Parte III - Implicações culturais e educacionais da teoria quântica

Os princípios de complementaridade e de incerteza na obra *Copenhagen* de Michael Frayn: a arte e a teoria quântica

Alessandro Frederico da Silveira
Aurino Ribeiro Filho
Ana Paula Bispo da Silva

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Os princípios de complementaridade e de incerteza na obra *Copenhagen* de Michael Frayn: a arte e a teoria quântica

Alessandro Frederico da Silveira

Aurino Ribeiro Filho

Ana Paula Bispo da Silva

1 Introdução

A obra *Copenhagen*, escrita em 1997 pelo escritor Michael Frayn, situa-se em tempo e lugar desconhecidos. São três os personagens principais: Niels Bohr, Werner Heisenberg e Margrethe Norlungue, esposa de Niels Bohr. Os personagens estão mortos e relembram, ora no mesmo ambiente, ora em ambientes diferentes, o que Bohr e Heisenberg conversaram em um encontro real realizado entre os cientistas em 1941, em Copenhagen, Dinamarca, na casa de Bohr. A conversa oscila entre dois assuntos principais: os princípios de incerteza e complementaridade e a questão nuclear. (DÖRRIES, 2005; FRAYN, 2000; SHEPHERD-BARR, 2006)

Quando o encontro ocorreu, em outubro de 1941, Heisenberg, professor de Física Teórica na Universidade de Leipzig, liderava o programa alemão para investigar a possibilidade de fabricação de uma bomba atômica. Nesse período, a Alemanha nazista já havia ocupado a Polônia, Bélgica, Holanda, Noruega, parte da França e a Dinamarca, onde Bohr se encontrava, isolado em sua casa. Heisenberg estava em Copenhagen para participar de um seminário no Instituto Cultural Alemão e foi convidado por Bohr para jantar em sua casa. (DÖRRIES, 2005) Como costumeiramente acontecia nos encontros de Bohr, os dois saíram para uma caminhada para conversar, porém, pouco se sabe sobre o que conversaram. (ABDALLA, 2006; HEISENBERG, 1995; MARTINS, 2006a)

Durante os anos de 1925 a 1927, Niels Bohr (1885-1962) e Werner Heisenberg (1901-1976) haviam trabalhado juntos em Copenhague, desenvolvendo dois dos princípios fundamentais formadores da chamada Interpretação de Copenhague, que negava a possibilidade de descrições causais microscópicas, semelhantes às da Física clássica, para os fenômenos quânticos, o princípio de incerteza e o da complementaridade. (MARTINS, 2006b)

Em 1927, Heisenberg havia chegado às relações de incerteza, baseado principalmente no papel do experimento na Teoria Quântica e no formalismo para descrever os fenômenos. (JAMMER, 1974, p. 63) Porém, as bases conceituais sobre as quais o princípio de incerteza foi estabelecido não agradaram a Bohr, apesar de ele concordar com as conclusões a que Heisenberg chegava em sua formulação. Este fato acabou gerando uma controvérsia entre os dois físicos.

A posição de Bohr estava baseada principalmente no fato de que as relações de incerteza limitavam a aplicabilidade das noções clássicas de posição ou *momentum* ao caso da microfísica. Além disso, havia as diferentes opiniões sobre o papel do formalismo matemático nas explicações físicas. Para Bohr, a explicação física precede o formalismo matemático, enquanto que para Heisenberg o formalismo matemático é que descreve o que ainda será observado.

Neste trabalho, apresentaremos os elementos de História da Mecânica Quântica presentes na peça; em particular, exploramos as ideias dos princípios da complementaridade e da incerteza, discutidas pelos personagens.

2 O princípio de incerteza

A questão da incerteza de Heisenberg diz respeito ao processo intrínseco de medida e expressa o fato de que sempre existe uma interação não determinável entre o observador e o que é observável (BOHR, 1928; GUIMARÃES, 1996; ROBERTSON, 1929) e que, segundo Heisenberg, não podemos fazer nada para evitar esta interação ou corrigir os seus efeitos. (GUIMARÃES, 1996) No melhor dos casos sempre haverá uma imprecisão ou, mais exatamente, *incertezas* devidas não à imperfeição das medidas efetuadas, mas à natureza intrínseca da matéria.

