Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Sociais
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas
PPGFIL

Vinícius Carvalho da Silva

A interpretação filosófica da mecânica quântica de Werner Heisenberg: ontologia matemática e crise nos fundamentos da lógica clássica

Rio de Janeiro
2012
Vinícius Carvalho da Silva

A interpretação filosófica da mecânica quântica de Werner Heisenberg: ontologia matemática e crise nos fundamentos da lógica clássica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Filosofia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia Moderna e Contemporânea.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Corrêa Barbosa

Rio de Janeiro
2012

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Sociais
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas
PPGFIL

Banca Examinadora

_____
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Corrêa Barbosa

_____
Examinador (UERJ): Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira

_____
Examinador externo: Prof. Dr. Marco Ruffino

Rio de Janeiro
2012

RESUMO

Qual a Filosofia da Natureza que podemos inferir da Física Contemporânea? Para Werner Karl Heisenberg, prêmio Nobel de Física de 1932, a ontologia da Ciência Moderna, estruturada no materialismo, no mecanicismo e no determinismo já não pode servir de fundamento para a nova Física. Esta requer uma nova base ontológica, onde o anti-realismo, seguido de um formalismo puro, aparece como o princípio basilar de uma nova Filosofia Natural. Este trabalho visa investigar o pensamento filosófico, a ontologia anti-realista, formalista, a abordagem da tradição filosófica e da história da ciência de Werner Heisenberg e sua contribuição para a interpretação da mecânica quântica.

PALAVRAS - CHAVE: Ciência Moderna; Física Contemporânea; Filosofia Natural.

ABSTRACT

What is the Philosophy of Nature that we can infer from the Contemporary Physics? For Werner Karl Heisenberg, Nobel Prize in Physics in 1932, the ontology of modern science, based on materialism, mechanism and determinism may no longer be the basis for the new physics. This requires a new ontology_based, where anti-realism, followed by a pure formalism, appears as the basic principle of a new Philosophy of Nature. This study aims to investigate the philosophical thought, the anti-realist ontology, formalistic approach to the philosophical tradition and the history of science of Werner Heisenberg and his contribution to the interpretation of quantum mechanics.

KEY WORDS: Modern Science; Contemporary Physics; Philosophy of Nature.

Agradecimentos

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....7

PRIMEIRA PARTE

Heisenberg e a filosofia 11

Heisenberg e Platão:

O formalismo platônico como fundamento do real ..... .18

Heisenberg e Aristóteles:

Os objetos quânticos como potências elementares da natureza.....30

Heisenberg e Schrödinger:

Superação do materialismo e ontologia do formal.....34

Heisenberg e Descartes.....43

Heisenberg e Kant:

da impossibilidade quântica de observação da "natureza em si".....55

Heisenberg e Goethe.....64

SEGUNDA PARTE

Linguagem, lógica e ciência.....70

A tensão entre as proposições de mecânica quântica e

os princípios de lógica clássica.....72

O princípio de incerteza.....77

A lógica de Copenhagen para a mecânica quântica:

As investigações de Carl von Weizsäcker.....84

A lógica quântica de Weizsäcker

E o princípio do terceiro excluído: resposta a Heisenberg.....87

CONCLUSÃO.....99

BIBLIOGRAFIA.....108

INTRODUÇÃO

De acordo com Werner Karl Heisenberg, o nascimento da filosofia entre os gregos pré-socráticos é também o início da grande tradição do pensamento científico ocidental. Não há rupturas ou estranhezas entre os anseios, objetivos e questões dos filósofos pré-socráticos e os problemas científicos centrais mais atuais. As mesmas questões filosóficas perpassam a história do pensamento, e foram questões deste tipo que inquietaram o cientista alemão: O que é a realidade? Qual a substância elementar da qual são feitas todas as coisas? O que é ontologicamente fundamental?

Quando o jovem Heisenberg já era um físico brilhante, a física experimentava um momento de inquietação e transformação profunda. Os trabalhos de Planck revelaram o caráter quântico de fenômenos subatômicos, abrindo caminho para as pesquisas revolucionárias pioneiras da mecânica quântica. Antes dos trabalhos de Planck o fenômeno de radiação de corpo negro era completamente incompreendido. Pensemos, *grosso modo,* em um sistema físico qualquer irradiando energia de modo contínuo. Logo o sistema se esgotaria. Planck, entretanto, propôs que o fenômeno de radiação possui caráter descontínuo, isto é, a energia é liberada em pacotes "fechados" chamados de *quantas*, do grego, quantidade. Logo em seguida, e de certa forma baseada na teoria dos *quantas* de Max Planck, uma teoria quântica para os fenômenos fotoelétricos foi proposta por Albert Einstein. A luz seria composta por "unidades" de energia denominada fótons, possuindo também um caráter descontínuo. Mais ou menos na mesma época, Niels Bohr defendia um modelo atômico sumamente quântico. Em alguns anos a comunidade científica internacional percebeu que os "fenômenos descontínuos" propostos pelas teorias quânticas estavam por toda parte, e que uma concepção científica do mundo subatômico não poderia dispensar tais descontinuidades.

Com a descoberta da natureza dualística da luz, que ora comporta-se de modo ondulatório, ora revela sua natureza corpuscular propagando-se como feixes de fótons, Louis de Broglie propôs a teoria ondulatória da matéria, e Schrödinger desenvolveu a mecânica ondulatória. Como é a estrutura fundamental da matéria? Quais são as leis que governam o comportamento dos sistemas subatômicos? Como coadunar os fenômenos ondulatórios e corpusculares? Para responder tais questões – as versões contemporâneas daquelas propostas pelos pré-socráticos – Heisenberg desenvolveu a mecânica matricial, uma teoria quântica de caráter extremamente formal, acusada por alguns contemporâneos, como o próprio Schrödinger, além de Einstein, de ser uma teoria mais

matemática do que física. Por fim, a mecânica ondulatória de Schrödinger e a mecânica matricial de Heisenberg se revelaram matematicamente equivalentes, explicando de modos formalmente diferentes os mesmos fenômenos.

Werner Heisenberg foi um pensador da conciliação entre a tradição e as vanguardas. Não era retrógado, ortodoxo, conservador, tampouco pretendia ser um revolucionário. Pensador de grandes sínteses, o físico alemão buscou coadunar a filosofia antiga e a física contemporânea, bem como pensar a arte, a ciência e a literatura como expressões de uma mesma ordem central. Todavia, nem toda tradição poderia ser preservada. Heisenberg compreendeu que os resultados da mecânica quântica não poderiam ser enunciados sem violar princípios de lógica clássica. Acerca de tal problema, escreveu de modo explícito como o princípio do terceiro excluído parecia não ser válido para o sistema de proposições da mecânica quântica. De acordo com Heisenberg, a lógica clássica é um instrumento de orientação do homem no mundo, refletindo as estruturas deste. A lógica clássica, portanto, reflete o modo como apreendemos as estruturas ontológicas básicas de um mundo igualmente clássico: o mundo dos fatos clássicos, ou seja, da experiência imediata.

No pensamento de Heisenberg há uma profunda relação entre ontologia e lógica. As proposições lógicas se referem a fatos do mundo. O mundo a que a lógica clássica se refere é o mundo macroscópico, da experiência imediata e da física clássica. A mecânica quântica revela um nível de realidade até então desconhecido, onde fenômenos desconcertantes são corriqueiros. O mundo clássico da experiência ordinária e o mundo quântico subatômico em nada se assemelham. Uma vez que a mecânica quântica, na visão de Heisenberg, é incompatível com a ontologia materialista do mundo clássico, a lógica clássica deixa de "funcionar". Se a mecânica quântica implica uma nova ontologia, deve ser elaborada também uma nova lógica.

Por meio desta dissertação pretendemos investigar os problemas ontológicos e lógicos da mecânica quântica, especificamente por meio das concepções, propostas e reflexões de Werner Heisenberg. Quero tornar evidente que Heisenberg criticou o materialismo científico e afastou-se do positivismo lógico, portanto, do experimentalismo radical, adotando assim uma nova concepção ontológica, de acordo com a qual a forma predomina sobre a substância. Mas qual será o significado do conceito de forma neste contexto? A forma matemática das estruturas ontológicas fundamentais – a forma lógica das relações matemáticas elementares. Pretendo também deixar claro que Heisenberg elabora sua interpretação da mecânica quântica – que

culmina nesta ontologia formalista – recorrendo à tradição filosófica, estabelecendo diálogos profícuos com pensadores como Platão, Aristóteles, Descartes e Kant. Outro ponto que não poderemos deixar de abordar é como Heisenberg expõe e trabalha o conflito entre os fundamentos da lógica clássica e da mecânica quântica. Heisenberg resolve os problemas que expõe? Ao sustentar que o princípio do terceiro excluído parece ser violado pelos enunciados de mecânica quântica Heisenberg está a defender que a lógica clássica não é universal, devendo existir relações lógicas próprias dos casos quânticos. Todavia, Heisenberg elabora uma lógica quântica, ou ao menos um esboço desta? Ele inaugura uma tradição de pesquisa nesta área? São tais questões que enfrentaremos nos capítulos seguintes.

Podemos notar, portanto, que são dois os temas fundamentais desta dissertação: a ontologia formalista de Heisenberg, que é anti-materialista, e os problemas postos por ele de inadequação entre os princípios fundamentais da lógica clássica e os enunciados da mecânica quântica. Considero que tais questões são extremamente relevantes para a pesquisa filosófica por abordarem problemas atuais de ontologia, lógica e epistemologia, e que o pensamento filosófico de Heisenberg é instigante e original. Pretendo abordar tais questões dividindo esta dissertação em três partes: a primeira demonstrando as relações entre o pensamento de Heisenberg e a tradição filosófica, buscando neste diálogo compreender e elucidar sua proposta anti-materialista de uma ontologia formal. A segunda, discorrendo acerca dos problemas lógicos levantados por Heisenberg. Quais são estes problemas? Pretendo ainda, nesta segunda seção, demonstrar como as duas primeiras partes do trabalho são coerentes, pois a ontologia formal e a interpretação lógica de Heisenberg podem ser interpretadas como nuances de uma única concepção filosófica. A terceira parte é a conclusão, por meio da qual pretendo salientar a importância do pensamento de Heisenberg para a compreensão de importantes problemas tratados ao longo do trabalho, bem como deixar claro por que considero que alguns problemas postos por Heisenberg ainda carecem de maiores desenvolvimentos.

PRIMEIRA PARTE

1. Heisenberg e a Filosofia: Como Heisenberg compreende a relação entre Física e Filosofia?

Podemos notar pelo menos duas posições antagônicas, entre os físicos, acerca da relação entre filosofia e ciência. Há aqueles que simplesmente ignoram tal relação, não a considerando relevante, e os que a defendem como sendo fundamental. Qual será a posição de Heisenberg e por que a consideramos a mais acertada?

Para Heisenberg a filosofia não somente é o fundamento teórico da *práxis* científica, como também o caráter do empreendimento científico remete necessariamente ao conceito de investigação filosófica. Deste modo, quando fazemos uma pergunta do tipo: "Por que não podemos conhecer o momentum e a posição de um elétron, ao mesmo tempo?", ou, "Como se explica a abundância do elemento hélio no sistema x?" queremos obter o entendimento de determinadas questões técnicas e aplicáveis, mas, além disto, perguntamos estas coisas porque desejamos entender o mundo, compreender a natureza, e porque acreditamos que o mundo possui explicação, possui ordem. Ou seja, fazemos tais perguntas por partirmos do pressuposto de que há respostas. Enfim, quando fazemos aquelas perguntas específicas de física, ou química, ou de qualquer outra ciência, estamos perguntando, na verdade, sobre "O que é a realidade? Quais são suas leis? Por que as coisas são como são? Como elas funcionam? A que mecanismos obedecem?". É por isso que tais questões científicas são questões filosóficas.

Em *A Parte e o Todo* Heisenberg narra a estranheza que lhe causara um jovem físico norte-americano, quando de sua visita aos Estados Unidos, por não pensar mais profundamente acerca das bases e implicações filosóficas de seu trabalho (HEISENBERG. 1996, p. 113). Parecia-lhe que o cientista que não reconhecesse a importância do pensamento filosófico para o empreendimento científico estava, a um só tempo, demonstrando ignorância em relação à história de seu próprio campo de atividades e privando-se de compreender com maior profundidade as implicações de suas investigações. Para Heisenberg, portanto, filosofia e ciência formam uma unidade coerente e complementar. Dois dos três pilares teóricos que sustentaram o edifício da ciência moderna, de sua aurora à contemporaneidade, são fundamentos filosóficos desenvolvidos pelos antigos gregos – o materialismo de Leucipo e Demócrito, por um

lado, e a "crença nas estruturas matemáticas", por outro:

> A Física Nuclear é um dos mais novos desenvolvimentos da ciência natural. Mas a concepção de estrutura atômica da matéria – de que existem partículas elementares, unidades indivisíveis, que são os blocos de construção de toda matéria – foi sugerida há 2.500 anos pelos antigos filósofos gregos. Qualquer um que desejar compreender a teoria atômica moderna deverá estudar a história do conceito de átomo. (HEISENBERG, 1953, p. 5)

Para Heisenberg, o estudo do desenvolvimento filosófico do conceito de átomo na Grécia antiga não é trivial. A compreensão de tal ideia filosófica se revela de grande importância para o entendimento dos fundamentos da física, mesmo de seus avanços mais recentes:

> Para se adquirir uma compreensão dos fundamentos da física atômica nós devemos seguir, passo a passo, as ideias que, dois mil e meio anos atrás, conduziram a filosofia natural à teoria atômica, e devemos então encontrar uma conexão com essas ideias fundamentais, mesmo nos avanços mais modernos da física atômica. (HEISENBERG. 1952, p. 96)

A concepção filosófica atomista, portanto, permanece viva, na visão de Heisenberg, como um dos fundamentos da física, bem como o formalismo matemático de Pitágoras e de Platão, de acordo com o qual a estrutura do mundo físico é matemática, de modo que as investigações matemáticas são instrumentos fecundos na dissecação das estruturas elementares da natureza:

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

É particularmente importante o uso do termo "determinante" na citação em questão. De acordo com Heisenberg, não é o caso que ideias filosóficas são presentes na ciência, nem que sejam importantes, mas acima e muito mais forte que isso: ideias filosóficas determinaram o modo e os objetivos da ciência, desde seu nascimento, e ainda o fazem na atualidade.

Heisenberg considerou a relação entre filosofia e ciência como sendo de fundamental importância para o aprofundamento de nossa compreensão, tanto da natureza, quanto da própria atividade científica. Para Heisenberg há pelo menos três fundamentos filosóficos da ciência – dois dos quais são legados pelos gregos, como vimos. O terceiro fundamento seria kantiano. Na obra *Schrödinger e Heisenberg: A Física além do senso comum,* Antônio F. R. de Toledo Piza nos narra um episódio em que Heisenberg participa de uma intensa discussão acerca da física alemã. Tendo sido "atacado" em artigo publicado, Heisenberg se vê na necessidade de respondê-lo, e na sua resposta, presenteia-nos de modo enfático com a sua concepção acerca da importância da filosofia kantiana para o desenvolvimento das ciências naturais. Nas palavras de Piza: "Heisenberg escreve uma resposta a esse artigo em que se refere à Física Teórica como continuação da grande tradição filosófica que Kant havia iniciado com pesquisas de exploração teórica das bases das Ciências Naturais" (PIZA. 2007, p. 140-141). Heisenberg considera de suma importância "a exploração teórica das bases das Ciências Naturais". Não se trata da exploração do funcionamento da natureza, mas do funcionamento da ciência. Tal investigação, portanto, não é uma ciência particular, mas uma filosofia da ciência. Se a ciência se torna, na cultura ocidental moderna, o principal instrumento para a compreensão do mundo, deve haver, antes de tudo, uma ciência da ciência, para que possamos compreender, em primeiro lugar, este instrumento. Quais os limites da prática científica? Como o conhecimento científico é produzido? Qual a natureza dos conhecimentos científicos? Sem entendermos o funcionamento interno da ciência, sua estrutura, seu alcance, seus limites, não poderemos utilizá-la efetivamente na tentativa de compreendermos o mundo. Heisenberg identifica em Kant o germe moderno de tais reflexões.

Heisenberg concebe as investigações kantianas como fundamentais para a instauração da ciência moderna principalmente por conta do conceito kantiano de "coisa em si". Há pelo menos dois modos de entendermos a atividade científica. Primeiro, concebendo que a ciência descreve o mundo, expondo as estruturas da "coisa em si".

Neste sentido, a ciência é um discurso explicativo acerca da natureza. Segundo, concebendo que a ciência descreve o modo como o homem compreende o mundo. Sendo assim, a ciência é um discurso acerca da relação entre o entendimento e a natureza. Para Heisenberg, a passagem do primeiro para o segundo modo de compreensão caracteriza a física teórica moderna. O conceito kantiano de "coisa em si" é fundamental neste processo:

> O físico atômico teve por isso que resignar-se a considerar a sua ciência apenas como um elo da cadeia infinita dos contatos do homem com a natureza e que aceitar que esta sua ciência não pode falar simplesmente da natureza "em si". (HEISENBERG. 1981, p. 14)

A ciência deriva da filosofia, mas é um rompimento com esta, ou um desdobramento desta? Para Heisenberg, a ciência representa uma continuação da filosofia. Heisenberg não situa o nascimento da ciência em Galileu, mas nos gregos antigos:

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

Heisenberg, portanto, propõe uma interpretação da história da ciência, de acordo com a qual o nascimento da filosofia natural na Grécia antiga é, concomitantemente, o nascimento da investigação científica. Também para Erwin Schrödinger, a origem da ciência moderna encontra-se não na Europa dos modernos, mas na Grécia dos antigos:

> (...) a teoria quântica remonta há 24 séculos, a Leucipo e Demócrito. Eles inventaram a primeira descontinuidade – átomos isolados implantados no espaço vazio. A nossa noção de partícula elementar descende historicamente da noção que eles tinham do átomo, e conceitualmente deriva também da sua noção do átomo. Nós limitamo-nos simplesmente a segui-la. Os atomistas e suas idéias não

> surgiram subitamente do nada (...) ***o atomismo dos filósofos gregos*** certamente não é uma conjectura sem fundamento, mas sim o resultado de uma observação cuidadosa. (SCHRÖDINGER, 1996, p. 134)

Aqueles que não consideram relevante a questão da relação entre filosofia e ciência argumentam que tal relação (i) é simplesmente histórica e (ii) que a ciência moderna surge na Europa como a superação da filosofia natural. Para Heisenberg, entretanto, a questão está longe de ser meramente histórica. Não é somente o caso de dizermos que a ciência tem origem na filosofia grega. A relação entre filosofia e ciência é uma relação de princípios, uma relação epistêmica.

Heisenberg, portanto, desloca o nascimento da ciência para a antiguidade grega. Foi na Grécia Antiga, entre os filósofos da natureza, que foram desenvolvidas as visões científicas de mundo que permanecem sendo o fundamento epistêmico da *práxis* científica, de tal modo que a origem filosófica (não somente histórica, mas também epistêmica) da ciência é algo claro e inequívoco.

> O grande rio da ciência, que atravessa a nossa época, brota de duas fontes situadas no terreno da antiga filosofia, e, embora mais tarde muitos outros afluentes tenham desaguado neste rio, contribuindo para engrossar o seu fecundo caudal, a sua origem é, não obstante, sempre claramente reconhecível. (HEISENBERG, 1962, p. 62)

É por essa origem epistêmica da ciência que mais nos interessamos, não obstante consideremos importantes as investigações em história da ciência. Diante de todo o exposto nesta discussão inicial, nos vemos na necessidade heurística de defendermos uma proposição que sintetize a posição de Heisenberg quanto à relação entre filosofia e ciência, sem a qual todo este trabalho não faria sentido. A presente pesquisa fundamentou-se no entendimento de que os empreendimentos filosófico e científico são, para Heisenberg, superpostos e essencialmente indiscerníveis. Sem este entendimento, a própria tarefa de analisar a Filosofia da Física de Heisenberg careceria de sentido. Embora tal proposta não seja de Heisenberg, defendemos que a seguinte proposição sintetiza o modo como Heisenberg lidava com a relação entre filosofia e ciência: "Nenhuma ciência pode ser empreendida sem bases filosóficas preliminares, interpretações filosóficas atuais e implicações filosóficas ulteriores".

As “bases filosóficas preliminares”, ou fundamentos filosóficos de uma ciência, podem ser entendidas de dois modos: (i) ou uma determinada ciência é *a priori* filosófica, porque todo o seu empreendimento só faz sentido por pressupor a validade de uma determinada tradição filosófica – poderíamos dar o exemplo da própria física, a qual, para Heisenberg, se baseia no materialismo de Leucipo e Demócrito, no formalismo da ontologia matemática de Pitágoras e do *Timeu* de Platão, e nas investigações de filosofia da ciência de Kant – ou (ii) porque a *práxis* científica é em geral uma “busca pelo saber”, portanto, uma “atitude filosófica”. As “interpretações filosóficas atuais” se referem ao sempre presente esforço analítico paralelo ao desenvolvimento técnico de um saber, para enquadrar este saber em um todo mais amplo, analisar a coerência interna do sistema em questão, analisar a classe dos conceitos empregados neste saber, interpretar de modo rigoroso os procedimentos concernentes a tal investigação, o que especificamente requer esforços em (i) analisar a validade lógica das proposições preliminares que sustentam tal investigação, bem como dos enunciados postos por esta, (ii) investigar as inconsistências na definição dos conceitos empregados por este saber, e tentar dirimi-los o mais rigorosamente possível e (iii) analisar a compatibilidade entre os enunciados deste sistema e a tradição epistêmica na qual o sistema se inclui (geralmente há a tentativa de acomodar os enunciados à tradição – modificar a tradição para acomodá-la aos enunciados ocorre somente em tempos extraordinários, como veremos no presente trabalho, uma vez que os desenvolvimentos em mecânica quântica, para Heisenberg, forçam-nos a abandonar as perspectivas milenares do materialismo, de tal modo que devemos promover uma profunda reflexão acerca do significado de determinados conceitos, tais como “espaço”, “tempo” e “matéria” no escopo da nova física). Por último, “as implicações filosóficas ulteriores” são patentes em qualquer campo de investigação. Caso o nível de abstração de um saber científico não seja tal, que questões de ontologia, epistemologia e lógica sejam levantadas, há sempre questões morais, éticas, políticas a serem amplamente discutidas. A inserção de um determinado saber em um espaço intelectual mais amplo, isto é, a reflexão acerca das relações entre um saber e a cultura na qual ocorre, é um trabalho de forte veia filosófica, além de sociológica, histórica e antropológica.

Notamos que podemos encontrar contribuições de Heisenberg em cada um destes itens:

(A) *Bases filosóficas preliminares:* Para Heisenberg, os fundamentos da ciência natural, como já exposto, encontram-se no (i) atomismo grego, (ii) no formalismo

matemático do *Timeu* e (iii) nas investigações kantianas.

(B) *Interpretações filosóficas atuais:* (i) Os estudos de Heisenberg acerca das implicações filosóficas de seu trabalho, o que culmina na necessidade de superação da ontologia materialista, (ii) os estudos de Heisenberg acerca da compatibilidade entre os enunciados de mecânica quântica e os princípios da lógica clássica e (iii) os estudos de Heisenberg acerca da validade e definição dos conceitos empregados pela ciência, portanto, das relações entre "linguagem" e "ciência".

(C) *Implicações filosóficas ulteriores:* (i) As análises de Heisenberg acerca dos aspectos e problemas epistemológicos e ontológicos levantados pela ciência de sua época, bem como (ii) as reflexões de Heisenberg acerca dos problemas éticos e sociais levantados pela ciência e pela técnica, e (iii) suas reflexões acerca das relações entre ciência e outros campos de atividade humana, como música, literatura e religião.

O que a proposição ora apresentada diz, pode ser resumido por meio de uma proposição ainda mais forte e sintetizada: "Concepções científicas de mundo são determinadas por ideais filosóficos". Lembremos que Heisenberg declarou de modo contundente que o curso da ciência atual ainda é determinado por duas ideias filosóficas pré-socráticas: a convicção pitagórica-platônica no formalismo matemático como método de compreensão da natureza e a compreensão atomista de que as estruturas físicas são compostas pela composição de partículas elementares. Qual a implicação radical da proposta de Heisenberg? Que um dos mais difundidos modos de se contar a história da ciência está inexoravelmente equivocado – a ideia de que a ciência moderna nasceu quando a investigação da natureza apartou-se da filosofia. A tese que apresentamos é completamente oposta. Nela, a ciência moderna é um desdobramento da filosofia, a ciência moderna é um modo de filosofar – um modo sistemático de filosofar, reunindo em um todo coerente, elementos já presentes entre os antigos filósofos: (i) investigação das estruturas físicas fundamentais, ou dos conceitos fundamentais acerca de estruturas físicas elementares (espaço, tempo, matéria etc.), (ii) fusão entre a investigação teórica e a investigação experimental, (iii) investigação das estruturas matemáticas como elementos fundamentais para a compreensão da natureza. Para Heisenberg, a ciência tem origem nos filósofos gregos, e não em Galileu. Galileu foi um grande e brilhante cientista, mas foi um filósofo da natureza dentre outros, influenciado, como o próprio Heisenberg, pelo platonismo do *Timeu* e pelo pitagorismo. Ao desenvolver a ciência moderna ele não rompe com a filosofia, mas inaugura uma nova fase do filosofar.

Para Heisenberg, reconhecer a importância da filosofia para a ciência não é uma necessidade da filosofia, uma reivindicação da tradição filosófica pelos louros do pensamento científico, mas uma necessidade da ciência – é a ciência que sai perdendo caso ignore este ponto crucial, pois reduz sua capacidade de compreensão dos próprios problemas herdados e levantados por seu labor. Para Heisenberg, a filosofia será ainda mais útil para o futuro da ciência, uma vez que a *práxis* científica tem retomado diversos problemas filosóficos antigos: "certos problemas de filosofia antiga surgirão em uma nova luz, e o entendimento da teoria quântica será aprofundado pelos estudos destes primeiros problemas" (HEISENBERG. 2004, p.17). Um trabalho acerca da filosofia da física de Heisenberg não poderia começar sem este esclarecimento.

2. Heisenberg e Platão: O formalismo platônico como fundamento do real.

> "Acredito que todo teórico verdadeiro é uma espécie de metafísico domesticado, não importa o quão puro ele se ache como 'positivista'."
> Albert Einstein, *Sobre a teoria geral da gravitação.*

Em *A Parte e o Todo* e *Física e Filosofia*, Heisenberg narra a transição de seu pensamento, de uma filosofia lógico-positivista e materialista, para uma nova visão, na qual a matéria perde em importância ontológica, deixando de ser vista como o fundamento de toda realidade, e o experimentalismo radical perde em importância metodológica, deixando de ser encarado como via obrigatória para o conhecimento científico. Um episódio fundamental nesse processo foi uma conversa travada com Einstein. Também Einstein havia sido bastante influenciado pela filosofia de Ernst Mach em seu trabalho científico, como na elaboração da relatividade. Segundo Ernst Mach, poderíamos considerar "real" somente o que pudéssemos de fato observar. Deste modo, para Mach, os átomos eram apenas modelos representacionais de descrição da natureza, mas não existiam de verdade, pois nunca ninguém vê um átomo. O que vemos, no máximo, são seus rastros em detectores, como câmeras de gás, ou percebemos que os fenômenos físicos e químicos com os quais nos deparamos encontram explicação no modelo atômico. Heisenberg admite que, em um primeiro momento foi influenciado pela filosofia positivista de Mach, pois defendia que somente grandezas observáveis poderiam ser levadas em conta por teorias científicas. Einstein

teria dito a Heisenberg que "é um grande erro tentar fundamentar uma teoria apenas em grandezas observáveis. Na realidade dá-se justamente o inverso. É a teoria que decide o que podemos observar" (HEISENBERG. 1996, p. 77-85). Em *A Parte e o Todo* Heisenberg revela que a filosofia formalista de Einstein, distante do positivismo de Mach, foi influência fundamental em seus trabalhos em física, inclusive na formulação de seu princípio de incerteza.

Afinal, algo que estava em jogo no interior deste debate era, por um lado, o próprio método científico, e, por outro, a validade da visão materialista de mundo. Ciência é somente o que une observação e teoria, se pensava, e somente se pode observar o que for material. Mas outros apontavam, como Einstein o fez a Heisenberg, que, já que ciência é uma investigação acerca da natureza, e que se nas suas entranhas mais profundas, a natureza não se permitir observar, mas apenas ser investigada racionalmente, utilizando a matemática como instrumento, então, nestes casos extremos, a ciência há de ser pura reflexão teórica. Obviamente tal abordagem se põe em sentido oposto ao experimentalismo radical presente na filosofia da física de Ernst Mach, para o qual, como já dissemos, somente é real o que é observável. A citação de Kaku ilustra bem este ponto: "observamos que no início da década de 1920 alguns cientistas ainda mantinham séria reserva com relação à existência de átomos. O que não podia ser visto ou medido diretamente no laboratório, zombavam eles, não existia" (KAKU. 2000, p. 131).

Notamos nesta citação uma clara alusão à filosofia de Mach, que exerceu grande influência na comunidade científica de sua época. Mas o próprio professor Kaku ressalta a ruptura entre a mecânica quântica e a filosofia de Mach, por meio da qual o experimentalismo perde *status* em proveito da reflexão teórica:

> "Mas na altura de 1925 e 1926, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e outros já haviam desenvolvido uma descrição matemática quase completa do átomo de hidrogênio. Com precisão devastadora, eles podiam explicar agora quase todas as propriedades do átomo de hidrogênio a partir da matemática pura." (KAKU. 2000, p. 131)

Como vimos, o pensamento de Heisenberg parece ter progressivamente abandonado a influência positivista de Mach e adotado, de alguma forma, o formalismo teórico de Einstein. De acordo com o positivismo não podemos falar da natureza, mas

apenas do resultado de eventos de observação. Já no formalismo de Einstein, os eventos de observação são partes integrantes e importantes da investigação científica. Todavia, em alguns casos especiais, como nos domínios mais profundos da física relativística e da mecânica quântica, os eventos de observação não são suficientes para a compreensão da natureza. Einstein admite, e Heisenberg parece ser claro em coadunar com ele, que nestes casos, as estruturas fundamentais do mundo podem ser desveladas tão somente por meio da teoria pura.

