

Os Estados Relativos de Hugh Everett III e o Realismo Científico na Mecânica Quântica

Hugh Everett III's Relative States and the Scientific Realism in Quantum Mechanics

Tiago Cunico Camara¹
Universidade de Brasília

Samuel Simon²
Universidade de Brasília

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo explorar o tipo de realismo prevalecente na interpretação mais usualmente adotada para a Mecânica Quântica, qual seja, a Interpretação de Copenhague, e contrapô-lo ao realismo da Interpretação dos Estados Relativos de Everett, baseado no formalismo de uma pura mecânica ondulatória.

Palavras-chave: Interpretação de Copenhague, Interpretação dos Estados Relativos, Princípio de Complementariedade, Realismo Científico, Hugh Everett III.

Abstract

The objective of the present work is to explore the kind of realism prevailing in the most usual interpretation adopted for Quantum Mechanics, that is, the Copenhagen Interpretation, opposing it to the realism of Everett's Relative States Interpretation, based on a formalism of pure wave mechanics.

Keywords: Copenhagen Interpretation, Relative States Interpretation, Complementarity Principle, Scientific Realism, Hugh Everett III.

¹ Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Grupo de Lógica e Filosofia da Ciência-CNPq/UnB. 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: cunicocamara@gmail.com

² Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Programa de Pós-graduação em Filosofia e Grupo de Lógica e Filosofia da Ciência-CNPq/UnB. 70910-900. Brasília, DF, Brasil. E-mail: samusimon@gmail.com

Introdução

Desde 1900, numerosas foram as tentativas de interpretar as observações experimentais dos fenômenos quânticos à luz de alguma teoria física. Alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos ao longo das duas primeiras décadas do século XX, mas somente em 1925 um formalismo matemático minimamente satisfatório foi obtido. Tal formalismo, conhecido como Mecânica Quântica Matricial, era, entretanto, altamente abstrato e, tal qual a rica história de experimentos e descobertas que o precederam nos vinte anos anteriores, necessitava ser grandemente interpretado para ser plenamente compreendido.

Pode-se dizer que até o advento da Mecânica Quântica Matricial a procura por um formalismo matemático referente aos fenômenos físicos esteve sobretudo vinculada, pelo menos, desde o século XVII, à busca de uma explicação para os mesmos³. Por essa tradição, o formalismo matemático procurado não deveria ser capaz apenas de nos fornecer poder preditivo para nossas observações, i. e., nos dotar da capacidade de antecipar os resultados futuros de nossas medições, mas também ser capaz de *explicar* aquilo que observamos em termos de um *mecanismo* ou *ontologia* facilmente visualizável. Tal mecanismo ou ontologia corresponderia a uma *imagem mental* daquilo que, supostamente, de modo subjacente, é responsável pelas nossas observações.

Mais especificamente, sendo uma *imagem*, tal mecanismo constitui um *modelo explicativo espaçotemporal causal* para o fenômeno. É espaçotemporal porque as partes do modelo são sempre visualizadas no espaço-tempo, ainda que não sejam necessariamente *materiais* (caso, por exemplo, das linhas de força próprias dos modelos clássicos para o eletromagnetismo). E é causal porque, de alguma maneira, existe alguma relação de antecedente e conseqüente associada ao fenômeno (sem entrarmos aqui no problema da conexão humana vinculada à causalidade).

Historicamente, em ciência, se um modelo explicativo espaçotemporal causal é satisfatoriamente encontrado para um dado fenômeno, a teoria associada à sua criação passa a ser, em certas concepções, considerada como *verdadeira*. Ademais, as entidades representadas pela teoria como elementos formadores do modelo são, nessas mesmas concepções, consideradas como sendo *reais* – sendo que, por *reais*, pretendemos que o estatuto ontológico de tais entidades é independente de qualquer conhecimento que tenhamos a seu respeito.

No caso da Mecânica Quântica, diversas interpretações realistas e idealistas surgiram entre 1900 e 1932 (ou mesmo em anos posteriores). Com o advento da Mecânica Matricial em 1925, contudo, e especialmente após a enunciação do Princípio de Complementariedade de Bohr em 1927, uma nova ortodoxia se consolidou na comunidade acadêmica – trata-se do que ficou conhecido como a Interpretação de Copenhague. Por esta concepção ortodoxa, ainda que não possamos dizer que uma atitude antirrealista tenha sido rigorosamente adotada com relação à Mecânica Quântica (haja vista, por exemplo, os principais expoentes daquela Escola nunca

³ O problema da explicação em ciência tem estreita relação com o problema do realismo científico. Nesse sentido, Ernst Mach (1838-1916), Wilhelm Ostwald (1853-1932) e, posteriormente, Pierre Duhem (1861-1916) constituem os principais nomes do que se poderia chamar de uma corrente não realista na Física do final do século XIX e início do século XX. Embora não constituíssem um movimento filosófico bem definido, esses autores criticavam uma ontologia associada aos conceitos científicos, os quais fundariam a explicação científica. No caso de Mach e Ostwald, a crítica voltava-se, sobretudo, à realidade dos átomos (crítica já feita por Auguste Comte). Esses autores, evidentemente, inserem-se numa longa tradição filosófica antirrealista (ou não realista) ou ainda antimetafísica, que remonta, particularmente, aos empiristas modernos.

terem negado a existência de entidades inobserváveis, tal qual o elétron⁴), podemos afirmar que o tipo de realismo almejado mudou radicalmente – de fato, houve a renúncia da tese de que uma teoria quântica deve prover modelos explicativos espaçotemporais causais para os fenômenos.

O primeiro ataque à atual ortodoxia veio de físicos de grande renome, tais como Einstein, de Broglie e Schrödinger. Contudo, ao longo das duas primeiras décadas do século XX, outros cientistas buscaram em suas pesquisas desenvolver modelos explicativos espaçotemporais causais para os fenômenos, ao contrário, portanto, do que a ortodoxia buscava.

