

# Física quântica e cultura: influências mútuas

Osvaldo Pessoa Jr<sup>1</sup>

**Resumo:** Uma exposição didática sobre a física quântica abre o artigo, salientando-se a diferença entre a parte objetiva da teoria e sua parte interpretativa. Adota-se uma “interpretação ondulatória realista com colapsos” para expor cinco princípios básicos da teoria. Aborda-se então a questão de qual é o impacto da física quântica sobre a sociedade. Discorre-se sobre seu grande impacto científico e tecnológico, e em seguida examina-se com mais atenção o seu impacto teórico, em termos ontológico e epistemológico. Argumenta-se que impacto ontológico em nossa vida cotidiana se limita às aplicações tecnológicas, e que possíveis consequências filosóficas do princípio de incerteza e do indeterminismo não são importantes, e muito menos as consequências imaginadas pelo Misticismo Quântico com relação ao emaranhamento. Dentre as lições epistemológicas está que conhecemos a interpretação que mais se aproxima da verdade, mas não sabemos qual é ela, dentre as dezenas de interpretações propostas. Por fim, discutimos a tese de Forman, que envolve a questão de se a ciência é objetiva ou se é uma construção sócio-culturalmente negociada, como defende o relativismo. Concluímos por um “relativismo relativo”: as interpretações podem ser fortemente influenciadas pela cultura, mas em uma ciência saudável a sua parte objetiva consegue se isolar das vicissitudes sociais e das intenções emotivas dos cientistas. Por fim, são dados alguns exemplos de influência da cultura, e de outros fatores, sobre as interpretações da Teoria Quântica.

**Palavras-chave:** interpretação; teoria quântica; cultura; relativismo.

---

<sup>1</sup> Professor titular de Filosofia da Ciência no Departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo (USP). Graduação em Física (1982) e Filosofia (1984) pela USP, Mestrado em Física Experimental na Unicamp, em 1985, e Doutorado no Departamento de História & Filosofia da Ciência na Indiana University, EUA, com tese sobre o problema da medição na física quântica (1990). Publicou o livro *Conceitos de física quântica* (2003). Desenvolve pesquisa em filosofia da física, filosofia da mente e “modelos causais em história da ciência”, além de se interessar por ensino e divulgação científica. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4191-1719>. Contato: [opessoa@usp.br](mailto:opessoa@usp.br).

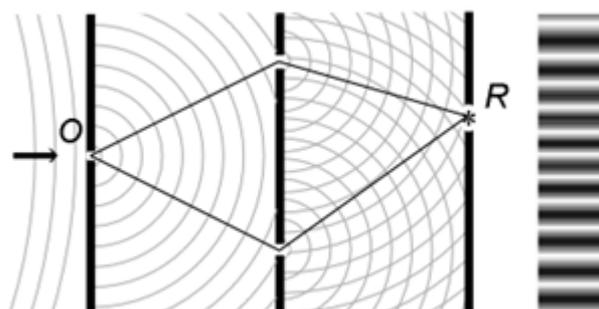
## **Quantum physics and culture: mutual influences**

**Abstract:** A pedagogical exposition of quantum physics opens the article, highlighting the difference between the objective part of the theory and its interpretative part. A “realist wave interpretation with collapses” is adopted to present five basic principles of the theory. One then addresses the impact of quantum physics on society. Its great scientific and technological impact is discussed, and then its theoretical impact is examined more closely, in ontological and epistemological terms. It is argued that the ontological impact on our everyday lives is limited to technological applications, and that possible philosophical consequences of the uncertainty principle and indeterminism are not important, much less the consequences imagined by quantum mysticism in relation to entanglement. Among the epistemological lessons is that we know the interpretation that comes closest to the truth, but we do not know which one it is, among the dozens of proposed interpretations. Finally, we discuss Forman's thesis, which involves the question of whether science is objective or whether it is a socio-culturally negotiated construction, as defended by relativism. We conclude in favor of a "relative relativism": interpretations can be strongly influenced by culture, but in a healthy scientific context its objective part is able to isolate itself from social vicissitudes and from the emotional intentions of scientists. Finally, some examples of the influence of culture and other factors on the interpretations of quantum theory are given.

**Keywords:** interpretation; quantum theory; culture; relativism.

## Introdução à física quântica

A física quântica (também chamada de mecânica quântica ou teoria quântica) é a área da ciência que descreve o domínio dos átomos e moléculas, e da radiação que interage com esses átomos e moléculas. Um experimento que exhibe os aspectos básicos desta teoria é o experimento da dupla fenda para elétrons individuais, ou, equivalentemente, para a detecção de fótons (quanta de luz).



**Figura 1:** experimento da dupla fenda para a luz, no regime clássico, formando franjas de interferência. Fonte: Pessoa (2003, p. 3).



