

Redução de estado na física quântica: amplificação ou consciência?

Osvaldo Pessoa Jr.[†]

Depto. de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo

O presente trabalho é um breve estudo do problema do “colapso” ou “redução de estado”, na física quântica. Aceitando que se possa tratar desse conceito como um processo real, faz-se uma distinção entre duas classes de interpretações. A classe *objetivista* vê na amplificação uma condição suficiente para o colapso, ao passo que a classe do *observador quântico* nega isso. Com relação à primeira classe, discutiremos duas posições pouco exploradas na literatura recente, apresentando um experimento factível que examina se o colapso poderia ocorrer na interação com placas detectoras. Na segunda classe, incluímos a interpretação subjetivista de London & Bauer e a dos muitos mundos de Everett. Essas duas classes não podem ser ambas consideradas verdadeiras, pois existe um experimento para o qual elas prevêem resultados diferentes, apesar de tal experimento não ser factível. Ao final, discute-se brevemente a relevância para esta discussão da pesquisa com superposições macroscópicas.

1. Superposição e colapso

Um traço essencial da teoria quântica é a conciliação entre aspectos contínuos (ondulatórios) e discretos (corpúsculares) para a matéria. A maneira exata pela qual esta conciliação é feita depende da “interpretação” adotada. Para fins didáticos, podemos adotar uma dessas interpretações e exprimir por meio de imagens o que se entende por “superposição” e por “colapso”.

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

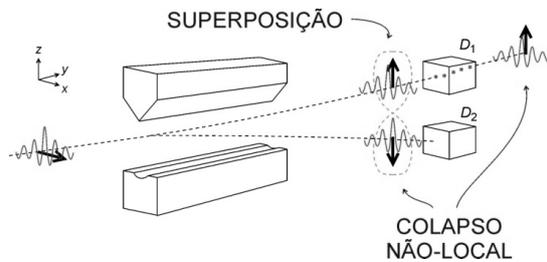


Figura 1:
Superposição e
colapso no
experimento de
Stern-Gerlach.

Considere a Fig. 1, que representa um átomo por meio de um pacote de ondas e por uma flechinha, que indica seu momento angular (que chamaremos simplificada de “spin”). Vindo da esquerda, com o spin na direção $+x$, o átomo passa por ímãs de Stern-Gerlach, decompondo-se em dois componentes que estão em “superposição quântica”, com spins na direção $+z$ e $-z$, antes de incidir nos detectores D_1 e D_2 . Isso implica que a probabilidade de detecção em cada trajetória possível é $\frac{1}{2}$. Quando a detecção finalmente ocorre, o átomo é observado em apenas um dos detectores, no caso D_1 . A descrição quântica, após a medição, não envolve mais um termo de superposição com a amplitude que rumava para D_2 . O desaparecimento deste componente se chama “colapso” ou “redução de estado”. Esse desaparecimento do componente em D_2 devido à detecção em D_1 ocorreria de maneira praticamente instantânea mesmo que os detectores estivessem separados a distâncias imensas, de maneira que se diz que o colapso é “não-local”.

Por que é necessário supor que os estados quânticos se encontrem em superposições de termos separados no espaço? Não se pode supor que a “escolha” entre os caminhos 1 e 2 já é feita ao sair dos ímãs, no estágio às vezes chamado de “análise” dos feixes? A resposta é negativa, por causa da possibilidade de *recombinar* os feixes.

Considere a Fig. 2, nos quais os detectores da figura anterior são removidos. Na parte de cima (Fig. 2a), o feixe atômico é recombinado em um segundo ímã de Stern-Gerlach, e o estado original é obtido, com o spin apontando na direção $+x$. Neste caso não ocorreu colapso em instante algum. Já na parte de baixo da figura (Fig. 2b), supõe-se que o átomo já escolheu uma de suas trajetórias possíveis, o que equivaleria a dizer que ocorreu um colapso. Neste caso, a recombinação dos feixes leva a um estado final *diferente* do inicial (com spin na direção $+z$). No entanto, ao se realizar na prática o experimento de recombinação, observa-se a recuperação do estado inicial (Fig. 2a). Assim, é *necessário* supor que o sistema quântico está numa superposição *antes* que ocorra qualquer medição.