Uma forma de expressar o citado princípio se refere às tentativas de medir a posição e o *momentum* de um objeto quântico simultaneamente. Especificamente, se, por exemplo, tratamos de localizar muito precisamente um elétron, somos forçados a renunciar à informação sobre seu *momentum*. Reciprocamente, podemos medir o *momentum* do elétron com muita precisão, mas então sua posição fica indeterminada. (HEISENBERG, 1927, 1949; MENESES, 2008a)

Heisenberg se dedicou a mostrar que embora para cada conceito mecânico tomado *individualmente* não haja, nem mesmo no domínio quântico, falta de experimentos capazes de lhe conferir legitimidade física, a *quantização* característica desse domínio impede que a posição e o *momentum* possam ser determinados experimentalmente, *ao mesmo tempo* com precisão ilimitada. Para isso, em seu trabalho de 1927, introduz o famoso experimento de pensamento do microscópio de raios gama, para ilustrar a origem física do princípio da incerteza. (CHIBENI, 2005; GUIMARÃES, 1996; HEISENBERG, 1927, 1949; ROSENFELD, 1971 apud WHEELER; ZUREK, 1983)

Após seus estudos, Heisenberg chega à relação apresentada a seguir e

[...] contrariamente ao que ocorre na mecânica de Newton, não se pode medir simultaneamente aquelas grandezas com alta precisão arbitrariamente. De fato, o produto das duas imprecisões, em suas medidas, resultou não ser menor que a constante de Planck [...]. (HEISENBERG, 1999, p. 63)

$$\delta x \delta p_x \geq h$$

em que δx é a incerteza da posição na direção x e δp_x é a incerteza no momentum final da partícula ao longo da direção x .

Pode-se dizer que tudo se passa de forma que, quanto mais precisamente se medir uma grandeza, forçosamente mais será imprecisa a medida da grandeza correspondente, chamada de canonicamente conjugada. (BOHR, 1928; FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 1987; ROBERTSON, 1929)

Desta maneira, o princípio de incerteza também está relacionado com a medida da energia E e do tempo t necessário à medida, como, por exemplo, o intervalo de tempo δt durante o qual um fóton com incerteza na energia δE é emitido de um átomo. Neste caso,

$$\delta E \delta t \geq h$$

em que δE é a incerteza no nosso conhecimento da energia E de um sistema e δt é o intervalo de tempo característico da rapidez com que ocorrem as mudanças no sistema.

Outra leitura que se pode fazer do princípio de incerteza é que existe uma complementaridade posição-momentum. Podemos escolher medir a posição de uma partícula, em cujo caso seu *momentum* é incerto ou podemos medir o *momentum* e abandonar o conhecimento de sua posição. Cada uma das propriedades - posição e *momentum* - constitui um aspecto complementar do objeto

quântico. (HEISENBERG, 1999) Se conhecermos uma dessas grandezas com alta precisão, a outra não poderá ser conhecida do mesmo modo; mesmo assim, precisamos conhecer ambas as imprecisões, a fim de determinar o comportamento do sistema.

Bohr elevou essas ideias à categoria de princípio: o da complementaridade. Na dualidade onda-partícula, por exemplo, as propriedades ondulatória e corpuscular de um objeto quântico constituem aspectos complementares de seu comportamento. Ele argumentou que não deveríamos encontrar nunca experimentos em que estes dois comportamentos diferentes entram em conflito entre si. (HEISENBERG, 1999)

3 O princípio de complementaridade

Bohr apresentou as suas ideias sobre a complementaridade pela primeira vez em um Congresso na cidade de Como, na Itália, em comemoração ao centenário da morte de Alessandro Volta, no outono de 1927. (BASTOS FILHO, 2003; FREIRE JR., 1999; GREENSTEIN; ZAJONC, 1997; KRAGH, 1999; PESSOA JR., 2008; ROSENFELD, 1971a apud WHEELER E ZUREK, 1983) Nesta ocasião, ele menciona que no mundo quântico, ao contrário do mundo clássico, nunca se pode fazer a observação de um sistema sem perturbá-lo. (BOHR, 1928, 1950; FOLSE, 1985; KRAGH, 1999; SELNER, 2006)

Bohr aproveitou essa oportunidade para falar sobre os fundamentos filosóficos da Teoria Quântica. A evidente dualidade onda-partícula nos experimentos e as relações de incerteza foram descritas por Bohr como uma nova forma de entendimento desta Teoria, conforme foi enunciado por ele:

[... o quantum de ação] força-nos a adotar um novo modo de descrição designado de complementaridade no sentido de que qualquer aplicação dada dos conceitos clássicos proíbe uso simultâneo de outros conceitos clássicos os quais em uma diferente conexão são igualmente necessários para a elucidação dos fenômenos.¹ (BOHR, 1961 apud GREENSTEIN; ZAJONC, 1997, p. 84)

1 “[... the quantum of action] forces us to adopt a new mode of description designated as complementarity in the sense that any given application of classical concepts precludes the simultaneous use of other classical concepts which in a different connection are equally necessary for the elucidation of the phenomena.”

