

INTRODUÇÃO HISTÓRICA À TEORIA QUÂNTICA, AOS SEUS PROBLEMAS DE FUNDAMENTO E ÀS SUAS INTERPRETAÇÕES*

Oswaldo Pessoa Jr.

Departamento de Filosofia, FFLCH - USP

Este artigo visa fornecer elementos para o ensino dos conceitos de Física Quântica. Ele parte de um breve histórico do surgimento da Mecânica Quântica. A seguir, adentra-se sucintamente em algumas questões de fundamentos, em especial o paradoxo de EPR e o teorema de Bell. O desenvolvimento de algumas interpretações da Teoria Quântica é então examinado, dando-se ênfase à classificação das interpretações de acordo com o critério epistemológico (realismo, positivismo) e ontológico (corpuscular, ondulatório e dualista). Por fim, discute-se qual seria a interpretação hegemônica hoje em dia, apontando-se para uma visão descritivista dos coletivos estatísticos.

I. APRESENTAÇÃO

O que é a Teoria Quântica? Em pouquíssimas palavras, é uma teoria que concilia, de alguma maneira, aspectos contínuos (ondulatórios) e discretos (corpusculares).

Um exemplo disso é dado pelo experimento de duas fendas. Em 1802, Thomas Young observou franjas de interferência para a luz que passava por duas fendas finas, e explicou esse padrão luminoso com a hipótese de que a luz é na realidade uma onda (Fig. 1a). Em torno de 1904, J.J. Thomson suspeitava que a luz tinha também um aspecto “granular”, e em 1909 instruiu seu aluno Geoffrey Taylor para repetir o experimento de Young para uma fonte de luz fraquíssima. Eles não puderam observar diretamente que o padrão de interferência se forma “ponto a ponto” (Fig. 1b), como ficou claro a partir da década de 1920, com o nascimento da Mecânica Quântica. A partir da década de 1980, esta formação paulatina e pontual das franjas de luz passou a ser observado diretamente, e o mesmo se aplica para a formação de padrões de interferência por elétrons e outras partículas. É importante frisar que essa formação ocorre mesmo que apenas um elétron ou “*quantum* de luz” (o fóton) incida por vez na tela detectora

* Este trabalho é oriundo do minicurso apresentado pelo autor na IX Semana de Física da UEFS ocorrida no período de 18 a 22 de setembro de 2006.

(como no experimento de Taylor).

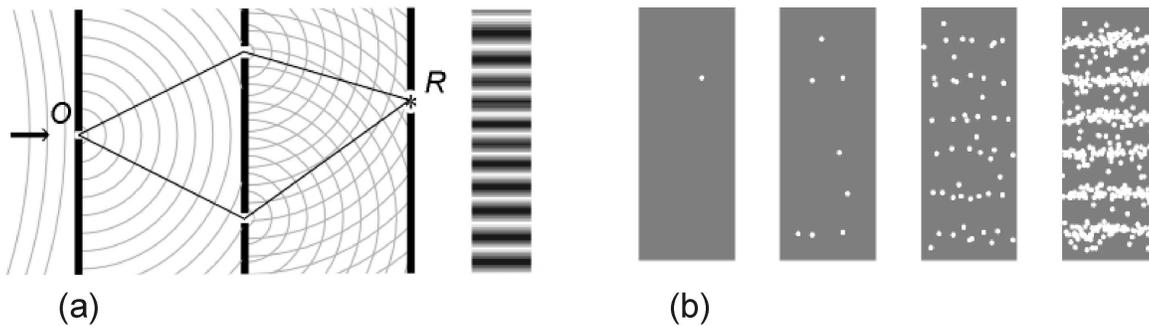


Fig. 1: (a) Experimento da fenda dupla, onde o padrão de interferência sugere uma representação em termos de ondas. (b) Formação ponto a ponto do padrão de interferência.

Mas como é possível um objeto se comportar ao mesmo tempo como onda e partícula? Uma onda é uma entidade espalhada, que pode ser dividida o quanto se queira (para a luz, por meio de um divisor de feixe). Já uma partícula é “bem localizada”, pontual, e é indivisível até um certo limiar de energia. Seria uma contradição lógica afirmar que “uma coisa (sem partes) é (ao mesmo tempo) onda e partícula”. Como resolver este problema conceitual?

O formalismo da Teoria Quântica fornece apenas *previsões* para resultados de medições, tipicamente probabilidades de se encontrarem *quanta* em diferentes posições. Mas ele se cala sobre o que acontece por trás das aparências. Para tentar “explicar” o problema conceitual apresentado acima, é preciso fornecer uma *interpretação* da Teoria Quântica.

Este texto apresenta, na seção 3, uma introdução às interpretações da Teoria Quântica, feita de uma perspectiva histórica. Antes disso, porém, inicia-se com uma breve história da Mecânica Quântica.

II. O DESENVOLVIMENTO DA TEORIA QUÂNTICA

A. A Velha Teoria Quântica

A Mecânica Quântica é a teoria física que descreve o mundo dos átomos e da radiação, tendo sido estabelecida de forma mais ou menos definitiva em torno de 1926. Seus primórdios, porém, datam de 1900, com uma descoberta surpreendente feita por Max Planck (de Berlim)

de que *os corpos emitem e absorvem luz em quantidades discretas de energia*, e não de forma contínua (nossas referências principais são Jammer, 1966, e Mehra & Rechenberg, 1982).

Este era um resultado teórico, necessário para explicar os novos dados experimentais concernentes às cores da luz emitida por corpos incandescentes (por exemplo, uma barra de ferro aquecida torna-se vermelha), obtidos em Berlim por dois grupos de físicos experimentais, Lummer & Pringsheim e Rubens & Kurlbaum, em 1899-1900. Imaginando que cada átomo em um corpo oscila com uma frequência ν , Planck foi obrigado a postular que a energia desta oscilação é um múltiplo inteiro de uma quantidade discreta ε , dada por $\varepsilon = h\nu$, onde h é hoje conhecida como a “constante de Planck”. Esta quantidade indivisível de energia ε era estranha à Física Clássica, e seria conhecida como um “*quantum*” (ou pacote) de energia, donde se derivou a expressão “Física Quântica” para a nova teoria que iria surgir. Planck foi obrigado a introduzir este conceito porque a única maneira de explicar a lei de radiação, que ele próprio havia obtido por interpolação (entre as leis de radiação de Wien e Rayleigh), era usando um método estatístico introduzido anteriormente por Ludwig Boltzmann, que “contava” o número de estados discretos de energia. Como o resultado de Planck era tortuoso e indireto, de início ninguém se convenceu de que o *postulado quântico* era realmente importante.

O primeiro a levar a sério o resultado de Planck foi o jovem Albert Einstein, trabalhando em Berna, na Suíça, em 1905. Planck havia postulado que os átomos que absorvem ou emitem luz têm energia discretizada; Einstein postulou que a própria luz era discreta, sendo composta de “quanta de luz” (mais tarde chamados de “fótons”). A energia de cada fóton seria proporcional à frequência da luz, segundo $\varepsilon = h\nu$. Usando esta idéia, Einstein derivou uma lei para o “efeito fotoelétrico”, que descreve como a incidência de luz é capaz de gerar uma corrente elétrica em um metal. Como esta lei só seria confirmada em 1916, com os trabalhos experimentais do norte-americano Robert Millikan, este trabalho de Einstein só seria levado a sério depois da 1ª Guerra Mundial.

Em 1907, Einstein novamente usou o postulado de Planck, desta vez para explicar os dados experimentais que existiam na época sobre o comportamento térmico de corpos a baixas temperaturas. Dado o sucesso de suas previsões, outros cientistas, como o químico Walther Nernst, começaram a levar a sério o *postulado quântico* de Planck, e o assunto começou a ser amplamente discutido em 1911, no 1º Congresso de Solvay, na Bélgica.

