

Mapa das Interpretações da Teoria Quântica

Oswaldo Pessoa Jr.

*Depto. de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, 315, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil
opessoa@usp.br*

*Publicado em Martins, R.A.; Boido, G. & Rodríguez, V. (orgs.), *Física: Estudos Filosóficos e Históricos*, AFHIC, Campinas, 2006, pp. 119-52. ISBN: 85-904198-2-7.

Apresentação

Este artigo é um estudo geral das interpretações da teoria quântica. Propõe-se uma classificação dessas interpretações de acordo com um critério epistemológico (positivista ou realista) e um ontológico (corpuscular, ondulatório, dualista ou sem ontologia), considerando-se também o aspecto intencional-emocional. Considera-se então como os quatro grupos gerais de interpretações respondem a seis perguntas relativas a experimentos quânticos. Um exame da literatura a respeito dos grandes grupos interpretativos é feito, culminando com um “mapa” envolvendo quarenta interpretações da teoria quântica.

O seguinte sumário serve como um convite para que o leitor possa ir direto para uma seção que lhe interessa:

1. Considerações Gerais
2. Quatro Grandes Grupos Interpretativos
3. Questões Chave para distinguir as Interpretações
 - 3.1 Experimento da Dupla Fenda
 - 3.2 Interferômetro de Mach-Zehnder
 - 3.3 Experimento de Anti-Correlação
 - 3.4 O Estado Quântico
 - 3.5 Medições em Física Quântica
 - 3.6 Interpretações do Princípio de Incerteza
4. As Principais Interpretações da Teoria Quântica
 - 4.1 As Primeiras Teorias Semi-Clássicas
 - 4.2 A Interpretação da Complementaridade
 - 4.3 Teorias de Variáveis Ocultas
 - 4.4 Interpretações Estocásticas
 - 4.5 Interpretação dos Coletivos Estatísticos
 - 4.6 Interpretações de Potencialidade
 - 4.7 As Interpretações Ortodoxas
 - 4.8 Interpretações Ondulatórias
 - 4.9 Interpretações que questionam a Lógica Clássica
5. Mapa das Interpretações
6. Conclusão

1. Considerações Gerais

A Teoria Quântica, ou seja, a física do mundo microscópico, tem um aspecto notável associado a ela, que é a existência de dezenas de “interpretações” diferentes. Quem tem alguma familiaridade com esta teoria sabe que há uma interpretação “ortodoxa”, e que esta se contrapõe a uma interpretação com “variáveis ocultas”. A literatura de divulgação refere-se frequentemente a uma interpretação de “muitos mundos”, e nas discussões sobre a não-

localidade às vezes se escreve que a interpretação que Einstein teria dado à realidade quântica estaria errada.

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 em nada as previsões observacionais da teoria¹. 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 (e que não desempenhou um papel seletivo na evolução biológica de nosso aparelho cognitivo) 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 de uma 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 teoria². 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). 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

¹ Pode acontecer que uma interpretação faça previsões em desacordo com a teoria, e neste caso deveríamos falar de uma “teoria diferente”; porém, se o desacordo for tão pequeno que não se possa fazer um experimento crucial para escolher entre as teorias, é costume considerar que a teoria diferente também seja uma “interpretação”.

² 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).

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” (segundo 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. Neste artigo, proporemos 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 têm desdobramentos no nível profissional e social. Não utilizaremos o aspecto *intencional-emocional* em nossa classificação das interpretações, mas consideramos pertinente destacar sua relevância.

Um exemplo interessante de como o aspecto intencional-emocional afeta o cognitivo é o seguinte. Alguns autores propõem novos formalismos para a Teoria Quântica, introduzindo conceitos novos que poderiam sugerir uma “interpretação natural” original. No entanto, como estes autores não estavam interessados em propor uma nova interpretação, a teoria é vista como parte da interpretação ortodoxa. Um exemplo típico é a abordagem da distribuição de Wigner (ver, por exemplo, Freyberger & Schleich, 1997), que introduz o conceito de “probabilidade negativa”. A atitude positivista de Wigner foi considerar que tal conceito é meramente um instrumento matemático, mas se ele tivesse uma atitude mais realista (com relação à interpretação natural de sua abordagem), talvez pudesse defender um “realismo de potencialidades” em que tal conceito se referisse ao “grau de impossibilidade” de uma situação (Feynman, 1987). Trocando em miúdos: um estudo mais aprofundado sobre interpretações deveria considerar não apenas situações em que cientistas *declaram* estar apresentando uma nova interpretação, mas também casos em que eles não fazem isso mas que *poderiam declarar*.

2. 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 Erwin 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 interage 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 Alfred Landé (1965-75), dentro da interpretação dos ensembles (coletivos) 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.

(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 problema 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*. Afirmar, 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).

3. Questões Chave para distinguir as Interpretações

Uma maneira de distinguir interpretações é anotar as respostas dadas por cada uma delas a diferentes questões. Desenvolvemos este exercício em Pessoa (2003), e abaixo apresentamos algumas das questões examinadas (em Pessoa, 1998, já examinamos estas mesmas questões, explicando com algum detalhe os experimentos com elétrons).

3.1 Experimento da Dupla Fenda

Como explicar o comportamento de um quantum, como um fóton ou um elétron, no experimento da dupla fenda? Por um lado, o fóton ou elétron se comporta como uma partícula ao ser detectado de maneira bem localizada; por outro, ele se comporta como uma onda, pois a probabilidade de ele incidir em cada ponto segue um padrão de interferência. Mas como é possível uma entidade ser ao mesmo tempo onda e partícula, se tais atributos são contraditórios?

Questão I: Como explicar o experimento das duas fendas para um único quantum?

(1) *Interpretação Ondulatória.* O fóton ou elétron que atravessa a fenda dupla seria na realidade uma onda, não uma partícula. Assim, fica fácil explicar o surgimento do padrão de interferência na tela. O aparecimento de um ponto na tela detectora ocorre devido a um “colapso” da onda, que durante a medição é forçada a se transformar em um “pacote de onda” bem estreito, o que tem a aparência de uma partícula pontual.

(2) *Interpretação Corpuscular.* O fóton ou elétron seria na realidade uma partícula, o que é manifesto quando o detectamos. Não existe onda associada: o padrão de interferência deve ser explicado a partir da troca de momento entre o elétron e a rede de difração (ou outra propriedade do dispositivo que provoca a separação e recombinação do feixe).

(3) *Interpretação Dualista Realista.* Na realidade existiria a partícula (com trajetória bem definida) e uma onda associada (que não carrega energia), conforme postulara L. de Broglie (1926) com sua teoria da “onda piloto”. A probabilidade de a 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. Isso explica de maneira natural o surgimento ponto-a-ponto de uma franja de interferência.

(4) *Interpretação Dualista Positivista.* De acordo com a interpretação da complementaridade de Niels Bohr, o “fenômeno” em questão é ondulatório (ou seja, o quadro que utilizamos para concebê-lo é ondulatório), e não corpuscular (não podemos inferir a trajetória passada de um quantum detectado). O aspecto corpuscular que observamos na detecção se deve ao “postulado quântico”, mencionado acima, que afirma a existência de uma *descontinuidade essencial* (uma indivisibilidade) em qualquer processo atômico, como por exemplo na ionização de átomos da tela detectora.

3.2 Interferômetro de Mach-Zehnder

Ao invés de usar uma dupla fenda, é possível observar um padrão de interferência por meio de um interferômetro de Mach-Zehnder. Neste aparelho, desenvolvido para a luz (há

uma versão para elétrons, ver Pessoa, 1998), divide-se o feixe em dois por meio de um espelho semi-refletor S_1 , resultando nos caminhos A e B . Eles então são recombinados em outro espelho semi-refletor, S_2 . O resultado, no caso de alinhamento perfeito, é que o feixe todo se junta novamente em uma certa direção D_1 , ao passo que na outra direção disponível D_2 ele desaparece por completo (interferência destrutiva) (ver Pessoa, 2003, cap. 2).

O que acontece quando apenas *um* fóton ou elétron incide no interferômetro? A teoria quântica fornece uma resposta simples: ele será detectado com probabilidade 1 (supondo detectores perfeitamente eficientes e esquecendo as perdas) em D_1 e com probabilidade 0 em D_2 . Mas o que acontece quando o fóton ou elétron se encontra *dentro* do interferômetro, antes de ser detectado? Neste caso, cada interpretação dará uma resposta diferente.

Questão II: O que acontece quando o elétron está dentro do interferômetro?

