

# Computação Quântica e as Interpretações da Teoria Quântica

Oswaldo Pessoa Jr.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Filosofia – FFLCH – Universidade de São Paulo (USP)  
Av. Prof. Luciano Gualberto, 315 – 05508-900 – São Paulo – SP – Brasil

opessoa@usp.br

In LIMA, A.F. & LULA JR., B. (orgs.), *Anais – WECIQ 2007 – 2º Workshop-Escola de Computação e Informação Quântica*, EDUFMG, Campina Grande, 2007, pp. 41-50. ISBN 978-85-89674-26-3.  
Online: <http://www.dsc.ufcg.edu.br/~iquanta/weciq2007/anaisonline/anais/005-33336.pdf>

**Abstract.** *This paper explores two philosophical issues concerning quantum computation. The first discusses what actually happens when a quantum computation is taking place. Is David Deutsch's thesis, that quantum computing is evidence for the existence of parallel universes, at all plausible? To clarify this assertion, a short introduction to the interpretations of quantum theory is presented, emphasizing the distinction between realism and positivism. The second problem concerns the nature of "quantum information" and the recent attempts to base quantum theory on this concept, such as those of Anton Zeilinger, Jeffrey Bub, Christopher Fuchs e Carlo Rovelli.*

**Resumo.** *Este trabalho explora duas questões filosóficas relacionadas à computação quântica. A primeira discute o que, na realidade, acontece quando ocorre uma computação quântica. É plausível a tese de David Deutsch de que a computação quântica fornece evidência a favor da existência de universos paralelos? Para esclarecer esta afirmação, é feita uma apresentação sucinta das interpretações da teoria quântica, salientando a distinção entre realismo e positivismo. O segundo problema envolve a natureza da "informação quântica" e as tentativas recentes de fundar a teoria quântica neste conceito, como as de Anton Zeilinger, Jeffrey Bub, Christopher Fuchs e Carlo Rovelli.*

## 1. Apresentação

Em 2001, o grupo de Isaac Chuang, da Universidade de Stanford, construiu um computador quântico com sete bits quânticos (qubits), capaz de fatorar o número 15 usando o algoritmo de Shor (Vandersypen *et al.*, 2001). Os qubits foram implementados em núcleos de spin  $\frac{1}{2}$  de uma única molécula, e manipulados e medidos por meio de ressonância magnética nuclear. Das várias vezes que o programa foi rodado com a entrada "15", uma parte das vezes o resultado apontou "3" e "5" como respostas, o que é facilmente verificável como correto. Espera-se que, no futuro, computadores quânticos maiores possam fatorar números maiores, por exemplo com 100 casas decimais, mas é ainda uma questão tecnológica em aberto saber se isso será possível.

Dado um computador quântico, ninguém tem dúvida sobre como interpretar os resultados da computação. O formalismo da teoria quântica é bem conhecido e já foi adaptado para a representação de programas computacionais quânticos, e o que resta são

difíceis problemas técnicos sobre o que é possível computar, como o fazer de maneira eficiente, e que conseqüências se podem tirar para a teoria da computabilidade.

No entanto, como em qualquer campo científico de ponta, há questões filosóficas que não afetam em quase nada a atividade do cientista e do especialista em computação, mas que surgem durante o aprendizado do assunto, na concatenação com outros campos, e na busca de novas idéias. Este artigo visa examinar algumas dessas questões filosóficas da computação quântica. O que acontece, de verdade, dentro de um computador quântico? O que a teoria quântica nos diz sobre a realidade dos átomos ou da radiação que são usados para implementar um computador quântico? A informação existe na realidade ou depende de um sujeito observador? Pode-se dizer que computações clássicas estão de fato sendo realizadas em paralelo, e que no final há uma espécie de sorteio de um dos resultados obtidos? Para responder a essas perguntas, o artigo inicia considerando questões filosóficas relativas à teoria quântica em geral, que recebem respostas diferentes de acordo com a “interpretação” da teoria quântica que é adotada.

