

# A INTERPRETAÇÃO DA COMPLEMENTARIDADE

## 1. Origens da Complementaridade

Nos últimos meses de 1926, o problema da interpretação da Mecânica Quântica era o tema central das discussões entre Bohr e Heisenberg. Este morava então no último andar do Instituto Niels Bohr, e frequentemente era visitado por Bohr a altas horas da noite, “e nós construíamos todo tipo de experimentos imaginários para ver se realmente entendíamos a teoria. Ao fazer isso, percebemos que nós dois estávamos tentando resolver as dificuldades de maneiras um tanto diferentes. Bohr procurava permitir a existência simultânea dos conceitos de partícula e onda, defendendo que ambas, apesar de mutuamente exclusivas, eram juntamente necessárias para uma descrição completa dos processos atômicos. Eu não gostava desta abordagem. Queria partir do fato de que a Mecânica Quântica, como a conhecíamos então, já impunha uma interpretação física única para algumas grandezas que nela ocorriam.”<sup>99</sup>

Um pouco mais tarde, a posição de Heisenberg seria de que tanto a linguagem corpuscular quanto a linguagem ondulatória seriam satisfatórias, cada uma sozinha, para descrever os objetos quânticos, enquanto que Bohr insistia que ambas eram necessárias, em conjunto. Heisenberg ficaria assim satisfeito com o desenvolvimento da abordagem da 2ª quantização por parte do sueco Oskar Klein, de Pascual Jordan e do húngaro Eugene Wigner (1927-28), que mostrava para ele “que a representação corpuscular e a ondulatória são meramente dois aspectos diferentes de uma mesma realidade física.”<sup>100</sup>

Em fevereiro de 1927, Bohr foi esquiar na Noruega, e esta separação permitiu que cada qual desenvolvesse sua interpretação. Heisenberg chegou no princípio de incerteza e Bohr ao conceito de “complementaridade”. Conforme salientado por Jammer, Heisenberg basearia a definibilidade de grandezas físicas em sua *mensurabilidade* (o que chamamos de “postulado positivista” na seção X.4), enquanto que Bohr tomaria a *definibilidade* como ponto de partida, argumentando que grandezas complementares não podem ser definidas de maneira simultânea. Em setembro, Bohr apresentou publicamente suas ideias no Congresso Internacional em homenagem ao centenário da morte de Alessandro Volta, realizado na cidade natal deste em Como, na Itália. A seguir, em outubro de 1927, no 5º Congresso de Solvay, Bohr reapresentou suas ideias, sendo que desta vez Einstein estava presente. Em 1928, Bohr publicou sua palestra na revista *Nature*.

## 2. Linguagem Clássica e a Questão do Macrorrealismo

Bohr iniciou a primeira seção de seu artigo se referindo às ideias e aos conceitos da Física Clássica, que têm que ser usados para interpretar os resultados experimentais, mas que ao mesmo tempo são limitados para descrever os fenômenos atômicos. Esta afirmação envolve o que chamaremos a tese da *linguagem clássica*<sup>101</sup>: a descrição da aparelhagem experimental e dos resultados das medições só pode ser feita na linguagem da Física Clássica.

Esta tese implica que conceitos próprios da Mecânica Quântica (como a “descontinui-

---

<sup>99</sup> HEISENBERG, W. (1971): “Reminiscences from 1926 and 1927”, in FRENCH, A.P. & KENNEDY, P.J. (1985), *Niels Bohr: a centenary volume*, Harvard University Press, Cambridge (EUA), pp. 163-171; ver p. 166.

<sup>100</sup> JAMMER (1974), op. cit. (nota 8), p. 68.

