ora específico, o diálogo que Heisenberg estabeleceu com a tradição filosófica grega. Essa necessidade que nos impomos parece bastante acertada caso se considere que o entrecruzamento entre o pensamento de Heisenberg e a tradição filosófica grega é uma constante em suas obras. Não somos os primeiros, nem seremos os últimos, a insistir nisto. Entre os fundadores da mecânica quântica, comenta Chevalley, Heisenberg figura como aquele que estabeleceu as mais profícuas relações com o pensamento grego.

Tais relações, quase não carece que iteremos, são bastante complexas. Elas se explicam, até certo ponto, pelo grande apreço que Heisenberg manteve pelos gregos, desde muito jovem. É curioso notar que seu pai, August Heisenberg, fora um especialista em filologia grega medieval e moderna¹, e seu avô materno, o Dr. Nikolaus Wecklein, uma grande autoridade em tragédia grega². Talvez isto esclareça, em alguma medida, por que, desde seus anos de estudante, Heisenberg lia (no original) Platão, Aristóteles e os pré-socráticos, uma leitura que continua durante toda sua carreira científica³. Por si só, esses fatos não são suficientes para dar conta do que, mais tarde, Heisenberg viria a fazer em sua obra. Ainda que não possamos afirmar, tomando por base a sua biografia, que Heisenberg desde há muito estivesse preocupado em estabelecer uma relação tão forte entre o pensamento grego e seu trabalho científico, parece-nos relevante o suficiente mencionar esses fatos.

¹ Cassidy, David C., **Uncertainty, The Life and science of Werner Heisenberg**, p. 3: “Após uma década do nascimento de Heisenberg, ele [August Heisenberg] chegaria ao topo da hierarquia acadêmica da Alemanha como o único professor completo em grego medieval e moderno”.

² *Ibidem*, p. 8: “Ele [Nikolaus Wecklein] escreveu uma dissertação sobre os sofistas gregos, qualificado como um *university lecturer* com um trabalho em gramática grega, e se tornou uma autoridade líder em tragédia grega”.

³ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In : **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 169.

Muito interessante nos parece, também, o que nos informa Heisenberg a esse respeito em seus “primeiros encontros com os átomos”. Diz ele que esses encontros foram, quase que simultaneamente, encontros com a filosofia grega.

Deste mesmo período merecem destaque – como atestam suas memórias de 1969 e outros escritos – alguns encontros com a teoria atômica em meados de 1919-1920, período em que Heisenberg ainda estava na escola. O primeiro deles envolvia uma ilustração encontrada em seu manual de física, um livro “francamente bom para o resto, mas no qual, por razões evidentes, a física mais moderna era tratada como enteada indesejável⁴”. O desenho pretendia representar uma molécula de gás e sua função era mostrar o princípio básico da combinação de duas substâncias uniformes em uma outra substância uniforme, isto é, em um composto químico. “A melhor explicação para este processo, segundo o livro, partia do pressuposto de que as partículas mais ínfimas de cada elemento, ou átomos, combinavam-se em pequenos grupos chamados moléculas⁵”. Na ilustração, os átomos eram unidos por ganchos e colchetes através dos quais eles podiam prender-se uns aos outros. Heisenberg se viu bastante incomodado com a maneira utilitária e superficial através da qual os átomos foram retratados:

Eu considerava esta abordagem totalmente sem sentido. Para mim, ganchos e colchetes eram estruturas arbitrárias, cujas formas podiam ser alteradas ao bel-prazer de cada um, de modo a adaptá-los a diferentes utilidades. No entanto, os átomos e sua combinação em moléculas deveriam ser regidos por rigorosas leis naturais. Isso para mim não deixava margem alguma para intervenções humanas, como ganchos e colchetes⁶.

Concomitantemente a esta situação, deparamo-nos com a primeira leitura que Heisenberg fez do *Timeu* de Platão. Àquela altura, entre maio e junho de 1919, Heisenberg estava liberado dos afazeres escolares por conta do serviço militar:

Para me pôr em dia com os trabalhos escolares, eu me recolhia ao telhado do Seminário, munido de uma edição escolar dos Diálogos de Platão em grego. (...) Numa dessas manhãs (...) cheguei ao *Timeu*, ou melhor, aos trechos em que Platão discute as partículas mais diminutas da matéria. (...) Percorri laboriosamente o texto embora ele me parecesse absurdo. Dizia-se que as partículas mais diminutas da matéria eram triângulos retângulos, que, depois de se combinarem aos pares, formando triângulos isósceles ou quadrados, juntavam-se nos corpos regulares da geometria dos sólidos: cubos, tetraedros, octaedros e icosaedros. Dizia-se que esses

⁴ Heisenberg, Werner, **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p.58.

⁵ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p. 10.

⁶ *Ibidem*, p. 10.

quatro corpos eram a base dos quatro elementos – terra, fogo, ar e água. Eu não conseguia entender se esses símbolos regulares associavam-se aos elementos meramente como símbolos – por exemplo o cubo com o elemento terra, de modo a representar a solidez e o equilíbrio deste elemento - , ou se realmente se supunha que as menores partículas da terra tinham o formato de cubos. Como quer que fosse, todas essas idéias me pareceram uma especulação desvairada, talvez perdoável por faltar aos gregos o necessário conhecimento empírico. Não obstante, entristeceu-me ver um filósofo da agudeza crítica de Platão sucumbir a tais fantasias. Busquei um princípio que pudesse ajudar-me a encontrar alguma justificativa para a especulação platônica, mas, por mais que tentasse, não consegui descobrir nenhum. Mesmo assim, fiquei extasiado com a idéia de que as partículas mais diminutas da matéria deveriam reduzir-se a uma forma matemática. Afinal, qualquer tentativa de desenredar a densa trama dos fenômenos naturais dependia da descoberta de formas matemáticas; contudo, continuou a ser incompreensível para mim por que Platão escolhera os corpos regulares da geometria dos sólidos. Eles não pareciam ter nenhum valor explicativo⁷.

O diálogo de Platão parecia não ter, inicialmente, relevância alguma para a ciência moderna. A compreensão das questões que Heisenberg se colocara, quando destes primeiros encontros com a teoria atômica, teve início a partir de uma conversa entre ele e dois amigos, Kurt Pflügel e Robert Honsell. Acompanhando de perto suas memórias, confirma-se o amigo Robert como aquele que o ajudara a compreender o problema da representação dos átomos. É nesta mesma conversa que Heisenberg começa a vislumbrar um argumento que tornava plausíveis os sólidos platônicos: “os átomos provavelmente não são coisas. Era isso, certamente, que Platão tentara dizer no *Timeu* e, vistas sob esse prisma, suas especulações sobre os corpos regulares começavam a fazer sentido para mim⁸”. Como podemos perceber, Heisenberg vê no *Timeu* de Platão, bem cedo, um argumento para desqualificar os ganchos e cravos utilizados numa representação dos átomos encontrada em seu manual de física.

As conexões entre Heisenberg e os gregos, como não é difícil suspeitar, não se esgotam no que acabamos de descrever. Afastando-nos um pouco de suas memórias, as quais nos interessam sobremaneira, podemos abordar essas conexões de modo mais geral.

Devemos começar afirmando que, para Heisenberg, é nos gregos que estão as raízes da ciência atômica. Em suas palavras:

Muitas disciplinas científicas se encontram estreitamente ligadas, nos seus fundamentos, à física atômica e conduzem, por isso, a questões teóricas análogas às

⁷ *Ibidem*, p. 16-17.

⁸ *Ibidem*, p. 20.

da física do átomo. Todo o edifício da Química se levanta sobre os alicerces da Física atômica; a Astronomia moderna está estritamente ligada com ela e, sem Física atômica, não pode progredir; até da Biologia se vão lançando pontes para a física atômica. Nos últimos decênios, o parentesco entre as diferentes ciências tem-se tornado muito mais perceptível do que a princípio. Em muitos pontos se reconhecem os sinais da origem comum e esta origem comum é, em última análise, o pensamento antigo⁹.

Mais do que isso, o pensamento grego não tem unicamente a função de representar o início de um processo histórico ao qual Heisenberg se refere repetidas vezes em seus textos. Referir-se à filosofia grega é especialmente importante na medida em que ele reconhece nela uma certa concepção de inteligibilidade à qual é preciso retornar:

uma inteligibilidade não tecnológica, mas especulativa, a busca de uma compreensão (...) de princípios e, mais especificamente, a busca de uma compreensão da variedade qualitativa do mundo – aquela mesma que a física quântica deixa clara de um modo completamente novo¹⁰.

Se, de acordo com Heisenberg, a aparição da física quântica tornou obrigatória a re colocação do significado da palavra “compreender”¹¹, fazia-se necessário reencontrar a inspiração dos grandes filósofos da natureza. A filosofia cartesiana havia buscado encontrar um conhecimento fundamental a partir de uma divisão essencial entre sujeito e objeto¹², cujo resultado é o discurso atual sobre a ciência que é, por sua vez, um discurso sobre a tecnologia. Na ciência de Newton,

Os processos simples da natureza eram elucidados por meio de experimentos convenientes e as leis assim descobertas eram colocadas em uma linguagem matemática. Este método podia ser aplicado a problemas individuais e por esta razão não havia mais a questão de compreender um todo singular interconectado, mas a de uma análise detalhada de várias pequenas conexões específicas¹³.

A ciência, tal como vemos nos gregos, por outro lado, é uma ciência de princípios ou da substância, que havia essencialmente “tentado encontrar ordem na

⁹ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 57.

¹⁰ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 152.

¹¹ Ver: Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 31.

¹² Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy**, p. 66.

¹³ Heisenberg, Werner, “On the unity of the Scientific Outlook on Nature” (1941), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 79.

variedade infinita das coisas e eventos pela procura de um princípio unificador fundamental¹⁴”.

O primeiro fenômeno físico que atraiu a atenção do pensamento grego sistemático foi aquele da ‘substância’, do ‘último’ elemento nas mutações de todos os fenômenos. Na tese de Tales¹⁵, aquela de que o mundo consiste de uma substância fundamental que é a água, podemos ver o conceito de ‘matéria’. Bem no início da pesquisa, nenhuma das palavras da oração antecedente podia, naturalmente, ter um sentido preciso. Nenhuma das palavras ‘substância fundamental’, ‘água’ ou ‘consistir’ tinha um campo de aplicação definido ou um sentido não ambíguo, e foi justamente este fato que deu completa liberdade à pesquisa futura. Nenhum sacrifício havia sido feito que pudesse limitar uma compreensão unificada¹⁶.

Ora, para Heisenberg,

Uma das mais importantes características do desenvolvimento e da análise da física moderna é a experiência de que os conceitos da linguagem natural, vagamente definidos como são, parecem ser mais estáveis na expansão do conhecimento do que os termos precisos da linguagem científica, derivados como uma idealização a partir de grupos limitados de fenômenos. Isto de fato não é surpreendente uma vez que os conceitos da linguagem natural são formados pela conexão imediata com a realidade; eles representam a realidade. É verdade que eles não são muito bem definidos e podem, conseqüentemente, também sofrer mudanças no curso dos séculos, assim como o fez a própria realidade, mas eles nunca perdem a conexão imediata com a realidade¹⁷.

A ciência, se não quiser se afastar da sua vocação inicial, deve procurar por “uma compreensão unificada do mundo¹⁸” – tarefa de que se ocupava a filosofia antiga. Esta era, para Heisenberg, a intenção da física atômica e da filosofia atômica desde o seu princípio: encontrar leis fundamentais a partir das quais a natureza pudesse ser compreendida¹⁹. Torna-se claro, assim, um dos motivos pelos quais Heisenberg acha interessante seguir uma a uma as idéias que levaram a

¹⁴ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy**, p. 66.

¹⁵ Heisenberg se refere a Tales de Mileto, tradicionalmente considerado como o mais antigo filósofo grego ou investigador da natureza das coisas como um todo. Ver Kirk, Raven & Schofield, **Os Filósofos Pré-socráticos, História Crítica com Seleção de Textos**, p. 73.

¹⁶ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 28. Note-se que *substância*, usada aqui por Heisenberg, corresponde aparentemente à palavra *ousia*, que provavelmente jamais foi usada pelos pré-socráticos. Mas Heisenberg segue a interpretação de Aristóteles, que, na ausência dos textos desses primeiros filósofos, vigora na tradição da história da filosofia: a de considerar o princípio ou origem última de todas as coisas, buscada pelos primeiros filósofos, como algo que responde à noção aristotélica de substância (*ousia*): um substrato que permanece *essencialmente* o mesmo, apesar da variedade de suas afecções ou *acidentes*. (Cf. *Metafísica A*, 983b6 ss.)

¹⁷ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy**, p. 188.

¹⁸ Heisenberg, Werner, “Fundamental Problems of Present-day Atomic Physics” (1948), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 95.

¹⁹ Heisenberg, Werner, “The Role of Elementary Particle Physics in the Present Development of Science” (1974), **Across the Frontiers**, p. 93.

ciência natural dos gregos à teoria atômica e, com isso, “tentar encontrar uma conexão com estas idéias fundamentais mesmo nos avanços da mais moderna física atômica²⁰”.

