

REPORTAGENS



A Interpretação da Mecânica Quântica

Silvio Seno Chibeni

Introdução: o papel das teorias na ciência

Há uma acepção popular da palavra 'teoria' na qual teoria se opõe ao que se considera "comprovado", "concreto", "real" ou de utilidade prática. Por outro lado, assume-se com boas razões que o conhecimento científico é o mais rigoroso que possuímos, tendo também inegável relevância prática, na medida em que está na base da moderna tecnologia. O que o homem comum muitas vezes não sabe é que todo o conhecimento científico é codificado por meio de teorias.

De um modo geral, podemos entender a ciência como possuindo dois grandes objetivos: 1) descrever e prever de forma sistemática os fenômenos de um dado domínio; e 2) explicar esses fenômenos, possibilitando a sua "compreensão". A consecução de ambos esses objetivos requer a formulação de *teorias* para o conjunto de fenômenos investigados. Nas ciências formalizadas, como a Física e a Química, a capacidade preditiva decorre em grande parte de um formalismo matemático complexo, que permite calcular a ocorrência de certos fenômenos a partir da ocorrência de outros. O poder de explicação, por outro lado, parece depender da possibilidade de entender os conceitos e leis da teoria como contrapartes teóricas de uma realidade subjacente, formada de objetos com determinadas propriedades, que interagem entre si segundo certos princípios.

Deve-se, pois, para fins de análise filosófica da ciência, distinguir claramente os *fenômenos* (aquilo que é imediatamente acessível aos nossos sentidos), a *teoria* (conceitos, leis e formalismo) e a *ontologia*, ou seja, os objetos reais que, em interação com nosso aparelho sensorial, produzem em nós os fenômenos. Quando se fala na interpretação de uma teoria científica tem-se duas coisas em vista: 1) o estabelecimento de uma correspondência entre os conceitos teóricos e os fenômenos; e 2) a postulação de uma ontologia capaz de, à luz da teoria, ser entendida

[O salto cântico da Física:](#)
[Carlos Vogt](#)

[Física Quântica, o que é e para que serve:](#)
[Almir Caldeira](#)

[Ondas estacionárias circulares:](#)
[Luís Ferraz Netto](#)

A interpretação da Mecânica Quântica:
[Silvio Seno Chibeni](#)

[A Física no final do séc. XIX:](#)
[Roberto Martins](#)

[Max Planck e o início da teoria quântica:](#)
[Jean-Jacques de Groot](#)

[Teoria Quântica:](#)
[Jean-Jacques de Groot](#)

[A descoberta da estrutura atômica:](#)
[Afonso de Aquino](#)

[Caos e Mecânica Quântica:](#)
[Ozorio de Almeida e Raúl Vallejos](#)

[Digressões sobre a importância da Ciência Básica:](#)
[Peter Schulz e Marcelo Knobel](#)

[Dos transistores aos computadores:](#)

[Anna Paula Sotero](#)
[Quântica e a ciência dos materiais:](#)
[Alexandre Barros](#)

[O laser e a pesquisa básica:](#)
[Elza Vasconcellos](#)

[Consciência quântica ou consciência crítica?:](#)
[Roberto Covolan](#)

[Mecânica quântica e interpretação na mídia:](#)
[Ulisses Capozoli](#)

[Einstein e a Mecânica Quântica:](#)
[David Martinez](#)

[Poema](#)

como a realidade subjacente aos fenômenos. Os entes dessa ontologia em geral cumprem o papel de causas dos fenômenos, contribuindo assim para a nossa compreensão de por que eles ocorrem e se inter-relacionam segundo as leis da teoria.

A teoria quântica

Na década de 1920 surgiu na física uma teoria que viria a se tornar o veículo de quase todo o nosso conhecimento da estrutura da matéria: a *mecânica quântica* (MQ). É ela que nos fornece os recursos teóricos para descrever o comportamento fundamental das moléculas, átomos e partículas sub-atômicas, assim como da luz e outras formas de radiação. Pode-se afirmar com segurança que a MQ é a teoria científica mais abrangente, precisa e útil de todos os tempos.

Não obstante seu extraordinário sucesso preditivo, desde a sua criação a MQ apresentou problemas de interpretação em grau sem precedentes na história da ciência. A discussão completa desses problemas requer conhecimentos especializados, não podendo pois ser empreendida aqui. Procuraremos, no entanto, indicar em termos simplificados as características conceituais da teoria quântica que levaram ao seu surgimento, e apresentar em linhas gerais as principais alternativas de solução já propostas.

As dificuldades interpretativas dessa teoria dizem respeito tanto à forma pela qual a teoria se relaciona com os fenômenos quanto ao delineamento de uma ontologia que lhe seja apropriada. A compreensão desse ponto requer uma breve menção a duas noções fundamentais das teorias físicas: a de *estado* e a de *grandeza física*. De um modo geral, estados são caracterizações básicas dos objetos físicos tratados pela teoria. As grandezas físicas são as propriedades mensuráveis desses objetos. Para efeitos de comparação, podemos lembrar que na mecânica clássica o estado de uma partícula de massa m é representado por conjunto de seis números que especificam sua posição e

velocidade. Em função desses números a teoria indica como calcular os valores de grandezas físicas como a energia cinética, o momento angular, etc.