<sup>101</sup> Esta tese da linguagem clássica foi chamada de “buffer postulate” por SCHEIBE, E. (1973), *The logical analysis of quantum mechanics*, Pergamon, Oxford, p. 24.

dade”, ou fugindo do vocabulário bohriano, a “superposição de autoestados associados a um observável”) não podem ser aplicados aos aparelhos macroscópicos *enquanto eles são usados na medição*. Note, porém, que Bohr admite que conceitos quânticos possam se aplicar a partes do aparelho de medição. No entanto, entre o sujeito e o objeto, sempre é preciso fazer um corte entre clássico e quântico. Tal corte, porém, não é algo “objetivo”, mas pode ser imposto em qualquer ponto entre o sujeito e objeto, conforme von Neumann exprimiria matematicamente (no contexto da seção IX.1).<sup>102</sup>

A tese da linguagem clássica não proíbe que corpos macroscópicos possam ser descritos pela Mecânica Quântica. Tal descrição é possível, *desde que os corpos sejam objetos da medição*. Se tal corpo for parte integrante do aparelho de medição, então ele deve ser tratado classicamente (levando em conta os comentários do parágrafo anterior). Notamos assim, na concepção de Bohr e von Neumann, um certo elemento de “subjetivismo”, pois o sujeito epistemológico (observador) nunca pode ser eliminado.

Esta proximidade com alguma forma de subjetivismo levou os partidários russos da interpretação ortodoxa (Fock, e de certa forma Landau<sup>103</sup>) a desenvolverem um critério mais claro e simples para separar o mundo quântico do clássico (condizente com a ideologia do materialismo dialético). Todo corpo de dimensões *macroscópicas* seria descrito pela Física Clássica. Este critério se adaptava bem à abordagem “objetivista” ao problema da medição (seção IX.2). Mais recentemente, esta posição recebeu o nome de *macrorrealismo*, termo cunhado por Anthony Leggett. O macrorrealismo proíbe a existência de superposições macroscópicas (como a do gato de Schrödinger, seção IX.8).<sup>104</sup> Será que esta é uma tese correta?

### 3. Descontinuidade e Distúrbio Interacional

Desafiando nossa linguagem clássica está o *postulado quântico* (que já encontramos na seção I.4), “que atribui a qualquer processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade, completamente estranha às teorias clássicas e simbolizada pelo quantum de ação de Planck” (BOHR, 1928, p. 53).

Segundo Bohr, a consequência desta *descontinuidade* é que “qualquer observação de fenômenos atômicos envolverá uma interação com o agente da observação que não deve ser desprezada”. Esta é uma versão do que chamamos de *concepção do distúrbio interacional*: a impossibilidade de controlar os distúrbios provocados no objeto pela interação com o aparelho de medição (ver seção X.5).

Descontinuidade implicaria distúrbio. É curioso que se adotarmos um ponto de vista próximo à interpretação ondulatória, somos levados a uma inversão desta implicação: seria o distúrbio provocado pela interação com o aparelho que causaria a descontinuidade quântica.

<sup>102</sup> BOHR (1928), op. cit. (nota 90), p. 54: “é uma questão de conveniência em que ponto introduzir o conceito de observação”. VON NEUMANN (1932), op. cit. (nota 42), pp. 418-9. Esta noção é também chamada de “corte de Heisenberg”, tendo sido explorado pelo físico alemão em artigo de 1936.

<sup>103</sup> FOCK, V.A. (1957), “On the interpretation of quantum mechanics”, *Czechoslovak Journal of Physics* 7, 643-56. Ver discussão sobre Landau & Lifshitz em BELL, J.S. (1990), “Against ‘measurement’”, in MILLER, A.I. (org.), *Sixty-two years of uncertainty*, Plenum, New York, pp. 17-31 (ver seção 6), republicado em *Physics World* (agosto 1990), 33-40 (ver pp. 34-5).

