

## **FÍSICA QUÂNTICA E O ENSINO DE FÍSICA NA CONTEMPORANEIDADE: REFLEXÕES À LUZ DA HISTÓRIA E DA EPISTEMOLOGIA REVISADA DE POPPER**

*Quantum physics and the teaching of physics in contemporary times: reflections in the light of history and the Popper's revised epistemology*

**Neusa Teresinha Massoni** ([neusa.massoni@ufrgs.br](mailto:neusa.massoni@ufrgs.br))

**Alan Alves-Brito** ([alan.brito@ufrgs.br](mailto:alan.brito@ufrgs.br))

*Instituto de Física*

*Departamento de Física*

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS*

*Rua Bento Gonçalves, 9500. Agronomia. Porto Alegre. RS.*

*Recebido em: 03/07/2020*

*Aceito em: 28/01/2021*

### **Resumo**

Este texto tem por objetivo fazer uma reflexão histórica e bastante referenciada na visão epistemológica revisada de Karl Popper, especialmente nas ideias expressas em seu pós-escrito publicado de 1982, em que ele retoma posições discutidas em sua primeira obra intitulada “A Lógica da Descoberta Científica”, de 1934. No pós-escrito, Popper discute a interpretação da Mecânica Quântica conhecida como Interpretação de Copenhague e coloca em questão a herança equivocada que ela gerou. Com base nessa (re)visita histórico-epistemológica, fazemos aqui reflexões sobre o ensino de Física na contemporaneidade, argumentando que a articulação da Física Quântica à educação básica é fundamental em nossos dias, e buscando subsidiar os professores de física nesse desafio.

**Palavras-chave:** Física Quântica. Ensino Básico. História da Ciência. Epistemologia de Popper.

### **Abstract**

This text aims to make a historical reflection and quite referenced in Karl Popper's revised epistemological vision, especially in the ideas expressed in his published 1982 post-writing, in which he reviews positions discussed in his first work entitled “The Logic of Scientific Discovery”, published in 1934. In the post-writing, Popper discusses the interpretation of Quantum Mechanics known as the Copenhagen Interpretation and puts in question the mistaken inheritance generated for it. Based on this historical-epistemological (re)visit, we make reflections on the teaching of physics in contemporary times, arguing that the articulation of Quantum Physics to basic education is fundamental today, and seeking to subsidize physics teachers in this challenge.

**Keywords:** Quantum Physics. Basic Education. History of Science. Popper's Epistemology.

## INTRODUÇÃO

A nossa aventura para compreender o Universo e o mundo que nos cerca tem uma longa história. Desprezá-la seria esquecer as dívidas intelectuais para com nossos antepassados. E, nesse sentido, do ponto de vista da descolonização do conhecimento (Alves-Brito et al., 2020), é importante lembrarmos que existem diferentes narrativas historiográficas sobre como se dá o processo de relação com o conhecimento e os saberes ao longo do tempo. Antes dos gregos, africanos, por exemplo, olharam para o céu, sistematizaram movimentos, desenvolveram tecnologias (calendários como marcadores do tempo) e avançadas técnicas de mumificação e construção. Um exemplo paradigmático do pensamento da antiguidade egípcia é Hermes Trismegisto, um pensador, filósofo, legislador e médico que viveu na região de Ninus, no Egito, por volta de 1500 a.C., que teve sua grande contribuição registrada em 42 livros, todos, porém, destruídos ao longo das invasões ao Egito. Parte de suas ideias<sup>1</sup> renasceram porque, segundo alguns historiadores admitem, seu pensamento influenciou vários filósofos gregos que foram educados e formados no Egito.

Neste texto retomamos ideias do filósofo e historiador Bertrand Russell ao dizer “A filosofia e a ciência, como as conhecemos, são invenções gregas” (Russell, 2015, p. 13) o que, por sua vez, é um tema controverso (Chauí, 2002). Ao fazermos esta escolha, estamos conscientes das controvérsias, e, em boa medida, deve-se a que as obras gregas atravessaram os tempos antigos, foram traduzidas pelos árabes na Idade Média e chegaram à Idade Moderna fornecendo as bases da ciência ocidental como a conhecemos hoje, com sua propalada natureza racional, cujas ideias (ou teorias) não abrem mão da observação, da experimentação e da busca sistemática de evidências, bem como de consistência lógico-matemática.

Para Russell, a explosão da atividade intelectual na Grécia Antiga é um dos acontecimentos mais espetaculares da história e pode ser mais bem entendida se percebermos sua ligação com o contexto histórico, isto é, a expansão do comércio e o nascimento de colônias e cidades comerciais, a partir do século VIII a. C. Estes fatos colocaram os gregos em contato com outras civilizações, como já comentado, em especial com a civilização egípcia, mas também com civilizações orientais e suas sabedorias milenares, e, ao valorizar a hospitalidade para com os estrangeiros, os gregos aprenderam com eles, não só saberes astronômicos, matemáticos e práticos, mas abriram horizontes à criatividade e a novas interpretações do mundo, mostrando que, talvez, o desenvolvimento crítico de ideias não tenha limites, como adiante se discutirá. Russell sugere que, possivelmente, a passagem do poder político para as “mãos dos cidadãos, que é o sentido literal da democracia” (ibid., p. 15) tenha favorecido atitudes racionais e observacionais nos gregos, atitudes estas menos atreladas à religião, embora esta nunca tenha sido desprezada. Como já dito, não se assume que outras civilizações não tenham desenvolvido filosofias racionais. Ao contrário, os gregos inspiraram-se em ideais, sabedorias e escritos antigos; não partiram do vácuo intelectual, mas tomaram ideias precedentes como ponto de partida, conseguindo produzir seus próprios escritos que, pela condição democrática que alcançaram, os registros nos chegaram como legados do tamanho de suas influências. Então, o que claramente fazemos aqui é uma opção, dentre tantas outras possíveis na história da ciência, e nosso recorte é em função de uma característica peculiar do pensamento grego - a tensão entre polos opostos.

---

<sup>1</sup> O livro intitulado “Caibalion” foi escrito por três iniciados do hermetismo de nomes desconhecidos, em 1908, e é uma das obras que remete ao pensamento da antiguidade egípcia remanescente através dos tempos, que ficou conhecido como “corpus hermético”; o livro aborda as principais leis, ou princípios herméticos que regem, segundo a filosofia de Trismegisto, todas as coisas do Universo; são ensinamentos profundos que remetem à sabedoria capaz de unir os humanos à divindade, fala das virtudes e vai muito além do pensamento racional, tipicamente grego.