Devemos, contudo, concordar com Chevalley quando ela afirma que à medida que “avançamos na leitura dos escritos de Heisenberg, esta presença recorrente dos gregos se torna muito mais difícil de se compreender. Que tipo de inteligibilidade é preciso fazer renascer²¹”? Parece necessário afirmar, antes de tudo, que a forma de investigação da natureza que se inicia com os gregos sofre, ao longo dos tempos, o que Heisenberg chama de um processo de “autolimitação²²”. Este processo tem por consequência a substituição da compreensão “imediate e direta”, vista nos pensadores da Grécia Antiga, por uma compreensão “analítica” das qualidades, que se inicia na Modernidade e se estende aos dias atuais. Heisenberg expôs esse processo deste modo:

No início da filosofia natural da Jônia vemos a famosa colocação de Tales de Mileto segundo a qual a água é a origem de todas as coisas. Esta colocação, que nos parece estranha hoje em dia, contém (...) três idéias fundamentais da filosofia. Primeiro, a idéia de que há uma origem para todas as coisas, depois, que esta questão tem que ser respondida racionalmente, e em terceiro, que deve (...) ser possível ‘compreender’ o mundo através deste princípio unificado. Estas três observações tornam-se mais dignas de nota na medida em que naquele tempo não era um passo óbvio procurar pela origem das coisas num processo material mais do que na vida em si mesma²³.

O que se passa em seguida? De acordo com Heisenberg, o sentido do termo ‘substância’²⁴, inicialmente bastante vago, foi definido de um modo mais conciso na pesquisa subsequente. Ele adquiriu, entretanto, as características de unidade e indestrutibilidade. Esta modificação do conceito de substância tornou mais complexa a investigação da natureza. Para tornar inteligíveis os fenômenos mutáveis do mundo, fazia-se necessário, a partir de então, admitir: ou que havia várias substâncias fundamentais cuja mistura ou separação eram responsáveis pelas

²⁰ Heisenberg, Werner, “Fundamental Problems of Present-day Atomic Physics” (1948), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 96.

²¹ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 171.

²² Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 28.

²³ Heisenberg, Werner, “Fundamental Problems of Present-day Atomic Physics” (1948), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 96.

²⁴ V. nota 16.

inumeráveis manifestações na nossa experiência, ou que o conceito de ‘permanência’ estava separado da experiência comum²⁵. Em outros termos:

O resultado desta busca foi que, ao fim desse período do pensamento humano, existiam dois conceitos opostos que exerceram a mais poderosa influência no pensamento ulterior da filosofia. Tais conceitos foram rotulados “materialismo” e “idealismo”²⁶.

É importante fazermos um breve exame do materialismo na medida em que, para Heisenberg, é dele que as modernas ciências exatas da natureza – a física e a química – herdam sua concepção de átomo: uma concepção que deve, aos seus olhos, ser reavaliada. O materialismo a que Heisenberg se refere tem seu mais alto desenvolvimento na teoria de Leucipo e Demócrito. As passagens a seguir parecem ressaltar os pontos mais relevantes desta teoria para a nossa pesquisa. Encontramos primeiramente em Aristóteles (citado por Simplício) que:

Demócrito ... designa o espaço pelos seguintes nomes: “o vazio”, “o nada” e o “infinito”, ao passo que a cada substância individual ele chama “coisa” [*i.e.* “nenhuma coisa” *sem o adjetivo* “nenhuma”²⁷], “compacto” e “ser”. Pensa ele que as substâncias são tão pequenas, que escapam aos nossos sentidos, se bem que possuam toda a espécie de formas, de feitios e diferenças de tamanho. Deste modo, consegue ele, a partir delas, como a partir dos elementos, criar, por agregação, massas perceptíveis à vista e aos demais sentidos²⁸.

E, de acordo com Simplício:

Diziam eles – Leucipo, Demócrito, Epicuro –, que os primeiros princípios eram infinitos em número e pensavam que tais princípios eram átomos indivisíveis e impassíveis devido à sua natureza compacta e sem qualquer vazio no seu interior; é que a divisibilidade, segundo eles, surge em virtude do vazio existente nos corpos compostos²⁹...

Nas palavras de Heisenberg, a teoria de Leucipo e Demócrito:

Considerava as menores partículas da matéria como ‘aquilo que existe’ no sentido mais estrito. Tais partículas foram consideradas indivisíveis e imutáveis. Eram

²⁵ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 28.

²⁶ Werner Heisenberg, “A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica” (1958), In: **Problemas da Física Moderna**, p. 11.

²⁷ Nota da tradução portuguesa: Procuramos, deste modo, traduzir o inglês “... he calls ‘thing’ [*i.e.* ‘nothing’ without ‘no’]” c.f., no texto grego, *oudéni* ‘não coisa; nenhuma coisa. Nada’ com *déni* ‘coisa’.

²⁸ Aristóteles *Sobre Demócrito ap. Simplicium de caelo* 295, 1, *Apud* Kirk, Raven & Schofield, **Os Filósofos Pré-socráticos, História Crítica com Seleção de Textos**, p. 438.

²⁹ Simplício *de caelo* 242, 18, *Apud* Kirk, Raven & Schofield, **Os Filósofos Pré-socráticos, História Crítica com Seleção de Textos**, p. 438.

eternas e unidades últimas; por isso eram chamadas de átomos e não necessitavam nem tinham qualquer explicação ulterior. Não possuíam outras propriedades que não as geométricas. Segundo os filósofos, os átomos não eram dotados de uma forma definitiva. Estavam separados entre si pelo espaço vazio e, graças às diferentes posições e movimentos diversos dos átomos. (...) Esses átomos constituíam, portanto, o verdadeiro núcleo objetivamente real da matéria e assim de todos os fenômenos³⁰.

Assim, a partir do século XVIII, percebeu-se que as experiências químicas podiam ser organizadas e interpretadas satisfatoriamente por meio da hipótese atômica herdada da Antiguidade:

Daqui resultou a imagem simplista que o materialismo do século XIX tinha do mundo: os átomos, última realidade imutável, movem-se no espaço e no tempo e, graças à sua disposição e movimentos recíprocos, produzem os mais variados fenômenos do nosso mundo sensível³¹.

Temos, portanto, que, no século XIX, os átomos da química e seus constituintes, as partículas elementares, eram considerados os últimos blocos indivisíveis da matéria, seu substrato real³². Mas, pergunta-se Heisenberg: A teoria atômica de Demócrito levava a uma compreensão das qualidades da matéria? “Em que sentido a teoria ‘explicava’ o comportamento geométrico dos corpos³³”?

A este respeito, Heisenberg julga ser necessário fazer recurso à distinção entre dois tipos de conhecimento, *dianoia* e *episteme*, feita por Platão no Livro VI da *República* (511e)³⁴. Examinaremos, pois, esta referência, à luz da qual

³⁰ Heisenberg, Werner, “A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica” (1958), In: **Problemas da Física Moderna**, p. 11.

³¹ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p.57.

³² Heisenberg, Werner, “A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica” (1958), In: **Problemas da Física Moderna**, p. 13.

³³ Werner Heisenberg, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 31.

³⁴ Chevalley aponta uma passagem diferente desta, a saber a 508e ao fim do livro VI. Ver a este respeito a consideração feita na nota 62 em Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: *Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin*, p. 172: “Na República, VI, 511 d-e, Platão distingue não exatamente a *episteme*, mas a *noesis* da *dianoia*, da *pistis* e da *eikasia*. Para compreender a interpretação de Heisenberg, podemos nos reportar à passagem 508e, onde Platão associa *episteme* à verdade, em oposição à opinião”. Pensamos que, mais exatamente, Heisenberg, referindo-se de memória ao final do livro VI da *República*, funde essa passagem com a 534a do livro VII, onde o termo *episteme* é reservado por Platão ao estado de alma que no final do livro VI é chamado de *noesis* (alcançada através da dialética), que ele distingue da *dianoia* (correspondente à apreensão intelectual própria da geometria e disciplinas afins). O termo *noesis*, por sua vez, é, em 534 a, o nome comum que abarca os dois estados de alma correspondentes à apreensão dos inteligíveis (*noesis* e *dianoia* de 511e, *episteme* e *dianoia* de 534a). Essa falta de rigor no emprego de termos é constante em Platão, que, em várias ocasiões, ao longo dos diálogos, critica a preocupação excessiva dos sofistas com o uso rigoroso das palavras; o

Heisenberg faz um reexame da ciência e da filosofia modernas. O contexto é a passagem da linha dividida. Uma linha é dividida em duas partes, cuja desigualdade simboliza que o mundo visível tem um grau de realidade mais baixo de realidade e verdade que o inteligível. Cada parte é então subdividida na mesma proporção em que foi dividida a linha como um todo. As quatro seções correspondem quatro estados da mente, cada um mais claro e certo que o anterior³⁵. Cito, então, a passagem da República a que Heisenberg parece se referir:

E agora você pode tomar, como correspondente a estas quatro seções, estes quatro estados da mente: a inteligência (noesis) no mais alto, o pensamento (dianoia) no segundo, a fé (pistis) no terceiro, e no último a suposição (eikasia). A estes você pode arranjar como a termos em uma proporção, atribuindo a cada um m grau de clareza e certeza correspondente à medida na qual seus respectivos objetos possuem verdade e realidade³⁶.

Sigamos, enfim, com a descrição da passagem por Heisenberg³⁷.

Ele [Platão] distingue quatro estágios da percepção: o estado mais alto é chamado episteme e corresponde ao saber das coisas reais, à percepção e ao reconhecimento da sua natureza, como descrito na analogia. O segundo estágio é chamado pensamento discursivo, dianoia e pode ser alcançado por meio do estudo das ciências³⁸. Os dois últimos estágios se relacionam com os dois primeiros como a crença o faz com a compreensão. Elas são chamadas fé e crença (pistis) e suposição (eikasia)³⁹.

Heisenberg está, como dissemos, especialmente interessado na distinção platônica entre os dois primeiros estágios da percepção, *episteme* e *dianoia*. Ele os define desta forma:

importante é saber, no contexto, a que elas se referem. (Cf., por exemplo, *Mênon* 75 e, *Timeu* 28 b3-4, e sobretudo *Teeteto* 184 c-d).

³⁵ Plato, **The Republic**, Translated with introduction and notes by Francis McDonald Cornford, p. 221.

³⁶ Plato, **The Republic**, Translated with introduction and notes by Francis McDonald Cornford, VI (511e), p. 226.

³⁷ V. nota 33.

³⁸ Os leitores de Platão podem estranhar que Heisenberg se refira à *dianoia* como um estado que pode ser alcançado "por meio do estudo das ciências", uma vez que o texto de *República* VI refere-se explicitamente apenas à geometria e ciências afins (aritmética, astronomia, harmonia), isto é, às disciplinas que mais tarde serão chamadas matemáticas. Cabe-nos dizer, no entanto, que o uso da palavra ciência parece justificado pela interpretação de Heisenberg, que vê as ciências atuais como sendo fundamentalmente matemáticas e, sobretudo, como utilizando o método próprio das matemáticas, tal como descrito por Platão.

³⁹ Werner Heisenberg, "On the History of the Physical Interpretation of Nature" (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 32.

Episteme é precisamente aquele estado da consciência no qual se pode parar e para além do qual não é preciso mais investigar. Dianoia é a habilidade de analisar em detalhes o resultado da dedução lógica. É também aparente em Platão que apenas a episteme, o primeiro tipo de conhecimento, fornece uma conexão com o verdadeiro, o mundo essencial, ao passo que embora a dianoia renda de fato conhecimento, este é um conhecimento desprovido de valores⁴⁰.

De acordo com Heisenberg, Platão explica, detalhadamente, a natureza da *dianoia*, este nível de percepção e compreensão mais baixo que a *episteme*. Ele descreve também como podemos chegar a este estado de percepção por meio de um estudo da natureza: “É importante e característico que Platão ressalte apenas este aspecto da ciência [*dianoia*], aquele que nós podemos chamar ocasionalmente agora de o seu aspecto ‘formal’⁴¹”. As leis matemáticas subjacentes aos fenômenos naturais parecem ser, para Platão, de primeira importância se comparadas com as variadas mudanças pelas quais passam estes fenômenos. Os fenômenos são, na pesquisa, adjuntos sem relevância. E a ciência não deve ter outra tarefa senão a procura das leis eternas dos fenômenos em constante mutação. É por esta razão que, aos olhos de Heisenberg, Aristóteles tinha uma melhor teoria da ciência que Platão⁴².

Mas em que esta distinção (*dianoia* e *episteme*) é útil para a questão a que se coloca Heisenberg: a da possibilidade de uma ‘explicação’ física da natureza? Ora, para ele, é precisamente deste modelo de ciência que parte a física abstrata de Galileu. Cito Heisenberg:

No lugar de uma preocupação com os processos da natureza como ela nos rodeia, ele [Galileu] está ocupado com a formulação matemática de um limite a que se pode chegar apenas sob condições extremas. A possibilidade de formular leis a partir dos processos naturais de uma maneira simples e precisa é alcançada em se sacrificando a aplicação destas leis de modo imediato e direto aos eventos naturais (...) Esta parte do desenvolvimento é finalmente e consistentemente concluída pelo gênio de Newton⁴³.

Devemos retomar, neste ponto, a questão acerca da mudança na noção de ‘compreensão’ da natureza que se produz no período inaugurado pela ciência de

⁴⁰ Heisenberg, Werner, “Goethe’s View of Nature and the World of Science and Technology” (1967), In: **Across the Frontiers**, p. 137.

⁴¹ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 33.

⁴² Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 171.

⁴³ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 34-35.

Galileu e Newton, a que fizemos referência no capítulo passado: uma modificação descontínua do conceito de natureza, ou, em outras palavras, uma transformação da posição do olhar do homem sobre a natureza.

Após o estabelecimento da mecânica newtoniana, inaugura-se um período histórico no qual os métodos desta mecânica foram sendo aplicados com sucesso a campos cada vez mais vastos da natureza. De acordo com Heisenberg,

Tentou-se, por meio de experiências, isolar determinadas partes do processo natural, observá-las objetivamente e compreender sua regularidade. Procurou-se, em seguida, formular matematicamente as relações descobertas e chegar a “leis” de validade incondicionada em todo o universo; assim se conseguiu, finalmente, mediante a técnica, o poder de aplicar aos nossos fins as forças da natureza. (...) À medida que aquele tipo de ciência progredia com êxito no seu caminho, ultrapassava progressivamente as fronteiras do domínio da experiência quotidiana e penetrava em campos remotos da natureza, só exploráveis mediante a técnica, que se ia desenvolvendo em ligação com a ciência⁴⁴.