A conversão maciça da comunidade científica se deu a partir do trabalho do jovem dinamarquês Niels Bohr, trabalhando em Manchester com o neo-zelandês Ernest Rutherford. Em

1910, Rutherford e Hans Geiger descobriram que o átomo tinha um núcleo duro, ao contrário da opinião corrente. Bohr então resolveu aplicar as idéias de Planck para este modelo atômico (tentativas anteriores de uma teoria quântica do átomo haviam sido feitas por Haas e Nicholson), e em 1913 conseguiu explicar as cores das linhas espectrais emitidas pelo átomo de hidrogênio. Em seu modelo, os elétrons que circundam o núcleo só podem ocupar certos níveis energéticos discretos. Quando um elétron passa de um nível mais energético para um menos energético, ele emite um *quantum* de luz com a diferença de energia correspondente a este salto.

A partir daí, a Teoria Quântica se estabeleceu, mas ela tinha várias lacunas, e ninguém estava satisfeito com ela. Após a Guerra, duas linhas de pesquisa independentes levariam a uma reformulação da “Velha” Teoria Quântica, estabelecendo a “Mecânica Quântica”. Antes de descrever estas duas correntes, porém, examinemos o problema da natureza da radiação, que assolava a Física no começo do século.

B. Paradoxos Onda-Partícula

O ano de 1896 havia sido um marco na história da Física experimental, com as descobertas do raio X, da radioatividade, das propriedades corpusculares do elétron e do efeito Zeeman. Mas o que seria o raio X? A primeira hipótese era de que o raio X seria um “impulso eletromagnético”, o que indicaria que ele tinha uma natureza semelhante à da luz, só que com mais energia. Desde os trabalhos teóricos de James Maxwell, em 1870, e da detecção experimental de ondas de rádio por Heinrich Hertz, em 1888, sabia-se que ondas de rádio, radiação de calor e luz visível eram manifestações de uma mesma coisa, *ondas eletromagnéticas*, que se manifestavam de diferentes formas conforme o comprimento da onda. O raio X parecia, assim, ser uma radiação eletromagnética de comprimento de onda curtíssimo, concentrado em um pulso. E a radiação que emanava de substâncias radioativas, que viria a se chamar de raio gama? Qual a sua natureza? A pesquisa indicava que raios X e raios gama tinham natureza semelhante.

No entanto, quando esses dois tipos de radiação interagem com gases, ionizando o gás (ou seja, separando a carga negativa da molécula gasosa da carga positiva), coisas muito estranhas aconteciam. Dois paradoxos foram identificados nesse processo de “fotoionização”, sendo às vezes chamados de paradoxos da “quantidade” e da “qualidade”. O *paradoxo da quantidade* foi identificado pelo inglês J.J. Thomson em 1897. Ele percebeu que o raio X ionizava apenas uma parcela ínfima das moléculas do gás. Ora, se o raio X fosse uma onda, espalhada uni-

formemente pelo espaço, ele não deveria ionizar todas as moléculas de forma mais ou menos igual? Será que o raio X seria uma partícula? Thomson estendeu essas considerações para toda a radiação eletromagnética, e em 1904 elaborou uma teoria em que a energia da frente luminosa é distribuída de maneira desigual, de forma “granular”.

Em 1906, na Austrália, além de se deparar com este mesmo problema, William H. Bragg também encontrou o *paradoxo da qualidade*. A energia que uma molécula gasosa absorvia durante a ionização era quase igual à energia do impulso como um todo. Mas a onda está espalhada no espaço! Como uma molécula consegue absorver toda esta energia? (Esta seção baseia-se em Wheaton, 1983.)

Em vista desses paradoxos, além do modelo corpuscular da luz formulado por Einstein (1905), interpretações corpusculares para o raio X foram sugeridas por Bragg (1907) e pelo alemão Johannes Stark (1909). Bragg, de fato, foi o primeiro a defender explicitamente, de maneira qualitativa, que a radiação tinha tanto uma natureza corpuscular quanto ondulatória. Tais modelos, porém, não conseguiam explicar o fenômeno de “interferência” para raios X, observado em 1912 por Friedrich, Knipping & Laue. Nesta altura, o consenso passou a ser que raios X são ondas eletromagnéticas, como a luz, e não partículas.

A maré começou a reverter quando Millikan (1916), para sua própria surpresa, confirmou a lei de Einstein para o efeito fotoelétrico. Em 1921, o físico amador parisiense Maurice de Broglie demonstrou o efeito fotoelétrico para o raio X, o que só podia ser explicado supondo que o raio X é constituído de partículas. E, por fim, o norte-americano Arthur Compton (1923) realizou um experimento de espalhamento com raios X que só podia ser explicado supondo que o raio X se chocava como uma partícula em elétrons da amostra. Luz e raio X se comportam tanto como onda quanto como partícula! Mas como explicar isso?

O primeiro tratamento teórico dessa *dualidade onda-partícula* foi apresentado por Louis de Broglie, irmão mais novo de Maurice, que lhe ensinara que o raio X se comporta tanto como onda quanto como partícula. Louis foi mais longe, porém, estendendo a dualidade para toda a matéria, em 1923. Usando a terminologia de de Broglie, *toda partícula ou forma de radiação se reduz a um móvel com uma onda associada*. Previu assim que seria possível observar fenômenos ondulatórios para o elétron, como logo se confirmaria. O comprimento de onda para uma partícula ou corpo de momento p (para partículas com massa, $p=mV$) seria dado por: $\lambda = h/p$.

C. A Mecânica Matricial

Em 1923, tinha-se uma Teoria Quântica que era insatisfatória e vários resultados experimentais requerendo explicação. Mencionamos que duas tradições levariam simultaneamente à nova Mecânica Quântica. A primeira linha de pesquisa envolvia os jovens Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli, que interagiam com os professores Max Born (de Göttingen, na Alemanha), Bohr (em Copenhague) e com o holandês Hendrik Kramers (que colaborava com Bohr). O que inspirava esta abordagem era uma atitude *positivista* (ou “operacionista”) de se recusar a falar de grandezas não-observáveis: por exemplo, a posição de um elétron no átomo não era observável, portanto a nova teoria não deveria tratar de posições, mas sim daquilo que era observável, como a frequência e intensidade da luz emitida pelo átomo. Abandonava-se a “visualização” propiciada por modelos, e manipulavam-se símbolos (especialmente Heisenberg) em busca de uma descrição matemática adequada aos dados experimentais.

Esta trilha resultou na descoberta, em junho de 1925, da “chave” para se entender a nova Mecânica Quântica: as grandezas relevantes não comutam, ou seja, o produto $a \cdot b$ pode ser diferente de $b \cdot a$. Born percebeu que essas grandezas se comportavam matematicamente como elementos de “matrizes”, e dessa maneira lançou, com o matemático Pascual Jordan, as bases da Mecânica Matricial, em setembro de 1925.

O trabalho de Heisenberg fora lido na Inglaterra por Paul Dirac, que rapidamente estabeleceu o elo de ligação entre a Mecânica Clássica e a Quântica, utilizando um formalismo “algébrico” que incorporava vários resultados da teoria clássica. Quando publicou seu trabalho em novembro de 1925, parecia que havia duas novas teorias quânticas, a matricial e a algébrica.

D. A Mecânica Ondulatória

Os físicos mal tiveram tempo para digerir as novidades quando o austríaco Erwin Schrödinger, trabalhando em Zurique (na Suíça), publicou em janeiro de 1926 uma nova versão da teoria, a Mecânica Ondulatória, com a qual era muito mais fácil fazer cálculos. Havia então três teorias quânticas! Qual era a melhor? Logo se provaria que as três eram equivalentes.