Para Einstein não somente a relatividade era fortemente "formal" – no sentido de ser uma estrutura teórica sem pontos de contato evidentes com a experiência –, como também é da natureza das teorias serem "especulativas".

> (...) toda teoria é especulativa. Quando seus conceitos básicos (força, pressão, massa) estão relativamente perto da experiência, seu caráter especulativo não é facilmente discernível. Mas, se ela exige a aplicação de complicados processos lógicos a fim de alcançar conclusões com base em premissas confrontáveis com a observação, todo mundo fica consciente de sua natureza especulativa. (EINSTEIN. 2010, p. 21)

Obviamente, o uso do termo "especulação" neste contexto não assume outro significado que não o de "uso puro da razão", de modo que nosso trato de *x* é especulativo se somente abordamos *x* de modo puramente formal, nos valendo unicamente de nosso entendimento, sem recorrermos a dados empíricos.

Embora reconheça a importância dos dados empíricos na construção do conhecimento científico, defendendo que as teorias cujos "conceitos e hipóteses fundamentais estão mais perto da teoria" possuem uma vantagem, pois podem gozar de maior confiança, sua afirmação de que toda teoria é especulativa não se reduz à defesa das teorias como estruturas lógico-matemáticas compostas por axiomas, postulados, hipóteses *et caetera*, mas também a uma proposta forte: o contato destas com o campo da experiência não é evidente:

> Contudo, à medida que aumenta a profundidade do nosso conhecimento, temos de desistir desta vantagem [a proximidade das teorias com o campo da experiência] na busca por simplicidade lógica e uniformidade nos fundamentos da teoria física. É preciso admitir

> que a relatividade geral foi além das teorias físicas anteriores no abandono da "proximidade da experiência" de conceitos fundamentais a fim de obter simplicidade lógica. (...) Na teoria generalizada, deduzir de suas premissas conclusões que possam ser confrontadas com dados empíricos é tão difícil que até agora não se obteve nenhum resultado. A favor dessa teoria estão, a esta altura, sua simplicidade lógica e sua "rigidez". Rigidez significa aqui que a teoria é verdadeira ou falsa, mas não modificável. (EINSTEIN. 2010, p. 22)

Einstein, portanto, admite que em alguns casos, quando a teoria penetra em campos demasiado profundos, o contato com a experiência deixa, até, de ser possível – só nos resta então "dissecarmos" as estruturas do real por meio de instrumentos puramente teóricos. Em alguns casos, o conhecimento científico deverá optar por buscar entre uma "teoria próxima da experiência" e uma teoria que possua "simplicidade lógica e uniformidade nos fundamentos da teoria física" mesmo que afastada do terreno da experiência. A relatividade geral, de acordo com o pensador, é um destes casos em que a segunda opção foi assumida:

> (...) Nenhuma quantidade de fatos poderia levar a essas equações, [Einstein está se referindo às equações gravitacionais relativísticas] a não ser que se usasse o princípio de relatividade geral. Essa é a razão pela qual todas as tentativas de se obter conhecimento mais profundo dos fundamentos da física me parecem condenadas ao fracasso, a não ser que os conceitos básicos estejam de acordo com a relatividade geral desde o começo. Essa situação torna difícil usar nosso conhecimento empírico, não importa quão abrangente ele seja, na busca dos conceitos e relações fundamentais da física – e nos força a recorrer à livre especulação de modo muito mais extenso do que é agora aceito pela maioria dos físicos. (EINSTEIN. 2010, p. 25)

Einstein, portanto, assume que, em alguns casos – justo os mais fundamentais – o alcance de uma teoria será tanto maior quanto menor for sua dependência de dados empíricos. De acordo com ele, ao invés de sempre partirmos da experiência para o entendimento, em casos específicos – e a relatividade é um destes – só nos é possível partir do entendimento para a experiência. Isto significa que devemos estabelecer *a priori* os conceitos fundamentais da teoria e admitir que todo e qualquer discurso acerca

deste campo só fará sentido se tais conceitos, previamente definidos, estiverem sendo levados em conta. Einstein, assim como Heisenberg, não ignora a importância da prática experimental para a constituição do conhecimento científico. A experiência permanece sendo um elemento fundamental da ciência, mas o poder criativo da ciência encontra-se na atividade teórica:

> Naturalmente a experiência se impõe como único critério de utilização de uma construção matemática para a física. Mas o princípio fundamentalmente criador está na Matemática. Por conseguinte, em certo sentido, considero verdadeiro e possível que o pensamento puro apreenda a realidade, como os Antigos o reconheciam com veneração. (EINSTEIN. 1981, p 150-151)

Buscamos enfatizar de modo claro e incisivo que este compromisso filosófico com o formalismo teórico, talvez uma filosofia da física neo-racionalista, presente no pensamento de Einstein, é algo marcante também em Heisenberg, que é formalista em dois níveis: epistemológico e ontológico. No nível epistemológico Heisenberg é formalista porque defende a teoria pura como último recurso para a compreensão do real em casos especiais como a mecânica quântica. Quanto ao nível ontológico, Heisenberg é formalista na medida em que recusa o materialismo como concepção científica ultrapassada e ingênua. Os tecidos elementares do mundo não são compostos de matéria, mas de estruturas abstratas que, embora não possam ser observadas, podem ser descritas pela matemática:

> Se a energia se converte em matéria, isso acontece porque a energia adota a forma equivalente de partículas elementares. Esta forma aparece como a representação de um grupo de transformação, tal como a rotação no espaço ou a transformação de Lorentz. (...) elas são as entidades menores, autênticos blocos construtores da matéria, ou são elas meramente representações matemáticas dos grupos de simetria pela qual a matéria é construída? (HEISENBERG. 1990, p. 47).

Não restam dúvidas de que Heisenberg considera as estruturas materiais como os eventos produzidos pelas relações matemáticas fundamentais:

> Sinto-me fascinado pela ideia de que a simetria seja algo muito mais fundamental do que a partícula em si. Isso se enquadra no espírito da teoria quântica, tal como Bohr sempre a concebeu. Também se enquadra na filosofia de Platão... (HEISENBERG. 1996, p. 193).

O formalismo de Einstein e Heisenberg parece ser pontualmente contrário à filosofia da ciência dominante. Luiz Pinguelli Rosa enfatizou que a maior parte das interpretações filosóficas heurísticas das teorias científicas considera que uma teoria desprovida de dados empíricos não nos comunica nada, de fato, acerca do mundo. Pinguelli cita como exemplo a interpretação de Max Jammer:

> Jammer distingue o sistema formal F de uma teoria T e as regras de correspondência R que fazem parte dela, mas não dos axiomas de F. Deste modo R faz a ponte entre F e os fenômenos observados. O sistema formal é assim o esqueleto lógico da teoria e R constitui as regras de correspondência para dar significado empírico à teoria. F sem R é um jogo lógico de símbolos vazios de conteúdo, R sem F é uma descrição de fatos, em geral incoerente. Esta concepção é a do empirismo lógico, compartilhada por Carnap, Hempel e Stegmuller, admitindo que uma teoria física é um sistema formal parcialmente interpretado. (PINGUELLI. n/p)

O que Jammer defende, portanto, é que x é um conhecimento científico se, e somente se, x = R + F. O que Einstein e Heisenberg defenderam, a nosso ver, é que um conhecimento científico pode ser puramente formal, desprovido de conteúdos empíricos, e ainda assim nos relevar propriedades ontológicas fundamentais. Devemos esclarecer, todavia, que ambos os pensadores não eram avessos ao método experimental. Einstein e Heisenberg consideravam a física experimental de imensa importância. Porém, enfatizavam que alguns problemas de relatividade e mecânica quântica eram casos especiais em que a ciência dissecava eventos e estruturas radicalmente distantes de qualquer experiência, de modo que nenhum método experimental poderia ser empregado. Nestes casos especiais, a única investigação científica possível ocorreria por meio de abstrações lógicas e matemáticas extremamente formais. A física dos eventos relativísticos e quânticos, neste sentido, é,

por excelência, a física do inobservável. Sendo assim, as propostas de Einstein e Heisenberg se opõem claramente ao empirismo construtivo de Bas C. van Fraassen. Em *A Imagem Científica* van Fraassen defende a distinção entre "observáveis" e "inobserváveis" (VAN FRAASSEN. 2007, p. 24). Dois fatores fundamentam tal distinção: as possibilidades sensoriais humanas e as condições da observação científica. A observação científica transcende a experiência empírica sensorial, porque conta com arrojados instrumentos e métodos de mensuração. O "observável" da ciência, em última análise, poderia ser chamado de "mensurável". O objeto da ciência, portanto, é tudo aquilo que pode ser mensurado, seja por meio da experiência sensorial, seja por meio de complicados procedimentos de observação que lançam mão de refinadas técnicas e arrojados recursos tecnológicos. Deste modo, van Fraassen elabora uma filosofia da ciência empirista de acordo com a qual, em uma teoria científica, estruturas formais e dados empíricos estão diretamente relacionados:

> Apresentar uma teoria é especificar uma família de estruturas, seus modelos; e, em seguida, especificar certas partes desses modelos (as subestruturas empíricas) como candidatas à representação direta dos fenômenos observáveis. (VAN FRAASSEN. 2007, p. 122)

Samuel Simon e Aline Moraes, no artigo "O Empirismo Construtivo de Bas C. van Fraassen e o problema do sucesso científico", esclarecem que van Fraassen limita o empreendimento científico ao conjunto dos fatos "observáveis". Sendo assim, aqueles que consideram também alguns "inobserváveis" como objetos da ciência defendem posições contrárias ao pensamento de van Fraassen:

> A oposição à formulação de van Fraassen em relação à distinção observável/inobservável feita pelo Realismo Científico considera que certos inobserváveis possam ser entidades reais. A estratégia dessa corrente fundamenta-se, sobretudo, no papel dos inobserváveis para o sucesso das teorias científicas. (SIMON; MORAES. 2007, p. 143)

Einstein e Heisenberg não somente consideram que certos inobserváveis possam ser entidades físicas reais, como defendem claramente que os eventos e estruturas físicas elementares talvez sejam fundamentalmente inobserváveis. Enquanto para van Fraassen o que pode ser observado determina o que pode ser teorizado, para Einstein e

Heisenberg, é a teoria que determina o que pode ser observado. Somente estabelecendo, antes de tudo, alguns conceitos e estruturas formais, é que temos um "modelo de mundo". As observações em laboratório não são mensurações do mundo, mas mensurações de certas propriedades destes "modelos de mundo" previstos pelas teorias. Outro aspecto ainda mais forte do formalismo de Heisenberg é o seu anti-materialismo. A matéria é apenas o produto de relações matemáticas ontologicamente fundamentais. A matéria é observável, mas tais relações matemáticas fundamentais são inobserváveis. Podemos "contemplá-las" por meio do formalismo das teorias, mas não "mensurá-las" por meio de métodos experimentais empíricos.

Essa visão de que a matemática seria o instrumento "por excelência" de descrição das camadas essenciais da natureza (ou mesmo sua "essência") é por certo uma concepção filosófica antiga muito presente nas escolas de Pitágoras e Platão:

> O próprio sentido moderno da palavra teoria, como conquista intelectual construída a partir do conhecimento matemático, começa a ser elaborado a partir do pitagorismo. (...) A Escola Pitagórica dedicou-se ao estudo da Matemática e a fez progredir bastante. Para os pitagóricos, o princípio de todas as coisas seria a *Matemática*, e, por conseguinte, também sua essência, os *números*. (CARUSO; OGURI. 2006.p 10)

Caruso e Oguri nos lembram de que a ideia platônica de que a natureza emerge de uma profunda simetria influenciou diretamente outros avanços fundamentais da física, que seriam as obras de Copérnico, de Kepler, e a concepção contemporânea de partículas elementares, os *quarks*. Sabemos que os *quarks* nunca foram e não podem ser observados isoladamente, mas, ainda assim, apresentada por meio de um formalismo matemático elegante e capaz de explicar fenômenos subatômicos, a tese dos *quarks* valeu o prêmio Nobel de Física ao seu elaborador, o físico norte-americano Murray Gell Mann.

> (...) esse período clássico da filosofia grega caracteriza-se, em linhas gerais, pela presença do ideal de *Cosmos* e pela convicção de que a ordenação da variedade infinita das coisas e eventos possa (e deva) ser alcançada racionalmente. Portanto, para os pensadores gregos, a compreensão da Natureza passa necessariamente pela busca de um

> tipo de ordem, o que, por sua vez, requer o reconhecimento do que é igual, do que é regular, ou ainda, da capacidade de reconhecer *simetrias*: tudo em busca de uma *Unidade*. (...) essa unidade era (...) *Geometria* para Platão. Dois exemplos podem evidenciar a relevância do ideal platônico de geometrizar a Natureza na história da Física. O primeiro é que a valorização implícita da simetria terá grande impacto na Astronomia do século XVI. O segundo exemplo de influência platônica, relacionado à concepção moderna da estrutura da matéria, é a introdução de novos constituintes da matéria nuclear, os *quarks*. (CARUSO; OGURI. 2006, p 12)

E ainda:

> Postulados, de início, como entidades matemáticas mnemônicas nos trabalhos dos físicos norte-americanos Murray Gell Mann e George Zweig da década de 1960, os *quarks* guardam uma forte analogia com os triângulos de Platão (...). Partículas observadas diretamente na natureza, como o próton e o nêutron, e outras, produzidas em laboratório, seriam constituídas de partículas não-observáveis, cujas existências teriam origem em princípios formais de simetria, portanto em princípios puramente matemáticos. Com relação a essa idéia de Gell Mann, que, aliás, se mostrou muito frutífera, pode se referir as palavras de Heisenberg: *Nossas partículas elementares são comparáveis aos corpos regulares do* Timeu *de Platão. São os modelos originais, a idéia de matéria.* (CARUSO; OGURI. 2006, 569-570)

Atualmente, os quarks, que nasceram como ideias matemáticas, são considerados de fato partículas, embora nenhum quark possa ser observado isoladamente.

Se a filosofia de Mach influenciou numerosos cientistas do mundo inteiro, e por um período, o próprio Einstein, posteriormente, tanto Einstein quanto Heisenberg perceberam que nem tudo poderia ser diretamente observado, e que tal descrição rigorosa dos fenômenos era insuficiente para comunicar o mistério do mundo quântico em toda sua profundidade. Há aqui, também, o nascimento de uma epistemologia própria de Heisenberg: não podemos conhecer a natureza com exatidão, mas isto não se

deve a nenhuma limitação da razão, é a própria natureza que é 'inexata', é ela própria que fixa os limites do conhecimento. O limite da razão está na incerteza ontológica do mundo.

Em *A Parte e o Todo* Heisenberg escreveu um capitulo chamado "Física atômica e filosofia platônica". Nele, o autor narra que, desde a mocidade, muito o impressionara o *Timeu* de Platão, com a idéia de que o cerne da realidade, sua camada mais profunda, onde toda a natureza é fecundada, é um "mundo" abstrato de conceitos matemáticos. Para Heisenberg, nesta obra, Platão não está defendendo que realmente a natureza é constituída por aquelas determinadas formas geométricas, tetraedros, octaedros, enfim. Mas, segundo Heisenberg, o essencial da obra é que Platão está propondo uma geometrização da física; está, já naquela época, intuindo seu âmago abstrato, indo por outro viés que não o atomismo de Leucipo e Demócrito.

> Até então acreditávamos na antiga representação de Demócrito, que pode ser resumida por "no princípio era a partícula". Havíamos presumido que a matéria visível compunha-se de unidades menores; se continuássemos a dividir estas por tempo suficiente, chegaríamos às unidades mais diminutas, que Demócrito havia chamado de "átomos" e que os físicos modernos chamavam de "partículas elementares", por exemplo, prótons e nêutrons. Mas, talvez toda essa filosofia fosse falsa. (…) Talvez a matéria pudesse ser ainda mais dividida, até finalmente já não ser uma verdadeira divisão de uma partícula, e sim uma transformação de energia em matéria, até as partes já não serem menores do que o todo de que foram separadas. Mas o que haveria no início? Uma lei física, a matemática, a simetria? No início era a simetria! Isso soava como o Timeu de Platão (...). As partículas elementares incorporam simetrias; são suas representações mais simples e, no entanto, são apenas conseqüências delas. (HEISENBERG. 1996, p. 157-158)

Nessa linha de raciocínio, os átomos são de fato entidades da natureza, mas não enquanto partículas elementares, e sim, como fenômenos que emergem de um plano profundo de forças e campos, os quais, por sua vez, emergem de leis, que no final das contas, são *relações*, *regulações*, bases matemáticas abstratas sem as quais a matéria não poderia existir e se organizar e desenvolver.

A questão que se põe, então, de modo irresistível, é: para Heisenberg, a física

contemporânea resgata o idealismo platônico como a filosofia da natureza mais viável para a ciência? Antes de tudo, devemos esclarecer o que Heisenberg entendia por "idealismo platônico":

> (...) em Platão, no limite mais baixo das séries das estruturas materiais, não existe efetivamente algo material, mas uma forma 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 ideia; esse conceito é, portanto, denominado idealismo. (HEISENBERG. 2000, p. 12)

Parece-nos que, apesar do fato de defender que as estruturas matemáticas são as "ideias de matéria", o idealismo platônico a que Heisenberg se refere não é do tipo que pode ser inferido de *A República*, estando, deste modo, mais próximo da visão apresentada por Platão no *Timeu*. Todavia, mesmo o "idealismo" do *Timeu* não é considerado de forma literal por Heisenberg, mas apenas como uma metáfora que nos indica a precedência, no escopo da nova física, das "estruturas matemáticas" em detrimento das "estruturas materiais". Neste sentido, poderíamos responder de modo afirmativo à questão posta acima, e afirmar que a física contemporânea, para Heisenberg, "está próxima" do idealismo platônico:

> Independente da decisão última podemos afirmar agora que a resposta final estará mais próxima dos conceitos filosóficos expressos, por exemplo, no "Timeu" de Platão do que dos antigos materialistas (HEISENBERG. 2000, p. 26).

De acordo com Steven Weinberg, laureado com o Nobel de Física, de fato, o avanço da física contemporânea demarca o fim para o materialismo científico e sua visão de que a causa de toda realidade é material, pois a própria matéria passa a ser vista como efeito de um campo de forças mais profundo:

> (...) da fusão da Relatividade com a Mecânica Quântica resultou uma nova visão de mundo, na qual a matéria perdeu seu papel central. Esse papel foi usurpado por princípios de simetria, alguns deles ocultos à visão no presente estado do Universo (CARUSO; OGURI. 2006, p. 553).

Weinberg ressalta que alguns princípios de simetria – algumas relações matemáticas ontologicamente fundamentais – encontram-se "ocultas à visão", isto é, (na linguagem de Bas van Fraassen), são inobserváveis, e ainda assim, são elementares, o que corrobora o formalismo de Heisenberg. De acordo com tal interpretação, o que seria, então, a matéria? Para Heisenberg, as partículas de matéria são "simples representações daquelas estruturas matemáticas fundamentais", são, dadas as leis da natureza, meras consequências da estrutura nomológica do mundo: "representam o conteúdo das leis fundamentais da natureza" (HEISENBERG. 2006, p. 26). No nível elementar da natureza, só as leis da natureza são fundamentais; é porque tais relações naturais elementares, que deliberamos chamar de leis da natureza, existem, que a matéria é como é, que a natureza é deste modo e não de outro.

Heisenberg, em *Física e Filosofia*, propõe uma nova visão da natureza, na qual o materialismo é repensado como um modelo incompleto e paradoxal da realidade. Para Heisenberg, quanto mais nos aprofundamos no mundo das partículas elementares, mais abstrata a natureza se torna, até que aquilo que chamamos de matéria, desvanecendo pouco a pouco, vai perdendo toda sua concretude, e se revela como um nível de conceitos matemáticos abstratos, para muito além do que o realismo materialista supôs ao longo dos séculos. A filosofia da física de Heisenberg está muito mais próxima daquilo que Platão nos deixou, e de outros sistemas filosóficos pré-socráticos e orientais, do que das obras clássicas da filosofia natural europeia, de Galileu, Newton e Descartes, difusora do mecanicismo e do realismo materialista. Podemos concluir que o empreendimento da física contemporânea não se desenrola sem amplas e profundas reflexões filosóficas, diríamos metafísicas (como um retorno à filosofia grega), e sem a necessidade de uma marcante reavaliação filosófica dos conceitos empregados pela ciência clássica para descrever a realidade, e que a soma disto tudo concorre para desconstruir a ontologia materialista e substituir o materialismo científico por uma filosofia mais ampla, que acomode o fato de que as partículas de matéria são "efeitos", e não "causas" da realidade. O mundo material do senso comum, tal como o percebemos cotidianamente, não passa de um dos tecidos mais superficiais do cosmos, de uma camada que impressiona nossos sentidos, e que nosso intelecto analisa com sofreguidão. Para além dos véus da ignorância e do velho senso comum, lá estará o âmago do real: não podemos tocá-lo, não se trata de matéria.

3. Heisenberg e Aristóteles: Os objetos quânticos como *potências* elementares da natureza.

Em *Física e Filosofia*, Heisenberg recorre ao conceito aristotélico de *potentia* para lançar luz sobre a questão da tensão entre os conceitos clássicos e a natureza quântica. O conceito de *potentia* é basilar na história do pensamento ocidental. Em Aristóteles, tal conceito ocorre em paridade com o conceito de ato.

Para Aristóteles algo poderia existir em ato, ou em potência. Uma semente, por exemplo, é ato enquanto semente, mas é árvore enquanto *potentia.* O ato, portanto, é a existência concreta, a concordância ontológica daquilo que é como de fato é, e a potência é também uma existência tão real quanto o ato, mas é existência daquilo que está presente no ato enquanto suas possibilidades. Ou seja, a existência da árvore na semente é uma existência real, porque a árvore é uma potência real da semente, um desdobramento natural da mesma, seu fim, sua consequência. A árvore já está "contida" na semente e, portanto, não existe enquanto ato, mas é real, na medida em que existe enquanto *potentia*. Analogamente, os objetos quânticos, mesmo que não possam ser medidos e localizados, mesmo que pareçam não existir concretamente, são reais porque existem enquanto possibilidades, *potências* elementares da natureza. Assim, durante o salto quântico o elétron *existe* enquanto possibilidade de ser, *potentia* de vir a ser.

> Na teoria quântica, analogamente, todos os conceitos clássicos – quando aplicados ao átomo – encontram-se tão bem ou tão mal definidos como o de "temperatura de um átomo": eles estão correlacionados com certas expectativas estatísticas acerca das propriedades atômicas; somente a instâncias raras, a expectativa, isto é, a probabilidade correspondente, equivalerá à certeza. E, de novo, como no caso da termodinâmica estatística clássica, é difícil considerar-se essa expectativa como algo objetivo. Talvez se possa chamá-la de tendência ou possibilidade objetiva, uma potencialidade, a *potentia* no sentido da física aristotélica. De fato, eu pessoalmente acredito que a linguagem que os físicos utilizam, ao falar sobre fenômenos atômicos, sugere em suas mentes algo semelhante ao conceito de *potentia*. E os físicos, assim, foram gradualmente se habituando a falar, por exemplo, de órbitas eletrônicas, não como uma

realidade, mas sim como uma *potentia.* (HEISENBERG. 2006, p. 136)

Respondendo as questões levantadas no início e ao longo do texto, a ideia de Heisenberg parece ser a de que existem dois modos de realidade. A realidade enquanto coisa objetiva, que pode ser mensurada, e a realidade enquanto *potentia*, que pode apenas ser pensada abstratamente e instrumentalizada pelo mais profundo formalismo matemático da física quântica. Os objetos quânticos, ao contrário dos clássicos, são potências neste sentido. Podemos afirmar que existem, mas existem neste modo: enquanto *possibilidades objetivas* e não como objetos ou eventos mensuráveis, que duram determinado tempo em alguma parte do espaço.

O físico John Bell toma caminho que parece coadunar com Heisenberg. Para Bell, não se trata de um problema de linguagem, trata-se de uma questão de lógica e ontologia, ou seja, o problema está em pensar "universo" e "espaço-tempo" como dois conceitos que compartilham exatamente o mesmo significado. Se esta relação fosse o caso, e se o elétron não se encontra no espaço-tempo, logo não se encontra no universo, e como o universo é tudo que existe, logo o elétron não existe durante o salto quântico. Como universo é tudo que existe, ao identificar "universo" com "espaço-tempo", ou formulamos que alguma coisa existe fora daquilo que contém todas as coisas, ou que algo desaparece da existência, e a ela retorna, vindo de lugar algum e indo para um nada absoluto. Bell elaborou um teorema para elucidar a questão, segundo o qual os sinais não-locais e os saltos quânticos só são paradoxais se aceitarmos que a única realidade possível é o espaço-tempo descrito pela teoria relativística. Contudo, se introduzirmos uma realidade não-local, o paradoxo desmorona. Penso que é o caso de dizermos que "Todo o espaço-tempo (S) é Universo (P)". Ao dizermos isto, inserimos S no universo de P, ou seja, tomamos S como elemento do conjunto P. "Todo S é P", neste sentido, implica que "Algum P é S". Alguma parte do universo é espaço-tempo, ou, o espaço-tempo corresponde a alguma quantidade dos elementos do conjunto "universo", mas não a totalidade de elementos. Durante o salto quântico, os elétrons (*e*) não existem em S, mas permanecem como entes, ou elementos, de P. Um salto quântico pode ser representado como a movimentação de uma partícula "*e*" dentro de um diagrama de Euler. A partícula "e" se localiza em alguma região do espaço-tempo S, que não pode ser definida por conta do princípio de incerteza. Em dado momento, "*e*" se desloca de uma região de S para outra, tomando um caminho fora de S, sem, contudo, sair de P. Segundo Bell, as partículas correlacionadas estão ligadas por elos

não-locais, ou seja, estão vinculadas para além do espaço-tempo. É por isso que interações quânticas instantâneas são possíveis e que os saltos quânticos ocorrem. Um enunciado "belliano" para o salto quântico seria: "Durante o salto quântico o elétron existe em outro nível de realidade que transcende os limites físicos do espaço-tempo".

O enunciado "Durante o salto quântico o elétron existe em um nível "belliano" de realidade contido pelo universo (P) fora do espaço-tempo (S)", pode ser aplicado sem contradição lógica. Se antes a situação era tão embaraçosa que postulávamos precisar de duas linguagens para uma realidade, agora com uma única linguagem explicamos duas realidades. Mas não estaremos fazendo uma concessão muito grande em termos de física, só para nos livramos de embaraços em termos da lógica semântica dos enunciados? A interpretação de Bell coaduna com a de Heisenberg. Parece que é o caso que o "nível das possibilidades" em Heisenberg, onde os elétrons existem enquanto potências, e o nível de realidade não espaço-temporal postulado por Bell apontam para uma mesma realidade quântica ainda desconhecida.

Poderíamos afirmar que a proposição de Heisenberg de que os objetos e eventos subatômicos devem ser encarados não como "coisas" que existem objetivamente no sentido da física clássica, mas como possibilidades coaduna com a proposta belliana de que o elétron, durante o salto quântico, existe em outro nível de realidade, que não a tessitura espaço-temporal. Este outro nível de realidade, para além da física do espaço-tempo, é um nível de possibilidades. Com isto, estamos a conceber uma nova estrutura ontológica onde tanto o "nível de potências" e o "espaço-tempo" são elementos do "conjunto universo". No espaço-tempo, X existe se e somente se existir uma "coisa" ou evento, no mundo físico, de modo objetivo, com a qual X esteja em relação de identidade A=A. Cada ente que existe no espaço-tempo deve objetivamente (isto é, deve ser passível de alguma mensuração direta ou indireta) durar uma determinada quantidade de tempo em alguma coordenada estatisticamente dedutível de espaço. Já no "nível de potências" um ente não possui existência objetiva alguma, existindo como uma possibilidade de vir a ser. No espaço-tempo os entes são "atos", fora do espaço-tempo, no sentido "belliano", os entes são possibilidades, como propôs Heisenberg.

Entretanto, apesar de parecer arrojada, a aproximação entre as interpretações de Bell e Heisenberg nos parece exagerada. Heisenberg não pensa as partículas como possibilidades quânticas fora do espaço-tempo. A natureza probabilística das partículas é uma característica da realidade "no" espaço-tempo. Penso que mais fiel à interpretação de Heisenberg é o entendimento das partículas quânticas como "atos"

durante as observações e potências entre as observações. Para Heisenberg, "As ondas probabilísticas de Born, Kramers e Slater podem ser interpretadas como a formulação quantitativa do conceito de 'dynamis', possibilidade, ou na versão latina posterior, 'potentia', na filosofia de Aristóteles" (HEISENBERG. 2000, p. 16). Em nenhum momento Heisenberg necessita conceber outro nível de realidade, metafísica no sentido de ser "além do espaço-tempo", para acomodar o fato de que as mesmas partículas quânticas são a um só tempo "atos" e potências. Por que isto é o caso, já o enunciamos acima: os objetos quânticos são "fatos" e, portanto, atos, quando são "objetos de observação", mas são emaranhados de possibilidades, enquanto são objetos puros da natureza, sem observação alguma: "uma certa camada intermediária de realidade, meio caminho entre a realidade maciça da matéria e a realidade intelectual da ideia ou a imagem", nas palavras de Heisenberg (HEISENBERG. 2000, p. 16).

Outro desenvolvimento analítico importante em que Heisenberg recorre à filosofia aristotélica para fundamentar a estrutura conceitual da física contemporânea é quando lança mão dos conceitos de forma e substância. Diante da questão fundamental posta pelos pré-socráticos – Do que é feito o mundo? – Heisenberg, ao que nos parece, responderia de modo aristotélico: O mundo é feito de forma e substância. Nas palavras de Heisenberg:

> Todas as partículas elementares são compostas da mesma substância, isto é, energia. Constituem as várias formas que a energia deve assumir a fim de tornar-se matéria. No caso reaparece o par de conceitos, "conteúdo e forma", ou "substância e forma", da filosofia aristotélica. Energia não é apenas a força que mantém o "todo" em movimento contínuo; é também – como o fogo na filosofia de Heráclito – a substância fundamental de que é feito o mundo. (HEISENBERG. 2000, p. 23)

A forma é o que molda e, em certo sentido, "determina" o mundo, e a substância é o conteúdo, a "massa" do mundo. Na física contemporânea, a forma equivale às estruturas matemáticas fundamentais, as leis da natureza, e a substância do mundo equivale ao conceito de energia. Todas as coisas que experimentamos, toda a diversidade da matéria, são estados variados de energia.