Nesse contexto, no início da década de 1950, surge uma curiosa alternativa à interpretação ortodoxa. Essa nova interpretação altera certos pressupostos centrais da Interpretação de Copenhague, sendo o principal a separação entre os domínios quântico e clássico. Trata-se da Interpretação dos Estados Relativos formulada por Hugh Everett III. O presente trabalho fará um exame dessa interpretação e analisará as consequências filosóficas dela decorrentes. Dessa maneira, apresentaremos, inicialmente, a Interpretação de Copenhague, especialmente o papel desempenhado pelo Princípio de Complementariedade, parte importante da crítica do trabalho de Everett. Em seguida, apresentaremos a Interpretação dos Estados Relativos, destacando as noções de observador e de sua “memória”, e, finalmente, analisaremos as consequências daí advindas, particularmente no que tange ao realismo científico em Mecânica Quântica.

A Interpretação de Copenhague

Pode-se dizer que a Física Quântica inicia-se com a apresentação, por Max Planck, de seu artigo “Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal” (Planck, 1900), em uma reunião da Sociedade Alemã de Física realizada em 14 de dezembro de 1900. Tal trabalho forneceu, pela primeira vez, um modelo explicativo para todo o espectro eletromagnético da radiação emitida por um corpo negro – tendo, contudo, para lograr tal êxito, que postular uma hipótese inédita na Física – o *quantum* de ação –, que viria a ser a semente de uma verdadeira revolução científica a se desenvolver vigorosamente nas três décadas seguintes e que, até hoje, em certo sentido, ainda não se esgotou.

Após um desenvolvimento vigoroso, desde as suas origens, pode-se perguntar como os físicos encaram a Mecânica Quântica. Parece ser possível afirmar que, após 1930, a maior parte da comunidade científica envolvida com o estudo dos fenômenos quânticos tem utilizado o que ficou conhecido como o formalismo de Dirac–von Neumann, configurando-se como a estrutura matemática central do que se poderia chamar de Mecânica Quântica. O sucesso desse formalismo, desde então, não tem sido seriamente questionado. O que sempre foi objeto de controvérsias diz respeito a como devemos interpretá-lo – seus termos, suas relações, sua aplicabilidade, seus pressupostos ontológicos e epistemológicos. Tradicionalmente, a visão que mais se popularizou surgiu no âmbito da Escola de Copenhague, capitaneada por Niels Bohr. Ela se baseia fundamentalmente no chamado Princípio de Complementariedade.

⁴ O problema do realismo científico em Mecânica Quântica é complexo e tem uma longa história (o presente artigo está exatamente examinando alguns desses aspectos). De toda maneira, parece ser possível afirmar que, embora os fundadores desse domínio da Física tenham um acordo bastante geral sobre a existência de partículas subatômicas, a ontologia dessas partículas era um problema em aberto. As ideias de Louis de Broglie (1892-1987) e David Bohm (1917-1992) apontam claramente para essa dificuldade, pois os modelos (como a onda piloto, por exemplo) associados a essas partículas não foram (e ainda não são) partilhados de maneira unânime pela comunidade de físicos.

Bohr desenvolveu o Princípio de Complementariedade de modo mais ou menos simultâneo à época em que Heisenberg elaborou o Princípio de Indeterminação. A primeira vez que apresentou suas ideias à comunidade científica se deu no seminário “O Postulado Quântico e o recente desenvolvimento da Teoria Atômica” (Bohr, 1927, *in* Bohr, 1928).

Bohr nunca deu uma definição explícita do termo “complementariedade”. Tudo o que temos é um vasto material de autoria do cientista em que tal termo é utilizado e explicado de modo por vezes operacional, empírico, epistemológico, linguístico e (raramente) ontológico. O cientista dinamarquês foi refinando suas ideias ao longo do tempo, de modo a melhor estabelecer seus contornos para, principalmente, diferenciar o Princípio de Complementariedade do Princípio de Indeterminação. Uma primeira leitura mostra que Bohr tentou explicar o suposto caráter complementar dos fenômenos quânticos por meio de experiências de pensamento, induzindo, mesmo que contra sua vontade original, a pensar que a complementariedade seria uma *consequência* da impossibilidade empírico-operacional em realizar uma medição sem perturbar um sistema quântico, tal qual Heisenberg o fizera seis meses antes para o Princípio de Indeterminação.

Duas citações de Bohr nos permitem abordar satisfatoriamente o tema da complementariedade, no que tange a uma discussão sobre o realismo científico em Mecânica Quântica. A primeira refere-se à conclusão apresentada no seminário de Como⁵:

A [...] formulação do argumento relativístico [...] implica essencialmente a união da *coordenação espaçotemporal e a demanda por causalidade* que caracteriza as teorias clássicas. Na adaptação do requerimento relativístico para o postulado quântico, nós devemos, no entanto, estar preparados para nos deparar com uma *renúncia à visualização* ordinária de modo ainda mais profundo que [aquela empregada] na formulação das leis quânticas aqui consideradas. De fato, encontramos aqui no caminho trilhado por Einstein de adaptar nossos modos de percepção, emprestados de nossas sensações, ao conhecimento gradualmente mais profundo das leis da Natureza. Os obstáculos encontrados nesse caminho originam-se, acima de tudo, no fato de, por assim dizer, *toda palavra na linguagem se referir à nossa percepção ordinária*. Na teoria quântica, deparamo-nos de imediato com essa dificuldade na questão da inevitabilidade de aparência de irracionalidade que caracteriza o postulado quântico. Espero, contudo, que a ideia de complementariedade seja adequada para caracterizar a situação de [...] *dificuldade geral na formação das ideias humanas*, inerente à *distinção entre sujeito e objeto* (Bohr, 1928, p. 590, grifos nossos).