Essa citação exprime o que Bohr chamou de complementaridade, em que as propriedades ondulatórias e corpusculares de um objeto quântico constituem aspectos complementares de seu comportamento. Um sistema quântico pode exibir aspectos corpusculares ou aspectos ondulatórios, dependendo do arranjo experimental, mas não ambos ao mesmo tempo. (BASTOS FILHO, 2003; BOHR, 1935; MENESES, 2008b; PESSOA JR., 2008; SELNER, 2006)

De fato, aqui novamente nós não estamos lidando com as imagens contraditórias, mas com as imagens complementares dos fenômenos as quais somente juntas oferecem uma generalização natural do modo clássico de descrição.² (BOHR, 1928, p. 91)

Em decorrência, Bohr argumentou que nunca se encontrariam experimentos em que estes dois comportamentos diferentes pudessem ser revelados ao mesmo tempo. (BOHR, 1935; FOLSE, 1985; SELNER, 2006) A complementaridade afirma que onda e partícula são conceitos mutuamente exclusivos. Quando um experimento particular mostra um, o outro não está presente. Eles nunca aparecem juntos.

Há uma mútua exclusão entre esses tipos experimentais, como mencionado pelo próprio Bohr:

De fato, é só a exclusão mútua de qualquer um dos dois procedimentos experimentais, que permite a definição inequívoca de quantidades físicas complementares, [...] para as novas leis físicas, a tal coexistência poderia parecer irreconciliável à primeira vista com os princípios básicos da ciência.³ (BOHR, 1935, p. 700)

Assim, se fizermos um experimento no qual fique claramente caracterizada a natureza ondulatória de um objeto quântico, suas características de partícula não irão se manifestar; e vice-versa.

O princípio de complementaridade afirma que qualquer experimento com uma entidade quântica, como um elétron, pode ser compreendido ou em um quadro corpuscular, ou

2 “In fact, here again we are not dealing with contradictory but with complementary pictures of the phenomena, which only together offer a natural generalization of the classical mode of description.”

3 “In fact, it is only the mutual exclusion of any two experimental procedures, permitting the unambiguous definition of complementary physical quantities, [...] for new physical laws, the coexistence of which might at first sight appear irreconcilable with the basic principles of science.”

em um ondulatório, mas nunca em ambos ao mesmo tempo. Ou seja, se observo franjas de interferência, não posso atribuir trajetórias, e vice-versa. (PESSOA JR., 2008, p. 35)

O princípio de complementaridade, além de afirmar a dualidade, declarava que quanto mais um dos dois aspectos é realçado, tanto mais o seu complemento é ofuscado.

O princípio de complementaridade (que é uma das bases da interpretação de complementaridade ou interpretação de Copenhague) pode ser definido como um fator comum que pode ser encontrado em uma variedade de situações. (BOHR, 1950, p. 53) Bohr estendeu a interpretação de complementaridade para outros ramos além da Física quântica, como a Termodinâmica e a Biologia. (JAMMER, 1974, p. 87)

Existem relatos de que o princípio de incerteza foi fundamental para a complementaridade. (FOLSE, 1985; HEISENBERG, 1967 apud WHEELER; ZUREK, 1983; KRAGH, 1999; MENESES, 2008a) E que nesta relação, Heisenberg tendeu a interpretar o princípio de incerteza de modo que apoiou a ideia que a tarefa da ciência é somente desenvolver um formalismo matemático para prever fenômenos observados. (FOLSE, 1985; JAMMER, 1974)

A abordagem de Heisenberg manteve-se próxima à matemática da Teoria Quântica, não utilizando a linguagem tradicional da Física. Ao contrário, Bohr insistiu que para resolver o dilema dessa dualidade era necessário procurar um caminho dentro das ideias e linguagens da Física clássica.⁴ (GREENSTEIN; ZAJONC, 1997, p.83)

Os aspectos apresentados por ambos os princípios tiveram implicações filosóficas na Ciência, em especial na causalidade e no determinismo da Física clássica, quando se percebeu que o surgimento de fenômenos subatômicos não podia ser explicado pelo seu desdobramento em causas e efeitos, como se fazia até então. (JAMMER, 1974; MENESES, 2008b; SELNER, 2006) Apenas com David Bohm, em 1952, é que se conseguiu articular uma interpretação causal da física quântica.