Estes são, a nosso ver, os dois principais usos que Heisenberg faz da filosofia aristotélica: Primeiro, pensar as partículas elementares em termos de "atos" e "potências" e, segundo, pensar a resposta da física de sua época em face da questão fundamental pré-socrática acerca da constituição do mundo, valendo-se dos conceitos aristotélicos de "forma" e "substância".

4. **Heisenberg, Schrödinger e Einstein: Superação do materialismo e ontologia do *formal.***

Embora tenha se posicionado ao lado de Einstein, numa interpretação não anti-realista da física de seu tempo, indo contra as posições técnicas e algumas das interpretações filosóficas de Bohr e Heisenberg, inúmeras vezes Erwin Schrödinger também questionou a antiga imagem da *Physis,* se as concepções antigas de matéria e realidade ainda faziam sentido no escopo ontológico e epistemológico da física contemporânea:

> O atomismo tem se mostrado ser infinitamente fértil. Contudo, quanto mais se pensa nele, mais temos que nos perguntar até que ponto é uma teoria *verdadeira*. Será que se alicerça exclusivamente sobre a estrutura objetiva e efetiva do "mundo real à nossa volta?" Será que não é, de alguma forma significativa, condicionado pela natureza da compreensão humana – que Kant designou por "*a priori*"? (SCHRÖDINGER. 1996, p. 82)

Em "A nossa imagem da matéria", Schrödinger é claro em sua posição: "essa imagem da realidade material é hoje mais vaga e incerta do que foi por muito tempo" (SCHRÖDINGER. 1996, p. 46). O que é, então, afinal, a matéria para a física contemporânea? Permanece como o fundamento da realidade, com existência objetiva? É formada por partículas indestrutíveis, sólidas, se constitui como a substância que compõe todas as coisas? Para Schrödinger, a matéria perde o *status* ontológico de fundamento do *real,* passando a ser considerada como mais uma conseqüência das leis da natureza. Essa visão aproxima-se imensamente das visões de Heisenberg e Einstein. Seria, portanto, o elo filosófico que uniria estes autores em uma interpretação comum da natureza da matéria: já não se pode dizer que todas as coisas são feitas de matéria, como aventavam os materialistas radicais, uma vez que a própria matéria revela-se como o

produto de um nível de realidade mais profundo, puramente formal. No mesmo texto acima citado Schrödinger expressa esta ideia da seguinte forma:

> O que são de fato essas partículas, esses átomos, essas moléculas? (...) Eles podem talvez no máximo ser pensados como criações mais ou menos temporárias dentro do campo de ondas, cuja estrutura e variedade estrutural, no sentido mais amplo do termo, são agudamente determinados por meio das leis de onda na medida em que reaparecem sempre do mesmo modo, que devem ocorrer *como se fossem* uma realidade material permanente. (SCHRÖDINGER. 2000, p. 66)

Neste ponto a filosofia da física de Schrödinger parece fundir-se à ontologia matemática, ou " formal" de Heisenberg. A ideia básica é que a matéria é apenas um modo transitório e contingente da realidade. O fundamento do *real* é pura forma, e não pura substância. O cerne ontológico da realidade é o complexo de leis da natureza, o complexo nomológico do *Kosmos*. Schrödinger desenvolve sua concepção de modo mais elaborado em *Ciência e Humanismo*, nos tópicos "Uma mudança radical nas nossas noções de matéria" e "Forma e não substância, o conceito fundamental". Neste ponto de sua obra, Schrödinger primeiro parece esboçar um tipo de idealismo, depois discorre sobre o abandono da perspectiva materialista. Quanto ao possível idealismo, não muito pode ser dito, uma vez que o esboço de tal programa se reduz a poucas frases:

> Existe o problema da *matéria*. O que *é* a matéria? Como que devemos visualizar *a matéria* na nossa mente? A primeira forma da questão é um pouco absurda. (Como é que poderíamos dizer *o que* a matéria *é* – ou, caso se chegue a isso, *o que a eletricidade é* – sendo ambos fenômenos que só a nós dizem respeito?) A segunda forma já revela toda uma mudança de atitude: a matéria é uma imagem na nossa mente – a mente, portanto, é anterior à matéria (apesar da estranha dependência empírica dos meus processos mentais sobre os dados físicos de uma certa porção de matéria, i.e. o meu cérebro). (SCHRÖDINGER. 1996, p. 104).

O que fica claro neste trecho? Parece uma assunção idealista por parte do autor. Se a matéria é uma imagem em nossa mente, então a mente é anterior à matéria. O problema está em admitir a dependência mental dos dados imediatos da consciência.

Schrödinger parece coadunar com a tese dos empiristas, como Hume e Locke, endossando que os processos mentais de certa forma dependem das impressões de nossas experiências empíricas sobre nossa matéria cerebral. Dado o estilo do texto, vivaz e eloquente, ficamos sem saber se o autor assume ou ironiza a tese de que "a mente é anterior à matéria", posto que "a matéria é uma imagem em nossa mente". Caso esteja assumindo esta posição, então parece contradizer-se, pois uma vez que os processos mentais dependem dos processos eletroquímicos neurológicos da matéria cerebral, a matéria é que deverá ser considerada fundamental, e não a mente. A aparente *aporia* dissolve-se quando pensamos na possibilidade de encararmos mente e matéria como uma hierarquia entrelaçada, formando um circuito em que cada um dos sistemas influi sobre o outro. A matéria é uma imagem na *minha* mente enquanto *minha* "elaboração do mundo material", elaboração que somente foi possível graças ao intercâmbio fisiológico de dados entre o mundo externo e a minha mente. A proposição é de que "o mundo é uma imagem em *minha* mente", de que o mundo é o *meu* mundo, sem, contudo, negar a existência de um mundo externo, do qual sou apenas mais um elemento.

Em sua interpretação da "matéria em si", Schrödinger é muito mais claro e incisivo do que o foi sobre a relação entre *mente* e *matéria*, poupando-nos trabalho analítico. Vejamos suas palavras em "Uma mudança radical nas nossas noções de matéria":

> Durante a segunda metade do século XIX a matéria parecia ser algo de permanente a que nos podíamos agarrar. *Existia* um pedaço de matéria que nunca tinha sido criado (tanto quanto cada físico sabia) e que nunca podia ser destruído! Podia-se pegar nele e sentir que não fugiria entre os dedos. (...) De momento, pretendo apenas explicar a mudança radical que ocorreu no decurso do último meio século. (...) Acreditávamos que estávamos a movimentar ainda no quadro da antiga estrutura "materialista" das idéias, quando afinal já a tínhamos abandonado. As nossas concepções de matéria revelaram-se muito menos materialistas do que o eram na segunda metade do século XIX. Ainda são muito imperfeitas, muito confusas, falta-lhes clareza relativamente a vários aspectos. Mas pode-se afirmar que a matéria deixou de ser a coisa simples, palpável e vulgar no espaço que se pode seguir enquanto se movimenta – cada um de seus pedacinhos – e que deixaram de se poder verificar as leis precisas que determinam o seu

movimento. (SCHRÖDINGER. 1996, p. 104)

O ponto crucial deste trecho é sua proposição negativa acerca da matéria – o que a matéria *não é*: palpável, eterna, indestrutível, fundamental. Todavia, surge logo a questão perturbadora: o que é, então, a matéria? Se a matéria não é fundamental, como pensavam os materialistas, o que o é? Schrödinger encarrega-se de responder, no tópico "Forma e não substância, o conceito fundamental" de *Ciência e Humanismo:*

> Vamos agora regressar às nossas partículas elementares e às pequenas organizações das partículas como átomos ou pequenas moléculas. A *velha* idéia acerca delas era que a *sua* individualidade se baseava na identidade da matéria contida nelas. Isto parece ser uma adição sem fundamento e quase mística, que representa um contraste marcado com o que acabávamos de descobrir que constitui a individualidade dos corpos macroscópicos, bastante independente dessa hipótese materialista grosseira e não necessitando de seu apoio. A noção *inovadora* é que aquilo que é permanente nestas partículas elementares ou pequenos conjuntos é a sua forma e organização. (SCHRÖDINGER. 1996, p. 110)

Esta ontologia proposta por Schrödinger coaduna perfeitamente com o uso que Heisenberg faz da filosofia aristotélica na mecânica quântica, quando defende que o conceito fundamental para entendermos os níveis mais profundos da natureza é o conceito de forma, não o de substância. Tal aproximação entre Schrödinger e Heisenberg se revela ainda maior quando analisamos a citação seguinte:

> O hábito da linguagem do dia a dia engana-nos e parece invocar, sempre que ouvimos pronunciar a palavra "configuração" ou "forma", a configuração ou a forma de *algo*, parece significar que é necessário existir um substrato material para assumir uma forma. Cientificamente este hábito remonta a Aristóteles, às suas *causa materialis* e *causa formalis.* Mas quando se trata das partículas elementares constituintes da matéria, parece que não faz sentido pensar nelas novamente como consistindo de algo material. Elas são, por assim dizer, *forma pura*, nada mais senão forma. O que surge uma e outra vez em observações sucessivas é esta forma, não uma quantidade ínfima e individual do

material. (SCHRÖDINGER. 1996, p. 110)

Por mais que possam divergir em outros pontos, de caráter técnico e filosófico, Erwin Schrödinger, o criador da mecânica ondulatória, e Werner Karl Heisenberg, o criador da mecânica matricial, concordam neste ponto de suma importância: a desconstrução da ontologia materialista e o nascimento de uma ontologia do *formalismo puro* como fundamento da *Physis* na física contemporânea. Assim como as mecânicas ondulatória e matricial são elaboradas em bases diferentes, mas equivalem-se matematicamente, as ontologias *formalistas* de ambos, embora desenvolvidas de modo original por cada qual, são, no fundo, filosoficamente equivalentes. O que chamo de ontologia formal é a concepção filosófica de acordo com a qual estruturas abstratas imateriais e inobserváveis são ontologicamente fundamentais, gerando e sustentando todos os demais níveis da realidade, dos micros aos macros sistemas. Estas "estruturas" são apreensíveis tão somente pelo formalismo lógico matemático. Tal ontologia se opõe radicalmente ao materialismo. Quanto ao materialismo, refiro-me à definição de Ricken: "Por materialismo entende-se toda visão de mundo que considera a matéria física como o único modo de existência ou, no mínimo, como sendo o modo último de existência da realidade a que tudo sustenta" (RICKEN. 2002. p, 169). É neste mesmo sentido que Heisenberg concebe o materialismo:

> Importante, para a imagem materialista do mundo é apenas a possibilidade de se considerarem estes menores constituintes das partículas elementares como a última realidade objetiva. (HEISENBERG. 1981, p. 13)

Os materialistas defendem que o discurso científico acerca das propriedades elementares das estruturas físicas não pode prescindir do conceito de matéria. Todavia, Heisenberg considerava a ontologia materialista como uma concepção de mundo demasiado simplista:

> Daqui resultou a imagem simplista que o materialismo do século XIX tinha do mundo: os átomos, única realidade imutável, movem-se no espaço e no tempo e, graças à sua disposição e movimentos recíprocos, produzem os variados fenômenos do mundo sensível. (HEISENBERG. 1981, p. 11)

Anderson Leite e Samuel Simon em "Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhagen: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica" enfatizam o ideal de uma ontologia não materialista no pensamento de Heisenberg.

> O caminho na direção dessa nova realidade física ou, em outras palavras, a busca por um conteúdo ontológico nas estruturas matemáticas da teoria quântica, fica nítida quando Heisenberg afirma que as ondas de probabilidade introduziam "algo entre a ideia de evento e o evento real", isto é, "um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade" (Heisenberg, 1995, p. 36). (...) No lugar dos pontos materiais, do império da *res extensa*, Heisenberg vê processos e simetrias fundamentais essencialmente platônicas, tidas por ele como "uma característica genuína da natureza". (LEITE; SIMON. 2010)[1]

O formalismo de Heisenberg parece estar baseado no mais simples e seguro método dedutivo. Há um grupo de proposições coligadas que Heisenberg assume como verdadeiras: A matéria não é fundamental. As estruturas matemáticas elementares são fundamentais. Os métodos experimentais sondam a estrutura da matéria. O formalismo da mecânica quântica sonda as estruturas matemáticas elementares. Logo, o formalismo da mecânica quântica é o método de investigação do que é fundamental. Novamente o que está em jogo aqui é a capacidade do formalismo lógico matemático de lidar com "inobserváveis" que extrapolam os limites da experimentação. A física contemporânea estaria repleta de "inobserváveis", daí, nas palavras de Caruso e Oguri, muitos cientistas, como Heisenberg e Murray Gell-Mann, desvencilharam-se da filosofia materialista e assumiram posições filosóficas formalistas:

> Partículas observadas diretamente na natureza, como o próton e o nêutron, e outras, produzidas em laboratório, seriam constituídas de partículas *não-observáveis*, cujas existências teriam origem em princípios formais de simetria, portanto, em princípios puramente matemáticos. (CARUSO;OGURI. 2006, p. 570)

[1] LEITE, A; SIMON, S. Sci. stud. vol.8 no.2 São Paulo Apr./June 2010. Número da página não informado por tratar-se de artigo eletrônico.
Disponível em: http://www.scientiaestudia.org.br.

A queda de *status* ontológico do conceito de matéria na física contemporânea parece ser inevitável, qualquer que seja o terreno pelo qual a nova física avança. Louis de Broglie, em *O Futuro da Física,* também considerou a filosofia materialista como uma concepção de mundo simplória em face dos avanços empreendidos pela física contemporânea. Broglie defende que o materialismo como ontologia não passa de uma suposição dogmática decorrente da falta de investigações analíticas acerca dos conceitos fundamentais da física:

> De fato, muitas vezes, por não terem analisado suficientemente os conceitos e os métodos de que se servem, certos sábios aceitam, inconscientemente e sem discussão, certo sistema filosófico, e tornam-se de tal modo dogmáticos que não submetem a nenhuma crítica as suas ideias preconcebidas. (BROGLIE. 1955, p. 34)

Tal dogmatismo, de acordo com Broglie, está na base da ontologia materialista. Para o cientista francês, a mecânica quântica revelou "uma realidade muito mais profunda", que permanecia encoberta no quadro geral da física clássica (BROGLIE. 1955, p. 35). O materialismo, portanto, é superficial:

> (...) certos sábios dos tempos modernos, vítimas dum ingênuo realismo, adotaram, quase sem se aperceberem disto, uma metafísica de caráter materialista e mecanicista, e consideraram-na como a expressão da própria verdade científica. Um dos grandes serviços prestados ao pensamento contemporâneo pela evolução recente da Física é ter feito ruir essa metafísica simplista, é ter conseguido chamar a atenção para certos problemas filosóficos tradicionais vistos agora sob aspectos inteiramente novos. (BROGLIE. 1955, p. 34)

Se Broglie, Schrödinger e Heisenberg desqualificaram o materialismo a partir da visão da natureza que lhes proporcionara a mecânica quântica, outros foram obrigados a seguir o mesmo caminho quando defrontados com os resultados da física relativística. É o caso do próprio Einstein. Também para Einstein, dado o desenvolvimento da ciência de sua época, já não havia espaço para que a matéria fosse considerada o fundamento da realidade, concordando que tal conceito desempenhou papel fundamental na mecânica

clássica. Em "A mecânica de Newton e sua influência sobre a formação da física teórica", Einstein salientou que:

> A importância dos trabalhos de Newton consiste principalmente na criação e na organização de uma base utilizável, lógica e satisfatória para a mecânica propriamente dita (...). Assim, pois, este sistema teórico em sua estrutura fundamental se apresenta como atômico mecânico. Portanto todos os fenômenos têm de ser concebidos do ponto de vista mecânico, quer dizer, simples movimentos de pontos materiais submetidos à lei do movimento de Newton. (EINSTEIN. 1981. p 186- 194)

Mas o paradigma newtoniano não sobreviveu ao desenvolvimento da física relativística. Em *Sobre a teoria geral da gravitação*, Einstein destacou que, na relatividade, a matéria aparece como um caso especial do espaço-tempo, um "acidente topológico" da geometria curva do *real*:

> Uma vez que a teoria da relatividade geral acarreta a representação da realidade física por um campo contínuo, o conceito de partículas ou pontos materiais não pode desempenhar um papel fundamental, tampouco o conceito de movimento. A partícula pode aparecer apenas como uma região limitada no espaço em que a força do campo ou a densidade da energia são particularmente altas. (EINSTEIN. 2010, p 20)

Não é o caso que o conceito de matéria seja epistemologicamente irrelevante para a teoria, porque não se trata de uma teoria acerca da matéria. A questão é mais forte, parece-nos. O que nos ocorre é que o conceito de matéria, no escopo da relatividade, não é ontologicamente fundamental para a compreensão do *real*. Não é fundamental porque, na teoria geral da relatividade, a realidade física é compreendida geometricamente, decorrendo os fenômenos ditos materiais apenas como produtos contingentes da topologia do espaço-tempo. Não é necessário, por exemplo, recorrermos a noções de corpos ou objetos. Corpos não são *objetos* materiais, mas *eventos* na "trama" do espaço-tempo, concentrações de energia em regiões específicas do tecido tetra-dimensional. Ou seja, podemos inferir o mundo, com toda a sua diversidade de formas e coisas, a partir de um espaço-tempo formado por uma

geometria curva, um meio de energia que se distribui pela configuração topológica do tecido cósmico. Dada a topologia espacial, um acidente geométrico (uma "dobra" do tecido) representa uma concentração de energia, e posto que $e=mc^2$, a matéria surge como um caso limite do mundo, uma condição especial, digamos, um produto contingente da geometria do espaço-tempo. O mundo, entretanto, é "pura forma". Tanto para Schrödinger, quanto para Heisenberg e Einstein.

Werner Heisenberg, enfim, propôs como filosofia da natureza uma nova interpretação ontológica do mundo físico, na qual o materialismo é compreendido como modelo de realidade incompleto e paradoxal. Para Heisenberg, ao nos aprofundarmos no mundo das partículas elementares, percebemos que mais abstrata a natureza se torna, de modo que aquilo que chamamos de matéria, que acreditávamos sólido, concreto, objetivo, revela-se como sendo um ente potencial, uma *potentia* aristotélica. Entretanto, não se trata da *potentia* de uma matéria, assim como a árvore é uma *potentia* da matéria semente, mas de uma *potentia* formal do mundo, uma *potentia* da estrutura formal da natureza subatômica, assim como "ser bela", "ser grande" ou "ser azul" é uma potência da forma "casa", independente do material que utilizaremos em sua construção. Uma casa é uma casa não por ser de madeira ou pedra, mas porque um conjunto formal de determinadas relações é satisfeito.

A grande renovação de Heisenberg para a interpretação filosófica da natureza no escopo da física do século XX parece residir no fato de que ele aventa dois modos de realidade para os objetos físicos. Ou eles possuem existência objetiva, são entes objetivos, são "atos", o caso dos objetos descritos pela física clássica, ou possuem existência potencial, são possibilidades objetivas, potências, caso dos objetos descritos pela física quântica.

Sendo assim, Heisenberg foi buscar em Aristóteles o instrumental teórico necessário para resolver os inapeláveis imbróglios de interpretação presentes na ciência subatômica de sua época. Na teoria aristotélica dos "atos e potências", Heisenberg encontrou um "lugar" para os objetos quânticos, desenvolvendo o pensamento de que "a linguagem que os físicos utilizam, ao falar sobre fenômenos atômicos, sugere em suas mentes algo semelhante ao conceito de *potentia*" (HEISENBERG. 1987, p. 136). Para Heisenberg, pensar o mundo quântico como um emaranhado de potências aristotélicas foi o primeiro passo para desenvolver uma ontologia puramente formal. Seu pensamento parece ser, portanto, de que uma *potentia*, neste sentido, não pode ser mensurada empiricamente, estando para além das possibilidades tecnológicas de

observação. Deste modo, as potências quânticas são estruturas, ou eventos, puramente abstratos, passíveis de abordagem tão somente por meio do formalismo da mecânica quântica.

Assim como no caso de Einstein, para Heisenberg, o elevado grau de abstração do formalismo puro é a um só tempo o instrumento por meio do qual o espírito científico pode penetrar as mais profundas sendas da natureza, como também um caminho que nos eleva aos níveis mais esotéricos da existência. De acordo com Heisenberg, é no formalismo puro da simplicidade lógica, das estruturas matemáticas, que ciência e arte se encontram, e que concorrem para que tomemos contato, de alguma forma, com a *ordem central.* Neste sentido, o pensamento de Heisenberg repercute nas palavras de Max Born: "A física por si não é apenas um fator de progresso material, mas também um elemento na evolução espiritual do homem" (BORN. 2000, p. 88).

5. Heisenberg e Descartes: A inseparabilidade entre sujeito e objeto na teoria quântica e a desatualização das cisões cartesianas.

Qual a importância que Heisenberg confere ao pensamento cartesiano no quadro da ciência moderna? De acordo com Heisenberg, Descartes exerceu papel capital na fundamentação filosófica da ciência natural de sua época. Assim o fez, tanto pelo seu mecanicismo que impregnou a cultura ocidental profundamente, quanto por sua defesa de um conhecimento rigoroso, analítico, construído laboriosamente por meio de um método criterioso e objetivo (HEISENBERG, W. 1987, p. 62). Descartes aparece como um pensador importante para as reflexões de Heisenberg na medida em que este se questiona se, no escopo da mais recente ciência natural, podemos coadunar as "cisões cartesianas" com os resultados da física subatômica. Se pensarmos os resultados da mecânica quântica como um conjunto fechado de proposições, poderíamos compreender tal conjunto como "possivelmente" compatível com a cisão cartesiana? Todavia, devemos antes de tudo esclarecer o que Heisenberg entendia como sendo esta "cisão". Há, no pensamento de Heisenberg, nitidamente, a noção de que a "cisão" empreendida por Descartes "moldou" o espírito ocidental, talvez como nenhuma outra filosofia moderna o fez. Qual é, entretanto, para Heisenberg, a peculiaridade desta cisão? Por que tal fato representa uma novidade na tradição filosófica, inaugurando um novo pensar distinto do dos antigos? De acordo com Heisenberg, Descartes estabelece uma "separação objetiva" entre "Deus", "mundo" e "homem" e, no caso deste último,

entre seu corpo, sua extensão, e sua mente, sua substância pensante.

Para Heisenberg, a sustentação tanto da cisão homem-mundo quanto da cisão entre *res extensa* e *res cogitans* não é possível no quadro atual da ciência natural:

> A antiga divisão do universo num processo objetivo no espaço e no tempo, por um lado, e por outro lado, a alma, em que se reflete aquele processo, ou seja, a distinção cartesiana entre a *res cogitans* e a *res extensa*, não pode já servir como ponto de partida da ciência 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 objeto a tal ponto que o método não pode separar-se do objeto. A imagem científica do universo deixa assim de ser uma verdadeira imagem da natureza. (HEISENBERG. 1995, p.28)

Como vimos, Heisenberg defende a noção de que, dado o desenvolvimento da ciência natural, não nos é mais possível pensar o "eu" e o "mundo" como entes isolados e independentes. Isto, se verdadeiro, parece nos impedir de adotarmos o realismo como filosofia geral, posto que não podemos considerar o mundo completamente isolado do nosso pensamento do mundo. Sendo assim, não seria lícita uma filosofia da ciência que pense os procedimentos de experimentação como investigações neutras acerca de sistemas objetivos – todo processo de mensuração estabelece uma síntese inescapável entre os sujeitos que observam e os sistemas observados. Para Heisenberg, portanto, "eu" e "mundo" não podem ser separados no escopo da física contemporânea, como transparece em *Física e Filosofia*:

> A antiga filosofia grega tentara achar uma ordem, na infinita variedade de coisas e fenômenos, pela procura de algum princípio fundamental de unificação. Já Descartes procurou estabelecer a ordem por meio de uma divisão (i.e., separação) fundamental. Todavia, as três partes que resultam dessa divisão perdem algo de sua natureza se cada qual for considerada separadamente das demais. Se quisermos mesmo fazer uso dos conceitos fundamentais cartesianos é essencial que Deus se encontre no mundo e no "Eu", e é também essencial que

> o “Eu” não possa ser realmente separado do mundo. (HEISENBERG. 1987, p.62,63)

Em outra passagem desta mesma obra, Heisenberg acena para o fato de que a divisão entre *res cogitans* e *res extensa* proposta por Descartes não representa o auge, a convicção final, do pensamento cartesiano. Heisenberg propõe que Descartes sabia da necessidade da síntese entre “corpo” e “mente”, que não a ignorou, muito embora seja igualmente verdadeiro que, a despeito disto, foi a ideia da cisão, e não da síntese, que entrou para a história e influiu de modo decisivo na formação do caráter intelectual da ciência moderna. É o legado desta cisão, e não propriamente Descartes, que Heisenberg pretende criticar:

> Descartes, certamente, sabia da inegável necessidade dessa ligação, mas a filosofia e ciência natural no período seguinte desenvolveram-se com base na polaridade entre *res cogitans* (“coisa pensante”) e *res extensa* (“coisa extensa”), a ciência natural concentrando seu interesse na “coisa extensa”. A influência da divisão cartesiana sobre o pensamento humano, nos séculos que se seguiram, dificilmente poderá ser exagerada, mas é justamente essa divisão que teremos de criticar, mais adiante, do atual ponto de vista da física. (HEISENBERG. 1987, p.63)

Entretanto, embora tenha promovido, em sua medicina, a síntese entre *res extensa* e *res cogitans,* a cisão que nos interessa ressaltar, entre homem e mundo, permaneceu. Tal cisão deve ser apontada como um dos fundamentos filosóficos da ciência moderna, posto que esta pressupõe que é possível compreender e explicar o funcionamento geral da natureza sem a necessidade de considerarmos tanto os observadores quanto a existência de Deus como relevantes – Laplace afirmou não necessitar desta hipótese para elaborar seu sistema físico. É interessante frisar que a não consideração da existência de Deus como elemento heurístico necessário para a formulação de uma ciência natural não implica a negação de sua existência, mas tão somente a irrelevância desta existência para a elaboração do sistema em questão, da mesma forma que, muito embora nos seja inegável nossa própria existência, também ela é considerada irrelevante para o entendimento da natureza pelo pensamento científico moderno. Heisenberg ressalta o caráter aparentemente necessário da cisão cartesiana

para a ciência moderna afirmando que:

> (...) essa divisão foi, durante muitos séculos, bem recebida. A mecânica de Newton, assim como todas as outras partes da física clássica, construídas segundo o modelo daquela mecânica, tiveram como ponto de partida a hipótese de que se pode descrever o mundo sem fazer qualquer menção a Deus ou a nós mesmos. Essa possibilidade logo pareceu necessária para a ciência natural em geral. (HEISENBERG, W. 1987, p.64)

De acordo com Heisenberg, *não poderia ter ocorrido a Descartes* o inexorável entrelaçamento entre o homem e a natureza. Séculos depois de Descartes, a ciência necessitaria de abandonar sua filosofia para continuar avançando e, de modo muito irônico, o apego de *cientistas renomados* às estruturas tradicionais de pensamento, cujos alicerces encontram-se fincados na cisão cartesiana, revelou-se como uma forma de resistência destes cientistas às mudanças científicas inescapáveis implicadas pelo avanço da ciência natural:

> A ciência natural não se restringe simplesmente a descrever e explicar a Natureza; ela resulta da interação entre nós mesmos e a natureza, e propicia uma descrição que é revelada pelo nosso método de questionar. Essa foi uma possibilidade que não poderia ter ocorrido a Descartes, mas que torna impossível uma separação bem nítida entre o mundo e o "Eu". (...) Se observarmos a dificuldade que mesmo cientistas eminentes, como Einstein, tiveram em entender e aceitar a interpretação de Copenhagen da teoria quântica iremos encontrar, na raiz dessa dificuldade, a divisão cartesiana. (HEISENBERG, W. 1987, p.64)

Mas por que, "homem" e "natureza", de acordo com Heisenberg são de tal modo entrelaçados, que não podemos mais sustentar a cisão cartesiana? Em que medida, e fundamentados em quais constatações, podemos afirmar que não é possível isolarmos "homem" e "natureza", e à moda dos modernos, fazermos uma ciência que exclua os observadores da descrição objetiva dos sistemas observados? Não somente para

Heisenberg, mas para a Interpretação de Copenhagen, da qual Heisenberg foi um dos mais importantes proponentes, uma das proposições fundamentais da mecânica quântica pode ser assim formulada: "Nenhum evento subatômico pode ser descrito sem fazer referência aos meios pelos quais foi observado". Observar *x* implica perturbar *x* por meio de algum procedimento de mensuração, de tal modo que nunca observamos *x* como *x* é na natureza, mas como *x* interage conosco. Para Bohr:

> A elucidação dos paradoxos da física atômica revelou o fato de que a inevitável interação dos objetos e dos instrumentos de medida instaura um limite absoluto à possibilidade de falarmos de um comportamento dos objetos atômicos que independa dos meios de observação. (...) Estamos diante de um problema epistemológico bastante novo na filosofia natural. (BOHR.1995, p. 32)

De acordo com Bohr, portanto, há a impossibilidade de pensarmos o núcleo objetivo da matéria inanimada sem fazermos referência ao sistema subjetivo por meio do qual são coletadas, por observação, as informações acerca destas estruturas. Nas palavras de Paulo de Tarso Gomes: "Na mecânica quântica, o sujeito e os instrumentos de medição passam a fazer parte do experimento, isto é, influem em seu resultado" revelando assim o entrelaçamento entre sujeito e mundo. "Antes da medição, o que chamamos de realidade é apenas uma probabilidade. Depois da medição, o resultado não é uma medida determinada ou um fato, mas a probabilidade de uma medida, ou a probabilidade de ocorrência de um fato" (GOMES. 2007, p. 79). Contudo, ao elaborarmos esta noção, não significa que elementos subjetivos (ou "subjetivistas") estejam sendo introduzidos arbitrariamente, de modo radical, como pré-condições da *práxis* científica. A interação entre o sujeito que observa e o sistema objetivo que é observado é ela mesma objetiva – ou seja, o resultado desta interação não depende das condições psicológicas do observador. Mesmo assim, e para todos os casos, continua a vigorar a impossibilidade de falarmos de um comportamento dos objetos atômicos sem fazermos referências aos meios de observação. Portanto, já não é possível qualquer sistema científico que vise explicar o funcionamento geral da natureza sem levar em conta o entrelaçamento entre observador e natureza – tudo se passa, deste modo, como se a ciência nunca falasse diretamente da natureza, mas tão somente das interações entre natureza e homem. Bohr referia-se ao caráter fundamental destas "interações", que definiriam o objeto último de quaisquer ciências, como "uma inseparabilidade entre

conteúdo objetivo e sujeito observador" (BOHR.1995, p. 38).