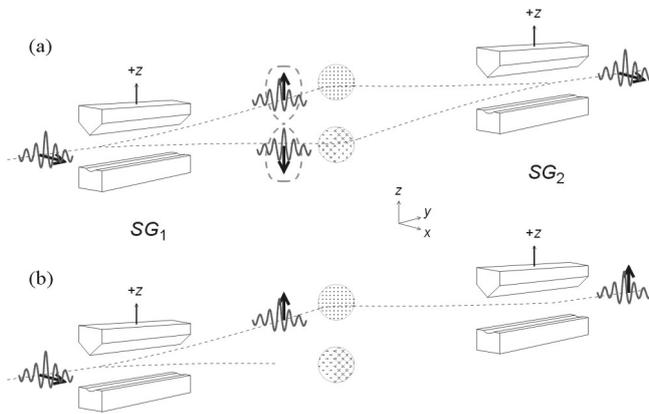


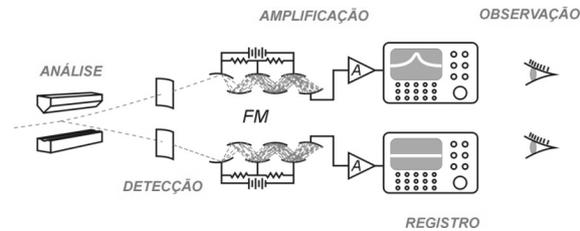
Figura 2:
 Experimento de
 recombinação
 para distinguir
 situações com e
 sem colapso.

2. A causa do colapso: visão objetivista

Vamos supor que a descrição que foi feita do colapso corresponda a algo que ocorre na realidade. Esta tese realista não é aceita por importantes interpretações da teoria quântica, como a maioria das visões ortodoxas e a interpretação dos “ensembles” estatísticos (Pessoa 2005). Mas supondo que faça sentido referir-nos a um colapso como um processo real, a pergunta que se coloca é *em que estágio do processo de medição ocorre o colapso?*

A Fig. 3 ilustra as possibilidades. Em primeiro lugar, já argumentamos que na *análise* dos feixes pelo ímã de Stern-Gerlach não pode ocorrer colapso, pois um experimento de recombinação leva ao estado inicial. Outra possibilidade é que o colapso ocorra na interação do átomo com o *detector* (antes da amplificação), aqui representado por finas placas metálicas. Se o átomo incide em uma destas placas, um elétron é liberado, e este é submetido a um processo de *amplificação*. Uma fotomultiplicadora (*FM*) ou outro equipamento mais moderno transforma uma corrente de um elétron em uma corrente de um milhão de elétrons. Para realizar este feito, é preciso fornecer energia ao sistema. Será que é esta a etapa na qual ocorre o colapso? Uma amplificação adicional (*A*) leva finalmente a um *registro* macroscópico, na figura representado pela tela de um osciloscópio. Por fim, um ser consciente *observa* o fenômeno e, ao final de toda esta cadeia, temos a certeza de que o átomo se localiza em apenas um dos caminhos. Em que etapa ocorre o colapso?

Figura 3:
Etapas no
processo de
medição.



Podem-se dividir as respostas a esta pergunta em duas classes. A primeira, de caráter *objetivista*, defende que a realização de uma amplificação é condição suficiente para a ocorrência do colapso. Isso é consistente com a interpretação que considera que o registro macroscópico irreversível é suficiente para caracterizar o colapso. Uma subclasse dessas posições objetivistas defende que o colapso é anterior à amplificação, que ele se dá na interação do objeto quântico com a placa detectora. Examinaremos a classe objetivista nas seções 4 e 5.