O conceito de natureza, que antes se referia aos objetos sobre os quais temos conhecimento por meio da experiência ordinária, passou a abranger todos os campos da experiência aos quais o homem tinha acesso por meio da técnica⁴⁵. E o que era antes uma “representação destinada a transmitir uma imagem da natureza tanto quanto possível viva e sensível⁴⁶” adquiriu o sentido de uma descrição matemática. A atitude humana em relação à natureza mudou de uma atitude contemplativa para uma pragmática⁴⁷. Quanto a isso Heisenberg reitera:

Esta tendência geral da nova ciência também prenuncia um traço característico (...), aquele da ênfase no quantitativo. A demanda por condições experimentais precisas, medições acuradas, em terminologia exata e sem ambigüidades e uma apresentação matemática dos fenômenos idealizados determinou o aspecto desta ciência da natureza, e trouxe-lhe o nome de “ciência exata”⁴⁸.

Este é o processo de “autolimitação” a que nos referimos anteriormente que determina o caminho histórico da física, segundo uma primazia crescente da *dianoia* e, simultaneamente, um distanciamento progressivo da *episteme*. A

⁴⁴ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 9.

⁴⁵ A questão da técnica, a que não poderemos nos ater no presente trabalho, é cuidadosamente examinada por Heisenberg nos textos que compõem a coletânea editada sob o nome de **A Imagem da Natureza na Física Moderna**.

⁴⁶ Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 10.

⁴⁷ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 184-185.

⁴⁸ Heisenberg, Werner, “Scientific and Religious Truth” (1973), In: **Across the Frontiers**, p. 216-217.

história da física moderna é, para Heisenberg, sob a luz da distinção platônica entre os dois primeiros tipos de conhecimento, o pôr-se em evidência de uma relação de “exclusão mútua⁴⁹” cada vez mais nítida entre estas duas formas de compreensão:

Embora elas sejam, em um certo sentido, interdependentes uma da outra, elas estão, no entanto, uma em relação à outra, em uma relação de exclusão mútua. À medida que novos campos da física se abrem, à química e à astronomia, nós substituímos mais e mais facilmente o termo “interpretação da natureza” [Naturerklärung] por aquele, mais modesto, de “descrição da natureza” [Naturbeschreibung]. Torna-se cada vez mais claro que, ao curso desta evolução, nós temos nos ocupado não de um conhecimento imediato e direto, mas de uma compreensão analítica⁵⁰.

Ora, as leis de Newton representavam, como dissemos, uma idealização à qual se havia chegado por meio da limitação do mundo dos fenômenos às partes que podiam ser organizadas por meio dos conceitos de espaço, tempo, etc. A física clássica havia operado uma transformação na noção de compreensão, que se tornou uma compreensão analítica dos fenômenos ao invés de uma busca por princípios, e representava, ao mesmo tempo, “a mais clara expressão do conceito de matéria (*Dingbegriff*⁵¹)⁵²”.

O desenvolvimento bem sucedido da mecânica por Newton e da ótica e da eletricidade por Maxwell, bem como os grandes desenvolvimentos da química voltaram as atenções dos físicos novamente para o problema dos átomos do modo como os Gregos haviam-no colocado. Assim como na filosofia de Demócrito, as qualidades da matéria foram consideradas simples aparência: o aroma e a cor, a temperatura e a tenacidade não eram verdadeiras propriedades da matéria, mas resultados das ações recíprocas entre estas e os nossos sentidos. Com as novas ferramentas da ciência moderna os diferentes estados da matéria foram ‘explicados’ pela suposição de que

Os átomos estão numa ordem estrita no sólido, de que eles movem fortuitamente embora estejam firmemente compactados nos líquidos e de que eles se movem rapidamente como um enxame de abelhas com consideráveis distâncias

⁴⁹ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 34.

⁵⁰ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 34.

⁵¹ A melhor tradução para *Dingbegriff* é, de acordo com Chevalley, o termo “coisa”. Ver Chevalley, Catherine, “Physical Reality and Closed Theories in Werner Heisenberg’s Early Papers” In: **Theory and Experiment: Recent Insights and New Perspectives on Their Relation / edited by D. Batens and J. P. Bendegen**, p.165.

⁵² Heisenberg, Werner, “Questions of Principle in Modern Physics” (1935), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 44.

interatômicas no estado gasoso. Conseqüentemente as qualidades de densidade, forma e mobilidade dos átomos foram reduzidas às configurações geométricas dos átomos. A estas qualidades foi adicionada, no último século, aquela da temperatura. (...) As mudanças qualitativas das substâncias ao longo dos processos químicos podem ser retraçadas a mudanças nas configurações geométricas dos átomos. Os processos de eletrólise mostraram, ainda, que há átomos de eletricidade, prótons e elétrons, e o estudo da radioatividade mostra que estes átomos de eletricidade devem ser vistos como as partículas fundamentais de que todos os outros átomos se constituem.(...) O programa de Demócrito foi assim amplamente realizado, as qualidades visíveis da matéria poderiam ser retraçadas às propriedades de configurações dos átomos⁵³.

Esta concepção materialista sofreu, no entanto, um forte abalo com o advento da física atômica moderna: “Constatou-se, de fato, que aquela esperada realidade objetiva das partículas elementares constitui uma simplificação muito grosseira do estado real das coisas e que deveria ceder o lugar para concepções muito mais abstratas⁵⁴”. A novidade fundamental introduzida por Planck reavivou, por assim dizer, o problema a respeito do qual Platão e Demócrito se opuseram há uns vinte e cinco séculos atrás⁵⁵. Ainda consoante Heisenberg, “parece que, a despeito do tremendo sucesso que o conceito de átomo alcançou na ciência moderna, Platão estava muito mais próximo da verdade acerca da estrutura da matéria do que estavam Leucipo e Demócrito⁵⁶”.

Mas por que Heisenberg afirma ser a derrota da concepção de átomo da ciência moderna simultaneamente uma vitória de Platão?

Devemos iniciar dizendo que, de acordo com Heisenberg, a idéia de que a matéria pudesse ser dividida até que se chegasse às suas menores partes indivisíveis, os átomos –e seus componentes, os prótons, nêutrons e elétrons- foi derrotada quando Paul Dirac descobriu o pósitron, em 1928. “Até então, pensava-se que havia dois tipos de partículas fundamentais, elétrons e prótons, que, diferentemente da maior parte das outras partículas, eram imutáveis⁵⁷”. O ponto decisivo não foi, entretanto, a existência de uma nova partícula, pois muitas outras

⁵³ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 37.

⁵⁴ Heisenberg, Werner, “A Descoberta de Planck e os Problemas da Física Atômica” (1958), In: **A Problemas da Física Moderna**, p. 13.

⁵⁵ Heisenberg, Werner, “Planck’s Discovery and Atomic Theory” (1958), In: **Across the Frontiers**, p. 9-10.

⁵⁶ Heisenberg, Werner, “Natural Law and the Structure of Matter” (1970), In: **Across the Frontiers**, p. 105.

⁵⁷ Heisenberg, Werner, “The Nature of Elementary Particles” (1975), In: **Physics Today, March 1976**, p. 32.

partículas vieram a ser descobertas sem que os fundamentos da física fossem abalados, mas sim a descoberta de uma nova simetria⁵⁸. Continuo com Heisenberg:

Ao chamá-las de ‘partículas elementares’ nós estamos querendo dizer que elas não são compostas de partículas ainda menores, em contraste com os átomos químicos que podem, obviamente, ser separados em outras partes componentes. Mas isto não indica de modo algum que estas partículas elementares não possam ser transformadas. Pelo contrário, o transformar-se é uma característica das partículas elementares. Um fóton pode transformar-se em um elétron mais um pósitron, e, reciprocamente, um fóton pode ser originado de um elétron e um pósitron. Mas seria errado, ou pelo menos, não apropriado, dizer que o fóton é uma combinação de um elétron com um pósitron. Pois, do mesmo modo, um fóton pode ser produto de um elétron quando, por exemplo, este elétron salta de um estado a outro. Outrossim, um próton pode transformar-se em um nêutron e um pósitron, ou um nêutron em um próton e um elétron. Mas dificilmente pode-se dizer que um próton é feito de um nêutron e um pósitron. Todas elas são verdadeiras partículas elementares, das quais a conversibilidade é uma das propriedades características⁵⁹.

Como vimos, as pesquisas físicas haviam indicado que as partículas elementares podem transformar-se umas nas outras praticamente sem nenhuma restrição (levando-se em consideração que esta transformação deve respeitar as leis da conservação da massa, energia, etc.⁶⁰). Conseqüentemente, o conceito de ‘partículas elementares’ sofreu, na física moderna, uma mudança; pode-se dizer que elas constituem os ‘últimos e indivisíveis blocos de matéria’ apenas em um sentido muito limitado.

A existência dos átomos, por conseguinte, não constituía, talvez, um fato último, incapaz de explicação ulterior. Essa existência poderia ser atribuída, como em Platão, à ação de leis da natureza matematicamente formuláveis, isto é, ao efeito de simetrias matemáticas⁶¹.

A característica revelada pelo quantum de ação de Planck levou à idéia de que a descontinuidade, do mesmo modo que a existência dos átomos, poderia ser “manifestações conjuntas de uma lei da natureza, de uma estrutura matemática da natureza, e que a sua formulação poderia conduzir a uma compreensão unificada da estrutura da matéria, que os filósofos gregos haviam procurado⁶²”.

⁵⁸ Heisenberg, Werner, “Cosmic Radiation and Fundamental Problems in Physics” (1975), In: **Across the Frontiers**, p. 57-58.

⁵⁹ Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics** (1948), p. 57.

⁶⁰ *Ibidem*, p. 49.

⁶¹ *Ibidem*, p. 57.

⁶² Heisenberg, Werner, “A Imagem da Natureza na Física Moderna” (1953), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 13.

Cabe-nos, portanto, citar ao menos uma passagem relevante do *Timeu* de Platão:

Vamos então distribuir as figuras, cuja formação nós descrevemos anteriormente, entre fogo, terra, água e ar.

À terra vamos atribuir a figura cúbica, pois dos quatro tipos a terra é o mais imóvel e o mais plástico dos corpos. A figura cujas bases são as mais estáveis devem responder melhor àquela descrição; e como base, se tomarmos os triângulos que admitimos início, a face do triângulo com os lados iguais é, por natureza, mais estável que aquela do triângulo cujos lados são desiguais; e além disso, das duas superfícies equiláteras respectivamente compostas dos dois triângulos, o quadrado é necessariamente uma base mais estável do que a do triângulo, tanto em suas partes quanto como um todo. (...) E dos que sobraram, o menos móvel [devemos designar] à água, o mais móvel ao fogo, e a figura intermediária ao ar. (...) Então, tomando todas estas figuras, aquela com a menor quantidade de faces (pirâmide) deve ser a mais móvel (...); a segunda (octaedro) deve ficar em segundo lugar (...) e a terceira (icosaedro), em terceiro⁶³.

Nas palavras do próprio Heisenberg,

Para Platão, (...) as menores partículas de matéria são, por assim dizer, apenas formas geométricas. [Ele] considera as menores partes dos elementos idênticas aos corpos regulares da geometria. Como Empédocles, admite que os quatro elementos são terra, água, ar e fogo. Concebe as menores partículas do elemento terra como cubos, as menores partículas do elemento água como icosaedros; identicamente, imagina como tetraedros as partículas elementares do fogo e, como octaedros as do ar. A forma é característica para as propriedades do elemento. Em contraste com Demócrito, em Platão as partículas menores não são inalteráveis ou indestrutíveis; ao contrário, podem ser resolvidas em triângulos ou ser reconstruídas a partir de triângulos. Nessa teoria, portanto, elas já não são denominadas átomos. Os próprios triângulos deixam de ser matéria, pois não possuem dimensões espaciais. Assim, em Platão, no limite mais baixo das séries das estruturas materiais, não mais existe efetivamente algo material, mas uma estrutura matemática, se preferirdes, uma construção intelectual. A raiz última a partir da qual o mundo pode ser uniformemente inteligível é, segundo Platão, a simetria matemática, a imagem, a idéia⁶⁴.

Embora na filosofia de Demócrito os átomos não possuíssem qualidades como cor, sabor, etc, eles continuavam a ocupar lugar no espaço, além de serem admissíveis asserções geométricas a seu respeito (asserções estas que não requeriam uma análise ulterior). Ora, se a física quântica está muito mais próxima à filosofia de Platão que à de Demócrito, isto se deve ao fato de que na física moderna os átomos perdem inclusive esta última característica: eles sequer possuem qualidades geométricas. Em outras palavras, a idéia de um átomo munido

⁶³ Plato, *Timaeus*, 55d – 56b, p. 222, Tradução Francis McDonald Cornford.

⁶⁴ Heisenberg, Werner, *Nuclear Physics* (1948), p. 57.

de propriedades representáveis e constituído pelas últimas partículas indivisíveis da matéria é substituída por um átomo absolutamente destituído de qualidades e que não permite de si qualquer representação visualizável⁶⁵:

O átomo na física moderna pode apenas ser simbolizado por uma equação parcial diferencial em um espaço multidimensional abstrato. Apenas um experimento força o átomo a indicar uma posição, uma cor e uma quantidade de calor. Todas as qualidades do átomo na física moderna são derivadas, ele não tem nenhuma propriedade física imediata e direta, i.e. qualquer tipo de concepção visual que nós possamos querer designar é (...) enganosa⁶⁶.