**Figura 2:** formação paulatina das franjas de interferência, a partir do acúmulo de detecções pontuais, associada aos fótons, ou quanta de luz. Fonte: Pessoa (2003, p. 4).

No regime clássico, ao qual estamos acostumados em nossa vida cotidiana (Figura 1), um feixe de luz que passa por uma fenda fina (O) gera ondas esféricas que, ao passar por duas outras fendas (A e B) gera duas ondas esféricas que se superpõem. O resultado visível dessa interferência entre as duas ondas esféricas é o padrão de claros e escuros que aparece na tela detectora. As regiões escuras das franjas de interferência são pontos em que, quando a onda vinda de A está subindo, a onda vinda de B está descendo, de maneira que seus efeitos se cancelam.

O regime quântico é atingido quando o feixe de luz é muito fraco e o detector é extremamente sensível. Neste regime, a absorção de luz se

dá em pacotes discretos de energia, os quanta (fótons), que também são pontuais (Figura 2). O acúmulo paulatino desses pontos acaba gerando as franjas que observamos no laboratório de óptica clássica. Um experimento análogo é obtido para elétrons.

Um aspecto surpreendente do regime quântico é que a luz ou o elétron sofrem interferência, o que é típico de ondas, mas são detectados na forma de partículas. Como conciliar esses aspectos ondulatórios e corpusculares? Afinal, ondas têm propriedades, como se espalhar no espaço e poder ser dividida o quanto se queira, que ocorrem de maneira oposta em partículas, que seguem trajetórias, sem se espalhar, e não são divisíveis (até um certo valor de energia).

Respostas a essa pergunta resultam nas diferentes *interpretações* da Teoria Quântica. Por exemplo: à pergunta sobre qual é a natureza da luz ou do elétron logo antes da detecção, algumas interpretações postulam que o objeto está espalhado como uma onda; outras, que ele já tem uma localização bem definida, enquanto interpretações “antirrealistas” negam que se possa atribuir uma natureza real para um objeto que ainda não foi medido.

Apesar de haver muitas interpretações para a Teoria Quântica, todas concordam que os quanta do experimento acima aparecem de forma paulatina, e que se distribuem de acordo com as franjas de interferência indicadas na figura. Esta é a parte *objetiva* da Teoria Quântica, envolvendo os fatos observados e “formalismo mínimo” da teoria. Esse formalismo envolve leis estatísticas, pois geralmente não se pode prever onde irá aparecer um ponto na tela detectora, mas apenas estipular a probabilidade de o quanta aparecer nas diferentes localizações da tela. A objetividade mencionada pode ser expressa da seguinte forma: qualquer que seja a civilização que desenvolva uma ciência madura e saudável, seja a China (no caso em que a ciência europeia não tivesse florescido) ou uma sociedade extraterrestre, eventualmente ela descobriria os fatos objetivos da Mecânica Quântica. Esta é a parte da ciência que consegue se isolar das pressões culturais e das inclinações dos cientistas, devido à aplicação dos métodos científicos.

Mas há uma parte da ciência que é bastante sensível às pressões culturais e às inclinações dos cientistas, e esta parte é chamada de *interpretação* da teoria. Uma interpretação envolve suposições metafísicas, não verificáveis, usadas para explicar de maneira coerente os fenômenos observados (interpretações realistas); uma interpretação pode também estipular que o cientista não deve especular sobre aspectos inobserváveis da realidade, evitando, assim, asserções metafísicas (interpretações antirrealistas ou instrumentalistas).

## Uma interpretação didática da teoria quântica

Toda apresentação introdutória da física quântica acaba adotando uma interpretação para fins didáticos. A que é tradicionalmente a mais usada é a interpretação da complementaridade, de natureza antirrealista. No entanto, prefiro adotar uma interpretação realista, que se adéqua mais às intuições do aluno, e propor um retrato da realidade que se aproxima de uma abordagem padrão da teoria quântica, a chamada mecânica ondulatória, baseada na representação fornecida pela equação de onda de Schrödinger. Sucintamente, então, podemos estipular cinco princípios básicos da física quântica. As duas primeiras são as mais fundamentais para o iniciante.

O primeiro princípio diz que *toda matéria é ondulatória*. Isso foi descoberto pelo jovem Louis de Broglie em 1924, ao prever que os elétrons deveriam sofrer difração (que é, fundamentalmente, o mesmo fenômeno de interferência visto acima), o que seria verificado experimentalmente em 1927. Aqui, peço ao leitor que imagine que todos os átomos e partículas têm uma oscilação intrínseca enquanto estão em repouso ou se propagam, e isso acontece quer ocorram observações (medições) ou não. Este princípio se estende também para a radiação eletromagnética, mas isso já era conhecido pela física clássica (vale também para outros “bósons de interação”, associados às outras três forças reconhecidas na natureza: gravitacional, nuclear forte e nuclear fraca). Uma consequência da natureza ondulatória é o *princípio de superposição*: dados dois estados distintos que possam ser preparados experimentalmente, é geralmente possível “somar” tais estados, gerando um novo estado ondulatório (que pode ser preparado experimentalmente). Se tais estados têm a mesma amplitude e oscilam em oposição, eles se cancelam, gerando as faixas escuras de interferência destrutiva que vimos na seção 1 (isso não viola a conservação de energia, pois a energia que é zerada acumula-se nas faixas de interferência construtiva).