Na mecânica quântica os estados dos objetos são definidos de modo inteiramente diverso, por meio das chamadas *funções de onda*. É justamente dessa nova (e complexa) forma de representação dos estados que surgem quase todos os problemas de interpretação da teoria.

O problema da atribuição de valores

Uma grandeza só terá significado físico se pudermos atribuir *valores* a ela. É isso que permitirá colocar a noção em correspondência com os fenômenos, com a leitura de aparelhos de medida. Neste ponto surge a primeira e mais fundamental dificuldade interpretativa na MQ: Dados um estado quântico e uma grandeza física quaisquer, *em geral o formalismo quântico simplesmente não atribui um valor à grandeza!* (Dissemos "em geral" porque há exceções.) O problema é agravado pelo fato de que mesmo quando o estado não fornece o valor de uma grandeza física, *medidas* dessa grandeza sobre o objeto *são inteiramente possíveis e dão valores bem definidos*. Parece, então, que a teoria está falhando em uma de suas funções essenciais, a predição dos fenômenos, dos resultados de medida. Como interpretar essa situação? Há duas posições possíveis:

a) A descrição quântica do objeto é *incompleta*: não prevê valores de grandezas perfeitamente mensuráveis;

b) Os valores dessas grandezas não existem, ou não estão definidos antes que se efetue a medida; a medida então criaria ou tornaria definidos os valores, não sendo propriamente uma medida, no sentido usual do termo: a mera revelação de uma propriedade preexistente do objeto investigado.

Entre os fundadores da MQ, Schrödinger, de Broglie e, sobretudo, Einstein, defenderam a posição (a); Bohr, Heisenberg e praticamente

todos os outros sustentaram (b), que se tornou a posição dominante. Vejamos brevemente como essa divergência básica se amplificou e ramificou ao longo das discussões subseqüentes.

As interpretações da mecânica quântica

a) *Incompletude*. Para mostrar que a descrição quântica das propriedades dos objetos é incompleta, Einstein, Podolsky e Rosen propuseram um interessante argumento em 1935, o chamado "argumento de EPR". Outro importante argumento para o mesmo fim foi proposto no mesmo ano por Schrödinger, argumento hoje conhecido pelo nome pitoresco de "gato de Schrödinger".

Não obstante a força desses argumentos e os abalos que causaram no campo adversário, a tese da incompletude não prevaleceu, por vários fatores. Primeiro, em 1932 von Neumann apresentou uma prova de que, aceitas certas premissas, qualquer tentativa de completar a descrição quântica seria matematicamente impossível. Depois, os argumentos foram rebatidos informalmente pelos defensores da tese oposta. Por fim, apesar dos problemas conceituais a MQ mostrou um poder preditivo sem precedentes. Embora para cada estado quântico o formalismo sempre deixe de especificar os valores de certas grandezas, atribui, no entanto, *probabilidades* de que os valores sejam encontrados empiricamente, por meio de medidas. É nessa atribuição de probabilidades que a teoria revelou sua impressionante capacidade preditiva.

Apesar disso tudo, os argumentos de EPR e de Schrödinger tornaram-se o pivô da maior parte das discussões sobre os fundamentos da teoria até nossos dias, levando a desdobramentos extremamente ricos. Dentre eles, mencionamos a criação por David Bohm, em 1952, de uma teoria mais completa que a MQ. (Esse fato pressupôs, naturalmente, um bem sucedido questionamento da relevância da prova de von Neumann.) Teorias desse tipo são hoje ditas *teorias de variáveis ocultas* (TVOs). Apesar de irem além da MQ na

atribuição de valores às grandezas físicas, coincidem com ela nas previsões probabilistas. Diversos pesquisadores mostraram subseqüentemente, por meio de importantes teoremas algébricos, que para reproduzirem as previsões quânticas as TVOs devem incorporar um traço conceitual inteiramente não-clássico, o chamado *contextualismo*, que significa que os valores das grandezas físicas podem refletir não apenas as propriedades do objeto, mas também de todo o seu "contexto". Foi esse traço que mais tarde levou Bohm a desenvolver a idéia de que há um holismo, ou "totalidade" no mundo.

Intrigado com o fato de a TVO de Bohm ser *não-local*, ou seja, permitir que os valores atribuídos às grandezas possam ser alterados instantaneamente por ações remotas, John Bell conseguiu provar, em 1964, que *toda* TVO que reproduza as previsões estatísticas da MQ terá necessariamente de ser não-local. Num admirável esforço de investigação, os físicos experimentais conseguiram mostrar que as previsões quânticas relevantes para essa questão são corretas. (O experimento mais importante foi conduzido por Alain Aspect em 1982.) Qualquer tentativa de complementar a MQ terá, portanto, de ser feita com a violação do princípio da localidade - um preço teórico que poucos físicos parecem dispostos a pagar.