(1) *Interpretação Ondulatória*. O elétron, que pode ser identificado com um pacote de onda propagando-se no espaço, dividir-se-ia em dois após o primeiro divisor de feixes S_1 , conforme preveria a física ondulatória clássica. Esses “meio elétrons” se recombinariam então em S_2 , e devido à interferência destrutiva que ocorre na direção de D_2 , o pacote inteiro termina em D_1 . O que falta explicar é por que nunca se detectam meio elétrons (ver seção seguinte).

(2) *Interpretação Corpuscular*. Como o elétron nunca se divide, ele ruma *ou* pelo caminho A (e nada vai pelo caminho B), *ou* por B (e nada vai por A). No entanto, se o elétron ruma com certeza pelo caminho A (o que pode ser garantido removendo-se S_1), a probabilidade de ele ser detectado em D_2 é diferente de zero; e se ele ruma por B (introduzindo-se um refletor de elétrons em S_1), a probabilidade também é diferente de zero. Porém, a probabilidade de detecção em D_2 é 0! Assim, não podemos dizer simplesmente que o elétron foi *ou* por A *ou* por B . Uma saída sugerida para este impasse é argumentar que a lógica ao nível quântico é de tipo não-clássica, invalidando o raciocínio precedente (ver Pessoa, 2004).

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Esta visão também afirma que o elétron não se divide, mas ela consegue escapar do impasse supramencionado postulando que a onda associada ao corpúsculo divide-se em dois em S_1 e recombina-se em S_2 , levando à interferência. A partícula seria um “surfista” que só pode navegar onde há ondas; como as ondas se cancelam na direção de D_2 , o elétron é obrigado a surfar para D_1 .

(4) *Interpretação Dualista Positivista*. De acordo com a visão de Bohr, um fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular, nunca os dois ao mesmo tempo. O experimento examinado é um fenômeno ondulatório, e portanto *não tem sentido* perguntar onde está o elétron.

3.3 Experimento de Anti-Correlação

Os dois experimentos examinados anteriormente são considerados “fenômenos ondulatórios” pela interpretação da complementaridade. Vejamos agora como as diferentes interpretações explicam um fenômeno “corpuscular”.

Considere um feixe de luz que incide em um *único* espelho semi-refletor S_1 . Naturalmente, a luz se dividirá igualmente nos caminhos A ou B . Acontece que se tivermos um único fóton, ele será detectado em D_A *ou* em D_B (supondo-se detectores perfeitamente eficientes), mas nunca nos dois ao mesmo tempo. Este fenômeno é chamado de “anti-correlação”. Ou seja, ao ser detectado o fóton mantém sua individualidade e não tem sua energia dividida. Como as diferentes interpretações explicam este fenômeno?

Questão III: Como explicar o experimento de anti-correlação?

(1) *Interpretação Ondulatória*. Após atravessar S_1 , o pacote de onda associado ao fóton se divide em dois, o que é expresso pela função de onda $\psi_A + \psi_B$. Porém, ao detectar-se o fóton em D_A , digamos, a probabilidade de detecção em D_B torna-se nula instantaneamente! O estado inicial é reduzido, neste caso, para ψ_A . Como, nesta interpretação, o estado corresponde a uma onda de probabilidade “real”, conclui-se que ocorreu um processo de *colapso* do pacote de onda.

(2) *Interpretação Corpuscular*. Neste caso a explicação é direta: a partícula simplesmente seguiu uma das trajetórias possíveis (A ou B), indo parar nos detectores D_A ou D_B . Não é preciso falar em “colapso”.

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Esta visão também considera que, após S_1 , a partícula seguiu uma das trajetórias A ou B , incidindo então no detector correspondente. Mas existiria também uma onda associada, que se dividiu em duas partes. A parte não detectada constituiria uma “onda vazia” que não carrega energia e não pode ser detectada. Temos assim uma proliferação de entidades, mas isso não leva a nenhuma consequência observacional indesejável.

(4) *Interpretação Dualista Positivista*. Completada a medição, a interpretação da complementaridade consideraria este fenômeno como sendo corpuscular. O fóton pode assim ser considerado uma partícula que seguiu uma trajetória bem definida. Tal inferência com relação à trajetória passada do quantum detectado é chamada de *retrodição*. Ao examinarem o princípio de incerteza, tanto Bohr ([1928] 1934, p. 66) quanto Heisenberg (1930, pp. 20, 25) salientaram que a retrodição é uma hipótese metafísica, que não precisa ser aceita (apesar de sua aceitação não levar a contradições); no entanto, ao definir um “fenômeno”, Bohr acabou fazendo uso implícito desta hipótese.

3.4 O Estado Quântico

Um conceito central a ser interpretado é o de “estado” $|\psi\rangle$. A que se refere este termo teórico? Vejamos como cada visão aborda esta questão.

Questão IV: A que se refere o estado quântico?

(1) *Interpretação Ondulatória*. Interpreta $|\psi\rangle$ de maneira “literal”, atribuindo realidade ao estado ou à função de onda, e sem postular que exista nada além do que descreve o formalismo quântico. Mas que espécie de realidade é essa? Não é uma realidade “atualizada”, que possamos observar diretamente. É uma realidade intermediária, uma *potencialidade*, que estabelece apenas probabilidades, mas que mesmo assim evolui no tempo como uma onda. O maior problema desta interpretação de estado é que, para N objetos quânticos, a função de onda é definida num espaço de configurações de $3N$ dimensões: o que significaria uma realidade com $3N$ dimensões?

(2) *Interpretação Corpuscular*. O estado $|\psi\rangle$ seria uma descrição essencialmente estatística, que representa a média sobre todas as posições possíveis da partícula. Em linguagem técnica, o estado representa um coletivo ou ensemble estatístico, associado a um procedimento de preparação experimental. Assim, esta visão considera que o estado quântico representa uma descrição *incompleta* de um objeto individual.

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Considera que existam “variáveis ocultas” por trás da descrição em termos de estados, variáveis essas que são as posições e velocidades das partículas. O estado $|\psi\rangle$ exprimiria um campo real em 3 dimensões que “guia” as partículas. Essa “onda piloto”, porém, não carregaria energia, que se concentraria na partícula. A descrição através do estado quântico seria incompleta, só se completando com a introdução dos parâmetros ocultos.

(4) *Interpretação Dualista Positivista*. Considera que o estado $|\psi\rangle$ é meramente um

instrumento matemático para realizar cálculos e obter previsões (esta visão chama-se “instrumentalismo”). Heisenberg ([1958] 1981, p. 25) exprimiu isso de maneira radical ao escrever que a mudança descontínua na função de probabilidade é “uma mudança descontínua em nosso conhecimento”, o que constitui uma visão *epistêmica* do estado quântico. A interpretação dos coletivos estatísticos (o item 2 acima) também compartilha desta visão; a diferença, porém, está em que a interpretação da complementaridade considera que o estado quântico seja a descrição mais “completa” de um objeto quântico individual. Ênfase também é dada ao *relacionismo*: a realidade de um fenômeno quântico só existe na relação entre objeto microscópico e aparelho de medição.

3.5 Medições em Física Quântica

O historiador da ciência Max Jammer defende a tese de que Bohr, antes de adotar a posição relacionista, tinha uma concepção de “interacionalista”: em geral, uma partícula só passa a ter um valor bem definido p_x de momento (por exemplo) após ela ter interagido com o aparelho de medição e o resultado p_x ter sido obtido. Pascual Jordan (1934) exprimiu isso de maneira mais radical: “nós mesmos produzimos os resultados da medição” (ver Jammer, 1974, p. 161).

Existe um certo consenso que a grandeza que é diretamente medida, tanto em medições na Física Clássica quanto Quântica, é a *posição* (velocidade, momento, etc. seriam medidos indiretamente a partir de medições de posição). Vejamos nesta seção como as diferentes interpretações encaram a medição de uma grandeza como a posição x .

Questão V: O que se pode dizer sobre a existência prévia de um valor medido de posição x ?

(1) *Interpretação Ondulatória*. No caso em que um objeto quântico encontra-se em uma superposição de auto-estados de posição (ou seja, a função de onda $\psi(x)$ não é fortemente centrada em torno de um valor de x), não se pode atribuir um valor bem definido para a posição. Após a medição, supondo-se que o valor x_0 foi obtido, ocorre um colapso da onda espalhada para uma onda fortemente centrada em torno de x_0 (segundo o postulado da projeção). Após a medição, então, pode-se atribuir um valor bem definido para a posição, mas não antes.