O segundo princípio, cuja evidência começou a surgir a partir de Max Planck, em 1900, é o de *quantização*, manifestado pela detecção pontual no experimento acima. A maneira instrumentalista de exprimir isso, ou seja, o enunciado que todas as interpretações aceitariam, é de que, no processo de medição, obtêm-se eventos observáveis (macroscópicos) que são localizados pontualmente (ou seja, com resolução de em torno de um milímetro), transmitindo para o detector uma energia quantizada. Estas duas propriedades são especialmente notáveis para a radiação eletromag-

nética (pois isso não é previsto pela física ondulatória clássica). Podemos resumir este princípio dizendo que *na medição ocorre quantização*. Geralmente, essa interpretação estritamente instrumentalista é associada a uma tese minimamente realista que postula que há um ente quântico revelado ou criado pela medição, de dimensões subnanoscópicas. O termo “fóton” (quantum de luz) geralmente é interpretado desta maneira minimamente realista, mas pode também ser interpretado da maneira instrumentalista indicada acima.

A tensão entre esses dois princípios, “toda matéria e radiação é ondulatória” e “na medição ocorre quantização”, deve ser resolvida por uma proposta de interpretação da teoria quântica. A que proponho aqui é a “interpretação ondulatória realista com colapsos” (IORC), que diz que, na interação com o aparelho de medição, uma onda espalhada colapsa para um pacote de onda de dimensões próximas ao evento macroscópico registrado (que acima sugeri poder ser da ordem de um milímetro, mas que em detectores mais modernos poderia ser menor, sempre satisfazendo os limites impostos pelo princípio de incerteza, que é um princípio oriundo da física ondulatória clássica).

A natureza desse colapso é um problema filosófico conhecido como “problema da medição”. Para uma interpretação realista como a IORC, uma característica trazida à tona pelo Teorema de Bell é que os colapsos postulados pela interpretação têm que ser não-locais, ou seja, são instantâneos (no referencial do laboratório, por exemplo). Outra questão importante que se coloca é se esses colapsos podem ocorrer em situações fora da interação de medição, ou seja, fora da situação em que há um aparelho macroscópico em estado metaestável que evolui para um estado considerado irreversível. Adotaremos a postura interpretativa de que sim, colapsos ocorrem fora do processo de medição. A “decoerência” induzida pelo ambiente descreve estatisticamente um processo de colapso que ocorre quando um sistema quântico interage com um sistema muito maior, sujeito a flutuações, em um processo cujos detalhes individuais ainda não são adequadamente descritos teoricamente (a decoerência faz uma descrição apenas estatística, não explicando os casos individuais em que ocorre uma transição ou colapso imprevisível). Uma tentativa de dar conta desta situação é fornecida pelas interpretações de localização espontânea (lançada por Ghirardi, Rimini e Weber, em 1986), que postulam uma ontologia ondulatória e também uma taxa de colapso espontâneo em toda a matéria.

O terceiro princípio conceitual introduzido pela mecânica quântica descreve o *emaranhamento de dois ou mais quanta*, que fornece estados

com propriedades que não ocorrem na física ondulatória clássica. O quarto princípio é a *distinção entre férmions e bósons*, exemplificados respectivamente por elétrons e pela luz (radiação eletromagnética). Por fim, um quinto princípio é a *existência do vácuo quântico*, um “pleno” ocupando (ou identificando-se com) o espaço (ou o espaço-tempo), contendo uma energia “de ponto zero” existente mesmo na ausência de átomos, e em constante flutuação.

## O impacto da física quântica na sociedade

Qual é o impacto da mecânica quântica sobre a sociedade? É costume afirmar-se que sem a mecânica quântica não haveria toda a gama de avanços tecnológicos que nos cerca, como transístores, lasers, energia nuclear, supercondutividade etc. No entanto, tal afirmação contrafactual precisaria ser formulada com mais cuidado, pois teorias semiclássicas, diferentes da teoria quântica, poderiam fornecer bases teóricas para descrever semicondutores (essenciais em transístores), e o próprio desenvolvimento de lasers antecedeu a formulação de uma óptica quântica que os descrevesse de maneira satisfatória.