4 “The approach of Heisenberg was to hold closely to the mathematics of quantum theory and to forgo using the traditional language of physics. By contrast, Bohr insisted on seeking a way within the ideas and language of classical physics [...]. (GREENSTEIN; ZAJONC, 1997, p. 83)

4 Explorando o texto: as ideias dos personagens sobre os princípios de complementaridade e de incerteza

Ao explorarmos o segundo ato da peça, encontramos no diálogo⁵ entre os personagens, Heisenberg e Bohr, uma primeira referência aos princípios de incerteza e complementaridade, conforme descrevemos a seguir:

BOHR: De 1924 a 1927.

HEISENBERG: Do momento em que eu cheguei a Copenhague pra ser seu assistente...

BOHR: Até sua partida, para ocupar sua cadeira em Leipzig.

HEISENBERG: Três anos de primaveras tempestuosas e revigorantes.

BOHR : E no final nós tínhamos a mecânica quântica, nós tínhamos a teoria da Incerteza.

HEISENBERG: Nós tínhamos a Complementaridade.

BOHR: Nós tínhamos toda a Interpretação de Copenhagen! (FRAYN, 2000, p. 60-61)

Mais adiante, encontramos no diálogo, agora com a participação da Margrethe, referências específicas ao princípio de incerteza.

HEISENBERG: Minha cabeça começou a clarear e eu tive uma imagem clara de como a física do átomo deveria se parecer. De repente percebi que nós tínhamos que limitá-la às medidas que nós pudéssemos tirar, daquilo que pudéssemos de fato observar. Nós não podemos. Simplesmente não podemos ver os elétrons dentro do átomo...

MARGRETHE: Assim como Niels não pode ver os pensamentos na sua cabeça; ou você, os pensamentos dele.

HEISENBERG: Tudo que nós podemos ver são os efeitos que os elétrons produzem, através da luz que eles refletem...

BOHR: Mas os problemas que você estava tentando resolver eram aqueles mesmos que nós tínhamos explorado juntos, jantando no apartamento ou na praia.

5 Os trechos foram retirados do texto original da peça, com a nossa tradução.

HEISENBERG: Claro, claro. Mas eu me lembro da noite em que a matemática começou a bater com o princípio. (FRAYN, 2000, p. 62)

Como já mencionamos anteriormente, tal incerteza diz respeito ao processo intrínseco de medida e expressa o fato de que sempre existe uma interação não determinável entre o observador e o que é observável.

Sobre este aspecto, Frayn nos adverte que

[...] o conceito de incerteza é uma dessas noções científicas que se tornou cunhagem comum, e generalizou-se ao ponto de perder muito de seu significado original [...].⁶ (SHEPHERD-BARR, 2006, p. 96)

e ainda complementa que:

[...] pensamentos e intenções, até mesmo da própria pessoa – talvez da maioria das pessoas – se modifiquem. Não há um único pensamento ou intenção de qualquer tipo que possa ser estabelecido precisamente.⁷ (FRAYN, 2000, p. 99)

Assim, essa visão de Frayn sobre o conceito de incerteza é usada na peça não só para explorar o próprio conceito, mas também para caracterizar os personagens Bohr e Heisenberg, cujas visões acerca da guerra e da pesquisa atômica são constantemente questionadas.

Em outro recorte do texto da peça, encontramos um diálogo entre Heisenberg e Bohr, o que a nosso ver já fora apresentado anteriormente por Jammer (1974), quando este autor enfatiza as ideias contrárias entre os dois físicos, acerca do princípio de incerteza.

BOHR: Eu disse apenas que a fórmula de ondas e a mecânica matricial são ferramentas alternativas.

HEISENBERG: Isso é uma coisa que você está sempre me acusando. “Se funciona, funciona”. Não importa o que significa.

BOHR: É claro que eu me importo com o que significa.

HEISENBERG: O que significa em língua de gente.

6 “[...] the concept of uncertainty is one of those scientific notions that has become common coinage, and generalized to the point of losing much of its original meaning.”

7 “[...] thoughts and intentions, even one’s own-perhaps one’s own most of all-remain shifting and elusive. There is not one single thought or intention of any sort that can ever be precisely established.”

BOHR: Claro, em língua de gente.

HEISENBERG: O significado de uma coisa é o que ela significa em Matemática.

BOHR: Você acha que contanto que a Matemática funcione, o sentido não tem importância.

HEISENBERG: A matemática é o sentido! Sentido é isso!

BOHR: Mas no final, no final, lembre-se bem, a gente sempre tem que ser capaz de explicar tudo para Margrethe! (FRAYN, 2000, p.64-65)

Percebemos que o personagem Bohr, ao referir-se à Margrethe, também se preocupa com a maneira como tal princípio é comunicado às “pessoas comuns”, aquelas que não se encontram na academia e não discutem ciência. A explicação para Margrethe tem implícita a questão do papel do formalismo matemático na descrição de fenômenos observáveis. Ainda que a expressão matemática forneça possíveis respostas, para que haja a compreensão dos fenômenos, deve-se sempre ter em mente a questão dos observáveis. Assim, um fenômeno microscópico deveria ser possível de descrever da mesma forma que a mecânica clássica descreve os fenômenos macroscópicos, compreensíveis por Margrethe.