(2) *Interpretação Corpuscular*. Nesta interpretação, é usual aceitar-se que as medições de posição são *fidedignas*: elas revelam o valor da posição possuído pela partícula antes do processo de medição. Além disso, logo após a medição a posição da partícula permanece a mesma. No entanto, para explicar adequadamente experimentos em que observáveis incompatíveis são medidos em sucessão, é preciso admitir que a medição de posição provoca um *distúrbio* incontrolável e imprevisível no momento da partícula. Esta, de fato, foi a interpretação adotada por Heisenberg em sua derivação semi-clássica do princípio de incerteza (ver na seção seguinte).

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Segundo esta visão, medições de posição são fidedignas, revelando o valor possuído antes da medição. Tal medição provoca uma alteração instantânea na onda associada, o que afeta o momento de maneira imprevisível (a alteração na onda dependeria do estado microscópico do aparelho de medição, o que nunca é conhecido pelo cientista).

(4) *Interpretação Dualista Positivista*. Para uma interpretação que tende a atribuir realidade apenas para o que é observado, a rigor não faz sentido perguntar qual era a posição de uma partícula antes da medição. Isto é expresso no “interacionalismo” mencionado acima, com a citação de Jordan. Porém, em sua versão “relacionista”, a interpretação da complementaridade acaba adotando a retrodição. Neste caso, então, é plausível dizer, *após* a

deteção de um quantum em uma certa posição x_0 (tanto para fenômenos corpusculares quanto ondulatórios), que a posição do objeto quântico logo antes da medição era x_0 (mas *antes* da medição é incorreto dizer que “ele tem uma posição bem definida, mas desconhecida”, pois o detector pode ser subitamente removido e uma interferência entre os diferentes caminhos pode ser provocada).

3.6 Interpretações do Princípio de Incerteza

Para finalizar este capítulo, examinemos como os diferentes grupos interpretativos encaram as *relações de incerteza* para pares de grandezas “incompatíveis”, derivadas originalmente em 1927 por Heisenberg. Para simplificar a discussão, consideraremos a relação envolvendo posição x e o componente do momento p_x : $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$.

Questão VI: O que significa a relação de incerteza?

(1) *Interpretação Ondulatória*. Atribuindo uma realidade apenas para o pacote de onda (sem postular a existência de partículas pontuais), Δx mede a extensão do pacote, indicando que a posição x do objeto quântico é indeterminada ou mal definida por uma quantidade Δx . A relação exprime assim um princípio de *indeterminação*: se x for bem definido, p_x é mal definido, e vice-versa.

(2) *Interpretação Corpuscular*. Os proponentes da interpretação dos coletivos estatísticos tendem a afirmar que é possível conhecer simultaneamente x e p_x com boa resolução. Uma maneira de fazer isso, para uma partícula livre, seria primeiro medir p_x , supor que esta se conserva (pois é uma variável de “não-demolição”), e depois medir x . Fazendo uso da hipótese de que a medição de posição é fidedigna (ver seção anterior, item 2), ter-se-iam valores simultaneamente bem definidos para x e p_x , logo antes da segunda medição! Desta forma, segundo esta interpretação, o princípio de incerteza não proibiria a existência de valores simultâneos bem definidos para uma mesma partícula. O que ocorreria (segundo argumentou Margenau, 1937, p. 361) é que se preparamos o mesmo estado quântico $|\psi\rangle$ várias vezes, e medirmos p_x e x para cada preparação, obteremos valores que variam de uma medição para outra. Ao colocar estes valores em um histograma de x e p_x , obter-se-ão os desvios padrões Δx e Δp_x . Assim, o princípio de incerteza seria exclusivamente uma tese estatística, ao contrário do que afirmam as outras interpretações, que também aplicam este princípio para casos individuais (ver também Ballentine, 1970).

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Segundo esta visão, a partícula tem sempre x e p_x bem definidos simultaneamente, só que tais valores são desconhecidos. Se medirmos x com boa *resolução*, temos necessariamente uma *incerteza* ou desconhecimento grande para p_x , pois a medição de x por um aparelho macroscópico provoca um distúrbio incontrolável no valor de p_x . Com relação ao princípio da incerteza, esta interpretação é bastante próxima da visão corpuscular vista acima.

(4) *Interpretação Dualista Positivista*. Vimos que um fenômeno não pode ser corpuscular e ondulatório ao mesmo tempo. De maneira análoga, seria impossível medir simultaneamente x e p_x com resoluções menores do que Δx e Δp_x dados pela relação de incerteza. Curiosamente, o argumento original de Heisenberg para justificar as relações de incerteza, por meio de um microscópio de raios gama, pode ser enquadrado nas interpretações 2 ou 3 (sendo por isso às vezes chamado de argumento “semi-clássico”). Mas como ele defendia uma tese *positivista*, segundo a qual só tem realidade aquilo que é observável, ele pôde concluir neste caso (após a determinação da posição) que “não tem sentido” falar em uma partícula com momento bem definido.

4. As Principais Interpretações da Teoria Quântica

Dividimos as interpretações da Teoria Quântica em quatro grandes grupos, segundo dois critérios: (i) *Ontologia*: qual é a natureza última da realidade física? Corpúsculos, ondas ou algum tipo de dualismo? (ii) *Epistemologia*: até que ponto a teoria descreve essa realidade? Ela só descreve a realidade que podemos observar e medir (positivismo) ou seus conceitos teóricos também representam corretamente (ou deveriam representar) uma realidade por trás das observações (realismo)?

Os quatro grupos de interpretações que obtivemos foram: (1) Ondulatória, (2) Corpuscular, (3) Dualista Realista e (4) Dualista Positivista. As interpretações ondulatórias e corpusculares tendem a ser realistas, mas elas também apresentam versões mais positivistas, e a transição entre os diferentes grupos acaba sendo bastante suave, como veremos. Iniciemos fazendo uma comparação entre a divisão apresentada aqui e as classificações usuais das interpretações.

Nos capítulos de seu famoso livro sobre a Filosofia da Mecânica Quântica, Max Jammer (1974) nos apresenta cinco grupos de interpretações: (i) as semi-clássicas pioneiras, (ii) a da complementaridade, (iii) as teorias de variáveis ocultas, (iv) as estocásticas e (v) as estatísticas. Pode-se também adicionar uma sugestão de Redhead (1987, cap. 2) e de outros: (vi) as de potencialidade.

4.1 As Primeiras Teorias Semi-Clássicas

As teorias *semi-clássicas* pioneiras consideradas por Jammer são interpretações realistas que surgiram entre 1926-27. Elas envolvem basicamente o que chamamos de interpretações ondulatória e dualista. As ondulatórias incluem a visão eletromagnética inicial de E. Schrödinger (1926) e a interpretação hidrodinâmica de E. Madelung (1926), esta subseqüentemente desenvolvida por outros, inclusive o brasileiro Mário Schönberg (1954). Uma das dualistas consiste da teoria da onda piloto de L. de Broglie (1926), abandonada no ano seguinte e retomada em 1952.

Entre as teorias semi-clássicas, Jammer também inclui a interpretação probabilista inicial de Max Born (1926), segundo a qual $|\psi(r)|^2$ exprime a *probabilidade* de se encontrar *uma partícula clássica* em uma certa região. Para explicar os fenômenos de interferência, tal partícula seria acompanhada de um “campo fantasma” (termo usado por Einstein), uma “onda de probabilidade” que se propagaria no espaço. Isso torna sua visão dualista, apesar de Jammer preferir vê-la como corpuscular.

Subseqüentemente, esta interpretação de Born foi enfraquecida, e $|\psi(r)|^2$ passou a exprimir a probabilidade de se *medir* um quantum por meio de um detector localizado em uma certa região. Por ter sido incorporada no formalismo mínimo da Teoria Quântica, chamamos esta tese de “regra de Born” (e não “interpretação probabilista de Born”). A rigor, a regra de Born não deveria se referir nem a “probabilidade”, mas sim a “frequência relativa”, que é o dado diretamente observável na base empírica. Considerar que a frequência relativa medida é uma “probabilidade” é, estritamente falando, uma *interpretação* do formalismo. Aceitando-se esta interpretação da Teoria Quântica (o que é usual), chega-se a diferentes visões do mundo quântico, conforme a interpretação adotada para a noção de probabilidade (dentro da Teoria das Probabilidades).