Feito isso, pode-se analisar a afirmação filosófica mais radical feita na literatura com relação à computação quântica, que é a visão de David Deutsch, de que computadores quânticos seriam evidência a favor da existência de muitos universos paralelos!

Uma outra classe de problemas filosóficos envolve a natureza da “informação quântica”. Definir a informação clássica já traz alguns problemas, e no contexto quântico as sutilezas se multiplicam. Mesmo assim, diversos autores têm proposto que a noção de informação fornece a chave para se interpretar corretamente os velhos problemas filosóficos da mecânica quântica, como a dualidade onda-partícula (problema do colapso) e a não-localidade (emaranhamento). Dentre esses autores, examinam-se brevemente as propostas de Zeilinger, Bub, Fuchs e Rovelli.

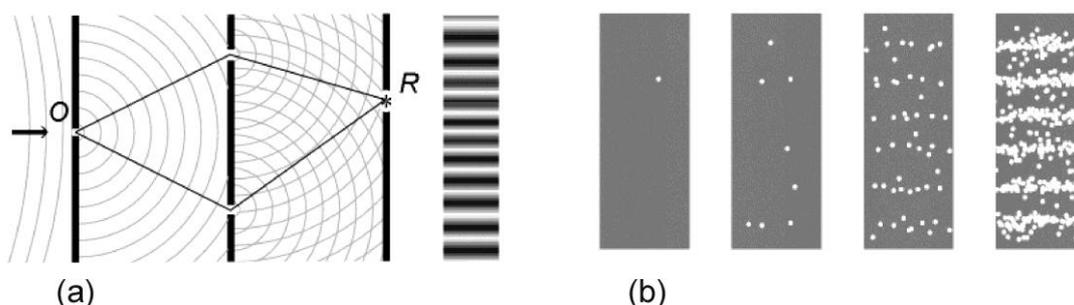
## **2. Dualidade Onda-Partícula**

O que é a Teoria Quântica? Em pouquíssimas palavras, é uma teoria que concilia, de alguma maneira, aspectos contínuos (ondulatórios) e discretos (corpúsculares).

Um exemplo disso é dado pelo experimento feito por Thomas Young em que a luz passa por duas fendas finas, e se observam franjas de interferência na tela detectora. A explicação para este padrão luminoso é que a luz é na realidade uma onda (Fig. 1a). Uma onda, ao passar por uma fenda fina  $O$ , passa a se propagar de maneira circular (por exemplo, na superfície da água) ou esférica (como o som no ar). Ao incidir nas fendas  $A$  e  $B$ , novas ondas esféricas se propagam, e estas passam a interferir construtivamente (as amplitudes das ondas se somam, ficando maiores) ou destrutivamente (quando a onda vindo de  $A$  está subindo, a onda vindo de  $B$  desce, e elas acabam se cancelando). Na tela detectora, as regiões de interferência destrutiva são escuras.

Em torno de 1904, o inglês J.J. Thomson suspeitou que a luz tinha também um aspecto “granular”, e em 1909 instruiu seu aluno Geoffrey Taylor para repetir o experimento de Young para uma fonte de luz fraquíssima. Eles não puderam observar diretamente que o padrão de interferência se forma “ponto a ponto” (Fig. 1b), mas puderam levantar isso como hipótese, o que ficaria claro a partir da década de 1920, com o nascimento da Mecânica Quântica. A partir da década de 1980, esta formação paulatina e pontual das franjas de luz passou a ser observada diretamente, e o mesmo se

aplica para a formação de padrões de interferência por elétrons e outras partículas. É importante frisar que essa formação ocorre mesmo que apenas um elétron ou “quantum de luz” (o fóton) incida por vez na tela detectora (como no experimento de Taylor).