De qualquer maneira, é inegável que a teoria quântica desenvolvida na década de 1920 teve *um grande impacto científico e tecnológico*, afetando assim a nossa sociedade. Mais sutil é a discussão sobre se a teoria quântica tem um impacto teórico, alterando a maneira como vemos o mundo. Iremos dividir esta questão em dois tipos: ontológico e epistemológico. Um impacto ontológico seria uma alteração da maneira em que concebemos a realidade; já um impacto epistemológico seria adaptarmos a estrutura da teoria dos átomos para teorias de outras áreas de nosso conhecimento e atuação.

Na questão do impacto teórico *ontológico*, está claro que agora entendemos melhor como funciona o mundo na escala dos átomos e moléculas, em torno de  $10^{-10}$  metros, ou a escala “subnanoscópica”. Nesse sentido, houve um impacto óbvio. Mas será que os princípios quânticos mencionados na seção anterior afetam a maneira como devemos entender o mundo macroscópico que nos cerca, na escala de centímetros e metros? O movimento do Misticismo Quântico defende que sim: os princípios quânticos se aplicam à mente humana, e esta pode entrar em um estado de emaranhamento com outras mentes. Mas tal especulação não é aceita pela maioria dos físicos. O que ocorre é que há uma transição entre o mundo da escala quântica e o mundo macroscópico, uma fronteira que

não é perfeitamente compreendida, e que é explorada pelo conceito de decoerência mencionado na seção anterior. Como calculou Mark Tegmark (2000), as flutuações térmicas em nosso cérebro relativamente quente impediriam a possibilidade de superposições quânticas se sustentarem nos microtúbulos de nossas células por mais de um microssegundo. Ou seja, uma propriedade ondulatória da matéria, a chamada superposição quântica, torna-se desprezível em escalas macroscópicas devido à interação com um ambiente ruidoso, ou cheio de flutuações aparentemente aleatórias (especialmente fortes na escala nanoscópica, um pouco acima da escala quântica). Isso, então, limita a possibilidade de o comportamento quântico (ou melhor, a ontologia quântica) afetar o mundo à nossa volta.

No entanto, há a possibilidade de este comportamento se estender para agrupamentos maiores de átomos, desde que as flutuações ambientais sejam minimizadas. O grupo de Markus Arndt, na Universidade de Viena, demonstrou superposição quântica com moléculas de 2000 átomos (Fein *et al.*, 2019). Além disso, a partir de 2006, experimentos “optomecânicos” atingiram superposições quânticas em vibrações mecânicas, por meio de excitações por fótons únicos (ver resenha de Aspelmeyer *et al.*, 2010). Tais experimentos são às vezes chamados de “gatos de Schrödinger”, em referência ao famoso experimento mental do físico austríaco, pioneiro da mecânica ondulatória (uma das versões originais da mecânica quântica, posteriormente unificada com as outras versões). Mas a extrema dificuldade de tais experimentos mostram que a decoerência induzida pelo ambiente impediria a superposição imaginada por Schrödinger, em seu argumento a favor da incompletude da teoria quântica.

Os próprios computadores quânticos seriam um exemplo de extensão da ontologia quântica para domínios macroscópicos, mas isso depende justamente do controle dos ruídos ambientais (flutuações térmicas). Computadores quânticos baseiam-se especialmente no emaranhamento de vários átomos para poder realizar certos cálculos em tempos bem mais rápidos do que computadores convencionais.

Um dos primeiros conceitos da física quântica a ter um impacto cultural e ser estendido para outros domínios, na década de 1930, foi o princípio de incerteza. Este princípio se baseia em uma propriedade ondulatória da matéria, acoplada à quantização na detecção (ou seja, os dois primeiros princípios da seção anterior). Ondas clássicas, como ondas eletromagnéticas, são limitadas por um princípio de indeterminação, afetando a localização de um pacote de onda e seu comprimento de onda. No

caso quântico, esta propriedade ondulatória adquire um aspecto corpuscular com o princípio da quantização na medição.

O astrônomo Arthur Eddington (1932, p. 79), por exemplo, especulou que a liberdade humana estaria garantida pela existência de processos quânticos em nosso cérebro, submetidos ao princípio de incerteza, que quebrariam o determinismo da física clássica. Até hoje, porém, tal especulação não obteve evidência alguma. O impacto ontológico do princípio quântico de incerteza no mundo à nossa volta não apareceu (já o princípio clássico de indeterminação tem consequências, por exemplo, na recepção de ondas de rádio nos aparelhos de uso cotidiano).

Uma questão associada é a tese de que a mecânica quântica teria mostrado que o universo é indeterminista, o que seria uma consequência ontológica notável. No entanto, a interpretação causal de David Bohm (1952) mostrou que, em princípio, pode-se conceber que o mundo quântico seja determinista, pois sua interpretação introduziu variáveis ocultas deterministas no sistema quântico e no aparelho de medição, de tal modo a dar conta das leis fundamentais da física quântica.