A relação entre as duas primeiras formas de aproximação de Heisenberg com a filosofia de Platão – a separação entre *episteme* e *dianoia* de um lado e a utilização das simetrias matemáticas encontradas no *Timeu* de outro - é tomada como uma nova dificuldade por Chevalley: “Se o sentido desta história filosófica é aquele de uma preeminência crescente do conhecimento discursivo, como explicar que o retorno aos gregos se apresente também, em Heisenberg, como um retorno a uma ontologia das simetrias⁶⁷”? Devemos observar, no entanto, que esta dificuldade é aparente e que, diferentemente do que pensa Chevalley, pode ser eliminada caso se examine de modo mais atento à filosofia do próprio Platão. Não há, aos nossos olhos, a necessidade de recorrer a um elemento exterior a estas duas referências como o faz Chevalley, para quem Heisenberg supera a dificuldade através da referência a Aristóteles (aquilo de que aqui cuidaremos em seguida). É fato que a matemática é o ponto principal nas duas passagens dos textos de Platão a que se refere Heisenberg. No entanto, o tratamento e conseqüentemente a questão colocada é diferente em cada uma. Na *República*, trata-se das diferentes formas da utilização da matemática como o método de aproximação à natureza a ser utilizado pelas ciências. No *Timeu*, a matemática é aquilo de que deve se ocupar a ontologia. Estamos certos de que Heisenberg estava perfeitamente ciente da diferença entre as duas abordagens.

Voltemo-nos, pois ao terceiro e último exemplo da referência aos gregos feita por Heisenberg. Trata da interpretação da noção quântica de probabilidade por meio do conceito de *potentia* de Aristóteles. A referência a Aristóteles, uma

⁶⁵ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 174.

⁶⁶ Heisenberg, Werner, “On the History of the Physical Interpretation of Nature” (1932), In: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 38.

⁶⁷ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 173.

das mais insistentes e importantes na obra de Heisenberg, é a terceira e última à qual nos ateremos nesta pesquisa. Sigamos, então, com algumas considerações a este respeito.

É interessante que nos voltemos para a *Metafísica* de Aristóteles, a obra em que ele estuda a ciência que é superior a todas, aquela que tem por objeto as causas e princípios do ser enquanto ser⁶⁸. Para Aristóteles, o ser tem vários significados mas todos eles implicam, de várias maneiras, uma referência unitária ao primeiro e fundamental significado: a substância⁶⁹. Esta substância é entendida em pelo menos quatro significados principais, dos quais o primeiro a ser examinado é o de substrato. O substrato é, em primeiro lugar a matéria, em segundo a forma, e em terceiro o conjunto matéria e forma:

Considera-se que substância de alguma coisa seja essência, o universal, o gênero e, em quarto lugar, o substrato. O substrato é aquilo de que são predicadas todas as outras coisas, enquanto ele não é predicado de nenhuma outra. Por isso devemos tratar dele em primeiro lugar, pois o substrato primeiro parece ser substância. E chama-se substrato primeiro, em certo sentido, a matéria, noutro sentido a forma e num terceiro sentido o que resulta do conjunto de matéria e forma⁷⁰.

Esta relação entre matéria e forma é, seguindo a análise de Ross, tratada no livro Z da *Metafísica* de Aristóteles, em sua maior parte, “como uma distinção existente dentro de uma coisa individual, num dado momento da sua história, como a distinção entre a essência de uma coisa tal como é formulada na definição, e o substrato incognoscível, sem o qual a essência não pode existir⁷¹”.

À medida que a discussão é levada adiante, no entanto, Aristóteles passa a prestar mais atenção à “passagem das coisas de um estado relativamente informe a um estado relativamente formado, e as expressões ‘potência’ e ‘ato’ passam a ser empregues⁷²”.

Novamente, em Aristóteles,

⁶⁸ Aristóteles, *Metafísica*, Livro Γ, 1003a 20 – 1003a31, p. 131.

⁶⁹ Aristóteles, *Metafísica*, Livro Γ, 1003b31 - 1003b11, p. 131-133. Ainda em *Metafísica*, Livro Z, 1028a9 – 1028a15: “O ser tem muitos significados, como estabelecemos anteriormente (...). De fato, o ser significa, de um lado, a essência e algo determinado, de outro, qualidade ou quantidade e cada uma das outras categorias. Mesmo sendo dito em tantos significados, é evidente que o primeiro dos significados do ser é a essência, que indica substância”.

⁷⁰ Aristóteles, *Metafísica*, Livro Z, 1028b 33 – 1029a 3, p. 293.

⁷¹ Ross, Sir David, *Aristóteles*, p. 182.

⁷² Ross, Sir David, *Aristóteles*, p. 182.

O ato é o existir de algo, não porém no sentido em que dizemos ser em potência: e dizemos em potência, por exemplo, um Hermes na madeira, a semi-reta na reta, porque eles poderiam ser extraídos, e dizemos pensador também aquele que não está especulando, se tem a capacidade de especular; mas dizemos em ato o outro modo de ser da coisa. O que queremos dizer fica claro por indução a partir dos casos particulares, pois não é necessário buscar definição de tudo, mas é preciso contentar-se em compreender intuitivamente certas coisas mediante a analogia. E o ato está para a potência como, por exemplo, quem constrói está para quem pode construir, quem está desperto para quem está dormindo, quem vê para quem está de olhos fechados mas tem a visão, e o que é extraído da matéria para a matéria e o que é elaborado para o que não é elaborado. Ao primeiro membro dessas diferentes relações atribui-se a qualificação de ato e ao segundo a de potência⁷³.

E, enfim, nas palavras de Heisenberg a matéria em Aristóteles é:

Em si mesma, não uma realidade, mas apenas uma possibilidade, a *potentia*⁷⁴; ela existe apenas por meio da forma. No processo natural, a “essência,” como Aristóteles a denomina, passa da mera possibilidade à atualidade por meio da forma. A matéria de Aristóteles certamente não é uma matéria específica como água ou ar, tampouco ela é simplesmente espaço vazio; ela é um tipo de substrato corpóreo indefinido que tem em si a possibilidade de tornar-se atual por meio da forma. Os exemplos típicos desta relação entre matéria e forma na filosofia de Aristóteles são os processos biológicos no qual a matéria toma forma de modo a se tornar o organismo vivo, e a atividade criadora e formadora do homem. A estátua está potencialmente no mármore antes de ser esculpida pelo escultor⁷⁵.

A noção de potencialidade é a saída encontrada por Aristóteles para o antigo problema do não-ser. Parmênides foi o primeiro filósofo a levantar a questão do não-ser. Em seu poema⁷⁶, ele afirma haver apenas duas vias de investigação, duas possibilidades de investigação logicamente coerentes, que se excluem mutuamente: a via que afirma “é” e a que afirma “não é”. Mas a via do “não é” é rejeitada por Parmênides como ininteligível: é impossível conhecer o que não é, uma vez que “o que não é”, não é. Como pode algo que não é vir a ser conhecido? O pensamento deve se afastar dessa via. Para Aristóteles, no entanto a passagem do não-ser ao ser pode ser explicada através da noção de potencialidade: uma coisa não se torna atualmente algo a partir do não-ser absoluto, mas a partir de algo que ela era potencialmente. Nas palavras de Ross,

⁷³ Aristóteles, **Metafísica**, Livro Θ, 1048a 32 – 1048b 5, p. 409-410.

⁷⁴ Ver Aristóteles, **Metafísica**, Livro H, 1042a 25 - 28, p. 371: “Todas as substâncias sensíveis têm matéria. E substância é o substrato, o qual, em certo sentido significa matéria (chamo matéria o que não é algo determinado em ato, mas algo determinado só em potência), num segundo sentido significa a essência e a forma (a qual, sendo algo determinado, pode ser separada pelo pensamento) (...).”

⁷⁵ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p. 135-136.

⁷⁶ Kirk, Raven & Schofield, **Os Filósofos Pré-socráticos, História Crítica com Seleção de Textos**, p. 252-273.

Aristóteles coloca em evidência um ponto real, a saber que a mudança não é catastrófica. Não devemos acreditar que A, sendo absolutamente não-B, se torna subitamente B. Considerai A mais atentamente e descobrireis aí já presentes algumas das condições do estado B; se assim não fosse, A jamais se tornaria B⁷⁷.

Contudo, embora a mudança não possa ser explicada sem que se recorra ao conceito de potencialidade, ela não pode ser explicada exclusivamente por este conceito.

Nada passa da potencialidade sem a ação de algo atual. A não é potencialmente B a menos que possa tornar-se atualmente B, e uma vez que isto pode apenas se passar a partir da ação de algo já atual, a sua própria potencialidade ser B pressupõe uma atualidade. Com efeito, a potencialidade pressupõe sempre, e em todos os casos, a atualidade possuindo nesta as suas raízes⁷⁸.

Vejamos a que contexto Heisenberg aplica a *potentia* aristotélica. Cito mais uma vez Chevalley: “Para Heisenberg, o problema crucial colocado em primeiro plano pela física quântica é certamente aquele da compreensão da *transição do possível ao real*⁷⁹”. Devemos retomar apenas alguns pontos da questão da redução descontínua do pacote de ondas operada pelo ato da observação em mecânica quântica que foi tratada de modo mais detalhado no capítulo anterior.

Trata-se de um dos traços mais estranhos da física quântica, que é, segundo Chevalley, que

a equação de Schrödinger, ela mesmo determinista, não pode receber nenhuma interpretação física direta, mas somente uma representação estatística. Ora, este caráter estatístico não intervém como uma medida do grau de imperfeição do nosso conhecimento do estado real do sistema considerado, mas como um aspecto intrínseco dos processos quânticos. (...) O processo individual, em mecânica quântica é, com efeito, pensado por meio do conceito de “amplitude de probabilidade”; o objeto, no sentido estrito da física clássica, desaparece; ele não é mais alguma coisa localizada no espaço e no tempo, de que se poderia seguir a evolução – a trajetória – e predizer, graças a uma lei formalizada desta evolução, o componente futuro. O conceito fundamental que permite descrever um sistema é o de vetor de estado, que não é suscetível de nenhuma interpretação intuitiva; as leis tornam-se intrinsecamente estatísticas e a possibilidade de “pôr a mão” sobre um objeto individual no sentido tradicional se evanesce⁸⁰.

⁷⁷ Ross, Sir David, **Aristóteles**, p. 182.

⁷⁸ Ross, Sir David, **Aristóteles**, p. 183.

⁷⁹ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 176.

⁸⁰ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 176.

Como dissemos anteriormente, consoante Heisenberg “o conceito de função de probabilidade não permite uma descrição do que acontece entre duas observações⁸¹”.

É, certamente, tentador dizer 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-lhe qual. Esse seria um argumento razoável em física clássica. Em teoria quântica, porém, teria sido um abuso de linguagem que (...) não poderia ser justificado.

Devemos nos lembrar que antes da interação entre instrumento e objeto a função de onda é um caso puro representado no espaço abstrato de Hilbert. Ela está essencialmente relacionada a um conjunto de processos de medição possível. Ora, Heisenberg afirma que este conjunto de processos representa uma potencialidade a ser atualizada pelo processo de medição. Nas suas próprias palavras: “A ‘redução dos pacotes de onda’ descontínua, que não pode ser derivada da equação de Schrödinger, é (...) uma passagem do possível ao atual⁸²”. Esta passagem é, como dissemos, operada pelo observador que altera a representação matemática de modo descontínuo ao registrar o comportamento do aparato de medição como atual. O observador tem, assim, a função de registrar decisões, ou seja, processos no espaço e tempo. Este registro, a transição do possível para o atual, é absolutamente necessária não podendo ser omitida da interpretação da teoria quântica⁸³. De acordo com Heisenberg:

Na teoria quântica a medição é em si mesma um estado objetivo dos acontecimentos, como na física anterior; mas a interferência da medição no curso objetivo da ocorrência atômica a ser medida torna-se problemática, uma vez que a medição interfere na ocorrência e não pode mais ser completamente separada da ocorrência em si mesma. Uma descrição intuitiva dos processos atômicos, tal como teria sido possível há cinquenta anos atrás, torna-se conseqüentemente impossível. Não podemos mais apreender os processos naturais no campo atômico como os processos em uma escala maior. (...) Para o curso subsequente do processo atômico nós podemos usualmente prever apenas probabilidades. Não são mais os eventos objetivos, mas antes as probabilidades para a ocorrência de certos eventos que podem ser postulados na fórmula matemática. Não é mais o acontecimento atual em si mesmo, mas antes a possibilidade deste acontecimento – a *potentia*, para aplicar o conceito da filosofia de Aristóteles – que está sujeito a leis naturais estritas⁸⁴.

⁸¹ *Ibidem*, p. 40.

⁸² Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 27.

⁸³ *Ibidem*, p. 22.

⁸⁴ Heisenberg, Werner, “Planck’s Discovery and the Philosophical Problems of Atomic Theory”, **Across the Frontiers**, p. 16.