A tradição na qual se colocava Schrödinger, ao contrário do positivismo de Heisenberg, etc., se prendia fortemente a modelos visualizáveis, associados à Física Ondulatória Clássica. O ponto de partida desta tradição foi o trabalho de Louis de Broglie, que alguns físicos tentaram desenvolver para chegar à nova Teoria Quântica. A idéia era usar os importantes trabalhos

do matemático irlandês William Hamilton, que na década de 1830 buscara encontrar uma lei única que regesse tanto a propagação de luz quanto o movimento das partículas, e que tivera algum sucesso com uma certa “analogia óptico-mecânica”. Dentre esses físicos foi justamente Schrödinger que conseguiu generalizar a teoria de de Broglie, descrevendo o átomo de hidrogênio e obtendo uma equação de onda para uma certa grandeza Ψ , chamada “função de onda”.

A maneira como Schrödinger apresentou sua teoria visualizava o átomo, por exemplo, como possuindo uma onda de elétrons que se espalhava em torno do núcleo, com uma carga elétrica distribuída de forma contínua no espaço. Esta postura é, hoje em dia, chamada de *realista*, pois ela considera que a teoria descreve adequadamente uma realidade não-observável por trás das aparências, ao contrário do que supõe o positivismo, que considera que a teoria só pode tratar daquilo que é observável.

Apesar de seu formalismo adquirir enorme sucesso, a concepção de realidade (ou “ontologia”) apresentada por Schrödinger não se sustentou, pois a idéia de que a carga do elétron pudesse ficar distribuída de forma contínua no espaço trazia certos problemas. O maior problema para a interpretação de Schrödinger era que a função de onda $\psi(r_1, r_2, t)$, para duas (ou mais) partículas, teria que ser definida em um espaço com mais de 3 dimensões!

A saída para este problema foi apresentada por Max Born, em junho de 1926, através de sua *regra probabilista*. A função de onda $\psi(r, t)$ não seria um campo que existiria na realidade, mas estaria associada à *probabilidade* de se encontrar uma partícula nesta ou naquela posição. Mais especificamente, $\psi(r, t)$ seria uma “amplitude” cujo quadrado $|\psi(r, t)|^2$ forneceria tal probabilidade (as barras são colocadas nesta expressão para o quadrado porque $\psi(r, t)$ é uma função de números complexos).

Outro resultado importante foi percebido por alguns físicos, e formalizado por Heisenberg, em março de 1927: as *relações de incerteza* (ou de indeterminação). Para certos pares de grandezas, como posição e velocidade de uma partícula, se a posição tiver um valor bem definido, a velocidade estará indeterminada; se a velocidade tiver um valor bem definido, a posição estará indeterminada.

Assim, a partir de 1927, a Mecânica Quântica já possuía todos seus ingredientes essenciais, tendo sido generalizada, no final de 1926, à forma conhecida como “teoria da transformação”, por Dirac e Jordan, e mais tarde, em 1929, sendo apresentada pelo húngaro John von Neumann como uma teoria de vetores em um “espaço linear complexo”.

III. DISCUSSÕES SOBRE OS FUNDAMENTOS DA TEORIA QUÂNTICA

A. A Interpretação da Complementaridade

Em 1927, o formalismo da Teoria Quântica Não-Relativística já tinha adquirido uma forma satisfatória, e ela era usada como arcabouço teórico para explicar os mais variados fenômenos. Restava, porém, o problema de como *interpretar* o formalismo da nova Mecânica Quântica. Dever-se-ia aceitar a interpretação ondulatória de Schrödinger, que para o elétron equacionava $|\psi|^2$ a uma densidade de carga elétrica, sem a existência de partículas? Ou dever-se-ia confiar na visão desenvolvida por Louis de Broglie, que concebia o objeto quântico como consistindo de uma partícula mais uma onda guia?

Em Copenhague, Heisenberg passava uma temporada trabalhando com Niels Bohr, e ambos tentavam entender o impacto conceitual e filosófico da nova teoria. Em fevereiro de 1927, Bohr foi esquiar na Noruega, e deixou seu discípulo livre para desenvolver suas próprias idéias. Heisenberg tentava entender como dar conta das trajetórias lineares de partículas em uma câmara de nuvens de Wilson (Fig. 2). Desenvolveu então a idéia de que, devido à observação, ocorreria uma “redução do pacote de probabilidade” (ou “colapso”) da função de onda ψ . Inicialmente essa onda estaria espalhada, mas com a primeira ionização ocorrida na câmara de nuvem, a função de onda associada se restringiria à vizinhança da ionização. Heisenberg não atribuía realidade à função de onda, mas a considerava apenas uma representação matemática. Essas idéias foram publicadas em meados de 1927, no artigo em que ele introduziu suas famosas relações de incerteza.

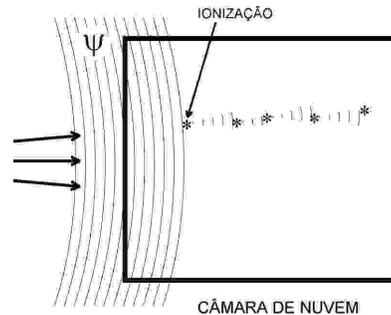


Fig. 2: Medições de posição em uma câmara de nuvens de Wilson.

Paralelamente a isso, Bohr encontrou inspiração nas neves norueguesas, e cristalizou sua idéia de que grandezas “complementares” não podem ser *definidas* de maneira simultânea (Heisenberg defendia que elas apenas não podiam ser simultaneamente *medidas* com boa resolução). Após muito elaborar, Bohr apresentou em setembro de 1927 a sua interpretação da complementaridade, na cidade italiana de Como, no centenário da morte de Alessandro Volta. Em outubro, reapresentou suas idéias no 5º Congresso de Solvay, desta vez com a presença de Albert Einstein.

O ponto de partida de Bohr era o “postulado quântico” descoberto por Planck, segundo o qual qualquer processo atômico possui uma “descontinuidade essencial” ou “individualidade”. Isso é exemplificado pelas detecções pontuais de fótons ou elétrons da Fig. 1b. Associado a essa descontinuidade estaria o fato de que o observador sempre provoca um distúrbio incontrolável ao interagir com o objeto.

Segundo Bohr, um objeto quântico não pode ser inteiramente compreendido dentro de um “quadro único”, mas necessita de descrições mutuamente excludentes, como “onda” ou “partícula”, que juntas se complementam para descrever o objeto. Estaríamos presos à linguagem da Física Clássica, que serve para comunicar às outras pessoas as montagens e procedimentos reprodutíveis que são usados em experimentos científicos. Essa linguagem clássica é limitada, e é insuficiente para descrever objetos quânticos dentro de um quadro único.

Dentre os físicos cuja interpretação da Física Quântica se aproxima bastante da de Bohr podemos citar Wolfgang Pauli, Leon Rosenfeld e, mais recentemente, o norte-americano John Wheeler.

B. Discussões nos Congressos de Solvay

O 5º Congresso de Solvay, em 1927, apresentou discussões memoráveis. A interpretação de Schrödinger foi criticada por envolver mais dimensões do que as três dimensões espaciais. A interpretação da dupla solução de de Broglie foi elogiada por Einstein, mas as duras críticas de Pauli o levariam a abandonar sua interpretação (até 1952). Dirac elaborou a idéia de que o colapso seria uma escolha feita “pela natureza”, ao que Heisenberg retrucou dizendo que o ato da *observação* era o responsável (ver Solvay, 1928).

A discussão mais célebre desta conferência envolveu as tentativas de Einstein para escapar ao princípio de incerteza. Pensando no fenômeno ondulatório do experimento das duas fendas

(Fig. 1), propôs que se poderia determinar a trajetória da partícula medindo o recuo do anteparo que contém as duas fendas após a passagem da partícula. Bohr, porém, partindo da suposição de que tal anteparo também obedecia às relações de incerteza, mostrou que tal medição do recuo apagaria as franjas de interferência.

No próximo Congresso em 1930, Einstein voltou ao ataque, tentando violar o princípio de incerteza para energia e tempo através de um engenhoso aparelho. Bohr, no entanto, novamente mostrou o erro de Einstein, desta vez apelando para a própria Teoria da Relatividade Geral, desenvolvida por Einstein em 1915.

