

# As Interpretações da Física Quântica

**Oswaldo Pessoa Jr.**

Instituto de Estudos Avançados (IEA), USP;  
e Centro de Lógica, Epistemologia & História da Ciência (CLE), Unicamp,  
C.P. 6133, Campinas, SP 13081-970.

Publicado in AGUILERA-NAVARRO, M.C.K.; AGUILERA-NAVARRO, V.C. & GOTO, M. (orgs.),  
*Anais III Semana da Física*, Ed. UEL, Londrina, 1998, pp. 137-87.

## Sumário

1	Apresentação	3
2	Três Experimentos Básicos	3
2.1	Experimento da Dupla Fenda para Elétrons	3
2.1.1	Interpretações do Experimento da Dupla Fenda	5
2.2	Interferômetro Eletrônico de Mach-Zehnder	6
2.2.1	Interpretações do Interferômetro de Mach-Zehnder	7
2.3	Experimento de Anti-Correlação e suas Interpretações	8
3	A Estrutura da Teoria Quântica	10
3.1	Interpretações do Estado Quântico	12
3.2	Interpretações sobre as Medições em Física Quântica	14
3.3	Interpretações do Princípio de Incerteza	15
4	As Interpretações da Teoria Quântica	16
4.1	Classificações Usuais na Literatura	17
4.1.1	As Primeiras Teorias Semi-Clássicas	17
4.1.2	A Interpretação da Complementaridade	18
4.1.3	Teorias de Variáveis Ocultas	20
4.1.4	Interpretações Estocásticas	21
4.1.5	Interpretação dos Coletivos Estatísticos	21
4.1.6	Interpretações de Potencialidade	22

4.2	As Interpretações Ortodoxas	23
4.3	Interpretações Ondulatórias	25
4.4	Interpretações que questionam a Lógica Clássica	27
5	Mapeamento das Interpretações	29
5.1	Evolução das Preferências Interpretativas	29
5.2	Mapa das Interpretações	30
6	Conclusão	32
	Apêndice 1: O Interferômetro Óptico de Mach-Zehnder	33
	Ap. 1.1 Alinhamento Perfeito	33
	Ap. 1.2 Padrões de Interferência	35
	Ap. 1.3. Deslocamento de Fase no Espelho Semi-Refletor	36
	Apêndice 2: Realismo vs. Positivismo	38
	Ap. 2.1 Realismo Científico	38
	Ap. 2.2 Anti-Realismo na Física Quântica	39
	Apêndice 3: Crítica da Lógica Quântica	41
	Referências	42

## 1 Apresentação [1]

É notável que por trás da maioria das teorias físicas fundamentais haja diferentes maneiras de interpretar o formalismo e a experiência. A Teoria Quântica é o caso mais extremado disso, havendo *dezenas* de diferentes interpretações, que podem ser agrupadas grosseiramente em cinco grandes grupos.

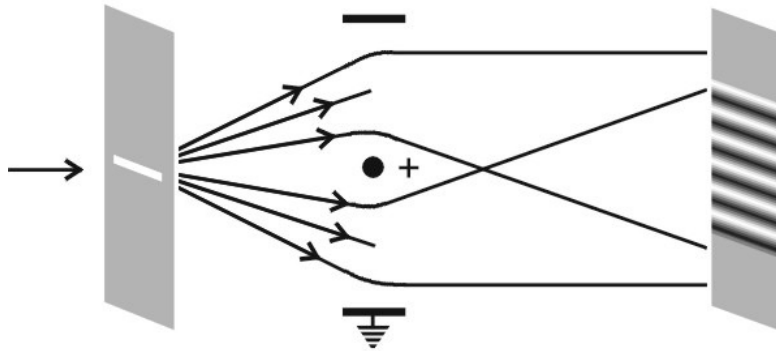
Uma *interpretação* é usualmente entendida como um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria, sem afetar em nada as previsões observacionais da teoria. Pode acontecer que uma interpretação faça previsões em desacordo com a teoria, e neste caso deveríamos falar de uma “teoria 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”.

As teses que a interpretação agrega ao formalismo fazem afirmações sobre a realidade existente para além dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações. Isso ficará claro quando examinarmos alguns exemplos básicos de controvérsia entre diferentes interpretações (seção 2), e quando considerarmos como as interpretações se agregam à estrutura da teoria quântica (seção 3). Como as interpretações fazem afirmações sobre a *realidade* que haveria por trás das observações físicas, tecemos algumas considerações gerais sobre as diferentes atitudes filosóficas que são adotadas com relação à realidade (Apêndice 2). Com isso, estaremos em condições de classificar as interpretações da Teoria Quântica em grandes grupos e descrever um grande número de visões mais específicas (seção 4).

## 2 Três Experimentos Básicos [2]

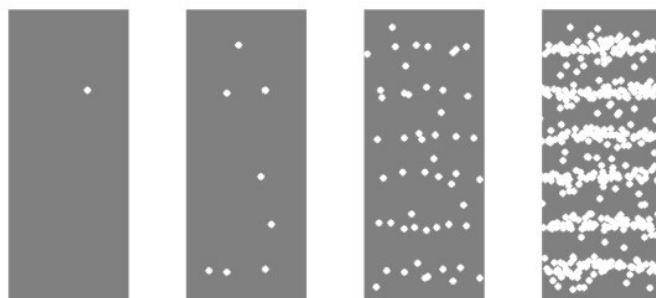
### 2.1 Experimento da Dupla Fenda para Elétrons

Considere um feixe muito fraco de elétrons que difrata através de uma pequena fenda e depois passa por uma região contendo um “biprisma de elétrons” (Fig. 1). Este biprisma nada mais é do que um fio carregado positivamente (+) localizado entre duas placas aterradas. O efeito deste biprisma é o seguinte: se um elétron passa por cima do fio, ele é atraído e sofre uma deflexão para baixo; se ele passa por baixo, ele é deflexionado para cima. O que se observa é que, na região em que estes dois componentes se sobrepõem, aparece um padrão de *interferência*, típico de fenômenos ondulatórios. Este experimento [3] é a versão eletrônica factível que mais se assemelha ao famoso experimento da dupla fenda para a luz.



*Figura 1: Esquema do biprisma de elétrons, com padrão de interferência à direita..*

O que acontece se estes elétrons incidirem individualmente no equipamento, um a um? Tal experimento pôde ser realizado recentemente [4], confirmando o que já se sabia: cada elétron aparece como um pequeno ponto na tela detectora, e à medida que tais pontos vão se acumulando, forma-se um padrão de interferência (Fig. 2).



*Figura 2: Formação paulatina de um padrão de interferência.*

### 2.1.1 Interpretações do Experimento da Dupla Fenda

Como explicar o comportamento de um único elétron neste experimento? Por um lado, o 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. É costume falar em *dualidade onda-partícula* nesta situação de *coexistência* de aspectos corpusculares e ondulatórios (chamaremos isso de dualidade onda-partícula “fraca”). Mas como é possível um elétron ser ao mesmo tempo onda e partícula, se tais atributos são contraditórios?

É nesse ponto que entram as interpretações da teoria quântica. O formalismo desta teoria fornece as probabilidades de o elétron cair em diferentes lugares; qualquer explicação adicional é uma “interpretação” da teoria. Vejamos então quatro explicações possíveis para o comportamento do elétron nesta versão do experimento de duas fendas.

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

(1) *Interpretação Ondulatória.* O elétron que atravessa o biprisma 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 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 interação do elétron com o biprisma (veremos mais sobre isso na seção 4.1.5).

(3) *Interpretação Dualista Realista.* Na realidade existiria partícula (com trajetória bem definida) e uma onda associada (que não carrega energia), conforme postulava L. de Broglie com sua teoria da “dupla solução”. 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.

(4) *Interpretação Dualista Positivista.* De acordo com a interpretação da complementaridade de Niels Bohr, o “fenômeno” em questão é ondulatório, e não corpuscular (não podemos inferir a trajetória passada de um elétron detectado). O aspecto corpuscular que observamos na detecção se deve ao “postulado quântico” descoberto por Max Planck, e que para Bohr é o fundamento da teoria quântica. Este postulado afirma que existe uma *descontinuidade essencial* (uma indivisibilidade) em qualquer processo atômico, como por exemplo na ionização de átomos da tela detectora devido à ação do elétron.

## 2.2 Interferômetro Eletrônico de Mach-Zehnder

Ao invés de usar um biprisma, é possível observar um padrão de interferência com elétrons a partir da difração em três camadas cristalinas finas  $C$  (Fig. 3a).

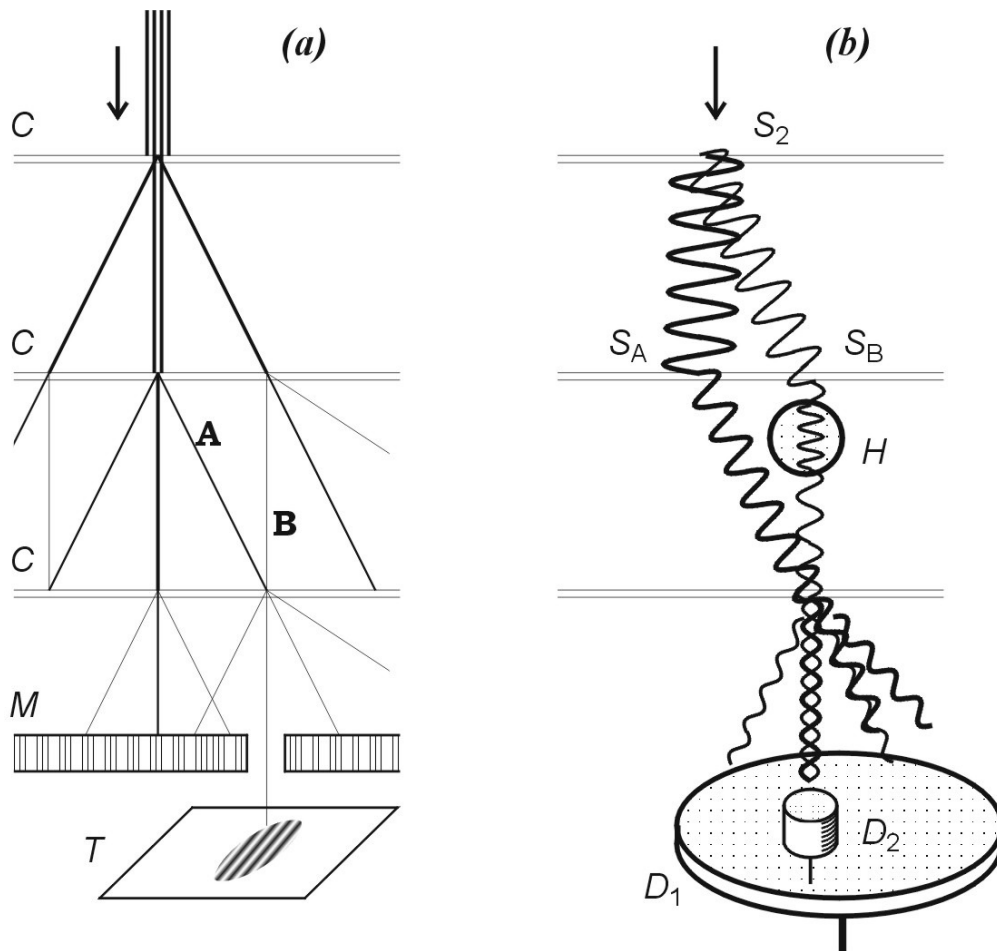


Figura 3: (a) Difração de elétrons em três camadas cristalinas [5].  
(b) Situação idealizada com alinhamento perfeito (representação ondulatória).