4.2 A Interpretação da Complementaridade

A interpretação tida como a mais aceita entre os físicos é a *interpretação da complementaridade* desenvolvida por Niels Bohr no período 1927-35, e cujas teses foram expostas acima como representando o dualismo positivista. Ela é também conhecida como interpretação de Copenhague, cidade de Bohr onde Heisenberg trabalhava na época, e onde Pauli se reuniu com eles em junho de 1927 para conciliar suas opiniões divergentes. Heisenberg havia escrito seu famoso artigo sobre o princípio da incerteza enfatizando uma interpretação corpuscular. Bohr, que desenvolvera sua idéia de complementaridade durante uma viagem para esquiar na Noruega em março, encontrou diversos erros no artigo, e salientava que tanto o quadro ondulatório quanto o corpuscular eram necessários para derivar o princípio da incerteza. Pauli e Bohr acabaram convencendo Heisenberg que a complementaridade era consistente com o princípio de incerteza, e assim nasceu a nova interpretação que logo adquiriria o consenso da comunidade dos físicos, deixando para trás as visões semi-clássicas mencionadas na seção anterior.

O *princípio da complementaridade* afirma que um experimento pode ser representado ou num quadro corpuscular, ou num quadro ondulatório, conforme a situação. Dizer que estes quadros são complementares significa que eles são mutuamente excludentes, mas juntos exaurem a descrição do objeto atômico. Um experimento se enquadra numa representação corpuscular se for possível inferir as trajetórias dos quanta detectados. Ele se enquadra numa representação ondulatória se apresentar um padrão de interferência. É uma tese empírica (ou seja, uma tese cuja aceitação independe da interpretação adotada) que um mesmo arranjo experimental não pode exibir padrões de interferência claros e trajetórias sem ambigüidade (ver Pessoa 1998).

Por que não seria possível abarcar um objeto quântico em um quadro mais geral e único? Porque, segundo Bohr, estamos limitados à linguagem da Física Clássica, a linguagem que usamos para comunicar aos outros como é um arranjo experimental e quais são os resultados das medições, a linguagem que descreve o mundo macroscópico. Precisamos de aparelhos descritíveis em linguagem clássica para ter acesso ao mundo quântico. ¿Isso implicaria no *macro-realismo*, ou seja, a tese de que objetos macroscópicos (como o gato de Schrödinger) não podem exibir propriedades quânticas? Não necessariamente: o que Bohr defende é que é sempre preciso um aparelho clássico para medir propriedades quânticas, mas partes deste aparelho podem ser tratados como um sistema quântico.

Conforme mencionamos na seção 3.1, o ponto de partida de Bohr foi o “postulado quântico”, que atribui a qualquer processo atômico uma “descontinuidade essencial” ou “individualidade”. Segundo Bohr, uma consequência disto é a impossibilidade de controlar ou prever os distúrbios provocados no objeto quântico pela interação com o aparelho de medição.

Em 1935, Einstein, Podolsky & Rosen (EPR) publicaram seu famoso artigo em que argumentavam que a Mecânica Quântica é uma teoria incompleta (tese esta compartilhada pela interpretação dos coletivos estatísticos). O argumento envolvia um par de partículas correlacionadas que se encontravam a uma certa distância entre si. Supondo que as operações de medição em uma das partículas não poderiam afetar instantaneamente a outra partícula (a tese de *localidade*), concluíram que haveria elementos de realidade os quais a Teoria Quântica não conseguiria descrever (por isso seria incompleta).

Para responder a EPR, Bohr foi obrigado a refinar sua interpretação, passando a dar ênfase à *totalidade* que engloba o arranjo experimental e objeto quântico, cunhando o termo “fenômeno” para se referir a uma instância desta totalidade. Assim, mesmo que uma aparelhagem possua partes separadas a grandes distâncias entre si, uma alteração em uma dessas partes modificaria a totalidade do fenômeno, modificando os elementos da realidade. Não haveria assim elementos da realidade não descritos pela Mecânica Quântica: a teoria

seria completa. A essência do argumento de Bohr parece ter sido justamente a rejeição (não muito explícita) da noção de localidade de Einstein, por meio de sua concepção de totalidade (ver Bohr 1949). A alteração de uma parte distante do aparelho seguido de medição resultaria numa modificação instantânea da função de onda global. Porém, como a função de onda não se refere à realidade (segundo esta interpretação), isso não violaria de maneira explícita a suposição da localidade (apenas com Bohm, em 1952, é que tal tese viria a ser explicitamente questionada).

Ao responder a EPR, portanto, Bohr passou a priorizar a totalidade envolvendo aparelho e objeto, resultando numa concepção “relacionalista”, segundo o qual o estado quântico é definido pela relação entre o objeto quântico e o aparelho de medição inteiro.

Na seção 4.7 examinaremos estas e outras nuances de opinião entre os fundadores da Mecânica Quântica, formando o agrupamento de visões que constituem *interpretações ortodoxas*.

4.3 Teorias de Variáveis Ocultas

As *teorias de variáveis ocultas* são propostas que introduzem parâmetros adicionais à Teoria Quântica, parâmetros esses que não são diretamente observáveis, mas cujos valores determinam univocamente o resultado de uma medição e, na média, fornecem os valores esperados da Mecânica Quântica. Segundo Jammer, o russo J.I. Frenkel, assistente de Born, teria esboçado uma interpretação deste tipo em 1926. Em 1932, von Neumann apresentou sua famosa prova da impossibilidade de variáveis ocultas, prova esta que não abarcava todas as possibilidades de teorias de variáveis ocultas, conforme mostraria claramente J.S. Bell apenas em 1966. A prova de von Neumann não considerava, entre outras coisas, a possibilidade das variáveis ocultas pertencerem ao aparelho de medição.

Foi justamente essa propriedade (chamada de *contextualismo*) que viabilizou a interpretação dualista realista de David Bohm (1952). Escrevendo a função de onda como $\psi(x) = R(x) \exp[iS(x)/\hbar]$, onde S e R são funções reais, Bohm supôs que $\psi(x)$ descrevesse um “coletivo” (*ensemble*) de partículas com posição x e momento dado por $p = \nabla S(x)$. Posição e momento seriam assim as variáveis ocultas de sua interpretação. Obteve então a equação de movimento newtoniana, $ma = -\nabla V(x)$, onde o potencial $V(x)$ é a soma de um potencial clássico e do *potencial quântico* $U(x)$, que tem a seguinte forma: $U(x) = -(\hbar^2/2m) \nabla^2 R(x)/R(x)$. Note que mesmo que o módulo R da função de onda tenha um valor pequeno (correspondendo a um rabo longínquo de ψ), o potencial pode ter um valor apreciável (já que R aparece tanto no numerador quanto no denominador). O potencial $U(x)$, que exprime o aspecto ondulatório do modelo, tem a propriedade de ser “não-local” (ou seja, age de maneira instantânea mesmo a longas distâncias), além de não possuir uma fonte bem definida. Mais recentemente, houve um renascimento do interesse na “mecânica bohmiana”, só que o potencial quântico passou a ser encarado de maneira não-realista, como uma hipótese desnecessária (ver Cushing et al., 1996).

A *interpretação da onda piloto* proposta por L. de Broglie em 1926-27 é formalmente igual à de Bohm para uma partícula, mas difere para mais partículas. Para de Broglie, a partícula é considerada uma “singularidade” do seu próprio campo ψ (comportando-se como um sóliton), e as ondas deste campo se propagam no espaço físico de 3-dimensões, e não no espaço de configurações, como para Bohm. Uma consequência experimental desta interpretação foi proposta por Croca et al. em 1990, mas sua previsão foi refutada por Wang, Zou & Mandel (1991), o que derrubou a interpretação da onda piloto no espaço tridimensional.

Interpretações que introduzem variáveis ocultas podem ser corpusculares, ondulatórias ou dualistas, ou podem até não ter nenhuma interpretação física. A teoria de Bohm & Bub (1966), por exemplo, introduz um espaço de Hilbert adicional (sem interpretação física), sendo que o vetor deste espaço (distribuído aleatoriamente) é a variável oculta (ver Belinfante, 1973).