O que podemos concluir desta discussão é que o impacto ontológico da teoria quântica em nossa sociedade limita-se justamente às aplicações tecnológicas que foram obtidas no último século, que são maneiras de amplificar efeitos quânticos de maneira a gerar efeitos em nosso cotidiano, efeitos esses que eram desconhecidos no passado. Isso é bem menos do que a influência que o Misticismo Quântico vê em nossa psicologia, medicina e em nossas crenças religiosas.

Passemos agora para o impacto teórico *epistemológico* da teoria quântica. Será que a natureza desta área da ciência fornece lições sobre como devemos construir nossas teorias científicas? Em Pessoa (2016), sugeri que a distinção entre um nível de descrição de potencialidades, expresso pela função de onda quântica, e um nível de atualizações, após o colapso da onda quântica e seu registro macroscópico, poderia, talvez, ser estendido para teorias psicológicas e sociológicas.

Aqui, porém, gostaria de salientar uma lição epistemológica associada à existência de dezenas de interpretações da teoria quântica. Como já mencionamos, por trás da parte objetiva da mecânica quântica há muitas interpretações distintas sobre a natureza última do nosso mundo, relativa às partes não observáveis da realidade. Qual delas é a correta? A melhor resposta que podemos fornecer hoje é *que não temos como saber qual é verdadeira*. Dentre as dezenas de interpretações, algumas delas são mais próximas da verdade; ou seja, ao estudar as várias interpretações,

talvez tenhamos contemplado a resposta correta a respeito da realidade quântica do mundo! No entanto, não sabemos qual é ela, não sabemos qual é a resposta correta. Iremos para nosso túmulo sabendo a resposta correta, mas sem poder reconhecer que ela é a resposta correta! Esta seria uma lição epistemológica da teoria quântica.

### **A tese de Forman**

A ciência é objetiva ou é uma construção socioculturalmente negociada? Iniciemos com a famosa tese de Forman ([1971] 1983), que defende que conteúdos da teoria quântica foram negociados pelos físicos da época, em face de uma pressão cultural contra a tese do determinismo.

Em seu artigo, Paul Forman parte das seguintes afirmações do historiador Max Jammer (1966, seção 4.2):

[...] certas ideias filosóficas do final do século XX não apenas prepararam o clima intelectual para a formação das novas concepções da moderna teoria quântica, mas contribuíram decisivamente para ela (Jammer, 1966, p. 166–67).

As escolas filosóficas que mencionamos, especificamente o contingentismo, o existencialismo, o pragmatismo e o empirismo lógico, surgiram em reação ao racionalismo tradicional e à metafísica convencional [...] A afirmação que faziam de uma concepção concreta da vida e sua rejeição de um intelectualismo abstrato culminaram em sua doutrina de livre-arbítrio, na recusa do determinismo mecanicista ou da causalidade metafísica. Unidas na rejeição da causalidade, apesar de não o fazerem nas mesmas bases, tais correntes de pensamento prepararam, por assim dizer, o pano-de-fundo filosófico para a mecânica quântica moderna. Elas contribuíram com sugestões no estágio formativo do novo esquema conceitual e depois promoveram sua aceitação (Jammer, 1966, p. 180).

A proposta de Forman, então, é fundamentar a tese de Jammer examinando documentos do período de construção da mecânica quântica, especialmente a década de 1920, no período conhecido com República de Weimar, que vai de 1919 a 1933, em que a Alemanha foi punida economicamente pelo Tratado de Versailles, que encerrou a Primeira Guerra Mundial, levando a um sentimento de humilhação na população alemã.

Seguindo Jammer, Forman salienta que, “após a derrota alemã, a tendência intelectual dominante no mundo acadêmico de Weimar era uma ‘filosofia da vida’ existencialista e neorromântica, que se alimentava de crises e se caracterizava pelo antagonismo em relação à racionalidade analítica em geral e às ciências exatas e suas aplicações técnicas em particular” (Forman, 1983, p. 7):

[...] um grande número de cientistas alemães, sob a influência de “correntes de pensamento” [...], se distanciou da causalidade na física ou a repudiou explicitamente. [...] a tese mais importante de Jammer — de que influências extrínsecas levaram os físicos a desejar ardentemente, buscar ativamente e aderir com entusiasmo a uma mecânica quântica acausal — é aqui demonstrada para a esfera cultural alemã. (p. 6) [...]

Implícita ou explicitamente, o cientista era o bode-expiatório de incessantes exortações em favor de uma renovação espiritual, enquanto o conceito — ou meramente a palavra — “causalidade” simbolizava tudo aquilo que era odioso na atividade científica. (Forman, 1983, p. 7).