**Figura 1. (a) Experimento da fenda dupla, onde o padrão de interferência sugere uma representação em termos de ondas. (b) Formação ponto a ponto do padrão de interferência.**

Várias questões surgem com relação a esta versão quântica do experimento. Se o elétron é uma partícula, de onde surgem as ondas associadas? E a luz, ela também contém partículas? Pode-se dizer que cada partícula passa por uma única fenda, descrevendo assim uma trajetória? Ou o fóton só surge na detecção? Deve-se salientar que propriedades corpusculares (ou seja, de partícula) e ondulatórias são contraditórias, no sentido de que uma partícula é bem localizada e indivisível (dentro de uma faixa de energia), ao passo que uma onda é espalhada e sempre divisível (por exemplo, por um espelho semi-refletor para a luz). Ou seja, um objeto sem partes não pode, no mesmo instante, ser ao mesmo tempo onda e partícula (isso violaria a lógica clássica). Como então resolver esse problema? O que está acontecendo na realidade, se é que se pode falar em “realidade”?

### 3. Interpretações Básicas da Teoria Quântica

É uma característica notável da Teoria Quântica que ela pode ser interpretada de diferentes maneiras, sendo que cada uma dessas interpretações é internamente consistente e, de modo geral, consistente com experimentos quânticos. Emprega-se a noção de *interpretação* como significando um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria científica, e que em nada afeta as previsões observacionais da teoria. As teses agregadas pela interpretação fazem afirmações sobre a realidade existente por trás dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações.

Uma interpretação *realista* é aquela que afirma algo a respeito da realidade não-observada. Pode-se chamar a negação desta tese de “descritivismo”, que seria uma das teses que compõem o *positivismo*. Segundo esta atitude, a tarefa da ciência é descrever os fenômenos observados, e não fazer especulações sobre entidades ou estruturas explicativas que estariam para além da comprovação experimental. Já o realista acredita que há razões de simplicidade, simetria ou mesmo de bom senso para acreditar em entidades ou estruturas não diretamente observáveis, postuladas por uma teoria bem

sucedida. O positivista não considera “falsas” as teses realistas a respeito da realidade não-observável, mas, pior, as considera “sem sentido”, pois são inverificáveis.

Existem dezenas de interpretações diferentes da Teoria Quântica, que respondem de uma maneira ou outra a questões como as levantadas na seção anterior. A título de introdução, apresentamos quatro interpretações simples que tratam do experimento da fenda dupla para um único fóton ou elétron. Essas posições são exemplos de quatro grandes grupos, dentro dos quais a maioria das interpretações pode ser agrupada. Essa classificação segue aquela apresentada em trabalhos anteriores (ver discussão em Pessoa, 2003, e Pessoa, 2006a), modificando-se apenas a última apresentada abaixo.

(1) *Interpretação Ondulatória Realista*. Antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele torna-se mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula, na forma de um pacote de onda reduzido. Essa transição entre uma onda espalhada e uma onda concentrada pode ser chamada de “colapso”. Antes da medição, o objeto quântico estaria potencialmente distribuído ao longo de todas suas posições possíveis, em uma “superposição” de estados.

Esta visão é realista porque atribui realidade para a função de onda  $\psi(\mathbf{r})$  da teoria quântica, ou pelo menos para seu módulo quadrado, ou para a projeção tridimensional deste. Ela engloba aquelas visões que consideram que o objeto quântico é espalhado ou borrado, como uma onda, geralmente sem apresentar valores bem definidos para posição (como seria típico de uma partícula) e outros observáveis. Erwin Schrödinger defendia uma posição desse tipo, rejeitando inclusive a noção de colapso. John von Neumann, que introduziu a noção de colapso dentro de um contexto positivista, não considerava que  $\psi(\mathbf{r})$  denotasse uma entidade real, mas apenas o conhecimento possuído pelo cientista.

(2) *Interpretação Dualista Realista*. Uma maneira de tentar evitar a estranha noção de colapso, dentro de uma visão realista, é supor que o objeto quântico envolve não só uma onda, mas também um corpúsculo, que tem sempre posição e velocidade bem definidas, e que é o que aparece na tela quando ocorre a detecção.