4.4 Interpretações Estocásticas

As *interpretações estocásticas* são teorias de variáveis ocultas que se caracterizam por inspirarem-se na teoria do movimento browniano, e no fato de que a equação de Schrödinger é formalmente igual a uma equação de difusão com coeficiente imaginário. Tais teorias são essencialmente classicistas, sendo em geral corpusculares e procurando ser locais. Para F. Bopp (1954), as ondas materiais da Física Quântica são resultado do movimento coletivo de partículas submicroscópicas (como no caso do som). Mais recentemente, a chamada “eletrodinâmica estocástica” tem mantido a ontologia corpuscular para partículas com massa, mas considera a luz como uma onda clássica cujas condições de contorno incluem flutuações do vácuo eletromagnético (Boyer, 1975). Geralmente tais interpretações conseguem derivar a equação de Schrödinger, mas têm dificuldade em explicar o processo de medição (ver resenha em Ghirardi et al., 1978).

4.5 Interpretação dos Coletivos Estatísticos

As interpretações estatísticas, ou *dos coletivos estatísticos*, defendem que a função de onda não se refere a um sistema individual, mas sim a um coletivo (ensemble) de sistemas preparados de maneira semelhante. Os norte-americanos J. Slater (1929) e E. Kemble (1937) defenderam tal posição, que tornou-se bastante popular na União Soviética (Blokhintsev), como forma de reação contra o subjetivismo das interpretações ortodoxas. K. Popper, H. Margenau e A. Landé são outros defensores desta linha, sendo que o último declarava explicitamente: “Partículas, sim! Ondas, não!”. A noção de “dualidade onda-partícula”, assim como a de “colapso do pacote de onda”, são rejeitados nesta visão corpuscularista.

L. Ballentine, em um influente trabalho de 1970, defendeu que a interpretação dos coletivos estatísticos não precisa se comprometer com uma ontologia, o que levou à distinção entre: (i) uma *interpretação “mínima” dos coletivos*, que agrega ao formalismo mínimo da teoria apenas a tese de que o estado representa um coletivo, sendo que a natureza dos elementos deste coletivo é deixada em aberto; (ii) e uma interpretação envolvendo variáveis ocultas, em geral corpuscular, que alguns chamam de *interpretação dos coletivos com valores intrínsecos*. Esta última é claramente realista, enquanto que a primeira é mais positivista (como exemplo de uma interpretação positivista dos coletivos, ver Park, 1973).

Talvez o aspecto mais sedutor da interpretação dos coletivos seja sua análise do princípio de incerteza, que apresentamos na seção 3.6.

A maior dificuldade de qualquer visão corpuscular é explicar experimentos de interferência. Landé (1965-75) argumentou que isso é possível a partir da antiga proposta de W. Duane (1923), segundo a qual ocorreria uma transferência discreta de momento da rede cristalina (que constitui o anteparo difrator) para a partícula (que é difratada). Tal explicação, porém, não funciona para experimentos de interferência sem anteparos rígidos, como o biprisma eletrônico (conforme apontado por Rosa, 1979; ver também Home & Whitaker, 1992).

4.6 Interpretações de Potencialidade

Michael Redhead (1987) agrupa as interpretações da Mecânica Quântica em três grupos principais, de acordo com a resposta a seguinte questão (comparar com a seção 3.5): o que se pode dizer sobre o valor de um observável Q , quando o sistema não está em um autoestado do operador correspondente? (Visão A:) As teorias de variáveis ocultas defendem que Q tem um valor bem definido mas desconhecido. (Visão C:) A complementaridade afirma que o valor de Q não é definido ou é “sem sentido”. (Visão B:) O último grupo propõe que Q tem um valor mal definido, difuso, borrado, “fuzzy”.

O que esta visão B propõe, segundo Redhead, é que na realidade o sistema não possui valores definidos, mas sim propensões ou *potencialidades* para produzir diferentes resultados de medição. Esta noção aristotélica de potencialidades que são atualizadas durante medições aparece na década de 50 nos escritos de Heisenberg, que podemos enquadrar na interpretação ortodoxa. Esta idéia também é formulada por Margenau (1954), com suas grandezas “latentes” (interpretação dos coletivos). Redhead conclui que esta visão é realista.

Esta noção de potencialidade ou realidade intermediária também pode ser atribuída às interpretações que chamamos de “ondulatória”. Argumentaremos mais adiante (seção 4.8) que esta é uma importante classe de interpretações, mas livros como o de Jammer (1974) tendem a omitir este agrupamento (Jammer descreve algumas destas interpretações em diferentes capítulos do seu livro). A noção de potencialidade também se identifica com a “ordem implicada” proposta mais recentemente por David Bohm.

É curioso que diferentes classes de interpretações (o que chamamos de corpuscular, ondulatória e dualista positivista) fazem uso dessa noção de potencialidade ou realidade potencial.

4.7 As Interpretações Ortodoxas

Examinaremos agora as nuances que existem entre diferentes interpretações usualmente classificadas como “ortodoxas”. Em geral elas têm um compromisso com o *dualismo*, mas as fronteiras com as interpretações corpusculares, de um lado, e ondulatórias, de outro, são um tanto quanto difusas. A maioria apresenta também uma postura *positivista*, mas novamente a fronteira com o dualismo realista é suave.

(a) *Interpretação da Complementaridade*. Esta é a “interpretação de Copenhague” defendida por Bohr desde 1927, e com uma maior ênfase no relacionismo a partir de 1935 (ver seção 4.2). Pauli e Rosenfeld se mantinham bastante próximos desta posição, Heisenberg e Born um pouco mais distantes. O positivismo adotado impede que se atribua um tipo de fenômeno (onda ou partícula) a um experimento antes que a medição se complete. Porém, após a medição, Bohr aceitava o uso da retrodição.

(b) *Interpretação Ondulatória Positivista*. Este termo se refere à postura adotada por von Neumann (1932), por Wigner (1963), e por boa parte dos físicos teóricos. Ênfase é dada ao vetor de estado $|\psi\rangle$, que é reduzido (sofre colapsos) após medições; até mesmo o aparelho de medição é descrito por um vetor de estado. Esta posição é às vezes chamada de “interpretação de Princeton”. Ela não atribui explicitamente realidade a $|\psi\rangle$ (neste sentido, é positivista), mas os cálculos são feitos como se $|\psi\rangle$ correspondesse a uma realidade.

(c) *Interpretação Subjetivista*. Esta é a abordagem adotada por London & Bauer (1939), defendida ocasionalmente por Wigner (1962) e alguns outros (como Jeans, Eddington e Heitler), e ressurgida na década de 90 (por exemplo, com H. Stapp). Adotando uma visão ondulatória, argumenta que a consciência humana é responsável pelo colapso. Nas palavras de London & Bauer: “a transformação irreversível no estado do objeto medido” seria devida à

“faculdade de introspecção” ou ao “conhecimento imanente” que o observador consciente tem de seu próprio estado. Esta postura é um desdobramento de (b), sendo que $|\psi\rangle$ pode ser tratado como algo real. Neste caso, não é uma visão positivista (descritivista), mas é idealista, no sentido de que a realidade descrita pela Mecânica Quântica depende da presença de um observador humano.

(d) *Interpretação Macrorealista da Complementaridade*. A escola russa que defendeu a complementaridade (Fock, 1957, e Landau, segundo Bell, 1990, seção 6) não aceitava a postura de Bohr e von Neumann, segundo a qual a fronteira entre os mundos quântico e clássico podia ser traçada em qualquer ponto na cadeia ligando o objeto ao *observador* (“paralelismo psicofísico”). De maneira mais objetiva, esta escola russa atribuía propriedades clássicas a objetos macroscópicos em geral. Uma posição próxima foi defendida por Ludwig (1961), que postulou que, para corpos macroscópicos, correções não-lineares para a equação de Schrödinger impoariam um comportamento clássico.

(e) *Interpretação “Eclética”*. Jammer (1974, p. 68) atribui a Heisenberg a seguinte postura, no início de 1927: tanto uma interpretação exclusivamente corpuscular quanto uma exclusivamente ondulatória poderiam ser associadas ao formalismo quântico. Em 1930, Heisenberg ainda pensava segundo cada um destes quadros, mas já sublinhava que cada qual tinha suas limitações. Esse ecletismo é às vezes adotado em Teoria Quântica de Campos para explicar o sucesso tanto da abordagem corpuscular de Feynman quanto a ondulatória de Schwinger.