Qual o conceito que simboliza hoje o “odioso” na atividade científica? É o de *reduccionismo*. Resumindo, então, a tese de Forman:

[...] existiriam indicações de que os físicos e matemáticos alemães ansiavam, e deliberadamente tentaram, alterar o caráter de suas disciplinas enquanto empreendimentos cognitivos e buscaram mudar conceitos específicos nelas empregados, de modo a trazê-las a uma conformidade mais estreita aos valores do meio intelectual de Weimar? [...] Estou convencido [...] que o movimento para eliminar a causalidade na física, surgido tão bruscamente e que floresceu luxuriantemente na Alemanha após 1918, exprimia fundamentalmente um esforço dos físicos alemães em adaptar o conteúdo de sua ciência aos valores de seu ambiente intelectual (Forman, 1983, p. 9).

A tese de Forman levou a muita discussão, no que podemos chamar de o debate *objetividade x relativismo*. Se o conteúdo de uma ciência natural busca retratar uma realidade que independe da cultura humana (objetividade), como é que o conteúdo da ciência pode ser influenciado pela cultura de um momento histórico particular (relativismo)?

Nossa resposta parte da distinção já feita entre a parte objetiva e a parte interpretativa da teoria quântica. A parte objetiva é expressa pelo “formalismo mínimo” da teoria, que reflete os fatos observados em experimentos e fornece as previsões experimentais da teoria. Qualquer cultura que tenha uma ciência que progrida de maneira “saudável” descobrirá, por exemplo, o fato de que a luz é detectada como fótons. Nisso constitui a objetividade da ciência: o lado objetivo da teoria quântica desenvolve-se de maneira independente da cultura (pressupondo apenas que haja uma valorização cultural da ciência, para que exista uma “ciência madura”).

Mas a mecânica quântica (assim como todas as outras áreas da ciência) possui também uma parte interpretativa, que envolve afirmações a respeito da realidade de processos não diretamente observáveis da realidade (interpretações realistas), ou teses justificando porque não se deve ir para além dos fatos observáveis (interpretações antirrealistas). Há deze-

nas de interpretações da teoria quântica: como a escolha da interpretação não é determinada pelos dados empíricos, ela pode sofrer considerável influência da cultura reinante em uma comunidade científica e da visão de mundo dominante. Isso é exemplificado pela rejeição do determinismo nos anos 1920–30, segundo a tese de Forman.

Esta postura adotada aqui pode ser considerado um “relativismo relativo”. Haveria um relativismo em parte das construções teóricas da ciência, no sentido de elas serem influenciadas pela cultura e pela ideologia, mas tal relativismo é relativo a só uma parte da ciência. Há também uma parte objetiva, que surge justamente do esforço dos métodos científicos em isolar suas descobertas das vicissitudes sociais e das intenções e emoções do cientista. Em suma, a tese de Forman pode ser aceita, considerando que a discussão sobre a causalidade faz parte do lado interpretativo da teoria quântica.

### **Breve exploração da relatividade das interpretações**

Ilustraremos a seguir alguns exemplos de influência da cultura sobre as interpretações da mecânica quântica. Veremos também que há outros mecanismos (além da influência cultural) para explicar por que certas interpretações são preferidas em certos lugares.

Começemos com a tese proposta por James Cushing (1994), segundo a qual a dominação da interpretação de Copenhague da mecânica quântica (uma visão antirrealista) foi uma “contingência histórica”: em outra situação, uma interpretação realista como a de Louis de Broglie e David Bohm (a preferida de Cushing) poderia ter sido hegemônica. Tal afirmação parece bastante plausível: bastaria haver um ambiente favorável para uma interpretação realista, e uma adequada solução dos quebra-cabeças presentes. O que Cushing não considera, porém, é que há uma vantagem natural de interpretações antirrealistas, que são mais econômicas e não introduzem variáveis ocultas ou inacessíveis à época. Como a postulação de um corpúsculo com posição e velocidade bem definidas a cada instante não traz nenhuma vantagem para o cálculo dos fenômenos quânticos, é natural que muitos físicos deixem de lado essas hipóteses a respeito de variáveis ocultas. Uma interpretação realista mais “natural” (isto é, próxima do formalismo matemático usado), como a interpretação ondulatória realista com colapsos (IORC), que não postula explicitamente variáveis ocultas, poderia ter uma melhor chance de sobreviver sem ser desafiada por visões antirrealistas.

As teses de Forman e Cushing se encaixam muito bem, segundo a nossa abordagem. Ambas são consistentes com a existência de uma parte objetiva da ciência, expressa no caso da teoria quântica pelo seu formalismo mínimo. E ambas argumentam que a parte interpretativa da teoria poderia ter sido diferente, conforme as circunstâncias culturais e filosóficas. Forman faz isso apenas indiretamente, ao defender que a causa da rejeição do determinismo era cultural; se a causa não tivesse ocorrido, o determinismo poderia não ter sido rejeitado, que é a tese de Cushing.