3. Colapso segundo as visões do observador quântico

Uma segunda classe de respostas à questão considerada – em que etapa ocorre o colapso? – envolve interpretações que negam que a amplificação seja suficiente para a ocorrência do colapso. Isso leva a um envolvimento direto da consciência do observador no mundo quântico, de forma que chamaremos esta classe de teorias do *observador quântico*. Interpretações subjetivistas (London & Bauer, 1939) defendem que o colapso ocorre apenas quando um ser consciente observa o fenômeno. Apesar de tal solução ser radical, não há um experimento factível que a refute (para um exame geral das teses subjetivistas na teoria quântica, ver Pessoa, 2001).

Outra visão pertencente a esta classe é a interpretação dos muitos mundos de Everett (1957), retomada por DeWitt (1970), e bastante popular nas últimas duas décadas. Segundo esta visão, chamada originalmente de interpretação dos “estados relativos”, o universo como um todo é descrito por uma grande função de onda, que evolui linearmente, sem reduções de estado. Em consequência, ela considera que *os próprios seres humanos, durante uma medição quântica, entram em superposição*. Cada “ramo” desta superposição corresponderia a um resultado da medição quântica, e a memória do ser humano, em cada ramo, não teria acesso às memórias dos outros ramos. Assim, em cada ramo, o ser humano teria a ilusão de que apenas *um* resultado de medição se produziu, e diria que tal resultado surgiu após uma “redução” do estado quântico. Mas, na verdade, ele

teria entrado numa superposição macroscópica, e nenhuma redução de fato teria ocorrido: esta seria apenas uma aparência.

Admitindo que a interpretação dos muitos mundos dê conta das frequências relativas observadas em medições quânticas e que ela seja empiricamente adequada (já que o experimento-de-pensamento mencionado acima não é factível), a crítica filosófica mais usual que se faz é que ela complicaria desnecessariamente a ontologia da teoria quântica, postulando infinitades de universos paralelos, o que violaria o preceito de simplicidade da “navalha de Ockham”. Outras críticas são discutidas por Barrett (1999, pp. 154-79).

Dentre essas críticas, o argumento que parece mais relevante é de natureza epistemológica (Shimony, 1986, pp.160-1). Qual é a evidência empírica que sustenta a teoria quântica dos estados puros (ou seja, deixando de lado o formalismo dos operadores de densidade)? São experimentos realizados em sistemas microscópicos, com *uma* partícula em superposição ou com *poucas* partículas emaranhadas. É este domínio de aplicação que corroborou a teoria quântica, incluindo o postulado da projeção que descreve a redução de estado. Qual seria então a justificativa para que a interpretação dos muitos mundos estendesse a teoria para o universo como um todo? Ou seja, qual a justificativa para sustentar que a teoria quântica (de estados puros) é universal? É lícito pretender que a teoria quântica (de estados puros) se aplique a todos os corpos do universo, só porque ela é a melhor teoria disponível para o domínio restrito de sistemas microscópicos?

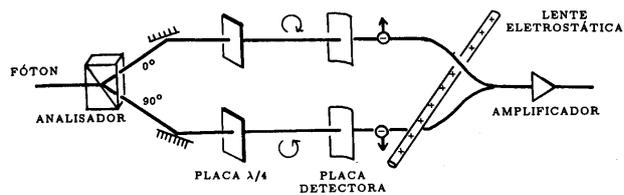
4. Teste de que o colapso ocorre na detecção

Na primeira classe de interpretações para o colapso, que chamamos “objetivistas”, mencionamos a posição que defende a tese de que o colapso ocorra na interação do objeto quântico com a placa detectora, antes de qualquer amplificação. Essa possibilidade foi defendida por Machida & Namiki (1980) e poderia talvez ser sustentada a partir das propriedades coletivas dos elétrons nas placas detectoras, e de seu possível acoplamento com o ambiente.