O sentido é aproveitar as dualidades – a ordem e o racional (que em grandes linhas deu origem à ciência moderna) de um lado, e o indisciplinado e instintivo, de outro, este último bastante ligado à religião e aos ritos de fertilidade. Essa batalha pendular entre polos opostos foi o que levou Hegel a propor o conceito de dialética. O movimento permanente entre opostos que se compensam é a verdade dialética para Hegel - e esta é mais uma das heranças da antiga filosofia hermética de Trismegisto. O movimento coloca em relação o humano e a história – o ser humano separado da sociedade e do processo histórico é uma abstração, de forma que toda a produção humana, a ciência, a arte, a medicina, não é uma invenção de gênios, mas sim uma expressão do seu povo, do seu tempo (Hegel, 1959). Esta relação permanente se traduz na linguagem, enquanto capacidade mais distintiva do ser humano em relação a outras espécies vivas.

A primeira expressão filosófica grega de que se têm notícias, segundo Russell, aconteceu em Mileto, a partir da noção predominante da “palavra” e da “medida” (o *logos*), de maneira que o discurso filosófico e a investigação científica estiveram (talvez ainda estejam) intimamente ligados. Foi assim que aquilo que parecia ser “eventos acidentais” passou a ser uma “busca de uma ordem”. Mas por que isso se deu? Aristóteles dizia que o ser humano é um animal político, não vive isoladamente, vive em sociedade e a convivência pressupõe um mínimo de organização da ordem (social). Nessa perspectiva, as mudanças na natureza que têm certa regularidade, como dia e noite e estações do ano, e outras mais que já eram conhecidas por civilizações antigas, passaram a ser objeto de (re)discussão, de comunicação e de (re)interpretação. Tal atitude, aliada à necessidade de sobrevivência frente ao aumento populacional nas cidades gregas, deu origem a uma atitude científica. Muitas vezes, como acontecia com os filósofos milésios (de Mileto) a ciência era requisitada para resolver questões práticas.

O que importa para esta discussão é a forma instrutiva como os gregos fizeram essa explosão intelectual acontecer. Como já apontado, a filosofia e a ciência gregas foram marcadas por dualismos. Para Russell, de certa forma esses dualismos “continuaram sendo tópicos sobre os quais os filósofos escrevem e discutem” (ibid., p. 19) como: verdade e falsidade, o bem e o mal, harmonia e discórdia, mente e matéria, aparência e realidade. Do ponto de vista da filosofia enquanto visão de mundo, pode-se dizê-la uma visão cosmológica (dado que não havia uma separação clara entre filosofia das virtudes e filosofia natural e o próprio Platão, discípulo de Sócrates considerado o maior sábio grego, via o ser humano como um microcosmos dentro do macrocosmos - o Universo), as questões giravam em torno de se as coisas seriam uma ou muitas, se seriam simples ou complexas, remetendo aos dualismos ilimitado e limite, caos e ordem.

Além disso, os gregos abordaram essas questões através de uma dinâmica que consistia em constituir uma escola filosófica para se aprofundar em um dos polos e, em seguida, outra escola surgia para criticá-la, assumindo o ponto de vista oposto. Em geral, surgia uma terceira escola para substituir os dois pontos de vista que estavam em batalha (ibid., p. 20).

Como dito, a primeira escola filosófico-científica na Grécia foi a de Tales, em Mileto, aproximadamente 585 a. C., que era uma cidade portuária de intenso comércio, com grande estocagem de mercadorias e que estava em contado com muitas civilizações. Esse contexto histórico tornou imperativo aprender a cunhar moedas de ouro para servir de dinheiro (favorecendo as trocas comerciais). Para Russell, era de se esperar que os filósofos se perguntassem sobre “de que são feitas todas as coisas?”. A resposta de Tales foi que todas as coisas são feitas de água, pois ele via o Sol provocar evaporação, a neblina se elevar, formar nuvens e depois retornar em forma de chuva, de maneira que sua hipótese não era totalmente desprovida de observação. Tales afirmava que o mundo é feito de água, e que a Terra seria uma

forma de “água concentrada”. À luz do que hoje sabemos, o hidrogênio, elemento que gera a água, é o elemento químico mais abundante no Universo e a fusão de átomos de hidrogênio dá origem ao elemento hélio, que fundido gera outros elementos sucessivamente. Nesta linha, a hipótese de Tales não era de todo fantasiosa.

A escola seguinte foi a de Anaximandro que chefiou uma das colônias milésias no litoral do mar Morto; ele criticou a cosmologia de Tales e defendeu que a matéria original – que ele chamou de “o Ilimitado” – seria “uma reserva infinita de material que se estende em todas as direções” (ibid., p. 22) (algo como o conceito novecentista de éter, talvez), de onde surgem todas as coisas do mundo e a ele retornam; propôs que nosso mundo estaria cercado por inúmeros mundos. Seguiram-se as escolas jônias de Anaxímenes, Pitágoras, Xenófanes e Heráclito (este colocou a teoria dos contrários, ou dos contrastes, i.e., uma ladeira tanto vai para cima como para baixo, dependendo da direção que se tome, dito de outra forma, não se pode compreender o bem sem compreender o mal), Assim, sucederam-se as demais escolas nessa dinâmica de dualismos, ou polos opostos.

Pelas razões até aqui expostas, este texto guarda um viés histórico e deste ponto em diante tentaremos desenvolver aspectos epistemológico que possam contribuir com o Ensino de Física. É relevante acrescentar que o aporte histórico-epistemológico da Física, da Astronomia, da Cosmologia na educação científica pode trazer à discussão uma riqueza de temas e gerar engajamento no estudo da história de suas ideias, teorias, experimentos, metodologias (Matthews, 1994, Solbes, 2014; Massoni, Moreira, 2010; Cuesta, Mosquera, 2017). A história e a filosofia das ideias, das teorias pode também nos ajudar a compreender melhor as interações sociais, econômicas, tecnológicas e políticas de nosso tempo; como bem adverte Aristóteles, somos seres políticos e toda a nossa ciência, medicina, instrumentos, fármacos, tecnologias são também políticos (se assim não fosse, caberia a pergunta: por que estas teorias, fármacos, instrumentos, etc. e não outras?).

Para o filósofo da ciência Thomas Kuhn “Se a história fosse vista como um repositório para algo mais do que anedotas ou cronologias, poderia produzir uma transformação decisiva na imagem da ciência que atualmente nos domina” (Kuhn, 2003, p. 19).