O segundo caso a ser examinado é o desenvolvimento de interpretações realistas em contextos culturais diferentes da Alemanha no período entreguerras, em que a formação dos cientistas tinha um forte componente filosófico. Refiro-me à interpretação dos coletivos (*ensembles*) estatísticos, que foi proposta no contexto estadunidense por John Slater (1926), Edwin Kemble (1937), Henry Margenau e Murphy (1946) e Alfred Landé (1951); e, no contexto da União Soviética, por Dmitrii Blokhintsev (1949) e Yakov Terletskii. No primeiro caso, haveria uma influência de uma tradição de Física prática e experimental, sem inclinações abstratas (com algumas exceções, como Willard Gibbs), e sem muita influência filosófica, salvo pelo pragmatismo. No segundo caso, havia uma ideologia materialista dialética contrária ao que era visto como idealismo na interpretação de Niels Bohr e outros autores, o que facilitava a recepção de uma teoria realista como a da interpretação dos coletivos, baseada na ideia de que o formalismo quântico não descreve quanta individuais, mas faz uma descrição estatística, de maneira que há propriedades reais que são ocultas.

A tese de Forman também explica muito bem o surgimento das interpretações realistas ondulatórias em que o sujeito teria a capacidade de causar um colapso da onda quântica, uma “interpretação subjetivista” incorporada pelas correntes do misticismo quântico. Tal interpretação esteve associada a John von Neumann (mas não explicitamente), Fritz London, Edmond Bauer, Walter Heitler, Eugene Wigner, além de James Jeans, Arthur Eddington e J. B. S. Haldane. A explicação para a força adquirida por essas interpretações espiritualistas envolveria o mesmo movimento do romantismo do entreguerras alemão descrito por Jammer e Forman, e as várias escolas esotéricas que sempre tiveram força nas diferentes civilizações humanas. Notamos que a tese de que a consciência humana causa os colapsos quânticos (sem afetar as probabilidades quânticas) nunca foi refutada por experimentos, de maneira que é uma interpretação que deve

ser aceita na “democracia de interpretações quânticas” que passou a ser mais amplamente reconhecida a partir dos anos 1970.

Um quarto caso envolve a interpretação dos estados relativos de Hugh Everett (1957) e dos muitos mundos Bryce DeWitt (1970). Neste caso, o surgimento da interpretação e seu sucesso mais recente se ligam ao ambiente acadêmico de pesquisa em cosmologia (e não da cultura em geral). Curiosamente, houve uma concentração de pesquisadores que defendem a interpretação everettiana em Oxford. Isso, em parte, parece ser um efeito do ambiente acadêmico de valorização da cosmologia e da física matemática.

Além do efeito da cultura e do ambiente acadêmico, há também um análogo ao “efeito fundador” em biologia evolutiva. Por exemplo, havia um pesquisador destacado na Rutgers University, Sheldon Goldstein, que defendia a “mecânica bohmiana”, uma versão corpuscularista da interpretação de Bohm. Ele atraiu vários pesquisadores, inclusive da interpretação ondulatória realista das localizações espontâneas, formando nesta universidade um núcleo de defesa de interpretações realistas.

Entre 1950 e 1980, com a Guerra Fria, muitos cientistas associaram sua visão ideológica de esquerda a interpretações realistas, acusando a interpretação da complementaridade de ser idealista e burguesa. Este debate é conhecido como “batalhas quânticas”, e é explorado por Olival Freire Jr. (2009). No final das contas, percebe-se que há propostas envolvendo todo tipo de combinação entre ideologia e interpretação. De qualquer maneira, é mais um exemplo de como a ideologia e a cultura influenciam as discussões sobre as interpretações da teoria quântica.

Uma associação notável entre cultura e interpretação parece ocorrer na França, em que há um forte peso do pós-modernismo, uma visão relativista. Após algumas versões do teorema de Bell (como a desigualdade de Leggett), alguns filósofos da física franceses passaram a defender que *a própria noção de realidade teria que ser abandonada* (Mécanique, 2008).

Muitos dos pontos acima necessitam de um melhor embasamento historiográfico, servindo, assim, como sugestão para pesquisa futura.

## Conclusão

Neste artigo, visitamos algumas questões relacionadas à física quântica, sua relação com a cultura em geral e seu impacto na sociedade. Começamos buscando apresentar didaticamente a teoria quântica, explorando o experimento da dupla fenda no regime quântico. Salientamos que a teoria tem uma parte objetiva e uma parte interpretativa, e exploramos

brevemente uma interpretação ondulatória realista com colapsos. A física quântica teve um grande impacto científico e tecnológico na sociedade; e examinamos, também, a questão de seu impacto teórico — tanto no aspecto ontológico quanto epistemológico. Estudamos, então, a tese de Forman, de que a criação da mecânica quântica se deu em um contexto de rejeição da noção de determinismo. Esta tese é vista como bastante plausível, dado que a influência da cultura se deu sobre a parte interpretativa da teoria. Examinamos, por fim, alguns exemplos de como a cultura e outros fatores têm tido uma influência sobre diferentes interpretações da teoria quântica.