A convicção de que a cisão cartesiana não poderia ser sustentada no quadro geral da física subatômica, que se desenvolvia a plenos pulmões na primeira metade do século XX, não se restringe aos físicos-filósofos da Interpretação de Copenhagen. Embora, na visão de Heisenberg, grandes nomes, como Einstein, permanecessem fiéis aos ditames da tradição, podemos notar que mesmo entre cientistas que em linhas gerais discordavam dos partidários de Copenhagen, a divisão proposta por Descartes deixara de ser uma noção fundamental para a física. Erwin Schröndiger, por exemplo, dava tal cisão como algo obscuro, não resolvido:

> Nem sequer é absolutamente claro o que significa esta antítese entre a natureza objetiva e a mente humana. Porque, por um lado, faço indubitavelmente parte da Natureza, ao passo que, por outro lado, para mim a natureza objetiva é apenas um fenômeno da minha mente. (SCHRÖDINGER. 1996, p. 130)

Schrödinger considerava que tal questão, embora não resolvida, era intrínseca à *práxis* científica:

> Desde essa época [gregos antigos] a questão surgiu sempre que existiu ciência, de tal forma que a poderíamos detectar ao longo dos séculos, falando das atitudes de Descartes, Leibniz, ou Kant relativamente a ela" (SCHRÖDINGER. 1996, p. 133).

Schrödinger, todavia, era um opositor da Interpretação de Copenhagen, e buscou formular uma interpretação diferente. Na interpretação de Copenhagen, não faz sentido falar que uma partícula *p* existe sem fazer referência ao processo de observação de *p*. Já Schrödinger busca enfatizar que, se *p* existe, então este é o caso independente de *p* ser observada ou não.

> Afirmo que é possível a seguinte interpretação: *existe* um objeto físico completamente determinado, mas nunca poderei saber tudo acerca dele. No entanto, esta interpretação revelaria uma incompreensão total do que Bohr e Heisenberg, e aqueles que os seguiram, efetivamente pretendem afirmar. O que eles querem dizer é que o objeto não tem

> qualquer existência independente do sujeito que observa. O que eles querem dizer é que as descobertas recentes na física fizeram avançar o limite misterioso entre o *sujeito* e o *objeto*, e assim se verificou que esse limite já não era, de todo, um limite preciso. (SCHRÖDINGER. 1996, p. 131)

Mas qual era, enfim, a posição de Schrödinger neste tópico. O que o justificava a não coadunar com Heisenberg? Sabemos por meio de seus escritos em *Ciência e Humanismo* que, apesar de suas objeções, Schrödinger admitia a importância da ênfase que Heisenberg e Bohr davam às "interações" entre sujeitos e objetos na física contemporânea. Entretanto, o criador da mecânica ondulatória mantinha-se cético quanto à participação da ciência na elucidação das questões filosóficas fundamentais. Para ele, embora a ciência fosse parte do empreendimento filosófico, participando como elemento ativo na busca pela solução da questão filosófica antiga "Quem somos nós?", a relação sujeito-objeto não poderia ser resolvida pelas investigações científicas puramente técnicas, – muito embora admitisse que não soubesse ao certo por que:

> Mas, apesar de tudo isso, não posso acreditar (e esta é minha primeira objeção) que a investigação filosófica mais profunda relativa à relação entre sujeito e objeto, e relativa ao verdadeiro significado da distinção entre ambos, dependa dos resultados quantitativos das medições físicas e químicas com balanças, espectroscópios, microscópios, telescópios, contadores Geiger-Müller, câmaras de nevoeiro de Wilson, placas fotográficas, disposições para medir a queda da radioatividade e tudo o mais. Não é muito fácil dizer por que é que não acredito. Sinto que existe certa incongruência entre os meios aplicados e o problema a resolver. (SCHRÖDINGER. 1996, p. 132)

Parece-me, contudo, que se dirigidas a Heisenberg, tais críticas não alcançaram o alvo. Se Heisenberg se dispõe a analisar a complexa e intrincada relação sujeito-objeto no escopo da física de sua época, ele o faz, não por lançar mão de complexas parafernálias tecnológicas, o instrumental de mensuração, comum em laboratório de pesquisas físicas. Heisenberg, como cientista, se lida com este estado de coisas, é antes de tudo um físico teórico, dado às maiores abstrações, tanto que sua mecânica matricial para sistemas subatômicos foi mal aceita pela maior parte dos físicos de então, por parecer-lhes excessivamente formal, sem laços sólidos com a experiência, muito

embora, e para desagradável surpresa de todos, tenha se mostrado tão correta e bem sucedida quanto a mecânica ondulatória desenvolvida por Schrödinger, sendo-lhe matematicamente equivalente, e formando, junto com esta, os fundamentos da mecânica quântica. Se Heisenberg, portanto, pensa tal questão, não o faz sem lançar mão de sofisticadas reflexões filosóficas, não se limitando a tentar desvendar o mistério por meio de aparelhagens de laboratório – Parece-me, portanto, que à moda de Roger Bacon, Heisenberg compreendia que os laboratórios e seus instrumentos são apenas expressões e extensões do pensamento humano.

A noção de "inseparabilidade entre conteúdo objetivo e sujeito observador" presente na Interpretação de Copenhagen, embora polêmica, como vimos, propagou-se, e foi compartilhada por muitos cientistas e filósofos da ciência, como Gaston Bachelard: "Em microfísica nunca se tem a certeza de experimentar 'um' elemento isolado pelo simples fato de que não há meios para reconhecer o objeto isolado" (BACHELARD. 2010, p. 25). Bachelard está a defender que não podemos "isolar" elétrons e demais objetos subatômicos como indivíduos, posto que (i) todo objeto microfísico pode ser entendido somente como parte inseparável da classe destes objetos mesmos e (ii) todos os objetos são absolutamente isomórficos, de tal modo que não há nada em um elétron, p.ex., que lhe garanta individualidade em face de outro. Por outro lado, é perfeitamente consonante com o pensamento de Bachelard afirmar que não podemos "isolar" o objeto microfisíco *do* sujeito macrofísico que empreende sua mensuração. Sendo assim, sujeito e objeto formam um sistema físico não fragmentável, o oposto do que propõe o sistema cartesiano.

A "interação" entre homem e natureza na configuração daquilo que chamamos de realidade parece, portanto, ser uma característica fundamental da natureza. O homem não somente é uma criatura da natureza, pois, de certa forma, dela também é criador, na medida em que, com ela interagindo, concorre para recriá-la de modo peculiar. Como podemos descrever, entretanto, a natureza desta inseparabilidade sujeito-mundo? Qual o papel dos procedimentos de observação nesta "interação"? A resposta de Heisenberg a tal pergunta revelar-se-á bastante original e, sobretudo, forte. Heisenberg propõe que não existe uma única realidade objetiva, mas uma trama de realidades potenciais superpostas formando sistemas quânticos concomitantes que existem como "possibilidades" dadas pelas leis da natureza em escala quântica. Mas como experimentamos uma única realidade clássica macrofísica? Isto ocorre porque nós, sistemas físicos complexos, somos permanentes eventos de observação – estarmos no

mundo é interagirmos com ele. Ocorre que são justamente os processos de observação que selecionam, entre todas as realidades potenciais, a realidade física factual. Em termos técnicos, quando ocorre um evento de observação, a interação entre o sistema observador e a natureza observada promove o colapso de todas as realidades potenciais, menos uma, justamente a que experimentamos como sendo a única realidade objetiva, simplesmente porque, de todas as realidades superpostas, foi a única que se realizou, "saltando" do *status* de possibilidade para o de "mundo físico":

> O ato de observação, por si mesmo, muda a função de probabilidade de maneira descontínua; ele seleciona, entre todos os eventos possíveis, o evento real que ocorreu. Visto que, pela observação, nosso conhecimento do sistema mudou descontinuamente, sua representação matemática também sofreu esta descontinuidade. (HEISENBERG. 1987, p. 46)

Neste ponto do pensamento de Heisenberg, uma "grave" noção pode estar implicada: O que está posto, o mundo, é configurado, de certo mundo, pela interação entre os sistemas observados e os processos de observação. Heisenberg defende, em *Física e Filosofia*, no capítulo "A Interpretação de Copenhagen da Teoria Quântica", que "a transição do 'possível' ao 'real' ocorre durante o ato de observação" (HEISENBERG. 1996, p. 46). Todavia, Heisenberg desacredita que seja a "consciência" que promova o colapso da função de probabilidade. Para o físico-filósofo, a "interação" que promove a *transição do "possível" ao "real"* não é entre mente e matéria*,* mas entre sistemas macro e microfísicos:

> Aquele termo diz respeito à componente física do ato de observação, mas não à psíquica e poderemos dizer que a transição do "possível" ao "real" toma lugar tão logo a interação do objeto com o instrumento de medida (e, portanto, com o resto do mundo) tenha se realizado; ele nada tem a ver com o ato de registrar o resultado por parte da mente do observador. (HEISENBERG. 1987, p. 46)

Entretanto, o elemento psíquico não é de todo banido da teoria, permanecendo como uma noção fundamental, em certo sentido. Se não é a interação entre mente e matéria que promove a transição do "possível" ao "real", mas sim a interação do objeto

com o instrumento de medida, a mente permanece inescapavelmente como elemento lógico necessário nesta cadeia de raciocínios, uma vez que se revela como a pré-condição para a existência de quaisquer instrumentos de medida – não poderia haver ato de observação objetiva no mundo se não houvesse um fenômeno mental elementar e fundamental: a interpretação dos resultados das observações. A atividade consciente, portanto, é pré-condição de qualquer evento de observação, e por isso o sistema observador-mundo não pode, como queria a física clássica, dispensar a existência de sujeitos conscientes como fatores que influenciam a configuração objetiva do mundo. Na mecânica quântica, de acordo com Heisenberg, os observadores devem sempre ser levados em conta, porque os eventos de observação influenciam o modo de ser dos sistemas observados, e porque quaisquer eventos de observação pressupõem atividades conscientes:

> Isso de novo realça o elemento subjetivo na descrição dos eventos atômicos, pois o instrumento de medida foi construído pelo observador, e temos que nos lembrar que aquilo que observamos não é a Natureza em si, mas sim a Natureza exposta ao nosso método de questionar. (HEISENBERG. 1987, p. 48)

O que "Copenhagen" afirma, portanto, é que o ato de observação, isto é, a interação entre os instrumentos de medida e os objetos observados constitui o processo por meio do qual a soma das possibilidades se converte na realidade objetiva. Todavia, "entre" observações, os sistemas observados voltam ao estado potencial, no qual todas as realidades quanticamente possíveis estão superpostas: "Se quisermos descrever o que ocorre em um evento atômico, deveremos compreender que o termo 'ocorre' pode somente ser aplicado à observação, e não ao estado de coisas durante duas observações consecutivas" (HEISENBERG, 1987, p. 46).

Parece, portanto, que *strictu sensu,* a Interpretação de Copenhagen defende que (i) a realidade, embora forme um todo complementar, possui gradações nomológicas próprias de cada escala espacial, de modo que no nível quântico as leis da natureza são tais que o universo, nesta escala, é a soma de todos os seus estados quânticos possíveis, (ii) quando a matéria se aglomera formando estruturas complexas que transcendem, geometricamente, os limites do mundo quântico, o alcance das leis quânticas vai diminuindo na mesma proporção que tais estruturas vão aumentando, até que, para objetos macroscópicos, as leis da mecânica clássica revelam-se como um caso limite

das leis da mecânica quântica.

De acordo com esse processo, uma estrutura material complexa macroscópica é demasiado "pesada" para ser afetada pelas leis quânticas, e muito embora as partículas subatômicas das quais é composta existam de modo superposto como a soma de todos os seus estados quanticamente possíveis, a soma de todas as suas partes, o que resulta em algo macroscópico, existe como apenas "um" objeto clássico, embora sempre haverá uma probabilidade maior que zero de que objetos clássicos experimentem, mesmo sutilmente, estados de superposição.

De acordo com a Interpretação de Copenhagen, portanto, como sistemas físicos complexos que somos, não experimentamos os efeitos quânticos tão comuns naquele nível. Neste exato momento, portanto, existimos de dois modos: (i) enquanto "soma" de todas as partículas que nos compõem, somos um "corpo" macroscópico, experimentando uma existência "clássica" no espaço-tempo, (ii) entretanto, cada uma das partículas que nos compõe experimenta existência quântica, existindo de modo superposto, como soma de todos seus estados quanticamente possíveis. A existência no nível quântico é apenas uma função de probabilidade – e como existem vários estados prováveis para cada objeto, cada objeto é, portanto, a soma de todas estas probabilidades. Cada objeto, antes de ser uma "coisa" material, e mais do que uma onda de matéria, é uma onda de probabilidades. Neste sentido, o conceito de probabilidade em mecânica quântica não deve ser confundido com o conceito clássico de probabilidade:

> Nosso uso de termos probabilísticos para descrever o produto de eventos do quotidiano reflete, portanto, não a natureza intrínseca do processo, mas apenas nossa ignorância sobre certos aspectos dele. As probabilidades nas teorias quânticas são diferentes. Elas refletem uma aleatoriedade fundamental da natureza. O modelo quântico da natureza incorpora princípios que contradizem não só a experiência diária, mas também nossa concepção intuitiva de realidade. (HAWKING; MLODINOW. 2001, p. 55)

Uma vez que a probabilidade, em mecânica quântica, é uma característica da natureza, e que a efetivação de um dos estados previstos pelo probabilismo quântico como realidade objetiva por meio de um ato de observação representa a inseparabilidade entre os sujeitos e os objetos da observação, e, portanto, entre homem e mundo,

Heisenberg defende que a cisão cartesiana não pode ser coadunada com o mais recente desenvolvimento desta área de pesquisa da ciência natural. Para Bohr, a superação da divisão cartesiana se deve à "impossibilidade de qualquer separação nítida entre o comportamento dos objetos atômicos e a interação com os instrumentos de medida que servem para definir as condições em que os fenômenos aparecem" (BOHR. 1995, p. 51).

Se no sistema de Descartes, como Heisenberg compreendeu, somos observadores imparciais de um mundo mecânico independente e objetivo, na teoria quântica do físico-filósofo não podemos falar de um mundo objetivo, dispensando a relação entre os observadores e o mundo. Tanto o mecanicismo de Descartes quanto o determinismo de Laplace são abandonados, uma vez que, não havendo a cisão proposta por Descartes, não somos totalmente determinados pela Natureza, porque também, como agentes dos atos de observação, participamos ativamente na sua determinação: "Dessa maneira, a teoria quântica nos faz lembrar, como disse Bohr, de uma sabedoria muito antiga segundo a qual – na procura da harmonia da vida – jamais deveremos esquecer que, no drama da existência, somos ao mesmo tempo atores e espectadores" (HEISENBERG. 1987). Heisenberg referia-se claramente a um trecho de uma apresentação de Bohr em um congresso sobre Física e Biologia, ocorrido em Bolonha em 1937:

> Para um paralelo com a lição da teoria atômica acerca da limitada aplicabilidade dessas idealizações costumeiras, devemos nos voltar, na verdade, para ramos bem diferentes da ciência, como a psicologia, ou até para o tipo de problemas epistemológicos com que já se confrontavam pensadores como Buda e Lao Tsé, ao tentarem harmonizar nossas posições de espectadores e atores no grande drama da vida. (BOHR. 1995, p. 25-26)

Ao enfatizar que não somente em nível psicológico, mas como também no nível físico, no drama cósmico que se desenrola sobre o palco do mundo, além de criaturas somos também criadores da realidade, Heisenberg endossa a inseparabilidade entre homem e mundo, desatualizando a cisão cartesiana como fundamento lógico-metodológico da ciência natural.

6. Heisenberg e Kant: Da impossibilidade quântica de observação da "natureza em si".

Se para Heisenberg a física teórica aparece como continuação das investigações kantianas acerca das ciências naturais, como defendeu Piza, parece-nos, então, que a importância de Kant para Heisenberg se deve ao fato de que a própria ciência natural é, antes de tudo, um discurso do nosso entendimento do real, e não do real em si. A ideia kantiana de que a "coisa em si" é incognoscível, de modo que um saber acerca de *x*, não é um saber de *x* em si, mas do modo como *x* nos aparece, do modo como compreendemos *x,* é estendida por Heisenberg para toda a ciência natural: A ciência nada tem a dizer acerca da natureza, mas tão somente do modo como nosso entendimento a compreende:

> O físico atômico teve por isso que resignar-se a considerar a sua ciência apenas como elo da cadeia infinita de contatos do homem com a natureza e aceitar que esta sua ciência não pode falar simplesmente da natureza "em si". (HEISENBERG. 1995, p. 14)

Entretanto, objeta Heisenberg, a "natureza em si", embora não sendo "diretamente" e "evidentemente" cognoscível, pode ser *deduzida* da experiência de modo indireto – trata-se das estruturas matemáticas a que se reduz o real na mecânica quântica.

> A "coisa em si" é, no final das contas, para o físico, caso ele faça mesmo uso desse conceito, uma estrutura matemática; essa estrutura, todavia, é – contrariamente ao que pensava Kant – deduzida indiretamente da experiência. (HEISENBERG. 1987, p. 71)

Este é um ponto relevante na filosofia da natureza de Heisenberg. Em mecânica quântica não há como separar o observador do sistema observado – ambos estão entrelaçados, uma vez que o processo de medida empreendido *por quem* mensura altera a configuração *do que* se mensura. Certamente os observadores e os sistemas observados são entidades distintas. Mas a ciência não pode, para Heisenberg, ser um discurso objetivo acerca do mundo, mas apenas da nossa relação com o mundo, porque toda vez que experimentamos o mundo nós o modificamos. Em certa medida, neste

contexto, diríamos que ontologia e epistemologia formam sistemas superpostos, pois os processos de entendimento acerca dos "entes quânticos" não podem ser separados daquilo que compreendemos como sendo os entes mesmos. Esta superposição transparece quando comparamos alguns textos de Heisenberg nos quais o autor defende que "as fórmulas matemáticas não representam, neste caso, a natureza, mas o nosso próprio saber acerca dela" (HEISENBERG. 1981, p.14), com outros trabalhos, nos quais fica clara a noção de que a natureza em nível elementar seria constituída por "estruturas matemáticas fundamentais" (HEISENBERG. 2000, p. 26). Se, por um lado, a primeira formulação apresenta um viés epistemológico, por outro, a segunda parece-nos claramente uma formulação ontológica. O caráter epistemológico fica evidente quando Heisenberg afirma:

> Daqui resulta que as leis da natureza que nós formulamos matematicamente na mecânica quântica não se referem às partículas elementares em si, mas ao conhecimento que nós temos delas. O problema da existência destas partículas "em si", no tempo e no espaço, não pode já apresentar-se sob esta forma, visto podermos falar sempre e só dos processos que têm lugar quando queremos inferir o comportamento da partícula pela ação recíproca entre ela e qualquer outro sistema físico, por exemplo, o aparelho de medida. (HEISENBERG. 1995, p. 14)

Esta noção epistemológica de Heisenberg, de que as estruturas matemáticas que aparecem na mecânica quântica como fundamentos das partículas elementares não representam propriedades da natureza em si (mas propriedades do nosso entendimento acerca de tais partículas) remete-nos à ideia do grande matemático e geômetra francês, Poincaré, para o qual "não é a natureza que os impõe [o tempo e o espaço] a nós, somos nós que os impomos à natureza porque os achamos cômodos" (POINCARÉ,1995). Ambos parecem propor que, no ato de dizermos o que a natureza *é*, projetamos nela os modos de nosso entendimento, e tudo o que fazemos é nos ater ao que ela *nos* parece ser. Novamente reencontramos Kant, pois é exatamente esta a proposta que temos na *Crítica da Razão Pura* (A125): "Assim, a ordem e regularidade nas aparências, o que chamamos Natureza, nós mesmos as introduzimos" (KANT, 1987, A125, p. 172-173).

Todavia, como vimos em "Heisenberg e Platão", a formulação epistemológica desta questão, para Heisenberg, não predomina sobre a formulação ontológica – as

estruturas elementares puramente formais não são apenas propriedades do entendimento humano, mas os fundamentos reais do mundo físico. Heisenberg considera que o desenvolvimento da ideia de "coisa em si" foi um passo importante de Kant na direção do tipo de realismo filosófico fundamental para a ciência moderna. Ao fazer a distinção entre aquilo que percebemos de *x* e o que *x* é em si, assumimos não só a realidade objetiva do mundo, mesmo que incognoscível, como endossamos a necessidade de duas escolas de investigação científica – as "ciências da percepção", que devem investigar por que o que me parece *x* me parece *x*, e as "ciências da natureza", que, mesmo tendo a "coisa em si" como incognoscível, dela deve achegar-se por aproximações indiretas cada vez mais refinadas. Esta tradição investigativa, talvez, poderia ser fomentada somente por um ambiente intelectual no qual predomina o tipo de realismo filosófico com o qual, segundo Heisenberg, a filosofia kantiana soube manter-se ligada:

> A questão bastante incômoda de se "as coisas realmente existem", ou não, que deu lugar ao empirismo filosófico, aparece também no sistema kantiano. Kant, todavia, não seguiu a linha de Berkeley e Hume, embora tal escolha teria sido logicamente consistente. Preservou ele a noção da "coisa em si" como sendo diversa daquilo que é percebido e, dessa maneira, manteve alguma ligação com o realismo filosófico. (HEISENBERG. 1987, p. 69)

Parece-nos, contudo, que, de acordo com Heisenberg, a importância dos trabalhos de Kant para o desenvolvimento das ciências naturais, e da física teórica especificamente, não ultrapassa estes aspectos – se Kant acerta ao afirmar a impossibilidade de conhecermos a "natureza em si", suas ideias de que nosso conhecimento acerca de determinadas entidades físicas, como espaço e tempo, seria *a priori* não se revela compatível com os desenvolvimentos da física contemporânea: "Enquanto Kant ainda podia pressupor que as nossas formas de percepção 'a priori' do espaço e do tempo devem constituir para sempre uma base inalterável da Física, sabemos que esse não é o caso"... (HEISENBERG. 2000). Heisenberg não concorda, portanto, que tais conhecimentos sejam *a priori*.

Além de não admitir a natureza *apriorística* do espaço e do tempo proposta por Kant, Heisenberg chama atenção para o fato de que, na filosofia kantiana, há outros conceitos físicos fundamentais, tidos por Kant como *a priori.*

> No que diz respeito a física, Kant tomou, como julgamento *a priori,* além de espaço e tempo, a lei da causalidade e o conceito de substância. Em estágio ulterior de seu trabalho, ele tentou incluir, na mesma categoria, a lei da conservação da matéria, a igualdade da "ação e reação" e, mesmo, a lei da gravitação. Nenhum físico estaria inclinado a seguir Kant nesse seu ponto de vista caso a expressão *a priori* fosse usada no sentido absoluto que lhe foi atribuído pelo filósofo de Königsberg. Em matemática, Kant aceitou o caráter *a priori* da geometria euclidiana. (HEISENBERG. 1987, p. 69)

Heisenberg considera que a física contemporânea não pode admitir conceitos *a priori* em sentido forte, ou *absoluto,* ou seja, tais como são admitidos no sistema de Kant. Todavia, adimite que há certos saberes *a priori* na ciência natural, em um sentido mais moderado. Heisenberg pensa que determinados conceitos, como "espaço", "tempo" e "energia" devem ser tidos como fundamentos *a priori* dentro de um determinado sistema fechado de proposições (que formam a estrutura de uma determinada teoria), embora não sejam pré-condições para o "entendimento humano" de um modo geral. O que chamo de "sistema fechado de proposições" é o conjunto de elementos de uma teoria, como postulados, hipóteses, axiomas, enunciados e conclusões, que pertencem unicamente a tal teoria, não sendo elementos compartilhados por outras teorias. Ou seja, dado, por exemplo, o sistema de proposições da mecânica clássica, este sistema mesmo só fará sentido se tomarmos como *a priori* os conceitos de "espaço", "tempo", "força", entre outros. Estes conceitos, portanto, embora não sejam pré-condições *do* entendimento, são pré-condições *para* o entendimento *deste* sistema específico de proposições. Tais conceitos, portanto, são *a priori,* mesmo se tal sistema não for verdadeiro (não for fiel à realidade), e mesmo se tais ideias forem dispensáveis para a construção lógica de outros sistemas fechados de proposições.

Kant considerou a causalidade como uma categoria do entendimento. Deste modo, não podemos, de acordo com Kant, elaborar uma visão da natureza, intuitiva ou formal, que não pressuponha a lei de causalidade. Da mesma forma que não podemos pensar a existência de um corpo sem antes pensarmos a existência do espaço e do tempo, não poderíamos fazê-lo sem levarmos em conta as relações de causalidade. Portanto, dizer que x existe é dizer que no espaço E e no tempo T existe alguma coisa que podemos chamar de x, ou, que x ocupa ao menos uma fração do espaço E e dura ao menos um instante do tempo T. Isto não quer dizer que E e T sejam entidades físicas

reais, mas que, antes de tudo, são formas *a priori* da intuição, uma vez que qualquer operação de entendimento do mundo físico deve previamente supô-las – pensar qualquer evento físico sem a pressuposição de *T* e *E* carece totalmente de sentido, aliás, e proposição bem mais forte, pensar que um corpo não ocupa nenhuma fração do espaço e não dura nenhum instante de tempo é o mesmo que pensar que tal corpo não existe.

Da mesma forma, Kant defende que as relações de causalidade são condições prévias do entendimento. Dada uma série de eventos físicos, tais como (..., *c-3,c-2, c-1, c0, c1, c2, c3,..., c*) não podemos pensar que cada elemento da série surgiu do nada, sendo completamente independente dos demais elementos. Deste modo, se temos um evento *c2* isto implica dois outros eventos: um evento factual *c1* e um evento possível *c3,* respectivamente "causa" e "efeito" de *c2*.

De acordo com Weizsäcker, na física clássica, "causalidade" não quer dizer nada mais do que uma conexão entre estados físicos em diferentes medidas de tempo, ou seja, conexões entre eventos. Tecnicamente, isto quer dizer que se um estado é completamente conhecido em um determinado momento, é possível calcular os valores deste estado em qualquer outro ponto temporal, anterior ou posterior. Não é o caso que a causalidade seja falsa no escopo da estrutura formal da mecânica quântica. Defendemos que a relação entre a lógica da física clássica e da mecânica quântica deve pressupor, além dos valores de "Verdade" (V=1) e "Falsidade" (F=0), os de "Aplicável" (A) e "Não-aplicável" (N-A). Deste modo, a proposição "Dado o sistema de proposições da mecânica quântica, as proposições de causalidade são falsas" é falsa.

Na verdade, a lei de causalidade é não-aplicável ao sistema de proposições da mecânica quântica. Isto ocorre porque para todo sistema quântico analisado, as relações de incerteza de Heisenberg devem ser levadas em conta.

O princípio de incerteza de Heisenberg descreve a impossibilidade de conhecermos simultaneamente a posição e o "movimento" de uma partícula quântica. Se obtivermos com precisão a posição, seu movimento se torna completamente incerto, se obtemos seu movimento, sua posição se torna completamente incerta. De acordo com a interpretação ontológica de tal princípio, isto não se deve nem a uma limitação da razão nem a uma limitação tecnológica experimental, mas trata-se de uma propriedade elementar da natureza. Seja como for, em mecânica quântica, nunca podemos conhecer com exatidão a localização de uma partícula. Isto implica que não podemos pensar em trajetórias, no sentido da física clássica. Deste modo, não podemos estabelecer uma conexão exata entre eventos de transição temporal de um mesmo sistema.

Tecnicamente, se não conhecemos com exatidão um determinado estado, não podemos calcular a situação deste estado em eventos posteriores ou anteriores, o que equivale a dizer que não podemos pensar as conexões entre os eventos quânticos em termos de causalidade.

O processo causal é um evento contínuo de conexão entre o estado de um sistema físico no tempo *t* e este mesmo estado em todos os tempos anteriores e posteriores a *t.* Dizer que o estado *x* é causa do estado *y*, neste sentido, não é simplesmente dizer que de *x* se segue *y,* mas que há um evento de transição contínua por meio do qual *x* "se torna" *y*. Todavia, os processos quânticos são descontínuos, e esta é a principal característica da natureza quântica. De acordo com Einstein e Infeld:

> Se tivéssemos de caracterizar a ideia principal da teoria quântica em uma sentença poderíamos dizer: deve ser admitido que algumas quantidades físicas até agora consideradas contínuas são compostas de "quanta" elementares. (EINSTEIN; INFELD. 1980, p. 202)

Não somente a matéria é composta por "quantas", isto é, descontínua, mas também os eventos quânticos são descontínuos, uma vez que obedecem às relações de incerteza de Heisenberg. Sendo assim, não podemos dizer que um estado *x* é causa de um estado *y*, simplesmente porque "entre" *x* e *y* há uma descontinuidade. Entretanto, podemos prever probabilisticamente o resultado de tal descontinuidade, e considerarmos que de um estado *x* descontínuo se seguirá um estado *y* descontínuo *x* vezes a cada *n* casos.

Pensemos por exemplo em um experimento quântico em que feixes de partículas γ são disparados a uma velocidade constante c contra um alvo A. Depois de *x* disparos, notamos que, mesmo sob a preservação de todas as condições de disparo em cada um dos *x* casos, diferentes regiões do alvo foram atingidas. Dizemos que tal variação é intrinsecamente estatística, e que não podemos determinar uma causa para tal fato.