Esta interpretação foi formulada originalmente por Louis de Broglie, e redescoberta em 1952 por David Bohm. O objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida) e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula.

(3) *Interpretação da Complementaridade*. Elaborada por Niels Bohr, esta visão dualista positivista é uma dentre várias interpretações semelhantes que, em conjunto, são designadas “interpretações ortodoxas”. Um dos pontos centrais desta visão é a “dualidade onda-partícula”: um fenômeno ou é ondulatório, ou corpuscular, nunca ambos ao mesmo tempo. Um “fenômeno” envolve um quantum particular e toda a aparelhagem experimental associada. Só se pode dizer algo a respeito de um fenômeno quando a observação se completa, e é esta a marca positivista da interpretação de Bohr. O fenômeno da Fig. 1 é “ondulatório”, o que significa dizer que só se pode compreendê-lo se a ele for associado um quadro da física clássica ondulatória. A marca de tal fenômeno são as franjas de interferência, ao passo que a marca de um fenômeno corpuscular é a capacidade de se poder atribuir uma trajetória bem definida ao objeto quântico.

(4) *Interpretação dos Coletivos (Ensembles) Estatísticos*. Este grupo envolve aquelas interpretações que consideram que a teoria quântica é uma teoria essencialmente estatística, que não se aplica de forma completa para um quantum individual, mas apenas para o limite de infinitos quanta preparados de maneira semelhante. Tradicionalmente, esta visão está associada a uma postura realista, como em Alfred Landé, que defendia explicitamente que um elétron é apenas uma partícula (sem nenhuma onda associada), ou mais recentemente por Leslie Ballentine. No entanto, ela também pode estar associada a uma atitude positivista, e neste caso se aproxima bastante das interpretações ortodoxas. Hoje em dia, a interpretação positivista dos coletivos é bastante difundida entre físicos teóricos (dado o declínio da interpretação da complementaridade), e uma versão sofisticada é apresentada pelo físico israelense Asher Peres. Com relação ao experimento da Fig. 1, diriam que a teoria quântica apenas descreve o comportamento estatístico dos elétrons ou fótons, e que não faz sentido perguntar o que acontece para um quantum individual enquanto ele está se propagando (antes de ser medido).

Ao contrário da visão ondulatória realista, a função de onda  $\psi(r)$  é interpretada pelas abordagens (3) e (4) de maneira “epistêmica”, ou seja, o estado quântico exprimiria apenas nosso conhecimento a respeito do sistema quântico, e não a realidade do sistema. Sendo assim, o colapso não é visto como um processo real, e sua não-localidade não é um problema.

#### **4. O Problema do Colapso e a Interpretação dos Muitos Mundos**

Na seção anterior foi apresentada uma interpretação ondulatória realista (1) que postula a ocorrência de colapsos praticamente instantâneos em uma frente de onda, quando ocorre uma medição ou observação, e isso acarreta uma não-localidade. Supondo que faça sentido referir-nos a um colapso como um processo real, uma pergunta que se coloca é *em que estágio do processo de medição ocorre o colapso?*

A Fig. 2 ilustra as possibilidades, a partir do experimento de Stern-Gerlach (Pessoa 2003, p. 40; Pessoa 2006b, p. 6). Um feixe de átomos é separado ou “analisado” pelo ímã de Stern-Gerlach, mas os dois componentes do feixe continuam em superposição, mantendo uma certa unidade. Esta etapa da *análise* não provoca um colapso, pois os feixes podem ser recombinados, levando novamente ao estado inicial (seria um experimento análogo ao da dupla fenda). Outra possibilidade seria que o colapso, a quebra da superposição coerente, ocorre 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?

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. (Por outro lado, a amplificação não seria condição necessária para o colapso, como ocorre em experimentos de resultado nulo.) 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 (ver discussão em Pessoa, 2007).