Em princípio, é possível realizar um experimento para testar esta hipótese (Pessoa 1992, pp. 206-7). Considere um feixe de luz que incide em um prisma birrefringente, e é separado em componentes polarizados ortogonalmente a 0° e a 90° (Fig. 4). O experimento com luz é análogo ao experimento de Stern-Gerlach visto anteriormente, e podemos considerar cada “fóton” propagando individualmente (não entraremos aqui na discussão sobre o que seria um fóton). Placas de $\frac{1}{4}$ de onda fazem com que os fótons adquiram uma polarização circular. Ao incidir sobre as placas detectoras, cada fóton é absorvido por um elétron, que é então ejetado. De acordo com o “efeito Fano” previsto em 1969 (ver Kessler, 1985, pp. 14-6), existe uma correlação entre o sentido de

polarização circular do fóton incidente e o spin do elétron ejetado, que pode estar na direção $+z$ ou $-z$. Se fosse possível recombinar os elétrons ejetados em cada canal (usando um campo elétrico apropriado) e medir o spin final, poder-se-ia determinar se o estado final do elétron é uma superposição dos estados na direção z (significando que não houve colapso) ou se está em uma das direções $+z$ ou $-z$ (sugerindo que houve colapso). A primeira possibilidade, indicando que não houve colapso na interação com a placa detectora, refutaria a hipótese de Machida-Namiki. Já a segunda possibilidade seria menos conclusiva, pois poderia ser explicada tanto pela ocorrência de um colapso quanto por imprecisões experimentais. As dificuldades em se recombinar elétrons ejetados e medir seu spin parecem inviabilizar esta proposta específica de experimento, mas talvez seja possível modificar o arranjo de maneira adequada para investigar o efeito.

Figura 4:
Experimento
para testar se o
colapso ocorre
na interação
com placas
detectoras.



5. Amplificação como condição suficiente para o colapso

Supondo que o colapso não ocorre na mera interação com uma placa metálica e ejeção de um elétron, surge a questão de se a amplificação provoca o colapso. Nas décadas de 50 e 60, surgiu a hipótese de que a amplificação, vista como um processo termodinâmico irreversível, seria condição necessária e suficiente para a ocorrência de um colapso (Ludwig, 1954). O trabalho de Daneri, Loinger & Prosperi (1962) levou adiante o programa de Ludwig de descrição deste processo, e na discussão subsequente apontou-se explicitamente a amplificação como processo chave para a ocorrência do colapso. Tausk (1966) e Jauch, Wigner & Yanase (1967), porém, apresentaram um problema para essa interpretação, baseado na noção de “experimento de resultado nulo”, de Renninger (1960).

Considere a Fig. 5, no qual há um detector em apenas um dos caminhos possíveis do átomo. Antes de atingir o detector, o objeto quântico está em estado de superposição, mas ao atingir o equipamento, o colapso ocorrerá ou para um

caminho ou para outro. Suponha que o colapso ocorra para o caminho em que *não* há detector (situação representada na figura). Neste caso, claramente, não houve amplificação, pois o átomo não transferiu energia para o detector. Assim, é possível haver colapso sem amplificação, ou seja, a amplificação não é condição *necessária* para haver colapso. Essa crítica prejudicou a aceitação do modelo de Daneri et al., mas eles puderam se defender mostrando que seu formalismo não exigia a amplificação, mas apenas o acoplamento do objeto quântico com os detectores (Loinger, 1968). Ou seja, acabaram adotando uma posição semelhante à proposta posterior de Machida & Namiki, segundo a qual o importante é o estágio da detecção, anterior à amplificação.

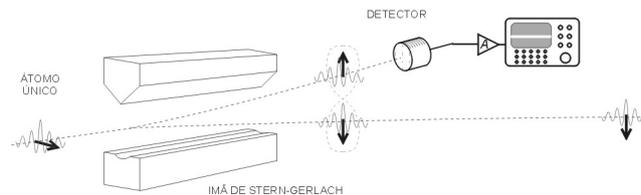


Figura 5:
Experimento
de resultado
nulo.