A segunda, por sua vez, é tida como aquela que mais se aproximaria de uma definição explícita do conceito de complementariedade, tendo sido proferida por Bohr em 1929, quando o mesmo nos afirmou que o postulado quântico

[N]os força a adotar um novo modo de descrição designado como complementar, no sentido de que qualquer dada aplicação de conceitos clássicos impede o uso *simultâneo* de outros conceitos clássicos que, em uma diferente concepção, são *igualmente necessários* para a elucidação dos fenômenos (Bohr, 1929, *Introductory survey, in* Bohr, 1934, p. 10, grifos nossos).

As duas citações supra, em conjunto, nos permitem apontar as características principais do Princípio de Complementariedade. Trata-se, afinal, de uma ideia que:

⁵ Cidade italiana onde foi realizado o Congresso Internacional de Física de 1927, por ocasião da celebração do centenário da morte de Alessandro Volta.

- (i) considera nossa linguagem, baseada *necessariamente* em conceitos oriundos da Física Clássica, como a razão pela qual determinados fenômenos (notadamente, os fenômenos quânticos) adquirem feições “irracionais” (vide citação de Bohr acima);
- (ii) no âmbito da Física, busca romper com a ideia de que nossas teorias devem prover, *simultaneamente*, uma descrição espaçotemporal e causal para os fenômenos, em razão do *quantum* de ação;
- (iii) prega a renúncia da Ciência em tentar prover *modelos explicativos espaçotemporais causais* como um meio de acesso sintético e imediato para a completa compreensão de um determinado fenômeno;
- (iv) diz respeito não somente à Física, mas a qualquer área do conhecimento na qual, para a compreensão completa de um dado fenômeno, faz-se necessária a consideração *simultânea* de conceitos *excludentes*;
- (v) supõe existir uma distinção *fundamental* entre sujeito e objeto em razão de nossa linguagem.

Creemos poder afirmar que, para a formulação do Princípio de Complementariedade, Bohr assumiu como verdade que os fenômenos quânticos observados desde a época da explicação do efeito fotoelétrico, quase trinta anos antes de Como, realmente apontavam que determinadas entidades físicas (por exemplo, o elétron, o átomo ou a radiação eletromagnética) possuíam um caráter corpuscular e um caráter ondulatório, cada um revelado de modo unívoco para um dado experimento em particular. Essa situação, persistentemente presente após três décadas de pesquisas, deveria ser encarada como um fato *inerente* à natureza, não sujeito a qualquer perspectiva futura de resolução por meio do desenvolvimento de novas técnicas experimentais, cuja estranheza, caracterizada por um aspecto de irracionalidade do fenômeno, seria explicável em razão de nossa linguagem, composta *necessariamente* de conceitos oriundos da Física Clássica, ou seja, de nossa experiência em fenômenos macroscópicos. Tal é a característica (i) do Princípio de Complementariedade.

Não devemos pensar, contudo, que, por reconhecermos que nossa linguagem é a fonte da aparente irracionalidade dos fenômenos quânticos, teremos esperanças de que uma mudança linguística viesse a superar nossos problemas. A própria descrição dos aparelhos de medida e dos resultados dela decorrentes (em termos de ponteiros, escalas, sinais luminosos, etc.) consubstancia-se na utilização de conceitos clássicos, uma vez que somente eles podem descrever tais objetos de nossa percepção imediata. Assim, não há qualquer possibilidade de dissiparmos a estranheza dos fenômenos quânticos por meio de uma pretensa substituição conceitual⁶.

A questão, por exemplo, se um elétron seria uma onda ou uma partícula, como no experimento da dupla fenda, estaria, segundo essa concepção, sendo mal apresentada. Dependendo do modo como o experimento é realizado, o resultado parece acolher as duas respostas. Estar-se-ia, dessa maneira, admitindo que se possa aplicar a tal entidade (inobservável) conceitos oriundos única e exclusivamente de nossa experiência macroscópica – i.e., conceitos da Física Clássica. No entanto, a única coisa que se está autorizado a enunciar é que, em determinado experimento, o elétron se comporta como uma partícula e em outro experimento, como uma onda. Pode-se estar certo, ademais, que não existirá experimento capaz de revelar, *simultaneamente*, que o elétron se comporta como uma partícula e como uma onda; isso decorre do *quantum* de ação – ou, como Bohr enunciaria, de uma

⁶ “[S]eria um equívoco acreditar que as dificuldades da teoria atômica podem ser evadidas por eventualmente substituir os conceitos da física clássica por novas formas conceituais” (Bohr, 1934, p. 15-16).

restrição do “Postulado Quântico” –, que inviabiliza a possibilidade de, em uma única medida, termos valores arbitrariamente bem definidos para suas coordenadas espaçotemporais e para sua energia-*momentum*. Segundo Jammer (1974, p. 96), Bohr sustentou que “descrições espaçotemporais e descrições causais não podem ser ambas operacionalmente significativas ao mesmo tempo, dado que elas requerem arranjos experimentais mutuamente excludentes”.

Ou ainda, nas palavras do próprio Bohr:

Por um lado, a definição do estado de um sistema físico, como costumeiramente costuma ser compreendido, clama pela eliminação de todas as perturbações externas. Mas, nesse caso, **de acordo com o postulado quântico, qualquer observação será impossível e, acima de tudo, os conceitos de espaço e tempo perderão seu sentido imediato**. Por outro lado, se com o intuito de tornar uma observação possível permitirmos certas interações com os agentes apropriados da medição, os quais não pertencem ao sistema, uma definição unívoca do estado do sistema não é mais naturalmente possível, e **não poderemos falar de causalidade no sentido ordinário da palavra**. A própria natureza da teoria quântica nos força, então, a considerar a coordenação espaçotemporal e a reivindicação de causalidade, a união dos quais caracteriza as teorias clássicas, como aspectos complementares, mas exclusivos da descrição, simbolizando a idealização de observação e definição, respetivamente (Bohr, 1928, p. 580, grifos nossos).