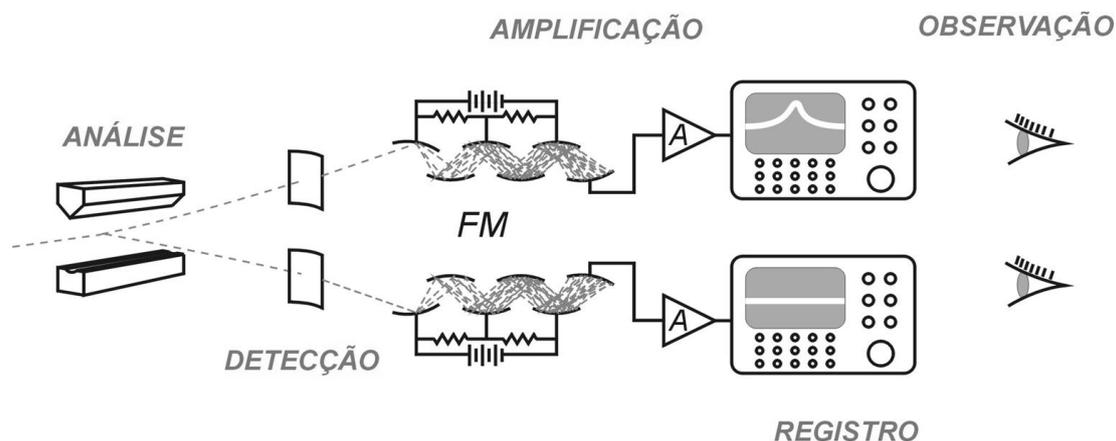


Figura 2. Etapas no processo de medição.

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, como aquela popularizada por London & Bauer em 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.

Outra visão pertencente a esta classe é a interpretação dos estados relativos de Hugh Everett III, de 1957, retomada por Bryce DeWitt, em 1970, na forma de uma interpretação de muitos mundos. Segundo esta visão, bastante popular nas últimas duas décadas, o universo como um todo é descrito por uma grande função de onda, que evolui linearmente, sem colapsos. Em consequência, este ponto de vista 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” ou colapso do estado quântico. Mas, na verdade, ele próprio teria entrado numa superposição macroscópica, e nenhuma redução de fato teria ocorrido: esta seria apenas uma aparência. Cada um desses ramos seria um “universo paralelo”, que não teria mais acesso aos outros ramos.

Admitindo que a interpretação dos muitos mundos dê conta das frequências relativas observadas em medições quânticas e que ela seja empiricamente adequada, a crítica filosófica mais usual que se faz é que ela complicaria desnecessariamente a ontologia da teoria quântica, postulando infinitudes de universos paralelos, o que violaria o preceito de simplicidade da “navalha de Ockham”. Outras críticas são

discutidas por Barrett (1999, pp. 154-79), que apresenta uma discussão ampla da interpretação dos muitos mundos.

Dentre essas críticas, pode-se mencionar o argumento epistemológico de Abner Shimony. 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. Seria 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?

## 5. Computação Quântica e Universos Paralelos

Para um sistema com  $n$  qubits, podem-se representar  $2^n$  números como entrada da computação, e considerar que as operações da computação atuam simultaneamente nesses  $2^n$  números. Essa propriedade é às vezes chamada de *paralelismo quântico*, e é uma das propriedades essenciais de uma computação quântica (outra é o emaranhamento, discutido, no contexto da filosofia da física, em Pessoa, 2006b). No entanto, toda essa aparente vantagem da computação quântica é reduzida quando se busca ter acesso às computações paralelas: apenas  $n$  bits de informação podem ser extraídos pela medição do estado final do computador.