Em física clássica, se repetíssemos tal experimento com bolas de gude e assegurássemos (1) que todas as partículas possuíssem exatamente as mesmas propriedades, e (2) que fossem projetadas na mesma direção com a mesma velocidade, (3) que as condições iniciais de todo o sistema fossem idênticas (pressão, temperatura, correntes de ar, valores de campos elétricos, gravitacionais, etc.) então todas deveriam acertar a mesma parte do alvo. Se as condições iniciais do experimento fossem as

mesmas em muitas ocasiões, então o resultado do experimento também seria o mesmo. Realizamos X experimentos S e constatamos que em todos os casos obtemos o valor exato de P como resultado. Dizemos que a "causa" disto acontecer pode ser deduzida das condições iniciais S. Percebemos também como a causalidade clássica é uma espécie de fundamento para o método indutivo das ciências naturais. Se constatarmos que S é causa de P porque todo estado S observado evoluiu de modo contínuo para um estado P, então podemos formular a proposição universal "o resultado de todo estado S é um estado P". Nas ciências naturais, proposições deste tipo possuem *status* de leis naturais ou proposições acerca de leis naturais.

Todavia, o "comportamento" quântico é diferente. Na experiência de pensamento em questão, temos que 100% dos disparos ocorreram com velocidade *c*, estando o projetor na posição *x*. 90% dos feixes atingiram a região "d", conforme a previsão clássica. Aproximadamente 9% dos feixes sofreram um desvio estatístico quântico e foram detectados na região "a". Cerca de 1% dos feixes sofreram desvio estatístico e foram detectados em outras regiões. Se realizássemos um experimento no qual fossem disparados um elevado número de fótons isolados contra um ou dois alvos, verificaríamos que quanto maior a quantidade de fótons disparados, mais nítida é a formação de um padrão de difração nos alvos. Tal padrão é próprio dos fenômenos ondulatórios.

Podemos perceber a não-causalidade quântica por meio da simulação de um experimento com o interferômetro de Mach-Zender[2]. O experimento virtual foi

[2] Com o grande avanço, nas últimas décadas, das ciências da computação, as simulações constituem hoje elementos importantes da prática científica experimental. Maria Grazia Pia e seus colaboradores, no artigo "The impact of Monte Carlo simulation: a scientometric analysis of scholarly literature", consideram o desenvolvimento de determinados métodos de simulação como fundamental para o progresso da física de partículas (PIA; BASAGLIA; BELL; DRESSENDORFER. 2010, p. 1). Em outro artigo, "Physics-related epistemic uncertainties in proton depth dose simulation", a autora e seus colaboradores investigam as incertezas epistêmicas que podem estar presentes na montagem e interpretação dos resultados de simulações de experimentos de física. A despeito de tais incertezas epistêmicas, os autores concordam que métodos de simulação desempenharão um importante papel no desenvolvimento da física de partículas, principalmente no caso da física elaborada no LHC, o grande cólisor hadrônico, do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (PIA; BEGALLI; LECHNER; QUINTERI; SARACCO. 2010, p. 23). O uso de métodos de simulação de experimentos científicos constitui, também uma área de grande interesse para a filosofia. Afinal, levanta problemas epistemológicos e lógicos, e mesmo ontológicos: Quais são as incertezas epistêmicas de tais procedimentos? Como podemos, a partir de eventos virtuais, simulados, gerarmos dados indutivos que façam referência ao mundo físico? Caso existam variáveis ocultas na natureza, estas não constam nos programas de simulação. Este déficit pode ser a fonte de incompletudes epistemológicas de tais simulações? Como podemos admitir, portanto, que realidades virtuais simuladas nos ofereçam dados significativos acerca do mundo dos fatos? Creio que estas sejam algumas das questões fortes, que poderiam constituir uma investigação filosófica dos métodos de simulação na física experimental.

desenvolvido pela equipe da Prof.ª Fernanda Ostermann do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Com o desenvolvimento das ciências computacionais, as simulações tornaram-se importantes instrumentos científicos. Programas que realizam simulações de eventos físicos são *softwares* configurados com dados empíricos projetados para antecipar os resultados físicos reais a partir da relação entre as propriedades físicas constituintes dos sistemas em questão. As simulações, portanto, podem prever como determinados eventos ocorrerão se variáveis específicas forem levadas em conta, com mais de 90% de acerto. Em um simulador de Mach-Zender, após 11203 fótons disparados a uma taxa de 10 fótons por segundo contra dois alvos, A e B, 5664 atingem o alvo A e 5539 atingem o alvo B, formando um padrão de difração próprio dos fenômenos ondulatórios. A formação de tal padrão não pode ser prevista classicamente, isto é, não pode ser descrita em termos de causalidade, posto que de acordo com as leis da física clássica, se disparamos partículas contra alvos, além de ser altamente improvável a formação de um padrão de difração (com isto queremos apenas dizer que não é matematicamente impossível, embora a probabilidade seja muito baixa), tal formação não é necessária, ao contrário do que se passa na mecânica quântica.

Tal experimento revela três características fundamentais para o entendimento dos sistemas quânticos: dualidade onda-partícula, caráter estatístico dos processos quânticos e eventos não-causais. Neste sentido, a dualidade onda-partícula deve ser encarada ontologicamente, e não apenas hermeneuticamente, isto é, não se trata apenas de conjugar estas duas realidades no discurso científico, mas de admitir que tais realidades estão conjugadas na natureza. Mesmo quando disparamos partículas isoladamente, obtemos um padrão de difração. Defendemos que tais elementos fazem parte do núcleo heurístico da mecânica quântica, isto é, que figuram entre as características mais fundamentais da mecânica quântica a serem compreendidas pelo investigador da física contemporânea.

Com relação a dualidade onda-partícula, em um experimento como o interferômetro de Mach-Zender, enquanto a quantidade de partículas não for suficientemente grande, tudo se passa como se o alvo fosse atingido por corpúsculos isolados.

Outro experimento por meio do qual podemos ilustrar a não-causalidade

quântica foi realizado por Marley Sculli e equipe na Universidade da Califórnia.

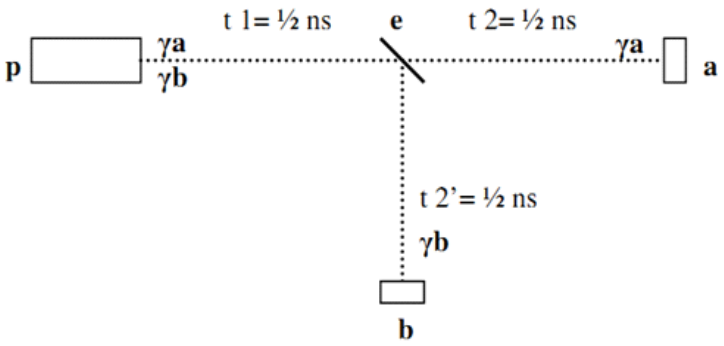


Figura 1: Experimento de Marley Sculli – Universidade da Califórnia.

No experimento, um fóton é disparado por um projetor *p* contra um alvo *a*. A meio caminho há um alvo transversal *b* formando 90˚ em relação ao projetor. Dada a velocidade da luz *c* e a distância entre o projetor e o alvo, podemos calcular que o fóton levará 1 nano-segundo entre *p* e *a*. Em alguns casos, a equipe de Sculli introduziu um desvio de 90˚ na metade do trajeto entre *a* e *p,* de modo que o fóton atingisse o alvo *b*, se desviado. Entretanto, tal desvio sempre foi introduzido bem depois de ½ nano-segundo, i.e. do fóton ter passado por aquela região, de acordo com o cálculo clássico. Classicamente, o acréscimo de tal desvio não deveria significar nada, o que quer dizer que as relações de causalidade dependem tanto do espaço quanto do tempo, e o tempo possui uma seta, uma direção inviolável. Eventos em t3 não poderiam influir sobre o estado de sistemas em t2, dada a direção do fluxo temporal. As setas temporal e causal avançam na mesma direção e são interconectadas transversalmente, i.e. cada evento em um ponto de uma das setas está necessariamente correlacionado a um evento em um ponto da outra seta. Talvez se trate de diferentes perspectivas da "mesma seta".

Todavia, o experimento de Sculli demonstra a quebra da causalidade clássica, pois foi verificada a ocorrência de casos em que o fóton atingiu o alvo *b*, ou seja, eventos em que o acréscimo do desvio em t3 gerou a modificação do estado em t2. Em tais eventos, a seta causal foi quebrada, o que contraria a causalidade clássica. Isto somente poderia acontecer caso (i) a informação de que o experimento foi alterado retrocedesse no tempo, fazendo com que o fóton fosse desviado pelo espelho que, "tecnicamente", ainda não estava ali quando ele passou, ou se (ii) o estado do fóton antes da observação fosse uma realidade superposta das duas possibilidades (atingir o alvo A ou B), e que somente a intervenção experimental sucedida pela verificação

observacional pôde selecionar estas duas possibilidades, efetivando uma das duas. No caso em que o espelho é colocado, a probabilidade de que o fóton atinja o alvo B é efetivada, e a outra descartada e vice-versa. A realidade só se efetiva quando ocorre a participação experimental (intervenção e observação). Por enquanto, estamos mais inclinados a admitir a hipótese da superposição do que a hipótese de envio de informações para o passado, por dois motivos: (i) De acordo com os cálculos relativísticos a velocidade mais elevada é a velocidade da luz de 300.000 quilômetros por segundo. Entretanto, para enviarmos informações para o passado a partir de um experimento como este, de acordo com as equações da teoria, teríamos que acelerar as partículas a velocidades superiores à da luz. (ii) Os efeitos de superposição são fenômenos previstos pela teoria quântica e de certo modo já evidenciados por experimentos como a "dupla fenda"[3].

Em suma, o que Weizsäcker e Heisenberg defendem e que tais experimentos como os de Marley Sculli e o interferômetro de Mach-Zender confirmam é que no nível quântico a causalidade clássica é quebrada, ou, em termos lógicos, que o conceito de causalidade clássica não é aplicável ao sistema de proposições da mecânica quântica. Sendo assim, Kant estava enganado quando sustentou que a causalidade era uma categoria sem a qual nenhum entendimento acerca do mundo físico é possível. A física contemporânea demonstrou até o contrário: a causalidade clássica é inaplicável *a priori* sempre que o objeto do entendimento for quântico.

7. Heisenberg e Goethe.

Em 1942, Heisenberg escreve *A ordenação da realidade,* um manuscrito no qual pretende analisar o "pensamento de Goethe acerca do real" (HEISENBERG. 2009, p. 27). Heisenberg detém-se em um adendo à "doutrina das cores" de Goethe, no qual o pensador alemão apresenta a ideia de que a realidade é composta por "camadas" ou regiões justapostas, a saber, pela ordem: causal, mecânica, física, química, orgânica,

[3] Realizado por Thomas Young (1773-1829) por volta de 1801. No experimento, elétrons são disparados individualmente contra um alvo, estando uma barreira a meio caminho, contendo duas fendas. Se os elétrons são disparados um a um, como partículas, então devem passar ou pela fenda A ou pela fenda B. Ao final de uma considerável quantidade de disparos, os cálculos clássicos prevêem que o alvo foi atingido em diversas regiões compatíveis com as regiões desprotegidas pelas fendas. Entretanto, o resultado demonstra um padrão de difração como se os elétrons individuais passassem pelas duas fendas ao mesmo tempo, interagindo consigo mesmos. O resultado se deve ao fato de que a cada elétron está associado um padrão ondulatório. O resultado de tal experimento pode ser interpretado como sendo o mesmo do interferômetro de Mach-Zender, que realizamos.

psíquica, ética, religiosa e genial. Qual a natureza de cada região e quais as conexões nomológicas entre elas, são algumas das questões abordadas por Heisenberg. Neste texto, Heisenberg defende algo que também aparece em *A Parte e o Todo:* a arte como meio de ligar o homem à *ordem central*. Esta obra de Heisenberg termina com os seguintes dizeres:

> Von Holst buscou sua viola, sentou-se entre os dois rapazes e juntou-se a eles na execução da Serenata em ré maior, uma obra da juventude de Beethoven. Ela é transbordante de alegria e força vital. A confiança na ordem central dissipa a covardia e o cansaço. Enquanto eu ouvia, fortaleceu-se minha convicção de que, avaliadas pela escala temporal humana, a vida, a música e a ciência prosseguiriam para sempre, ainda que nós mesmos não sejamos mais do que visitantes transitórios, ou, nas palavras de Niels, simultaneamente espectadores e atores do grande drama da vida. (HEISENBERG. 1996, p. 286)

Não está claro o que Heisenberg quer dizer com "ordem central" – mas parece que se trata do "belo", da "beleza em si". A ordem central, aquilo por meio do qual o mundo "vem a ser", que mantém a conexão nomológica entre "as partes e o todo" – as estruturas essenciais da natureza – é pura beleza. O ideal de beleza aparece como característica da simplicidade lógica das estruturas matemáticas fundamentais, e de tais estruturas deriva o mundo – posto que tais estruturas existem, a natureza existe. No nível fundamental, portanto, o mundo *é* beleza. O belo é, a um só tempo, caminho que nos eleva e núcleo do mundo. Para Heisenberg, por meio do Belo, presente tanto na ciência quanto na arte, o homem pode contemplar a *ordem central*. Heisenberg, portanto, defende um profundo parentesco entre ciência e arte: "Como essa aspiração por ordenações harmônicas forma constantemente a força impulsionadora do pensamento científico, a ciência também permanece constantemente marcada por um parentesco estreito com a arte" (HEISENBERG. 2009, p. 127). Mas se há parentesco entre ciência e arte, qual é o gene comum a ambas? Por certo a beleza das estruturas matemáticas, a beleza da simplicidade lógica que garante o poder formal de unificação de seus fundamentos, o que transparece das palavras de Heisenberg: "A ligação estreita da matemática com a arte é dada por meio da beleza imediata das estruturas, que são expressas por meio de uma sentença matemática" (HEISENBERG. 2009, p. 129).

Quanto maior o grau de "beleza", mais próximo da *ordem central,* da "pura

forma" se encontra um saber científico:

> Em todo caso, o valor de uma realização científica não é medido segundo o objeto, isto é, não é medido segundo a significação humana do material a ordenar, e, com maior razão, não segundo uma "utilidade prática" qualquer, mas apenas segundo a beleza e a força frutífera das estruturas expostas. (HEISENBERG. 2009, p. 130)

Coadunam com tal pensamento, tanto um Schrödinger, para o qual, como já vimos, o valor da ciência não reside nem no seu desenvolvimento técnico, nem na sua capacidade de produção de tecnologias com fins de utilidade prática, mas no fato de participar de algum modo da busca por solucionar a questão filosófica fundamental "Quem somos nós?", quanto um Max Born, de acordo com o qual o empreendimento científico transcende a mera busca por utilidade (BORN. 2000, p. 89).

O ideal estético que concebe a beleza como uma característica das teorias científicas corretas está ligado, de certa forma, ao formalismo científico do tipo proposto por Heisenberg. Os cientistas que tendem a considerar que a força científica do empreendimento lógico-matemático, da teoria pura, precede o esforço experimental, argumentam que teorias belas não podem estar erradas. O poder criativo da teoria também é destacado por Kaku:

> O astrônomo Arthur Eddington chegou até a questionar se os cientistas não estariam exagerando quando insistiam que tudo deveria ser testado. Ele escreveu "Um cientista geralmente professa basear suas crenças em observações, não em teorias... Nunca deparei com nenhum que ponha essa declaração em prática... A observação não é suficiente... a teoria tem uma parcela importante na determinação da crença". O prêmio Nobel Paul Dirac disse isso de maneira ainda mais ousada: "É mais importante nossas equações terem beleza do que se ajustarem ao experimento". (KAKU. 2000, p. 210)

A proposta de Dirac é radical: a beleza é um forte parâmetro de correção de uma teoria científica. É mais importante uma teoria ser bela do que ter sido verificada experimentalmente. Uma teoria sem beleza dificilmente será correta, de modo que nunca poderá ser verificada experimentalmente, já uma teoria bela, mesmo que ainda

não tenha sido verificada experimentalmente, deve ser correta. O que significa dizer que uma teoria é bela? Ainda de acordo com Kaku, afirmar que uma teoria é bela é o mesmo que dizer que seja simples e elegante:

> Simplicidade, elegância. Estas são as qualidades que inspiraram alguns dos maiores artistas a criar suas obras-primas, e são precisamente essas mesmas qualidades que motivam os cientistas a investigar em busca das leis da natureza. (...) O físico Richard Feynman expressou isso quando disse, "Você pode reconhecer a verdade por sua beleza e simplicidade" (...) O matemático francês Henri Poincaré disse o mesmo ainda com maior franqueza quando escreveu: "O cientista não estuda a Natureza porque ela é útil; estuda-a porque se delicia com ela, e se delicia com ela porque ela é bela". (KAKU. 2000, p. 149)

As palavras de Poincaré ecoam e se fortalecem no discurso de Heisenberg acerca da teoria das cores de Goethe. A partir de uma análise deste trabalho podemos destacar que Heisenberg coaduna com Goethe: a realidade é um sistema complexo formado por "regiões ontológicas" – da matéria mais grosseira ao "espírito" mais sutil. Não fica clara nenhuma definição precisa de espírito, mas trata-se, sem dúvida, de uma "ordem" mais elevada que transcende a experiência humana e, em certo sentido, a "determina", ou pelo menos a orienta. Esta ordem oculta que promove a ligação entre as partes – que, portanto, possibilita a integridade do Todo, não é, para Heisenberg, algo evidente. Pelo contrário, Heisenberg defende que a apreensão desta região, a mais profunda, a mais central, a ordem central, encontra-se para muito além das possibilidades de compreensão do homem comum, tão ocupado somente pelos desafios práticos e os prazeres mundanos.

A experiência desta ordem central, portanto, é uma espécie de "graça" ou enlevo – o maravilhar-se que experimenta o espírito diante da beleza e mistério do mundo. É a experiência que se pode ter da harmonia que ordena o universo, e de nossa ligação com esta. Não há um método de apreensão desta ordem. A ordem central, para Heisenberg, é como um núcleo sintético máximo para onde convergem, ou de onde partem todas as facetas do espírito. Deste modo, podemos "vivenciar" nossa ligação com tal região de múltiplos modos: por meio da música, da literatura, da experiência religiosa e científica – poderíamos considerar estas obras como manifestações da ordem. Em comum, a força

da beleza e da harmonia. Heisenberg relatou sentir a sua ligação com o centro a partir de experiência estética:

> Houve um murmúrio abafado e, lá no alto, ele fez soarem os primeiros grandes acordes em ré menor da chacona de Bach [não sabemos quem, mas o fato importante é que alguém executou Bach]. No mesmo instante, e com extrema certeza, descobri minha ligação com o centro. (...) Sempre foi possível falar de uma ordem central na linguagem da música, na filosofia e na religião, não menos naquele dia do que nas épocas de Platão e de Bach. Naquele momento, eu soube disso por experiência própria. (HEISENBERG. 1996, p. 20)

Há aqui um Heisenberg tão poeta quanto físico. O rigor do discurso científico cede lugar à leveza e imprecisão da linguagem alegórica. Não estamos certos do que podemos entender de modo claro por "ordem central", tanto quanto não sabemos se o próprio Heisenberg possuía tal clarividência conceitual. Contudo, isto não nos parece uma inconsistência do pensamento do autor, é antes mais um traço de sua personalidade fascinante: o gosto e a crença na força do abstrato, a intuição de que nem tudo pode ser dito de modo preciso, a valorização da linguagem alegórica e poética. Parece que para Heisenberg não há uma definição analítica rigorosa de "ordem central" simplesmente por que não pode haver, porque sendo esta região a mais profunda, a mais afastada da experiência diária, só temos acesso aos seus domínios de modo indireto.

Heisenberg nos deixou elementos para que tal "região" seja interpretada como núcleo sintético máximo, onde mal podemos distinguir as diferentes faces do espírito, onde as partes encontram tamanha ligação com o "Todo", que nos perguntamos, tal como Tales, se "Tudo" não é realmente "Um":

> Há aqui um poder ainda mais elevado que, sem ser influenciado por nossos desejos, decide derradeiramente e, com isso, valora. Por isso, o mais importante também são os domínios da ciência pura, domínios nos quais não se fala de aplicações práticas e nos quais o puro pensamento segue o rastro da harmonia velada no mundo. Essa região de todas a mais interna, na qual a ciência e a arte quase não conseguem mais ser diferenciadas, talvez seja para a humanidade de hoje o único lugar em que a verdade se encontra diante dela de maneira totalmente pura e sem encobrimentos por meio de ideologias

ou desejos humanos. (HEISENBERG. 2009, p. 147)

Tais palavras de Heisenberg nos soam realmente metafísicas. O autor parece defender uma ordem elevada, uma harmonia velada no mundo, que existe independente de nós a percebermos. A ciência pura – uma espécie de sacerdócio apartado dos desejos mundanos do homem prático – pode (de modo limitado) seguir as pistas desta ordem, pistas presentes em cada partícula de matéria, em cada lei natural, uma vez que o próprio mundo é a expressão desta harmonia. Nos domínios profundos desta harmonia, ciência e arte não podem ser facilmente diferenciadas. Tal região, enfim, é onde repousa a verdade pura. "A natureza ama esconder-se", mas é neste nível que ela revela todo o esplendor de sua nudez.

SEGUNDA PARTE

1. Linguagem, lógica e ciência.

A linguagem ordinária, de acordo com Heisenberg, é um produto do devir histórico. A linguagem evoluiu e faz parte do homem como se fosse um "órgão": "O desenvolvimento da linguagem e, com isso, do pensamento racional é, nesse caso, de maneira similar ao desenvolvimento de um órgão, a realização e a fixação de uma possibilidade estabelecida em estágios anteriores do desenvolvimento" (HEISENBERG. 2009, p. 112). Sua finalidade é, antes de tudo, a orientação prática, a descrição dos fatos ordinários do mundo:

> A espécie humana forjou sua linguagem, durante a era pré-histórica, tanto no propósito de exprimir suas intenções e ideias, como também para servir de base ao seu pensamento. Pouco sabemos sobre as várias etapas de sua elaboração, mas, presentemente, a linguagem encerra um grande número de conceitos que se mostram um instrumento conveniente para uma descrição, mais ou menos precisa, dos acontecimentos da vida cotidiana. (HEISENBERG. 1987, p. 128)

A primeira seara da linguagem, portanto, é de ordem prática. Seu "excesso" – o "vigor do verbo" que transcende tal praticidade, é que possibilita toda a cultura: a filosofia, as ciências, a arte *et caetera*[4]. Sua produção histórica evolutiva permitiu ao homem apreender de modo objetivo as estruturas evidentes do mundo material. Neste sentido, "mundo material" é tudo aquilo que está posto de modo direto e evidente ao homem: a natureza clássica, as relações espaciais e temporais grosseiras, a existência e a dinâmica dos corpos, a existência de outros corpos pensantes e a relação interpessoal e social com estes, enfim, a vida cotidiana.

Heisenberg sustentou que a lógica clássica é a organização formal do pensamento comum, isto é, da linguagem ordinária. Heisenberg, quando se refere à lógica clássica, tem em mente especificamente a lógica aristotélica. Deste modo, por

[4] Penso no *Fausto* de Goethe. O "vigor do verbo" é aquilo que torna a vida rica, plena, mas que nem por isso nos possibilita a apreensão do real. Nesta parte do poema Fausto conclui que jamais alcançou a verdade, mesmo após anos de intensas investigações. GOETHE, J; W. *Fausto*. Trad. Sílvio Meira. Rio de Janeiro: Agir, 1968, p. 32.

mais que a lógica clássica se refira às leis do pensamento e não às leis da física, notamos uma profunda relação entre seus princípios e os "fatos descritos pela mecânica clássica". Para o homem de ciência moderno, o mundo é a "totalidade dos fatos clássicos" – o mundo é o que está posto, direta e evidentemente, isto é, tudo o que é mundo pode ser descrito por meio da física clássica, e tudo o que pode ser descrito por esta, pode ser enunciado por meio de proposições de lógica clássica que obedecem aos princípios de não contradição, terceiro excluído, identidade – e identidade dos indiscerníveis. Há, portanto, uma íntima e indispensável relação entre os princípios da lógica e os fatos do mundo. Isto ocorre, de acordo com Heisenberg, porque a lógica descreve as leis do pensamento, e o pensamento "evoluiu" como o órgão de apreensão e entendimento das estruturas do mundo material.

A lógica clássica, na medida em que expressa formalmente as leis do pensamento, revela os limites deste, encontrando-se, por isto mesmo, presa aos limites do mundo[5]. Deste modo, as proposições de mecânica quântica nos parecem extraordinárias justamente porque nos informam de fatos que extrapolam o mundo material clássico compreendido pela linguagem ordinária. Os fatos de mecânica quântica são transcendentais – comunicam acontecimentos que não são observáveis, dados que não são imediatos, nos trazem informação acerca de uma realidade que não é evidente.

Heisenberg parece concordar com a tese de Bohr: os conceitos da física clássica são conceitos *a priori* para a mecânica quântica – conceitos assumidos previamente –, porque são os únicos de que dispomos, de modo que, para comunicarmos algo acerca dos fenômenos quânticos, temos que fazê-lo por meio de uma linguagem pensada originalmente tão somente para comunicar fenômenos clássicos. A linguagem comum está estruturada em princípios de lógica clássica. Com isto não queremos dizer que não nos é possível enunciar algo que viole as leis da lógica clássica, mas que o resultado de tal violação nos parecerá sem sentido. Ou seja: tão certo quanto é possível elaborarmos um enunciado que viole o princípio do terceiro excluído, é que tal enunciado, parece, carecerá de sentido.

Todavia, aparentemente, há certa incongruência entre princípios de lógica clássica e enunciados de mecânica quântica. Este estado de coisas fez Heisenberg

[5] Tal abordagem pode nos lembrar do Wittgenstein do *Tractatus Logico-Philosophicus.* Não sei até que ponto os possíveis paralelos são autênticos ou frutíferos – e não os desenvolverei aqui – mas, *grosso modo*, parecem-me interessantes, possibilitando investigações futuras.

sugerir, p.ex. que o princípio do terceiro excluído teria que ser revisado, ou, quiçá, abandonado, no escopo da nova física, em prol de novos desenvolvimentos em uma lógica própria para enunciados de mecânica quântica.

Heisenberg promove a desconstrução do materialismo científico moderno, como vimos, e parece compreender que a lógica clássica era a estrutura formal por trás deste materialismo – a lógica clássica é a formalização das relações epistemológicas entre o homem e o mundo físico clássico. Se os fundamentos ontológicos deste mundo clássico estão sendo revistos, então os fundamentos da lógica de seus enunciados também devem sê-lo. Entretanto, por mais que levante o problema, Heisenberg parece não resolvê-lo, não, ao menos, de um modo formal, dando margem para o desenvolvimento de uma tradição de pesquisa em "lógica quântica", "semântica não clássica" para sistemas quânticos e demais relações entre enunciados de mecânica quântica e linguagens formais.

Nosso trabalho será analisar estas possíveis incongruências entre mecânica quântica e lógica clássica, a viabilidade de lógicas não-clássicas para enunciados de mecânica quântica e a viabilidade lógica de interpretações da mecânica quântica rivais da Interpretação de Copenhagen. Por último, nos esforçaremos para apresentar possíveis soluções para os problemas levantados.

2. A tensão entre as proposições de mecânica quântica e os princípios de lógica clássica.

De acordo com Heisenberg, os enunciados de Mecânica Quântica estão contidos em um sistema fechado de proposições. Com isto queremos dizer que fazem referência a condições específicas ou a coleções específicas de fatos (os sistemas subatômicos)[6]. Utilizamos a noção de sistema de proposições como sendo o conjunto de todos os elementos que compõem uma teoria. Existem os "sistemas abertos de proposições", que são aquelas teorias que compartilham seus elementos fundamentais com outras teorias, e os "sistemas fechados de proposições", as teorias que não compartilham seus elementos fundamentais com outras.

Tomemos como exemplo o conceito de "matéria", presente tanto na mecânica

[6] De acordo com Vlatko Vedral, físico da Universidade de Oxford, pesquisas recentes indicam que fenômenos quânticos que até então pensávamos restritos às mais diminutas escalas espaciais, também podem ocorrer em escalas macrofísicas, consideradas clássicas. Para saber mais: VEDRAL.V. "A Vida em um Mundo Quântico", em *Scientific American* n° 110. São Paulo: Duetto, 2011.

clássica quanto na mecânica quântica. Embora o termo matéria apareça tanto em uma quanto na outra, são elementos diferentes. O conceito de matéria nem de longe possui o mesmo significado e *status* em ambos os discursos. Enfim, usamos a noção de "sistema de proposições" no mesmo sentido que Einstein concebeu a ideia de "sistema de axiomas". Em artigo de 1919, "Indução e dedução na física", Einstein defendeu a importância do método dedutivo no desenvolvimento das ciências naturais contemporâneas e sustentou que aquilo que chamamos de teoria é formado por um sistema de axiomas e suas consequências:

> A compreensão intuitiva dos aspectos essenciais do enorme complexo de fatos leva o pesquisador a construir uma ou várias leis fundamentais hipotéticas. A partir da lei fundamental (sistema de axiomas), o pesquisador extrai as suas consequências, de maneira tão completa quanto possível, por um método puramente lógico-dedutivo (...). Juntas, a lei fundamental (axiomas) e as consequências formam aquilo que denominamos uma "teoria". (EINSTEIN, 2000. p, 34-35)

Um sistema de proposições, portanto, engloba não somente os elementos estruturais de uma teoria, mas as consequências e conclusões da mesma.

Os sistemas físicos quânticos são descritos pelo sistema de proposições de mecânica quântica e os sistemas físicos clássicos permanecem sendo descritos por meio de um sistema de proposições clássicas[7]. Seria, portanto, necessário que cada sistema fosse regido por lógicas diferentes? Ao que parece, de fato, muitos enunciados de mecânica quântica deixam claro que, naquele domínio, as leis da lógica clássica perdem sua pretensão de validade. Heisenberg defende que uma compreensão ampla da mecânica quântica indica que, em alguma medida, a lógica clássica não é verdadeira. Parece-nos, contudo, que Heisenberg incorre em um erro quanto aos "limites de

[7] Talvez a incompatibilidade não seja somente entre os princípios da mecânica quântica e os princípios da lógica clássica, abarcando processos lógico-matemáticos não-quânticos em geral. Isso explicaria por que tal problema se estende à ciência da computação. Os computadores clássicos são programados em linguagem lógica não-quântica, de modo que não podem computar determinados processos quânticos. Em alguns casos, supercomputadores clássicos demandam um tempo incrivelmente longo para tanto. Lima e Lavor, no artigo "Representação Geométrica de Ruídos Quânticos", lembram-se da patente necessidade de desenvolvimento de uma computação propriamente quântica: "Richard Feynmam observou em meados dos de 1980, que certos princípios quânticos não poderiam ser simulados de maneira eficiente em computadores clássicos. Daí surge a computação quântica (...) (LIMA; LAVOR. 2010, p. 207).

aplicabilidade" da lógica clássica, supondo-a como o único sistema de "leis do pensamento" para a formulação de quaisquer enunciados.