Estamos, assim, em condições de retomar a noção de “dualismos” focando no objetivo de discutir, é o que faremos mais adiante neste texto, aspectos relacionados à inserção da Física Contemporânea na Educação Básica. É nesta linha que apresentamos a interpretação de Karl Popper, que coloca em questão a chamada Interpretação de Copenhagen da MQ, como uma das possíveis interpretações, dentre muitas outras, que suscitam reflexões para a abordagem didática. Poderíamos, então, nos perguntar: seria possível pensar nossa ciência atual em termos de dualismos? A resposta pode ser positiva se olharmos para a História da Ciência à luz da visão de Popper (2012) e Prigogine (2002). Um exemplo paradigmático pode ser: percebe-se, de um lado, o polo da certeza e do determinismo da Física Clássica (a mecânica newtoniana, o eletromagnetismo de Maxwell etc.) e, de outro, o fim das certezas (Prigogine, 2002) e o caráter probabilístico da Mecânica Quântica (MQ).

É neste ponto que nos atemos, isto é, o aspecto contraintuitivo da MQ, que chocou a própria comunidade científica e a sociedade em geral, no início do século XX, pode ser examinado com mais cuidado e com reflexos importantes para o ensino de Física na educação básica.

## DETERMINISMO *VERSUS* INDETERMINISMO

Em um pós-escrito à sua obra original intitulada *A Lógica da Descoberta Científica* (originalmente publicada em alemão *Logik der Forschung*, em 1934), Karl Popper retoma, estende e desenvolve suas ideias através de um exercício de escrita de apêndices e notas nas margens do seu primeiro livro, aliado a discussões com seus colaboradores, que, segundo o próprio Popper afirma na apresentação do texto, publicado em 1982, se estendeu por 30 anos. O pós-escrito divide-se em três volumes (Vol. I: *O realismo e o objetivo da Ciência*; Vol. II: *O Universo aberto: um argumento para o indeterminismo*; e Vol. III: *A teoria dos quanta e o cisma na Física*), o que para alguns autores corresponde ao clímax da filosofia da Física popperiana.

No primeiro volume, Popper reforça o falsificacionismo e sua crítica ao indutivismo, colocando este último como fonte de subjetivismo e idealismo. Subjetivismo é uma doutrina que toma o conhecimento como dependente de fatores que residem no próprio sujeito cognitivo (aquele que aprende). Por exemplo, o gosto é algo subjetivo porque depende de fatores que são peculiares ou próprios de cada pessoa; o quão complexa ou fácil é a compreensão de um conteúdo de Física para um aprendiz depende de como tal conteúdo se relaciona com aspectos já existentes na sua estrutura cognitiva, ou com experiências por ele vividas anteriormente e, portanto, pode ser tomado como algo subjetivo.

Popper ataca a interpretação subjetivista do cálculo de probabilidade, no sentido de assumir que a probabilidade possa medir um estado subjetivo de conhecimento insuficiente. Ele nega esta assunção.

No segundo volume, sustenta que, contrariamente à opinião comum, a Física Clássica não implica no determinismo mais do que o faz a Física Quântica, e afirma que “a razão humana não tem limites em relação a críticas, mas é limitada em relação aos seus poderes de previsão, e mostra que tanto os limites quanto a ausência de limites são, em suas respectivas posições, absolutamente necessários para a existência da racionalidade humana” (Popper, 2012, p. 10).

Neste texto focalizamos o terceiro volume intitulado *A teoria dos quanta e o cisma na Física* (Popper, 2012) porque cremos que as ideias ali desenvolvidas consistem em uma possibilidade, não a única, e podem ajudar a compreender uma confusão com relação ao dualismo que foi mencionado na Introdução, e também nos ajuda a refletir e a criticar algumas crenças inadequadas ao pensamento científico que pairam hoje em ambientes da Internet e, em certa medida, deslegitimam a ciência.

W.W. Bartley ao prefaciar o volume III do pós-escrito, *A teoria dos quanta e o cisma da Física*, diz que este volume contém o tema central da filosofia de Popper, e assim se expressa:

As ideias fundamentais da filosofia de Popper, e os temas dominantes dos três volumes do pós-escrito, são todos correlacionados com o tema basilar de que **do nada pode nascer alguma coisa**. As teorias científicas introduzem novas formas no universo e não são redutíveis a observações: não existe nada tal como a indução científica. O futuro não está contido no presente ou no passado. Existe indeterminismo na física e existe indeterminismo na história, *ipso facto*, e também porque novas ideias científicas influenciam a história e, portanto, o curso do universo físico. Há uma genuína emergência na Biologia. O valor não é

reduzível ao fato. A mente não é reduzível à matéria. (...) (Popper, 2012, p. 1; tradução livre; grifo nosso).

Ao escrever “do nada pode nascer alguma coisa”, Bartley remete-se ao embate de Popper com os positivistas do início do séc. XX, pois discordava que o conhecimento científico tenha como fonte a observação e a experimentação; para ele, não existe observação pura dado que ela sempre é antecedida por algum quadro teórico; com isso Popper inverte a perspectiva positivista, mostrando que todo o conhecimento científico tem como fonte ideias, conjecturas, hipóteses, ou seja, são livres criações do intelecto humano, que precisam ser criticadas e testadas.

Ao dizer que, para Popper, há indeterminismo na Física e na História, talvez faça sentido retomarmos a crítica de Ilya Prigogine, físico-químico ganhador do prêmio Nobel em 1977, ao afirmar que a nossa Física está alicerçada em sistemas estáveis e deterministas, i.e., que nossa Física trata os sistemas instáveis como exceções. Prigogine inverte essa perspectiva e afirma que sistemas estáveis são, em verdade, casos especiais de uma dinâmica estendida, de formulação estatística; que a noção de instabilidade dinâmica está associada ao 'caos'. Caos em uma concepção comum sugere desordem e imprevisibilidade, mas Prigogine afirma que “É possível (...) incluir o caos nas leis da natureza” desde que esta noção seja generalizada para nela incluirmos a probabilidade e a irreversibilidade (Prigogine, 2002, p. 8). As leis básicas da Física precisam ser estendidas, na visão de Prigogine, pois tanto a equação de movimento da mecânica clássica quanto a de Schroedinger da MQ descrevem processos dinâmicos reversíveis, contudo processos reversíveis são construções idealizadas e marcadas pela simetria temporal (“+t” e “-t” fornecem, ambos, movimentos plausíveis). Na natureza, aponta ele, há inúmeros processos que são irreversíveis (Massoni, 2008). A evolução cosmológica, a expansão do Universo é um exemplo emblemático disto.