Neste experimento, é a amplitude associada a cada elétron que é dividida ao atingir cada cristal (e não a frente de onda, como no exemplo anterior). A cada difração, o feixe incidente é dividido em três; usando uma máscara  $M$ , é possível selecionar elétrons provenientes de apenas duas trajetórias possíveis  $A$  e  $B$ . Neste caso, observa-se um padrão de interferência na tela detectora  $T$  [5]. Este arranjo experimental é conhecido como interferômetro eletrônico de Mach-Zehnder oblíquo.

Alinhando-se com cuidado o interferômetro de Mach-Zehnder, é possível em princípio eliminar a formação de um padrão (como o da Fig. 3a), sem que com isso deixe de haver interferência. Isso é explicado no Apêndice 1.1, onde examinamos o interferômetro de Mach-Zehnder no caso óptico. Essa condição ideal (Fig. 3b) pode ser atingida desde que as faces cristalinas estejam igualmente espaçadas e perfeitamente paralelas. Inserindo-se um defasador  $H$  (um dispositivo envolvendo um campo magnético) em um dos caminhos (no exemplo da Fig. 3b, no caminho  $B$ ) e regulando a defasagem  $\phi$  do componente, é possível fazer com que nenhum elétron caia no contador de elétrons  $D_2$  (ver Apêndice 1.2)!

## 2.2.1 Interpretações do Interferômetro de Mach-Zehnder

No caso da Fig. 3b, o que acontece quando apenas *um* 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 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, dividiria-se 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  $D_2$  na montagem da Fig. 3b 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 seção 4.4).

(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.

### 2.3 Experimento de Anti-Correlação e suas Interpretações

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

Suponha que um feixe de elétrons difrata em uma única camada cristalina, dividindo-se em três componentes (Fig. 4). Cada componente incide em um detector, sendo que cada um destes é posicionado após um campo magnético uniforme de forma a detectar apenas os elétrons com a energia do feixe inicial. O que acontece agora se apenas *um* elétron difrata na camada cristalina? Sabemos que ele será detectado ou em  $D_A$ , ou em  $D_B$ , ou em  $D_C$  (“anti-correlação”). Ou seja, ao ser detectado o elétron 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 elétron se divide em três, o que é expresso pela função de onda  $\psi_A + \psi_B + \psi_C$ . Porém, ao detectar-se o elétron em  $D_A$ , por exemplo, as probabilidades de detecção em  $D_B$  e  $D_C$  tornam-se nulas instantaneamente! O estado inicial é reduzido, neste caso, para  $\psi_A$ . 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 ( $A$ ,  $B$  ou  $C$ ), indo parar em  $D_A$ ,  $D_B$  ou  $D_C$ . Não é preciso falar em “colapso”.



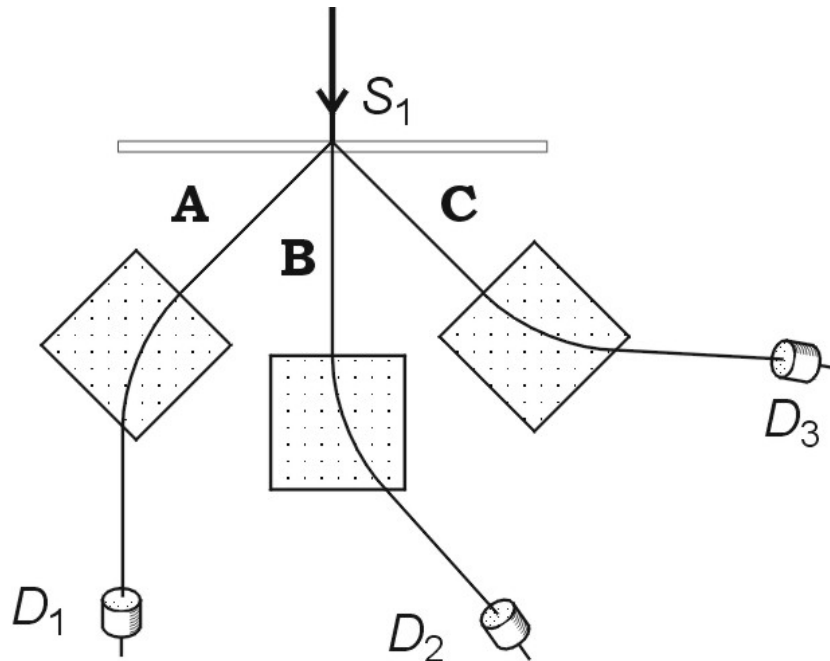


Figura 4: Experimento de anti-correlação para elétrons.

(3) *Interpretação Dualista Realista.* Esta visão também considera que, após  $S_1$ , a partícula seguiu uma das trajetórias  $A$ ,  $B$  ou  $C$ , incidindo então no detector correspondente. Mas existiria também uma onda associada, que se dividiu em três partes. As partes não detectadas constituiriam “ondas vazias” que não carregam energia e não podem ser detectadas. 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 elétron 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) quanto Heisenberg (1930) salientaram que a retrodição é uma hipótese metafísica, que não precisa ser aceita (apesar de sua aceitação não levar a contradições) [6]; no entanto, ao definir um “fenômeno”, Bohr acabou fazendo uso implícito desta hipótese.

Notemos que se no interferômetro da Fig. 3b o divisor de feixes  $S_2$  for retirado, o experimento torna-se análogo ao de anti-correlação e o fenômeno torna-se corpuscular.

A presença ou ausência de  $S_2$  determina se o fenômeno é ondulatório ou corpuscular. Ora, é possível escolher se  $S_2$  é retirado ou não mesmo depois do elétron entrar no interferômetro! A possibilidade deste “experimento de escolha demorada” mostra então porque é preciso esperar a medição se completar para dizer se o fenômeno é ondulatório ou corpuscular (dentro da interpretação da complementaridade).

### 3 A Estrutura da Teoria Quântica

Os exemplos acima mostram em que sentido é possível agregar diferentes interpretações ao formalismo mínimo da Teoria Quântica. Mas qual é esse formalismo mínimo?

Na Fig. 5 apresentamos um esquema simplificado desta estrutura, que exibe uma interessante simetria entre *sistema quântico* (representado pelo estado  $|\psi\rangle$ , no lado esquerdo) e *observável quântico* (representado pelo operador  $\hat{Q}$ , no lado direito). Note que ambos são necessários para se calcularem as probabilidades de resultados experimentais.

Mais à direita, na figura, representam-se diferentes níveis “epistemológicos” [7]. A divisão básica aqui é entre *teoria* e *realidade*, que apresentam também uma simetria (a teoria procura espelhar a realidade). Mais em baixo no diagrama representa-se a realidade física, que em um experimento envolve: (i) a *preparação do objeto* quântico (por exemplo, a preparação de elétrons em um forno) e de seu estado (seleção de energia, do estado de spin etc.); (ii) o *arranjo do aparelho* de medição (que determina o observável sendo medido). Em um experimento tipicamente quântico, podem-se obter resultados individuais para cada objeto quântico, resultados estes que fazem parte de uma classe de *resultados possíveis*, e que podem ser coligidos para que se determinem *frequências relativas*. Estes resultados experimentais formam a chamada “base empírica” a ser explicada pela teoria.

Acima da realidade paira a teoria (pelo menos é assim no diagrama). Os conceitos da teoria que correspondem mais diretamente à base empírica são chamados de “conceitos observacionais”. Os conceitos mais abstratos são chamados de “conceitos teóricos”. Na parte de cima da figura temos dois deles: sistema quântico e observável quântico. Escolhe-se uma representação matemática, como o *espaço vetorial complexo* (o espaço de Hilbert), e nela se definem os conceitos de estado e operador.

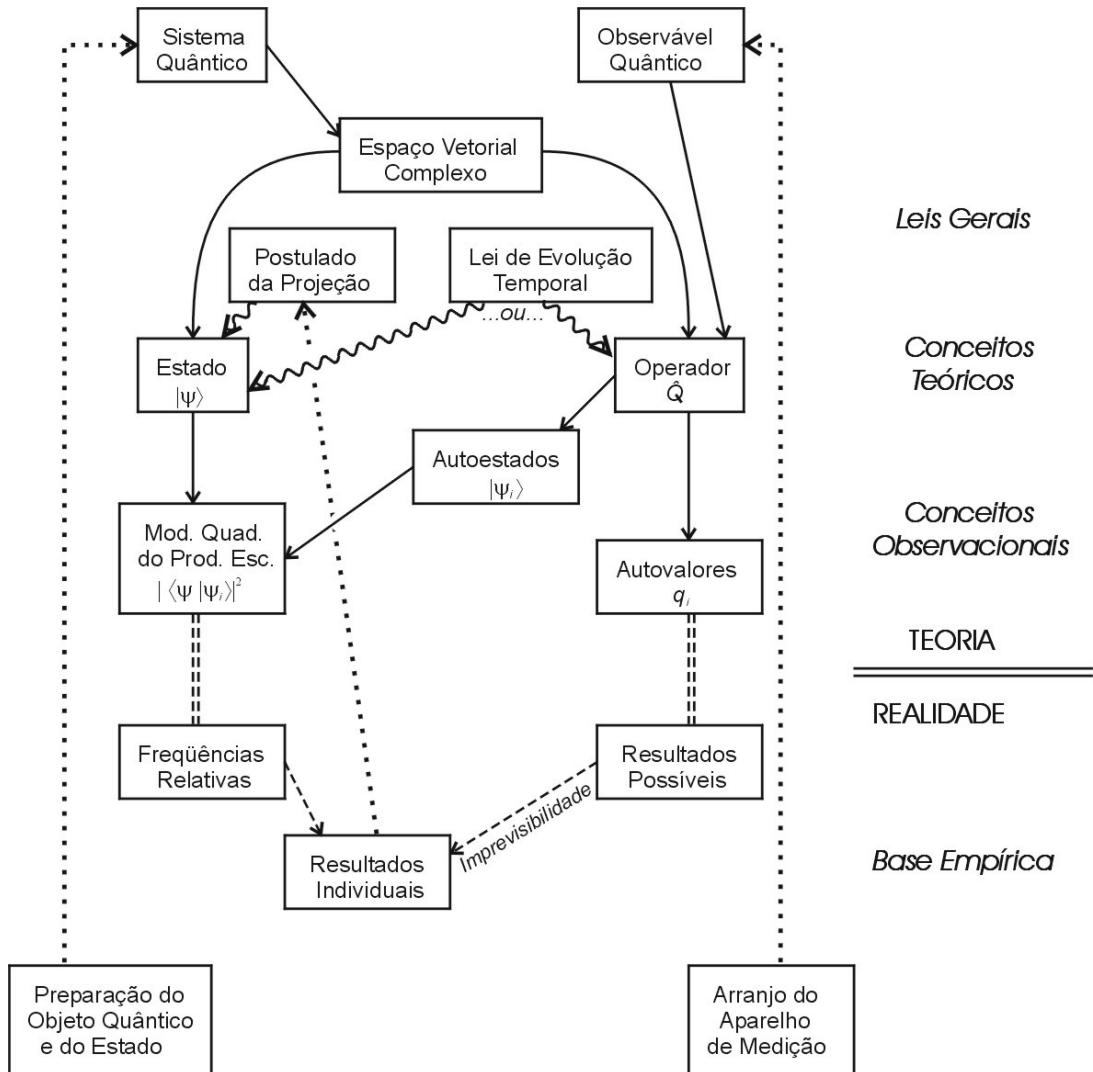


Figura 5: Esquema da estrutura da Teoria Quântica.