<sup>104</sup> O termo “macrorrealismo” não é muito adequado, pois um realista ondulatório poderia defender a existência de superposições macroscópicas. Sobre a busca por superposições de objetos macroscópicos, interferência de moléculas com 2000 átomos foi obtida por FEIN, Y.Y.; GEYER, P.; ZWICK, P.; KIALKA, F.; PEDALINO, S.; MAYOR, M.; GERLICH, S. & ARNDT, M. (2019), Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa”, *Nature Physics* 15: 1242-45.

Bohr, porém, partiu do postulado quântico como um fato fundamental, e, assim, é esta descontinuidade que explica o distúrbio interacional. Mais tarde, a partir de 1935, Bohr passaria a dar menos importância ao distúrbio e mais à “totalidade” (seção XI.5).

Devido à interação entre sujeito e objeto, “uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes da observação” (BOHR, 1928, p. 54). Esta frase exhibe uma posição “antirrealista”, pois parece negar que o mundo físico tenha uma existência independente do observador. Em seus textos posteriores, Bohr não faria mais afirmações como essa, típicas da concepção filosófica de Kant.

#### 4. Os Três Tipos de Complementaridade

Na obra de Bohr é possível distinguir três tipos diferentes de complementaridade,<sup>105</sup> no contexto da Física.

(1º tipo) *Complementaridade entre coordenação espaço-temporal e asserção da causalidade*. Este foi o primeiro tipo de complementaridade citado por Bohr, mas, curiosamente, ele seria abandonado.

Em seu artigo de 1928, Bohr nota que só se pode *definir* o estado de um sistema físico quando todos os distúrbios externos são eliminados. De fato, vimos na seção VI.1 que um operador hamiltoniano auto-adjunto só pode ser associado a um sistema isolado ou a um sistema que não reage na fonte dos campos externos. No entanto, um sistema mantido sob tais condições de isolamento não pode ser observado! Por outro lado, se ocorrer uma *observação*, com o distúrbio acompanhante, “então uma definição sem ambiguidades do estado do sistema naturalmente não é mais possível” (p. 54). Temos assim uma complementaridade entre observação e definição.

Um sistema isolado conserva energia e momento, e portanto pode-se dizer que satisfaz a *causalidade*. Como, porém, ele não pode ser observado, não é possível associar uma posição espacial e um instante temporal a ele. Por outro lado, ao ser observado, um sistema passa a ter uma *coordenação espaço-temporal* (dada pelo resultado da medição), mas seu estado (após a redução) não evoluiu a partir do estado anterior de acordo com a lei da causalidade (ou seja, de maneira determinista).

“A própria natureza da teoria quântica nos força assim a considerar a coordenação espaço-temporal e a asserção da causalidade, cuja união caracteriza as teorias clássicas, como aspectos complementares mas exclusivos da descrição, simbolizando a idealização da observação e da definição, respectivamente” (pp. 54-5). Este foi o primeiro enunciado do princípio de complementaridade.

Esse par envolve características que são consistentes na Física Clássica: nesta, temos coordenação espaço-temporal e causalidade.

Porém, após 1928, Bohr passou a se incomodar com o fato de que este tipo de complementaridade feria princípios antirrealistas. Fazia-se uma distinção entre um átomo enquanto existente e o mesmo átomo enquanto conhecido,<sup>106</sup> o que não fazia sentido para o antirrealismo, que identifica o existente e o conhecido. Como distinguir entre observação e definição, se o positivismo e o construtivismo kantiano (formas de antirrealismo) estipulam que só o que é observado é definível? Apenas de um ponto de vista realista é possível dar sentido a este 1º tipo de complementaridade.

<sup>105</sup> Esta divisão em três tipos é também apresentada por VON WEIZSÄCKER, C.F. (1955), “Komplementarität und Logik”, *Naturwissenschaften* 42, 521-29, 545-55, cuja posição é resumida por JAMMER (1974), op. cit. (nota 8), pp. 102-4.

<sup>106</sup> MACKINNON, E. (1985): “Bohr on the foundations of quantum theory”, in FRENCH & KENNEDY, op. cit. (nota 99), pp. 101-20; ver p. 112.