Essas vitórias de Bohr sobre o maior físico do século certamente ajudaram os físicos a aderirem à interpretação da complementaridade, que passou a ser a “interpretação ortodoxa” da Mecânica Quântica. De maneira geral, os físicos passaram a ignorar problemas de fundamentos da Física Quântica, confiando na solução apresentada por Bohr, apesar da maioria não entendê-la muito bem.

C. As Provas de von Neumann

Em 1932, John von Neumann publicou em alemão um livro monumental intitulado *Fundamentos Matemáticos da Mecânica Quântica*. Nesta obra, ele apresentou pela primeira vez a Teoria Quântica em termos de postulados, propondo assim uma “axiomatização” da teoria. Apresentou também uma demonstração que seria muito influente. Provou que teorias de variáveis ocultas, como a interpretação da dupla solução, não poderiam reproduzir todos os resultados da Mecânica Quântica. Tal *prova de impossibilidade* sofreu uma ou outra crítica, mas só a partir do trabalho de Bell, em 1966, é que se esclareceu que tal demonstração, apesar de correta, não exclui todas as teorias de variáveis ocultas possíveis.

Von Neumann também apresentou uma *prova de insolubilidade* para o problema do colapso associado à medição. Tal prova significa que o postulado da projeção, que descreve a redução de estado (o colapso) durante a medição, não pode ser reduzido à equação de Schrödinger. Como consequência, não se pode aceitar o que viria a ser chamado de “criptodeterminismo”, ou seja, a visão de que a imprevisibilidade quântica é somente devida à nossa ignorância do estado microscópico exato do aparelho de medição.

Tais provas de insolubilidade seriam melhoradas na década de 1960, a partir do trabalho do húngaro-americano Eugene Wigner (1963), e sua discussão faz parte do chamado “problema

da medição”.

D. O Paradoxo de EPR

Bohr havia vencido duas batalhas com Einstein, mas a guerra cordial entre esses dois gigantes continuaria. Em 1935, Einstein, Podolsky & Rosen (EPR) apresentaram um experimento de pensamento para mostrar que a Teoria Quântica é *incompleta*, ou seja, que existem “elementos de realidade” que a teoria não consegue descrever.

Faremos apenas uma descrição superficial do problema. Considere a montagem experimental da Fig. 3, que foi apresentada em 1951 por David Bohm, e que é mais simples do que a montagem original de EPR.

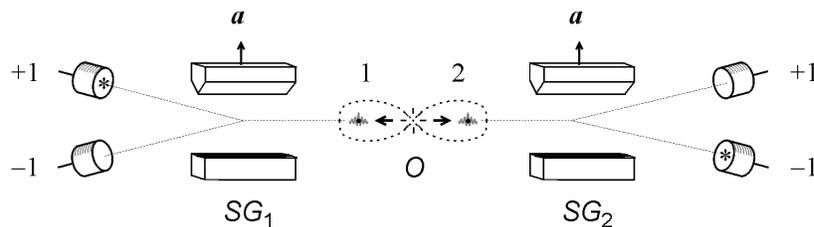


Fig. 3: Estado de singleto de duas partículas de spin $1/2$, apresentando anti-correlação perfeita.

Um par de partículas é emitido de maneira correlacionada, no chamado “estado de singleto”, e atravessam ímãs de Stern-Gerlach, que permitem a medição da componente de momento angular (que chamaremos de “spin”). Esse estado de singleto tem a seguinte propriedade interessante: se medirmos o spin na direção a da partícula n^o1 e obtivermos o valor $+1$ (ou seja, o componente de spin foi encontrado apontando no sentido $+a$, e não no sentido $-a$), então se medirmos o spin na direção a da partícula n^o2, *com certeza* obteremos o valor -1 . Tal propriedade é conhecida como *anti-correlação perfeita*. Essa propriedade pode parecer trivial, mas o estranho é que ela vale para *qualquer ângulo* a , e isso é incrível! Só um estado quântico possui uma simetria tal que permite que isto aconteça. Para que o leitor entendesse melhor o porquê disso, teríamos que nos deter mais neste ponto, mas não o faremos aqui.

Pois bem, poderíamos medir o spin na direção z da partícula n^o1, e neste caso, instantaneamente (devido à redução do estado quântico), o valor deste componente de spin da partícula

n^o2 se atualizaria, tornando-se “real”. Mas poderíamos também medir o spin na direção x da partícula n^o1, e neste caso o que se tornaria “real” para a partícula n^o2 seria o componente de spin nesta direção. Ora, se as duas partículas estiverem muito distantes, não dá tempo para a escolha que fazemos na n^o1 (medir spin na direção z ou medir na direção x) influenciar o estado da partícula n^o2. Esta é a hipótese da *localidade*. Assim, tanto o spin na direção z quanto na direção x para a partícula n^o2 teriam realidade simultânea (ou seja, valores bem definidos), o que não é permitido pela Mecânica Quântica, pois essas grandezas não são “compatíveis”, e portanto seus valores deveriam estar limitados pelo princípio de incerteza. Portanto, concluíram EPR, a Teoria Quântica seria *incompleta*!

É difícil para um leitor novato entender as sutilezas do paradoxo com esta breve exposição, mas após pensar nele por algum tempo, as coisas começam a ficar claras. Vale notar que esse argumento *não envolve nenhuma medição*, mas apenas a possibilidade de se realizá-las.

Em termos lógicos, o argumento de EPR pode ser colocado nos seguintes termos. Parte-se do *formalismo* da Mecânica Quântica (MQ), que inclui o “postulado da projeção” que descreve a redução de estado. Além disso, utiliza-se uma forma branda de *realismo* R, que diz que se podemos prever algo com certeza, então existe um “elemento de realidade” correspondente. Utiliza-se também a condição de *localidade* L, que diz que uma medição realizada aqui não pode afetar instantaneamente um elemento de realidade lá longe. Com isso, argumentando em termos de medições que não são realizadas (“contrafactuais”), concluem que a Teoria Quântica é *incompleta*, ou seja, existem elementos de realidade que não têm um correspondente na teoria. Esquemáticamente temos (onde “ \Rightarrow ” é o sinal de implicação lógica):

$$\text{MQ, R, L} \Rightarrow \text{Incompleteza}$$

O artigo de EPR caiu sobre Niels Bohr como um “raio do céu”. Após muita ponderação, ele escreveu um artigo de resposta, no qual criticou a concepção de realidade (R) usada por EPR, e o uso de medições contrafactuais. Bohr foi também forçado a aprimorar a interpretação da complementaridade, salientando que o “fenômeno” quântico envolve tanto o objeto quanto o aparelho, que formam uma *totalidade* que não pode ser adequadamente analisada em partes.

Muita discussão foi gerada pelo paradoxo de EPR, e nos anos 60 o problema retornaria sob outra roupagem, através da desigualdade de Bell.

E. Teorias de Variáveis Ocultas

Vimos que von Neumann (1932) havia demonstrado ser impossível haver uma teoria de variáveis ocultas (TVO) que obtivesse todas as previsões da Teoria Quântica. Uma TVO é qualquer teoria que adiciona grandezas invisíveis à Mecânica Quântica – parâmetros ocultos como a posição e a velocidade de uma partícula, segundo a interpretação de Louis de Broglie –, e que dessa maneira consegue retornar ao ideal da Física Clássica de uma teoria determinista, onde os eventos não ocorrem ao acaso. Em outras palavras, se num experimento quântico conhecêssemos o estado quântico ψ e o valor das variáveis ocultas λ , poderíamos prever com exatidão o resultado de qualquer medição feita em um objeto individual.