A ponte entre teoria e realidade é feita através das chamadas “regras de correspondência”, que ligam conceitos observacionais e a base empírica (linha tracejada dupla). De maneira simplista e figurada, podemos dizer o seguinte: a filosofia-da-ciência *empirista* (ou positivista) considera que essas regras de correspondência são os únicos pontos de contato entre teoria e realidade. Já uma filosofia-da-ciência *realista* considera que os conceitos teóricos também estão ligados diretamente (“referem-se”) à realidade (ou seja, a uma parte não observável da realidade). É justamente esta ligação que estamos chamando de *interpretação* da teoria. As regras de correspondência seriam assim uma forma trivial ou básica de interpretação, que estaria incorporada ao formalismo mínimo da teoria. Já as “interpretações” propriamente ditas seriam adicionadas por diferentes cientistas, sem com isso modificar as previsões da teoria.

Os conceitos observacionais são relacionados através de “leis empíricas”. Já os princípios da Teoria Quântica envolvem “leis gerais” que relacionam conceitos teóricos. Há dois tipos de leis que regem a transformação de um sistema quântico. A *lei de evolução temporal* é a equação dinâmica que rege um sistema “fechado” [8], enquanto nenhuma medição esteja sendo feita. O exemplo mais famoso desta lei é a equação de Schrödinger, que rege a evolução temporal de *estados* (flecha ondulada para a esquerda), enquanto que os operadores não se alteram. Porém, é possível considerar que os *operadores* evoluem no tempo, enquanto que o estado não se altera (enquanto não ocorra uma medição): é a chamada “representação de Heisenberg” (flecha ondulada para a direita).

A outra lei que descreve a transformação do sistema é o *postulado da projeção*, que se aplica apenas para o ato da medição. Após uma medição, conforme o resultado individual obtido (resultado este que em geral é imprevisível), calcula-se com este postulado o novo *estado* do sistema (não há versão da Mecânica Quântica para a qual os operadores se alterem com o postulado da projeção).

Terminando nossa análise da Fig. 5, mencionemos apenas que a partir do operador podem-se calcular autovalores e autoestados. Os primeiros correspondem aos resultados possíveis de uma medição, ao passo que o módulo quadrado do produto escalar de cada autoestado com o estado do sistema fornece a *probabilidade* de cada resultado possível (na seção 4.1 refinaremos a análise desta regra de Born).

### 3.1 Interpretações do Estado Quântico

Eis então uma descrição esquemática do formalismo mínimo da Teoria Quântica. Conforme salientado, o que chamamos de *interpretação* da Teoria Quântica é qualquer tese suplementar mapeando *conceitos teóricos* a entidades não diretamente observadas

da realidade (atitude “realista”), ou uma tese dizendo que *não faz sentido* supor que um dado conceito teórico tenha um referente na realidade (atitude “positivista”).

Um conceito central a ser interpretado é o de “estado”  $|\psi\rangle$ . A que se refere este conceito 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 uma instrumento matemático para realizar cálculos e obter previsões (esta visão chama-se “instrumentalismo”). Heisenberg exprimiu isso de maneira radical ao escrever que a mudança descontínua na função de probabilidade é “uma mudança descontínua em nosso conhecimento” [9], 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*, manifesto na simetria apontada na Fig. 5 entre estado e operador: a realidade de um fenômeno quântico só existe na relação entre objeto microscópico e aparelho de medição.

### 3.2 Interpretações sobre as 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 “interacionista”: 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” [10].

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) [11]. 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 autoestados 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 “interacionismo” mencionado acima, com a citação de Jordan. Porém, em sua versão “relacionista”, a interpretação da complementaridade acaba adotando a retrodição (seção 2.3, questão

III.4). Neste caso, então, é plausível dizer, *após* a detecção de um quanta 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).

### 3.3 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 [12]. Para simplificar a discussão, consideraremos a relação envolvendo posição  $x$  e o componente do momento  $p_x$ :

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2. \quad (1)$$

*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),  $\Delta x$  mede a extensão do pacote, indicando que a posição  $x$  do objeto quântico é indeterminada ou mal definida por uma quantidade  $\Delta x$ . A eq.(1) 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 (ver adiante a seção 4.1.5) 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! (Alguns até afirmam ser possível medir no mesmo instante  $x$  e  $p_x$ , com aparelhos diferentes, mas isso parece ser incorreto salvo em situações especiais, como a envolvendo partículas correlacionadas.)

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 em 1937) 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  $\Delta x$  e  $\Delta p_x$  (Fig. 6). 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 [13].

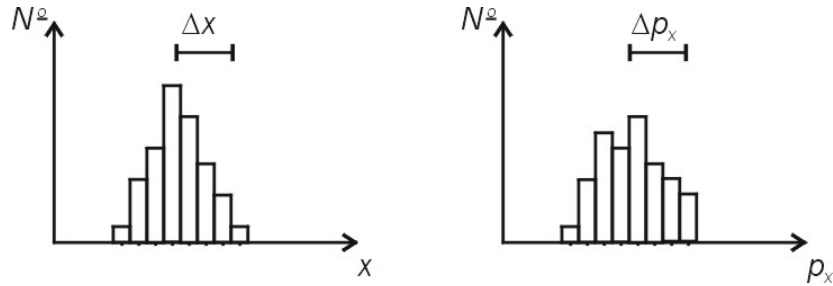


Figura 6: Número de contagens de medições de  $x$  e  $p_x$  para cópias do mesmo estado.

(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, é impossível medir simultaneamente  $x$  e  $p_x$  com resoluções menores do que  $\Delta x$  e  $\Delta p_x$  dados pela eq.(1). Esta tese parece correta, conforme mencionamos no item 2.

Curiosamente, o argumento original de Heisenberg (1927) 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 Interpretações da Teoria Quântica

Nas seções 2 e 3.1 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)? No Apêndice 2 esclarecemos a diferença entre realismo e positivismo, explorando também o anti-realismo na Física Quântica.

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.

## 4.1 Classificações Usuais na Literatura

Nos capítulos de seu famoso livro sobre a Filosofia da Mecânica Quântica, Max Jammer [10] 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.

### 4.1.1 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 subsequente desenvolvida por outros, inclusive Mário Schönberg (1954). Uma das dualistas consiste da teoria da dupla solução 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 (Fig. 5). 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) [14].

#### 4.1.2 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 Copenhagen, 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 (ver seção 4.2). 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 [15].

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 (ver Apêndice 1.2). 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 [16].

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 2.1.1, 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 (ver seção 3.2).

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, ver seção 4.1.5). 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 (porisso 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 [17]. A alteração de uma parte distante do aparelho resultaria numa modificação instantânea da função de onda global, que envolve as partes distantes. Porém, como a função de onda não se refere à realidade (segundo esta interpretação, ver seção 3.1), 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 (comparar com a seção 3).

Na seção 4.2 examinaremos estas e outras nuances de opinião entre os fundadores da Mecânica Quântica, formando o agrupamento de visões que constituem *interpretações ortodoxas*.

### 4.1.3 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 mostaria 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 [18].

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*, ver seção 4.1.5 abaixo) 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  $\psi$ ), o potencial tem 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 um hipótese desnecessária [19].

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  $\psi$  (comportando-se como um sólito), e as ondas deste campo se propagam no espaço físico de 3-dimensões, e não no espaço de configurações, como para Bohm. Considera-se que esta proposta traz dificuldades insuperáveis para a interpretação da onda piloto.

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 [20].

#### 4.1.4 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 [21]. Geralmente tais interpretações conseguem derivar a equação de Schrödinger, mas têm dificuldade em explicar o processo de medição.

#### 4.1.5 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 (ver seção 3.1). 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 (seção 4.2) 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 [13], 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 na seção 4.2, item g).

Talvez o aspecto mais sedutor da interpretação dos coletivos seja sua análise do princípio de incerteza, que apresentamos na seção 3.3 (item 2).

A maior dificuldade de qualquer visão corpuscular é explicar experimentos de interferência (seção 2.1.1). Landé, desde 1951, tem argumentado 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), transferência esta que depende da presença de fendas no anteparo. Tal explicação, porém, não funciona para experimentos sem anteparos rígidos, como o do biprisma eletrônico (seção 2.1) [22].

#### 4.1.6 Interpretações de Potencialidade

Em seu excelente livro [23], M. Redhead agrupa as interpretações da Mecânica Quântica em três grupos principais, de acordo com a resposta a seguinte questão (comparar com a nossa questão V, seção 3.2): 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 propensidades ou *potencialidades* para produzir diferentes resultados de medição. Esta noção aristoteliana 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, com suas grandezas “latentes” [24] (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” (ver por exemplo seção 3.1). Argumentaremos mais adiante (seção 4.3) que esta é uma importante classe de interpretações, mas livros como o de Jammer 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.

## 4.2 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 4.1.2). 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, levando às palavras de Wheeler: “o passado não tem existência enquanto ele não é registrado no presente” [25].

(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 [26]. 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, e ressurgida na década de 90 [27]. 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, pois 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, Landau) não aceitava a postura de Bohr e von Neumann, segundo a qual a fronteira entre os mundos quântico e clássico podia ser traçado 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 [28]. Uma posição próxima foi defendida por Ludwig, que postulou que, para corpos macroscópicos, correções não-lineares para a equação de Schrödinger imporiam um comportamento clássico [29].

(e) *Interpretação “Eclética”*. Jammer 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 [30]. 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, salientando que a imprevisibilidade está ligada ao acoplamento do objeto quântico ao universo como um todo (durante a medição) [31].

(g) *Instrumentalismo radical*. Numa revisão de possíveis interpretações para o problema da medição, Wigner (1983) menciona 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” (Apêndice 2.1) é bastante comum entre os físicos, levando ao extremo o positivismo da interpretação ortodoxa e a visão epistêmica do estado quântico (seção 3.1). J. Park, um discípulo de Margenau, chegou a esta posição a partir da interpretação dos coletivos estatísticos (seção 4.1.5): “a Mecânica Quântica é uma teoria sobre a estatística de resultados de medições” [32].

(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 névoa de Wilson. Heisenberg (1927) discute esta possibilidade, salientando que neste caso a velocidade instantânea não se define [33].

(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 [34].

(j) *Interpretação da Soma sobre Histórias*. Em 1948, Feynman [35] 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.

### 4.3 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”. Em contrapartida, mas por esta mesma razão, Heisenberg prefere considerar a onda  $\psi$  como algo “objetivo”, mas não “real” [36].

Nos últimos anos, tem aumentado o número de propostas interpretativas condizentes com a visão ondulatória de que a função de onda corresponde a um realidade (apesar de um estado não poder ser determinado a partir de uma única medição). Um argumento positivista usado contra esta visão é que não se pode atribuir realidade a  $\psi$  porque seria impossível determinar o estado quântico a partir de uma única medição. Tentando refutar este argumento, Aharonov et al. [37] 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 4.2c).

(a) *Interpretação Eletromagnética*. Na proposta original de Schrödinger (mencionada na seção 4.1.1),  $e|\langle\psi|\psi\rangle|^2$  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  $\psi$* . 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 ( $E=hf$ )? (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 [38]. Mencionaremos algumas destas soluções mais adiante.

(b) *Interpretação Hidrodinâmica*. Partindo da equação de Schrödinger e escrevendo  $\langle \psi | \psi \rangle = \alpha e^{i\phi}$ , Madelung (1926) obteve uma equação hidrodinâmica para  $\alpha$ , sugerindo assim que um fluido com carga e massa distribuídos 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 [39].

(c) *Interpretação Ingênua com Colapsos*. Uma visão ondulatória realista pode ser obtida adaptando-se a interpretação positivista de von Neumann (seção 4.2b). 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 [40], e hoje em dia voltou a adquirir uma certa popularidade.

(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 o seguinte lema: “Não há saltos quânticos, nem há partículas!” [41]. 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 e vários outros físicos [42] 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, seção 4.1.4). 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 oitilhões 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 [43].