Visto que a amplificação não é condição necessária para o colapso, seria ela uma condição *suficiente*? Uma motivação para esta tese é que a amplificação sempre envolve um acoplamento com uma fonte externa de energia, e que isso então poderia ser suficiente para destruir qualquer coerência da função de onda do objeto quântico. No entanto, por si só, tal argumento tem força limitada, já que perda de coerência não implica colapso, e já que se pode incluir a fonte de energia em um sistema fechado mais amplo (para uma discussão desses dois pontos, ver Pessoa, 1998).

6. Um experimento-de-pensamento

Uma consequência da tese de que a amplificação é condição suficiente para a redução é que *aparelhos de medição usuais não entram em superposições* (de estados macroscopicamente distinguíveis), ao contrário do que defendem as interpretações subjetivista e dos muitos mundos. Isso sugere um experimento-de-pensamento para distinguir essas duas classes de interpretações sobre o colapso.

Considere um experimento de interferência em que se tenta colocar um aparelho macroscópico em um estado de superposição. O próprio Everett (1973) considerou, de passagem, essa possibilidade. A montagem seria semelhante àquelas representadas nas Figs. 2a e 4, só que a recominação seria realizada *depois* de a amplificação ter sido efetuada. Ter-se-ia que realizar uma

interferência entre duas correntes macroscópicas, ou entre dois osciloscópios macroscópicos! Além disso, ter-se-ia que evitar o acoplamento do sistema com o ambiente, ou seja, seria preciso isolar o sistema (incluindo a fonte de energia para a amplificação) do ambiente, o que é impraticável para corpos macroscópicos (Zeh, 1970). Se a redução ocorre antes ou durante a amplificação, está claro que não se poderia observar um efeito de interferência. Por outro lado, se as interpretações subjetivista e dos muitos mundos estiverem corretas, poderia haver interferência.

Temos assim um experimento-de-pensamento, não factível, que serve para distinguir duas classes de teorias sobre o colapso. Em outras palavras, essas duas classes de teorias (objetivista e do observador quântico) não podem ser ambas verdadeiras, no sentido da concepção da verdade por correspondência. (Por outro lado, pode-se também afirmar que as interpretações subjetivista e a dos muitos mundos não podem ser ambas verdadeiras, já que a primeira nega que um ser humano possa estar em um estado de superposição de componentes macroscopicamente distinguíveis, ao passo que a segunda afirma isso.)

Outro ponto a ser levantado com relação a esta discussão envolve o chamado “macrorealismo” (Leggett, 2002), a tese de que não podem existir superposições macroscópicas. A evidência parece apontar para uma negação do macrorealismo, ou seja, superposições macroscópicas, tipo “gatos de Schrödinger”, são possíveis, desde que condições satisfatórias de isolamento sejam implementadas (ver Leggett, 2002, pp. 438-46). Aceitaremos esta possibilidade em nossa discussão. A classe de visões do observador quântico (ou seja, as interpretações subjetivista e de Everett) obviamente aceita superposições macroscópicas. A classe objetivista, por seu turno, apenas nega que tais estados sejam possíveis após a ocorrência do processo de amplificação, que ocorre em medições quânticas usuais. A obtenção de superposições macroscópicas envolveria procedimentos experimentais diferentes da amplificação com fontes de energia externa, usadas em medições quânticas.