Ainda sobre o princípio de incerteza, abaixo apresentamos duas falas de Heisenberg, em que o mesmo estabelece uma relação do princípio com uma situação imaginária.

E foi aí que eu cheguei na Teoria da Incerteza. Andando pelo Parque, sozinho, numa noite de inverno horrível. É muito tarde, e assim que eu entro no parque, eu fico completamente sozinho no escuro. Eu começo a pensar no que você veria, se pudesse focar um telescópio em mim, lá das montanhas da Noruega. Você só me veria quando eu passasse embaixo das lâmpadas de rua, e não veria nada quando eu sumisse dentro da escuridão. De repente, outra pequena aparição minha, quando eu passasse debaixo da lâmpada no coreto. É isso que a gente vê na câmara de nuvens. Não um rastro contínuo, mas uma série de aparições momentâneas produzidas por uma série de colisões entre um elétron passando e várias moléculas de vapor de água...Eu não sei como a gente não tinha pensado nisso antes! A não ser que a gente estivesse tão ocupado discutindo, que não havia tempo pra pensar [...] (FRAYN, 2000, p. 66-67)

[...] Você nunca pode saber tudo sobre a trajetória de uma partícula, ou sobre qualquer outra coisa, nem mesmo sobre Bohr agora, zanzando pra cima e pra baixo pela sala, deste

jeito enlouquecido dele, porque nós não podemos observar se não introduzirmos um novo elemento na situação, uma molécula de vapor de água para a partícula bater nela, um pedaço de luz, enfim, coisas que tenham energia própria, e que, justamente por isso, produzem um efeito naquilo em que batem. Um pequeno efeito, no caso de Bohr [...]. (FRAYN, 2000, p. 67-68)

Nesta fala, em particular, a peça apresenta uma visão distorcida, pois dá a entender que o princípio de incerteza teria surgido de um *insight* de Heisenberg. Segundo Beller (1985)⁸, as limitações de medidas impostas pelo princípio de incerteza já tinham sido discutidas por Pascual Jordan.

O trecho da peça fornece subsídios para entender alguns aspectos do princípio de incerteza, tais como:

- a) O comportamento das partículas é totalmente imprevisível.
- b) É impossível se determinar, efetivamente, órbitas ou trajetórias para os elementos de um sistema microscópico, pois a simultaneidade das medidas de posição e *momentum* apresenta uma incerteza intrínseca às medidas.
- c) O conhecimento mais preciso possível sobre um sistema físico não permite prever sua evolução no tempo, por causa das incertezas existentes.

Mais adiante, neste segundo ato da peça, passam a surgir as primeiras ideias dos personagens sobre a complementaridade. Abaixo, apresentamos algumas falas que dão indícios sobre tal princípio.

HEISENBERG: Escuta. Copenhague é um átomo. Margrethe é seu núcleo.

BOHR: Sim, sim...

HEISENBERG: Agora, Bohr é um elétron. Ele está passeando pela cidade em algum lugar da escuridão, ninguém sabe aonde. Ele está aqui, ele está lá, ele está em todo lugar e em lugar algum. Lá em cima, no Parque, lá embaixo, no centro da cidade. Passando em frente à Prefeitura, pelo porto. Eu sou um fóton. Um quantum de luz. Eu sou mandado para a escuridão para achar Bohr. Eu o encontro, eu dou um jeito

8 Segundo Beller (1985, p. 347), as ideias de Jordan sobre as probabilidades de transição podem ser agrupadas em cinco pontos principais, que coincidem com as hipóteses de Heisenberg na elaboração do princípio de incerteza. Além disso, é a partir do trabalho de Jordan que Heisenberg passa a interpretar de modo diferente o significado da posição do elétron.

de colidir com ele... Mas o que foi que aconteceu? Olha, ele ficou mais lento, ele se desviou. Ele não está mais andando enlouquecidamente como estava antes de eu ir até ele.

BOHR: Mas, Heisenberg, Heisenberg! Você também foi desviado! Se as pessoas podem ver por onde você caminhou até me encontrar, então elas podem descobrir por onde eu devo ter caminhado! O problema é saber o que aconteceu com você! Porque para entender como as pessoas te vêem, a gente tem que te tratar não como uma partícula, mas como uma onda. Eu tenho que usar não só a sua mecânica de partículas, eu tenho que usar a função de onda de Schrödinger.

