

Interpretações Básicas da Teoria Quântica

ECF5842 – Fundamentos da Mecânica Quântica
(adaptado do Encontro no Hades – IFUSP – 01/06/2012)

Oswaldo Pessoa Jr.
opessoa@usp.br

Há dezenas de interpretações diferentes da Teoria Quântica, e propostas novas vêm surgindo a cada ano. Neste resumo, apresentarei cinco grandes grupos, que cobrem a maioria das interpretações, e podem ser classificadas segundo diferentes “atitudes interpretativas”:

I) Uma distinção básica, de tipo “epistemológico”, é se as interpretações são “realistas” ou “fenomenalistas”. Por *fenomenalismo* designamos a abordagem do cientista que não vai além daquilo que pode ser observado, que não especula sobre o que está por trás das aparências, e considera que o papel da ciência é descrever os fenômenos observados, e não buscar explicações a partir de causas ocultas. Esta abordagem é típica dos movimentos positivista e pragmatista, e das abordagens instrumentalistas.

Já o *realista* científico defende que a ciência tem como alcançar as partes inobserváveis da realidade, não através da observação (é claro), mas através de inferências para a melhor explicação dos fenômenos. Por exemplo, Einstein defendeu que o espaço-tempo é curvo não porque isso possa ser diretamente observado (pois não pode), mas porque suas equações se simplificavam ao máximo.

II) Na classificação das interpretações, pode-se também fazer uma distinção de tipo “ontológico”, a respeito das entidades básicas que constituem o mundo real ou o mundo dos fenômenos. No caso da teoria quântica, há interpretações que se baseiam apenas em partículas (corpúsculos), que possuiriam sempre propriedades (posição, velocidade, energia, etc.) com valores bem definidas (exatos). Por outro lado, há interpretações que veem o mundo quântico como constituído apenas de ondas, ou de entidades difusas ou borradas. Há também aquelas que são dualistas, descrevendo o mundo com ambas as entidades (ondas e partículas). Por fim, há algumas interpretações que não adotam uma ontologia explícita (ênfatizando apenas a descrição matemática).

III) Há um terceiro eixo que é significativo para classificar as interpretações científicas, que é o aspecto “intencional” ou “emocional”, que as pessoas agregam às suas posições interpretativas. Há indivíduos que defendem ardentemente e até agressivamente uma interpretação, e o embate emocionalmente carregado envolvendo dois ou mais partidos pode resultar numa controvérsia científica. Há cientistas que apresentam idéias interpretativas novas, como as probabilidades negativas de Wigner, mas as consideram apenas como um instrumento útil de cálculo, e não como a base de uma nova interpretação da natureza.

Com essas distinções, proponho que se possam formar cinco grandes grupos de interpretações da teoria quântica:

(1) **Interpretações Ondulatórias Realistas.** Este ponto de vista considera que a função de onda quântica corresponde a uma realidade, uma realidade ondulatória, “borrada”, ou talvez uma “potencialidade”. Numa versão ingênua da interpretação ondulatória, a realidade que corresponde à função de onda sofreria colapsos toda vez que ela interage com um aparelho de medição. A versão “mentalista” de London & Bauer, de que a consciência seria a responsável pelo colapso das superposições quânticas, se enquadra neste grupo, apesar de se aproximar do item 4a (ver abaixo). Um problema conceitual de se supor que as ondas são reais é que os colapsos são “não-locais”, ou seja, envolvem efeitos que se propagam de maneira instantânea. Além disso, há de se resolver a questão de que as ondas para N partículas correlacionadas são definidas em $3N$ dimensões. A interpretação dos estados relativos de Everett (1957), a transacional de Cramer (1986), a da decoerência de Zeh (1993), e a das localizações espontâneas (Ghirardi et al., 1986) são outros exemplos de interpretações ondulatórias realistas.

(2) **Interpretações Realistas dos Coletivos.** Este é o ponto de vista segundo o qual o estado quântico não descreve partículas individuais, mas sim o coletivo estatístico (*ensemble*) associado a uma preparação experimental, ou seja, uma coleção abstrata infinita de objetos quânticos (independentes entre si) preparados da mesma maneira. Nesta interpretação realista (para a versão fenomenalista, ver item 5), as entidades microscópicas são partículas, sem uma onda real associada: as franjas de interferência que observamos seriam consequência das leis de propagação quânticas, regidas pela mecânica ondulatória, mas não haveria uma onda real. A característica corpuscular desta interpretação foi defendida explicitamente por Landé (1965), ao passo que outros defensores desta abordagem foram Kemble, Margenau, BlokhinsteV, Popper e Ballentine, sendo que este último argumenta que Einstein se inclui nesta interpretação. O princípio de incerteza seria apenas uma limitação estatística, podendo-se atribuir valores simultaneamente bem definidos para observáveis incompatíveis (como posição e momento). As interpretações estocásticas, exemplificadas em Bopp (1954), são corpusculares realistas, mas tendem a ser locais. A interpretação implícita ao se usar a Lógica Quântica é outro exemplo de uma abordagem corpuscular realista.