#### 4.4 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 (vimos um exemplo na seção 2.2.1, item 2). O que ela 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”. No Apêndice 3 salientamos os problemas desta visão.

(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 [44].

(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 [45].

(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  $S_x=+1/2$  (após a medição de spin na direção  $x$ ) e o final  $F$  for  $S_z=+1/2$  (após uma medição de spin na direção  $z$ ), a probabilidade de um evento intermediário  $E$  ser  $S_x=+1/2$  é 1, e a probabilidade de ser  $S_z=+1/2$  também é 1! Porém, como estas duas histórias não são consistentes, não se pode deduzir que  $S_x=+1/2$  e  $S_z=+1/2$  com probabilidade 1, para o mesmo evento  $E$ . Isso viola o cálculo de probabilidades clássico.

Outros autores, como Omnès, Gell-Mann e Hartle, desenvolveram esta interpretação propondo que ela seria um desenvolvimento 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 [46]. Implícito na abordagem de Griffiths está a aceitação da retrodição (ver seção 2.3, item 4), da visão epistêmica de estado (seção 3.1, item 4), e das medições fidedignas (seção 3.2, item 2), o que a enquadra na interpretação corpuscular dos coletivos estatísticos.

## 5 Mapeamento das Interpretações

### 5.1 Evolução das Preferências Interpretativas

Se uma pesquisa de opinião tivesse sido realizada entre os físicos para saber qual interpretação cada um deles defendia, poderíamos construir um gráfico mostrando a evolução das preferências interpretativas. Apesar de tal pesquisa sistemática não ter sido feita, esboçamos aqui qual poderia ter sido seu resultado.

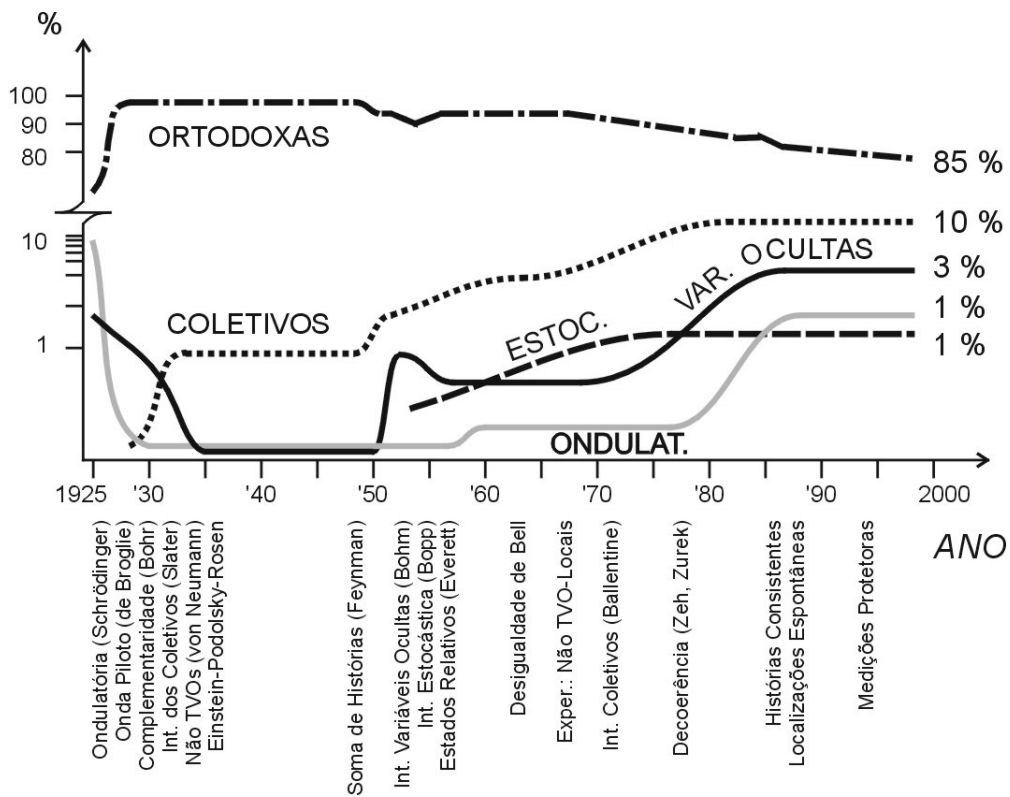


Figura 7: Gráfico fantasioso representando a porcentagem de físicos que defendem cada corrente interpretativa (Fonte: Chutemetria).

Na Fig. 7, apresentamos como a popularidade de cinco grandes grupos de interpretações teria evoluído ao longo do século. Os grupos são: interpretações ortodoxas (seções 4.1.2 e 4.2), interpretações corpusculares dos coletivos estatísticos (seções 4.1.5), de variáveis ocultas (seção 4.1.3), ondulatórias (seção 4.3) e estocásticas (seção 4.1.4). Note que o eixo ordenado do gráfico, marcando a porcentagem de físicos que possuem opinião e que defendem cada interpretação, é logarítmica até os 10%, sofre um salto entre 10 e 80%, sendo então linear!

Antes da criação da Mecânica Quântica, o positivismo já era forte em Heisenberg, por exemplo. Após o surgimento promissor das teorias semi-clássicas de de Broglie e Schrödinger, a complementaridade, o debate Bohr-Einstein e a obra de von Neumann colocou as interpretações ortodoxas em hegemonia absoluta. Nos Estados Unidos e na União Soviética firmou-se uma pequena tradição de interpretação dos coletivos. Com o dualismo realista de Bohm, as teorias de variáveis ocultas e as estocásticas ganharam vida, enquanto que Everett fez ressurgir a tradição ondulatória mantida apenas por Schrödinger (e de certa maneira pelo subjetivismo). O teorema de Bell e os experimentos violando as teorias realistas locais parecia que iria abalar as teorias corpusculares (estocásticas, dos coletivos) e de variáveis ocultas locais, mas não foi isso que aconteceu. Ballentine, inclusive, exerceu bastante influência a favor da interpretação dos coletivos. Na década de 80, as noções de decorência e de histórias consistentes foram utilizadas para fortalecer a visão ortodoxa, que já cedia espaço para visões realistas. Os artigos de Bell elogiando tanto o dualismo de Bohm quanto a interpretação das localizações espontâneas teve bastante impacto na nova geração. A sugestão de medições protetoras (seção 4.3) e um certo renascimento dos estados relativos de Everett favoreceram também a tradição ondulatória.

## 5.2 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) mencionados no início do capítulo 4. No mapa da Fig. 8, a abcissa 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.

- |  |   |
|--|---|
| <b>BA:</b> Int.Coletivos - Ballentine        | <b>IR:</b> Instrumentalismo Radical       |
| <b>BB:</b> TVO Bohm-Bub                      | <b>IS:</b> Interp. Subjetivista           |
| <b>BM:</b> TVO Bohm                          | <b>LE:</b> Localizações Espontâneas       |
| <b>BV:</b> Bohm-Vigier                       | <b>LM:</b> Interpretação Modal            |
| <b>CM:</b> Int.Coletivos Mínima              | <b>LO:</b> Lógica Operacional             |
| <b>CO:</b> Complementaridade                 | <b>LQ:</b> Lógica Quântica                |
| <b>CR:</b> Complement. Realista              | <b>MA:</b> Macrorealismo e Complem.       |
| <b>EE:</b> Eletrodinâmica Estocástica        | <b>MS:</b> Interp. da Matriz-S            |
| <b>EP:</b> Escola de Princeton               | <b>OP:</b> Teoria da Onda Piloto          |
| <b>ER:</b> Estados Relativos                 | <b>OS:</b> Int. Ondulatória - Schrödinger |
| <b>ES:</b> Interp. Estroboscópica            | <b>PA:</b> Int.Coletivos - Park           |
| <b>HI:</b> Interp. Hidrodinâmica             | <b>SH:</b> Soma sobre Histórias           |
| <b>HG:</b> Histórias Consistentes- Griffiths | <b>TR:</b> Interp. Transacional           |
| <b>HO:</b> Histórias Consistentes- Omnès     | <b>VE:</b> Visão Eclética                 |
| <b>IE:</b> Interpretações Estocásticas       | <b>ZE:</b> Decoerência - Zeh              |
| <b>IN:</b> Int. Ondulatória Ingênua          | <b>ZU:</b> Decoerência - Zurek            |

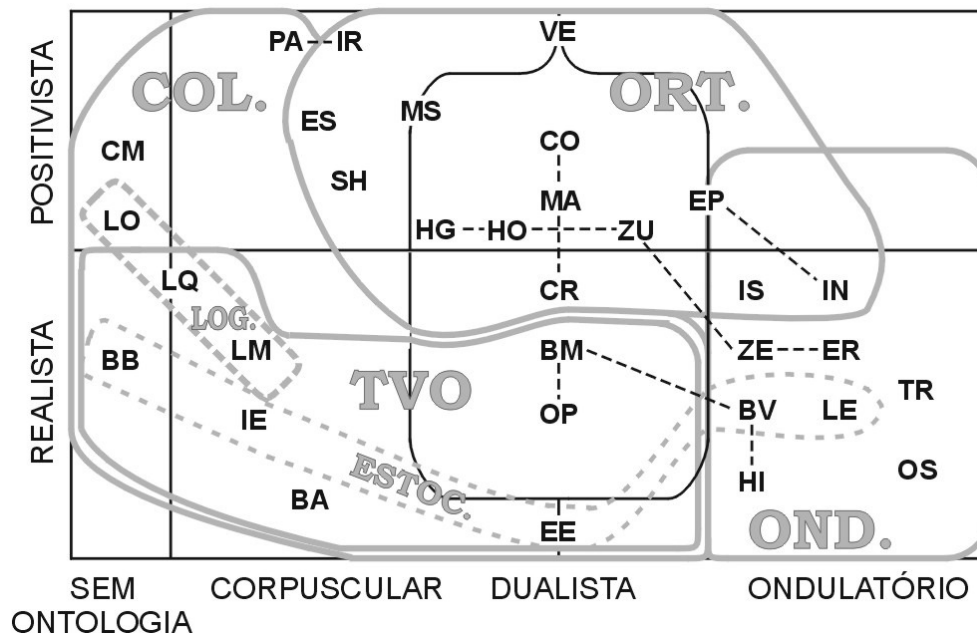


Figura 8: Mapa das interpretações da Teoria Quântica.

Cada interpretação particular está representada por duas letras. Interpretações que possuem uma ligação entre si aparecem ligadas por linhas tracejadas.

## 6 Conclusão

O estudo sistemático das interpretações da Teoria Quântica é ainda um campo vasto e não muito explorado. Os físicos que propõem novas interpretações muitas vezes fazem boas resenhas das outras visões. No entanto, é tarefa da “filosofia da física” tentar sistematizar o estudo comparativo das interpretações, delineando quais são as teses que cada visão responde claramente (como as questões I a VI apresentadas nos capítulos 2 e 3), 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, como agrupar as interpretações de maneira objetiva (sem se basear numa frágil intuição, como foi feito na Fig. 8), etc. O objetivo final desta abordagem poderia ser até o de avaliar as diferentes interpretações, ordenando-as de acordo com o mérito com que cada uma preenche um conjunto de requisitos.

Ocorre que a tradição da filosofia da física anglo-saxônica sofre uma influência muito forte da lógica e de concepções classicistas, ocupando seu tempo por exemplo com o desenvolvimento da interpretação modal ao invés de tentar compreender o que de fato é uma “interpretação” de uma teoria científica, qual a sua contrapartida psicológica (na mente do cientista), etc.