HEISENBERG: Eu sei - eu coloquei isso num post-scriptum no meu artigo.

BOHR: Todos lembram do artigo - ninguém se lembra do post-scriptum. Mas a questão é fundamental. Partículas são coisas, completas em si mesmas. Ondas são perturbações em outra coisa. (FRAYN, 2000, p. 68-69)

Bohr apresenta as bases de seu princípio para quase todos os físicos envolvidos na nova Teoria Quântica, no mês de setembro do mesmo ano em que Heisenberg publica sobre as relações de incerteza. Para Bohr, as “entidades quânticas” não são nem ondas nem partículas, nem uma combinação das duas coisas. No entanto, elas podem se comportar como ondas ou partículas, dependendo da situação.

Em outros recortes de falas dos três personagens, o princípio de complementaridade também é encontrado dentro de um contexto em que os personagens utilizam situações diárias imaginárias, a fim de melhor exemplificar tal princípio.

HEISENBERG: Eu sei. Complementaridade. Está lá no post-scriptum.

BOHR: Elas são uma coisa ou a outra. Ou são partículas ou são ondas. Não podem ser as duas coisas ao mesmo tempo. Nós temos que escolher uma forma ou outra de olharmos para elas. Mas na medida em que escolhemos, já não podemos saber tudo sobre elas.

HEISENBERG: Sei, sei, Complementaridade... É claro que o lugar pra onde você vai quando passeia é determinado pelos seus genes e pelas várias forças físicas agindo em você. Mas também é determinado pelo impenetrável capricho de um momento para o outro. Assim, nós não podemos compreender completamente seu comportamento, sem olhar pra você das duas maneiras ao mesmo tempo. E lá vai ele entrando em órbita outra vez.

BOHR: Você nunca aceitou total e absolutamente a Complementaridade, aceitou? (FRAYN, 2000, p. 69-70)

É importante ressaltar que, em meio às discussões sobre quântica, o encontro se deu durante um período de tensão política em que Heisenberg representava a Alemanha e Bohr representava a oposição à Alemanha nazista.

HEISENBERG: Em absoluto - funciona. É o que importa. Funciona, funciona, funciona!

MARGRETHE: Se Heisenberg estiver no centro do Universo, então a única parte do Universo que ele não pode ver é ele mesmo, Heisenberg.

HEISENBERG: E daí...

MARGRETHE: E daí que não adianta perguntar pra ele porque é que ele veio a Copenhague em 1941. Ele não sabe!

HEISENBERG: Eu achei, naquele preciso momento, que tinha conseguido ter uma rápida visão disso.

MARGRETHE: E aí você se virou pra ver.

HEISENBERG: E ele sumiu.

MARGRETHE: Complementaridade outra vez, certo?

BOHR: Certo, certo...

MARGRETHE: Eu datilografei isso talvez vezes... Se você está fazendo uma coisa você tem que se concentrar. Não pode ao mesmo tempo ficar pensando sobre o que faz. E se você estiver pensando sobre aquilo que está fazendo, então você não pode estar de fato fazendo aquilo. Certo? (FRAYN, 2000, p. 72)

BOHR: Meu caro Heisenberg, a sugestão é, obviamente...

HEISENBERG: Muito interessante. Tão interessante que ela nunca lhe ocorreu. Complementaridade, mais uma vez. Eu sou seu inimigo; mas eu sou também seu amigo. Eu sou um perigo para a humanidade; mas também sou seu convidado. Eu sou uma partícula; mas também uma onda. Nós temos uma série de obrigações para com o mundo em geral; e nós temos outras obrigações, que nunca podem ser conciliadas com as outras, com nossos conterrâneos, nossos vizinhos, nossos amigos, nossa família, nossos filhos. Tudo que podemos fazer é olhar depois e ver o que aconteceu. (FRAYN, 2000, p. 77-78)

As discussões acerca da complementaridade permitem fazer algumas conjecturas sobre o papel de Heisenberg e Bohr no contexto da guerra em 1941. Usualmente, devido à associação de Heisenberg com o nazismo, sua posição política na Guerra foi, por muito tempo, encarada como “negativa”. (HEISENBERG, 1995)

Apesar de não haver consenso entre historiadores, ou mesmo um conhecimento mais detalhado do que foi realmente conversado sobre a bomba nuclear no encontro, a peça serve para discutir que a versão comum sobre os fatos pode apresentar uma “complementaridade”, ou seja, só é possível entender realmente como os fatos aconteceram se forem analisadas as duas posições. Apenas uma versão não fornece respostas finais, assim como apenas um comportamento da radiação (ou da matéria) não permite determinar plenamente sua natureza. De modo quase explícito, percebe-se um direcionamento, no decorrer da peça, em defesa de Heisenberg.