Não sendo possível, simultaneamente, descrever um determinado fenômeno em termos espaçotemporais e em termos causais, deve-se abandonar a pretensão da Ciência em prover modelos explicativos espaçotemporais causais. Explicam-se, assim, as características (ii) e (iii) do Princípio de Complementariedade.

No caso de teorias da Física, a negação do tipo de acesso epistêmico aos fenômenos aqui apresentados (isto é, com a utilização de modelos explicativos espaçotemporais causais) justifica-se na existência do *quantum* de ação, que torna complementares os conceitos de coordenação espaço-temporal e de causalidade. Contudo, em outras áreas do conhecimento humano, nada impede que outro par de conceitos necessários à explicação de um determinado objeto sejam igualmente considerados complementares, em razão de alguma justificativa qualquer.

Não iremos considerar em profundidade a aplicação do Princípio de Complementariedade a outras áreas que não a Mecânica Quântica, limitando-nos a expor brevemente algumas poucas situações. No seminário “Biologia e Física Atômica”, ministrado no Congresso Biológico e Físico em memória de Luigi Galvani, em Bolonha, Itália, em outubro de 1937, Bohr afirmou que a *vida* é, para a Biologia, um fato elementar, assim como o *quantum* de ação o é para a Física, sendo que ela só pode ser completamente descrita por meio dos conceitos, supostamente complementares, de *mecanicismo* e *vitalismo*. Por sua vez, no seminário “Filosofia Natural e Culturas Humanas”, proferido no Congresso Internacional de Ciências Antropológicas e Etnológicas em Copenhague, em agosto de 1938, Bohr considera que *pensamentos* e *emoções* são encarados como conceitos complementares para descreverem uma experiência psíquica; *razão* e *instinto* seriam conceitos complementares necessários para descrever o comportamento humano e, finalmente, as *diferentes culturas* podem ser encaradas como elementos complementares para uma explicação completa da sociedade humana em sua plenitude. Por esses poucos exemplos (vários outros podem ser encontrados em Bohr, 2010), percebe-se que, para Bohr, o Princípio de Complementariedade é encarado como uma proposta *filosófica* de aplicação geral, não limitado à Física.

Esperamos, assim, ter sido suficientemente explicada a característica (iv) do Princípio de Complementariedade supramencionada. O tipo de realismo epistêmico

que acreditamos que tal princípio negue pode ser enunciado como a possibilidade de se ter, para determinados objetos da experiência (não somente da Física), acesso epistemológico imediato e sintético para sua compreensão, a partir da visualização de um determinado modelo. Tal acesso, certamente, existe para uma ampla variedade de fenômenos. Contudo, o Princípio de Complementariedade assume o compromisso *ontológico* de que existem determinados objetos (elétrons, luz, vida, experiência psíquica, comportamento humano, sociedades...) para os quais nenhuma descrição em termos de um único modelo é possível. Isso ocorre sempre que tais objetos necessitam, para sua completa caracterização, da aplicação simultânea de conceitos mutuamente excludentes.

Bohr considerava que a Mecânica Quântica, tal qual apresentada no formalismo de Dirac–von Neumann, era uma teoria completa acerca de fenômenos quânticos para os quais, supunha-se, nossa linguagem nunca seria suficiente para prover um único modelo visualizável que os representasse adequadamente. Ora, uma pergunta que se coloca então é a seguinte: “onde exatamente nossa linguagem deixa de ser suficiente?” Afinal, o formalismo matemático da teoria não nos diz a quais sistemas ela se refere. Podemos, ainda, reformular tal questão das seguintes formas: “onde é estabelecida a separação entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica?”, ou, mais tecnicamente, “a quais sistemas físicos se refere, exatamente, a Mecânica Quântica, isto é, quando os sistemas físicos devem ser descritos por uma superposição de estados sujeitos a colapsarem em razão de uma medição?”.

Para Bohr, a Mecânica Quântica se aplicaria a partir do momento em que, para a descrição completa de uma entidade, se fizesse necessária a utilização de conceitos complementares. Ou seja, a partir do momento em que *nossa linguagem*, necessariamente baseada em conceitos da Física Clássica, fosse insuficiente para representar tal entidade adequadamente por meio de um único modelo explicativo espaçotemporal causal, após os resultados experimentais obtidos – caso, por exemplo, dos elétrons, que apresentam fenômenos de interferência ao mesmo tempo em que claramente possuem trajetórias em câmaras de nuvens. Isso significa, então, que Bohr subordinou a aplicabilidade da teoria quântica às limitações linguísticas e epistêmicas humanas. Podemos tratar uma bola de futebol por meio da Mecânica Clássica *porque nossa linguagem assim o permite*⁷; o mesmo não ocorre, contudo, com o movimento de um elétron – explica-se, assim, a característica (v) do Princípio de Complementariedade.

Mas, conforme aponta Whitaker (1996, p. 173), a separação entre o sistema sendo medido e o aparelho de medição (macroscópico, diga-se de passagem) é *arbitrária* – o *corte* que estabelecemos entre uma e outra coisa é, por assim dizer, móvel. Whitaker chama isso de *corte de Heisenberg*. Pode-se, em princípio, considerar partes do aparelho de medição como pertencentes ao sistema sendo medido – talvez, por exemplo, a agulha do microscópio eletrônico em contato com o material sendo observado e com ele interagindo, ou os pequenos diafragmas presentes em um experimento de dupla fenda. Ligações mecânico-causais entre as partes do aparelho de medição justificariam, então, a inclusão de pedaços cada vez maiores do aparelho no sistema sendo medido, de modo que, ao final, a fronteira entre o nanoscópico, o inobservável, e o macroscópico, observável, se tornaria arbitrariamente turva. Nenhuma descrição é mais impactante para ilustrar essa situação que o famoso paradoxo do gato de Schrödinger (Schrödinger, 1935).