Von Neumann “provou” que tal teoria não poderia existir. No entanto, em 1952, o norte-americano David Bohm apresentou uma nova versão da antiga interpretação de de Broglie, uma interpretação realista e com variáveis ocultas (as posições e velocidades das partículas) que era consistente com a Mecânica Quântica, gerando as mesmas previsões que esta! Mas como isso era possível? E a prova de von Neumann? Ora, Bohm explicou que em sua teoria, as variáveis ocultas relevantes não pertenciam apenas ao objeto quântico, mas também ao aparelho de medição. Assim, continuava sendo verdade que, dado o estado quântico ψ e o valor das variáveis ocultas λ , o resultado de uma medição seria determinado (apesar de ser impossível conhecer todas as variáveis ocultas relevantes). Acontece que quando medimos a posição x ou a velocidade v_x , o arranjo experimental muda (em acordo com as idéias de Niels Bohr), e assim muda também o conjunto de variáveis ocultas relevantes. Essa propriedade da teoria de David Bohm é chamada de *contextualismo*, e ela é suficiente para escapar da prova de impossibilidade de von Neumann.

Bohm trabalhou na Universidade de São Paulo entre 1952 e 1955, fugindo do macartismo. Morando aqui, colaborou com vários físicos brasileiros, e tentou estender sua teoria para o domínio relativístico, projeto este que não teve muito sucesso, e explica porque poucos físicos aderiram à sua abordagem (ver Freire, 1999, pp. 128-34).

F. A Desigualdade de Bell

A teoria de Bohm tem uma propriedade que a afasta das teorias mais modernas da Física Clássica: ela viola a condição de localidade! Ou seja, um evento que ocorre aqui pode influenciar instantaneamente o estado quântico lá longe. É assim que a teoria de Bohm resolve o paradoxo

de EPR: sua teoria não seria incompleta (a Mecânica Quântica seria), apesar de satisfazer a condição do realismo (R), porque *ela viola a condição de localidade* (L).

O norte-irlandês John Stuart Bell achou curioso esta característica da teoria de Bohm, e suspeitou que ela seria uma característica geral de qualquer TVO consistente com a Teoria Quântica. Antes de explorar essa possibilidade, porém, escreveu um importante artigo no qual esclareceu as limitações de provas de impossibilidade como a de von Neumann. E no artigo seguinte, publicado em 1964, derivou uma desigualdade envolvendo grandezas mensuráveis para pares correlacionados de partículas (como os da Fig. 3) que seria obedecida por qualquer TVO *local*, mas que seria violada pela Teoria Quântica! Dentro de uma década, experimentos mostraram que a natureza de fato viola essas desigualdades, em acordo com a Teoria Quântica, e que portanto *teorias de variáveis ocultas locais são incorretas*.

Esquemáticamente, podemos representar este resultado da seguinte maneira. Uma teoria que seja realista (R), que seja local (L), e que descreva um mundo no qual podemos usar a “indução” (ou seja, um experimento para testar a desigualdade de Bell envolve amostragens justas, não viciadas, de pares de partículas) (I), obedece a uma desigualdade que é violada pela Teoria Quântica e pela natureza:

$$R, L, I \Rightarrow \text{Desigualdade}$$

Deixando de lado a indução, o que o teorema de Bell nos obriga é a rejeitar pelo menos uma de duas teses metafísicas, adotadas pelas teorias clássicas de campos: o realismo ou a localidade. Se quisermos que a Teoria Quântica descreva a realidade que jaz para além das observações, teremos que abandonar a localidade (como faz a teoria de Bohm). Só ao preço de abandonar o realismo poderíamos manter a tese da localidade.

Para encerrar, citamos John Clauser (1991), que trabalhou na verificação experimental da desigualdade de Bell: “Percebi que o Teorema de Bell tinha conseqüências filosóficas que iam muito além das teorias de variáveis ocultas que nós propalávamos que ele restringia. De fato, ele restringe a própria objetividade da natureza. [...] O consenso [a partir de 1976] passou a ser que a Mecânica Quântica é muito mais espantosa do que ela parecia ser antes de 1964.”

IV. AS INTERPRETAÇÕES BÁSICAS DA TEORIA QUÂNTICA

A. Algumas Interpretações Iniciais da Teoria Quântica

Na seção 1, apresentamos um problema básico para a Teoria Quântica, que é o de *explicar* porque os eventos pontuais, que são detectados em um experimento de fenda dupla, se distribuem em franjas de interferência. Uma primeira resposta dos físicos é que isso não requer explicação, mas é um fato fundamental do mundo. A tarefa da Física, segundo essa visão, é descrever e *prever* resultados de medições, e não postular mecanismos ou entidades ocultas por trás dos fenômenos. Tal atitude recebe o nome de “descritivismo” (Nagel, 1961, cap. 6) ou, de maneira menos precisa, *positivismo*. Essa atitude marcou parte dos pioneiros da Mecânica Quântica, em especial Pauli, Heisenberg, Bohr, Born e Jordan.

Um exemplo da atitude positivista está em uma sugestão feita por Heisenberg (1927). Quando observamos a trajetória de um objeto quântico, digamos em uma câmara de nuvens (Fig. 2), o que vemos são ionizações separadas, formando um trajeto aproximadamente linear. Isso poderia ser representado com o auxílio de ondas ψ , como se vê na figura, que sofreria colapsos (reduções de estado) a cada ionização. A atitude de Heisenberg, porém, neste primeiro momento de seu célebre artigo, foi o de considerar que só faria sentido atribuir realidade aos pontos observados, que aparecem de maneira descontínua, como se dando saltos (a função ψ seria só um auxílio matemático de cálculo). A realidade física teria uma natureza “estroboscópica”. Esta, então, seria uma interpretação corpuscular positivista da Teoria Quântica.

Uma interpretação corpuscular *realista* também é possível. Um dos pioneiros da Teoria Quântica, Alfred Landé, na década de 50 passou a defender uma interpretação em que um objeto quântico, como um elétron, seria apenas um corpúsculo, sem onda associada. Para explicar os fenômenos de difração, nos quais um feixe de elétron passa por um cristal e exhibe franjas semelhantes às da Fig. 1, Landé utilizou uma idéia proposta por Duane em 1921, segundo a qual a rede cristalina transferiria momento de forma quantizada para o elétron (Landé, 1965-75). Tal explicação não funciona para outros tipos de experimentos (como o biprisma eletrônico), mas as interpretações corpusculares têm aparecido em diversos contextos da física de partículas.

Na Fig. 4, as interpretações corpusculares do jovem Heisenberg e do velho Landé estão representadas na coluna da esquerda, que representa uma ontologia corpuscular. A parte superior do diagrama representa visões mais descritivistas ou positivistas, e as abaixo visões

mais realistas.

Do lado direito da figura, representam-se as interpretações puramente ondulatórias. Já mencionamos a visão ondulatória realista de Schrödinger (seção 2.4), cuja formulação se iniciou em 1926 e na qual ele trabalhou até a década de 30. Schrödinger queria desenvolver um retrato ondulatório em que não houvesse saltos ou colapsos, como ocorria na Física Ondulatória Clássica. Seu projeto fracassou, apesar de suas idéias voltarem a ser examinadas com interesse mais recentemente (Dorling, 1987).

Uma maneira de fazer a interpretação realista ondulatória funcionar melhor é admitir a ocorrência de colapsos quase instantâneos. O preço a pagar por isso é que a não-localidade tem que ser admitida, mas isso acaba sendo um problema para quase qualquer interpretação realista (seção 3.6). A interpretação de von Neumann se aproxima desta visão ondulatória com colapsos, mas sua postura não era realista: as ondas seriam apenas entidades matemáticas. Quando perguntado sobre sua interpretação, aliava-se à visão ortodoxa de Bohr, apesar de, na prática, ao fazer cálculos, tratar até o aparelho de medição como um objeto quântico, por meio de uma função de onda. Esta postura de von Neumann, então, pode ser classificada como uma interpretação ondulatória positivista.

Na Fig. 4, a coluna do meio representa as ontologias dualistas, que de alguma forma dão pesos semelhantes para o aspecto onda e para o aspecto partícula. Na visão de Niels Bohr, podemos aplicar ou um quadro ondulatório, ou um quadro corpuscular, para entender um experimento quântico. Antes de um experimento terminar, porém, não faria sentido atribuir um desses quadros à realidade.