7. Conclusões

A finalidade deste artigo foi colocar novamente em pauta o problema do colapso na teoria quântica. Deixando de lado um exame de todas as posições da literatura, concentramo-nos em visões realistas que associam o colapso a uma etapa específica do processo de medição. Dentre essas, duas classes de interpretações são distinguíveis a partir de um experimento-de-pensamento não factível, descrito na seção 6. A classe objetivista tem recebido pouca atenção na literatura recente, mas suas afirmações merecem ser investigadas, especialmente porque suas teses parecem ser testáveis experimentalmente, conforme indicado na seção 4. Há também a questão de conciliar sua visão com a possibilidade de construção de superposições macroscópicas, ou seja, é preciso esclarecer as

diferenças entre o processo de amplificação realizado em medições quânticas usuais e aquele usado na construção de superposições macroscópicas. Do lado das visões do observador quântico (subjativismo e muitos mundos), as críticas mais fortes são de natureza epistemológica, já que sua interpretação pode ser considerada empiricamente adequada. No entanto, experimentos como o mencionado na seção 4 podem um dia levar a uma derrocada empírica de tais interpretações.

Referências bibliográficas

- Barrett, J.A. (1999), *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford: Oxford University Press.
- Daneri, A., Loinger, A. & Prosperi, G.M. (1962), “Quantum Theory of Measurement and Ergodicity Conditions”, *Nuclear Physics* 33, 297-319.
- DeWitt, B.S. (1970), “Quantum Mechanics and Reality”, *Physics Today* 23 (Sept.), 30-35.
- Everett III, H. (1957), “Relative State Formulation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 29, 454-462.
- Everett III, H. (1973), “The Theory of the Universal Wave Function”, in De Witt, B.S. & Graham, N. (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press, pp. 3-140.
- Jauch, J.M., Wigner, E.P. & Yanase, M.M. (1967), “Some Comments concerning Measurements in Quantum Mechanics”, *Il Nuovo Cimento* 48 B, 144-151.
- Kessler, J. (1985), *Polarized Electrons*, 2^a ed., Berlin: Springer.
- Leggett, A.J. (2002), “Testing the Limits of Quantum Mechanics: Motivation, State of Play, Prospects”, *Journal of Physics: Condensed Matter* 14, R415-R451.
- Loinger, A. (1968), “Comments on a Recent Paper Concerning Measurements in Quantum Mechanics”, *Nuclear Physics* 108, 245-9.
- London, F. & Bauer, E. (1939), *La Théorie de l’Observation em Mécanique Quantique*, Paris: Hermann.
- Ludwig, G. (1954), *Die Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin: Springer-Verlag.
- Machida, S. & Namiki, M. (1980), “Theory of Measurement in Quantum Mechanics - Mechanism of Reduction of Wave Packet. I. II.”, *Progress in Theoretical Physics* 63, 1457-73, 1833-47.
- Pessoa Jr., O. (1992), “O Problema da Medição em Mecânica Quântica: um Exame Atualizado”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (série 3) 2, 41-81.

- Pessoa Jr., O. (1998), “How can the Decoherence Approach Help to Solve the Measurement Problem?”, *Synthese* 113, 323-46.
- Pessoa Jr., O. (2001), “O Sujeito na Física Quântica”, em Oliveira, E.C. (org.), *Epistemologia, Lógica e Filosofia da Linguagem – Ensaios de Filosofia Contemporânea*, Núcleo de Estudos Filosóficos – UEFS, Feira de Santana, pp. 157-96.
- Pessoa Jr., O. (2005), “Mapa das Interpretações da Teoria Quântica”, a sair em Martins, R.A.; Boido, G. & Rodríguez, V. (orgs.), *Filosofia y Historia de la Física*, AFHIC, Buenos Aires.
- Renninger, M. (1960), “Messungen ohne Störung des Messobjekts”, *Zeitschrift für Physik* 158, 417-21.
- Shimony, A. (1993), “Events and Processes in the Quantum World”, in Shimony, A., *Search for a Naturalistic World View*, vol. II, Cambridge University Press, pp. 140-62.
- Tausk, K.S. (1966), “Relation of Measurement with Ergodicity, Macroscopic Systems, Information and Conservation Laws”, Trieste: International Atomic Energy Agency, Internal Report 14/1966.
- Zeh (1970), “On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory”, *Foundations of Physics* 1, 69-76.