Esta descrição, de certa forma, já aparece em casos simples de experimentos quânticos, como o da dupla fenda da Fig. 1. Ali, a descrição ondulatória da propagação de ondas esféricas a partir das duas fendas leva ao complexo padrão de superposições construtiva e destrutiva na região anterior à tela detectora. Quando a medição é feita, porém, apenas um pontinho aparece em algum lugar da tela (com probabilidade proporcional ao módulo quadrado da amplitude de onda em cada região da tela). Todo esforço da computação quântica está no sentido de canalizar o rico comportamento da função de onda para representar números e se submeter à ação de portas lógicas.

Todas as interpretações aplicáveis ao caso simples da dupla fenda também se aplicam a uma computação quântica, com a diferença que esta envolve mais de uma partícula emaranhada. Podem-se aplicar interpretações positivistas como a da complementaridade, a dualista realista, etc. No entanto, para facilitar a representação mental sobre o que ocorre na computação quântica, é usual se adotar, mesmo que privadamente, uma interpretação ondulatória realista. É no contexto deste grupo interpretativo que faz mais sentido pensar em computações paralelas e rotações de estados emaranhados. A opção mais tradicional (dentro das interpretações ondulatórias) é considerar que os diferentes ramos da computação e seu emaranhamento ocorrem simultaneamente em nosso mundo, talvez em um nível de “potencialidade”, antes de a medição final efetuar uma “atualização” (para usar uma terminologia aristotélica).

No entanto, é também possível interpretar a computação quântica no contexto da interpretação dos muitos mundos (que também pode ser classificada como ondulatória realista). É isso que fez David Deutsch, um dos pioneiros da computação quântica, em livro publicado em 1998 e intitulado *The Fabric of Reality*, traduzido para o português (Deutsch, 2000). No entanto, ele foi além, defendendo que a interpretação de Everett-deWitt seria superior às outras interpretações da computação quântica, e conseqüentemente afirmando que a computação quântica seria uma evidência a favor da existência de universos paralelos!

Seu argumento parte da constatação de que um computador clássico não conseguiria fatorar um número com centenas de casas decimais. Isso significaria que, em nosso universo, não há suficiente “poder computacional” para obter a resposta certa. No entanto, o algoritmo de Shor mostrou que um computador quântico poderia fatorar tal número. E não há razão em princípio para descartar a possibilidade de que tal computador possa ser construído para fatorar o número de centenas de casas decimais. Mas, sendo assim, de onde viria o poder computacional para o cumprimento da computação quântica? Teria que vir, segundo Deutsch, de universos paralelos.

O argumento de Deutsch tem sofrido críticas, como a de Steane (2003), que ataca a concepção de que a computação quântica apresenta um ganho em poder computacional. Para este autor, a computação quântica não oferece uma quantidade maior de computação para um dado tamanho e tempo, mas sim um tipo de processamento mais “flexível” do que ocorre no caso clássico. Segundo Steane, o computador quântico é mais eficiente que o caso clássico, para certos tipos de problemas, porque o emaranhamento quântico permite gerar e manipular uma representação física das correlações entre entidades lógicas (no caso, números inteiros), sem precisar representar de maneira completa essas entidades lógicas.

## **6. As Novas Interpretações Informativas da Teoria Quântica**

Na última década surgiram diversas tentativas de interpretar a teoria quântica a partir do conceito de informação quântica. A maioria desses esforços se dá num contexto positivista, na tradição das interpretações ortodoxas.

O renomado físico austríaco Anton Zeilinger (1999), da Universidade de Viena, propôs uma interpretação baseada no que chamou de “princípio de quantização de informação”: um sistema quântico elementar, como uma partícula de spin  $\frac{1}{2}$ , carrega apenas 1 bit de informação. Se esta informação nos disser que uma medição do componente de spin na direção  $z$  fornecerá um valor previsível, então as medições em direções como  $x$  ou  $y$  necessariamente terão resultado aleatório, pois informação adicional não pode ser atribuída ao sistema (pois este só carrega 1 bit de informação). A interpretação informativa de Zeilinger se aplica especialmente bem para duas ou mais partículas correlacionadas. Duas partículas de spin  $\frac{1}{2}$  correlacionadas carregam 2 bits: se esta informação corresponder às frases “os componentes de spin  $z$  têm o mesmo valor” e “os componentes  $x$  têm valores opostos”, isso fixa o estado quântico, e nenhuma outra informação pode ser atribuída ao sistema, como por exemplo o valor da componente de spin de uma partícula individual. A interpretação de Zeilinger, trabalhada também por seu aluno Časlav Brukner, captura a informação essencial de um sistema quântico e não afirma nada mais, levando adiante o espírito positivista das interpretações ortodoxas.