A exibição da peça com essa entonação acabou por gerar polêmicas sobre o encontro Bohr-Heisenberg, durante o simpósio *Creating Copenhagen*, realizado na City University of New York, na época da apresentação da peça na Broadway.

De acordo com Dörries (2005), nesse simpósio, durante os debates sobre a peça, particularmente sobre suas implicações e relevância, a família de Niels Bohr decidiu antecipar a divulgação de cartas-documento⁹ que ele escrevera e nunca enviara a Heisenberg.

A revelação, que aconteceu em fevereiro de 2002, causou repercussão no meio acadêmico, tanto que para alguns historiadores e críticos, o surgimento das cartas-documento contribuiu para que o autor Michael Frayn adicionasse um pós-escrito¹⁰ a sua obra original.

Não é possível estabelecer, na peça, uma posição definitiva para Bohr, Heisenberg e mesmo Margrethe quanto aos fundamentos e consequências de seus pensamentos. O próprio fato de a peça trabalhar com os personagens após sua morte permite-lhes a escolha das consequências de seus atos do passado, sem possibilitar uma certeza quanto à sua ocorrência. (SHEPHERD-BARR, 2006)

9 Tais documentos contêm várias cartas e notas escritas por Niels Bohr, entre 1957 e 1962, e uma carta de Heisenberg para Bohr. Os originais destes documentos encontram-se publicados na obra *Michael Frayn's Copenhagen in Debate* de Dörries (2005).

10 O pós-escrito refere-se a uma série de alterações ao texto da peça, em resposta às sugestões e críticas que Michael Frayn recebeu após a encenação da peça em Londres e depois em Nova York.

Essa afirmação pode ser exemplificada pela fala de Heisenberg que aparece no final do primeiro ato e se repete no final do segundo ato.

HEISENBERG: Por que é que eu vim a Copenhagen? Sim, por que foi que eu vim?

BOHR: Mais um esboço, sim? Um esboço final.

HEISENBERG: E mais uma vez eu atravesso o gramado até a porta da frente da casa dos Bohr. E toco a familiar campainha. Por que é que eu vim? Eu sei perfeitamente bem. Sei tão bem que nem preciso me perguntar. Até que mais uma vez a pesada porta da frente se abre.

BOHR: Ele fica ali, na soleira da porta, piscando por causa da repentina onda de luz que vem da casa. Até esse instante seus pensamentos estiveram em todo lugar e em lugar nenhum, como partículas não observadas. Agora os pensamentos podem ser observados e analisados. (FRAYN, 2000, p. 86)

5 Considerações finais

A análise feita neste artigo mostra que a peça *Copenhagen* se apresenta como um material muito rico em termos de História da Mecânica Quântica, bem como quanto à contribuição que a interpretação de Copenhagen trouxe para a filosofia e para a comunidade científica em geral.

Um aspecto presente no texto de *Copenhagen* de Michael Frayn é a ausência de *causalidade*: a peça não se desenvolve seguindo uma sequência linear de fatos, lugares, tempo. Do mesmo modo, apresentam-se as características principais dos princípios de incerteza e complementaridade quanto ao comportamento e descrição de movimento.

O autor não indica sequer eventuais mudanças de cena e de situação; elas acontecem no desenvolvimento da ação e cabe a nós escolhermos a sua melhor tradução cênica. Pode-se ainda mencionar que os próprios personagens se movem livres, no tempo e no espaço, num exercício radical de imaginação e raciocínio.

Quanto aos aspectos sociais, a peça mostra que a Mecânica Quântica (particularmente a Interpretação de Copenhagen) foi desenvolvida dentro de um contexto amplo, que envolvia questões éticas entre cientistas. Neste sentido, a peça traz discussões sobre a história do século XX, como o nazismo, a II Guerra Mundial, a bomba atômica e a sua relação com a ciência. Apesar de se restringir

a apenas três personagens dentro de uma teoria que apresentou inúmeras contribuições até seu estabelecimento, a peça pode servir como instrumento para uma discussão mais ampla do papel da ciência e da sua utilização na sociedade.

Referências

ABDALLA, M. C. B. Niels Bohr: o arquiteto da mecânica quântica. *Scientific American Brasil- Gênios da Ciência Quânticos*, São Paulo, v. 13, p. 32-43, 2006.

BASTOS FILHO, J. B. Os problemas epistemológicos da realidade, da compreensibilidade e da causalidade na teoria quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 2, p. 125-147, jun. 2003.