### Agradecimentos

O presente trabalho é um diálogo com pesquisadores das Humanidades, sendo que uma etapa anterior recente de tal diálogo foi realizada por Pessoa (2016), dirigido para psicólogos e psicanalistas. Aqui, eu retraço o início deste outro artigo, mas a maior parte do que aparece das seções 2 em diante deste presente texto é inédito. As seções 4 e 5 foram desenvolvidas ao longo de 2017, em palestras no IRFJ, Unicsul, UFABC, IFT, UFPA, FEG e na Escola de HFC do Paraná — mas não tinham sido publicadas no papel.

O estímulo para o presente texto adveio da interação com três grupos ligados à área de Comunicação, interessados em física quântica, nas seguintes palestras online, durante a pandemia de Covid-19. (1) Evento “A Cidadania do Terceiro Milênio”, em 05/11/2020, no *I Festival Internacional de Cidadania Digital*, organizado pelo Centro Internacional de Pesquisa Atopos, ECA-USP. (2) Palestra no Fórum na disciplina “Alterciência: Proposições Críticas e Processos Criativos para o Conhecimento”, ofertado pelo Diversitas, USP, a convite de Thiago Costa e Artur Matuck, da ECA-USP, com curadoria de Daniela Carolina Ernst, em 24/05/2021. (3) Palestra no *Horizonte Quântico*, do Programa de Estudos Pós-Graduados em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), PUC-SP, em 20/08/2021, a convite de Rodrigo Petronio e Lucia Santaella.

## Referências

ASPELMEYER, Markus, *et al.* Quantum optomechanics – throwing a glance. *Journal of the Optical Society of America B*, Washington, DC, v. 27, n. 6, p. A189–A197, 2010.

BLOKHINTSEV, Dmitrii. *Foundations of quantum mechanics*. Moscow: GITTL, 1949.

BOHM, David. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables part I and II. *Physical Review*, College Park, MD, v. 85, n. 2, p. 166–193, 1952.

CUSHING, James T. *Quantum mechanics: Historical contingency and the Copenhagen hegemony*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1994.

DEWITT, Bryce. Quantum mechanics and reality. *Physics Today*, v. 23, n. 9, p. 30–35, 1970.

EDDINGTON, Arthur. The decline of determinism: presidential address to the Mathematical Association. *The Mathematical Gazette*, Leicester, v. 16, n. 218, p. 66–80, 1932.

EVERETT III, Hugh. *On the foundations of quantum mechanics*. PhD Thesis submitted to the Princeton University, 1957.

FEIN, Yaakov, *et al.* Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa. *Nature Physics*, Berlin, v. 15, n. 12, p. 1242–1245, 2019.

FORMAN, Paul. A cultura de Weimar, a causalidade e a teoria quântica, 1918–1927: a adaptação de físicos e matemáticos alemães a um ambiente intelectual hostil. Tradução de C. W. Abramo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Suplemento 2, Campinas, p. 3–98, [1971] 1983.

FREIRE Jr., Olival. *Marxism and quantum controversy: responding to Max Jammer’s question*. In: CATTANI, Mary Schnackenberg *et al.* (orgs.). *Trends in Physics: Festschrift in homage to prof. José Maria Filardo Bassalo*. São Paulo: Livraria da Física, 2009, p. 237–258.

GHIRARDI, Giancarlo; RIMINI, Alberto; WEBER, Tullio. Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D*, Philadelphia, PA, v. 34, n. 2, p. 470–491, 1986.

JAMMER, Max. *The conceptual development of quantum mechanics*. New York, NY: McGraw-Hill, 1966.

KEMBLE, Edwin C. *The fundamental principles of quantum mechanics*. New York, NY: McGraw-Hill, 1937.

LANDÉ, Alfred. 1951. *Quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1951.

MARGENAU, Henry; MURPHY, George M. *The mathematics of physics of chemistry*. New York, NY: Van Nostrand, 1946.

MÉCANIQUE quantique: l'erreur d'Einstein. *La recherche*, Paris, v. 418, 2008.

PESSOA Jr., Osvaldo. A psicologia precisa da teoria quântica? *Calibán* — *Revista Latino-Americana de Psicanálise*, Montevideo, v. 14, n. 2, p. 145–152, 2016.

SLATER, John. A dynamical model for complex atoms. *Physical Review*, College Park, MD, v. 28, p. 291–317, 1926.

TEGMARK, Max. Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, College Park, MD, v. 61, p. 4194–4206, 2000.