Espero então que este estudo um tanto quanto caótico (especialmente nos capítulos 4 e 5) sirva para despertar o interesse de físicos, filósofos, lógicos e educadores com relação a este rico campo das *interpretações das teorias científicas*.



## Apêndice 1: O Interferômetro Óptico de Mach-Zehnder

### Ap. 1.1 Alinhamento perfeito

Para explicar o funcionamento do interferômetro eletrônico de Mach-Zehnder oblíquo (Fig. 3b), consideraremos a versão óptica do interferômetro (Fig. 9), onde, ao invés de difrações através de camadas cristalinas, ocorrem reflexões e transmissões em *espelhos semi-refletores*, que deixam passar metade do feixe e refletem a outra metade [47].

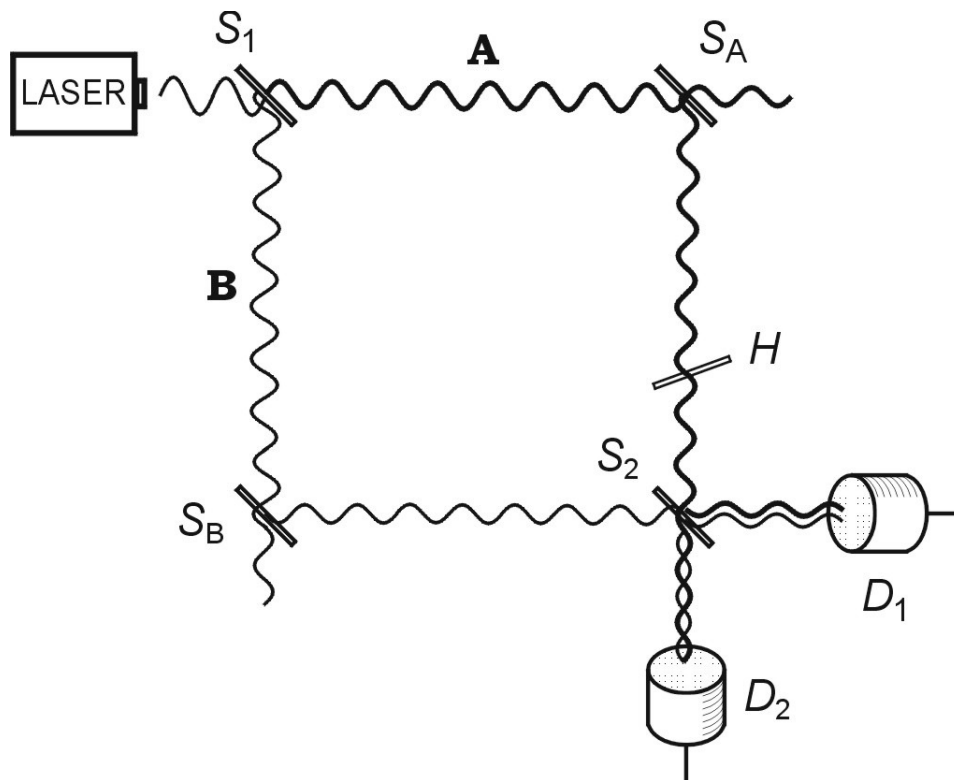


Figura 9: Interferômetro óptico de Mach-Zehnder com alinhamento perfeito.

Se as distâncias percorridas pelos dois componentes forem exatamente iguais e os espelhos estiverem perfeitamente alinhados, ocorre um fenômeno curioso. Após a última divisão de feixe, metade dos fótons seguem para  $D_1$  e *nenhum* é detectado em  $D_2$ !

Isso pode ser entendido segundo a física ondulatória clássica. Representemos o feixe de luz (assim como se faria com o feixe de elétrons) como um trem de onda unidimensional contínuo, de amplitude inicial  $\psi_0$ . Ao passar pelo primeiro espelho semi-refletor  $S_1$ , a amplitude é dividida em dois componentes cada qual com amplitude  $\psi_0 / \sqrt{2}$ . Nesta divisão de feixe, o trem de onda refletido  $B$  sofre um *deslocamento de fase* em relação ao trem  $A$  transmitido através do espelho. Para o caso mais simples de divisor de feixe sem perdas e simétrico, mostra-se que a cada reflexão ocorre um avanço de  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda em relação ao componente transmitido (ver Apêndice 1.3). Depois, cada componente é parcialmente refletido nos espelhos semi-refletores  $S_A$  e  $S_B$ , sendo que se podem ignorar os componentes transmitidos através destes espelhos. Os feixes resultantes  $A'$  e  $B'$  têm agora amplitude  $\psi_0/2$ . Por fim, os componentes voltam a se cruzar no espelho  $S_2$ , rumando então para os detectores  $D_1$  e  $D_2$ . O que acontece?

Como cada componente  $A'$  e  $B'$  se divide em duas partes em  $S_2$ , poderíamos esperar que cada detector medisse a mesma quantidade de fótons. Mas não é isso que acontece! Supondo que todas os espelhos estejam perfeitamente paralelos e que a distância percorrida pelos dois componentes sejam exatamente iguais, ocorre que todos os fótons (presentes em  $A'$  e  $B'$ ) são detectados em  $D_1$ , e nenhum em  $D_2$ !

Isso acontece devido à superposição construtiva em  $D_1$  e à superposição destrutiva em  $D_2$  (Fig. A1). O feixe  $A'$  se aproxima de  $S_2$  com uma amplitude  $\psi_0/2$  e com um deslocamento de fase relativo de  $\lambda/4$ , pois sofreu uma reflexão em  $S_A$ ; o feixe  $B'$  se aproxima com mesma amplitude e uma defasagem de  $\lambda/2$ , pois sofreu reflexões em  $S_1$  e  $S_B$ . No espelho semi-refletor  $S_2$ , metade do feixe  $A'$  é transmitido e metade é refletido, sendo que o mesmo ocorre para o feixe  $B'$ . Consideremos as partes de  $A'$  e de  $B'$  que rumam para  $D_2$ . O componente que percorreu o caminho  $A'$  passa direto sem reflexão, permanecendo defasado em  $\lambda/4$ , e passando a ter uma amplitude  $\psi_0/2\sqrt{2}$  após a divisão da onda; enquanto isso, o componente vindo de  $B'$  sofre uma reflexão adicional (em  $S_2$ ), ficando com uma defasagem de  $3\lambda/4$ , com amplitude  $\psi_0/2\sqrt{2}$ . Temos assim uma diferença de  $\lambda/2$  entre os componentes de mesma amplitude, o que corresponde a uma superposição destrutiva. Ou seja, as amplitudes que atingiriam  $D_2$  se anulam, e nada é medido neste detector.

No caso das partes que rumam para  $D_1$ , o componente que vem por  $A'$  sofre no total duas reflexões (em  $S_A$ ,  $S_2$ ), enquanto que o que vem por  $B$  também sofre duas (em  $S_1$ ,  $S_B$ ). Cada qual tem um deslocamento de fase de  $\lambda/2$ , e assim não têm nenhuma diferença de

fase entre si, resultando em uma superposição construtiva. Como cada um destes componentes que atingem  $D_1$  tem amplitude  $\psi_0/2\sqrt{2}$ , eles se somam resultando numa amplitude  $\psi_0/\sqrt{2}$  (que corresponde à metade da intensidade inicial – lembrando que a intensidade é o quadrado da amplitude –, dado que metade dos elétrons saem do interferômetro ao serem transmitidos em  $S_A$  e  $S_B$ ).

### Ap. 1.2 Padrões de Interferência

O comportamento ondulatório do feixe de luz pode também ser exibido inserindo-se um defasador  $H$  em um dos caminhos do interferômetro (Fig. 9). No caso óptico, tal defasador nada mais é do que uma lâmina fina de vidro. Ao girar lentamente a lâmina, o trem de onda que passa por ele sofre um deslocamento de fase  $\phi$ , e com isso alteram-se as superposições dos componentes que rumam para os detectores. Se a defasagem  $\phi$  for variada continuamente, a intensidade do feixe detectado em cada detector varia de forma proporcional a  $\cos^2\phi$ , constituindo-se num *padrão de interferência temporal*.

Ao montar-se o interferômetro em sala de aula, não se observa o desaparecimento completo do feixe rumando para  $D_2$ , mas sim um padrão de interferência *espacial*. Por que ocorre isso? Supusemos que o feixe de luz inicial podia ser representado por um trem de onda unidimensional, mas na realidade este feixe é levemente divergente, e assim devemos pensar nele como um trem de ondas esféricas. No entanto, o raciocínio que acabamos de fazer também vale neste caso, desde que os espelhos estejam perfeitamente alinhados e os caminhos ópticos sejam iguais. Ocorre que na prática é bastante difícil fazer este alinhamento. Se uma das condições mencionadas não for satisfeita, o que ocorre é justamente o aparecimento de um padrão de interferência espacial no plano em que se encontra  $D_1$ , e outro padrão complementar no plano de  $D_2$ . Isto pode ser visto intuitivamente na Fig. 10.

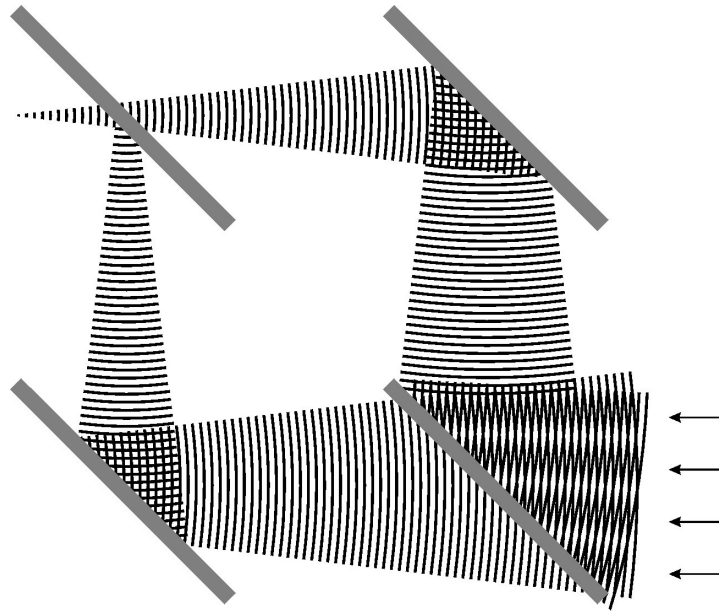


Figura 10: Para espelhos desalinhados, surgem padrões de interferência complementares em  $D_1$  e  $D_2$ .

### Ap. 1.3 Deslocamento de Fase no Espelho Semi-Refletor

Quando um feixe é dividido em um espelho semi-refletor (Fig. 9), o trem de onda refletido  $B$  sofre um *deslocamento de fase* em relação ao trem  $A$  transmitido através do espelho. Para o caso mais simples de divisor de feixe sem perdas e simétrico, mostraremos agora que a cada reflexão ocorre um avanço de  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda em relação ao componente transmitido [48].

Considere um feixe no estado  $|\psi_{0L}\rangle$ , incidindo em um espelho semi-refletor pela esquerda, e outro  $|\psi_{0R}\rangle$  incidindo pela direita. Ora, estes dois estados são ortogonais,  $\langle\psi_{0L}|\psi_{0R}\rangle=0$ , já que suas funções de onda não se interseccionam no espaço. Assim, com o passar do tempo, esses estados evoluem *unitariamente* para estados mutuamente ortogonais (caso em que *não há perdas* por absorção). Conforme a geometria do problema, podemos fazer com que os estados evoluídos se interseccionem espacialmente; mesmo assim, eles permanecerão ortogonais (ver Fig. 11).