Uma abordagem informativa distinta tem sido defendida pelo sul-africano Jeffrey Bub (2006a), da Universidade de Maryland. O ponto central é um estudo feito por ele e seus colegas Rob Clifton (falecido precocemente) e Hans Halvorson, mostrando, com uma abordagem algébrica, como se podem derivar as características básicas da mecânica quântica a partir de três restrições informativas fundamentais: (i) Dados dois sistemas físicos, é impossível transferir informação entre eles a uma velocidade maior do que a da luz, a partir da realização de uma medição em um deles. (ii) É impossível transmitir toda a informação contida em um sistema físico

desconhecido (o que impede a amplificação sem erros, ou “clonagem”, de um estado puro). (iii) É impossível comunicar informação de maneira a implementar um “protocolo de comprometimento de um bit com segurança incondicional”. Este último ponto, envolvendo criptografia quântica, afeta a possibilidade de uma emissora, chamada Alice, enviar um bit de informação sobre alguma previsão futura sua (por exemplo, quem ganhará uma eleição entre dois candidatos), sem que o receptor Bob possa decifrar sua previsão antes da hora certa (seguindo o exemplo, para não obter vantagens comerciais a partir do conhecimento privilegiado de Alice). Somente após a eleição Alice enviaria um segundo bit, a partir do qual Bob verificaria a previsão de Alice, e reconheceria que ela havia acertado. O ponto (iii) afirma, ao contrário do que se esperava antes de 1996, que *não* existe uma maneira de fazer isso que esteja imune à desonestidade, ou por parte de Bob ou por parte de Alice (ver Bub, 2006, pp. 45-57).

Christopher Fuchs, dos Laboratórios Bell em New Jersey, tem procurado fundar a teoria quântica na teoria da probabilidade “bayesiana”. A regra publicada por Thomas Bayes, em 1763, explicita como atualizar a atribuição de uma probabilidade a uma hipótese, com base em novos dados empíricos ou informação. A idéia central da abordagem de Fuchs é exprimir o colapso como uma variante não-comutativa da regra de Bayes. Fundamenta assim a abordagem epistêmica da função de onda (mencionada no final da seção 3) em uma teoria probabilista. O colapso que se segue a uma medição quântica exprimiria apenas um refinamento de nossas crenças a respeito do sistema quântico, e não seria um processo real, como nas interpretações ondulatórias realistas (incluindo a visão dos muitos mundos de Deutsch). Um problema dessa abordagem, que Fuchs busca levar em consideração, é que a medição na física quântica é invasiva, o que provoca uma alteração no sistema estudado. Hagar (2007) procura criticar a concepção epistêmica do colapso apresentada por Fuchs.

Carlo Rovelli (1997), que trabalha na Universidade de Pittsburgh, se inspirou na filosofia da teoria da relatividade restrita para propor uma interpretação “relacional” da teoria quântica, fundada na tese de que, na mecânica quântica, observadores diferentes podem dar descrições diferentes para uma mesma seqüência de eventos. Essa possibilidade é exemplificada pelo paradoxo do “amigo de Wigner”, em que um sujeito observa um experimento e atribui ao sistema um colapso, ao passo que outro observador externo, que não observa o primeiro, descreve a situação sem colapso. Assim, a noção de “informação relativa” é fundamental em sua abordagem, que considera que a mecânica quântica é uma teoria completa (o que afasta sua posição das interpretações do coletivo estatístico).