Dessa maneira, segundo a Interpretação de Copenhague, a Mecânica Quântica se aplicaria a certos subsistemas, mas não a outros maiores que os englobam.

⁷ Vale observar que, em toda essa discussão, *linguagem* aqui se refere, em grande parte, a um sistema formal, obviamente a matemática, mas que se encontra, no caso da Física, estritamente vinculada à interpretação dos termos que aparecem em uma equação, por exemplo. Daí a parte da linguagem não estritamente matemática.

Ou seja, o corte de Heisenberg não pode ser feito segundo os critérios de diferenciação entre *observável* e *não observável*.

A teoria como um todo, portanto, interpretada à luz do Princípio de Complementariedade, parece padecer da acusação de incompletude (no sentido de que a mesma não nos fornece critérios para estabelecer onde efetuar o corte de Heisenberg). A atitude de Copenhague nessa situação sempre foi dizer que podemos, em princípio, pragmaticamente escolher apropriadamente onde efetuar o corte, de modo a evitarmos falar na existência de gatos mortos-vivos.

A Interpretação dos Estados Relativos

A Interpretação dos Estados Relativos de Everett, tal qual apresentada em sua tese de doutorado⁸, costumeiramente é conhecida como um conjunto de ideias que faz referência a uma infinidade de universos paralelos coexistentes. De fato, contudo, Everett nunca usou os termos “universos” ou “mundos” para se referir à sua própria interpretação. Se tais expressões se fixaram no imaginário popular, isso foi em grande parte devido a Bryce DeWitt, que editou, em 1973, juntamente com Neill Graham, uma coletânea de trabalhos de Everett, alguns deles nunca antes publicados, sob o título de “A Interpretação dos Muitos-Mundos da Mecânica Quântica” (Barrett e Byrne, 2011 *in* Everett, 2012, p. 22).

O projeto everettiano consistiu em considerar como fundamentos para a Mecânica Quântica todos os postulados do formalismo adotado pela ortodoxia vigente, à exceção de dois: o primeiro, aqui chamado de Postulado de Born, trata da probabilidade de um sistema descrito por uma superposição de estados se encontrar em um estado particular quando uma medição for efetuada; o segundo, conhecido como o Postulado de Projeção, trata do efeito de uma medição sobre um sistema físico, no sentido de que, imediatamente após a realização da mesma, a superposição de estados que descreve o sistema colapsa para um estado em que a variável sendo medida possui um valor bem definido⁹. Daí segue-se que, em seu projeto, Everett procura *deduzir* as estatísticas¹⁰ decorrentes originalmente de probabilidades postuladas, resgatando, assim, os resultados concernentes ao Postulado de Born,

⁸ Hugh Everett III (1930-1982) ingressou no curso de doutorado em Física de Princeton no outono de 1953, sob a supervisão de John Archibald Wheeler, ao qual apresentou suas ideias em janeiro de 1956, na forma daquilo que viria a ser posteriormente conhecido como a “longa tese”, sob o título de “Mecânica Quântica pelo Método da Função de Onda Universal” (Barrett e Byrne, 2011 *in* Everett, 2012, p. 4). Este trabalho foi enviado a vários físicos proeminentes da comunidade acadêmica, incluindo Niels Bohr, em abril daquele mesmo ano, sob o novo título de “Mecânica Quântica sem Probabilidade”. Posteriormente, durante o inverno de 1957, após duras críticas de Bohr e da Escola de Copenhague, Wheeler sugeriu a Everett reescrever o texto, reduzindo 75% de seu conteúdo, com o intuito de deixá-lo à prova de quaisquer críticas e, ao mesmo tempo, minimizar o ataque à Interpretação de Copenhague. O novo trabalho, que passou a ser conhecido como a “tese curta”, recebeu o nome de “Sobre os Fundamentos da Mecânica Quântica”, tendo sido aceito para defesa em março de 1957. Logo a seguir, este trabalho, ao ser publicado em julho de 1957 no periódico *Reviews of Modern Physics*, passou a receber a nova denominação de “A Formulação de Estados Relativos da Mecânica Quântica”. Finalmente, no que tange à longa tese, a mesma também sofreu uma renomeação quando foi publicada em 1973 no livro *A Interpretação dos Muitos-Mundos da Mecânica Quântica*, passando a se chamar “A Teoria da Função de Onda Universal”. Um estudo aprofundado dos elementos determinantes do projeto everettiano e seus desenvolvimentos, sobretudo no contexto de visões alternativas da Mecânica Quântica, pode ser encontrado em Osnaghi *et al.* (2009).

⁹ Vale notar, como bem observa Pessoa Jr. (2003, p. 36), que a validade do Postulado de Projeção foi criticado por autores como Mangelau, pois, em casos em que a partícula que está sendo medida venha a ser absorvida ou destruída, não haveria sentido em falar de estado do sistema depois da medição

¹⁰ Toda teoria probabilística de sucesso resulta, empiricamente, em uma estatística que corrobora as probabilidades teóricas. Como a Interpretação dos Estados Relativos é uma teoria determinística, é incorreto dizer que Everett procura resgatar as *probabilidades* da Interpretação de Copenhague; o que Everett procura obter, nesse caso, mesmo com uma teoria *determinística*, são as estatísticas atinentes aos fenômenos quânticos.

e *interpretar* aquilo que aparentemente era percebido como o colapso de uma superposição de estados. Ademais, tal projeto expressamente nega-se a estabelecer qualquer distinção entre sistemas macroscópicos e microscópicos no que concerne à aplicação do formalismo matemático (voltaremos a esse aspecto na Conclusão).