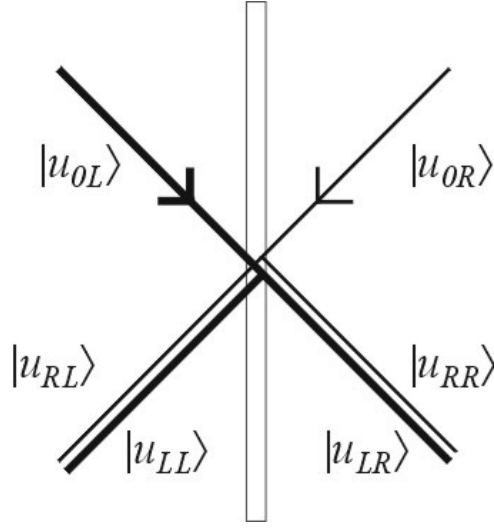


Figura 11: Ondas incidentes, refletidas e transmitidas em um espelho semi-refletor.

Assim, se o estado  $|\psi_{0L}\rangle$  evolui para uma amplitude refletida  $|\psi_{LL}\rangle$  somada a uma transmitida  $|\psi_{LR}\rangle$ ; e  $|\psi_{0R}\rangle$  evolui para uma refletida  $|\psi_{RR}\rangle$  mais uma transmitida  $|\psi_{RL}\rangle$ , então  $\langle\psi_{LL} + \psi_{LR}|\psi_{RL} + \psi_{RR}\rangle = 0$ . Escrevamos agora cada um desses termos da seguinte forma:  $|\psi_{LL}\rangle = R_{LL}e^{i\phi_{LL}}|u_{1L}\rangle$ , etc. Neste caso,  $R_{LL}$  é uma amplitude real não-negativa de reflexão,  $\phi_{LL}$  é a fase correspondente e  $|u_{1L}\rangle$  é o vetor de estado (de módulo 1) indo para a esquerda após a interação do feixe com o espelho. Fazendo as substituições, a condição de ortogonalidade final pode ser escrita como:  $\langle R_{LL}e^{i\phi_{LL}}u_{1L} + T_{LR}e^{i\phi_{LR}}u_{1R} | T_{RL}e^{i\phi_{RL}}u_{1L} + R_{RR}e^{i\phi_{RR}}u_{1R} \rangle = 0$ . Considerando que  $\langle u_{1L} | u_{1R} \rangle = 0$ , isso fornece:  $R_{LL}e^{i\phi_{LL}}T_{RL}e^{-i\phi_{RL}} + T_{LR}e^{i\phi_{LR}}R_{RR}e^{-i\phi_{RR}} = 0$ . No caso *simétrico*,  $R_{LL}e^{i\phi_{LL}} = R_{RR}e^{i\phi_{RR}}$  e  $T_{RL}e^{i\phi_{RL}} = T_{LR}e^{i\phi_{LR}}$ . Obtém-se assim, para a onda vinda da esquerda:  $e^{i(\phi_{LL}-\phi_{LR})} = -e^{i(\phi_{LR}-\phi_{LL})} = e^{i(\phi_{LR}-\phi_{LL}+\pi)}$ . Ou seja,  $\phi_{LL} - \phi_{LR} = \phi_{LR} - \phi_{LL} + \pi$ , o que resulta em  $\phi_{LL} - \phi_{LR} = \pi/2$ . Isto é, a amplitude que é refletida tem uma defasagem  $\pi/2$  maior do que a amplitude transmitida.

## Apêndice 2: Realismo vs. Positivismo

### Ap. 2.1 Realismo Científico

A primeira distinção a ser feita é entre o realismo ontológico e o epistemológico. Já usamos estes adjetivos filosóficos em outro contexto no início do capítulo 4. “Ontológico” significa “relativo às essências das coisas, ao ‘ser’ das coisas”, enquanto que “epistemológico” significa “relativo ao conhecimento das coisas”. O *realismo ontológico* é a tese de que existe uma realidade lá fora que é independente de nossa mente, ou de qualquer mente. A negação desta tese é chamada de *idealismo*, que pode assumir várias formas (veremos uma na seção Ap. 4.2, item II).

A grande maioria dos cientistas que escreveram sobre a Física Quântica aceitam que o mundo microscópico existe independentemente do ser humano. O ponto de discórdia não é este; a discussão é se a Teoria Quântica consegue descrever esta realidade enquanto esta não é observada. O *realismo epistemológico* afirma que sim, que a realidade lá fora pode ser conhecida de maneira fidedigna, e que a Teoria Quântica (incluindo uma interpretação) descreve esta realidade corretamente, mesmo quando nenhuma medição é feita (por exemplo, quando o elétron está dentro do interferômetro da Fig. 3b).

Mas o que significa “conhecer” a realidade ou “descrevê-la corretamente”? Esta é uma pergunta difícil, mas podemos imaginar (seguindo o espírito da Fig. 5) que a ciência seja uma linguagem cuja estrutura espelhe a estrutura da realidade. Supondo isso, diz-se que uma sentença (na teoria) é verdadeira se o fato (na realidade), a que se refere essa sentença, ocorrer. Esta é, grosso modo, a definição de “verdade por correspondência”, que é típica do *realismo científico* [49]. Essa definição se opõe à definição pragmática de verdade, a chamada “verdade por convenção”, que seria estabelecida pela comunidade científica (neste sentido, cada época histórica teria a sua verdade).

Uma interpretação realista de uma teoria física (ou seja, o realismo científico) comporta três afirmações básicas: 1) Realismo ontológico. 2) Teoria da verdade por correspondência. 3) Realidade dos termos teóricos: a teoria pode conter “termos teóricos” que se referem a entidades físicas que não são diretamente observadas. Além dessas características, costuma-se adicionar mais três afirmações para uma interpretação realista. 4) Realismo metodológico: atingir a verdade é a meta principal da ciência. 5) Realismo convergente (K. Popper): as teorias físicas se aproximam cada vez mais da verdade, sem talvez nunca atingi-la de maneira completa. 6) Inferência para a melhor explicação: a melhor explicação para o sucesso prático da ciência é a suposição de que as teorias científicas são de fato aproximadamente verdadeiras.

A negação de diferentes teses do realismo científico constituem formas de “anti-realismo”. O *relativismo* (Kuhn, Feyerabend) adota a definição de verdade pragmática. O *instrumentalismo* nega que as sentenças científicas tenham valor de verdade (ou no caso de van Fraassen, que isso seja importante), sendo importante a sua capacidade de fazer previsões corretas. A negação da tese 3 recai no que estamos chamando de *positivismo*, ou, para usar um termo mais preciso e neutro, no “descritivismo” (pois as teorias se limitariam apenas a descrever as observações). Uma maneira de negar o realismo convergente (tese 5) é o *convencionalismo*, defendido na passagem do século por H. Poincaré, segundo o qual a forma particular da teoria adotada tem diversos elementos convencionais, já que outras teorias empiricamente equivalentes são possíveis.

### Ap. 1.2 Anti-Realismo na Física Quântica

Niels Bohr, e a interpretação da complementaridade, aceitam o realismo ontológico, mas tendem a rejeitar o epistemológico, negando a tese 3 (realidade dos termos teóricos) do realismo científico. Nesse sentido esta interpretação é positivista (descritivista), apesar de existir uma grande discussão sobre se Bohr era positivista ou realista [50]. Antes da 2ª Guerra, o “positivismo lógico” do Círculo de Viena salientava que se a verdade ou falsidade de uma sentença não pudesse ser verificada, então ela careceria de sentido (por exemplo, a frase “a realidade física existiria mesmo que não existisse nenhum observador” seria sem-sentido). Dizemos que a interpretação da complementaridade é positivista porque ela só pode definir se um fenômeno é ondulatório ou corpuscular *após* completada a medição: antes de uma detecção, nada pode-se dizer com segurança (por causa do experimento de escolha demorada, ver final da seção 2.3). Além disso, o estado do sistema (que é bem definido mesmo antes da detecção) é visto por esta interpretação como um mero instrumento de cálculo (seção 3.1).

Diferentes interpretações da Teoria Quântica salientam diferentes formas de realismo ou de anti-realismo. Três tipos básicos de anti-realismo podem ser encontrados: i) o *instrumentalismo* afirma que a Mecânica Quântica não passa de um instrumento para fazer previsões experimentais; ii) o *idealismo* afirma que a consciência humana tem um papel importante na determinação do estado do objeto; iii) o *positivismo* nega que se afirme a existência de entidades não observáveis e que se afirme proposições não verificáveis.

Na discussão sobre o realismo científico, há quem declare que “o realismo morreu, quem o matou foi a Física Quântica” [51]. Esta afirmação, porém, não é precisa; o que morreu nos anos 70 (durante as discussões sobre o teorema de Bell) não foi o realismo em geral, mas um certo tipo que podemos chamar de *realismo classicista*, a tese de que a realidade tem uma estrutura próxima às nossas concepções e intuições clássicas a respeito do mundo.

Façamos um breve resumo de três “capítulos” da história do anti-realismo na Física Quântica:

(I) O primeiro capítulo está associado à noção de *complementaridade* (seção 4.1.2), e à afirmação que “uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes da observação” [52]. Defendia-se que a teoria só trata do observável: uma realidade não-observada pode até existir mas ela não é descritível pela linguagem humana. A realidade observada é fruto da relação entre sujeito e objeto (“relacionismo”), e esta realidade tem propriedades que dependem da escolha ou vontade do observador (o “voluntarismo” de von Weizsäcker – lembrar do experimento de escolha demorada).

(II) O segundo capítulo está associado ao idealismo ou *subjetivismo*. Ela surge da tese de que o colapso associado a medições só é causado pela observação humana (ver seção 4.2, item c). Filósofos adoram explorar os paradoxos trazidos por esta posição, como no exemplo do gato de Schrödinger, mas o consenso parece ser que tal posição radical é desnecessária (apesar de consistente).

(III) O terceiro capítulo está associado ao trabalho de John S. Bell, que mostrou que qualquer teoria realista que satisfaça a propriedade de “localidade” (salvo algumas exceções) são inconsistentes com a teoria quântica. Quem morreu com este resultado não foram as teorias realistas não-locais (como a de David Bohm), mas sim boa parte do *realismo local*, uma variedade de realismo classicista que defende que, na realidade, os sinais sempre se propagam com uma velocidade menor ou igual à da luz.

Por que o realismo é tão fortemente ligado ao classicismo? Como o realista não se prende aos dados observacionais, ele adota outros critérios – para avaliar a qualidade das teorias – que não se restringem apenas à “adequação empírica”. Dentre tais critérios estão o simplismo (a tese de que as leis da natureza são simples) e a harmonia com as suposições classicistas de outras teorias (científicas, metafísicas ou de senso comum) que adotamos. Ou seja, como a nossa visão do mundo macroscópico é classicista, temos a tendência a projetar essa visão no não diretamente visível mundo microscópico. Por outro lado, a postura positivista gerou bons resultados quando ela incentivou que se suspendesse a crença em certas teses teóricas clássicas e se concentrasse a atenção na definição operacional de grandezas físicas (Einstein e a relatividade restrita, 1905; Heisenberg, 1925). O positivismo, assim, funciona bem quando é preciso superar algumas das suposições do classicismo.

Alguns outros exemplos de suposições classicistas que são violadas por alguma interpretação da teoria quântica (além da localidade) são: determinismo, corpuscularismo (a matéria é composta de partículas), a tese de que o mundo existe em quatro dimensões, de que eventos presentes não afetam o passado, de que emissões de partículas ocorrem em instantes bem determinados, etc. Notemos, por fim, que o classicismo pode ser em boa parte adotado por abordagens positivistas, como é o caso da interpretação da complementaridade de Niels Bohr.