(f) *Leituras realistas da Complementaridade*. Este é um caminho a ser explorado no futuro. Em 1927-28, Bohr apresentou o princípio da complementaridade opondo “definição” (um estado puro de um sistema fechado) e “observação” (uma medição torna o sistema aberto e introduz o indeterminismo). Abandonou esta caracterização, porém, por que não fazia sentido para o positivismo se referir a um sistema não-observado. Leituras realistas, porém, podem retomar este tipo de complementaridade. David Bohm, em seu livro-texto de 1951, fez também uma leitura mais realista da complementaridade (fracassando em alguns pontos), salientando que a imprevisibilidade está ligada ao acoplamento do objeto quântico ao universo como um todo (durante a medição). Em outra direção, leituras realistas da complementaridade levam a situações paradoxais, como a afirmação de que “o fóton sabe qual será o arranjo experimental no futuro”, o que serve para aumentar o mistério da Teoria Quântica aos olhos do grande público. John Wheeler faz este tipo de leitura realista da complementaridade, concluindo (no experimento de escolha demorada, devido à retrodição) que “o passado não tem existência enquanto ele não é registrado no presente” (Wheeler 1983, p. 194).

(g) *Instrumentalismo radical*. Numa revisão de possíveis interpretações para o problema da medição, Wigner (1983) mencionou a visão segundo a qual o objetivo da Mecânica Quântica não seria descrever uma realidade, mas sim apenas fornecer correlações estatísticas entre observações seguidas. Este ponto de vista “instrumentalista” é bastante comum entre os físicos, levando ao extremo o positivismo da interpretação ortodoxa e a visão epistêmica do estado quântico. J. Park (1973), um discípulo de Margenau, chegou a esta posição a partir da interpretação dos coletivos estatísticos: “a Mecânica Quântica é uma teoria sobre a estatística de resultados de medições”.

(h) *Interpretação Estroboscópica*. Dentro desta linha radical encontra-se uma interpretação corpuscular *estroboscópica*, segundo a qual as partículas da natureza dão saltos descontínuos de uma posição para outra, conforme o registro macroscópico que é deixado, por exemplo, em uma câmara de nuvem de Wilson. Heisenberg (1927, p. 63) discute esta possibilidade, salientando que neste caso a velocidade instantânea não é definida (ver também Bohm, 1951, p. 144-8).

(i) *Interpretação da Matriz-S*. Outra versão instrumentalista é a interpretação dada pela Teoria da Matriz-S. Esta abordagem descreve processos de espalhamento considerando apenas

os estados assintóticos inicial e final, e a matriz-S que relaciona um ao outro. Sob certas condições, mostra-se que esta abordagem é idêntica à aplicação da equação de Schrödinger, tendo porém a vantagem de ser facilmente estendida para o domínio relativístico (Stapp, 1971).

(j) *Interpretação da Soma sobre Histórias*. Em 1948, Feynman apresentou sua abordagem da “soma sobre histórias”, desenvolvida em Teoria Quântica de Campos Relativísticos, como uma nova interpretação da Teoria Quântica. Uma partícula percorreria todas as trajetórias possíveis, e a função de onda seria a soma destas amplitudes (histórias). Esta abordagem salienta o quadro corpuscular, mas vale a pena investigar até que ponto ela é uma visão não-ondulatória.

4.8 Interpretações Ondulatórias

As visões ondulatórias consideram que o estado quântico corresponde a algum tipo de realidade (ao contrário das ortodoxas), e negam que existam partículas pontuais que seguem trajetórias contínuas. Assim, em comum com a interpretação da complementaridade, e ao contrário das interpretações dos coletivos estatísticos, estocástica e dualista realista, aceitam que a descrição por meio do estado quântico é completa, e que sistemas preparados no mesmo estado são de fato idênticos.

Max Born, em certa ocasião, defendeu a realidade de $|\psi\rangle$ ao escrever: “Eu pessoalmente gosto de considerar uma onda de probabilidade, mesmo no espaço 3N-dimensional, como uma coisa real, como certamente mais do que um instrumento para cálculos matemáticos. Pois ele tem a característica de um invariante de observação” (Born, 1949, pp. 105-6). Em contrapartida, mas por esta mesma razão, Heisenberg ([1958] 1981, p. 78) prefere considerar a onda ψ como algo “objetivo”, mas não “real”.

Nos últimos anos, tem aumentado o número de propostas interpretativas condizentes com a visão ondulatória de que a função de onda corresponde a uma realidade. Um argumento positivista usado contra esta visão é que não se pode atribuir realidade a ψ porque seria impossível determinar o estado quântico a partir de uma única medição. Tentando refutar este argumento, Aharonov et al. (1993) propuseram uma nova classe de medições, chamadas “protetoras”, que permitiriam determinar o estado quântico. Tal proposta, no entanto, tem sido bastante criticada.

Façamos agora um apanhado da tradição de interpretações ondulatórias, que tem sido pouco estudada (um representante da qual já examinamos na seção 4.9c).

(a) *Interpretação Eletromagnética*. Na proposta original de Schrödinger (mencionada na seção 4.1.), $e|\langle\psi_i|\psi\rangle|^2$ representaria uma densidade de carga clássica (onde e é a carga total do sistema), de forma que teríamos “ondas materiais” e não “ondas de probabilidade”. Tais ondas se propagariam de maneira determinista, resgatando a visualização clássica. Partículas seriam na verdade pacotes de onda.

Os argumentos colocados na época que minaram esta proposta foram: (i) *Alta dimensionalidade de ψ* . Para N partículas, $|\psi\rangle$ é definido no espaço de configurações de $3N$ dimensões. Como interpretar isso? (ii) *Partículas como pacotes de onda*. Pacotes de onda se dispersam com o passar do tempo, ao contrário do que ocorre no caso especial examinado por Schrödinger do oscilador harmônico quântico. (iii) *Discretização em processos atômicos*. Como explicar os saltos quânticos, a quantização de carga, e como associar frequências atômicas discretas a energias discretas ($E=h\nu$)? (iv) *Redução de estado na medição*. Como explicar o aparente colapso que ocorre durante medições, expresso pelo postulado da projeção, e a não-localidade envolvida?

Mais recentemente, alguns autores têm reexaminado a proposta original de Schrödinger, e oferecido soluções para os problemas mencionados acima (Dorling, 1987; Barut 1988). Mencionaremos algumas destas soluções mais adiante.

(b) *Interpretação Hidrodinâmica*. Partindo da equação de Schrödinger e escrevendo $\langle \psi_i | \psi \rangle = \alpha e^{i\beta}$, Madelung (1926) obteve uma equação hidrodinâmica para α , sugerindo assim que um fluido com carga e massa distribuídas compõe a estrutura básica do mundo. Esta abordagem seria retomada por Bohm (1952), que adicionou porém uma partícula. Bohm & Vigier (1954) apresentaram um modelo hidrodinâmico no qual o fluido estaria acoplado a flutuações estocásticas em um nível subquântico (ver Jammer, 1974, pp. 33-8, 49-54).

(c) *Interpretação Ingênua com Colapsos*. Uma visão ondulatória realista pode ser obtida adaptando-se a interpretação positivista de von Neumann (seção 4.7b). Neste caso, os colapsos seriam processos reais, cuja causa pode estar associada a ressonâncias devidas à interação do aparelho com o ambiente, ou simplesmente aceitos de maneira *ad hoc*. Haveria não-localidade tanto no processo de colapso quanto nas medições em partículas correlacionadas do teorema de Bell.

(d) *Interpretação dos Estados Relativos*. Em 1957, H. Everett postulou que o universo como um todo seria descrito por uma única função de onda que evolui deterministicamente, de acordo com a equação de Schrödinger. O aparente colapso associado a medições seria na verdade uma ilusão, ligada ao fato que nosso cérebro também se acopla aos objetos quânticos. O cérebro entraria em uma superposição de estados associados a diferentes leituras dos resultados das medições, e cada um destas “configurações de memória” não teria acesso às outras. O mundo se ramificaria assim em muitos mundos paralelos durante cada ato de medição. Apesar do aparente absurdo desta interpretação, ela despertou bastante interesse em torno de 1970 (DeWitt, 1970), e hoje em dia voltou a gerar bastante discussão, com David Albert e outros, em diferentes variações: muitos mundos, muitas mentes e teoria despida (*bare theory*) (ver Barrett 1999).

(e) *Interpretação Ondulatória com Decoerência*. A abordagem da “decoerência” procura explicar o surgimento de um comportamento clássico em um sistema quântico (por exemplo, após medições) a partir da interação entre objeto, aparelho e ambiente. Autores como Zurek se colocam mais próximos da interpretação da complementaridade, enquanto outros como Zeh & Joos adotam uma visão ondulatória. É de Zeh (1993) o seguinte lema: “Não há saltos quânticos, nem há partículas!”. A abordagem destes autores oferece uma solução ao problema (ii) mencionado no item (a) acima: à medida que um pacote de onda livre vai se dispersando, choques com outras partículas induzem uma “localização” do sistema (que deixa porém de ser um estado puro).