(2º tipo) *Complementaridade entre partícula e onda*. Após a pequena crise conceitual pela qual Bohr passou em 1929, na qual reteve apenas o domínio da “observação” (rejeitando a pura “definição”), ele passou, especialmente a partir de 1935, a priorizar a complementaridade entre onda e partícula.

Já apresentamos este tipo de complementaridade na seção III.2, como “dualidade onda-partícula forte”, e notamos que ela envolve aspectos que são excludentes na Física Clássica (onde temos *ou* partícula, *ou* onda), ao contrário do 1º tipo de complementaridade. No cap. XII examinaremos este tipo mais a fundo.

Os aspectos ondulatório e corpuscular de um objeto quântico são revelados por arranjos experimentais mutuamente *excludentes*, mas, segundo Bohr, este par constitui uma descrição “exaustiva” do objeto quântico.

(3º tipo) *Complementaridade entre observáveis incompatíveis, como posição e momento*. Aqui temos dois aspectos que são *consistentes* na Física Clássica de Partículas: posição e momento. Isto distingue este tipo da complementaridade onda-partícula. Podemos igualar este tipo ao 1º tipo? Alguns comentaristas fazem isso, o que significa identificar a asserção da causalidade com as leis de conservação.<sup>107</sup> Mas o 1º tipo envolve uma oposição entre o observado e o não-observado, o que está naturalmente ausente no 3º tipo.

É interessante notar que o par posição-momento se restringe a *partículas*. Por simetria, somos levados a nos perguntar sobre pares complementares que ocorram só na representação ondulatória. Heisenberg pensou nesta possibilidade, e sugeriu um princípio de incerteza entre campos elétrico e magnético. Com a “segunda quantização”,<sup>108</sup> podemos pensar na relação de incerteza envolvendo número-de-quanta e fase, o que pode ser interpretado como uma complementaridade entre amplitude da onda e a fase da onda, aspectos que são consistentes na Física Clássica de Ondas, mas que seriam mutuamente excludentes na Mecânica Quântica.

## 5. Totalidade do Fenômeno

A partir do desafio lançado por Einstein, Podolsky & Rosen em 1935 (que veremos no Cap. XIII), Bohr foi obrigado a refinar sua interpretação, tornando mais explícita a complementaridade de arranjos experimentais. A novidade foi a ênfase que Bohr passou a dar para o “todo” do arranjo experimental, ao se definir o “fenômeno” quântico (comparar com o uso do termo na citação de 1928 apresentada na seção XI.3): “A lição essencial da análise de medições na teoria quântica é pois a ênfase na necessidade, para dar conta do fenômeno, de levar em consideração o arranjo experimental como um todo, em completa conformidade com o fato de que toda interpretação não ambígua do formalismo quântico envolve a fixação das condições externas.”<sup>109</sup> Chamaremos esta característica do fenômeno de *totalidade* ou *inteireza* (“wholeness”).

Uma versão um pouco diferente da noção de totalidade seria ressaltada por David Bohm (1951), ainda no contexto da interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica, como veremos na seção que fala sobre sua noção de “universo indiviso” (seção XV.5.)

<sup>107</sup> MURDOCH, D. (1987), *Niels Bohr's philosophy of physics*, Cambridge U. Press. Este autor define uma complementaridade cinemática-dinâmica (englobando os nossos 1º e 3º tipos), em oposição à complementaridade onda-partícula (p. 58). Ver também a estranha opinião de Léon Rosenfeld, p. 66.

<sup>108</sup> Ver *Conceitos de física quântica*, vol. 1, seção XVII.3.

<sup>109</sup> BOHR (1939), citado em SCHEIBE (1973), op.cit. (nota 101), p. 21.

Max Jammer<sup>110</sup> salienta que a concepção de totalidade de Bohr traz consigo uma concepção “relacionista” do estado de um sistema, ou seja, que o estado quântico passou a ser definido pela *relação* do objeto microscópico com o aparelho de medição inteiro.