### Apêndice 3: Crítica da Lógica Quântica

Jammer (1974) dedica um capítulo inteiro para a Lógica Quântica, discutindo a lógica não-distributiva (G. Birkhoff e von Neumann), lógicas polivalentes (Février, Reichenbach), abordagens algébricas (Segal) e axiomáticas (Mackey, Piron, Mittelstaedt).

Sem querer abarcar todas essas abordagens, consideremos um exemplo típico de uso da lógica quântica não-distributiva [53]:

1) Se preparmos uma partícula de spin- $\frac{1}{2}$  no autoestado  $|+z\rangle$ , todos concordam que podemos afirmar a proposição P: “O spin na direção  $z$  está para cima”.

2) Se agora medirmos o componente de spin na direção  $x$ , todos concordam que o valor medido será ou + (para cima) ou – (para baixo). Fazendo uso agora da hipótese de medições fidedignas (seção 3.2, item 2), a presente interpretação afirma que, antes de medirmos, a proposição “Q ou R” é verdadeira, onde Q: “O spin na direção  $x$  está para cima” e R: “O spin na direção  $x$  está para baixo”. Note que esta afirmação seria negada por uma visão ondulatória do estado quântico, mas é aceita pela interpretação dos coletivos estatísticos (seção 4.1.5).

3) Como “P” é verdadeiro, e “Q ou R” é verdadeiro, podemos dizer que “P e (Q ou R)” é verdadeiro.

4) Pelo princípio de incerteza, não existem valores simultaneamente bem definidos para o spin na direção  $z$  e para o spin na direção  $x$ . Curiosamente, esta afirmação é negada por uma interpretação dos coletivos estatísticos que adota valores intrínsecos, e é aceita por uma visão ondulatória (ao contrário do que ocorreu no passo 2 acima).

5) Aceitando-se o enunciado do princípio de incerteza dado acima, dizer “P e Q” corresponderia a uma falsidade; da mesma maneira, “P e R” seria falso. Neste ponto, autores como Reichenbach diriam que “P e R” não é nem verdadeiro, nem falso, mas tem um valor de verdade *indeterminado*.

6) Do passo precedente, pode-se afirmar que “(P e Q) ou (P e R)” é falso.

7) Enfim, aceitando-se as hipóteses interpretativas dos passos 2, 4 e 5, chega-se à conclusão, comparando-se os passos 3 e 6, que “P e (Q ou R)” não é equivalente a “(P ou Q) e (P ou R)”, ao contrário do que ocorre na lógica clássica. Ou seja, a distributividade seria violada pela Lógica Quântica.

Neste exemplo simples, o problema não está na adoção de hipóteses interpretativas (o que é inevitável), mas sim na adoção de interpretações diferentes em passos diferentes (2 e 4).

Em seu trabalho pioneiro sobre Lógica Quântica, Birkhoff & von Neumann (1936) chegaram à não-distributividade de outra maneira, a partir de duas propriedades dos projetores no espaço de Hilbert: a *soma direta* (por exemplo, a soma direta de dois eixos diferentes é um plano) e a *intersecção* (a interseção entre dois eixos diferentes tem valor zero). Mostra-se que soma direta e interseção não obedecem a

distributividade. Ora, interpretando a intersecção como o conectivo lógico “e” (o que é plausível) e a soma direta como o conectivo “ou” (o que não é muito plausível), chega-se à Lógica Quântica. Mas o que justifica interpretar essas propriedades de projetores como conectivos lógicos? Jauch (1968) mostrou como interpretar experimentalmente a soma direta e a intersecção (por meio de filtros), mas tais operações experimentais permanecem longe dos sentidos usualmente associados aos conectivos lógicos “e” e “ou” [54].

## Referências

[1] Este artigo é o desenvolvimento de algumas idéias apresentadas no mini-curso “Introdução Conceitual à Física Quântica”, na *III Semana de Física - Centenário do Elétron* da Universidade Estadual de Londrina, em 17-18/09/97. O conteúdo deste mini-curso de seis horas seguiu as seções I-XII, XIX-XX do artigo: PESSOA JR., O., “Interferometria, Interpretação e Intuição: uma Introdução Conceitual à Física Quântica”, *Rev. Bras. Ens. Fis.* 19 (1997) 27-48. Gostaria de agradecer o convite feito pelos colegas da UEL e a proveitosa interação com Bia Fagundes e Roberto Montenegro, no IFUSP.

[2] No mini-curso e no artigo citado na nota 1 exemplificamos a dualidade onda-partícula por meio de experimentos com a luz. Mas para comemorar o centenário da descoberta do elétron, apresentamos aqui experimentos análogos feitos com elétrons.

[3] Este experimento foi feito pela primeira vez por MÖLLENSTEDT, G. & DÜKER, H., “Beobachtungen und Messungen an Biprisma-Interferenzen mit Elektronenwellen”, *Z. Phys.* 145 (1956) 377-97. Para uma introdução histórica a experimentos semelhantes, ver HASSELBACH, F., “Recent contributions of electron interferometry to wave-particle duality”, in SELLERI, F. (org.), *Wave-Particle Duality*, Plenum, Nova Iorque, 1992, pp. 109-25.

[4] TONOMURA, A.; ENDO, J; MATSUDA, T. & KAWASAKI, T., “Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern”, *Am. J. Phys.* 57 (1989) 117-20.

[5] MARTON, L., “Electron interferometry”, *Phys. Rev.* 85 (1952) 1057-8; MARTON, L.; SIMPSON, J.A. & SUDDETH, J.A., “Electron beam interferometer”, *Phys. Rev.* 90 (1953) 490-1.

[6] Ver p. 66 de: BOHR, N. (1934, orig. 1928), “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, in *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, pp. 52-91, republicado em: WHEELER, J.A. & ZUREK, W.H. (orgs.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, pp. 87-126. Há uma tradução deste texto para o português, usado pelo autor no curso de Fundamentos da Mecânica Quântica da pós-

graduação no IFUSP. Ver também: HEISENBERG, W. (1930), *The Physical Principles of Quantum Theory*, University of Chicago Press, pp. 20, 25.

[7] A estrutura de teoria científica exibida na Fig. 6 é o chamado “modelo do bolo de camadas”, proposto pelos herdeiros do positivismo lógico na década de 50. Ver FEIGL, H., “The ‘orthodox’ view of theories: remarks in defense as well as critique”, in RADNER, M. & WINOKUR, S. (orgs.), *Analyses of Theories and Methods of Physics and Psychology* (Minnesota Studies in the Philosophy of Science IV), University of Minnesota Press, Minneapolis, 1970, pp. 3-16. Uma limitação desta abordagem é que pouco foi feito para explicar como as estruturas de teorias científicas se desenvolvem com o passar do tempo.

[8] Um sistema *fechado* ou está isolado de qualquer perturbação do ambiente, ou sofre a ação de um campo externo “clássico”, ou seja, de um campo que não é afetado pelo estado do sistema. Quando ocorre uma medição, o sistema necessariamente deixa de estar fechado. (Isto porque o estado do sistema modifica o estado macroscópico do aparelho: afinal, ele é um medidor. Mas ao ocorrer isto, o campo de interação entre sistema e aparelho é modificado, o que viola a definição de sistema fechado.)

[9] HEISENBERG, W. (1981, orig. 1958), *Física e Filosofia*, Editora da Universidade de Brasília, p. 25 (22<sup>o</sup> parágrafo do cap. III).

[10] JAMMER, M. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, Nova Iorque. Ver pp. 160-6, 197-211. Citação de Jordan está na p. 161.

[11] Dentre os primeiros a salientar esta tese no domínio quântico estão Henry Margenau (interpretação corpuscular) e Louis de Broglie (interpretação dualista realista). A interpretação da complementaridade também aceita esta tese, à medida que o postulado quântico afirma que as trocas de energias se dão em pacotes bem localizados. Somente a visão ondulatória não seria afetada por uma violação desta tese.

Além de posição, argumenta-se que a outra grandeza diretamente mensurável é o *tempo*. Mais fundamental do que a medição do tempo, porém, parece ser o procedimento de *contagem*: contagem de eventos cíclicos no caso da avaliação de intervalos de tempo, e contagem de eventos quânticos no caso de medições de intensidade de campo.

[12] HEISENBERG, W. (1983, orig. 1927), “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”, in WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 62-84.

[13] MARGENAU, H. (1937), “Critical Points in Modern Physical Theory”, *Philosophy of Science* 4, 337-70. Ver p. 361. Esta discussão é retomada em: BALLENTINE, L.E. (1970), “The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics”, *Rev. Mod. Phys.* 42, 358-81.

[14] A noção de probabilidade é normalmente definida de maneira axiomática. As principais interpretações da probabilidade são a clássica (Laplace), freqüencista (R. von Mises), subjetivista (de Finetti), logicista (Jeffreys) e das propensidades (Popper). Ver resumo e

referências na seção 2 de: HOME, D. & WHITAKER, M.A.B. (1992), “Ensemble Interpretations of Quantum Mechanics. A Modern Perspective”, *Physics Reports* 210, 224-317.

[15] Além do relato apresentado por Jammer (1974), *op. cit.* (nota 10), existem diversas descrições detalhadas da formação da interpretação da complementaridade, por autores como E. MacKinnon (1982), J. Mehra & H. Rechenberg (1982-88), J. Hendry (1984), A. Pais (1991), O. Darrigol (1992), D. Cassidy (1992) e Mara Beller (1992).

[16] Os adjetivos “claros” e “sem ambigüidades” são usados para excluir os chamados *fenômenos intermediários*, que misturam aspectos ondulatórios e corpusculares, mas que também se apresentam em pares complementares. Os primeiros a descrever fenômenos intermediários foram: WOOTTERS, W.K. & ZUREK, W.H. (1979), “Complementarity in the Double-Slit Experiment: Quantum Non-Separability and a Quantitative Statement of Bohr’s Principle”, *Phys. Rev. D* 19, 473-84, republicado em: WHEELER & ZUREK (1983), *op. cit.* (nota 6), pp. 443-54. A rigor, o fenômeno deve se referir a um *detector* de uma montagem experimental (ou seja, num mesmo arranjo, diferentes detectores podem estar associados a diferentes tipos de fenômenos). Ver: PESSOA JR., O. (1998), “Complementing the Principle of Complementarity”, submetido ao *Am. J. Phys.*

[17] Um resumo da resposta de Bohr a EPR é apresentada nas pp. 72-6 de: BOHR, N. (1995, orig. 1949), “O Debate com Einstein sobre Problemas Epistemológicos na Física Atômica”, em Física Atômica e Conhecimento Humano, Ensaios 1932-1957, Contraponto, Rio de Janeiro, pp. 41-83. Não existe um claro consenso a respeito de como Bohr escapou ao argumento de EPR. Seguindo a análise de D’ESPAGNAT, B. (1979), “The Quantum Theory and Reality”, *Scient. Amer.* 241 (nov.), 128-40, haveria três suposições principais envolvidas tanto na derivação do teorema de Bell quanto do paradoxo de EPR: realismo, localidade e indução. Uma primeira leitura da resposta de Bohr sugere que ele rejeitava o critério de elemento de realidade de EPR. No entanto, este critério de EPR mistura realismo e localidade, e tendemos a concordar com REDHEAD, M. (1987), *Incompleteness, Non-Locality, and Realism*, Clarendon, Oxford, p. 77, de que o que Bohr acaba rejeitando é a noção de localidade. D’Espagnat, no entanto, afirma que a resposta de Bohr é uma violação da indução.

[18] Ver JAMMER (1974), *op. cit.*, pp. 261-71, e BELL, J.S. (1992; orig. 1966), “Sobre o Problema das Variáveis Ocultas em Mecânica Quântica”, *Cad. Hist. Fil. Ciên.* (série 3) 2(2), 243-57.