É também digno de nota o que Heisenberg afirma a propósito da teoria BKS (Bohr, Kramers e Slater), que mencionamos no primeiro capítulo, e cujo conceito decisivo era o de que as leis da natureza determinam não a ocorrência de um evento, mas a probabilidade de um evento verificar-se. Para ele, as ondas probabilísticas de Bohr, Kramers e Slater podiam ser

Interpretadas como uma formulação quantitativa do conceito de *dynamis*, possibilidade, ou na versão latina posterior, *potentia*, na filosofia de Aristóteles. A concepção de que os eventos não estão determinados de modo peremptório, mas que a possibilidade ou a “tendência” para que um evento ocorra apresenta uma espécie de realidade – uma certa camada intermediária de realidade, meio caminho entre a realidade maciça da matéria e a realidade intelectual da idéia ou da imagem – este conceito desempenha um papel decisivo na filosofia aristotélica. Na teoria quântica moderna, tal conceito assume uma nova forma; é formulado quantitativamente como probabilidade e sujeito a leis da natureza que são expressas matematicamente. As leis da natureza formuladas em termos matemáticos não mais determinam os próprios fenômenos, mas a possibilidade de ocorrência, a probabilidade de que algo ocorrerá⁸⁵.

Não se trata mais de eventos objetivos, mas apenas das probabilidades de ocorrência de tais eventos. O que se apresenta às leis naturais estritas, portanto, não é mais o que antes ocupava o lugar da realidade atual (ou efetiva), mas sim o conceito de *potentia* da filosofia de Aristóteles. O conceito de *potentia* introduziu, para Heisenberg, “algo que se situa a uma igual distância entre a idéia de um evento e o evento atual, um estranho tipo de realidade entre a possibilidade e a realidade⁸⁶”. Em outros termos, Heisenberg busca em Aristóteles um meio de se pensar no que lhe parece uma revolução na significação do conceito de realidade⁸⁷, um modo de se pensar a relação do possível ao real efetivo como uma relação entre dois tipos de realidade⁸⁸. Trata-se, de uma diferença entre a totalidade da determinação possível de uma *res* e o modo de existência ou de realidade atual (ou efetiva) do fenômeno, em outras palavras, daquilo a que nós podemos ter acesso

⁸⁵ Heisenberg, Werner, “A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica” (1958), In: **Problemas da Física Moderna**, p. 16. Ver também, Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 12.

⁸⁶ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy** (1955), p.28-29.

⁸⁷ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 178.

⁸⁸ *Ibidem*, p. 181.

por meio das nossas percepções⁸⁹. Como dissemos, as teorias físicas sempre lidaram e sempre lidarão com “realidade atual”, que é aquela de que podemos ter percepção e que é descritível por meio dos conceitos clássicos; o que é válido também na mecânica quântica. “O ‘atual’ tem, em mecânica quântica, o mesmo papel decisivo que tem na física clássica⁹⁰”. De acordo com a interpretação de Copenhague, é absolutamente necessário que falemos dos resultados dos experimentos por meio dos conceitos clássicos que compõem a nossa “realidade objetiva”. Isto é, não se trata de abandonar a descrição dos processos que podem ser simplesmente descritos por conceitos clássicos e que compõem nossa “realidade” no seu sentido próprio⁹¹, mas apenas de não extrapolar esta realidade aos objetos quânticos. Nas palavras de Heisenberg,

Se quisermos penetrar por detrás desta realidade, nos detalhes dos eventos atômicos, os contornos deste mundo “objetivamente real” se dissolvem – não na bruma de uma nova idéia de realidade ainda não suficientemente clara, mas na transparente clareza de uma matemática cujas leis governam o possível, e não o atual⁹².

Desta definição não se poderia concluir que a mecânica quântica nega toda realidade aos fenômenos físicos. De acordo com Chevalley,

Se, para Heisenberg, “a idéia de coisas objetivamente reais deve ser (...) de uma certa maneira abandonada⁹³”, (...) e se é impossível falar da existência dos fenômenos atômicos “entre duas observações sucessivas”, a razão é simplesmente que estas últimas não se apresentam jamais como as “coisas”, ao oposto dos objetos da física clássica.

Percebemos então que se para Heisenberg a história filosófica da física se enraíza na Antigüidade grega é porque é possível a partir dela apontar para um problema novo, aquele de uma fragmentação das “ordens de realidade”,

Que fez com que o conhecimento não pudesse mais ser concebido nem como uma participação nas Idéias nem como a decodificação de um livro imutável escrito em caracteres matemáticos, nem como restrição ao puro jogo das representações. Pode-se possivelmente dizer que, para Heisenberg, a ontologia é parcialmente

⁸⁹ Chevalley, Catherine, “Physical Reality and Closed Theories in Werner Heisenberg’s Early Papers” In: **Theory and Experiment: Recent Insights and New Perspectives on Their Relation / edited by D. Batens and J. P. Bendegen**, p.

⁹⁰ Werner Heisenberg, “The Development of the Interpretation of Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p.28.

⁹¹ *Ibidem*, p.28.

⁹² *Ibidem*, p.28.

⁹³ *Ibidem*, p.27.

cognoscível – pela via da abstração matemática -, enquanto a redução à dianoia exprime por seu lado a impossibilidade qualquer ontologia naturalista, imposta pelo papel que desempenha doravante a probabilidade na própria determinação do objeto da física e pelo desaparecimento correlativo de qualquer critério clássico de individuação⁹⁴.

A colocação destas questões tem por resultado o soçobramento da crença de que a física é ou pode ser um conhecimento completo ou a verdadeira tradução do que acontece na natureza. Torna-se sem sentido derivar qualquer visão geral de mundo unicamente a partir da física. A física clássica tinha, de acordo com Heisenberg, “a crença irracional de era possível obter uma compreensão da totalidade do mundo a partir de uma pequena parte dele⁹⁵”.

O arcabouço geral do pensamento humano do século XIX foi também uma crença na confiança no método científico e em termos racionais precisos, e levou a um ceticismo geral no que diz respeito aos conceitos da linguagem natural que não se encaixavam no arcabouço do pensamento científico – por exemplo, aqueles da religião. A física moderna aumentou este ceticismo de muitas maneiras; mas ela também o voltou contra a supervalorização de conceitos científicos precisos, contra uma visão muito otimista a respeito do progresso de uma maneira geral, e, finalmente, contra o próprio ceticismo. O ceticismo contra conceitos científicos precisos não significa que deva haver uma limitação definida para a aplicação do pensamento racional. Ao contrário, pode-se dizer que esta habilidade humana de compreender pode ser, em um certo sentido, ilimitada. Mas os conceitos científicos existentes cobrem apenas uma parte muito limitada da realidade, e a outra parte que ainda não foi compreendida é infinita⁹⁶.

⁹⁴ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 181.

⁹⁵ Heisenberg, Werner, “Recent Changes in the Foundations of Exact Science” (1934), in: **Philosophic Problems of Nuclear Science**, p. 23.

⁹⁶ Heisenberg, Werner, **Physics and Philosophy**, p. 189.

5

Conclusão

Nosso trabalho principal foi o de observar as relações que Heisenberg estabelece entre sua interpretação da mecânica quântica e a filosofia grega.

Suas referências aos gregos não se restringem, como dissemos, aos três casos para os quais voltamos nossas atenções. De fato, são vários os textos em que Heisenberg se esforça por expor os fundamentos da filosofia grega que são relevantes para o desenvolvimento da ciência de seu tempo e, para tanto, ele se refere, por exemplo, a Parmênides, Anaximandro, Anaxágoras, Empédocles, Pitágoras e Heráclito. No entanto, acreditamos serem as referências sobre as quais nos concentramos aquelas que lhe parecem solucionar ou pelo menos indicar caminhos para os impasses filosóficos resultantes do desenvolvimento da ciência, um processo histórico em escala mundial¹, cujo caráter problemático tornou-se evidente a partir do acontecimento da física moderna. Cabe-nos, portanto, retomar, ainda que muito sucintamente, os casos a que nos ativemos no terceiro capítulo deste trabalho.

É preciso dizer, primeiramente, que, para Heisenberg, o pensamento grego representa a base do pensamento ocidental: “toda a nossa vida cultural, toda a nossa maneira de agir, de pensar e de sentir tem suas raízes na substância espiritual do Ocidente, quer dizer, numa entidade espiritual que apareceu na Antiguidade com a arte, a poesia e a filosofia dos Gregos²”. Mas, mais importante para nós é o fato de que pensamento antigo representa a origem comum das diferentes ciências, isto é, o pensamento científico como um todo tem suas raízes no pensamento grego. Mais precisamente na capacidade dos gregos de formular questões acerca de princípios que pudessem sistematizar a vasta gama dos fenômenos da natureza, tornando-os acessíveis ao pensamento humano. “Quem estudou a filosofia grega esbarra a cada passo com esta capacidade de formulação teórica e pode exercitar-

¹ Heisenberg, Werner, **A Parte e o Todo** (1969), p.228.

² Heisenberg, Werner, “Relações entre Cultura Humanística, Ciência e Ocidente” (1949), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 52.

se, lendo os gregos, no uso da mais poderosa ferramenta espiritual que o pensamento ocidental conseguiu criar³”.

O que se observa, contudo, nos escritos de Heisenberg é que a necessidade de retomar os gregos se dá não somente pelo fato de eles serem a origem do pensamento tal como ele se apresenta atualmente, mas também porque lá se encontrava uma noção de inteligibilidade, uma noção de “compreensão” da natureza que deve ser reencontrada. A ciência dos princípios ou da substância cujo objetivo principal era a compreensão qualitativa do mundo vai sendo substituída ao longo do tempo por uma ciência que busca uma compreensão analítica das qualidades. É a transformação de uma ciência capaz de gerar uma imagem viva e sensível do mundo em direção a uma que se preocupa em dar uma descrição matemática da natureza. Este processo de autolimitação pelo qual a ciência passa é descrito por Heisenberg em termos platônicos: trata-se da passagem da *episteme* para a *dianoia*, o afastamento da ciência da experiência imediata como encontramos em Aristóteles, na direção de um modelo de ciência matematizada de inspiração platônica.

Um segundo aspecto da referência aos gregos em Heisenberg é a retomada da oposição entre Platão e Demócrito no que concerne à constituição da matéria. Enquanto a tradição científica materialista julga serem os átomos os últimos blocos indivisíveis da matéria, Heisenberg opta pelos sólidos platônicos. Até a descoberta do pósitron por Dirac, pensava-se que havia dois tipos de partículas fundamentais imutáveis, os prótons e os elétrons. Esta descoberta, bem como outros desenvolvimentos subsequentes da física⁴ mostraram, no entanto, que as partículas da física moderna são representações de grupos de simetrias e, afirma Heisenberg, nesta medida elas se parecem com os corpos simétricos da filosofia de Platão. “Em Platão, no limite mais baixo das séries das estruturas materiais, não existe mais efetivamente algo material, mas uma forma matemática, se preferirdes, uma construção intelectual⁵”.

³ Heisenberg, Werner, “Relações entre Cultura Humanística, Ciência e Ocidente” (1949), In: **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, p. 53.

⁴ A descoberta da radioatividade artificial por Frédéric Joliot e Irene Curie, a observação de partículas altamente energéticas nos anos 30, a descoberta dos pions por Cecil Powell em 1940, etc. Ver Heisenberg, Werner, “The Nature of Elementary Particles” (1975), In: **Physics Today**, **March 1976**, p. 32-33.

⁵ Heisenberg, Werner, “A Descoberta de Planck e os Problemas Filosóficos da Física Atômica ” (1958), In: **Problemas da Física Moderna**, p. 12.

O terceiro caso por nós examinado é o da utilização da noção de *dynamis* aristotélica para a compreensão da redução descontínua do pacote de ondas efetuada pelo ato de observação na mecânica quântica. Esta noção permite pensar a realidade não mais por meio da dicotomia entre sujeito e objeto instaurada com a física clássica e a filosofia moderna, mas por meio da idéia de uma realidade atual e uma realidade potencial. Trata-se, como afirma Chevalley, da recusa à redução da noção de individuação que aparece no período moderno⁶: “Podemos dizer que o estado do sistema fechado representado por um vetor de Hilbert é, certamente, objetivo, mas não real, e que a idéia clássica de ‘coisas objetivamente reais’ deve ser, nesta medida, abandonada⁷”.

Concordamos com Chevalley quando ela afirma que a referência aos gregos permite exprimir uma insatisfação no que diz respeito à ininteligibilidade da ciência técnica bem como deixar explícita a recusa, por parte da física quântica, dos princípios da interpretação da natureza que havia sido proposta pela filosofia moderna⁸.

Devemos discordar, no entanto, de que a presença dos gregos seja apenas “uma presença negativa, uma pura função interpretativa⁹” e de que tudo se passe como se “as filosofias platônica e aristotélica devessem seu papel, em Heisenberg, ao fato de que elas são exteriores à filosofia moderna¹⁰”. Não podemos negar que este seja, de fato, um dos aspectos desta referência. Ele não é, no entanto, o único a que devemos dar atenção. Se o exame da filosofia grega elaborado por Heisenberg não consiste propriamente em uma retomada fiel às temáticas elaboradas pelos antigos (a questão de saber se isto é possível mesmo entre os comentadores destes filósofos é, desde sempre, uma questão em aberto), isto não significa que a função deste exame seja apenas uma função negativa.

Julgamos ser necessário ressaltar, porém, que não se trata de uma discordância completa, mas de uma diferença na ênfase que se dá a determinados aspectos do problema, como por exemplo a possibilidade de pensar, a partir da *dynamis* aristotélica, nos níveis (ou ordens) de realidade que sabemos ser o foco

⁶ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In : **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 153.

⁷ Heisenberg, Werner, “The Development of the Interpretation of the Quantum Theory” (1955), In: **Niels Bohr and the Development of Physics**, p. 37.

⁸ *Ibidem*, p. 152.

⁹ *Ibidem*, p. 152.

¹⁰ Chevalley, Catherine, “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, p. 33

central do *Manuscrito de 1942*, obra que, pela sua complexidade, não pudemos examinar no presente trabalho.