Já as visões de Louis de Broglie (até 1927 e depois de 1952) e de David Bohm concebem que um elétron é sempre um corpúsculo com posição e velocidade bem definidos, e que junto a ele há uma onda piloto ou um potencial quântico. Seria este aspecto ondulatório que se comportaria de maneira não-local.

A classificação das interpretações da Teoria Quântica em termos de eixos epistemológico e ontológico foi levada adiante em Pessoa (2006), onde uma meia centena de interpretações diferentes foi mapeada. Foi necessário também introduzir uma coluna com visões “sem ontologia”, ou seja, visões instrumentalistas que não se comprometem com a natureza da realidade, mas apenas com maneiras alternativas de derivar o formalismo quântico.

Na seção seguinte, retomamos a discussão sobre as interpretações básicas da Teoria Quântica.

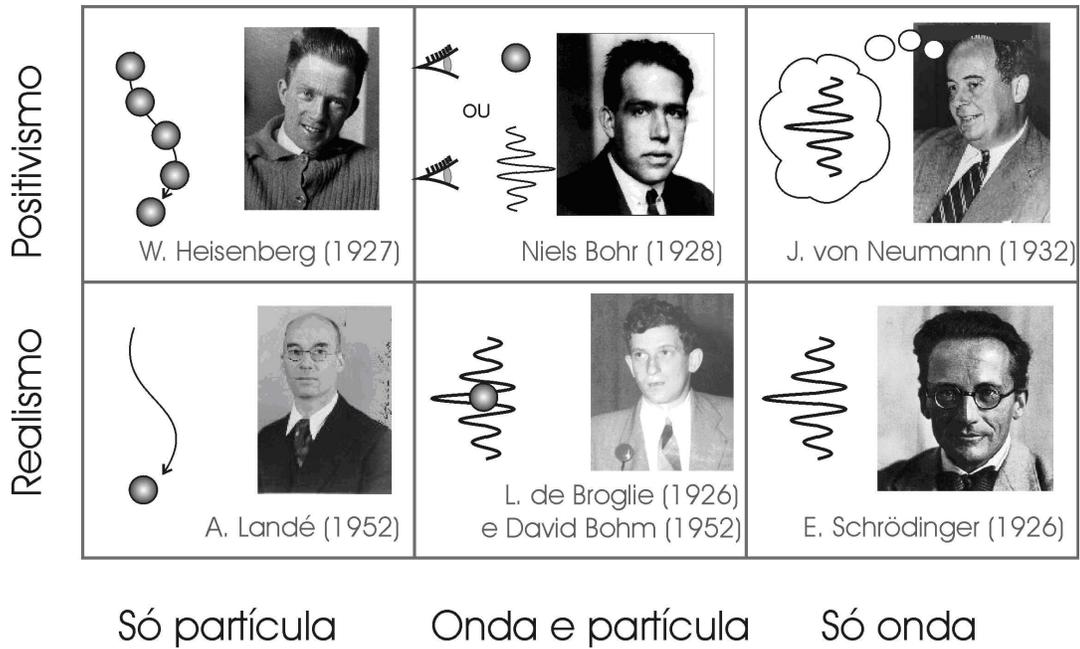


Fig. 4: Mapeamento simplificado de algumas interpretações da Teoria Quântica, ao longo do eixo epistemológico (realismo, positivismo) e ontológico (corpúscular, dualista, ondulatório).

B. Considerações Gerais sobre Interpretações

A Teoria Quântica tem um aspecto notável associado a ela, que é a existência de dezenas de “interpretações” diferentes. Como é possível haver tantas interpretações diferentes para uma teoria considerada tão fundamental? Um pouco de reflexão mostra que esta situação, longe de ser patológica, deve ser considerada típica.

Uma *interpretação* é usualmente entendida como um conjunto de teses ou imagens que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria, sem afetar as previsões observacionais da teoria. Essas teses fazem afirmações sobre a realidade existente para além dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações. Claramente, uma interpretação equivale a uma postura filosófica ou metafísica, a qual o cientista tem liberdade para escolher.

O fato de a Teoria Quântica se referir a um domínio de realidade que está muito distante de nós faz com que a consideremos contra-intuitiva; como ela está nos limites de nosso conhecimento, fica difícil testar qualquer conjectura a respeito da realidade que se encontraria por

trás de nossas tênues medições experimentais. Assim, é natural que haja um grande número de construções hipotéticas a respeito da natureza desta realidade que se oculta por trás das observações. Em outras palavras, há uma grande “subdeterminação” da interpretação pelo formalismo mínimo da teoria.

O primeiro guia para se postular qual seria a natureza desta realidade, a partir do momento em que temos uma teoria geral muito bem sucedida em fazer previsões e explicar todo tipo de medições, é a própria estrutura da teoria. Se a teoria utiliza uma entidade matemática que é análoga a uma onda, como a função de onda $\psi(r,t)$ da Mecânica Ondulatória de Schrödinger, então a interpretação “natural” desta teoria é de que exista um referente (na realidade) a esta função de onda. Há outras abordagens para a Mecânica Quântica Não-Relativística que fornecem as mesmas previsões experimentais que a mecânica ondulatória, como a mecânica matricial de Heisenberg ou a soma sobre histórias de Feynman. Existem provas de que estas abordagens são matematicamente equivalentes entre si, mas mesmo assim tais abordagens “sugerem”, por meio das entidades matemáticas que são salientadas (ondas, trajetórias, trajetórias possíveis), quais seriam as entidades reais que têm prioridade. Cada formalismo matemático diferente *sugere* uma ontologia diferente, cada uma tem uma interpretação natural diferente.

No entanto, não há nada que obrigue um físico que trabalhe com funções de onda a acreditar ou a defender que tais ondas existam na realidade. A interpretação “oficial” adotada por um cientista não precisa refletir a interpretação natural sugerida pela teoria. Por outro lado, pode-se argumentar que existem “interpretações privadas” que o cientista utiliza, até sem perceber, durante seu trabalho, e que podem diferir da “interpretação oficial” adotada publicamente por ele (ver Montenegro & Pessoa, 2002). Com efeito, não há nada que obrigue um cientista a defender qualquer tese que seja (a respeito da realidade não-observável). Se, de fato, ele adotar esta posição de suspensão de juízo, isto não significa, porém, que ele não tenha uma interpretação com relação à teoria, mas sim que adota uma interpretação que desaconselha que se associe uma imagem de mundo à realidade não observável. Esta atitude é conhecida como *positivismo* ou, mais precisamente, como “descritivismo” (segundo esta visão, a ciência deve se relegar a descrever a realidade observada, não “fazendo sentido” falar nada a respeito daquilo que não é observável; ver Nagel, 1961, cap. 6). As interpretações ortodoxas da Teoria Quântica se caracterizam por um alto grau de positivismo, ao passo que a maior parte das interpretações alternativas asseveram algo a respeito da realidade não-observada, atitude esta que recebe o nome de *realismo*. Toda interpretação pode ser analisada sob a perspectiva de seu

grau de positivismo/realismo. Tanto é assim que propomos, neste trabalho, uma classificação das interpretações da Teoria Quântica baseada nesta distinção.

Um segundo critério de classificação de interpretações é relativo à *ontologia* proposta. No caso da Teoria Quântica, a distinção ontológica fundamental é entre interpretações corpusculares e ondulatórias. Esta distinção reflete a dicotomia mais geral entre “propriedades bem definidas” e “propriedades difusas” (“borradas”). O que chamamos interpretações “ondulatórias” (seguindo Reichenbach, 1944) deve ser entendido como visões que não atribuem propriedades bem definidas para certas grandezas quânticas, como a posição. O que chamamos interpretações “corpusculares” inclui visões que atribuem valores simultaneamente bem definidos para quaisquer observáveis, como energia ou spin.