Everett enveredou-se na tarefa de elaborar uma nova interpretação para a Mecânica Quântica porque acreditava que a teoria ortodoxa para o colapso de uma superposição de estados, tal qual presente no formalismo de Dirac–von Neumann, era, segundo Byrne,

[...] inteiramente inaceitável, pois, em vez de explicar como um experimento produz um resultado definitivo utilizando-se da dinâmica quântica linear usual [a equação de Schrödinger], simplesmente estipula que as medições produzem os resultados definitivos exatamente nos momentos corretos e exatamente segundo as corretas estatísticas quânticas (Barrett e Byrne, 2011 *in* Everett, 2012, p. 13).

Everett é mais enfático com relação à Interpretação de Copenhague e o Princípio de Complementariedade nela presente:

[...] a interpretação de Copenhague é irremediavelmente incompleta por causa de sua dependência [*reliance*] *a priori* da física clássica (excluindo por princípio qualquer dedução da física clássica a partir da teoria quântica, ou qualquer investigação adequada do processo de medição), bem como por ser uma monstruosidade filosófica, ao afirmar um conceito de “realidade” para o mundo macroscópico e negá-lo para o microcosmo (Everett, 1957 *in* Everett, 2012, p. 255).

Em “Sobre os Fundamentos da Mecânica Quântica”, de 1957, Everett começa a expor aquilo que entende ser a formulação convencional da Mecânica Quântica:

Consideramos a formulação convencional da Mecânica Quântica, ou “formulação da observação externa”, como sendo essencialmente a seguinte: um sistema físico é completamente descrito por uma função de estado ψ , que é um elemento de um espaço de Hilbert, e que ademais dá informação apenas no que tange à especificação das probabilidades dos resultados das várias observações que podem ser feitas sobre o sistema por observadores externos. Existem duas maneiras fundamentalmente diferentes em que a função de estado pode mudar:

Processo 1: A mudança descontínua trazida pela observação de uma quantidade com autoestados ϕ_1, ϕ_2, \dots , pela qual o estado ψ será alterado para um estado ϕ_j com probabilidade $|\langle \psi, \phi_j \rangle|^2$.

Processo 2: A mudança contínua, determinística, do estado de um sistema isolado ao longo do tempo, de acordo com a equação $\frac{\partial \psi}{\partial t} = A\psi$, onde A é um operador linear (Everett, 1957 *in* Everett, 2012, p. 175-176).

O que o trabalho de Everett se propõe a fazer é considerar a pura mecânica ondulatória descrita pelo Processo 2 acima como uma teoria completa para os fenômenos quânticos, eliminando-se, assim, a postulação do Processo 1. Dada essa premissa, a interpretação da teoria seguiria, segundo esse autor, naturalmente:

Este artigo propõe considerar a mecânica ondulatória pura (apenas o processo 2) como uma teoria completa. Postula-se que uma função de onda que obedeça à equação de onda linear em todos os lugares e a todo tempo provê um modelo matemático completo para todo sistema físico isolado, sem exceções. Ademais, postula-se que todo sistema sujeito a uma observação possa ser considerado parte de um sistema maior isolado.

A função de onda é considerada como a entidade física básica sem qualquer interpretação *a priori*. A interpretação apenas vem *depois* de uma investigação da estrutura lógica da teoria. Aqui, como sempre, a própria teoria determina o quadro para sua interpretação (Everett, 1957 *in* Everett, 2012, p. 152-153).

Não iremos, no presente trabalho, explorar como Everett resgatou as estatísticas decorrentes do Postulado de Born sem a utilização desse postulado – tarefa que exigiria um aprofundamento matemático que foge do escopo do presente artigo. Em vez disso, nós nos centraremos na tarefa de examinar como Everett interpretou o formalismo matemático da teoria, desprovido do Processo 1 citado acima. A fundamentação encontra-se na noção de estados relativos relacionados a sistemas compostos:

Sumarizando: Não existe, em geral, algo como um único [*single*] estado para um subsistema de um sistema composto. Subsistemas não possuem estados que sejam independentes dos estados do resto do sistema, de modo que os estados dos subsistemas são geralmente correlacionados [*correlated*] uns com os outros. Pode-se arbitrariamente escolher um estado para um subsistema e assim ser levado para o estado relativo do resto. Assim, deparamo-nos com uma *fundamental* relatividade de estados, que é implicada pelo formalismo de sistemas compostos. É sem sentido nos perguntarmos sobre o estado absoluto de um subsistema – pode-se apenas perguntar qual o estado [de um subsistema] relativamente a um dado estado do resto [do sistema composto] (Everett, 1957 *in* Everett, 2012, p. 179-180).

Acreditamos que a noção de *estados relativos*, quando aplicada a sistemas compostos microscópicos, possui o mérito de explicitar algo já conhecido por qualquer físico ortodoxo, não sendo um ponto sujeito a maiores controvérsias. Como o próprio Everett aponta, a interpretação da “observação externa” reconhece a possibilidade de se calcular probabilidades condicionadas. Ademais, pela Interpretação de Copenhague (que é um tipo de interpretação de “observação externa”), antes de qualquer observação ser efetuada, é esperado que o sistema composto em questão seja representado por uma superposição de estados mutuamente excludentes e que, uma vez que a situação experimental tenha sido alterada e um subsistema tenha sido medido, o subsistema não observado seja representado por outra superposição diferente da anterior.