Esta diferença de ênfase explica o porquê de haver também uma diferença metodológica entre o trabalho aqui efetuado e aquele de Chevalley. Se Chevalley julga ser arriscada a comparação com os textos originais a que Heisenberg se refere¹¹, acreditamos que esta busca rendeu, nesta dissertação, resultados bastante frutíferos. Ainda assim, pensamos, junto com Chevalley que, se “certas perguntas encontraram-se, assim, reabertas, (...) pode-se considerar que sua simples formulação é um trabalho filosófico ainda em curso¹²”.

¹¹ Chevalley, Catherine, “La Physique Quantique et les Grecs”, In: **Nos Grecs et Leurs Modernes / textes réunis par Barbara Cassin**, p. 178, nota 84.

¹² *Ibidem*, p. 187.

Referências bibliográficas

ARISTÓTELES. **Metafísica**, Ensaio introdutório, texto em grego com tradução e comentário de Giovanni Reale, Volumes II e III, São Paulo, Edições Loyola, 2002.

_____. **Physics (books I-IV)**, With an english translation by Philip H. Wicksteed and Francis M. Cornford, Cambridge, Massachusetts, London, England, Harvard University Press, 1996.

BELLER, M. “Bohr, Niels”, “Heisenberg, Werner”, In: **Routledge Encyclopedia of Philosophy, Version 1.0.**, London, Routledge, 1998.

BOHR, N. **Física Atômica e Conhecimento Humano**, ensaios 1932-1957, Rio de Janeiro, Editora Contraponto, 2000.

BORN, M. **Physics in my generation**. New York, Springer-Verlag Inc., 1969.

_____. **The Correspondence Between Albert Einstein and Max and Hedwig Born, from 1916 to 1965**. New York, Walker and Company, 1971.

BRANSDEN, B. H. & Joachain, C. J. **Introduction to Quantum Mechanics**. New York, Longman Scientific & Technical, 1989.

BUNGE, M. **Philosophy of Physics**, Dordrecht-Holand/Boston - U.S.A., D. Reidel Publishing Company.

CASSIDY, D. C. **Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg.**, New York, W. H. Freeman and Company, 1992.

CAYGILL, Howard, **Dicionário Kant.**, Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor Ltda, 2000.

CHEVALLEY, C. “Introduction”, In: Heisenberg, Werner, **La Nature Dans La Physique Contemporaine**, Paris, Éditions Gallimard, 2000.

_____. “Introduction”, In : Heisenberg, Werner, **Philosophie, Le Manuscrit de 1942**, Paris, Éditions Gallimard, 2000..

_____. “Introduction”, “Glossaire”, In : Niels Bohr, **Physique Atomique et Connaissance Humaine** , Paris, Éditions Gallimard, 1991.

_____. “La Physique Quantique et les Grecs”, In : **Nos Grecs et Leurs Modernes – Les Stratégies Contemporaines d’ Appropriation de l’Antiquité / textes réunis par Barbara Cassin**, Paris, Éditions du Seuil, 1992.

_____. “Physical Reality and Closed Theories in Werner Heisenberg’s Early Papers” In : **Theory and Experiment : Recent Insights and New Perspectives**

on Their Relation / edited by D. Batens and J. P. Bendegen, New York, Humanities Press, 1988.

CORNFORD, F. M. *Plato's Cosmology, The Timaeus of Plato*, Indianapolis/Cambridge, Hackett Publishing Company, 1997.

CUSHING, J. T. **Philosophical Concepts in Physics- The Historical Relation Between Philosophy and Science Theories**, Cambridge University Press., New York, USA, 1998.

DESCARTES, R. "Meditações", In: **Descartes**, Coleção Os Pensadores, São Paulo, Editora Nova Cultural Ltda, 1999.

_____. **O Discurso do Método**, São Paulo, Livraria Martins Fontes Editora Ltda, 1989.

DIRAC, P. A. M., HEISENBERG, W. e SALAM, A. **A Unificação das Forças Fundamentais**, Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1993.

FEYNMAN, R. P. **The Feynman Lectures on Physics, vols. I, II, III / Richard Feynman, Robert B. Leighton, Matthew L. Sands**, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

FINE, A., HOWARD, D. e NORTON, J. D. "Einstein, Albert". In: **Routledge Encyclopedia of Philosophy, Version 1.0**, London, Routledge, 1998.

FORMAN, P., "A Cultura de Weimar e a Teoria Quântica, 1918-1927: A Adaptação de Físicos a um ambiente Culturalmente Hostil", In: **Cadernos de História e Filosofia da Ciência, suplemento 2**. Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência (CLE), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1983.

HEELAN, S. J. Patrick A., **Quantum Mechanics and Objectivity, A Study of the Physical Philosophy of Werner Heisenberg**, Martinus Nijhoff, The Hague, Netherlands, 1965.

HEISENBERG, W. **A Imagem da Natureza na Física Moderna**, Lisboa, Livros do Brasil.

_____. **A Parte e o Todo**, Rio de Janeiro, Editora Contraponto, 2000.

_____. **Across the Frontiers**, Harper & Row., 1974.

_____. **Encounters With Einstein & Other Essays**, Princeton, NJ, U.S.A., Princeton University Press, 1989.

_____. **Nuclear Physics**, Philosophical Library, 1953.

_____. **Philosophic Problems of Nuclear Science**, New York, Pantheon Books, 1966.

_____. **Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science**, New York, Penguin Books, 1990.

_____. “The Nature of Elementary Particles”, In: **Physics Today, March 1976**

_____. **The Physical Principles of the Quantum Theory**, Dover Publications, Toronto.

_____. “Quantum Theory and Its Interpretation”, In: **Niels Bohr, His Life And Work as Seen By His Friends and Colleagues / edited by S. Rozental**. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1968.

_____. “Quantum Theory and the Structure of Matter”, In: **German essays in the 20th Century / edited by Schirmacher, Wolfgang**, p.72 – 86, New York, The Continuum Publishing Company, 1996.

HENDRY, J., “Weimar Culture and Quantum Causality”, In: **History of Science 18**, 1980, p. 155-180.

HOWARD, D., **Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology**, disponível para consulta online no endereço: <http://www.nd.edu/~dhoward1/Copenhagen%20Myth%20A.pdf>

HUGHES, R. J. “The Bohr Einstein Weighing-of-energy’ Debate and The Principle of Equivalence”, In: **American Journal of Physics 58**, 1934.

ISAACS, A. e UVAROV, E. B. **The Penguin Dictionary of Science**, London, Penguin Books, 1988.

JAMMER, M. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, New York, McGraw-Hill Book Company, 1966.

_____. **The Philosophy of Quantum Mechanics**, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1974.

KANT, Immanuel, **Crítica da Razão Pura** (segunda edição, 1787), Coleção Os Pensadores, São Paulo, Editora Nova Cultural Ltda, 1999.

KIRK, G.S., RAVEN, J.E. & SCHOFIELD, M., **Os Filósofos Pré-socráticos, História Crítica com Seleção de Textos**, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1994.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 4 – Ótica, Relatividade, Física Quântica**, São Paulo, Editora Edgar Blücher Ltda, 1998.

PLATÃO, **The Republic of Plato**, Translated with introduction and notes by Francis McDonald Cornford, London, Oxford University Press, 1990.

POPPER, Karl. **A Lógica da Pesquisa Científica**, São Paulo, Editora Cultrix, 2002.

_____. **Quantum Theory and the Schism in Physics**, W. W. Bartley ed., Londres, Hutchinson, 1982.

ROSS, Sir David. **Aristóteles**, Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1987.

STANFORD ENCYCLOPEDIA OF PHILOSOPHY, Versão eletrônica disponível para consulta na internet, Endereço: <http://plato.stanford.edu/>

WEIZÄCKER, Carl Friedrich von, “Heisenberg Conception of Physics”, In: **Quantum Theory and the Structures of Time and Space volume 2**, In Memoriam Werner Heisenberg, edited by L. Castell, M. Drieschner, CFv Weizsäcker, München, Carl Hanser Verlag, 1977.

7

Glossário

Câmara de Wilson (Câmara de nuvem) - é uma câmara que contém vapor de água super saturado. Se uma partícula carregada é atirada nele, a água se condensa em forma de minúsculas gotículas ao redor da partícula, e pode-se observar o caminho percorrido pela partícula na câmara. (Há uma explicação bastante clara do que seja uma câmara nuvem, ou câmara de Wilson em Heisenberg, Werner, *Nuclear Physics*, p. 25.)

Comprimento de onda (λ) – “É a distância entre dois pontos consecutivos do meio que vibram em fase; e.g. o comprimento de onda de ondas de água poderia ser medido como a distância de crista a crista. O comprimento de onda é igual à velocidade do movimento da onda dividida pela sua frequência. Para a radiação eletromagnética $\lambda = c/v$, onde c é a velocidade da luz e v é a frequência¹”.

Difração - Se uma onda que se propaga, por exemplo, na superfície da água e encontra um obstáculo dotado de pequena abertura, a parte da onda que não foi bloqueada pelo obstáculo não se mantém em linha reta: ao passar pela abertura a onda se espalha em todas as direções. A isto se chama difração da onda. A difração ocorre com qualquer tipo de onda. “Quando um feixe de luz passa através de uma abertura ou pela borda de um obstáculo opaco e lhe é possível cair em cima de uma tela, padrões de faixas claras e escuras (com luz monocromática) ou de faixas coloridas (com luz branca) são observados perto das bordas do feixe, e se estendem pela sombra geométrica. Este fenômeno é um exemplo particular da interferência²”.

Dispersão - A dispersão da luz é o processo de separação dos comprimentos de onda que compõem a luz branca (luz do sol) quando esta passa, através de um prisma óptico, por exemplo³.

Eletromagnetismo – É o estudo dos campos magnéticos e suas interações com as correntes elétricas. Foi o inglês James Maxwell o responsável pela construção da teoria clássica do eletromagnetismo. Ele criou uma estrutura teórica e matemática que explicava os fenômenos elétricos e magnéticos como sendo manifestações de

¹ Isaacs, Alan e Uvarov, E. B., *The Penguin Dictionary of Science*, p. 161.

² *Ibidem*, p. 109.

³ *Ibidem*, p. 114.

uma mesma entidade, o chamado campo eletromagnético. Até então, a eletricidade e o magnetismo eram considerados áreas separadas na física. Maxwell expôs matematicamente as conclusões a que chegou acerca dos conhecimentos de eletricidade e magnetismo da época em seu tratado sobre a eletricidade e o magnetismo, publicado em 1873. A relação entre o campo elétrico e o campo magnético foi expressa por ele em 4 equações matemáticas, as chamadas equações de Maxwell. A partir da publicação do tratado a luz passa a ser entendida como onda eletromagnética, consistindo da variação de campos elétricos e magnéticos perpendiculares à direção de sua propagação.

Frequência (f) – “É o número de ciclos, oscilações, ou vibrações do movimento ou oscilação da onda por unidade a tempo (geralmente um segundo). No movimento da onda a frequência é igual à velocidade da propagação dividida pelo comprimento de onda⁴”.

Interferência do movimento de ondas – “A adição ou combinação das ondas; se a crista de uma se encontrar com o vale de uma outra de igual amplitude, a onda será destruída neste ponto; inversamente, a superposição de uma crista em cima de outra leva a um aumento do efeito.(...) A interferência fornece a evidência para a teoria da onda da luz⁵”.

Lei da conservação de energia - “Há um fato, ou se você desejar, uma *lei*, que governa todos os fenômenos naturais que conhecemos atualmente. Não há exceção para esta lei: ela é tão exata quanto sabemos. A lei é chamada *conservação de energia*. Ela postula que há uma certa quantidade, a que chamamos de energia, que não muda ao longo das diversas mudanças pelas quais a natureza passa. Esta é uma idéia abstrata, porque ela é, na verdade um princípio matemático que ele diz que há uma quantidade numérica que não muda quando algo acontece. Não é uma descrição de um mecanismo, ou algo concreto mas apenas o estranho fato de que podemos calcular algum número e então quando terminamos de observar a natureza em suas artimanhas, este número é o mesmo⁶”.

Momento – “É o produto da massa pela velocidade. A velocidades próximas à velocidade da luz, a variação da massa cuja velocidade deve ser levada em

⁴ *Ibidem*, p. 440.

⁵ *Ibidem*, p. 205.

⁶ Feynman, Richard, **The Feynman Lectures on Physics, vol. 1**, p. 4-1.

consideração, e o valor de m apropriado ao da velocidade do corpo deve ser usado na expressão do momento⁷”.

Onda – “É um distúrbio periódico em um meio ou no espaço, que pode envolver o deslocamento elástico de partículas materiais ou uma mudança periódica em alguma quantidade física tal como temperatura, pressão, potencial elétrico, etc⁸”.

Onda Estacionária - Uma onda estacionária é uma onda composta de duas ou mais ondas que se propagam em direções opostas, de tal modo que a onda resultante parece não se mover.

Princípio de incerteza (Princípio de indeterminação) – “É impossível determinar com precisão ambos, a posição e o momento de uma partícula (e.g. um elétron) simultaneamente. Quão mais acurado for o nosso conhecimento da posição (x) tão menos acuradamente o momento (p) poderá ser determinado. Se a indeterminação no componente- x do momento é Δp_x , então $\Delta p_x \Delta x \geq h/4\pi$, aonde h é a constante de Planck⁹”.

Radiação - Denomina-se radiação qualquer processo físico de emissão e propagação de energia, seja ele por meio de fenômenos ondulatórios, seja através de partículas. É um fenômeno natural que pode ocorrer de muitas formas. São emissores de radiação, por exemplo, o ar, o solo, rochas, alimentos, aparelhos de TV, fornos de microondas, estrelas distantes, máquinas de raios-x dentários, combustível usado em usinas nucleares, dentre outros. Estamos diariamente expostos a vários tipos de radiação, como o calor, a luz visível, as ondas de rádio, o radar, etc.