b) *Completude*. A tese de que a MQ descreve tudo o que há para ser descrito nos objetos físicos de que trata tem sido apresentada em conjunção com diversas outras, dando lugar a várias interpretações distintas da teoria. Apontaremos as principais.

b1. Interpretação "ortodoxa". Por ter sido elaborada por Bohr e seus colaboradores, essa posição é também conhecida como "de Copenhague". Não podemos fazer justiça aqui às sutilezas e divergências existentes dentro dessa posição. Uma das versões mais radicais sustenta que, ao contrário de todas as demais teorias físicas, a MQ não tem como objetivo descrever nenhuma realidade transcendente aos fenômenos. Sua função seria apenas descrever e

correlacionar os fenômenos com o auxílio de um formalismo cujos conceitos não devem ser entendidos como contrapartes teóricas de uma realidade objetiva. Os filósofos chamam esse tipo de posição de instrumentalismo. A teoria seria mero instrumento de predição ou cálculo. Ao deixar de tratar do plano ontológico, a teoria abdicaria por consequência de sua função explicativa. Assim, nessa variante da interpretação "ortodoxa" a MQ não explicaria nada sobre o mundo real extra-fenômico. Outra versão pende para a posição filosófica do idealismo. Neste caso, a teoria é entendida como se referindo a uma realidade, mas esta deixa de ser entendida como objetiva: ela seria relativa aos agentes de observação. A famosa doutrina da "complementaridade" desenvolvida por Bohr é parte dessa perspectiva.

b2. Interpretação das "potências". Ao contrário da posição anterior, não há aqui nenhum distanciamento da visão filosófica do *realismo científico*, segundo a qual a ciência objetiva a descrever uma realidade independente de qualquer observação ou cognição. Aceita-se, no entanto, o desafio de reformular radicalmente as concepções de realidade associadas às teorias clássicas. Em particular, procura-se conceber uma ontologia compatível com a informação contida nas funções de onda quântica. Uma das consequências seria a presença no mundo de objetos aos quais não se poderiam atribuir o conjunto inteiro das propriedades clássicas. Um elétron num estado quântico que não permita o cálculo de uma velocidade (por exemplo) na realidade não teria velocidade alguma; ou, alternativamente, deve ser concebido como tendo uma infinidade de velocidades "potenciais". O grande desafio dessa proposta está em determinar fisicamente as condições em que essas "potências" se atualizariam, e em descrever esse processo matematicamente. (A sugestão "ortodoxa" de que é a própria mensuração, *qua* ato de observação por um agente consciente, que determina essa transição, é rejeitada como subjetivista.) Esse programa comporta presentemente algumas linhas de investigação bastante promissoras.

b3. Interpretação dos "muitos mundos". Outra proposta que tem merecido a atenção de especialistas, não obstante a estranheza que causa, é a de que todas as propriedades que na posição anterior são dadas como meramente potenciais de fato existem simultaneamente. Como não observamos isso, ou sequer conseguimos conceber tal coisa, sugere-se que cada um desses valores "existe" num mundo diferente. Haveria, pois, uma multiplicidade infinita de universos, que aumenta incessantemente. O caráter definido de nossas observações se deveria ao fato de que nós próprios existimos em versões múltiplas, e em cada uma delas estamos associados a um conjunto definido de valores das grandezas físicas dos objetos com os quais interagimos.

Concluindo...

Esta breve apresentação indicou que mesmo a nossa mais poderosa e bem sucedida teoria física não está isenta de dificuldades teóricas, conceituais e filosóficas. Se é verdade que tais dificuldades não têm obstado à aplicação prática da teoria, revelam, por outro lado, as limitações do intelecto humano na compreensão mais profunda da realidade que nos cerca. Seu estudo incessante por parte de um pequeno, mas prestigioso, grupo de cientistas tem contribuído de forma expressiva para a descoberta de intrigantes características da realidade, alargando, ao mesmo tempo, nossos horizontes de investigação.

Sugestões de leitura: Dos muitos livros de divulgação sobre os fundamentos da MQ poucos são recomendáveis. Entre os melhores incluiríamos: Squires, E. *The Mystery of the Quantum World* (Bristol, Adam Hilger, 1986); d'Espagnat, B. *A la Recherche du Réel* (Paris, Bordas, 1979; versão inglesa: *In Search of Reality*, New York, Springer-Verlag, 1983); Gribbin, J. *In Search of Schrödinger's Cat* (London, Corgi Books, 1984), edição em português: "A procura do Gato de Schrödinger" (editora Presença, Lisboa, Portugal); Herbert, N.

Quantum Reality (London, Rider, 1985). Para leitores mais avançados indicamos o excelente *Le Réel Voilé*, de B. d'Espagnat (Paris, Fayard, 1994; também disponível em inglês, *The Veiled Reality*.)

Silvio Seno Chibeni é professor do departamento de Filosofia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Unicamp

Esta reportagem tem
[1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#),
[11](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [16](#), [17](#)
documentos
[Bibliografia](#) | [Créditos](#)



Atualizado em 10/05/2001

<http://www.comciencia.br>
contato@comciencia.br

© 2001
SBPC/Labjor
Brasil