A maioria das interpretações da Teoria Quântica responde de maneira clara às seguintes questões: “existem partículas?”, “existem ondas?”. Sendo assim, haveria três grandes grupos interpretativos: *corpuscular*, *ondulatório* e *dualista* (visões que aceitam a existência de ambos), além de algumas abordagens que evitam qualquer comprometimento ontológico. Em Pessoa (2006), propomos uma classificação de todas as interpretações da Teoria Quântica baseada em como cada uma delas se distribui ao longo do eixo epistemológico (positivismo ou realismo) e ontológico (partícula, onda, dualismo ou sem ontologia).

Há, no entanto, um terceiro eixo que seria significativo para classificar as interpretações, mas cujo caráter esquivo nos impede de utilizá-lo. Trata-se do aspecto “intencional”, mesmo “emocional”, que as pessoas agregam às suas posições interpretativas. Há indivíduos que defendem ardentemente e até agressivamente uma interpretação, e o embate emocionalmente carregado envolvendo dois ou mais partidos pode resultar numa “controvérsia científica”, que muitas vezes tem desdobramentos no nível profissional e social. Não utilizaremos o aspecto *intencional-emocional* em nossa classificação das interpretações, mas consideramos pertinente destacar sua relevância (ver Pessoa, 2006).

C. Quatro Grandes Grupos Interpretativos

Seguindo os comentários da seção anterior com respeito à classificação das interpretações com base nos eixos epistemológico (positivismo ou realismo) e ontológico (corpuscular, ondulatório ou dualista), podemos formar quatro grandes grupos de interpretações da Teoria Quântica. Dentro de cada uma delas mencionaremos uma versão “ingênua”, que são utilizadas

em Pessoa (2003) para um primeiro contato dos alunos com a teoria.

(1) *Interpretação Ondulatória (realista)*. Este ponto de vista considera que a função de onda quântica corresponde a uma realidade, uma realidade ondulatória, “borrada” (“*smearred out*”) ou talvez uma “potencialidade”. A visão ondulatória era defendida explicitamente por Schrödinger, mas ele encontrou extrema dificuldade em dar conta dos fenômenos sem a noção de “colapso”. Numa versão ingênua da interpretação ondulatória, a realidade que corresponde à função de onda sofreria colapsos toda vez que ela interagisse com um aparelho de medição. Um problema conceitual é que tais colapsos são “não-locais”, ou seja, envolvem efeitos que se propagam de maneira instantânea (ver Einstein em Solvay, 1928, p. 254). Essa visão é próxima da de John von Neumann, só que este não associava a função de onda a uma realidade (sua postura era positivista: a função de onda representaria apenas nosso conhecimento), de forma que a não-localidade não era problemática. A interpretação dos estados relativos de Everett (1957), a da decoerência de Zeh (1993) e a das localizações espontâneas (Ghirardi et al., 1986) são outros exemplos de interpretações ondulatórias realistas.

(2) *Interpretação Corpuscular (realista)*. Este é o ponto de vista segundo o qual as entidades microscópicas (ou pelo menos as possuidoras de massa de repouso) são partículas, sem uma onda associada. Esta posição foi defendida explicitamente por Landé (1965-75), dentro da interpretação dos coletivos (*ensembles*) estatísticos. A grande dificuldade da abordagem corpuscular é explicar os padrões de interferência obtidos em experimentos com elétrons. Apesar deste problema não ter sido satisfatoriamente superado, é muito comum encontrarmos interpretações corpusculares na literatura e também, de forma mais ingênua, entre alunos. Interpretações que atribuem valores simultaneamente bem definidos para observáveis incompatíveis (como posição e momento), e que não introduzem grandezas “borradas”, são classificadas como “corpusculares”. A interpretação implícita ao se usar a Lógica Quântica seria um exemplo disso. Na seção 4.4 mencionamos uma versão descritivista da interpretação dos coletivos.

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Esta interpretação foi formulada originalmente por Louis de Broglie, em sua teoria da “onda piloto”, e ampliada por David Bohm (1952) para incluir também o aparelho de medição. O objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas em geral desconhecida), e uma onda associada (ou um “potencial quântico”). A probabilidade da partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. No nível ingênuo de um curso introdutório, esta abordagem está livre do prob-

lema da não-localidade, tendo como única dificuldade conceitual a existência de “ondas vazias”, que não carregam energia. O problema da não-localidade só surge quando se consideram duas partículas correlacionadas, como foi demonstrado por John S. Bell.

(4) *Interpretação Dualista Positivista*. Esta expressão designa especialmente a interpretação da complementaridade de Niels Bohr (1928), que reconhece uma limitação em nossa capacidade de representar a realidade microscópica. Conforme o experimento, podemos usar ou uma descrição corpuscular, ou uma ondulatória, mas nunca ambas ao mesmo tempo (esses aspectos excludentes, porém, “exauririam” a descrição do objeto). Isto não significa, porém, que o objeto quântico *seja* um corpúsculo ou *seja* uma onda. Segundo qualquer abordagem positivista (no contexto da física), só podemos afirmar a existência das entidades *observadas*. Afiramar, por exemplo, que “um elétron não-observado sofre um colapso” não teria sentido. Um fenômeno ondulatório se caracteriza pela medição de um padrão de interferência, e um corpuscular pela possibilidade de inferir (ou melhor, “retrodizer”) uma trajetória bem definida. O aspecto pontual de toda detecção (considerada pela interpretação 2 como a maior evidência da natureza corpuscular dos objetos quânticos), que ocorre mesmo em fenômenos ondulatórios, é considerado o princípio fundamental da Teoria Quântica, e chamado por Bohr de “postulado quântico”. Há diversas variações desta abordagem, constituindo as chamadas interpretações “ortodoxas”. Mais recentemente, podemos destacar a interpretação das histórias consistentes de R.B. Griffiths (1984) e Omnès (1992).

Uma maneira de distinguir interpretações é anotar as respostas dadas por cada uma delas a diferentes questões chave. Desenvolvemos este exercício em Pessoa (2003) e em Pessoa (2006) enfocamos as seguintes questões chave: experimento da dupla fenda, interferômetro de Mach-Zehnder, experimento de anti-correlação, o estado quântico, medições em Física Quântica e princípio de incerteza.

V. QUAL É A INTERPRETAÇÃO HEGEMÔNICA HOJE EM DIA?

A interpretação que oficialmente dominou a física entre 1928 e 1970 foi a da complementaridade ou a “interpretação de Copenhague”, também chamada de “ortodoxa”. No entanto, na prática nem todos os físicos trabalhavam efetivamente nesta interpretação, havendo entre muitos físicos teóricos uma tendência a seguir o estilo de von Neumann, na chamada “escola de Princeton”. A abordagem de Feynman é outra variante das interpretações ortodoxas, inter-

pretações estas que são marcadas por uma atitude descritivista ou anti-realista.

Hoje em dia vivemos em uma época de pluralidade de interpretações. Na Cosmologia, a interpretação dos estados relativos de Everett é levada a sério. O dualismo de David Bohm é utilizado por muitos físicos, em busca de novas perspectivas a respeito de algum problema (como o caos quântico ou o efeito túnel). Os conceitos trabalhados pela interpretação da complementaridade são ainda muito usados em Óptica Quântica, mas não se pode dizer que esta interpretação seja hegemônica, como o foi anteriormente.

Dentre os físicos teóricos, e também entre muitos físicos experimentais que se preocupam com questões de fundamento, pode-se observar (ao menos no Brasil) uma ascendência da tese de que “a Teoria Quântica é uma teoria essencialmente estatística”, visão esta que foi fortemente defendida pela tradição conhecida como interpretação dos coletivos (*ensembles*) estatísticos. Um texto importante nesta tradição é o de Ballentine (1970), que defende uma versão realista desta interpretação, seguindo os passos de Kemble, Blokhintsev, Popper, Landé, Margenau e até Einstein, dentre muitos outros. Parece-me que uma interpretação *realista* dos coletivos estatísticos tende a ser uma visão corpuscular (como fica claro em Landé), dada a aversão que autores como Ballentine apresentam em relação à noção de dualidade onda-partícula.