Radiação térmica – A radiação térmica ou transmissão de calor por radiação é a taxa de emissão de energia de um dado material, dada sua temperatura. Ela está relacionada à energia liberada de oscilações ou transições dos elétrons, átomos, íons, ou moléculas mantidos pela energia interna do material. Qualquer forma de matéria com temperatura acima do zero absoluto emite energia térmica. Em gases ou outros materiais transparentes (materiais com absorção interna desprezível), a energia térmica se irradia através de seu volume. Para materiais com alta absorção interna, como os metais, apenas algumas centenas de camadas atômicas mais

⁷ Isaacs, Alan e Uvarov, E. B., *The Penguin Dictionary of Science*, p. 260.

⁸ *Ibidem*, p. 439.

⁹ *Ibidem*, p. 424.

externas realmente contribuem para a emissão de energia térmica. Para esses materiais, a emissão de energia térmica é um fenômeno superficial.

8

Apêndices

Apêndice 1

Sabemos que qualquer pedaço de matéria quando aquecido, ou seja, qualquer pedaço de matéria a uma temperatura maior que zero, emite energia na forma de radiação eletromagnética. A energia emitida inicialmente não é visível, mas à medida que sua temperatura se eleva a radiação passa a ser visível: o pedaço de matéria fica incandescente, e tem inicialmente um tom avermelhado (que é quando a maior parte da energia emitida está concentrada nas ondas de maior comprimento) que se torna esbranquiçado tendendo para o azulado (ondas de menor comprimento). A coloração não depende muito da superfície do objeto e, no caso de um corpo negro (qualquer pedaço de matéria de superfície negra, por exemplo uma bola, que seja ôca e que tenha um pequeno furo), depende apenas da temperatura em que ele se encontra. O corpo negro é definido como uma superfície que absorve toda a radiação eletromagnética que chega nele, e é justamente por não refletir nenhuma parte do espectro luminoso que ele parece negro, pelo menos às temperaturas do nosso meio ambiente. Isso faz dele o mais eficiente absorvedor e emissor de energia que podemos encontrar. Assim, a radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura constante é de grande interesse porque sob estas circunstâncias (em que a temperatura não aumenta e nem diminui), a radiação é emitida na mesma quantidade que é absorvida.

Apêndice 2

O experimento da radiação do corpo negro¹⁰, realizado por Rayleigh e Jeans no fim do século XIX, é de simples realização: é possível gerar radiação no corpo negro esquentando um objeto côncavo ou, melhor, uma bola oca cuja superfície seja negra a uma temperatura constante T , o que possibilita que o equilíbrio térmico seja estabelecido. Uma vez em equilíbrio, podemos, então, através de aparelhos, observar a radiação eletromagnética que escapa por um pequeno furo na

¹⁰ Retirado de Cushing, James T., **Philosophical Concepts in Physics**, p. 277.

parede do objeto. Com os dados do experimento é então construído um gráfico (uma espécie de ‘foto’ da radiação emitida por este corpo negro a uma temperatura T fixada), no qual a densidade da energia é analisada em função dos vários comprimentos de onda que compõem o sistema. A idéia é que a energia total deste sistema fechado se distribui pelos diferentes comprimentos de onda que constituem o espectro, comprimentos estes que seremos capazes de medir por aparelhos. Podemos dizer que a energia total do sistema é a soma dos comprimentos de todas as ondas que lá encontrarmos. Sabemos que quanto maior o comprimento de uma onda, menor a quantidade de energia que ela carrega (menor a sua frequência). Sabemos também que a emissão de radiação a cada diferente frequência corresponde uma cor do espectro luminoso.

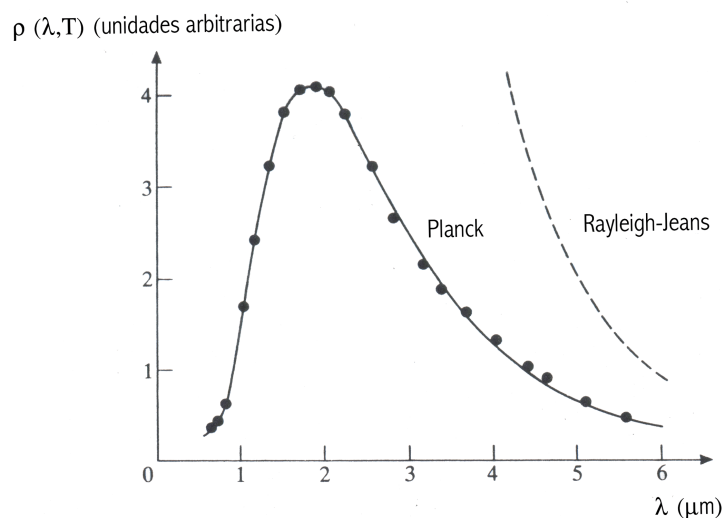


Figura 1: Radiação dos corpos negros

Observando o gráfico acima, vemos a curva apontada pela fórmula de Rayleigh e Jeans que era compreensível dentro das leis da física clássica, que tinham como pressuposto a idéia de que a energia disponível em um sistema em equilíbrio térmico era compartilhada igualmente, isto é, de modo contínuo, por todas as partes do sistema. No entanto, as tentativas de Rayleigh e Jeans malograram e o resultado foi a curva experimental apresentada no gráfico como a curva de Planck. A física clássica não era capaz de explicar a forma das curvas

desta figura.¹¹ Planck traduziu teoricamente por fórmulas as medidas muito precisas do espectro da radiação térmica feitas, também em 1900, por Kurlbaum e Rubens. Estas fórmulas, uma tentativa de obter uma expressão para a distribuição de energia térmica em equilíbrio, pareciam plausíveis sob o ponto de vista de sua pesquisa sobre calor e radiação. Ele tentou, então, encontrar uma fórmula matemática que se adaptasse à curva encontrada na experiência do corpo negro. Para isto Planck se utilizou de uma hipótese termodinâmica *ad hoc* que modificava as relações clássicas que envolviam a entropia da radiação para explicar o comportamento das ondas de comprimento longo e uma lei *ad hoc* conjecturada em 1896 por Wilhelm Wein que se ajustava às ondas de comprimento curto. Foi deste modo que ele propôs uma nova fórmula que se ajustou a todos os comprimentos de onda e que constituiu o que se chamou Lei de Planck da radiação térmica. Planck chegou à conclusão de que a quantidade de energia emitida ou absorvida deveria ser igual a um múltiplo inteiro de uma quantidade mínima a que denominou *quantum elementar de ação* h vezes a frequência f com que cada molécula vibra.

Apêndice 3

Como foi dito, o experimento do efeito fotoelétrico mostrava que a energia dos elétrons emitidos não dependia da intensidade da luz, mas apenas da sua cor, em outras palavras, da sua frequência. Isto havia sido demonstrado por experiências anteriores, especialmente as de Lenard. No caso da experiência do efeito fotoelétrico, percebeu-se que a luz ultravioleta facilitava a ejeção dos elétrons enquanto caso se colocasse uma lente vermelha e se jogasse esta luz sobre a placa metálica nada acontecia aos elétrons, o que possibilitou uma descrição da luz bastante diferente da propiciada pelo modelo ondulatório tradicional.

¹¹ Para simplificar a discussão, consideremos que o corpo negro produz radiação de dimensão l . Ondas estáveis são possíveis apenas a determinados comprimentos de onda dados pela equação $\lambda n = 2l/n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) Cada um destes é um grau que deveria dividir igualmente a energia disponível e, como há infinitas ondas de comprimento cada vez menor e menor, toda a luz deveria ser de curto comprimento de onda no fim de seu espectro. O conceito clássico rigoroso produz a fórmula de Rayleigh-Jeans: $p(\lambda, T) = (8 \pi k T) / (\lambda)^4$, onde k é a constante de Boltzmann. Esta fórmula concorda com o gráfico apenas para grandes comprimentos de onda. A pequenos comprimentos de onda ($\lambda \rightarrow 0$) ela se torna infinita (catástrofe ultravioleta), como indicado no gráfico. A figura claramente discorda destes dados. Suas raízes remetem a um artigo datado de 1900 de Lord Rayleigh, mas o resultado da equação acima foi derivado por ele e Sir James Jeans em 1905. A falência desta lei era um problema sério, uma vez que ela havia sido deduzida de uma das leis firmemente estabelecidas da mecânica estatística clássica, a da equipartição da energia.

Apêndice 4

Modelo atômico de Thomson

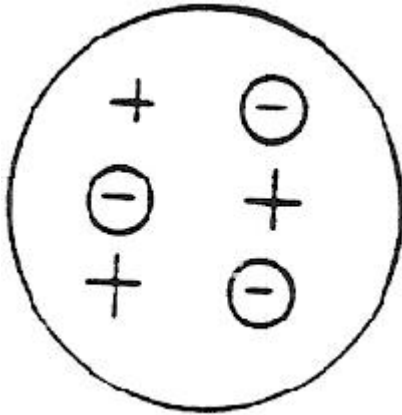


Figura 2: Modelo atômico de Thomson (pudim de passas).

Apêndice 5

A idéia básica é que o padrão de espalhamento das partículas deveria refletir a estrutura das forças atuantes no interior do átomo. Geiger e Marsden usaram uma folha de ouro ($^{75}\text{Au}^{157}$) de aproximadamente 400 átomos de espessura com partículas α (He^{++}) como projéteis bombardeadores. A maior parte das partículas α passou através da folha de ouro sem se desviar. Uma vez que as partículas α são muito compactas que os elétrons (aproximadamente 7.5000 vezes mais compactas), elas não são essencialmente desviadas por eles. O núcleo do ouro é, por sua vez, no total, 50 vezes mais compacto do que uma partícula α . No modelo de Thomson, a massa e a carga positiva eram pensadas como estando uniformemente espalhadas no volume da amostra e não deveria haver, deste modo, choques com objetos maciços isolados mas apenas com pedaços rarefeitos dos átomos do ouro. No entanto, observou-se que, vez por outra, algumas partículas α desviavam-se a ângulos maiores que 90 graus. Este comportamento era totalmente incompatível com o modelo de Thomson, o que fez Rutherford pensar que a grande carga do átomo de ouro, justamente a sua carga positiva, estaria concentrada essencialmente em uma minúscula região central. Ele pediu então ao jovem teórico Charles Darwin que fizesse um estudo exato do espalhamento produzido por um átomo distinto. Os resultados obtidos confirmaram suas

expectativas e os físicos se viram, então, diante de um modelo atômico nuclear similar a um sistema planetário. A ligação química estabelecida entre os átomos seria explicada, a partir de então, como resultado da interação entre os elétrons mais externos de átomos próximos, não tendo relação direta com o núcleo. O núcleo seria, devido à grandeza e presença de sua carga, responsável pelo comportamento químico do átomo. A carga do núcleo seria responsável também por fixar o número de elétrons girando à sua volta.¹²

Apêndice 6

Um outro tipo de fenômeno que foi bastante relevante para a teoria quântica foi o padrão de linhas espectrais emitido por um elemento (espectro de emissão de um elemento), descoberto por Kirchhoff e Bunsen¹³. Quando um arco elétrico passa através de uma amostra de gás ou vapor como o hidrogênio, o gás brilha com uma cor característica. Por exemplo, o hidrogênio é laranja e o sódio é amarelo. Em um exame mais cuidadoso, é possível perceber que apenas algumas frequências da luz estão presentes. Fotografias das linhas espectrais mostram que uma vez decompostas ou separadas por um retículo difrator (ou dispersas por um prisma) revelam um conjunto de linhas brilhantes, cujo comprimento de onda é apenas um no elemento da substância que emite o espectro. Tais espectros discretos são característicos de todos os elementos e podem ser usados como uma espécie de “digital” que possibilita sua identificação. Este espectro discreto era surpreendente uma vez que, de acordo com um das leis da teoria clássica, cargas aceleradas emitem radiação eletromagnética. Se as cargas que ficam dentro da matéria se movem ao acaso, seria de se esperar que radiações eletromagnéticas de todas as frequências fossem emitidas, o que produziria um espectro contínuo. As frequências discretas de emissão espectral dos elementos foram associadas a certas órbitas estáveis ou vibrações características destas cargas.

Apêndice 7

“De acordo com o nosso conhecimento prévio, um elétron que gira em torno de um núcleo não poderia permanecer em uma órbita elíptica ou circular por uma

¹² Retirado de Cushing, James T., *Philosophical Concepts in Physics*, p. 276.

¹³ *Annalen der Physik und der Chemie* (Poggendorff), Vol. 110 (1860), pp. 161-189 (dated Heidelberg, 1860).

grande quantidade de tempo. Em primeiro lugar, o elétron carrega uma carga elétrica, e em segundo lugar, ele vibra em sua órbita em torno do núcleo¹⁴. Em qualquer órbita descrita em torno do núcleo, um elétron está sempre se movendo com aceleração diferente de zero e, de acordo com a lei clássica de Maxwell, qualquer carga acelerada emite radiação, criando um campo eletromagnético e perdendo energia, em outras palavras, um elétron centripetamente acelerado em torno do núcleo deveria, emitir uma onda de radiação (que neste caso observaríamos como luz ultravioleta). Ao perder energia, o elétron seria atraído pelo núcleo para o qual ele se dirigiria num movimento espiralado e no qual cairia, o que provocaria o colapso do átomo como um todo.