[19] O artigo original é: BOHM, D. (1952), “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of ‘Hidden’ Variables, I and II”, *Phys. Rev.* 85, 166-93, reimpresso em WHEELER & ZUREK (1983), *op. cit.* (nota 6), pp. 369-96. Um bohm texto foi traduzido para o português: BOHM, D. (1992; orig. 1962), “Variáveis Ocultas na Teoria Quântica”, in *A Totalidade e a Ordem Implícada*, Cultrix, São Paulo, pp. 98-153. Sobre a mecânica bohmiana, ver a coletânea: CUSHING, J.T.; FINE, A. & GOLDSTEIN, S. (orgs.) (1996), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, (*Boston Studies in the Philosophy of Science* 184), Kluwer, Dordrecht. A

comparação que faço com a teoria da onda-piloto de L. de Broglie foi retirada deste volume, do artigo de DEWDNEY, C. & HORTON, G., “De Broglie, Bohm and the Boson”, pp. 169-89.

[20] Um estudo aprofundado das teorias de variáveis ocultas de Bohm (1952) e Bohm & Bub (1966) é feito por BELINFANTE, F.J. (1973), *A Survey of Hidden-Variables Theories*, Pergamon, Oxford.

[21] BOYER, T.H. (1975), “Random Electrodynamics: The Theory of Classical Electrodynamics with Classical Electromagnetic Zero-Point Radiation”, *Phys. Rev. D* 11, 790-808. Uma resenha crítica das interpretações estocásticas é apresentada por GHIRARDI, G.C.; OMERIO, C.; RIMINI, A. & WEBER, T. (1978), “The Stochastic Interpretation of Quantum Mechanics: A Critical Review”, *Riv. Nuovo Cim.* 1, 1-34.

[22] Esta observação é relatada em HOME & WHITAKER, *op. cit.* (nota 14), sendo atribuída a R. Rosa (1979). O extenso artigo desses dois autores centra-se na interpretação dos coletivos, e faz uma bela resenha deste e de assuntos correlatos, sem esclarecer, porém, boa parte das questões levantadas. Com relação ao trabalho de Landé e de outros partidários desta interpretação, ver JAMMER, *op. cit.* (nota 10), cap. 10.

[23] REDHEAD (1987), *op. cit.* (nota 18), cap. 2.

[24] Margenau divide as interpretações da Mecânica Quântica nos mesmos três grandes grupos que Redhead: MARGENAU, H. (1954), “Advantages and Disadvantages of Various Interpretations of the Quantum Theory”, *Phys. Today* 7 (out.), 6-13.

[25] WHEELER, J.A., (1983), “Law without Law”, in WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 182-213. Citação da p. 194.

[26] VON NEUMANN, J. (1955), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press (orig. alemão 1932). WIGNER, E.P. (1963), “The Problem of Measurement”, *Am. J. Phys.* 31, 6-15, republicado em WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 324-41.

[27] LONDON, F. & BAUER, E. (1983), “The Theory of Observation in Quantum Mechanics”, in WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 217-59 (orig. francês 1939). O seguinte artigo apresenta o “amigo de Wigner”: WIGNER, E.P. (1983, orig. 1962), “Remarks on the Mind-Body Question”, in WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 168-81. Outros físicos que defenderam posições subjetivistas foram Jeans, Eddington e Heitler. Um exemplo recente da “recaída subjetivista” é H. Stapp, e toda uma corrente que defende que a consciência humana é um fenômeno essencialmente quântico.

[28] Ver discussão sobre Landau & Lifshitz em BELL, J.S. (1990), “Against ‘Measurement’”, in MILLER, A.I. (org.), *Sixty-Two Years of Uncertainty*, Plenum, Nova Iorque, pp. 17-31 (ver seção 6), republicado em *Physics World* (agosto 1990), 33-40 (ver pp. 34-5). Ver também: FOCK, V.A. (1957), “On the Interpretation of Quantum Mechanics”, *Czechosl. J. Phys.* 7, 643-56.

[29] LUDWIG, G. (1961), in BOPP, F. (org.), *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit*, Vieweg, Braunschweig, pp. 150-81.

[30] JAMMER (1974), *op. cit.* (nota 10), p. 68. Não encontrei nenhuma outra evidência de que Heisenberg realmente pensava assim; de qualquer forma, ele logo aceitou a dualidade de Bohr. Ver HEISENBERG (1930), *op. cit.* (nota 6), caps. II, III e seção IV.3.

[31] Um comentário sobre o abandono da complementaridade entre definição e observação se encontra na p. 112 de: MACKINNON, E. (1985), “Bohr on the Foundations of Quantum Theory”, in FRENCH, A.P. & KENNEDY, P.J. (orgs.), *Niels Bohr: A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge, pp. 101-20. O livro-texto mencionado é: BOHM, D. (1951), *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

[32] Ver pp. 286-7 de: WIGNER, E.P. (1983), “Interpretation of Quantum Mechanics”, in WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 260-314. Quanto à citação, ver p. 215 de: PARK, J.L. (1973), “The Self-Contradictory Foundations of Formalistic Quantum Measurement Theories”, *Int. J. Theor. Phys.* 8, 211-8.

[33] HEISENBERG (1927), *op. cit.* (nota 12), p. 63. Ver também a discussão em BOHM (1951), *op. cit.* (nota 29), pp. 144-8.

[34] STAPP, H.P. (1971), “S-Matrix Interpretation of Quantum Theory”, *Phys. Rev. D* 3, 1303-20.

[35] FEYNMAN, R. (1948), “Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics”, *Rev. Mod. Phys.* 20, 367-87.

[36] BORN, M. (1949), *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford University Press, pp. 105-6. HEISENBERG (1958), *op. cit.* (nota 9), p. 78 (8º parágrafo do cap. VIII).

[37] AHARONOV, Y.; ANANDAN, J. & VAIDMAN, L. (1993), “Meaning of the Wave Function”, *Phys. Rev. A* 47, 4616-26. Alguns críticos são: UNRUH, W.G. (1994), “Reality and Measurement of the Wave Function”, *Phys. Rev. A* 50, 882-7; ROVELLI, C. (1994), “Comment on ‘Meaning of the Wave Function’”, *Phys. Rev. A* 50, 2788-92.

[38] DORLING, J. (1987), “Schrödinger’s Original Interpretation of the Schrödinger Equation: A Rescue Attempt”, in KILMISTER, C.W. (org.), *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath*, Cambridge University Press, pp. 16-40. BARUT, A.O. (1988), “The Revival of Schrödinger’s Interpretation of Quantum Mechanics”, *Found. Phys. Lett.* 1, 47-56.

[39] Para as interpretações hidrodinâmicas, ver JAMMER (1974), *op. cit.* (nota 10), pp. 33-8, 49-54.

[40] EVERETT III, H. (1957), “Relative State Formulation of Quantum Mechanics”, *Rev. Mod. Phys.* 29, 454-62, reimpresso em WHEELER & ZUREK, *op. cit.* (nota 6), pp. 315-23. DEWITT, B.S. (1970), “Quantum Mechanics and Reality”, *Phys. Today* 23 (set.), 30-35.

[41] ZEH, H.D. (1993), “There are no Quantum Jumps, nor are there Particles!”, *Phys. Lett. A* 172, 189-92. Para um estudo filosófico da decoerência, ver PESSOA JR., O. (1998), “Can the Decoherence Approach Help to Solve the Measurement Problem?”, *Synthese* 113(3).

[42] Ver, por exemplo, GHIRARDI, G.C. & RIMINI, A. (1990), “Old and New Ideas in the Theory of Quantum Measurement”, in MILLER, *op. cit.* (nota 28), pp. 167-91. Ver também GISIN, N. & PERCIVAL, C. (1992), “The Quantum-State Diffusion Model applied to Open Systems”, *J. Phys. A*, 5677-91.

[43] CRAMER, J.G. (1986), “The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics”, *Rev. Mod. Phys.* 58, 647-87.

[44] FOULIS, D.J. & RANDALL, C.H. (1974), “The Empirical Logic Approach to the Physical Sciences”, in HARTKÄMPER, A. & NEUMANN, H. (orgs.), *Foundations of Quantum Mechanics and Ordered Linear Spaces*, Springer, Nova Iorque, pp. 230-49.

[45] KOCHEN, S. (1985), “A New Interpretation of Quantum Mechanics”, in LAHTI, P. & MITTELSTAEDT, P. (orgs.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics*, World Scientific, Cingapura, pp. 151-69.

[46] GRIFFITHS, R.B. (1984), “Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics”, *J. Stat. Phys.* 36, 219-72. Uma crítica é feita por: D’ESPAGNAT, B. (1989), “Are there Realistically Interpretable Local Theories?”, *J. Stat. Phys.* 56, 747-66. Ver também: OMNÈS, R. (1992), “Consistent Interpretations of Quantum Mechanics”, *Rev. Mod. Phys.* 64, 339-82.

[47] O Apêndice 1 segue de perto o artigo citado na nota 1. A única diferença na montagem experimental é que, no presente artigo, espelhos semi-refletores  $S_A$  e  $S_B$  substituem os espelhos de reflexão total  $E_1$  e  $E_2$  do artigo citado na nota 1. Em termos didáticos, a única novidade aqui é a explicação associada à Fig. 10. Esta figura, assim como outras referentes ao interferômetro, podem ser apresentadas em sala de aula por meio transparências (o “kit ondas”) colocadas em um retroprojektor.

[48] No artigo citado na nota 1, o sinal deste deslocamento está errado: o componente refletido *avança*  $\lambda/4$  em relação ao transmitido (ou seja,  $\phi_r = \pi/2$ ), e não atrasa. Isso é discutido em: ZEILINGER, A. (1981), “General properties of lossless beam splitters in interferometry”, *Am. J. Phys.* 49, 882-3. Uma derivação mais simples desta propriedade é apresentada no Apêndice 1.3.

[49] O termo “realismo epistemológico” pode se referir tanto ao conhecimento que um sujeito individual tem do mundo, quanto ao conhecimento sistematizado da ciência. Neste segundo caso, utiliza-se a expressão “realismo científico”. Esta seção sobre realismo e positivismo está mais desenvolvida no cap. XII das *Notas de Aula: Fundamentos da Mecânica Quântica*, IFUSP, 1996, do presente autor, submetido para publicação na Edusp. Mais sobre o assunto, no contexto da física quântica, pode ser encontrado em NIINILUOTO, I. (1987), “Varieties of Realism”, in LAHTI, P. & MITTELSTAEDT, P. (orgs.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics 1987*, World Scientific, Cingapura, 1987, pp. 459-83. Em português, ver CHIBENI, S.S. (1997), *Aspectos da Descrição Física da Realidade* (Coleção CLE 21), CLE-Unicamp, Campinas, cap. 2.

[50] Ver a coletânea: FAYE, J. & FOLSE, H.J. (1994), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (Boston Studies in the Philosophy of Science 153), Kluwer, Dordrecht. D. Murdoch, por exemplo, conclui que Bohr seria um “realista instrumentalista”, solução que certamente agradaria ao arauto da complementaridade!

[51] FINE, A. (1982), “The Natural Ontological Attitude”, republicado na excelente coletânea: LEPLIN, J. (org.), *Scientific Realism*, University of California Press, Berkeley, 1984, pp. 83-107.

[52] BOHR (1934), *op. cit.* (nota 6), p. 54.

[53] HUGHES, R.I.G. (1981), “Quantum Logic”, *Sci. Amer.* 245 (out.), 146-57

[54] BIRKHOFF, G. & VON NEUMANN, J. (1936), “The Logic of Quantum Mechanics”, *Annals of Mathematics* 37, 823-43. JAUCH, J.M. (1968), *Foundations of Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, Reading.