Ele contrasta esta posição com a concepção anterior (pré-1935) que chama de “interacionista”. Já examinamos um aspecto desta concepção com a noção de “distúrbio interacional” (seções X.5 e XI.3). Outra instância desta concepção interacionista seria a famosa afirmação idealista de Jordan, segundo a qual “nós mesmos produzimos os resultados da medição” (ver nota 48, na seção VIII.3).

## 6. Outras Posições Ortodoxas

A chamada “interpretação de Copenhague” desenvolvida por Bohr, Heisenberg e Pauli é usualmente tomada como sendo uma posição monolítica, defendida por todos os fundadores da Mecânica Quântica, com exceção de realistas como Planck, Einstein, de Broglie (pré-1927 e pós-1952) e Schrödinger. Um exame mais atento, porém, mostra nuances nas posições ortodoxas.

Heisenberg desenvolveu, nos anos 1950, uma interpretação que enfatizava alguns pontos não desenvolvidos por Bohr. Sem abandonar a noção de complementaridade, Heisenberg passou a salientar que a função de onda  $\psi$  (no caso puro) exprime uma *potencialidade*, no sentido aristotélico, relacionada a uma probabilidade “objetiva” que independe do estado de conhecimento do observador. Esta posição se aproxima da interpretação ondulatória (seção V.5), sem, talvez, interpretar  $\psi$  de maneira tão literal.<sup>111</sup> A respeito dos “saltos quânticos” (colapsos), da “transição do ‘possível’ ao ‘real’ [que] ocorre durante o ato de observação”, Heisenberg (p. 25) enfatizou que ela “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”. Ele assim ataca a solução subjetivista ao problema da caracterização (seção IX.2), oferecendo uma descrição consistente com o criptodeterminismo (seção VI.2), já que é a interação com o resto do mundo que provocaria o colapso.

A frase que se segue a esta citação, porém, interpreta  $\psi$  de maneira claramente *epistêmica*, nos deixando em dúvida se as potencialidades são objetivas ou não<sup>112</sup>: “A mudança descontínua na função de probabilidade, no entanto, tem lugar com o ato de registro, pois é essa mudança descontínua do nosso conhecimento, no instante do registro, que tem por imagem a mudança descontínua da função de probabilidade.”

Tem-se explorado pouco, na literatura, as posições filosóficas dos outros físicos próximos à corrente ortodoxa. Pauli se mantinha bastante próximo a Bohr, ao contrário de Max Born, que a exemplo de Heisenberg parece ter flertado com a ideia de uma “realidade intermediária”: “A questão de se as ondas são algo ‘real’ ou uma ficção para descrever e prever fenômenos de maneira conveniente é uma questão de gosto. Eu pessoalmente gosto de considerar uma onda de probabilidade, mesmo no espaço  $3N$ -dimensional, como uma coisa

<sup>110</sup> JAMMER (1974), op.cit. (nota 8), pp. 160-6, 197-211.

<sup>111</sup> HEISENBERG ([1958] 1981), op. cit. (nota 41), cap. III (pp. 24-26 da edição brasileira de 1981). No contexto da interpretação da complementaridade, a noção de potencialidade foi também utilizada por BOHM (1951), op. cit. (nota 29).

<sup>112</sup> Ver a análise feita por: STAPP, H.P. (1985), “Bell’s theorem and the foundations of quantum physics”, *American Journal of Physics* 53, 306-17, especificamente nas pp. 311 (seção X) e 312 (2ª coluna).

real, como certamente mais do que um instrumento para cálculos matemáticos. Pois ela tem a característica de um invariante de observação.”<sup>113</sup>

Heisenberg parecia concordar com isso, porém preferia considerar a onda  $\psi$  como algo “objetivo” mas não “real”.<sup>114</sup>

## 7. Principais Teses da Interpretação Ortodoxa

Para fechar o capítulo, apresentaremos as teses principais da interpretação de Copenhague, que consiste basicamente de uma síntese das visões de Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Dirac, Rosenfeld, etc. Esta visão ortodoxa deve ser distinguida da chamada interpretação de Princeton, representada por von Neumann, Wigner, etc., que atribui maior importância à função de onda  $\psi$  e ao seu colapso (uma visão ondulatória antirrealista).