A noção de estados relativos torna-se insidiosa à ortodoxia apenas quando aplicada a sistemas compostos macroscópicos – em particular, a observadores e aparelhos de medição. Eis como Everett os insere em sua teoria:

Será suficiente aos nossos propósitos considerar observadores como detentores de memórias (i. e., partes de uma natureza relativamente permanente cujos estados estão em correspondência com as experiências passadas dos observadores). Com o intuito de fazer deduções sobre as experiências passadas de um observador, é suficiente deduzir os conteúdos presentes da memória, tal qual aparecem dentro de um modelo matemático.

Como modelos de observadores, podemos, se assim desejarmos, considerar automaticamente máquinas funcionais, possuidoras de aparatos sensoriais [*sensory*] e acopladas a instrumentos de gravação capazes de registrar os dados sensoriais passados e as configurações da máquina [...]. Se considerarmos que os dados sensoriais atuais, assim como as configurações de aparelho, são imediatamente gravados na memória, então as ações da máquina em um dado instante podem ser consideradas como função apenas dos conteúdos da memória, e todas as experiências relevantes da máquina serão contidas na memória (Everett, 1957 *in* Everett, 2012, p. 183).

Ou seja, para Everett, “observadores” são sistemas físicos, máquinas capazes de realizar medições e efetuar o registro dos resultados em uma memória tal como, por exemplo, “furos em uma fita de papel, impressões em um carretel magnético, configurações de um chaveamento de comutação de circuito [*relay switching circuit*] ou mesmo configurações das células do cérebro” (Everett, 1957 in Everett, 2012, p. 184). Evita-se, assim, qualquer guinada idealista no programa de interpretação da Mecânica Quântica.

A noção de estados relativos, quando aplicada a observadores físicos, leva Everett à seguinte conclusão:

Chegamos assim ao seguinte panorama: ao longo de toda uma sequência de processos de observação, **existe apenas um único sistema físico representando o observador**, e, no entanto, não há um único estado singular para o mesmo (o que se segue das representações de sistemas em interação). Não obstante, há uma representação em termos de uma *superposição*, cada elemento da qual contém um estado do observador definido e um correspondente estado do sistema. Assim, com cada observação (ou interação) sucessiva, o estado do observador ramifica-se [*branches*] em um número [qualquer] de diferentes estados. Cada ramo [*branch*] representa um resultado diferente para a medição e o *correspondente* autoestado para o estado do objeto-sistema. **Todos os ramos existem simultaneamente na superposição após qualquer sequência de observações** (Everett, 1957 in Everett, 2012, p. 188-189, grifos nossos).

Ou seja, para Everett, não há necessidade de falarmos no colapso de uma superposição de estados devido a propriedades misteriosas de um “ato de medição”. O cientista interpreta a *aparente* univocidade de nossas observações estabelecendo uma correlação biunívoca entre os estados de nossas memórias e os estados do sistema sendo medido.

Vemos, ademais, no trecho acima, toda a estranheza do realismo pregado por Everett. O cientista não receia explorar todas as consequências que a dinâmica linear postulada pela Mecânica Quântica nos traz. Dos tempos de Newton ao século XIX, existiam variadas entidades físicas ontologicamente independentes (e. g., partículas e campos), todas elas seguindo leis determinísticas que, levadas ao extremo (e ignorando-se problemas de fundo acerca do livre-arbítrio e, numa perspectiva dualista, do ainda hoje não resolvido problema mente–corpo), implicariam uma única história para todo o universo e seus subsistemas. A Mecânica Quântica, por sua vez, *nos termos propostos por Everett*, parece implicar um gigantesco monismo – a única coisa existente é a função de onda (ou, usando a linguagem presente na tese “longa”, a função de onda universal), a qual segue a equação de Schrödinger. O universo, portanto, não deve possuir uma única história bem definida, com subsistemas com estados independentes dos demais evoluindo segundo uma única trajetória espaçotemporal. Pelo contrário, todo o formalismo implica que somente faz sentido falar de determinado estado de um subsistema quando em relação ao estado do resto do sistema composto. A história do universo deve, assim, seguindo o projeto everettiano, ser dada pela evolução temporal de um número enorme de termos de uma única superposição (chamada apropriadamente por Everett de função de onda universal), cada um deles evoluindo espaçotemporalmente de modo independente dos demais e contendo os estados de todos os subsistemas imagináveis. Cada um desses termos deverá, em princípio, em qualquer instante, conter observadores com memórias que se correlacionam perfeitamente com os estados de todos os subsistemas ali presentes quando os mesmos forem objeto de observação. Ou seja, graficamente, a história do universo não é uma única linha, mas uma árvore com diversos ramos!

Ciente da estranheza de sua interpretação, após o trecho apresentado acima, Everett adicionou a seguinte (longa) nota, a qual, pela sua importância, transcrevemos integralmente:

Em resposta à pré-impressão deste artigo, alguns correspondentes apontaram para a questão da “transição do possível ao atual [*possible to actual*]”, argumentando que em “realidade” não existe – como nossa experiência testemunha – tal divisão [*splitting*] de estados de observadores, de modo que apenas um ramo pode existir de modo atualizado [*actually exist*]¹¹. Como essa questão pode ocorrer a outros leitores, o seguinte é oferecido como uma explicação.

Toda a questão da transição do “possível” ao “atual” é levada em conta na teoria de um modo muito simples – não há tal transição, nem tal transição é necessária para a teoria estar de acordo com nossa experiência. Do ponto de vista da teoria, *todos* os elementos de uma superposição (todos os “ramos” [*branches*]) são “atuais”, nenhum mais “real” [*real*] que o resto. É desnecessário supor que todos [os ramos] menos um são de alguma forma destruídos, dado que todos os elementos separados de uma superposição individualmente obedecem à equação de onda, com completa indiferença quanto à presença ou ausência (de modo atual [*actuality*] ou não) de quaisquer outros elementos. Essa total falta de efeito de um ramo sobre outro também implica que nenhum observador poderá algum dia estar ciente de qualquer processo de divisão [*splitting process*].