(f) *Interpretação da Localização Espontânea*. Ghirardi et al. (1987) e também Gisin & Percival (1992) têm atribuído realidade à função de onda, mas supõem que o processo de colapso (para um pacote de onda estreitamente centrado em torno de uma posição) seja espontâneo ou estocástico (o que coloca esta corrente também dentro das interpretações estocásticas). Para eliminar o subjetivismo, supõem que todas as partículas têm uma probabilidade muito pequena de sofrer uma localização, o que não afetaria a validade da equação de Schrödinger para poucas partículas. No caso, porém, em que um objeto microscópico se acopla a um aparelho de medição com otilhões de partículas, a probabilidade de localização torna-se grande, explicando assim a redução de estado que acompanha medições diretas de posição.

(g) *Interpretação Transacional*. Esta abordagem se baseia na “transação” entre um emissor e um absorvedor, que se dá através de ondas retardadas (usuais) e avançadas (que se propagam com energia negativa para o passado), conforme proposto por Wheeler & Feynman (1945). Esta interpretação da Mecânica Quântica desenvolvida por Cramer (1986) é

temporalmente simétrica, não-local e considera que a função de onda é uma onda física no espaço 3-dimensional.

4.9 Interpretações que questionam a Lógica Clássica

Nesta seção agrupamos algumas visões que propõem modificações na lógica clássica para explicar os problemas interpretativos da Mecânica Quântica. O que elas têm em comum, além do questionamento de diferentes aspectos da lógica clássica, é uma certa simpatia pela atribuição de valores bem definidos para todos os observáveis, o que as aproxima das visões corpusculares ou das teorias de variáveis ocultas.

(a) *Lógica Quântica*. Desde o trabalho pioneiro de G. Birkhoff & von Neumann (1936), costuma-se dizer que a lógica do mundo microscópico é de um tipo especial, chamada “lógica não-distributiva” (ver por exemplo Hughes, 1981). Tal conclusão é defensável, mas pressupõe uma interpretação corpuscular (valores sem dispersão) para a Teoria Quântica.

(b) *Abordagem Operacional*. Uma certa abordagem à lógica quântica (que não adota uma ontologia corpuscular) considera a teoria não como uma descrição da natureza física, mas sim uma descrição do comportamento do cientista ao preparar e medir objetos microscópicos no laboratório (Foulis & Randall, 1974).

(c) *Interpretação Modal*. De maneira genérica, este nome se aplica a qualquer interpretação que se inspira na lógica modal, que faz uso das categorias de “possibilidade” e “necessidade”. Mais especificamente, ele se refere à interpretação proposta por Kochen (1985), que aborda o problema de quais são as *propriedades* (ou seja, quais os observáveis que têm valores bem definidos) de um subsistema correlacionado quanticamente com um outro (fazendo uso do teorema de decomposição de Schmidt). Este realismo relacionista (as propriedades existem em relação ao ambiente escolhido) propõe-se a explicar o paradoxo de EPR sem supor a não-localidade.

(d) *Histórias Consistentes*. Uma “história” é uma série de propriedades bem definidas ocorrendo numa seqüência ordenada de tempo (por exemplo, $p_x(t_1)$, $x(t_2)$, $p_x(t_3)$). Em 1984, R. Griffiths introduziu a noção de “família de histórias consistentes”, para a qual se pode atribuir uma probabilidade para cada história. Dado um evento inicial D e um evento final F , esta abordagem responde qual é a probabilidade de uma história de eventos intermediários E_1 , E_2 , etc. ocorrer. Se o evento inicial D for $S_x=+\frac{1}{2}$ (após a medição de spin na direção x) e o final F for $S_z=+\frac{1}{2}$ (após uma medição de spin na direção z), a probabilidade de um evento intermediário E ser $S_x=+\frac{1}{2}$ é 1, e a probabilidade de ser $S_z=+\frac{1}{2}$ também é 1! Porém, como estas duas histórias não são consistentes, não se pode deduzir que $S_x=+\frac{1}{2}$ e $S_z=+\frac{1}{2}$ com probabilidade 1, para o mesmo evento E . Isso viola o cálculo de probabilidades clássico (ver críticas de d’Espagnat, 1989).

Outros autores, como Omnès, Gell-Mann e Hartle, desenvolveram esta interpretação propondo que ela seria um desdobramento da interpretação ortodoxa, pois esta só atribui probabilidades para o instante da medição, ao passo que a interpretação das histórias consistentes permitiria atribuir probabilidades para eventos no passado. Omnès (1992) chegou a defender o que chamou de uma “lógica quântica”, mas trata-se apenas de uma regra de aproximação para zerar quantidades muito pequenas. Implícito na abordagem de Griffiths está a aceitação da retrodição, da visão epistêmica de estado e das medições fidedignas. Sua visão é claramente dualista, pois uma retrodição pode levar a estados envolvendo superposições de trajetórias.

5. Mapa das Interpretações

Agora que já nos familiarizamos com várias interpretações da Teoria Quântica, façamos um esboço de como cada uma se posiciona com relação aos critérios *ontológico* (corpúsculo, onda, dualismo ou sem ontologia) e *epistemológico* (realismo ou positivismo). No mapa da Fig. 1, a abscissa apresenta os critérios ontológicos, enquanto a ordenada é dividida em realismo (em baixo) e positivismo. Certas regiões estão demarcadas, correspondendo às interpretações ortodoxas (ORT.), dos coletivos estatísticos (COL.), teorias de variáveis ocultas (TVO.), interpretações ondulatórias (OND.), estocásticas (ESTOC.) e lógicas quânticas (LOG.). Em geral, as teorias de variáveis ocultas podem ser consideradas um caso particular da interpretação dos coletivos. Interpretações que possuem uma relação aparecem ligadas por linhas tracejadas.

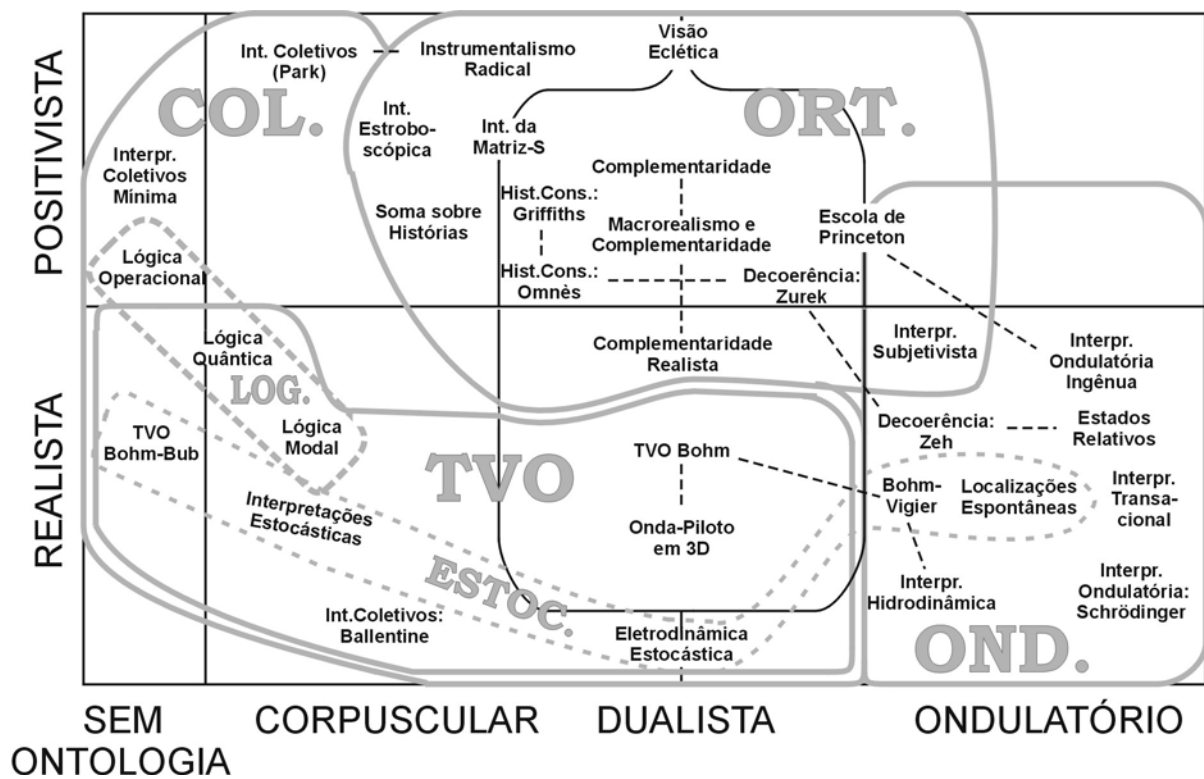


Figura 1: Mapa das interpretações da Teoria Quântica.