Prigogine coloca o conceito de “estruturas dissipativas” que são próprias de processos irreversíveis e que revelam que pode ocorrer a criação de ordem longe do equilíbrio termodinâmico<sup>2</sup>. O mais interessante, adverte ele, é que em situações próximas do equilíbrio (no domínio do que é chamado termodinâmica de não equilíbrio linear) a produção de entropia é mínima e esta propriedade leva o sistema a estados estacionários<sup>3</sup>. Tais situações longe do equilíbrio têm mostrado, em estudos recentes, resultados surpreendentes: os sistemas não levam a extremos das funções de estado (funções de estado são, por exemplo, a energia livre e a entropia do sistema), e não é certo que as flutuações sejam amortecidas, de maneira que as flutuações, as instabilidades passam a desempenhar um papel essencial (Prigogine, 1996). Longe do equilíbrio, as flutuações “escolhem” um dos possíveis regimes de funcionamento do sistema, e colocam em jogo o mecanismo dos processos irreversíveis, situações em que a matéria adquire novas propriedades. Assim, fenômenos caóticos ou irreversíveis não se reduzem a um aumento de “desordem”, como se pensa comumente, mas têm um importante papel construtivo. Um exemplo é o cálculo do movimento de sistemas de três corpos (Sol, Terra e Lua), que se apresenta como um sistema instável, porque não há um único ponto, mas um conjunto, uma nuvem de pontos que podem representar o sistema no espaço de fases, exigindo a introdução das probabilidades. O que ocorre, segundo Prigogine, é que a equivalência entre o nível individual e o estatístico é destruída. E essa ruptura revela novas

---

<sup>2</sup> No equilíbrio termodinâmico a entropia tende a um máximo e a energia atinge um mínimo. Em ambos os casos, o extremo da entropia ou da energia garante que as flutuações que aparecem nesses sistemas microscópicos (compostos de muitas partículas em interação) possam ser amortecidas e que ocorra um retorno ao equilíbrio (Massoni, 2008).

propriedades da matéria, associadas ao não equilíbrio. E é justamente isto que dá lugar à auto-organização e à possibilidade da vida.

Em boa medida Popper alinha-se às ideias de Prigogine quando admite que “Há uma genuína emergência na Biologia”. Ambos assumem a existência de indeterminismo na Física e invocam a necessidade de abandonarmos as certezas.

Em uma linha similar, porém mais social, Edgar Morin afirma que “A maior contribuição do conhecimento do século XX foi o conhecimento dos limites do conhecimento. A maior certeza que nos foi dada é a da indestrutibilidade das incertezas, não somente na ação, mas também no conhecimento” (Morin, 2003, p. 55), especialmente frente ao progresso científico e tecnológico alcançado pela ciência. Para ele, o estudo da condição humana não depende apenas do ponto de vista das ciências humanas, da reflexão filosófica, depende também das ciências naturais como a Cosmologia, a Física, a Ecologia e final do século XX nos solicita compreender a “incerteza irremediável da história humana” (Morin, 2000). Ao nos colocar diante do conceito de *imprevisibilidade*, a ciência recente mostra-nos que a história humana é uma aventura desconhecida, pois o futuro é aberto, é imprevisível. Ainda que existam determinantes econômicos, sociais, tecnológicos, etc., o autor entende que estes campos não conseguem prever acidentes e imprevistos que podem desviar grandemente o curso da história humana. Para ele, são exemplos, as duas guerras mundiais, que marcaram profundamente o século XX, a catástrofe econômica de 1929 que abalou a vida das pessoas, a implosão do império soviético e outros eventos imprevisíveis, mas que mudaram a história humana. A atual pandemia da COVID-19 (do inglês, *Coronavirus Disease, 2019*), que nos coloca frente a desafios antes nunca imaginados, seria mais uma imprevisibilidade? Um tipo de desvio que, na linha de Morin, decorre de inovações e criações internas e acontecimentos externos. É importante assinalar que por transformações internas Morin entende aquelas criações que inicialmente são locais, quase microscópicas, que surgem como desvios à normalidade e que se não forem estagnadas podem, alimentadas por crises, proliferar de modo epidêmico (ibid. p. 81). Poderíamos dizer que a “injustiça”, no sentido grego<sup>4</sup>, significando ausência de equilíbrio na sociedade moderna, ou ausência de equilíbrio na distribuição de riquezas, de educação, de saúde, etc., estariam alimentando a crise e favorecendo a proliferação da COVID-19 no mundo, e de forma ainda mais imprevisível em sociedades subdesenvolvidas e severamente desiguais?

Morin adverte que é preciso substituir uma “visão do universo obediente a uma ordem impecável” por uma outra visão em que esse Universo é “o risco da dialógica (relação ao mesmo tempo antagônica, concorrente e complementar) entre a ordem, a desordem e a organização” (ibid., p. 83-84).

## A FÍSICA QUÂNTICA E O CISMA NA FÍSICA

Popper em seu pós-escrito de 1982 concorda que a ciência física assumiu, ao longo da história, um papel fundamental no esforço de compreender o mundo, combinando criatividade

---

<sup>3</sup> Estados em que ocorre regressão das flutuações, mas que pode ser de maior complexidade do que o estado de equilíbrio, ou seja, levam à formação de uma ordem que não poderia ocorrer no equilíbrio (ibid.)

<sup>4</sup> Nas palavras de Platão, “*Não é próprio do homem justo causar dano, nem a seu amigo nem a outros, mas isso que é próprio de seu contrário, o homem injusto*” (Platão, 1963, apud Caldera, 2007, p. 50). Esta definição de justiça em Platão pode ser aplicada ao conceito de Estado (político) a quem se aplica a expressão histórica e política da justiça como virtude suprema.

especulativa e abertura à experiência, mas que pode ser que no futuro não seja assim. Entendia que a Física estava em crise, ainda que, em sua visão, esse estado de permanente revolução das teorias fundamentais fosse normal em uma ciência madura. Explicava que a crise estava associada a uma crise de à compreensão.

A crise de compreensão, para ele, tinha muito a ver com um dos pilares da Física contemporânea – a Mecânica Quântica. Para entendê-la é preciso visitar o tempo da proposição da interpretação de Copenhague da MQ<sup>5</sup>, pois Popper diz que esta interpretação: a) introduziu subjetivismo na Física; b) propagou a ideia de que a teoria quântica alcançará a verdade completa e definitiva. Esta última noção foi cunhada por Albert Einstein como a “tese do final do caminho”, no sentido de que foi defendida por Bohr e Heisenberg<sup>6</sup> como uma insuperável revolução no âmbito da Física.