Argumentos de que a visão de mundo apresentada pela teoria é contradita pela experiência, dado que não somos cientes de qualquer processo de ramificação [*branching process*], são como a crítica à teoria copernicana, segundo a qual a mobilidade da Terra enquanto um fato físico real é incompatível com a interpretação do senso comum da natureza, uma vez que não sentimos tal movimento. Em ambos os casos, o argumento falha quando é mostrado que a própria teoria prediz que nossa experiência será o que de fato é. (No caso de Copérnico, a adição da física de Newton era requerida para se demonstrar que os habitantes da Terra estariam ignorantes de qualquer movimento terrestre) (Everett, 1957 *in* Everett, 2012, p. 189, grifos nossos).

A Interpretação dos Estados Relativos causou tanta estranheza porque é radicalmente contraintuitiva, advogando que um sistema físico, *macroscópico ou não*, existe em uma superposição de diferentes autoestados mutuamente excludentes – inclusive se o sistema físico for, por exemplo, o próprio observador. Nesse cenário, como devemos nos compreender enquanto observadores dotados de uma única, aparentemente não superposta, consciência? (Barrett, 2003 [1999], p. 183). Everett não forneceu maiores aprofundamentos além daqueles já aqui expostos.

Conclusão

Parece ser possível afirmar que um seguidor da Interpretação de Copenhague (e do Princípio de Complementariedade) pode ser um realista no que tange à Mecânica Quântica (seja de entidades, seja de teorias), no sentido de que considera essa teoria como mais do que um mero instrumento empiricamente adequado para prever o resultado das medidas (Bohr e Heisenberg certamente eram realistas de entidades, aceitando, evidentemente, as restrições apontadas acima, sobretudo no

¹¹ A tradução *atual* nos pareceu, no presente contexto, mais adequada que o termo *real*, dada a distinta conotação deste último em Everett.

que se refere à causalidade). Contudo, deverá reconhecer que: (a) não há um modelo explicativo espaçotemporal causal para descrever os fenômenos quânticos; (b) existe uma distinção fundamental entre sistemas macroscópicos e sistemas quânticos, distinção essa que não é decorrente de uma suposta ontologia do mundo, mas, nessa interpretação, de uma distinção ocasionada pelo modo como é estruturada a linguagem, que não abarca a descrição de determinados fenômenos que, para serem completamente conhecidos, necessitariam da aplicação simultânea de conceitos mutuamente excludentes; (c) não poderá aplicar o formalismo da Mecânica Quântica a sistemas macroscópicos.

Por sua vez, vimos que o mesmo formalismo matemático empregado pela interpretação de Copenhague admite outras interpretações realistas, estas capazes de nos levar a modelos explicativos espaçotemporais causais. É o que ocorre com a interpretação dos Estados relativos de Hugh Everett III. Esta interpretação se utiliza de um modelo puramente ondulatório, intrinsecamente determinístico e aplicável a quaisquer sistemas físicos, podendo ser utilizado para deduzir a Física Clássica a partir da Mecânica Quântica.

A interpretação dos Estados Relativos de Everett afirma que: (a) uma função de onda universal descreve completamente todo o universo e seus subsistemas; (b) não existe algo como um estado absoluto para um dado subsistema – só faz sentido falarmos do estado de um subsistema relativamente ao estado do resto do universo; (c) observadores são subsistemas físicos capazes de realizar medições e efetuar o registro dos resultados em uma memória; (d) todos os subsistemas em geral, incluindo os observadores, existem em uma superposição de estados. Essa interpretação, como é bem conhecido, gerou um grande número de estudos, particularmente vinculados ao problema de “muitos-mundos”, oriundo do trabalho de DeWitt e Graham (1973). No entanto, independentemente de consequências como essa, podemos afirmar que a abordagem inusitada de Hugh Everett III contém um novo tipo de realismo, ausente na interpretação de Copenhague. Ou seja, não existiria separação entre o domínio clássico e quântico, o que conduz a outro programa de pesquisa: obter a Física Clássica a partir da Física Quântica.

Referências

- BARRETT, J. 2003 [1999]. *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. 1ª ed., Oxford, Oxford University Press Inc., 267 p.
- BOHR, N. 1928. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Nature*, 121:580-590. <http://dx.doi.org/10.1038/121580a0>
- BOHR, N. 1934. *Atomic Theory and the Description of Nature*. 1ª ed., Cambridge, Cambridge University Press, 128 p.
- BOHR, N. 2010 [1961]. *Atomic Physics and Human Knowledge*. 1ª ed., Mineola, Dover Edition, 101 p.
- DEWITT, B.S.; GRAHAM, N. 1973. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. New Jersey, Princeton University Press, 253 p.
- EVERETT III, H. 2012. *The Everett Interpretation of Quantum Mechanics: Collected Works 1955-1980 with Commentary*. 1ª ed., New Jersey, Princeton University Press, 389 p.
- JAMMER, M. 1974. *The Philosophy of Quantum Mechanics: Interpretations of QM in historical perspective*. 1ª ed., New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 536 p.
- OSNAGHI, S.; FREITAS, F.; FREIRE, O. 2009. The Origin of the Everettian Heresy. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 40(2):97-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsb.2008.10.002>
- PESSOA Jr., O. 2003. *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo, Editora Livraria da Física, 189 p.
- PLANCK, M. 1900. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2:237-245.

SCHRÖDINGER, E. 1935. The Present Situation in Quantum Mechanics. *Naturwissenschaften*, 23:807-812, 823-828, 844-849. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01491891>
WHITAKER, A. 1996. *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*. 1ª ed., Cambridge, Cambridge University Press, 349 p.

Submitted on June 9, 2015
Accepted on December 26, 2015