Apêndice 8

Para construir seu modelo atômico, Bohr admitiu, um átomo nuclear como o de Rutherford. De acordo com a mecânica clássica, o problema de um elétron orbitando em torno de um próton em um átomo (no caso do hidrogênio), sujeito apenas à força coulombiana, é inteiramente igual ao problema de Kepler de dois corpos na gravitação. Órbitas circulares ou elípticas são admitidas pela mecânica clássica e Bohr optou, por uma questão de simplicidade, por uma órbita circular. O elétron se move em uma órbita em torno do núcleo que exerce uma atração eletrostática sobre ele. Ele então postulou que ao invés das infinitas órbitas aceitas pela mecânica clássica, haveria apenas um certo número de órbitas estáveis (ou seja, certos valores de r), que ele chamou de estados estacionários. Conseqüentemente, os átomos só poderiam existir em certos níveis de energia permitidos, com energias E_a, E_b, E_c, \dots . De acordo com a clássica, um elétron em movimento deveria irradiar energia. Ele poderia irradiar, no entanto, todas as frequências produzindo um espectro contínuo, o que contrariava a experiência. Contrariando esta lei, Bohr postulou também que um elétron seria dinamicamente estável e, estando em uma destas órbitas reconhecidas, não emitiria energia. Não havia nenhuma explicação clássica para isto e ele não ofereceu nenhuma. Ele assumiu que a emissão ou absorção de energia por um elétron se dava apenas quando este elétron fazia uma transição descontínua de um destes níveis permitidos de energia (órbitas estacionárias) permitidas a outro, como na figura abaixo.

¹⁴ Heisenberg, Werner, **Nuclear Physics**, p.30

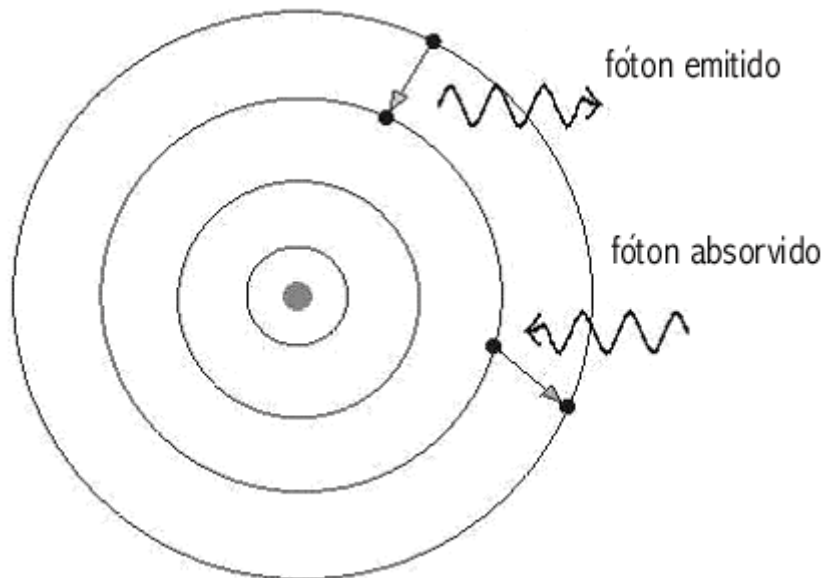


Figura 3: Modelo atômico de Bohr.

Para obter a frequência da radiação ele usou a idéia de que a energia eletromagnética da radiação é quantizada e pode ser carregada por fótons, estando cada fóton associado a uma frequência ν e carregando energia igual a $h\nu$ (a quantização de Planck). Bohr considerou inicialmente um elétron com nível zero de energia total, ou seja, infinitamente longe do núcleo e em repouso, caindo em uma das órbitas e quantizou a energia $h\nu$ do fóton em termos da energia do elétron em sua órbita final. Assim, em resumo, o átomo de Bohr consiste num núcleo positivo com elétrons girando, em estados estacionários (um conjunto discreto de camadas de energia). O estado estacionário de energia mais baixa, chamado de estado fundamental, é realmente estável, ou seja, nele o átomo poderia permanecer indefinidamente. Estes estados correspondem a órbitas eletrônicas em torno do núcleo que Bohr calculou usando as leis da mecânica newtoniana e considerando somente órbita coulombianas circulares. Apesar de se utilizar destes modelos clássicos, Bohr violou a teoria eletromagnética vigente, ao postular que um elétron em movimento na órbita não emitiria radiação. A fórmula de Bohr funciona quantitativamente somente para os átomos de apenas um elétron (temos como

exemplos: hidrogênio neutro, hélio singularmente ionizado (He^+), lítio duplamente ionizado (Li^{++}), etc)¹⁵.

Apêndice 9

É pertinente aqui abrir um parêntese para descrever, mesmo que de modo sucinto, o experimento das duas fendas¹⁶, que consiste de:

- Um dispositivo que emite elétrons (no caso, um fio de tungstênio, aquecido por uma corrente elétrica, dentro de uma caixa de metal com um buraco (se o fio está a uma voltagem negativa em relação à caixa, os elétrons por ele emitidos são acelerados na direção das paredes da caixa e alguns são atirados para fora dela através do buraco));

- Uma parede com duas fendas, colocada na frente do dispositivo; e

- Uma outra parede, colocada mais à frente da primeira parede, onde se situa um detector de elétrons.

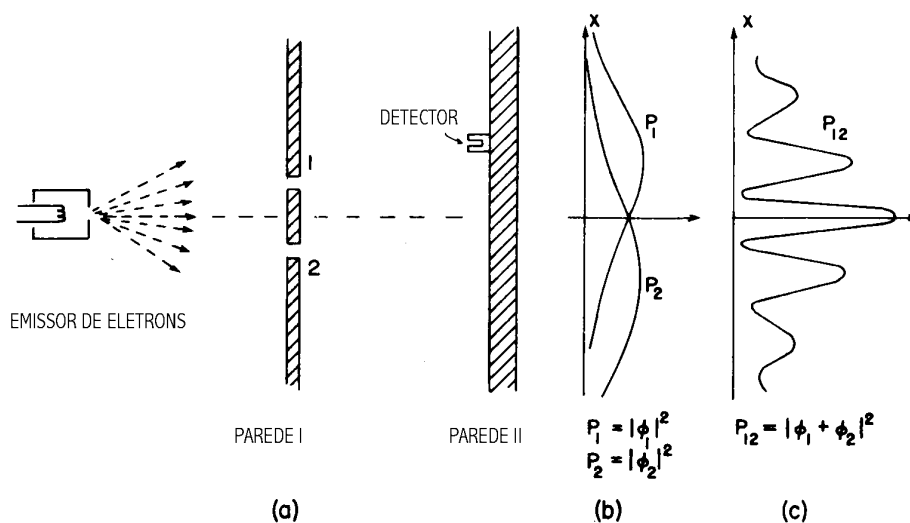


Figura 4: Experimento das duas fendas.

¹⁵ Ver também Jammer, Max, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, p. 82.

¹⁶ Retirado, resumidamente, de Feynman, Richard, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. III., op.cit. p. 1-1 a 1-11.

Uma parte dos elétrons atirados vai parar na primeira parede, mas outra parte vai passar através das duas fendas que nela se encontram chegar à outra parede. O detector pode ser um alto falante conectado a um multiplicador de elétrons: sabemos que um elétron chegou à parede ao ouvirmos um agudo 'click'. Assim podemos saber quantos elétrons chegaram à parede em um determinado período de tempo.

Ao fazermos o experimento notamos, primeiramente, que por mais que diminuamos a temperatura disponível no dispositivo de elétrons a única coisa que muda é o intervalo de tempo entre a chegada de um elétron e outro, mas nunca o tamanho do elétron. Os 'clicks' que indicam a chegada de cada elétron à parede são sempre os mesmos, nunca ouvimos um 'meio-click'. Também percebemos que os elétrons chegam um de cada vez, e nunca dois (ou mais) ao mesmo tempo. Podemos inferir, daí, que eles chegam em pacotes, como se fossem corpúsculos. Isto parece indicar que os elétrons, ao passarem pela parede com as duas fendas abertas, devam passar por uma ou por outra fenda. De fato, se bloquearmos uma das fendas, digamos, a fenda 2 e calcularmos quantos elétrons chegaram ao outro lado em um determinado período de tempo, veremos que o resultado é similar ao de um experimento análogo feito, por exemplo, com balas de revólver. O mesmo ocorre ao bloquearmos a fenda 1. Podemos calcular também a distribuição de probabilidades de que um elétron chegue numa determinada parte da segunda parede e, ao fazermos isto, vemos que enquanto trabalhamos com apenas uma fenda aberta de cada vez, os elétrons se distribuem como se fossem corpúsculos. Tal situação está representada, na figura acima, pelas curvas em azul e em vermelho.

Isto deveria significar que, ao abrirmos as duas fendas, a probabilidade de chegada dos elétrons em uma determinada região x fosse equivalente à soma das probabilidades de chegada obtidas quando o experimento era feito com uma fenda aberta de cada vez, como em um experimento com balas. Isto seria expresso por uma curva que representa a soma destas duas curvas de probabilidades. No entanto, quando fazemos o experimento com ambas as fendas abertas, o que encontramos não o resultado esperado, mas a existência de um padrão característico dos fenômenos ondulatórios. Os elétrons se comportam como se fossem emitidos por um gerador de ondas, e não de corpúsculos: uma só onda emitida por tal aparelho ao passar pelas fendas se divide em duas. Estas duas se

encontram do outro lado formando um padrão de interferência. Podemos ver este fenômeno representado na figura abaixo (ou na alínea “c” da fig. 4).

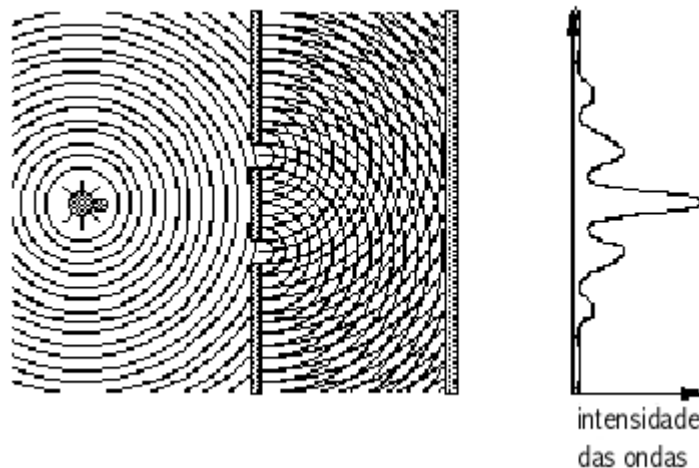


Figura 5: Padrão de interferência.

Sabemos, deste modo, que o gráfico obtido com as duas fendas abertas é tal que os elétrons parecem se comportar como se fossem ondas, i.e., eles apresentam um padrão de interferência. No entanto, sabemos também que, quando fazemos o mesmo experimento deixando apenas uma das fendas aberta, os elétrons se comportam como se fossem corpúsculos. Isso significaria que os elétrons se dividem em duas partes quando temos as duas fendas abertas? Não, uma vez que também sabemos que eles sempre chegam em pacotes.

A interpretação de Born não dava conta deste experimento, porque de acordo com esta interpretação o gráfico encontrado ao se abrir os dois buracos deveria ser a superposição dos gráficos das fendas fechadas separadamente. No entanto, como vimos, a função obtida quando ambas as fendas estão abertas apresenta um padrão de interferência, o que significa que a função de onda não é apenas uma representação do nosso conhecimento, mas algo fisicamente real.

O experimento das duas fendas, como outros experimentos em mecânica quântica, levanta ainda uma outra questão, intimamente ligada à anterior e bastante central em mecânica quântica, e de que Heisenberg tratará em suas relações de incerteza (ou indeterminação). Em uma teoria física, um experimento é tipicamente

descrito em termos do estado do sistema observado. Na física clássica, as quantidades físicas (variáveis) independentes especificam completamente o estado total do sistema em qualquer instante de tempo.¹⁷ Uma vez especificadas as variáveis relevantes são utilizadas leis dinâmicas para calcular a evolução desse sistema no tempo. A equação temporal relaciona os valores numéricos dessas variáveis independentes extraídos da experiência, em um instante inicial $t1$ qualquer, aos valores numéricos das mesmas variáveis independentes, em um instante ulterior $t2$ qualquer, e isso de tal modo que é possível, a partir da simples colocação, na equação temporal, dos valores empiricamente determinados em $t1$, deduzir os valores de um instante futuro $t2$. A equação temporal faz, portanto, a passagem de um diferente estado a outro, estabelecendo entre eles uma relação de causa e efeito necessária. A característica fundamental das mecânicas einsteiniana e newtoniana é que nestas mecânicas podemos, em princípio, do instante inicial de um sistema, deduzir seu estado futuro. Isto é, os valores no instante futuro $t2$ podem ser obtidos a partir da mera resolução da equação temporal.¹⁸

Apêndice 10

O princípio de incerteza foi primeiramente colocado por Heisenberg da seguinte forma: no ato de medição de qualquer objeto, não se pode determinar o seu momento com uma incerteza Δp e determinar, simultaneamente, a sua posição Δx mais acuradamente que $\Delta x = h/\Delta p$ (h é a constante de Planck). Assim, quanto mais se sabe sobre o valor de uma destas variáveis, menos se sabe sobre a outra¹⁹.

¹⁷ Cushing, James T., **Philosophical Concepts in Physics**, p. 290.

¹⁸ Por exemplo, o estado de um sistema na mecânica de partículas clássica é especificado pelas posições e velocidades de todas as partículas no sistema. A segunda lei de Newton, $F = ma$, é então utilizada para determinar a evolução das variáveis ou do estado do sistema. No caso da eletrodinâmica, as variáveis são os campos elétricos e magnéticos e as equações de Maxwell governam sua evolução temporal.

¹⁹ Feynman, Richard, **The Feynman Lectures on Physics**, vol. III, p. 1-11.