No entanto, parece-me que o que temos hoje em dia como nova ortodoxia é uma *versão descritivista da interpretação dos coletivos*. Um exemplo mais radical de tal postura é Park (1973). Um livro muito influente na área de Fundamentos, que parece se alinhar a essa postura, é Peres (1993). Segundo esta abordagem, não se deve querer aplicar a Teoria Quântica a detecções individuais (como um único elétron sofrendo difração), mas apenas para um grande número de *quanta* submetidos ao mesmo arranjo experimental (que seriam adequadamente representados pelo *ensemble* $|\psi\rangle$).

Num certo sentido, trata-se de um descritivismo mais radical do que o da interpretação da complementaridade, que ao menos aplicava seus conceitos para detecções individuais. Essa visão dos coletivos não nega a realidade de eventos individuais, mas nega que a Teoria Quântica se refira a eles individualmente. No mapeamento da Fig. 4, tal interpretação descritivista dos coletivos poderia se situar à esquerda, na coluna de ontologia corpuscular, acima da visão corpuscular que Heisenberg exprimiu em 1927, pois tratar-se-ia de uma visão mais positivista ainda, no que tange a estipular a que a Teoria Quântica se refere.

Por outro lado, pelo aspecto intencional-emocional, a nova era parece impor de maneira menos autoritária a sua ortodoxia. Aceita-se, de maneira pragmática, o uso de outras inter-

pretações como estratégias heurísticas para auxiliar a descoberta e facilitar a compreensão de um fenômeno. E os físicos, hoje em dia, tendem a reconhecer como legítima a preocupação com os problemas de fundamento na Mecânica Quântica, mesmo que tal preocupação deva ser evitada como tema de pesquisa oficial dentro dos Institutos de Física.

VI. AGRADECIMENTOS

Deste artigo, as seções 1 e 4 foram apresentadas, em 20-21 de setembro de 2006, no minicurso “As Interpretações da Física Quântica”, na 9ª Semana de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana, e se baseiam em partes do artigo Pessoa (2006), com exceção das seções 4.1 e 4.4, que são novas. As seções 2 e 3 são adaptadas de partes (até aqui inéditas) das notas de aula do curso de atualização para professores de ensino médio, realizado na Estação Ciência, São Paulo, em fevereiro e março de 1996. Agradeço aos organizadores da 9ª Semana de Física pelo convite e financiamento de minha estada na Princesa do Sertão.

VII. REFERÊNCIAS

1. BALLENTINE, L.E. (1970), The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics, *Reviews of Modern Physics* 42, 358-81.
2. BARRETT, J.A. (1999), *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford: Oxford University Press.
3. BOHM, D. (1952), “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of ‘Hidden’ Variables, I and II”, *Physical Review* 85, 166-93. Reimpresso em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 369-96.
4. BOHR, N. (1928), “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, *Nature* 121, 580-90. Reimpresso em Bohr, N., *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge: Cambridge University Press, p. 52-91, 1934. Reimpresso também em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 87-126. Tradução para o português em Pessoa Jr., O. (org.), *Fundamentos da Física 1 – Simpósio David Bohm*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, p. 135-59, 2000.

5. ————— (1949), “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Physics”, em P.A. Schilpp (org.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Evanston: The Library of Living Philosophers, 1949, pp. 200-41. Reimpresso em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 9-49. Tradução para o português em Bohr, N., *Física Atômica e Conhecimento Humano, Ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995, pp. 41-83.
6. BORN, M. (1949), *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford: Oxford University Press, pp. 105-6.
7. CLAUSER, J.F. (1991), “Early History of Bell’s Theorem and Experiment”, in Black, T.D. et al. (orgs.), *Foundations of Quantum Mechanics*, World Scientific, Cingapura, pp. 168-74.
8. DORLING, J. (1987), “Schrödinger’s Original Interpretation of the Schrödinger Equation: A Rescue Attempt”, em Kilmister, C.W. (org.), *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 16-40.
9. EVERETT III, H. (1957), “Relative State Formulation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 29, 454-62. (Reimpresso em Wheeler & Zurek (1983), pp. 315-23.)
10. FEYNMAN, R.P. (1948), “Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 20, 367-87.
11. FREIRE JR., O. (1999), *David Bohm e a Controvérsia dos Quanta* (Coleção CLE 27), Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência.
12. GHIRARDI, G.C., RIMINI, A. & WEBER, T. (1986), “Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems”, *Physical Review D* 34, 470-91.
13. GRIFFITHS, R.B. (1984), “Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics”, *Journal of Statistical Physics* 36, 219-72.
14. HEISENBERG, W. (1927), *Zeitschrift für Physik* 43, 172-98. Tradução para o inglês: “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”, in Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 62-84.
15. JAMMER, M. (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Nova Iorque: McGraw-Hill.

16. ————— (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Nova Iorque: Wiley.
17. LANDÉ, A. (1965-75), “Quantum Fact and Fiction. I. II. III. IV.”, *American Journal of Physics* 33 (1965), 123-7; 34 (1966), 1160-6; 37 (1969) 541-8; 43 (1975) 701-4.
18. LONDON, F. & BAUER, E. (1939), *La Théorie de l’Observation em Mécanique Quantique*, Paris: Hermann. Tradução para o inglês em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 217-59.
19. MEHRA, J. & RECHENBERG, H. (1982), *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 1, Nova Iorque: Springer.
20. MONTENEGRO, R. & PESSOA JR., O. (2002), “Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física”, *Investigações sobre Ensino de Ciências* 7(2).
21. NAGEL, E. (1961), *The Structure of Science*, Harcourt, Nova Iorque.
22. OMNÈS, R. (1992), “Consistent Interpretations of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 64, 339-82.
23. PARK, J.L. (1973), “The Self-contradictory Foundations of Formalistic Quantum Measurement Theories”, *International Journal of Theoretical Physics* 8, 211-8.
24. PERES, A. (1993), *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Dordrecht: Kluwer.
25. PESSOA JR., O. (2003), *Conceitos da Física Quântica*, vol. 1, São Paulo: Editora Livraria da Física.
26. ————— (2006), “Mapa das Interpretações da Teoria Quântica”, in Martins, R.A.; Boido, G. & Rodríguez, V. (orgs.), *Física: Estudos Filosóficos e Históricos*, AFHIC, Campinas, 2006, pp. 119-52.
27. REICHENBACH, H. (1944), *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, Berkeley: University of California Press. Republicado pela Dover, Nova Iorque, 1998.
28. SOLVAY, Institut International de Physique (1928), “Discussion Générale des Idées Nouvelles Émises”, in *Électrons et Photons - Rapports et Discussions de Cinquième Conseil*

de Physique, Paris: Gauthier-Villars, pp. 248-89. Tradução para o português em Pessoa Jr., O. (org.), *Fundamentos da Física 2 – Simpósio David Bohm*, São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2001, pp. 139-72.

29. VON NEUMANN, J. (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin: Springer. Tradução para o inglês pela Princeton University Press, 1955.
30. WHEATON, B.R. (1983), *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of the Wave-Particle Dualism*, Cambridge: Cambridge University Press.
31. WHEELER, J.A. & Zurek, W.H. (orgs.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press.
32. WIGNER, E.P. (1963), “The Problem of Measurement”, *American Journal of Physics* 31, 6-15. Reimpresso em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 324-41.
33. ZEH, H.D. (1993), “There are no Quantum Jumps, nor are there Particles!”, *Physics Letters A* 172, 189-92.

SOBRE O AUTOR -

Oswaldo Pessoa Jr. - Doutor em História e Filosofia da Ciência pela Indiana University, com Pós-Doutorado pela UNICAMP, é Professor do Departamento de Filosofia da USP.

email: opessoa@usp.br