Ao longo desta segunda parte tentaremos demonstrar que se é o caso de haver dois sistemas fechados de proposições da física, o sistema da mecânica clássica e o sistema da mecânica quântica, é necessário termos dois sistemas de lógica específicos, próprios dos respectivos casos. Com isto, indicamos que não é que a lógica clássica deixa de ser verdadeira quando aplicada ao sistema de proposições da mecânica quântica. Neste domínio a lógica clássica deixa de ser válida, simplesmente porque os limites de sua aplicabilidade foram extrapolados.

Quais tensões Heisenberg admite entre a lógica clássica e a mecânica quântica? Qual é realmente o "estranhamento" entre a lógica clássica e a mecânica quântica? Heisenberg concorre para solucionar o problema por ele indicado? Como será, então, uma lógica propriamente quântica? Para responder a tais questões pretendemos seguir o seguinte roteiro: (i) Apresentar um panorama de tal aporia, recorrendo inclusive a outros autores, visando deixar claro o estranhamento entre a lógica clássica e a mecânica quântica. (ii) Indicar o problema específico exposto por Heisenberg, em que o autor expõe as aparentes contradições entre a lógica clássica e a mecânica quântica. (iii) Explorar outros casos em que tais contradições ficam patentes. (iv) Defender que não é o caso que a lógica clássica seja incorreta no escopo da mecânica quântica, mas que apenas não é aplicável naquele domínio.

Em que medida tal roteiro satisfaz a necessidade de sermos coerentes com a proposta desta dissertação? Se, por um lado, para dar conta do que nos propomos nesta segunda parte, teremos que nos referir a discussões posteriores e externas a Heisenberg, por outro, queremos defender que tais discussões foram enriquecidas, em grande medida, porque Heisenberg ajudou a fomentá-las, porque, de certo modo, fazem parte de uma tradição que tem em Heisenberg um de seus principais pioneiros, e porque, portanto, consideramos que responder a tais questões é também dialogar com Heisenberg, concorrendo para o entendimento dos problemas expostos por ele e buscando soluções para os mesmos.

2.1 O admirável mundo novo quântico e suas estranhezas

Como notamos nas palavras de Roland Omnès, os fenômenos quânticos e a experiência humana ordinária são completamente estranhos:

> Nada é mais árido do que os princípios da mecânica quântica, nem mais formal (...) Não há nenhuma dúvida de que os princípios da mecânica quântica e o senso comum se chocam. Mais vale reconhecê-lo logo de saída e não procurar a todo custo uma conciliação enganosa. Dar instruções de uso, refletir sobre seus próprios atos, comunicar o que se constatou... em suma, tudo o que pertence à prática pertence também ao senso comum. O senso comum, em compensação, não é capaz de incluir em sua lógica o que se passa no nível dos átomos. (OMNÈS. 1995, p. 191-193)

Toda estranheza, ou confusão, entretanto, nasce do fato de querermos entender os fenômenos quânticos por meio do formalismo da lógica clássica, de querermos descrever um estado de coisas não-*x* por meio das regras de validade lógica de todas as coisas que pertencem ao conjunto *x*, sendo *x* o conjunto de todos os enunciados aos quais os princípios da lógica clássica podem ser aplicados, ao invés de considerarmos que o universo de discurso dos enunciados de mecânica quântica deve ser regulado por uma lógica própria que lhes seja especifica – uma lógica quântica[8]. Heisenberg, em *Física e Filosofia,* notou perfeitamente que enunciados de determinados fenômenos quânticos não poderiam ser devidamente formulados sem que princípios clássicos fossem violados:

> O resultado dessas tentativas [de elaborar uma lógica quântica], da autoria de Birkhoff e Neumann, e mais recentemente por parte de Weizsäcker, pode ser descrito dizendo-se que o esquema matemático da teoria quântica pode ser interpretado como uma extensão ou modificação da lógica clássica. (HEISENBERG.1987, p. 101-113)

Na citação acima podemos constatar que Heisenberg parecia não pensar em termos de "limites de aplicabilidade de sistemas lógicos", defendendo que a lógica clássica era ou incompleta, caso em que a lógica quântica seria sua *extensão*, ou incorreta, caso em que a lógica quântica seria sua *modificação*. Mas qual seria, afinal, o motivo exato desta "insuficiência" ou "deficiência"? O que exatamente Heisenberg compreendia que deveria ser "desenvolvido" ou modificado?

[8] A discussão envolvendo a lógica clássica pressupõe que os princípios que a compõem não são universais.

> É, em especial, um dos princípios fundamentais da lógica clássica que parece requerer uma nova concepção, como discutiremos a seguir. Na lógica clássica, supõe-se que, se uma afirmação tiver sentido, há então somente duas possibilidades a considerar, a saber, ela é correta, ou caso contrário, sua negação o será. Nas duas seguintes asserções, "nesta mansarda há uma mesa" e "não há uma mesa nesta mansarda", uma delas é verdadeira e, a outra, falsa. Aqui vigora o princípio do "terço excluído", *tertium non datur*: uma terceira possibilidade inexiste. Pode ocorrer pela fragilidade de nosso conhecimento que não saibamos decidir qual das duas assertivas, a afirmativa ou sua negativa, seja a correta; mas, de fato, somente uma delas é verdadeira. Na teoria quântica, o princípio do terço excluído precisa ser modificado. (HEISENBERG.1987, p. 101-113)

Constatamos, portanto, que Heisenberg identifica o princípio do terceiro excluído como o problema nuclear da inadequação entre a lógica clássica e a mecânica quântica, e na última linha se posiciona pela sua "modificação". Entretanto, não apresentou nenhuma solução para o problema levantado. Apesar de propor que o princípio do terceiro excluído precisa ser modificado quando os enunciados em questão são referentes a dados empíricos de fenômenos quânticos, não deixou claro quais seriam tais modificações, e apesar de citar os trabalhos de Birkhoff, Neumann e Weizsäcker, o faz muito rapidamente, sem ponderar se considerava que tais trabalhos assentavam ou não as bases de uma lógica que resolvia a problemática em questão. Mais do que isto, ao pensar assim, Heisenberg revelou estar ainda a considerar a existência de conflitos entre enunciados de mecânica quântica e princípios de lógica clássica.

Nosso desafio será demonstrar que tais conflitos são inexistentes, não porque seja possível elaborar os enunciados quânticos em acordo com os princípios lógicos clássicos, mas justamente porque a necessidade de tal adequação entre uns e outros é falsa – em outras palavras, pretendemos demonstrar que o entendimento do mundo quântico exige seu próprio ordenamento lógico específico, e que não é o caso de dizermos que os fenômenos quânticos provam a falsidade dos princípios clássicos, mas apenas o de estabelecermos que há um limite de aplicabilidade lógica, tanto para os princípios de lógica clássica, quanto para os princípios de lógica quântica. Sendo assim, dado um conjunto de enunciados, não podemos dizer se os mesmos demonstram a

veracidade ou falsidade de um determinado sistema lógico; o máximo que podemos inferir é que, para tais enunciados, um sistema lógico é ou não é "aplicável". A noção de aplicabilidade é fundamental nesta linha de raciocínio. Por meio dela, podemos responder a todos que pretendem mostrar que a mecânica quântica pressupõe a falsidade ou mesmo o fim da lógica clássica, que isto não é verossímil, porque a esfera à qual a lógica clássica se pretende aplicável não compreende o conjunto de enunciados de mecânica quântica; logo, para tais enunciados, nem sentido há em supormos que os mesmos devam ou não devam estar de acordo com princípios como o terceiro excluído. Respondendo a Heisenberg, na teoria quântica o princípio do terceiro excluído *não* deve ser modificado, uma vez que sua esfera de aplicabilidade não compreende os enunciados da mesma, os quais devem estar de acordo com princípios de uma lógica propriamente quântica.

Antes de tudo, precisamos esclarecer quais são estes determinados fenômenos quânticos aos quais a lógica clássica não se aplica. A base de tudo está em entendermos o princípio de incerteza de Heisenberg e fenômenos quânticos a ele correlacionados diretamente, como os casos de superposição quântica e salto quântico.

2.1.1 O princípio de Incerteza.

physis kruptesthai philei
"A natureza ama ocultar-se"
Heráclito, fragmento 123.

Procuremos compreender o princípio de incerteza. Imaginemos que temos por objetivo localizar uma partícula fotossensível, do tamanho de um grão de sal, movendo-se a velocidades elevadíssimas, dentro de um grande salão escuro. Se procurarmos no escuro, talvez milhares de anos sejam necessários para acharmos o tal objeto, ou, mesmo que não demore tanto, deveremos atribuir ao acaso o fato de sermos bem sucedidos em nossa busca, de modo que esse não pode ser nosso método de exploração. No escuro, não sabemos nossa própria posição, não temos referências, de modo que não poderemos precisar nem a velocidade, nem a posição do objeto em questão. Então, para localizarmos a partícula no salão, devemos iluminar nosso campo de busca. Podemos acender uma luz fraca, com foco disperso, como uma lâmpada, que ilumine uma grande área do salão, mas a ilumine pouco. Entretanto, uma luz fraca, que possui um

comprimento de ondas longo e fótons com baixo nível de energia não nos possibilitará obtermos informações precisas sobre o estado do pequenino corpo em movimento. Nossa única chance será substituirmos o uso de uma luz fraca que cobre uma grande área, por uma luz forte, com comprimento de ondas curto e fótons bem energizados, que seja um foco de luz cobrindo áreas bem menores. O problema é que a partícula que procuramos, quando exposta à luz, tem seu estado perturbado. Sendo assim, quando projetamos nosso foco de luz e localizamos a partícula na esperança de medirmos seu estado natural, a própria luz que utilizamos perturba e altera o estado natural que pretendíamos medir, gerando um efeito colateral de fina ironia.

Tecnicamente, o produto da incerteza quanto ao valor de uma coordenada *x* e a incerteza quanto ao valor de seu correspondente *momentum*, *não pode* ser inferior, em grandeza, à constante de Planck normalizada. Tal constante, representada por *h*, descreve o tamanho dos *quanta*: $\Delta x \, \Delta p \geq h/2$.

Dito de outro modo, o raio de ação da incerteza quanto às posições e velocidades dos objetos quânticos é sempre igual ou maior do que o raio de ação destes mesmos objetos, como se o conjunto de objetos quânticos estivesse contido no conjunto da incerteza quântica. De acordo com este princípio, a posição e o *momentum* de um elétron não podem ser obtidos com exatidão. Se determinarmos a posição, não podemos ter acesso ao *momentum*, se determinamos o *momentum*, não podemos determinar a posição[9]. Nosso conhecimento sobre o nível quântico, de acordo com tal princípio, será sempre "inexoravelmente" limitado. O máximo que podemos obter com relação a estes dados são seus valores prováveis, mas nunca seus valores exatos.

Muitas são as interpretações do princípio de incerteza formulado por Heisenberg. Destacaremos ao menos quatro: as interpretações ontológica, epistemológica, tecnológica e estatística. A interpretação ontológica considera que a incerteza é uma propriedade fundamental da natureza. Não podemos conhecer com precisão os estados quânticos porque os mesmos são intrinsecamente indeterminados. A interpretação epistemológica considera que a natureza não é indeterminada: é o entendimento humano que se revela limitado para compreender a ordem oculta – o determinismo velado – encoberta pela incerteza aparente. A interpretação tecnológica defende que a tecnologia atual não é capaz de investigar a natureza sem superar as

[9] Erhard Scheibe em *Die philosophie der physiker* lembra que, para Bohr, os valores quânticos de "posição" e "momentum" são complementares, isto é, embora sejam valores fundamentais de uma partícula quântica, não podem ser enunciados ao mesmo tempo. Neste sentido, é interessante notar a profunda relação entre o princípio de incerteza de Heisenberg e o conceito de complementaridade de Niels Bohr.

relações de incerteza. Tais relações não seriam, portanto, ontológicas, mas apenas efeitos das interações ainda grosseiras entre os instrumentos de medida e os sistemas subatômicos. Por fim, a interpretação estatística considera que os sistemas quânticos são complexos e não individuais, de modo que as relações de incerteza são produtos das análises estatísticas de tais sistemas. Como os agrupamentos de entidades quânticas são complexos, seu comportamento é estatístico, logo, de certa forma, indeterminado. Tal indeterminação é fruto das estruturas pelas quais investigamos tais sistemas. Deste modo, a indeterminação não é nem ontológica e tampouco epistemológica. É porque tratamos de tais sistemas por meio de um formalismo estatístico que estes se revelam indeterminados. A ciência estatística não trata de indivíduos, mas de "populações". Podemos determinar os estados de indivíduos, mas acerca do comportamento de populações só nos resta calcular a probabilidade de que determinados eventos ocorram.

Muitos teóricos defendem que é a interação entre o objeto medido e os instrumentos de medição que perturba as partículas, tornando-as incertas, como é o caso de Niels Bohr:

> O aspecto crucial neste ponto é o reconhecimento de que qualquer tentativa de analisar, à maneira habitual da física clássica, a individualidade dos processos atômicos, condicionados pelo quantum de ação, é frustrada pela inevitável interação dos objetos atômicos em exame, com os instrumentos de medida indispensáveis para este fim. (BOHR,1995. p 24)

Outros defendem que a incerteza é uma característica imanente da natureza quântica, como é o caso de Stephen Hawking:

> O limite imposto pelo princípio da incerteza não depende da maneira pela qual você tenta medir a posição ou velocidade da partícula, nem do tipo de partícula. O princípio da incerteza de Heisenberg é uma propriedade fundamental, inescapável, do mundo, e teve profundas implicações na maneira como vemos o mundo. (HAWKING. 2005, p. 95)

Na verdade, esta ideia de que a incerteza não é fruto de nossa deficiência observacional, nem do fato de que a observação afeta o observado, mas sim que se trata de uma característica da própria natureza já está presente desde os primórdios da

mecânica quântica. Um de seus pioneiros, Paul Dirac, que apresentou teoricamente a descoberta do *pósitron*, a antipartícula do elétron, defendeu esta tese:

> Há quem afirme que não se pode localizar exatamente um elétron, porque ele não se encontra em um lugar determinado. (...) Existe um limite para os nossos poderes de observação e para o mínimo de perturbação que acompanha o nosso ato de observação, um limite inerente à natureza das coisas e que nunca pode ser vencido pelo aperfeiçoamento da técnica e da habilidade do observador. (CARUSO; OGURI. 2006, p.468-471)

Dado um elétron *e*, sua posição e seu *momentum* (sua massa multiplicada por sua energia) são sempre prováveis. É mais provável que o elétron se localize em determinadas regiões do que em outras, mas, ainda assim, nosso conhecimento é probabilístico. De acordo com a equação de Schrödinger, podemos inferir que, enquanto não sofrer um colapso observacional, o elétron se ramifica em diversas realidades superpostas, em cada qual apresentará uma maior probabilidade de ser identificado a um vetor que relacione suas coordenadas espaciais (x,y,z) em um espaço de Hilbert com uma coordenada temporal t.[10] Ou, seja, de acordo com esse modelo, o elétron, antes de ser observado, existe em todos os lugares possíveis, com todos os níveis de energia possíveis e em todas as velocidades possíveis, mas com distribuição desigual de probabilidades para cada uma destas realidades potenciais.

De acordo com a equação de Schrödinger, todas as probabilidades são concomitantemente reais. Sendo assim, no nível quântico, uma probabilidade deixa de ser compreendida como uma "possibilidade" e passa a ser entendida como uma "*potentia* objetiva do mundo". A implicação epistemológica deste princípio é a limitação inevitável do empreendimento intelectual em face da natureza. Nunca conheceremos a natureza com absoluta precisão, ou porque nunca "*podemos"* observá-la precisamente (como defendem os que postulam que a incerteza é provocada por uma inevitável perturbação entre os instrumentos de medida e os objetos medidos) ou porque a própria natureza não possui valores precisos (como postulam os que defendem a tese de que a incerteza é uma característica necessária, ontológica, da própria natureza quântica).

Podemos ainda demarcar as diferentes interpretações da incerteza quântica

[10] Um espaço de Hilbert é uma generalização do espaço euclidiano com *n* dimensões.

citando o artigo "Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg" de Silvio Seno Chibeni:

> Versão ontológica: 'Indefinição': Ela (a incerteza) diria respeito a uma indeterminação intrínseca aos entes físicos [Esta seria a interpretação de Paul Dirac].
> Versão epistemológica: 'Incerteza': A incerteza como perturbação inescapável da interação entre o observado e o sistema observador. Os experimentos que fornecem tal definição [dos conceitos mecânicos] sofrem, eles próprios, de uma indeterminação introduzida puramente pelos procedimentos experimentais que utilizamos para a determinação simultânea de duas quantidades canonicamente conjugadas.
> Versão estatística: 'Dispersão estatística': Para Karl Popper, a indeterminação não possui caráter ontológico, tampouco epistemológico, sendo o resultado da matemática estatística utilizada nas operações quânticas. O que Popper propôs é que as relações [de incerteza] fossem entendidas como 'relações de dispersão estatística'.(CHIBENI. 2005, p. 30)

Seja como for, estando correta a interpretação ontológica, epistemológica ou estatística, a impossibilidade técnica de medirmos simultaneamente a posição e o *momentum* de uma partícula quântica qualquer representa a negação do determinismo causal no escopo da mecânica quântica. Isto ocorre porque se há incerteza acerca de *x*, então não posso determinar com precisão nem o estado passado de *x*, nem seu estado futuro, bem como não posso determinar de modo inequívoco um encadeamento causal entre os diferentes estados de *x* em diferentes momentos do tempo. Se não posso determinar estes eventos porque a natureza é indeterminável em si, ou porque meu entendimento é limitado, não muda em nada o fato de que uma descrição determinista de *x* permanece impossível.

O princípio da incerteza de Heisenberg desabilita o caráter universal do determinismo causal da física clássica que postulava: (i) a determinação dos estados físicos e (ii) a possibilidade de conhecimento de tais estados. Ou seja: ao determinismo é imposto agora uma espécie de "limite de validade". Ele é valido quando os sistemas analisados em questão são clássicos, e deixa de ser válido para sistemas quânticos.

Todos os fenômenos quânticos estão submetidos à incerteza. James T. Cushing em *Philosophical Concepts in Physics* sustenta que a indeterminação quântica possui, na Interpretação de Copenhagen, *status* ontológico:

> De acordo com a Interpretação de Copenhagen, existe, no nível mais fundamental da natureza, uma indeterminação que não pode ser reduzida ou eliminada [a indeterminação é uma propriedade ontológica do mundo]. Três são as assunções fundamentais da Escola de Copenhagen: (i) nenhuma partícula realiza trajetórias definidas no espaço-tempo, (ii) nenhuma descrição determinística de fenômenos físicos fundamentais é possível (iii) Dentre as leis fundamentais da física devemos incluir a indeterminação quântica. Tal indeterminação é essencial e não eliminável. (CUSHING. 1998, p. 331)

A partir deste princípio vários problemas lógicos parecem surgir, como, por exemplo, problemas referentes ao conceito de trajetória, diretamente relacionado à ideia de determinismo causal. Pensemos no deslocamento de uma partícula entre dois pontos, A e B. O princípio da incerteza de Heisenberg nos impede de pensarmos em uma simples trajetória clássica, bem definida, pelo tecido do espaço-tempo. É impossível sabermos com precisão a trajetória do elétron, sem tornarmos completamente incerta a sua velocidade.

De acordo com tal interpretação, proposições de trajetórias não fazem parte do universo de proposições epistemicamente válidas de mecânica quântica. O valor do conceito de "trajetória", portanto, é nulo para o sistema fechado de proposições da mecânica quuântica. Isto ocorre porque, como vimos, o "princípio de incerteza" de Heisenberg nos impede de localizarmos uma partícula quântica em qualquer ponto preciso (x,y,z) dedutível de espaço. Uma trajetória precisa é, em suma, associada a um determinado segmento de reta. Um segmento de reta é a soma de n pontos p, sendo $p = (x,y,z)$, ou seja: cada ponto p de um seguimento de reta associado à trajetória de um corpo representa uma parte localizável de espaço. Se uma partícula quântica não pode ser localizada em $p = (x,y,z)$ então não podemos pensar em uma trajetória precisa de uma partícula entre dois pontos A e B. Na física contemporânea, trajetórias associadas a segmentos de reta não fazem sentido. Se quisermos fazer uso do conceito de trajetória devemos especificar de modo claro que o mesmo diz respeito apenas a um cálculo probabilístico da superposição das inúmeras regiões em que uma determinada partícula

poderia estar entre A e B.

Uma trajetória tão bem conhecida implica uma indeterminação total quanto ao *momentum* do elétron[11]. Além disto, tal esquema não leva em conta a dualidade onda-partícula, pois ao traçar uma trajetória definida, considera apenas o caráter corpuscular eletrônico. Entretanto, o caráter ondulatório da matéria considera que, entre as duas posições, há toda uma região de probabilidades, onde podemos encontrar o elétron, pois a onda eletrônica se espalha entre A e B. Então, o que ocorre entre os pontos A e B?

Einstein não foi opositor da mecânica quântica. Pelo contrário, foi um de seus pioneiros. Sua oposição dirigiu-se a determinadas interpretações da mecânica quântica, como a "Interpretação de Copenhagen" de Bohr e Heisenberg. Todavia, mesmo Einstein não pôde deixar de sintetizar a mecânica quântica da seguinte forma: a mecânica quântica não trata de objetos, mas de probabilidades. Suas leis não podem nos revelar o estado de um sistema, mas as probabilidades de tal estado:

> A Física Quântica formula leis governando aglomerados e não indivíduos. Não são descritas propriedades, mas probabilidades, não são formuladas leis revelando o futuro de sistemas, mas leis governando as alterações de probabilidades no tempo e relativas a grandes aglomerados de indivíduos. (EINSTEIN. 1980, p. 236)

Temos, portanto, duas interpretações diferentes da mecânica quântica que chegam, por vias distintas, à mesma conclusão: Heisenberg e os partidários de Copenhagen defendem que todo evento quântico obedece às relações de incerteza, o que torna o determinismo impossível no escopo da mecânica quântica. Já Einstein defende que a mecânica quântica não trata de indivíduos, mas de extensos grupos de indivíduos. Tais aglomerados formam sistemas complexos que se comportam estatisticamente, de modo que podemos calcular as probabilidades de evolução de tais sistemas, mas não determinar de modo preciso cada estado, passado ou futuro, de tais sistemas.

[11] Para melhor compreensão desta questão, vale citar o artigo "Uma Proposta para o Ensino de Mecânica Quântica", de Ileana Maria Greca, Marco Antonio Moreira, Victoria E. Herscovitz, publicado na *Revista Brasileira de Ensino de Física*: "De qualquer forma, o Princípio de Incerteza é uma limitação inerente a todo ato de medição e não pode ser superado com os avanços tecnológicos dos sistemas de medição. Este limite natural à nossa capacidade de observação leva-nos a abandonar ideias centrais da visão clássica de mundo, como a do caráter fundamental que o conceito de trajetória ocupa aí" (GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. 2001, p. 444-457).

3. Lógica de Copenhagen para Mecânica Quântica: As investigações de Carl von Weizsäcker.

Em *A Imagem Física do Mundo* Weizsäcker apresenta um sistema de lógica para enunciados de mecânica quântica. Seu primeiro esforço é a definição dos conceitos fundamentais. São eles:

Verdade: Um enunciado elementar é verdadeiro quando sua probabilidade é 1.

Falsidade: Um enunciado elementar é falso quando sua probabilidade é 0.

Indeterminação: Um enunciado elementar é indeterminado quando sua probabilidade é menor que 1 e maior que 0.

Enunciados elementares são determinados por observações máximas, a saber, que expressam informações acerca de sistemas observados, em acordo com o princípio de complementaridade. Já com os primeiros vislumbres deste sistema, identificamos que o mesmo insere no domínio lógico o conceito de incerteza que Heisenberg introduziu na física. O princípio de incerteza assegura que determinados sistemas físicos podem ser enunciados somente em termos de indeterminação. Sendo assim, a lógica de Weizsäcker parece, portanto, coadunar perfeitamente com a física de Heisenberg.

Há também outro ponto em que o conceito lógico de "indeterminação" aponta necessariamente para a necessidade de considerarmos, *a priori*, os princípios da lógica clássica como inaplicáveis ao sistema de lógica quântica. Na lógica quântica há uma terceira possibilidade para um enunciado além de verdadeiro ou falso, pois pode ser que ele seja indeterminado, isto é, que sua probabilidade seja menor que um e maior que zero. A probabilidade de um enunciado ser V, F, ou "indeterminado" não expressa, no escopo deste sistema, um déficit de informação, um não-saber, mas propriedades e relações ontológicas dos objetos aos quais os enunciados de mecânica quântica se referem. A lógica quântica, portanto, é uma lógica dos casos puros, a formulação lógica de certas propriedades dos entes quânticos em si, isto é, de relações ontológicas quânticas. Os enunciados ontológicos são pressupostos dos enunciados lógicos. Deste modo, Weizsäcker delimita conceitos ontológicos fundamentais do sistema:

"Realidade". Um estado é denominado real se o enunciado que afirma sua existência é verdadeiro.

"Não-real". Um estado é considerado não-real se o enunciado que afirma sua existência é falso.

"Possível". Um enunciado é considerado possível se o estado enunciado por ele é fisicamente possível.

"Somente possível". Um estado é somente possível se o enunciado que afirma sua existência encontra-se indeterminado. Na linguagem de Heisenberg, um estado somente possível é uma *potentia* física objetiva.

"Complementaridade". Dois enunciados são complementares se não podem ser determinados simultaneamente.

Novamente, os pensamentos de Weizsäcker e Heisenberg parecem coadunar. O conceito de complementaridade do primeiro remete ao conceito de incerteza do segundo. O exemplo mais claro de enunciados complementares que podemos oferecer são de enunciados que não podem ser determinados simultaneamente por conta das relações de incerteza descobertas por Heisenberg. Se temos um enunciado A acerca da posição de um determinado elétron em (x,y,z) em t1 e um enunciado B acerca do *momentum* deste mesmo elétron também em t1, então os enunciados, posto o princípio de incerteza de Heisenberg, não podem ser determinados ao mesmo tempo, conforme o conceito lógico de complementaridade de Weizsäcker, tomado da filosofia da física de Niels Bohr. É neste momento que um novo conceito delimitado por Weizsäcker, o conceito de "coexistência", coadunará com outro princípio fundamental de mecânica quântica: o conceito de superposição de Schrödinger. A ideia é que se temos dois enunciados elementares complementares, então os estados descritos por eles são coexistentes, ou, em outros termos, estão superpostos. Os enunciados acerca da posição e *momentum*, por exemplo, são complementares posto que não possam ser simultaneamente determinados, mas os estados de posição e *momentum* são propriedades coexistentes do mesmo sistema físico.

Se um estado A é real e outro estado, B, é somente possível, dizemos que B participa de A. O princípio de superposição de Schrödinger e a interpretação neo-aristotélica de Heisenberg concorrem para que possamos atribuir status existencial aos estados somente possíveis: são entes potenciais. De acordo com Weizsäcker, se os vetores χ e φ representam estados possíveis de S, então a superposição $\psi\ (\chi,\varphi)$ também representa um estado possível.

Na lógica quântica de Weizsäcker o conceito de "problema" corresponde ao conceito físico de "experimento". Os enunciados são resultados, respostas ou informações acerca de problemas. Um problema delimitado é aquele que está posto, para o qual pode dar-se uma solução. Um problema positivo ou "plenamente

delimitado" é chamado de "alternativa". Uma alternativa é o problema cuja verdade de sua solução implica a falsidade de soluções alternativas. Uma alternativa é chamada de eneádica quando possuí n soluções, p.ex. o problema "onde se localiza a partícula β em t_x?" A solução para tal questão é dada pela relação entre a posição da partícula β em uma região específica do espaço, por meio das coordenadas (x,y,z) no momento determinado t_x.

Na mecânica clássica tal questão é trivial. Todavia, na mecânica quântica, dada a relação de incerteza $\Delta x \, \Delta p \geq h/2$, a resposta para o problema em questão pode ser "a partícula está em n posições". Cada posição é descrita por um vetor complexo que indica a relação $(x,y,z) + t_x$. Tal tipo de vetor é chamado de "vetor mecânico-quântico de estado". São chamados de ortogonais os vetores correspondentes aos enunciados que, do fato de serem enunciados elementares verdadeiros, implicamos a falsidade de outros enunciados. Se, p. ex. para um problema tenho n soluções e se x é uma solução verdadeira, com vetores ortogonais, então todas as soluções, menos x, são falsas. Entretanto, não se segue que da falsidade de x possamos inferir a não falsidade das outras soluções.

Analisemos novamente, agora à luz da lógica quântica, o experimento da dupla fenda. Tendo tal experimento como problema fundamental, pomos a questão: por qual fenda passou a partícula β? Em primeiro lugar, podemos constatar que tal problema é positivo, uma "alternativa", porque sua solução implica a falsificação de outros enunciados possíveis. Temos três enunciados, a saber, E1 = "A partícula passou pela fenda A", E2 = "A partícula passou pela fenda B" e E3 = "Os enunciados E1 e E2 são ambos verdadeiros". Podemos, entretanto, reduzir estes três enunciados aos dois que se seguem: E1 = "A partícula passou somente pela fenda A", E2 = "A partícula passou somente pela fenda B". Destes dois enunciados derivamos as seguintes relações:

"Se E1 = 1 então E2 = 0" (Se é verdadeiro que a partícula β passou somente pela fenda A então é falso que passou pela fenda B) e "Se E1 = 0 então E2 = 1" (Se é falso que a partícula β passou, somente, pela fenda A, então é verdadeiro que passou pela fenda B).