O subjetivismo foi introduzido na Física, na visão de Popper, com o nascimento da Física Probabilística que se tornou importante para a teoria da matéria com Maxwell e Boltzmann. Há esse tempo, passou-se a aceitar considerações probabilísticas frente à impossibilidade de conhecer a posição e quantidade de movimento de todas as moléculas de um gás contido em um container, por exemplo. A ligação da Física Maxwell com a física probabilística, então, se estabeleceu frente à falta subjetiva de conhecimento.

Popper discorda dessa interpretação, e defende uma interpretação realista para a Física. Afirma que o terceiro volume do pós-escrito “*introduz ao mesmo tempo, aquilo que chamo um <<epílogo metafísico>> (...) Propus um programa de pesquisa real para aplicações a, a interpretação de problemas reais em física e em biologia. (...) precisei examinar a história da ciência (...) articular as sucessivas situações problema na física (e depois na biologia)...*” (ibid., p. 46).

Ele dedica capítulos<sup>7</sup> do livro para tentar afastar o espectro que ele chama “consciência” ou “observador” na/da MQ, e busca mostrar que a MQ é uma teoria igualmente “objetiva”, tal como a mecânica estatística clássica. A tese assumida por Popper nesse empreendimento é a de que o observador (ou o experimentador) joga na teoria dos quanta o mesmo papel que na física clássica: *sua tarefa é controlar a teoria* (ibid., p. 51). O filósofo opõe-se, como dito, à chamada *Interpretação de Copenhague* da MQ que essencialmente assume que a realidade objetiva desaparece, que a MQ quântica não representaria as partículas

---

<sup>5</sup>A Interpretação de Copenhague ficou assim conhecida porque Bohr, Heisenberg e Pauli discutiam no início do séc. XX alguns aspectos filosóficos da MQ, geralmente no laboratório de Bohr, em Copenhague, sendo esta a mais antiga das interpretações da teoria quântica. A crítica de Popper aponta que, para eles, os sistemas físicos não teriam propriedades bem definidas antes da medição, que as previsões da MQ são probabilísticas; que a base para a construção de uma teoria são os resultados dos processos de medida e que não haveria sentido fazer discussões que não se relacionassem com as medições; Heisenberg (2005) dizia que não há uma resposta objetiva viável para uma pergunta como “O que acontece ‘realmente’ em um evento atômico?” no sentido de o que acontece entre duas medições; e que a observação em si muda a função de probabilidade descontinuamente, ela seleciona entre todos os possíveis eventos aquele que verdadeiramente acontece; que observar provoca o que ficou conhecido como o colapso da função de onda, ou seja, significaria que, apesar das muitas possibilidades expressas na função de probabilidade, apenas uma é selecionada quando o é feito o ato de medição, e a função de onda se modificaria instantaneamente para refletir essa escolha. Para Popper essa interpretação introduziu subjetivismos e mistérios na MQ que abriram caminhos para interpretações inadequadas que associam indevidamente uma poderosa teoria física - a MQ - a processos de “cura quântica”, de “coaching quântico” e outros achismos que confundem as pessoas. Vale também ressaltar que essas associações foram também fomentadas por cientistas da própria comunidade, quando, por exemplo, a física moderna foi popularizada, em 1975, por físicos como Fritjof. Kapra, que a associava ao pensamento oriental.

<sup>6</sup> Heisenberg teria dito (na “tese do final de caminho”) no livro intitulado *Der Teil und das Ganze* (apud, Popper, 2012, p. 25): “o critério fundamental de verdade é a visão intuitiva da simplicidade da solução que, ao final, ilumina tudo.

<sup>7</sup> Na verdade Popper afirma que o capítulo é uma versão revisada e ampliada de um artigo publicado na *Quantum Theory na Reality*, por Mario Bunge, 1967, pp. 7-44.



(ou ondas), mas sim o nosso conhecimento, as nossas observações e a nossa consciência das partículas.

É importante destacar que essa postura filosófica de Popper não é a única, há muitas outras, as vezes divergentes; alguns autores defendem que não há nem mesmo um acordo completo entre os integrantes da Escola de Copenhagen e apontam interpretações conflitantes, por exemplo, a de Bohr e a de von Neumann, de maneira que mesmo nos dias de hoje trata-se de uma questão em aberto. Uma reconstrução histórica de como os fundamentos da MQ foram formulados e interpretados de maneiras variadas de 1925 até os anos 1990 pode ser encontrada em Freire Jr. (2015). Adicionalmente, destacamos que a interpretação da MQ descrita no pós-escrito de Popper não é aceita sem críticas<sup>8</sup>, mas que mesmo assim é apresentada aqui como uma possibilidade capaz de suscitar reflexões.

Afirma Popper que tal assunção é historicamente errada, e observa que físicos importantes como Einstein, Planck, von Laue e Schrödinger foram, no início, defensores dessa interpretação, mas depois passaram a considerá-la não convincente, não conclusiva. Como dissidentes da interpretação de Copenhagen, Popper cita Alfred Landé, David Bohm, Mario Bunge, Fritz Bopp e o faz para *combater o mito histórico segundo o qual somente filósofos (e físicos totalmente incompetentes ou decrépitos) possam duvidar da interpretação de Copenhagen* (ibid., p. 53)<sup>9</sup>.

Disse Popper estar consciente que a interpretação de Copenhagen há muito foi superada e que mesmo os físicos que ainda creem nela, com honestidade, não a levam em conta na sua prática real. Contudo, defende que é fundamental criticá-la pela herança deixada na Física em relação à “subjetividade” e, de fato, geralmente mal compreendida nas representações sociais da MQ.

A nova teoria quântica foi, no início, uma outra denominação da “nova teoria eletromagnética da matéria” (Einstein escreveu em 1922<sup>10</sup>: “segundo nossas atuais concepções as partículas elementares não são nada além de condensações do campo eletromagnético... A nossa visão do universo apresenta duas realidades...o espaço e a matéria”). Isto mostra que os resultados da MQ eram aceitos pela maioria dos físicos como a comprovação de que toda a matéria era constituída de elétrons e prótons, pelo menos até 1932 quando foi descoberto o pósitron, descoberta atribuída a Roberto A. Millikan. As autoridades de Copenhagen, em um primeiro momento, recusaram-se a crer tanto na descoberta pósitron como do nêutron, que também ocorreu no ano de 1932 e é atribuída ao físico James Chadwic. Porém, acrescenta Popper, tal interpretação teve um golpe mortal com a descoberta das quatro interações

---

<sup>8</sup> Na verdade, há críticas em relação à interpretação probabilística de Popper: ela enfrenta dificuldades frente a diversos resultados experimentais como, por exemplo, os de Alain Aspect sobre a Desigualdade de Bell, os experimentos de emaranhamento, os resultados referentes à quantização do campo e experimentos envolvendo apenas um nêutron ou elétron. Contudo, as críticas podem estar mostrando um aspecto importante do conhecimento científico: a ciência física, assim como suas interpretações filosóficas não param, estão em constante evolução; se de um lado, há a possibilidade de Popper estar errado em sua interpretação, de outro, as próprias teorias científicas são passíveis de revisões, retificações e, eventualmente, até mesmo de substituições e um processo que é dinâmico.