1) *Postulado Quântico*. Há uma descontinuidade essencial na absorção e emissão de radiação (e partículas materiais) pela matéria, incluindo no processo de medição. Tais processos se dão em quanta de energia discretizados e de localização bem definida.

2) *Linguagem Clássica*. Só temos acesso ao mundo microscópico através de aparelhos macroscópicos, e a descrição da aparelhagem experimental e dos resultados das medições, assim como a comunicação para os outros cientistas, só pode ser feita na linguagem da Física Clássica.

3) *Distúrbio Interacional*. Como consequência do postulado quântico, é impossível controlar os distúrbios provocados no objeto microscópico pela interação com o aparelho de medição.

4) *Antirrealismo*. A teoria quântica só trata das observações (ou medições) de objetos microscópicos, de forma que não faz sentido referir-nos a uma realidade independente do sujeito (observador).

5) *Totalidade*. Para dar conta do fenômeno quântico, é preciso considerar não só o objeto quântico, mas também todo o aparelho experimental, incluindo partes localizadas à distância.

6) *Complementaridade (Dualidade Onda-Partícula)*. Um experimento pode ser compreendido em um quadro corpuscular, ou em um quadro ondulatório, mas nunca nos dois ao mesmo tempo. Ou seja, se houver padrões de interferência, não pode haver inferência sobre trajetórias (retrodição), e vice-versa. Além desta “exclusão mútua”, essas duas descrições “exaurem” a descrição do objeto.

7) *Grandezas Incompatíveis*. Não é possível medir simultaneamente grandezas incompatíveis como posição e momento. Não faz sentido atribuir simultaneamente valores bem definidos para grandezas incompatíveis.

8) *Quebra do determinismo*. Não faz sentido defender o determinismo no mundo microscópico. A imprevisibilidade observada em experimentos quânticos é expressa no formalismo pelo fato de que apenas podemos calcular probabilidades. As probabilidades são inelimináveis, não devendo ser interpretadas de maneira meramente epistêmica. Levando em consideração a tese positivista (ver final da seção IX.4), o mundo é “efetivamente” (para todos os efeitos) indeterminista.

<sup>113</sup> BORN, M. (1949), *Natural philosophy of cause and chance*, Oxford U. Press, London; citação das pgs. 105-6.

<sup>114</sup> HEISENBERG ([1958] 1981), op. cit. (nota 41), cap. VIII (p. 78 da edição brasileira de 1981). Em geral, porém, ele não fazia esta distinção, como na p. 145 de HEISENBERG, W. ([1969] 1996), *A parte e o todo*, Contraponto, Rio de Janeiro; edições anteriores: *Der Teil und das Ganze* (1969), Piper, Munique; *Physics and beyond* (1971), Harper & Row, New York; *Diálogos sobre física atômica* (1975), Verbo, Lisboa.

9) *Completeza*. A descrição quântica, mesmo para objetos individuais, é completa. Não faz sentido postular variáveis ocultas, dado que sua postulação não traz nenhuma previsão nova.

10) *Simetria de Representação*. É igualmente aceitável representar um sistema nas representações de posição ou de momento. Nenhum observável tem privilégio ontológico, ao contrário do que ocorre na teoria da onda piloto, que privilegia a representação espacial. (Notar que neste ponto a interpretação da complementaridade adota uma postura típica do realismo, ao passo que a interpretação da onda piloto adota uma atitude própria do antirrealismo.)