3.1. A lógica quântica de Weizsäcker e o princípio do terceiro excluído: resposta a Heisenberg.

De acordo com a lógica quântica de Weizsäcker, em um plano lógico imediato temos enunciados como:

a) "E1 é verdadeiro"

b) "E1 é falso"

Em um plano lógico mais elevado são tais enunciados imediatos que são verdadeiros ou falsos: trata-se do plano lógico dos metaenunciados:

a) "O enunciado *E1 é verdadeiro* é verdadeiro."

b) "O enunciado *E1 é verdadeiro* é falso."

Na lógica quântica, da verdade ou falsidade de E1 se segue a verdade ou falsidade de "E1 é verdadeiro". Se "E1 é falso", então "O enunciado 'E1 é verdadeiro' é falso."

Tal operação, entretanto, apresenta "inversão assimétrica", ou seja, se invertermos sua ordem não verificamos o mesmo resultado. Se "E1 é verdadeiro" é falso, então não se segue que E1 seja falso – não estamos afirmando que E1 é falso, mas apenas negando que seja verdadeiro. Se E1 não é verdadeiro, então pode ser ou falso ou indeterminado. É neste sentido que o conceito de indeterminação se qualifica como um valor de verdade, uma terceira via legítima além de verdade e falsidade.

De acordo com Heisenberg, o princípio do terceiro excluído deve ser modificado para ser compatível com o sistema de proposições da mecânica quântica. Como vimos, todavia, a lógica de Weizsäcker não promove ajustes no domínio deste princípio, e também em nenhuma outra área da lógica clássica. Pelo contrário, o que deve ser modificado é nosso entendimento acerca deste princípio mesmo. O que Weizsäcker propõe, de fato, é compreendermos sob quais condições o princípio do terceiro excluído não deve ser válido, e por que.

O sistema de proposições de mecânica quântica é composto por duas classes de enunciados: os enunciados – que são acerca de fatos do mundo – e os metaenunciados – que são acerca de enunciados. O princípio do terceiro excluído pode ser aplicado na análise das relações compreendidas por enunciados, mas não é válido quanto à classe dos metaenunciados, isto é, não pode ser aplicado na análise das relações compreendidas por metaenunciados, pois metaenunciados podem ser falsos, verdadeiros

ou indeterminados.

Em *Física e Filosofia* Heisenberg analisa a tentativa de Weizsäcker de elaborar um sistema formal de lógica quântica. A noção de níveis de linguagem é indispensável no sistema de Weizsäcker. Em um primeiro nível temos uma linguagem acerca de objetos, ou "fatos do mundo". Neste sentido, a equação $e=mc^2$ é uma relação simples entre fatos empíricos puros (energia, massa, velocidade da luz) e fatos matemáticos (igualdade, multiplicação, potenciação). Em um segundo nível de linguagem, temos enunciados sobre objetos ou fatos do mundo. O enunciado "É verdadeiro que $e=mc^2$" é uma operação de segundo nível. Em um terceiro nível, temos enunciados acerca de enunciados. Se chamarmos o enunciado "É verdadeiro que $e=mc^2$" de E1, então o enunciado "E1 é verdadeiro" ("É verdade que *é verdadeiro que* $e=mc^2$") é uma operação de terceiro nível. Na linguagem de Weizsäcker, enunciados acerca de enunciados são metaenunciados.

Os metaenunciados são complementares. Heisenberg defende que na lógica clássica a relação entre diferentes níveis de linguagem é biunívoca. Heisenberg oferece o exemplo de um átomo em uma caixa. Ou "o átomo está na metade esquerda da caixa" – chamaremos este enunciado de $1p$ - ou "o átomo está na metade direita da caixa" – chamaremos este enunciado de $2p$: "O átomo pode, então, de acordo com a lógica clássica, encontrar-se em uma das metades ou na outra. Não há uma terceira possibilidade: o princípio do terceiro excluído!" (HEISENBERG. 1987, p. 138). O enunciado "o átomo encontra-se na parte esquerda da caixa" é um enunciado de primeiro nível. O enunciado "É verdadeiro que o átomo encontra-se na parte esquerda da caixa" é um enunciado de segundo nível – chamaremos este enunciado de $Me1$. Para a lógica clássica, não há "modos lógicos distintos para os diferentes níveis de linguagem", portanto, há equivalência total entre tais enunciados, de modo que ou são ambos verdadeiros, ou são ambos falsos[12]. Na lógica clássica se $Me1$ é falso então $2p$ é verdadeiro. Ora, sabemos que o átomo está na caixa, ou no lado direito, ou no lado esquerdo. Se for falso que ele está no lado esquerdo, então é necessariamente verdadeiro que ele esteja no lado direito.

No caso do sistema lógico proposto por Weizsäcker, a relação de equivalência entre enunciados de níveis diferentes é quebrada. A correção ou incorreção de um enunciado de primeiro nível permanece implicando a correção ou incorreção de um enunciado de segundo nível. Todavia, a incorreção de um enunciado de segundo nível

[12] Heisenberg, quando se refere à lógica clássica, tem em mente especificamente a lógica aristotélica.

não implica a incorreção de um enunciado de primeiro nível. Vejamos novamente o exemplo de Heisenberg. Temos um enunciado afirmando que um átomo encontra-se no lado esquerdo de uma caixa, e um enunciado afirmando que este enunciado é verdadeiro. Em *Física e Filosofia* Heisenberg notou esta relação assimétrica entre metaenunciados incorretos e seus enunciados correspondentes. Nas palavras de Heisenberg:

> Se o segundo enunciado for incorreto, fica em aberto se o átomo está, ou não, na metade esquerda: o átomo não precisa, necessariamente, estar na metade direita. Persiste ainda uma completa equivalência entre os dois níveis de linguagem, no exemplo citado, no que diz respeito à correção de um enunciado, mas não no que se refere à sua incorreção. (HEISENBERG. 1987, p. 139)

A sutileza da quebra de paridade lógica neste exemplo – quebra de equivalência, na terminologia de Heisenberg – é que se $Me1=0$ não é necessário que $2p=1$. Na lógica quântica, o enunciado "é verdadeiro que o átomo está no lado esquerdo da caixa" equivale a "é verdade que o átomo está SOMENTE no lado esquerdo da caixa". Caso este enunciado seja falso, o átomo pode estar SOMENTE no lado direito – mas não é necessário que isto seja verdadeiro – pois ele pode estar em uma região indeterminada entre o lado esquerdo e o lado direito.

Na lógica quântica, ao contrário da lógica clássica, o fato de sabermos que o átomo não está no lado esquerdo da caixa não nos comunica onde o átomo está – sabemos somente onde ele não está – o que é tudo. Isto ocorre, obviamente, porque o princípio do terceiro excluído não se aplica nesta esfera.

Todavia, mesmo após expor suas considerações acerca da lógica de Weizsäcker, Heisenberg permanece sendo inconclusivo quanto ao seguinte ponto: em *Física e Filosofia*, onde discorre acerca das relações entre lógica e linguagem na física moderna, não fica compreensível se a noção de "limites de aplicabilidade lógica" é admitida pelo autor. Sendo assim, Heisenberg não se posiciona de modo claro em relação ao sistema de Weizsäcker, em que distintos níveis de linguagem possuem diferentes ordenações lógicas. Não sabemos se Heisenberg permanece pensando que o princípio do terceiro excluído deve ser modificado no escopo da lógica quântica ou se considera que tal questão não faz sentido, posto que tal princípio não se aplique àquela esfera. A exposição que faz do sistema de Weizsäcker parece indicar que Heisenberg considera

que o terceiro excluído não se aplica à lógica quântica. Contudo, há passagens do texto que comprometem esta interpretação:

> Todavia, como aponta Weizsäcker, pode-se distinguir diversos níveis de linguagem. O primeiro deles refere-se a objetos, por exemplo, a átomos e elétrons. O segundo tem a ver com enunciados sobre objetos. O terceiro dirá respeito a enunciados acerca de enunciados sobre objetos e, assim, *ad infinitum.* (...) A possível modificação da lógica clássica dirá respeito, em primeiro lugar, ao nível de pronunciamentos sobre objetos. (HEISENBERG. 1987, p. 137)

Neste trecho Heisenberg considera ainda uma "possível modificação" da lógica clássica com relação aos enunciados quânticos de primeiro nível. O terceiro excluído não se aplicaria aos enunciados de primeiro nível porque, voltando ao exemplo do átomo na caixa, a mecânica quântica admite mais de dois estados possíveis. O átomo pode estar ou do lado direito, ou do lado esquerdo, ou em uma complexa região formada por localizações possíveis superpostas: "Na teoria quântica, contudo, teremos que admitir – se quisermos fazer uso dos termos 'átomo' e 'caixa' – que ocorram outras possibilidades, misturas estranhas daquelas duas" (HEISENBERG. 1987, p. 138). Para tentar resolver o problema, logo em seguida Heisenberg apresenta e discorre acerca do sistema de Weizsäcker. Heisenberg chega a considerar que tal sistema "corresponde ao formalismo matemático da mecânica quântica" e que "essa estrutura lógica propicia as fundações de uma linguagem precisa que pode ser utilizada na descrição do átomo" (HEISENBERG. 1987, p. 139).

Parece, então, que temos o seguinte quadro: Heisenberg considera que a lógica de Weizsäcker soluciona as aparentes contradições entre o sistema de proposições da mecânica quântica e os fundamentos da lógica clássica, admitindo que os níveis de linguagem quântica exijam modos lógicos específicos, dentro dos quais não se incluem os princípios de lógica clássica. Se x não se aplica a y, y não pode implicar que x é falso. Entretanto, o quadro pretensamente diáfano volta a turvar-se rapidamente. Heisenberg defende que tal linguagem levanta problemas. Não fica clara a extensão destes problemas. Heisenberg sustenta que na lógica quântica a equivalência lógica entre enunciados de níveis diferentes é quebrada somente nos casos de incorreção, mas não nos casos de correção. Nos casos de correção, se um enunciado de segundo nível é correto, então o enunciado de primeiro nível correspondente é necessariamente correto.

Tal equivalência revela uma inter-relação própria da lógica clássica. É como se Heisenberg defendesse que nos casos de correção os fundamentos da lógica clássica são suficientes no regimento das relações entre enunciados de mecânica quântica.

A lógica clássica opera com dois valores de verdade, V e F. Ou bem algo é verdadeiro, ou bem é falso, não havendo uma terceira possibilidade. Algo não pode ser V e F ao mesmo tempo. Na lógica quântica, há três valores de verdade: V, F e I. Um enunciado pode ser verdadeiro, falso ou indeterminado. De acordo com Weizsäcker, se um metaenunciado é falso, então o enunciado correspondente pode ser falso ou indeterminado. Temos aí os três valores de verdade que caracterizam a lógica quântica e a tornam tão diferente da lógica clássica. Todavia, parece que Heisenberg argumenta que na lógica quântica ainda persistem fortes elementos clássicos – talvez seja neste sentido que o autor afirma ser a lógica clássica um *a priori* para a lógica quântica. Vejamos. Mesmo na lógica quântica, se um metaenunciado é verdadeiro, então o enunciado correspondente é falso ou verdadeiro, mas nunca indeterminado. Neste caso, os valores de verdade clássicos V e F regem as relações entre os enunciados quânticos.

Analisemos o seguinte caso. Temos dois enunciados de primeiro nível (E1*a* e E1*b*) e um metaenunciado (*Me*1). E1*a* = "O elétron passou somente pela fenda A". E1*b* = "O elétron passou somente pela fenda B". *Me*1 = "O enunciado E1*a* é verdadeiro". Se *Me*1 é verdadeiro, então E1*a* é necessariamente verdadeiro e E1*b* é necessariamente falso.

Se "é verdadeiro que o elétron passou somente pela fenda A" então o enunciado "o elétron passou pela fenda B" ou é verdadeiro ou é falso – logo, é falso – não havendo possibilidade de ser indeterminado. Sendo assim, poderíamos formular o seguinte princípio: "Sempre que um metaenunciado for verdadeiro, os enunciados correspondentes serão falsos ou verdadeiros, mas nunca indeterminados". Se isto está correto, então Heisenberg tinha razão em considerar a "persistência das leis clássicas na teoria quântica" (HEISENBERG. 1987, p. 139).

A "crítica" de Heisenberg ao sistema de Weizsäcker (Heisenberg não descarta tal lógica, mas a considera problemática em alguns sentidos complexos demais para serem discutidos naquela ocasião, em *Física e Filosofia*), contudo, não nos parece justa, nem mesmo clara. Weizsäcker não defendeu que todas as relações entre enunciados de mecânica quântica deveriam necessariamente contar com os três valores de verdade quânticos, V, F e I. O próprio Weizsäcker defendeu que, na lógica quântica, é a falsidade de um metaenunciado que introduz a indeterminação do enunciado

correspondente como um valor de verdade, e que o mesmo não se dá no caso de metaenunciados verdadeiros:

> Podemos estabelecer exatamente em que sentido o princípio do terceiro excluído é válido – em que nível se aplica e em que nível não se aplica. Os dois enunciados *a*1 e "*a*1 é verdadeiro" pertencem a níveis distintos de linguagem e sem dúvida possuem sentidos diferentes. Na lógica clássica tais enunciados são equivalentes, isto é, ou ambos são verdadeiros ou ambos são falsos. Na lógica quântica tais enunciados não são equivalentes. Na realidade, da verdade ou falsidade de *a*1, se segue a verdade ou falsidade de "*a*1 é verdadeiro", mas não o inverso: se "*a*1 é verdadeiro" é falso, *a*1 pode estar indeterminado. (...) Neste sentido, podemos afirmar que a lógica quântica não modifica as implicações do valor "verdadeiro", mas somente do valor "falso". (WEIZSÄCKER. 1958, p. 320)

Parece que temos que nos satisfazer com o seguinte quadro: Heisenberg considera que os enunciados de mecânica quântica contêm informações acerca de novas estruturas ontológicas desconhecidas do "materialismo ingênuo" da física clássica. Como a linguagem evoluiu para expressar os níveis imediatos de experiência do mundo, obviamente, há contradições entre os modos lógicos que regem tal linguagem, e a concatenação dos fatos quânticos. Estes, por serem tão diferentes e pouco intuitivos, por serem de uma complexidade formal e abstrata muito elevada, demandam novos modos lógicos, aparentemente incompatíveis com aqueles da linguagem ordinária. Sendo assim, Heisenberg considera muito natural que haja contradições entre princípios de lógica clássica, como o "terceiro excluído", e enunciados de mecânica quântica, especialmente aqueles que comunicam relações de incerteza e superposição – todos os fatos do mundo para os quais uma descrição física é possível se e somente se estiverem expressos por meio do princípio de incerteza de Heisenberg e da equação de Schrödinger.

Heisenberg, parece, chega à conclusão que a lógica clássica é um caso limite da lógica quântica, sendo um *a priori* para esta. Isto significa que a lógica clássica é limitada, ou seja, não podemos considerar que ela seja universal, que se aplique a todos os enunciados de mecânica quântica. Na realidade, devemos destacar dois casos em que a lógica clássica pode ou não aplicar-se à mecânica quântica: (1) Quanto ao conteúdo de

um enunciado. (2) Quanto à relação entre enunciados e metaenunciados.

No caso (1) sempre que o conteúdo de um enunciado expressar incerteza e superposição, os princípios de não contradição e terço excluído serão suspensos[13]. Com respeito ao caso (2) – a relação entre enunciados e metaenunciados – a lógica clássica é válida no regimento das relações entre enunciados quânticos sempre que os valores de verdade V e F forem suficientes (sempre que os metaenunciados forem verdadeiros) e inválida sempre que os valores de verdade V, F, e I estiverem presentes (o que ocorre quando metaenunciados são falsos e o valor de verdade I é introduzido).

Embora não tenha proposto um "limite de aplicabilidade" para princípios lógicos, ou sistemas de lógica, Heisenberg não foi indiferente a tal noção, defendendo limites de aplicabilidade para conceitos. Determinados conceitos perdem o sentido quando empregados fora de seus espaços semânticos próprios. Conceitos clássicos, como matéria, p. ex., não fazem sentido no escopo da mecânica quântica, a não ser como nomes para novos significados radicalmente diferentes daqueles que estes nomes compreendem em seus usos tradicionais:

> Isso mostra que jamais poderemos saber, de antemão, que limitações deverão ser impostas na aplicabilidade de certos conceitos quando os estendemos a partes mais recônditas da Natureza, nas quais só conseguimos penetrar pelo uso das técnicas mais elaboradas. Portanto, nesse processo de penetração, somos às vezes obrigados a usar nossos conceitos de uma maneira injustificada e desprovida de sentido. Assim sendo, a insistência no postulado de uma completa elucidação lógica tornaria a ciência inexequível. (HEISENBERG. 1987, p. 67)

Deste modo parece que encontramos em Heisenberg os elementos para a

[13] De acordo com os pesquisadores Dr. Décio Krause e Dr. Newton da Costa, da UFSC, outro princípio "violado" pela mecânica quântica é o de identidade. Em alguns trabalhos como *Axioms for Collections of Indistinguishable Objects*, de 1996 e *Sortal predication and quantum physics*, de 2002, Krause defende que na mecânica quântica os objetos devem ser tratados como não-indivíduos, logo, devemos dispor de teorias que violam o princípio de identidade dos indiscerníveis. Jaison Schinaider, doutorando da UFSC em 'Identidade relativa, predicados sortais e a Indistinguibilidade das partículas na mecânica quântica' enfatiza que os objetos quânticos devem ser tratados como entidades para as quais a noção de identidade não faz sentido. Michael Dickson, da Universidade de Indiana, em *Quantum Logic Is Alive*, publicado no periódico *Philosophy of Science,* volume 68, número 3, do biênio 2000/2001, afirma que a importância de uma lógica quântica permanece "atual". De acordo com o artigo, uma das possíveis implicações da LQ seria que a lei distributiva da álgebra booleana seja "errada", não errada para sistemas quânticos, ou no contexto das teorias físicas, mas errada em si.

composição de uma teoria dos sistemas fechados de proposições. Quando tais sistemas são formados por axiomas e enunciados que podem ser expressos por meio de um formalismo matemático consistente, que buscam explicar e prever fatos do mundo, então temos uma teoria física. Os conceitos científicos de tal teoria estão interligados e são seus blocos básicos de construção – seus núcleos semânticos elementares. Um sistema fechado de proposições, portanto, tem sua estrutura fundamental formada por uma complexa rede de conceitos. Tais sistemas, entretanto, são "fechados", de modo que seus conceitos constituintes podem perder o conteúdo semântico fora de seus limites:

> Quaisquer palavras ou conceitos que foram criados no passado, frutos da interação do homem com o mundo, não são, de fato, precisamente definidos no que se refere a seu sentido. (...) Frequentemente sabemos que eles podem ser aplicados em um domínio amplo de experiências interiores e exteriores, mas, na prática, jamais saberemos precisamente os limites de sua aplicabilidade. (...) Os conceitos poderão, todavia, ser precisamente definidos no que diz respeito às suas inter-relações. Isso é de fato o que ocorre quando os conceitos se tornam partes de um sistema de axiomas e definições que podem ser expressos consistentemente em um esquema matemático. Um tal conjunto de conceitos inter-relacionados pode vir a ser aplicável a um domínio amplo da experiência (...). Seus limites de aplicabilidade, todavia, não serão conhecidos, pelo menos completamente. (HEISENBERG. 1987, p. 72)

Para Heisenberg, portanto, conceitos não são universais. Na verdade, sequer possuem um conteúdo semântico preciso. Qualquer conceito compreende algum grau de indefinição semântica, por mínimo que seja. Quanto mais abstrato e amplo for um conceito, possivelmente maior será seu grau de indefinição semântica. Conceitos científicos fazem parte de redes de conceitos e encontram-se limitados a sistemas fechados muito bem definidos. Pode até mesmo ser que dois sistemas muito próximos compartilhem alguns conceitos, como a química e a física no caso do conceito de átomo, dentre outros. Contudo, os conceitos de química e física não podem, e de fato não são compartilhados indefinidamente por diversos sistemas.

Uma breve análise das controvérsias em torno do conceito de "massa" nos

servirá de exemplo deste problema posto por Heisenberg. Max Jammer, em *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, salienta que o conceito de massa não possui uma definição clara e única tanto na física clássica quanto na física moderna. O mesmo conceito pode inclusive sofrer variações de significado em diferentes teorias, bem como em diferentes áreas da física. Jammer conclui a obra com as seguintes palavras:

> "Temos que admitir que não obstante os esforços de físicos e filósofos, matemáticos e lógicos, nenhuma definição final do conceito de 'massa' pode ser defendida. (...) A física moderna experimentou e promoveu avanços tecnológicos espetaculares. Entretanto, ainda há questões mal resolvidas em seus fundamentos, e noções básicas de tal disciplina, tal como o conceito de massa, apresentam sérias incertezas. Tais problemas estão postos a espera de uma solução." (JAMMER. 1997, p. 224).

Marco Antônio Moreira considera os diferentes usos do conceito de massa uma "desafortunada terminologia"[14]. O conceito de massa pode ser usado em diversos sentidos – massa de repouso, massa inercial, massa gravitacional etc. – cada um das quais encontrando inconsistências mais ou menos sérias em sua definição (MOREIRA. 2001, s/p).

Heisenberg discorreu acerca dos limites de aplicabilidade dos conceitos de física clássica e considerou-os de modo bem peculiar. Embora os conceitos da física clássica não façam sentido, a rigor, no escopo da mecânica quântica, ainda assim a estrutura

[14] Em seu artigo "O Modelo Padrão da Física de Partículas" Moreira defende que a física do modelo padrão, que tem por fundamento a existência do bóson de Higgs, exigiria uma nova reformulação do conceito de massa. "Massa" seria uma propriedade intrínseca de determinadas partículas elementares que interagem com o campo de Higgs, formado por uma nuvem de bósons de Higgs (MOREIRA. 2001, s/p). O modelo padrão seria um sistema fechado de proposições e a massa no sentido em que foi exposta acima por Moreira seria um conceito aplicável somente a tal sistema. O conceito de massa no sentido de "força transportada pelo bóson de Higgs" tem no modelo padrão seu espaço semântico próprio. Os limites de tal espaço são também os limites de aplicabilidade de tal conceito. Se quisermos empregar o conceito de massa, no sentido da física de Higgs, para corpos astronômicos, por exemplo, nosso discurso será incoerente. Ao tratarmos sistemas físicos macroscópicos, como os astrofísicos, devemos trabalhar com o conceito de massa relativística, elaborado por Einstein.

conceitual da física clássica é um *a priori* "kantiano" da mecânica quântica. O discurso quântico necessita de tal estrutura para empreender a configuração de seus domínios. Ou seja, embora conceitos clássicos como espaço e matéria não possam preservar seu conteúdo semântico tradicional quando aplicados nos domínios da mecânica quântica, esta permanece empregando-os. A mecânica quântica deve lançar mão dos conceitos físicos disponíveis, mesmo que imprecisos, caso contrário, não poderá enunciar nada realmente inteligível. Parece, portanto, que Heisenberg defende que embora o "uso" dos conceitos clássicos seja indispensável ao empreendimento da mecânica quântica, devemos estar cientes que tais conceitos já não significam, nos domínios da mecânica quântica, o mesmo que significam quando empregados na física clássica. Nomes como "matéria", "energia", "espaço", "probabilidade" são preservados, porque não dispomos de outros, mas seus conteúdos semânticos são completamente transfigurados.

> No caso, é preciso, antes de tudo, sublinhar, como fez Von Weizsäcker, que os conceitos da física clássica desempenham um papel na interpretação da mecânica quântica semelhante ao que representam na filosofia kantiana, as formas de percepção *a priori*. Assim como Kant expõe os conceitos de espaço e tempo ou causalidade aprioristicamente, pois eles já constituíam as premissas de todas as experiências e, por conseguinte não poderiam ser considerados como o resultado da experiência, também os conceitos da física clássica formam uma base *a priori* para os experimentos da teoria quântica, uma vez que podemos realizar experiências no campo atômico utilizando apenas esses conceitos da física clássica. (HEISENBERG. 2006, p. 18)

Por que devemos tomar os conceitos clássicos como um *a priori* para a mecânica quântica? A criação de um léxico quântico seria um empreendimento completamente dispendioso e arbitrário. De onde partiríamos? Por fim, obteríamos um discurso incompreensível, sem a mínima referencia à experiência. Estamos a falar de "matéria", de "espaço", de "energia", embora com significados muito distintos e bem mais abstratos, cada vez mais afastados da experiência empírica imediata. Entretanto, não abandonamos tais conceitos porque estes nos orientam, e permitem que formemos concepções mentais acerca dos fenômenos quânticos. A profunda sutileza está em compreender que tais conceitos apenas nos indicam algo cujo conteúdo é totalmente

abstrato. Tais conceitos são como o portão de entrada de um novo mundo. No cerne deste, nada de familiar pode ainda ser reconhecido, e um formalismo lógico-matemático profundamente esotérico se revela. Eis o limite de aplicabilidade dos conceitos clássicos em relação à mecânica quântica: tais conceitos não podem penetrar seu núcleo sem perder totalmente seus conteúdos semânticos tradicionais. Apesar de ter versado acerca dos limites de aplicabilidade dos conceitos da física clássica, Heisenberg não fez o mesmo com os princípios da lógica clássica. Como vimos, Heisenberg defende que os princípios lógicos clássicos não são universais, mas não avança em suas investigações. Propomos que Weizsäcker desenvolveu um sistema de lógica quântica que dialoga amplamente com os problemas postos por Heisenberg, avançando nesta questão. A lógica de Weizsäcker parece ter sido elaborada tomando a noção de limites de aplicabilidade como uma estrutura *a priori* para qualquer análise das relações entre a lógica clássica e a mecânica quântica.

CONCLUSÃO

A ciência de Heisenberg foi decisiva no cenário da física contemporânea. Junto com a mecânica ondulatória de Schrodinger, a mecânica matricial foi o esforço pioneiro para a elaboração do formalismo da mecânica quântica. Alguns desenvolvimentos específicos do trabalho de Heisenberg são fundamentais e talvez necessários, como é o caso do princípio de incerteza. Nenhuma teoria física séria pós-Heisenberg pode dispensar tal princípio. Na verdade, o princípio de incerteza, como vimos, é para alguns uma propriedade ontológica do mundo, possuindo assim o *status* de lei natural: qualquer que seja o caso quântico em questão, as relações previstas pelo princípio de incerteza devem necessariamente ser levadas em conta.

Esta dissertação esforçou-se em analisar os problemas lógicos e ontológicos da mecânica quântica e até mesmo da física contemporânea em geral, com foco nas contribuições de Heisenberg. Sendo assim, pensamos poder sustentar que não somente a física, mas também a filosofia da física de Heisenberg deve ser considerada como uma das maiores contribuições para a história do pensamento contemporâneo. As interpretações filosóficas de Heisenberg são audazes e inovadoras, ao mesmo tempo em que resgatam importantes concepções da tradição filosófica. Penso que as maiores contribuições de Heisenberg para a filosofia da física possam ser contabilizadas em: (i) suas concepções ontológicas formalistas, (ii) seu racionalismo peculiar, que não ignora a grande importância do método experimental para as ciências, mas que defende a prática teórica como o motor das mesmas, (iii) o modo como interpretou problemas filosóficos importantes para as ciências naturais e aplicou à física conceitos que buscou, principalmente, na filosofia grega antiga, (iv) certas concepções acerca da relação entre o entendimento e a realidade, importantes análises epistemológicas e (v) suas investigações acerca da relação entre a lógica clássica e a mecânica quântica, que embora não tenha resolvido o problema levantado, o pôs na pauta da ciência.

A história da física pós-Heisenberg corrobora especialmente os itens (i) e (ii). O caráter extremamente formal da física contemporânea fica patente quando nos damos conta que o próprio uso da palavra "partícula" no escopo da mecânica quântica não faz a mínima referência a ideia de "corpo" ou "objeto" no sentido da linguagem comum. O conceito de partícula é uma abstração. Uma partícula elementar é um conjunto de relações descritas por equações complexas. Na linguagem comum, partículas são diminutas partes de algo. Por minúsculas que sejam, possuem propriedades empíricas

definidas, como formato, tamanho, peso, densidade. Tais propriedades podem ser mensuradas por processos empíricos ordinários ou sofisticados. Não podemos, entretanto, atribuir tais propriedades empíricas às partículas elementares. Qualquer tentativa de imaginar uma partícula subatômica como uma "bolinha" – um corpo, objeto – possuirá caráter apenas pedagógico ou lúdico, mas se levada a sério, revelará um pensamento demasiado vulgar. As partículas elementares podem ser contempladas como "coisas em si" somente se concebermos o formalismo matemático como o modo de abordagem direta de tais estruturas. Empiricamente, todavia, temos acesso somente aos seus efeitos em determinados experimentos arrojados. Nestes casos, não observamos "as" partículas, mas "como" estas interagem com nossos aparatos de mensuração. Sendo assim, em experimentos, observamos eventos de interação entre as partículas e os arranjos experimentais.

Neste sentido, é particularmente interessante analisar brevemente a história do modelo padrão e sua relação com o bóson de Higgs. O chamado modelo padrão é a teoria mais aceita e difundida da física de partículas, descrevendo os tipos, propriedades e comportamento das partículas elementares, suas interações, bem como as leis que as governam[15]. Com relação aos átomos, o modelo padrão sustenta que estes contêm núcleos compostos por prótons e nêutrons, que por sua vez são compostos por quarks. Como vimos, os quarks foram propostos como partículas imaginárias por Murray Gell-Mann, por meio de um formalismo matemático altamente abstrato. Os quarks de Gell-Mann não eram partículas de matéria, mas equações, estruturas matemáticas postas pela teoria. Por que deviam ser reais? Não porque foram observados, enfim, não por quaisquer motivos empíricos. Os quarks deviam ser reais porque eram, na visão de Gell-Mann, a melhor explicação matemática para a existência dos prótons e nêutrons. Uma

[15] O modelo padrão é uma teoria de física de partículas que busca descrever as partículas elementares e as forças fundamentais que configuram o universo. É formada por um conjunto de equações que prevêem a existência de diversas partículas, muitas já confirmadas experimentalmente. De acordo com seus defensores, como Gordon Kane, "o Modelo Padrão é, na história, a mais sofisticada teoria matemática sobre a natureza" (G. Kane, Scientific American 288(6), 56 (2003)). O modelo padrão classifica basicamente as partículas em bósons, léptons e quarks. Bósons são partículas mensageiras de forças. O fóton é o bóson da força eletromagnética, o glúon é o mensageiro da força forte – que mantém os núcleos atômicos unidos -, os bósons W e Z são mensageiros da força fraca, responsável pelos fenômenos radioativos. O recém-descoberto bóson de Higgs também seria um "mensageiro", transportando massa às demais partículas. Moreira esclarece que o modelo padrão explica também a existência dos hádrons: "De acordo com o Modelo Padrão, *léptons e quarks* são partículas verdadeiramente elementares, no sentido de não possuírem estrutura interna. Partículas que têm estrutura interna são chamadas de *hádrons*; são constituídas de quarks: *bárions* quando formadas por três quarks ou três antiquarks, ou *mésons* quando constituídas por um quark e um antiquark" (MOREIRA. A. M. Rev. Bras. Ensino Fís. vol.31 no.1 São Paulo Apr. 2009). O *mésom* foi previsto teoricamente por Yukawa, Nobel japonês, vindo a ser verificado experimentalmente bom tempo depois por físicos experimentais, dentre os quais o brasileiro César Lattes.

questão fundamental de lógica dedutiva. Posto que prótons e nêutrons de fato existem, os quarks "devem" existir. Caso contrário, não podemos explicar a existência destes. Anos depois da teoria, físicos experimentais verificaram a existência destas partículas elementares.