<sup>9</sup> É importante pontuar que Popper não é um neopositivista, mas sim um falseacionista. Os positivistas acreditavam que todo o conhecimento científico tem fonte ou nasce da observação e experimentação (tem origem, **assim**, nos sentidos), portanto, nasceria verificado porque resultaria de um desvendar a natureza; discordando dessa visão, Popper, afirma que o conhecimento nasce do intelecto humano, de conjeturas, de palpites, de hipóteses que devem ser testáveis para se candidatarem a ser científicas, e que mesmo depois de muito testadas, nossas melhores teorias nunca serão provadas, são sempre conhecimentos provisórios, podem ser substituídos, melhorados, modificados - falseados.

<sup>10</sup> Einstein, A. *Sidelights on Relativity*, 1922, p. 22 (apud Popper, 2012, p. 53).

fundamentais (força nuclear; força eletromagnética; força fraca de decaimento e força gravitacional).

É à luz dessa situação, diz Popper, que devemos retrospectivamente considerar a luta titânica entre Einstein e Bohr: Einstein colocou dúvidas e afirmou que a MQ não era uma teoria “completa e perfeita”, e Bohr dizia que sim. Popper diz não ter dúvidas de que Einstein tinha razão, mas que o que ficou e se pode ler até hoje é que Bohr venceu a batalha. Isto persiste porque o ataque de Einstein à afirmação de Bohr de “perfeição” da MQ foi interpretada pela escola de Copenhague como um ataque à própria MQ e à sua coerência e consistência. O que não é verdade, assevera Popper (Popper, 2012). O próprio Einstein forneceu a interpretação estatística da teoria dos quanta e, portanto, aceitava sua coerência.

Para Popper, é inegável que o formalismo da MQ é aplicado por físicos tanto em velhos problemas, como a muitos novos problemas da Física Nuclear e da Física de Partículas, e que seus métodos são parcialmente usados, com muitas modificações, de maneira que os físicos reconhecem o seu poder. A preocupação dos físicos está na precisão dos resultados das medidas, não estão preocupados com o “papel do observador” ou de “sua interferência” nos resultados, não mais do que em seus sensíveis experimentos clássicos. Na prática, os físicos *“medem e experimentam hoje essencialmente como antes de 1925. Se há uma diferença relevante, esta consiste no fato de que o grau de execução indireta das medidas aumentou, e assim também o grau de ‘objetividade’”*. (Popper, 2012, p. 56), e isto porque hoje se usam mais filmes fotográficos e contadores automáticos.

Contudo, filmes fotográficos e a leitura de contadores, como em qualquer outro experimento, são interpretados à luz de uma teoria, e não sofrem “interferência” ou “influência” física por parte de nossas interpretações teóricas. Muitos controles experimentais têm atualmente um caráter estatístico, frequentemente determinado por contadores e computadores, mas nenhuma relação tem com a chamada inclusão do observador, ou do sujeito, ou da consciência, na física. Ao contrário, a preparação de experimentos sempre tem a ver com nossa consciência mutável, justamente porque ela depende da teoria. **E teorias sempre foram invenções nossas: são produto de nossa consciência, ao passo que o estado científico de nossas teorias depende de outros fatores, são critérios metafísicos, como “sua simplicidade, simetria e poder explicativo, (...), de sua verdade (correspondência com a realidade), ou proximidade [nearless] à verdade”** (ibid., p. 57, grifo nosso).

O acesso à compreensão crítica da teoria quântica, para Popper, requer remover alguns obstáculos que foram colocados pelos teóricos da doutrina copenhagueniana, que passaram a adotar a concepção de que as teorias não são outra coisa senão instrumentos ou dispositivos de cálculo – a teoria quântica é incompreensível, diziam, porque nós podemos compreender apenas “imagens” clássicas, como “imagens corpusculares” ou “imagens ondulatórias”. Para Popper esta é uma doutrina errônea e até mesmo viciosa.

O erro consiste em descrever as teorias como “sistemas conceituais”. Para ele, é muito importante distinguir teorias de conceitos. É errado pensar que uma teoria  $T_1$  está vinculada ao uso estrito de um sistema conceitual  $C_1$ , isto porque ela pode ser formulada de muitas maneiras e pode empregar sistemas conceituais diversos. Por exemplo, se substituirmos a lei newtoniana do inverso do quadrado por uma lei do inverso com uma potência 2000, o que obteremos é uma lei diferente dentro do mesmo quadro conceitual, e a diferença aumentará se aumentar a diferença entre os dois parâmetros; podemos até mesmo introduzir na teoria newtoniana uma velocidade finita para as interações gravitacionais; se a velocidade é muito grande as duas teorias podem até resultar teoricamente indistinguíveis, se a velocidade é pequena pode haver consequências empíricas diversas, mas permaneceremos no mesmo quadro conceitual.

Essas considerações são relevantes por causa da conversa interminável que se faz com respeito à “imagem corpuscular” e à “imagem ondulatória” e da chamada “dualidade” ou “complementaridade” se pressupondo a necessidade, afirmada por Bohr, de usar “imagens clássicas” por causa da dificuldade (reconhecida, mas irrelevante, na interpretação de Popper) de “visualizar” e, portanto, “compreender” objetos atômicos. Popper afirma que **este tipo “compreensão” é de baixo valor e negar que possamos compreender a teoria quântica tem tido assustadoras repercussões, seja no ensino como na real compreensão da teoria.**

A tese errônea de que a tentativa de compreender as teorias da Física Quântica é fútil porque elas são essencialmente “incompreensíveis” equivale, segundo Popper, à asserção absurda de que não podemos saber quais problemas tais teorias buscam resolver.

Neste ponto Popper coloca treze teses para criticar a interpretação de Copenhagen e busca mostrar que uma outra interpretação realista da teoria dos quantas é possível.