(3) **Interpretações Dualistas Realistas.** Esta interpretação foi formulada originalmente por Louis de Broglie, em sua teoria da “onda piloto”, e ampliada por David Bohm (1952) para incluir também o aparelho de medição. O objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas em geral desconhecida), e uma onda associada (ou um “potencial quântico”). A probabilidade 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. No nível ingênuo de um curso introdutório, esta abordagem está livre do problema da não-localidade, tendo como única dificuldade conceitual a existência de “ondas vazias”, que não carregam energia. O problema da não-localidade só surge quando se consideram duas partículas correlacionadas, como foi demonstrado por John S. Bell. Uma versão mais fenomenalista desta concepção é conhecida como “mecânica bohmiana”, que não associa realidade ao potencial quântico, só aos corpúsculos (se aproximando do item 2). A eletrodinâmica estocástica de Boyer, H. França, etc., trabalha com um dualismo realista que separa férmions corpusculares e ondas eletromagnéticas coerentes em um fundo estocástico.

(4) *Interpretações da Complementaridade.* A interpretação desenvolvida por Niels Bohr entre 1928 e 1935 é fenomenalista (se aproximando mais de um construtivismo neokantiano do que de um positivismo lógico, que são ambos fenomenalistas), e pode ser considerada também dualista. Conforme o experimento, podemos usar ou uma descrição corpuscular, ou uma ondulatória, mas nunca ambas ao mesmo tempo (esses aspectos excludentes, porém, “exauririam” a descrição do objeto). Isto não significa, porém, que o objeto quântico *seja* um corpúsculo ou *seja* uma onda. Segundo qualquer abordagem fenomenalista (no contexto da física), só podemos afirmar a existência das entidades *observadas*. Afirmer, por exemplo, que “um elétron não-observado sofre um colapso” não teria sentido. Um fenômeno ondulatório se caracteriza pela medição de um padrão de interferência, e um corpuscular pela possibilidade de inferir (ou melhor, “retrodizer”) uma trajetória bem definida. O aspecto pontual de toda detecção (considerada pelas interpretações 2 e 3 como a maior evidência da natureza corpuscular dos objetos quânticos), que ocorre mesmo em fenômenos ondulatórios, é considerado o princípio fundamental da teoria quântica, e chamado por Bohr de “postulado quântico”. Há diversas variações desta abordagem, como as várias propostas de Heisenberg, a de Feynman, etc., constituindo as chamadas interpretações “ortodoxas” (que incluem também os itens 4a e 5). Mais recentemente, podemos destacar a interpretação das histórias consistentes de R.B. Griffiths (1984) e Omnès (1992).

(4a) Vale mencionar que não há interpretações ondulatórias fenomenalistas, já que as ondas quânticas não são observadas diretamente. O que mais se aproximaria disso seria a visão de John von Neumann (1932), que descrevia todos os objetos (incluindo aparelho de medição e até o observador humano) a partir de funções de onda, sem no entanto defender que essa descrição correspondesse à realidade. Tal abordagem, que nos anos 60 seria liderada por Wigner, é às vezes chamada de interpretação de Princeton, em oposição à de Copenhague, que incluiu Bohr, Heisenberg, Pauli e, nos anos 60, Rosenfeld (rival de Wigner).

(5) *Interpretações Instrumentalistas dos Coletivos.* A atitude mais comum entre os físicos, que pode ser enquadrada no conjunto de interpretações “ortodoxas” (como as do item 4), combina uma atitude anti-realista com a tese (defendida também pelo item 2) de que a teoria quântica é uma descrição estatística, que refere-se a um coletivo estatístico, e não a partículas individuais. Esse fenomenalismo pode ser chamado de “instrumentalismo”, caracterizado jocosamente como a atitude do tipo “cala boca e calcula”. A ontologia é basicamente corpuscular, pois não faz sentido afirmar nada a respeito do que acontece por trás dos fenômenos, e o que podemos observar nos experimentos quânticos são sempre eventos pontuais. Defensores desta abordagem às vezes dizem que “há apenas uma única interpretação da mecânica quântica”, que estaria associada à regra de Born, e que as outras abordagens são apenas elucubrações filosóficas estéreis. Trata-se de um fenomenalismo mais radical do que o da interpretação da complementaridade, pois este último ao menos aplica seus conceitos para detecções individuais, além de ter um reconhecido papel didático. Uma visão corpuscular fenomenalista aparece no trabalho inicial de Heisenberg (1927), e uma sofisticada versão recente é apresentada pelo físico israelense Asher Peres. A leva recente de interpretações baseadas no conceito de informação (Zeilinger, Bub, Fuchs, etc.) pode ser enquadrada aqui. Para esta interpretação, não há porque falar em violação da localidade no teorema de Bell: “o conceito de realidade só atrapalha”.