Este exemplo ilustra a concepção de Heisenberg de que o motor principal da ciência está no poder criativo e preditivo da teoria. Outro caso tão ou mais importante é ainda mais incisivo: mesmo com a descoberta dos quarks e de outras partículas elementares, o modelo padrão permanecia incompleto. Sabia-se que devia existir uma partícula (ou campo) ainda não descoberta. Caso contrário, nada poderia explicar por que as demais partículas elementares possuem massa. Esta partícula faltante devia ser justamente a responsável por atribuir massa às demais. Foi então que Peter Higgs propôs a existência de uma partícula, um bóson, desenvolvendo uma teoria de acordo com a qual esta partícula outorgava massa à matéria. O bóson de Higgs, assim como os quarks de Gell-Mann, nasceu como uma partícula imaginária, uma estrutura matemática puramente teórica. Da correção de tal teoria dependia todo o modelo padrão, e, portanto, grande parte da física de partículas contemporânea. Se a teoria de Higgs fosse incorreta, então toda a física de partículas baseada no modelo padrão deveria ser reformulada, abrindo uma imensa lacuna no cerne da ciência atual e propiciando o ambiente adequado para o desenvolvimento de teorias concorrentes.

A teoria do bóson de Peter Higgs abriu caminho para uma corrida global em busca de tal partícula. Ao longo das últimas cinco décadas milhares de físicos experimentais trabalharam dia e noite na tentativa de indícios experimentais da existência do bóson de Higgs. A física experimental necessitou do trabalho de todos estes cientistas, de bilhões de dólares de fomento à pesquisa, das máquinas mais poderosas e complexas que a engenharia mecânica já construiu, para verificar experimentalmente o que a física teórica antecipou em cinquenta anos por meio da teoria pura – a teoria desenvolvida pela razão de um pioneiro e seus colaboradores. Mais uma vez a história da física endossou a concepção de Heisenberg: embora teoria e experiência se complementem sendo aspectos interligados e indispensáveis para a ciência, a teoria é o motor fundamental, posto que por meio do formalismo teórico podemos contemplar estruturas inobserváveis pela prática experimental. No exemplo do bóson de Higgs, tais partículas não constituem inobserváveis absolutos - foram não-observadas por cinquenta anos, revelando esta diferença peculiar de alcance entre a prática teórica e experimental: A teoria desvelou os bósons cinco décadas antes que os

maiores experimentos da história da física pudessem fazê-lo.

A descoberta de fortes indícios da existência de tal bóson pode ilustrar outra peculiaridade do pensamento de Heisenberg: o uso que fez dos conceitos aristotélicos de forma e substância. Heisenberg defende que o nível formal é ontologicamente fundamental. Isto quer dizer que, estruturas matemáticas são realmente elementares, e as partículas materiais são apenas efeitos destas. A forma, entretanto, não dispensa a substância: o mundo físico se constitui a partir da união de ambas. Se sem forma não há substância, sem substância temos um mundo totalmente abstrato formado apenas por estruturas matemáticas. Para que existam corpos materiais é preciso que forma e substância se completem. Podemos interpretar as partículas elementares como estruturas matemáticas, formas puras. Para que estas se tornem corpos materiais, todavia, devem receber a massa/substância transportada pelo bóson de Higgs. No modelo padrão as partículas elementares não possuiriam massa caso os bósons de Higgs não existissem. Se este fosse o caso, nenhuma estrutura material teria se formado, do átomo de hidrogênio, o mais simples, aos mais complexos superaglomerados de galáxias.

O bóson de Higgs completa o modelo padrão, fazendo-o "funcionar" como a mais viável teoria de física de partículas. Sem o bóson, o modelo padrão seria incompreensível, revelando um mundo "caprichoso", sem explicação. A ideia é que as teorias expressam fatos, são modelos de como tais fatos realmente funcionam. Teorias com lacunas ou elementos arbitrários são totalmente indesejáveis, pois não revelam a ordem que "desejamos" contemplar na natureza. Podemos relacionar o chamado modelo padrão com bóson de Higgs com o ideal de ordem central presente no pensamento de Heisenberg. O modelo padrão torna a natureza compreensível, revelando uma profunda ordem no universo, responsável pela formação das estruturas físicas. Deste modo, não há na natureza nada mais elementar do que a ordem. O fundamento do mundo não é a substância que lhe dá corpo, mas o *nomos,* a ordem que configura tal substância. Nas palavras de Heisenberg, no fundamento último da realidade não encontramos corpos, estruturas materiais, mas leis, estruturas matemáticas – as leis da natureza, a ordem central.

Tais reflexões são de ordem ontológica. Visam responder questões do tipo "O que é o mundo? Do que é composto? Como se estrutura? O que é ontologicamente fundamental?". Todavia, o pensamento de Heisenberg é importante também para questões de história da ciência, epistemologia e lógica. Com relação à história da ciência Heisenberg rompeu com a interpretação convencional de que a ciência moderna

nasceu com a física de Galileu, o que se deve ao fato de este ter unido a prática teórica à experimental. Heisenberg situou a origem da ciência entre os filósofos gregos antigos, citando as duas grandes fontes filosóficas constituintes do pensamento científico: o formalismo matemático de Pitágoras e do *Timeu* de Platão de um lado, e o atomismo de Leucipo de Demócrito de outro. Para a epistemologia contemporânea é particularmente importante a interpretação que Heisenberg faz da filosofia kantiana. A ciência consiste não em uma descrição de como a natureza de fato é e funciona, mas do modo como o entendimento humano apreende e se relaciona com a natureza. Não expomos a realidade, expomos a compreensão que temos dela. Esta teoria do conhecimento é característica do anti-realismo da interpretação de Copenhagen, de acordo com o qual não faz sentido falarmos de um mundo objetivo sem fazermos referência aos sujeitos que o observam.

A epistemologia de Copenhagen de Heisenberg se fundamenta, de certo modo, numa assunção do pensamento kantiano como via para a compreensão do empreendimento científico, respondendo concomitantemente duas questões fundamentais: "Quais são os limites do conhecimento?" e "O que é a ciência?". Os limites do conhecimento são postos pela incognoscibilidade da natureza em si. Dado que a coisa em si é incognoscível, a ciência não pode ser uma descrição da natureza, mas apenas uma representação, não constituindo um discurso acerca da natureza em si, mas um conjunto de modelos que expressam níveis da compreensão humana. Todavia, tal epistemologia parece não estar bem acabada. Primeiro não fica claro por que Heisenberg considera a "natureza em si" incognoscível. Segundo, Heisenberg parece contradizer-se, dada a defesa que faz do formalismo matemático como modo de compreensão dos fundamentos ontológicos do mundo – portanto, do mundo em si.

Entretanto, pensamos que tal problema não seja de difícil solução. Vimos que, de acordo com Heisenberg, o nível mais profundo de realidade, nível elementar, que sustenta todo o real, é composto por estruturas matemáticas puras fundamentais. Heisenberg chama este nível de "ordem central". A ordem central, todavia, não pode ser totalmente compreendida pela razão humana, mas isto não significa que seja de todo inacessível a qualquer abordagem. O homem pode ter a experiência da ordem central, não somente por meio da ciência, como também pelas vias da arte, da literatura e da filosofia. O homem não compreende totalmente a ordem central, mas a sente, percebe, intui, vislumbra, e por ela é modificado. Na visão de Heisenberg, o formalismo matemático, sobretudo da mecânica quântica, é tal como uma rede de Novalis, que

chega a tocar a ordem central, e que se não a apanha por completo, nos traz vestígios dela, vestígios não capturados por nenhuma outra rede já lançada pela ciência. Em suma, a ordem central é incognoscível porque de um nível totalmente abstrato, muito além do que podemos apreender. Todavia, a ordem central é incognoscível, mas não inacessível, sendo parcialmente contemplada por diferentes modos do espírito. O formalismo científico, por sua vez, seria o móvel mais eficiente de que dispomos para tal apreensão.

Um dos problemas postos por Heisenberg, mais instigante e de difícil solução, é a questão que levantou acerca da inaplicabilidade da lógica clássica ao sistema fechado de proposições de mecânica quântica. Lembremos que, de acordo com Heisenberg, a mecânica quântica revela que a lógica clássica ou está incompleta, de modo que deveria ser finalizada, ou é incorreta, caso em que deveria ser modificada. O exemplo mais forte dado por Heisenberg é o caso do princípio do terceiro excluído, que seria violado por enunciados quânticos simples. Neste tópico, o pensamento de Heisenberg é realmente forte, diríamos radical. Seja qual for o caso, o que o físico-filósofo está a propor é que a lógica clássica não é universal. Seus princípios não são válidos no escopo da mecânica quântica, uma vez que as proposições acerca de fatos quânticos não podem ser enunciadas sem que tais princípios sejam violados.

Os exemplos dados pelo pensador são contundentes e sólidos, tanto que, motivados ou não por Heisenberg, mas quase que pelos mesmos motivos, muitos autores chegaram a conclusões parecidas, iniciando na ciência pós-Heisenberg uma tradição de pesquisa em lógica quântica. Atualmente ainda há muitas propostas e interpretações concorrentes do que poderia ser um sistema de lógica propriamente quântico, não havendo nenhum consenso. O campo de investigações permanece aberto, talvez povoado, ainda, mais por lacunas do que por soluções. O próprio Heisenberg não ofereceu respostas razoáveis para as questões levantadas. Seu diálogo maior foi com Weizsacker. Este, por sua vez, tentou elaborar um sistema formal de lógica quântica, de acordo com o qual há um limite de aplicabilidade de princípios lógicos. Princípios de lógica clássica não se aplicam ao sistema fechado de proposições da mecânica quântica tanto quanto princípios de lógica quântica não se aplicam ao sistema fechado de proposições da mecânica clássica. Na verdade, a relação entre princípios de lógica quântica e lógica clássica não é tão simétrica quanto a definição anterior pode sugerir. Os princípios da lógica clássica não se aplicam apenas aos enunciados de mecânica quântica, sendo válidos, não somente para proposições acerca de fatos de mecânica

clássica, como também para quaisquer outros fatos ordinários – não científicos – desde que não sejam quânticos. Já os princípios da lógica quântica são válidos apenas para os enunciados acerca de fatos quânticos, não sendo válidos para quaisquer outros enunciados.

Defendemos que a lógica de Copenhagen elaborada por Karl von Weizsacker estabelece um diálogo direto com os problemas postos por Heisenberg. A lógica clássica não é universal. Todavia, isto não significa que seja incompleta nem incorreta, como aventou Heisenberg. Um sistema lógico é completo e correto, não quando universal, mas quando seus princípios são válidos e invioláveis para todos os casos abarcados por seu limite de aplicabilidade. O sistema fechado de proposições de mecânica quântica se situa "fora" dos limites de aplicabilidade da lógica clássica, logo, enunciados acerca de casos quânticos não violam princípios de lógica clássica, não implicando, deste modo, nem a incompletude, nem a incorreção destes. Para os enunciados quânticos, devemos dispor de princípios específicos de lógica quântica. Talvez devêssemos chamar um dos mais importantes princípios da lógica quântica de princípio de "inclusão do terceiro". De acordo com Weizsacker, para uma proposição "E = m" não temos dois valores de verdade, F e V, mas três, F, V, e I, sendo F= falso, V = verdadeiro e I = indeterminado.

A despeito do valor de todas as concepções filosóficas de Heisenberg, ao menos três questões nos pareceram inconclusas, não tendo sido resolvidas pelo físico filósofo, carecendo de maiores investigações:

(i) Seu anti-realismo é uma concepção científica de mundo negativa, não positiva. Nega o realismo, mas o que afirma? Sua ontologia anti-realista parece dinamitar o fisicalismo materialista, bem como o realismo científico convencional, de acordo com o qual o mundo existe de modo objetivo, independente de ser observado. Ao defender que este realismo não faz sentido, porque qualquer discurso acerca de um mundo objetivo pressupõe necessariamente um observador, sujeito do discurso, Heisenberg nega o realismo, mas parece não substituí-lo por nada verdadeiramente sólido. Propor um anti-realismo é negar a viabilidade do realismo, mas não é, a rigor, afirmar uma nova teoria do mundo. Heisenberg busca preencher esta lacuna, desenvolvendo uma ontologia formalista, apostando na força das estruturas matemáticas como o nível que gera e sustenta a realidade. Todavia, se está claro que esta ontologia formalista é incompatível com sistemas realistas e materialistas, não está claro se podemos coadunar tal ontologia com interpretações idealistas da mecânica quântica.

Algumas questões inquietantes permanecem, e não nos esqueceremos facilmente de suas implicações: a ontologia formalista de Heisenberg, afinal, poderá ser a aplicação do idealismo platônico à física contemporânea?

(ii) Heisenberg, como vimos, propõe que a lógica clássica é incompatível com o sistema fechado de proposições da mecânica quântica. Acena com duas possibilidades: Ou bem a lógica clássica é incorreta, ou bem é incompleta. Heisenberg, contudo, não desenvolve um sistema de lógica quântica. Vários sistemas foram propostos, como os de Neumann e Birkhof, e mais recentemente os de Omnès e Dixon, contudo o sistema que mais dialogou com os problemas postos por Heisenberg foi chamado de "Lógica de Copenhagen" por seu criador, Carl von Weizsacker. A lógica quântica de Weizsacker responde realmente aos problemas levantados por Heisenberg? O sistema de Weizsacker pode ser considerado atual, face os desdobramentos sofridos pela mecânica quântica pós-Heisenberg?

(iii) A ontologia formalista de Heisenberg possui como fundamento o conceito de ordem central. A ordem central é o núcleo sintético máximo que sustenta toda a realidade. O conceito de ordem central, contudo, não é somente um conceito ontológico, mas também estético. Como vimos neste trabalho quando tratamos da relação entre Heisenberg e Goethe, a ordem central encerra o nível mais profundo do belo.

Como o conceito estético de beleza pode ser considerado fundamental para uma concepção científica de mundo?[16] Qual nível de realidade Heisenberg considera como o nível fundamental? O nível puramente matemático da ordem central. O núcleo ontológico do mundo não possui nenhuma substância, nenhum formato. É composto por relações puramente abstratas, convencionalmente chamadas de relações matemáticas. Quanto pesa uma lei da natureza? Onde se localiza? Em que tempo dura? Quantas perguntas forem feitas deste tipo, tantas serão as negativas decorrentes. Nada que possa ser atribuído à matéria, ou mesmo ao mundo empiricamente conhecido, pode servir de definição para uma lei natural.

Leis da natureza se deixam conhecer empiricamente somente de modo muito indireto. Vemos um corpo qualquer despencar no espaço. Pensamos neste momento

[16] Na teoria do mundo das ideias de Platão há a noção de que o verdadeiro (as ideias) é também perene, belo (posto que perfeito, "claro", cristalino) e bom. Em Platão, as ideias de verdade, bem e belo formam a trilogia fundamental do mundo das ideias. Em suma, a verdade é bela. O mundo da ilusão, passível de corrupção, posto que imperfeito, também é, por consequência, o nível de realidade no qual ocorre o fenômeno da fealdade. O "feio", sendo assim, é a degradação do belo, ou o "imperfeito". Degradação, porque os objetos físicos são meros reflexos das ideias perenes. Lembremos que Heisenberg foi leitor de Platão desde a juventude. Em muitos momentos Heisenberg deixa claro que recorre a conceitos platônicos para pensar determinadas questões da ciência contemporânea.

enfaixar em nossas mãos a gravidade, mas o que vimos foi somente um pequeno efeito de uma ordem que determina o mundo. A "gravidade em si" nunca contemplamos empiricamente, mas apenas sua ação no mundo. A lei da gravidade se apresenta ao homem tão somente ao seu intelecto, quando em equações e enunciados o espírito apreende que há no mundo uma ordem transcendental, que ultrapassa qualquer evento particular, que não se localiza especificamente em nenhuma coordenada do espaço, e que tão pouco se limita a "regiões" específicas do tempo. Uma ordem abstrata descrita pelo intelecto por meio de um formalismo esotérico. A ordem é perfeita, simétrica, universal, transcendental, logo, bela. Neste sentido, o conceito de beleza não expressa nenhuma conotação sensual. Beleza, de fato, nos remeterá, então, ao conceito de elegância, e este, ao de simplicidade. As leis da natureza são elegantes por expressarem de modo simples e econômico a ordem central.

As teorias científicas são belas, ou seja, "elegantes", na medida em que são simples, econômicas e fecundas. Uma teoria é fecunda não somente quando é eficiente e clara em explicar fatos conhecidos, mas quando se revela promissora na predição de fatos novos. Notamos a vitalidade do ideal de simplicidade e economia que guiam o pensamento científico desde Guilherme de Ockham. A importância do programa "econômico" na ciência foi pouco antes de Heisenberg retomada por Ernest Mach. As teorias científicas são belas na medida em que por meio de sistemas formais lógico-matemáticos simples e econômicos "expressam" a própria elegância da natureza, manifestação perfeita da ordem central.

Não podemos deixar de notar a forte posição metafísica desta proposta. Não parece haver necessidade alguma de que as coisas se passem deste modo. De certa forma parece absolutamente arbitrário atribuir às leis naturais qualidades como beleza, simplicidade, elegância, atribuir à natureza uma espécie de "intenção" de economia. Tais qualidades parecem depender muito de referenciais humanos, estritamente pessoais, e especificamente estéticos. Todavia, foi justamente cultivando tais ideais, vivificando tal metafísica, que não somente Heisenberg, mas a física contemporânea como um todo, elevou o patamar da ciência a níveis que nossos antepassados sequer poderiam imaginar.

A ideia de que há ordem na natureza é um ideal filosófico que guia o pensamento científico ocidental desde os pré-socráticos. O vemos em Galileu, Newton, Einstein, para citar alguns exemplos. Contudo, o ideal de ordem é na verdade uma característica do empreendimento científico em geral. Se não há ordem no mundo, não

há lei, não há regularidade, os processos naturais não podem ser compreendidos e nem previstos, e, portanto não há ciência. Entretanto, como pensou Kant, a ordem é uma característica da natureza ou do entendimento? Desvelamos a ordem do mundo, ou projetamos ordem no mundo?

Assim é o entendimento. Pequeno veleiro a deslizar num infinito oceano de mistério. Como um grande pensador Heisenberg parece ter iluminado múltiplas possibilidades de caminhos para o pensamento. Alguns destes caminhos Heisenberg desbravou como um pioneiro, abrindo estrada na mata densa e permitindo que pudéssemos seguir seus passos firmes. Outros, todavia, foram apenas vislumbrados, mas permaneceram intocados ou muito pouco explorados. Desejamos percorrer alguns destes caminhos. Que esta dissertação tenha sido pelo menos o primeiro passo.

BIBLIOGRAFIA

1.1. Obras de Werner Heisenberg

HEISENBERG, W. *A Imagem da Natureza na Física Moderna.* Lisboa: Livros do Brasil, 1981.

_____. *A ordenação da realidade*: *1942.* Tradução de Marco Antônio Casanova. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2009.

_____. *A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política.* Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

_____. *Física e filosofia*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1987.

_____. *Más Allá de La Física.* Madri: Editorial Católica, S. A., 1974.

_____. *Nuclear Physics.* London: Methuen & CO. LTD.,1953.

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

_____. *Philosophic problems of nuclear science.* New York: Philosophical Library, 1952.

1.2. Bibliografia secundária

BACHELARD, G. *A experiência do espaço na física contemporânea.* Trad. Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 2010.

BACHELARD, G. *Estudos.* Trad. Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 2008.

BACHELARD, G. *O novo espírito científico.* Trad. Juvenal Hahne Jr., Lisboa: Edições 70, 1996.

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

BELLER, M. (The Rethoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit). *Philosophy of Science*, 63, p.p.183-204, 1996.

BENJAMIM. C. *Dicionário de biografias científicas.* Rio de Janeiro: Contraponto, 2007.

BOHM, D; PEAT, D. *Ciência, ordem e criatividade*. Lisboa: Gradiva, 1989.

BOHR, N. *Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

BORN, M; AUGER; SCHRÖDINGER, E; HEISENBERG, W. *Problemas da Física Moderna.* Trad. Gita. K. Guinsburg. São Paulo: Perspectiva: 2006.

BROGLIE, L. *O Futuro da Física* in *Para Além da Ciência.* Trad. Eduardo Pinheiro. Porto: Livraria Tavares Martins, 1955.

BULCÃO, M. *O Racionalismo da Ciência Contemporânea.* Aparecida: Ideias e Letras, 2009.

CARUSO, F & OGURI, V. *Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos.* Rio de Janeiro: Editora Campus, 2006.

CHIBENI, S. (Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg). *Rev. Bras. Ensino Fís*. vol.27 no.2 São Paulo Apr./June 2005.

CUSHING, J. T. *Philosophical Concepts in Physics.* Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

DAVIES, P. *O enigma do tempo.* Trad. Ivo Korytowski. Rio de Janeiro: Ediouro, 2000.

DESCARTES, R. *Meditações Metafísicas*. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

DICKSON, M. "Quantum Logic Is Alive". *Philosophy of Science*. Vol.68, no.3, 2001.

EINSTEIN, A. *Como eu vejo o mundo.* Trad. H. P. de Andrade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

EINSTEIN, A. (Induction and deduction in physics). *Sci. stud*. vol.3 no.4 São Paulo Oct./Dec. 2005. Tradução do alemão, de A. M. Adam para o *Journal for General Philosophy of Science*, 31, p. 34-5, 2000.

EINSTEIN, A. *Sobre a teoria geral da gravitação:* in Prêmios Nobel na Scientific American. São Paulo: Duetto, 2010.

EINSTEIN, A; INFELD, L. *A Evolução da Física.* Trad. Giasone Rebuá. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1980.

FEYNMAN, R. P. *Física em 12 lições.* Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

FEYNMAN, R. P. *O que é uma lei física?* Lisboa: Gradiva,1989.

FRAASSEN, B. C. V. *The Scientific Image*. Oxford: Oxford University Press, 1980.

FRAASSEN, B. C. V. *A Imagem Científica*. Trad. de Luiz Henrique de Araújo Dutra. São Paulo: Editora UNESP / Discurso Editorial, 2007.

FREGE, G. *Os fundamentos da Aritmética,* in *Frege,* Col. Os Pensadores. São Paulo: Nova Cultural, 1989.

GELL-MANN, M. *O Quark e o Jaguar*: As Aventuras no Simples e no Complexo. Rio de Janeiro: Rocco, 1996.

GOMES, P. T. (As leis das estrelas) in *Filosofia Especial*. Ano I. N°. 3. São Paulo:

Editora Escala, 2007.

GOSWAMI, A. *O Universo autoconsciente.* Rio de Janeiro: Aleph, 2006.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. (Uma proposta para o ensino de mecânica quântica). *Rev. Bras. Ensino Fís.* 2001, vol.23, n.4, pp. 444-457.

GREENE, B. *O Universo Elegante.* São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

GUITON, J; BOGDANOV, G; BOGDANOV, I. *Deus e a Ciência.* Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1992.

HAWKING, S. *O Universo numa casca de noz.* Trad. Ivo Korytowski. São Paulo: Arx, 2001.

HAWKING, S. *Uma nova história do tempo.* Trad. Vera de Paula Assis. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

HAWKING, S; MLODINOW, L. *O Grande projeto.* Trad. Mônica Gagliotti Fortunato Friaça. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2011.

HEMPEL, C. G. *Filosofia da Ciência Natural.* Trad. Plínio Sussekind Rocha. Rio de Janeiro: Zahar editores, 1974.

JAMES, W. *Pragmatismo.* São Paulo: Martin Claret, 2005.

JAMMER, M. *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics.* New York: Dover Publications, Inc., 1997.

JAMMER, M. *Concepts of Space:* The History of Theories of Space in Physics. New York: Dover Publications, Inc., 1997.

JEANS, J. H. *Através do Espaço e do Tempo.* Trad. Dr. Pedro da Silva Dantas. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1948.

JEANS, J. H. *O Universo em que vivemos.* Trad. Waltensir Dutra. Rio de Janeiro: Zahar Editôres, 1962.

JEANS, J. H. *O Universo Mysterioso.* Trad. J. de Sampaio Ferraz. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1944.

JEANS, J. H. *Physics and Philosophy*. New York: Dover Publications, Inc., 1943.

KAKU, M. *Hiperespaço.* Rio de Janeiro: Rocco, 2000.

KANT, I. *Crítica da Razão Pura.* Trad. de Valério Rohden e Udo Baldur Moosburger. 3. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1987 - V. II (In: Coleção - Os Pensadores n. 25).

KANT, I. *Crítica da Razão Pura. Fundação*. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1994.

KRAUSE, D; French, S. (Quantum sortal predicates). *Synthese* 154 (3), 417-430. 2007.

KRAUSE, D. (Axioms for collections of indistinguishable objects). *Logique et Analyse* 153-154, Mars-Juin, 69-93. 1996.

KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas.* Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Editora Perspectiva, 1987.

LEITE, A; SIMON, S. (Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica). *Sci. stud.* vol.8 no.2 São Paulo Apr./June 2010.

LIMA, L.B; LAVOR, C. (Representação geométrica de ruídos quânticos). Anais do *III Workshop – Escola de Computação e informação quântica.* Petrópolis: LNCC, 2010.

LOSEE, J. *Introdução histórica à Filosofia da Ciência.* Trad. Borisas Cimbleris. São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1979.

MARQUES, G. C (Org.). *A Física no Brasil na próxima década:* Física Nuclear, Física de Partículas, Projetos Interdisciplinares. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 1990.

MOREIRA, A. M. Rev. Bras. Ensino Fís. vol.31 no.1 São Paulo. 2009.

NEWTON, I. *Principia*: Princípios Matemáticos da Filosofia Natural. Trad. Trieste Ricci. São Paulo: Nova Stella / EDUSP, 1990.

NOVELO, M. *Do Big Bang ao universo eterno.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2010.

OMNÈS, R. *Filosofia da Ciência Contemporânea.* Trad. Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 1996.

OSTERMANN, F; PRADO, S, D. (Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro de Mach-Zehnder). Rev. Bras. Ensino Fís. Vol.27 no.2. São Paulo. Apr/June. 2005.

PAIS, A. *Sutil é o Senhor*: a ciência e a vida de Albert Einstein. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

PIA, M.G; BASAGLIA, T; BELL, Z. W; DRESSENDORFER, P.V. (The impact of Monte Carlo simulation: a scientometric analysis of scholarly literature). Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010). Tokyo. 2010.

PIA, M.G; BEGALLI, M; LECHNER, A; QUINTERI, L; SARACCO, P. (Physics-related epistemic uncertainties in proton depth dose simulation). Cornell University Library. 2010.

PIZA, A. *Schrödinger e Heisenberg: A física além do senso comum*. São Paulo: Editora Odysseus, 2007.

PLATÃO. *A República*. São Paulo: Martin Claret, 2002.

PLATÃO. *Timeu e Crítias*. Curitiba: Hemus, 2002.

POINCARÉ, J.H. *A Ciência e a Hipótese.* 2. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1984.

POINCARÉ, J.H.. *O Valor da Ciência.* 1. ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

POPPER, K. *Conjecturas e refutações.* Coimbra: Almedina, 2000.

POPPER, K. *Pós-Escritos à Lógica da descoberta científica.* Vol 3. A Teoria quântica e o cisma na física. Lisboa: Dom Quixote, 1992.

POPPER, K. *A Lógica da pesquisa científica***.** Trad. Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Costa. São Paulo: Cultrix, 2004.

PORTO, C.M. (A física de Aristóteles: uma construção ingênua?) *Rev. Bras. Ensino Fís*. vol.31 no.4 São Paulo Oct./Dec. 2009.

ROSA, L. P. *Revoluções da física e teorias do conhecimento científico.* n/p.

RUSSEL, B. *Ensaios Céticos.* Trad. Wilson Velloso. Rio de Janeiro: Editora Opera Mundi, 1970.

RUSSEL, B. *História da Filosofia Ocidental.* Trad. Brenno Silveira. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1968.

SCHEIBE, E. *Die philosophie der physiker*. München: Beck´schen Reihe, 2007.

SCHRÖDINGER, E. *A Natureza e os Gregos:* seguido de *Ciência e humanismo*. Lisboa: Edições 70, 1996.

SCHRÖDINGER, E. *Mi concepción del mundo.* Barcelona: Tusquets Editores, 1988.

SCHRÖDINGER, E. *O que é a vida? Espírito e matéria.* Trad. M. L. Pinheiro. Lisboa: Fragmentos, 1989.

SIMON, S; MORAES, A. (O empirismo construtivo de Bas C. Van Fraassen e o problema do sucesso científico). *PHILÓSOPHOS* 12 (2): 131-169, jan./jun. 2007.

TUGENDHAT, E; WOLF, U. *Propedêutica Lógico-Semântica.* Petrópolis: Editora Vozes, 1997.

VEDRAL,V. "A Vida em um Mundo Quântico", in *Scientific American* n° 110. São Paulo: Duetto, 2011.

WARNOCK, G. J. *Berkeley.* Baltimore: Pelican Books, 1953.

WEIZSÄCKER, C. *La importancia de La ciencia.* Barcelona: Editorial Labor, S, A., 1972.

WEIZSÄCKER, C. *La imagem física del mundo.* Madri: Editorial Católica, S. A., 1974.