I – afirma que a teoria quântica busca resolver problemas estatísticos (assim foi com o problema de Planck em 1900 que trouxe a fórmula da radiação; com o problema de Einstein, em 1905, que resultou na hipótese dos fótons; com, em parte, o problema de Bohr, em 1913, que levou à teoria de emissão espectral, e com o problema da estabilidade atômica, ou seja, que elétrons estão em um estado fundamental estacionário e neste estado são não radiantes no átomo – que Bohr resolveu mediante o postulado das “órbitas privilegiadas”). Diz Popper que *“O problema central que levou à nova mecânica quântica foi a de melhorar esta situação obtendo resultados estatísticos exatos”* (ibid., p. 62).

Contudo, adverte Popper, não foi esta a forma como a escola de Copenhagen olhou a questão. Não buscaram uma “generalização da mecânica estatística clássica”, mas em vez disso, uma “generalização da mecânica clássica” (das partículas) que levasse em conta a existência do *quantum* de ação. Admite, no entanto Popper, que o programa de Bohr associado à tese de doutorado de de Broglie (1923-24) que aplicava aos elétrons a ideia de Einstein (de que os fótons fossem “associados” com ondas e, com isso, conseguiu mostrar que as “órbitas privilegiadas” de Bohr, e por consequência, a estabilidade do átomo, podia ser entendida como interferência de ondas) foi uma das ideias mais audazes de todo esse desenvolvimento. Porém, dois anos depois a teoria de de Broglie se desenvolveu na “mecânica ondulatória” de Schrödinger e foi Max Born quem aplicou uma interpretação estatística à MQ – a intensidade das ondas luminosas (aqui houve uma observação de Einstein sobre a conexão entre a teoria ondulatória da luz e a hipótese dos fótons) deveria constituir uma medida da densidade de fótons, ou mais precisamente, da probabilidade da presença dos fótons.

Assim o problema da estabilidade atômica foi reduzido a um problema estatístico – as “órbitas privilegiadas” quantizadas de Bohr são aquelas em que a probabilidade da presença de um elétron é diferente de zero.

II – questões estatísticas requerem respostas estatísticas, de forma que a Mecânica Quântica é essencialmente uma teoria estatística. Embora Popper admita que este argumento não é linear e logicamente cogente (ou convincente), afirma que, pelo fato de os problemas da teoria não serem vistos como estatísticos (e às vezes ainda não o são) foram criadas outras razões para explicar o caráter estatístico da teoria.

III – a crença errada de que devemos explicar o caráter probabilístico da teoria quântica por causa da *nossa falta de conhecimento* (especialmente mediante os limites de nosso conhecimento formulados no “princípio da incerteza” de Heisenberg), e não mediante o caráter estatístico dos problemas que ela busca resolver, é que nos levou à *inclusão do observador*, ou

*do sujeito* na quântica que leva a uma *interpretação subjetivista da teoria da probabilidade*. Esta tese não se sustenta porque, para Popper, seria pura magia sermos capazes de extrair conhecimento da ignorância.

IV – Em consequência dessa interpretação encontramos-nos diante do que Popper chama de “grande confusão quântica”. Para explicar tal confusão Popper esclarece alguns aspectos da teoria estatística que são bastante instrutivos: 1) certos *eventos* (como cair a face 5 de um dado) acontecem a certos *elementos* (um dado) em certas *situações experimentais* (sacudir o dado dentro de um copo e lançá-lo à mesa); os resultados destes lançamentos formam a “população” da amostra estatística; 2) certas propriedades físicas desses eventos, elementos e situações experimentais (por exemplo, que o dado seja de material homogêneo e que só uma das seis faces tenha o nº 5) permitem que haja uma variação na situação experimental; 3) há um conjunto dos possíveis eventos chamados pontos no espaço amostral ou espaço de probabilidades; 4) um nº associado a cada ponto do espaço amostral, determinado de qualquer função matemática, chamada função de distribuição – no caso contínuo, a função de distribuição é uma função de densidade.

Popper exemplifica essa ideia com uma analogia que é sumarizada no Quadro 1. Diz que o espaço amostral pode ser representado pelo conjunto eventos de um homem ou mulher que vive em uma região qualquer do Reino Unido. A função de distribuição de densidade contínua (normalizada) da população, isto é, o número efetivo de pessoas que vivem em uma região é normalizado dividindo-o (este nº) pela população total do Reino Unido. Esta informação ajuda-nos a responder a perguntas do tipo: qual é a probabilidade que um inglês viva em certa região, por exemplo, no Sul da Inglaterra? É preciso ter clareza que a *função da distribuição estatística (normalizada) pode ser considerada como uma propriedade caracterizante do espaço amostral* – nesta analogia, a população do Reino Unido. **Não é, contudo, uma propriedade física dos eventos** – por exemplo, que o Sr. Henry Smith, que reside no Reino Unido, esteja domiciliado em Oxford; **e também não é uma propriedade dos elementos** (por exemplo, idade do Sr. Smith, tipo de sua cama ou de seu relógio de pulso).

Retomando a MQ, Popper diz que a “grande confusão” **consiste em assumir uma função de distribuição, isto é, uma função de medida estatística caracterizante de algum espaço amostral e tratá-la como uma propriedade física dos elementos daquela população**. É uma confusão, pois o espaço amostral nada tem a ver com os elementos. Não há nenhuma relação simétrica e, portanto, nenhuma “dualidade” entre partículas e ondas, ou entre partículas e o campo a elas associado (Popper, 2012, p. 66).

Em sua tese Popper diz que muitas pessoas, inclusive físicos, **falam como se a função de distribuição (a forma matemática) fosse uma propriedade dos elementos** (na analogia aqui parafraseada significa não fazer distinção entre tipos de coisas muito diferentes como, por exemplo, pressupor erroneamente que o nº – que indica a probabilidade do Sr. Smith viver no Sul da Inglaterra – possa ser tomado como sua idade, que é uma de suas propriedades físicas).

O problema que Popper identifica e ataca em seu pós-escrito é que essa confusão se difundiu na teoria quântica, como testemunham aqueles que falam de “dualidade de onda e partícula”. Popper insiste que a função de onda  $\psi$  é a forma matemática de uma função  $f(P, dP/dt)$ , que é uma função de distribuição probabilística  $P$ , onde  $f = \psi(q, t)$  e  $P = |\psi|^2$  é uma “função de densidade de distribuição”. A forma ondulatória da função  $\psi$  seria, neste ponto de vista, uma espécie de acidente que coloca um problema à teoria das probabilidades, **mas que nada tem ver com as propriedades físicas das partículas** (ibid., p. 66).