## 7. Conclusões

A última década de estudos em informação quântica trouxe novas propostas para se interpretar a teoria quântica, geralmente retomando as visões epistêmicas sobre a função de onda  $\psi(\mathbf{r})$  e a redução de estado, das interpretações ortodoxas e dos coletivos estatísticos. A base para algumas dessas novas interpretações é a noção de informação, que em termos práticos, para sistemas simples, pode ser definida de maneira não-problemática.

No entanto, apesar da correção da teoria matemática da informação, há problemas filosóficos relacionados com esse conceito. Supondo-se um emissor e um receptor que se comunicam utilizando uma mesma linguagem, não há problemas, mas a

extensão desse conceito para a natureza, em contextos em que não há mentes envolvidas, é ainda problemática. Que linguagem é usada? Qual a origem da informação? Talvez precisemos de uma teoria adequada da consciência humana para podermos resolver essas questões.

Não há dúvida que as idéias propostas por Zeilinger, Bub e outros, deverão iluminar a teoria quântica de novas maneiras. Mas não devemos desistir de tentar entender em termos físicos a natureza da informação e da computação quântica. A proposta de Deutsch é metafisicamente exagerada, mas outras abordagens realistas poderão lançar luz sobre a questão. Na batalha entre posturas realistas e positivistas, a melhor aposta é mantermos vivas as duas tradições epistemológicas, que desempenham papéis complementares, cada qual se adaptando melhor a diferentes momentos e contextos científicos.

## Referências

- Barrett, J.A. (1999), *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford University Press.
- Bub, J. (2006a), “Quantum Entanglement and Information”, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, disponível on-line.
- (2006b), “Quantum Information and Computation”, in Earman, J. & Butterfield, J. (orgs.), *Handbook of Philosophy of Physics*, Elsevier/North Holland. Disponível como e-print arXiv quant-ph/0512125, 105 pgs.
- Deutsch, D. (2000), *A Essência da Realidade*, Makron, São Paulo.
- Fuchs, C.A. (2001), “Quantum Foundations in the Light of Quantum Information”, in Gonis, A. (org.), *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Decoherence and its Implications in Quantum Computation and Information Transfer*. Disponível como e-print arXiv quant-ph/0106166, 45 pgs.
- Hagar, A. (2007), “Quantum Computing”, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, disponível on-line.
- Pessoa Jr., O. (2003), *Conceitos de Física Quântica*, 2 vols, Livraria da Física, São Paulo.
- (2006a), “Mapa das Interpretações da Teoria Quântica”, in Martins, R.A.; Boido, G. & Rodríguez, V. (orgs.), *Física: Estudos Filosóficos e Históricos*, AFHIC, Campinas, p. 119-52.
- (2006b), “Conceitos e Interpretações da Mecânica Quântica: o Teorema de Bell”, in da Rocha Costa, A.C. & Portugal, R. (orgs.), *Anais WECIQ 2006*, PPGINF/UCPel, Pelotas, p. 5-22.
- (2007), “Redução de Estado na Física Quântica: Amplificação ou Consciência?”, a sair em Lorenzano, P. & Miguel, H. (orgs.), *Filosofía y Historia de la Ciencia en el Cono Sur*, vol. II, Prometeo Libros-AFHIC, Buenos Aires.
- Rovelli, C. (1997), “Relational Quantum Mechanics”, disponível como e-print arXiv quant-ph/9609002v2, 21 pgs.

- Steane, A.M. (2003), "A Quantum Computer Needs Only One Universe", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34B, 469-78
- Vandersypen, L.M.K., Steffen, M., Breyta, G., Yannoni, C.S., Sherwood, M.H. and Chuang, I.L. (2001), "Experimental Realization of Shor's Quantum Factoring Algorithm using Nuclear Magnetic Resonance", *Nature* 414, 883-7.
- Zeilinger, A. (1999), "A Foundational Principle for Quantum Mechanics", *Foundations of Physics* 29, 631-43.