BELLER, M. Pascual Jordan's influence on the discovery of Heisenberg's indeterminacy principle. *Journal Archive for History of Exact Sciences*, v. 33, n. 4, p. 337-349, dez. 1985.

BOHR, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, v. 48, p. 696-702, oct. 1935. Tradução para o português: A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa? Tradução C.W. Abramo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 2, p. 97-106, 1981.

_____. On the notions of causality and complementarity. *Science*, New Series, v. 111, n. 2873, p. 51-54, jan. 1950.

_____. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, v. 121, p. 580-590, 1928, apud WHEELER, J. A.; ZUREK, W. H. *Quantum Theory and Measurement*. New Jersey: Princeton University, 1983. p. 87-126. Tradução para o português: *O postulado quântico e o recente desenvolvimento da teoria atômica*. Tradução O. Pessoa Jr. em PESSOA JR., O. (Org.). *Fundamentos da Física 1: Simpósio David Bohm*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2000. p. 135-159.

CHIBENI, S. S. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.27, n. 2, p. 181-192, 2005.

DÖRRIES, M. (Ed.). *Michael Frayn's copenhague in debate: historical essays and documents on the 1941 meeting between Niels Bohr and Werner Heisenberg*. Berkeley: Office for History of Science and Technology, 2005.

FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. T. *Lectures on physics, quantum mechanics*. Delaware: Addison-Wesley Iberoamericana, 1987. v. 3. Em português: *Lições de Física de Feynman*: edição definitiva. Trad. A.V. Roque da Silva. Porto Alegre: Bookman, 2008.

FOLSE, H. J. *The philosophy of Niels Bohr: the framework of complementarity*. New York: North-Holland, 1985.

FRAYN, M. *Copenhagen*. New York: Anchor Books Original, 2000.

FREIRE JR., O. *David Bohm e a controvérsia dos quanta*. Campinas: Unicamp, 1999. (Coleção CLE, v. 27).

GREENSTEIN, G.; ZAJONC, A. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, MA: Jones and Bartlett, 1997.

GUIMARÃES, F. E. G. Ótica de campo próximo e super-resolução à luz do critério de Rayleigh e do princípio da incerteza de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 18, n. 2, jun. 1996.

HEISENBERG, W. *Física e filosofia*. Tradução de Jorge Leal Ferreira. 4. Ed. Brasília: Universidade de Brasília, 1999. Original de 1958.

_____. The physical content of quantum kinematics and mechanics. In: WHEELER, J. A. e ZUREK, W. H. *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University, 1983. p. 62-84.

_____. *The physical principles of the quantum theory*. Tradução de Carl Eckart e Frank C. Hoyt. New York: Dover Publications, 1949. Original de 1930.

_____. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, v. 43, p. 172-178, 1927.

_____. *A vida política de um apolítico: minhas lembranças de Werner Heisenberg*. Tradução de Ingeborg Fleckenstein. São Paulo: Ars Poética, 1995.

JAMMER, M. *The philosophy of quantum mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1974.

KRAGH, H. *Quantum generations: a history of physics in the twentieth century*. New Jersey: Princeton University, 1999.

MARTINS, R. A. O nascimento de uma nova Física. *Scientific American Brasil- Gênios da Ciência Quânticos*, São Paulo, v. 13, p. 6-13, 2006a.

_____. Werner Heisenberg: o semeador da mecânica matricial. *Scientific American Brasil- Gênios da Ciência Quânticos*, São Paulo, v. 13, p. 64-73, 2006b.

MENESES, R. D. B. de. A causalidade e as causalidades segundo Schlick : pelo significado do Circulo de Viena. *Eikasia - Revista de Filosofia*, ano 3, n. 18, p. 33-57, maio 2008b.

_____. A complementaridade em Niels Bohr: da mecânica quântica a filosofia. *Eikasia - Revista de Filosofia*, ano 3, n. 17, p. 75-126, mar. 2008a.

PESSOA JR., O. As interpretações da mecânica quântica. *Ciência Hoje*, v. 42, n. 250, p. 32-37, jul. 2008.

ROBERTSON, H. P. The uncertainty principle. *Physical Review*, v. 34, p. 63-164, 1929.

SELNER, C. *Método para análise de sistemas de conhecimento, inspirado no princípio da complementaridade de Niels Bohr*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SHEPHERD-BARR, K. *Science on stage: from doctor faustus to copenhagen*. New Jersey: Princeton University, 2006.

WHEELER, J. A.; ZUREK, W. H. *Quantum theory and measurement*. New Jersey: Princeton University, 1983.