6. Conclusão

O estudo *sistemático* das interpretações da Teoria Quântica é ainda um campo vasto e não muito explorado. Seria tarefa da “filosofia da física” tentar sistematizar o estudo comparativo das interpretações, delineando quais são as teses que cada visão responde claramente, quais afirmações de fato correspondem a uma ontologia específica e quais são apenas a atribuição de um rótulo, quais problemas são varridos para debaixo do tapete, e como agrupar as interpretações de maneira satisfatória. Além disso, seria interessante levar em conta os aspectos intencionais-emocionais mencionados na seção 1, e estender o estudo

não só para as interpretações “declaradas”, mas também para interpretações “naturais” de formalismos alternativos (como a distribuição de Wigner).

Referências Bibliográficas

Aharonov, Y., Anandan, J. & Vaidman, L. (1993), “Meaning of the Wave Function”, *Physical Review A* 47, 4616-26.

Ballentine, L.E. (1970), “The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 42, 358-81.

Barrett, J.A. (1999), *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford: Oxford University Press.

Barut, A.O. (1988), “The Revival of Schrödinger’s Interpretation of Quantum Mechanics”, *Foundations of Physics Letters* 1, 47-56.

Belinfante, F.J. (1973), *A Survey of Hidden-Variables Theories*, Oxford: Pergamon.

Bell, J.S. (1990), “Against ‘Measurement’”, em Miller, A.I. (org.), *Sixty-Two Years of Uncertainty*, Nova Iorque: Plenum, pp. 17-31. (Reimpresso em *Physics World* (agosto 1990), 33-40.)

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), pp. 369-96.)

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), pp. 87-126. Tradução para o português em Pessoa Jr., O. (org.), *Fundamentos da Física I – Simpósio David Bohm*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, p. 135-59, 2000.)

——— (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), 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.)

Born, M. (1949), *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford: Oxford University Press, pp. 105-6.

Boyer, T.H. (1975), “Random Electrodynamics: The Theory of Classical Electrodynamics with Classical Electromagnetic Zero-Point Radiation”, *Physical Review D* 11, 790-808.

Cramer, J.G. (1986), “The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 58, 647-87.

Cushing, J.T., Fine, A. & Goldstein, S. (orgs.) (1996), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* (Boston Studies in the Philosophy of Science 184), Dordrecht: Kluwer.

DeWitt, B.S. (1970), “Quantum Mechanics and Reality”, *Physics Today* 23 (setembro), 30-35.

d’Espagnat, B. (1989), “Are there Realistically Interpretable Local Theories?”, *Journal of Statistical Physics* 56, 747-66.

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.

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.)

Feynman, R.P. (1948), “Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 20, 367-87.

————— (1987), “Negative Probability”, em Hiley, B.J. & Peat, F.D. (orgs.), *Quantum Implications*, Londres: Routledge, pp. 235-48.

Fock, V.A. (1957), “On the Interpretation of Quantum Mechanics”, *Czechoslovakian Journal of Physics* 7, 643-56.

Foulis, D.J. & Randall, C.H. (1974), “The Empirical Logic Approach to the Physical Sciences”, em Hartkämper, A. & Neumann, H. (orgs.), *Foundations of Quantum Mechanics and Ordered Linear Spaces*, Nova Iorque: Springer, pp. 230-49.

Freyberger, M. & Schleich, W.P. (1997), “True Vision of a Quantum State”, *Nature* 386, 235-48.

Ghirardi, G.C., Omero, C., Rimini, A. & Weber, T. (1978), “The Stochastic Interpretation of Quantum Mechanics: A Critical Review”, *Rivista Nuovo Cimento* 1, 1-34.

Ghirardi, G.C., Rimini, A. & Weber, T. (1986), “Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems”, *Physical Review D* 34, 470-91.

Gisin, N. & Percival, C. (1992), “The Quantum-State Diffusion Model applied to Open Systems”, *Journal of Physics A*, 5677-91.

Griffiths, R.B. (1984), “Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics”, *Journal of Statistical Physics* 36, 219-72.

Heisenberg, W. (1927), *Zeitschrift für Physik* 43, 172-98. (Tradução para o inglês: “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”, em Wheeler & Zurek (1983), pp. 62-84.)

————— (1930), *The Physical Principles of Quantum Theory*, Chicago: University of Chicago Press.

————— (1958), *Physics and Philosophy*. Londres: Allen & Unwin. (Tradução para o português, *Física e Filosofia*, Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1ª edição, 1981.)

Home, D. & Whitaker, M.A.B. (1992), “Ensemble Interpretations of Quantum Mechanics. A Modern Perspective”, *Physics Reports* 210, 224-317.

Hughes, R.I.G. (1981), “Quantum Logic”, *Scientific American* 245 (outubro), 146-57

Jammer, M. (1974), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Nova Iorque: Wiley.

Kochen, S. (1985), “A New Interpretation of Quantum Mechanics”, em Lahti, P. & Mittelstaedt, P. (orgs.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics*, Cingapura: World Scientific, pp. 151-69.

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.

London, F. & Bauer, E. (1939), *La Théorie de l’Observation em Mécanique Quantique*, Paris: Hermann. (Tradução para o inglês em Wheeler & Zurek (1983), pp. 217-59.)

Ludwig, G. (1961), em Bopp, F. (org.), *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit*, Braunschweig: Vieweg, pp. 150-81.

Margenau, H. (1937), “Critical Points in Modern Physical Theory”, *Philosophy of Science* 4, 337-70.

————— (1954), “Advantages and Disadvantages of Various Interpretations of the Quantum Theory”, *Physics Today* 7 (outubro), 6-13.

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).

Omnès, R. (1992), “Consistent Interpretations of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 64, 339-82.

Park, J.L. (1973), “The Self-contradictory Foundations of Formalistic Quantum Measurement Theories”, *International Journal of Theoretical Physics* 8, 211-8.

Pessoa Jr., O. (1998), “As Interpretações da Física Quântica”, in Aguilera-Navarro, M.C.K., Aguilera-Navarro, V.C. & Goto, M. (orgs.), *Anais III Semana da Física*, Londrina: Editora da Universidade Estadual de Londrina, pp. 137-187.

————— (2000), “Complementing the Principle of Complementarity”, *Physics Essays* 13, 50-67, 2000.

————— (2003), *Conceitos da Física Quântica*, vol. 1, São Paulo: Editora Livraria da Física.

- (2004), “A Quantum Modal Logic”, a sair no *Logical Journal of the IGPL*.
- Redhead, M. (1987), *Incompleteness, Non-Locality, and Realism*, Oxford: Clarendon.
- Reichenbach, H. (1944), *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, Berkeley: University of California Press. (Republicado pela Dover, Nova Iorque, 1998.)
- Rosa, R. (1979), “Electron Interference: Landé’s Approach Upset by a Recent Elegant Experiment”, *Lettere al Nuovo Cimento* 24, 549-50.
- 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.)
- Stapp, H.P. (1971), “S-Matrix Interpretation of Quantum Theory”, *Physical Review D* 3, 1303-20.
- von Neumann, J. (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin: Springer. (Tradução para o inglês pela Princeton University Press, 1955.)
- Wang, L.J.; Zou, X.Y. & Mandel, L. (1991), *Physical Review Letters* 66, 1111-4.
- Wheeler, J.A. (1983), “Law without Law”, in Wheeler & Zurek, pp. 182-213.
- Wheeler, J.A. & Zurek, W.H. (orgs.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press.
- Wigner, E.P. (1961), “Remarks on the Mind-Body Question”, em Good, I.J. (org.), *The Scientist Speculates*, Londres: Heinemann, pp. 284-302. (Reimpresso em Wheeler & Zurek (1983), pp. 168-81.)
- (1963), “The Problem of Measurement”, *American Journal of Physics* 31, 6-15. (Reimpresso em Wheeler & Zurek (1983), pp. 324-41.)
- Zeh, H.D. (1993), “There are no Quantum Jumps, nor are there Particles!”, *Physics Letters A* 172, 189-92.