**Quadro 1:** Síntese da analogia posta por Popper e sua relação com a MQ.

Analogia posta por Popper	Interpretação da MQ posta por Popper no seu pós-escrito de 1982
Espaço amostral: população do Reino Unido	Espaço amostral: população de elétrons de um átomo
A <i>função da distribuição estatística</i> – é o nº que indica a probabilidade do Sr. Smith habitar o Sul da Inglaterra	A <i>função da distribuição estatística</i> $P= \psi^2 $ - fornece um nº que indica a probabilidade de um elétron ser encontrado em uma dada região em torno do núcleo atômico
Esse nº não caracteriza os elementos – nada diz sobre a idade do Sr. Smith, tipo de sua cama ou a marca e tipo de seu relógio de pulso	$P= \psi^2 $ nada diz sobre as propriedades de um elétron, se é partícula, ou onda, ou tem “dualidade” (onda-partícula)

Popper discute no pós-escrito outras teses, por exemplo, a interpretação das equações que representam o Princípio de Incerteza de Heisenberg e diz que: 1) o princípio assume que as leis da MQ são notavelmente estatísticas; 2) que sempre se referem a populações de partículas que são dotadas de posição, quantidade de movimento, energia, spin e outras propriedades físicas; 3) que as relações/equações de Heisenberg nos dizem que não podemos preparar experimentos que possam eliminar, mesmo com repetição dos experimentos, a “dispersão da quantidade de movimento” se dispormos de uma “dispersão de energia-massa”, se o tempo for muito pequeno; ou a dispersão da quantidade de movimento se dispormos de uma posição estritamente limitada. Mas insiste que isto significa apenas que existem limites à homogeneidade estatística dos resultados, e não que não seja possível medir a energia e o tempo, a quantidade de movimento e a posição com precisão maior do que as fórmulas de Heisenberg ( $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$  e  $\Delta p_x \cdot \Delta q_x \geq \hbar$ ) parecem permitir. Contudo, tais medidas são necessárias para checar essas mesmas fórmulas. Popper busca mostrar que as fórmulas de Heisenberg podem ser derivadas de teorias muito mais antigas, por exemplo, da expressão do Princípio de Planck ( $\Delta E = \hbar \cdot \Delta \nu$ ), em que se pode interpretar  $\Delta \nu$  como a amplitude da linha espectral ( $\nu$  é o resultado estatístico de fótons incidentes de energia  $E = \hbar \cdot \nu$ ) como sendo o campo  $\Delta E$  de “difusão estatística das energias” do conjunto de fótons que formam a linha espectral.

Popper reconhece alguns enganos quando se remete à sua primeira versão da obra *A lógica da Descoberta Científica* devido a entendimentos subsequentes da MQ (por exemplo, no nascimento da MQ o termo “partículas elementares” era um conceito usado para se referir a prótons e elétrons, entendidos como blocos indestrutíveis (p. 145), hoje partículas elementares têm outro significado e não são mais entendidas como últimas ou “elementares”<sup>11</sup>). Contudo, ele discorda também da primeira interpretação de Schrödinger de que “partículas” são estruturas de onda ou “pacotes de ondas” porque a considera simplista e, pode ser refutada pelo caráter da transição das partículas (p. 146). Popper reafirma que a estrutura das partículas é complexa e insiste que é falsa a interpretação de Copenhagen, segundo a qual “*objeto e sujeito se tornaram inseparáveis um do outro*” (ibid., p 127), sustentada pela impossibilidade de uma nítida separação entre o comportamento dos objetos atômicos (segundo Bohr) e sua interpretação com os instrumentos de medida usados para definir as condições em que os fenômenos se manifestam. A interpretação errônea – muito baseada no naturalismo animista ou num idealismo subjetivista e de elementos religiosos (Pessoa Jr, 2011) – que se difundiu abriu

<sup>11</sup> Do ponto de vista da historiografia é um erro de anacrônico retirar a interpretação de uma teoria do seu contexto de nascença (olhando-a com os conhecimentos atuais) e como Popper explica, é preciso reconhecer que os entendimentos do conceito de “partículas elementares” foi mudando grandemente entre o momento inicial da teoria quântica e aquele mais alargado da década de 1980, quando da publicação do pós-escrito.

margem à introdução de mistérios na MQ que levaram/levam a interpretações inadequadas, ainda hoje, feitas por não especialistas. Isto estava ligado, argumenta Popper, ao argumento ortodoxo de incompletude do formalismo matemático.

A mencionada incompletude do formalismo, sustenta ele, é uma característica do tratamento probabilístico de um vasto número de problemas e que isto nada tem a ver com a Física Quântica e com o mito da interferência do observador na quântica.

Para tentar resolver os vários paradoxos da MQ Popper propõe o que ele chama de “interpretação propensional” em que as fórmulas de Heisenberg, por exemplo, são interpretadas como “relações de difusão” ou uma probabilidade “singular”; como se determinasse a propensão de uma partícula singular de “difundir-se”, isto é, prediz que a efetiva difusão estatística ocorrerá se repetíssemos o experimento várias vezes com uma mesma partícula.

Mais adiante afirma que o indeterminismo e a interpretação propensional da probabilidade permitem desenhar uma nova visão (imagem) do mundo físico,

Segundo esta imagem, da qual não podemos traçar aqui senão um esboço aproximado, todas as propriedades do mundo físico são disposicionais e o estado real de um sistema físico, a qualquer instante, pode ser concebido como a soma total de suas disposições – ou potencialidade, ou possibilidade, ou propensão (Popper, 212, p. 167).

Este quadro, explica Popper, consiste na realização ou atualização de algumas potencialidades, que por sua vez abrem novas situações que modificam as potencialidades iniciais. Para aclarar, ele exemplifica dizendo que quando um estudante se inscreve na universidade, é inerente a esta situação o surgimento de certas possibilidades como: concluir as disciplinas, defender o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e obter o diploma. Quando conclui todas as disciplinas realiza a primeira destas possibilidades ou potencialidades e abre, ao mesmo tempo, uma nova situação que, se for atendida, muda as outras duas possibilidades. Ao defender o TCC e cumprir um conjunto de outras exigências acadêmicas ele cria uma nova situação que muda a última possibilidade, a de obter o diploma. Quando finalmente obtém o diploma está realizando certa potencialidade e esta abre uma nova situação que cria novas potencialidades, no sentido de fazer ou não uso do diploma no curso de sua carreira. Cria-se, assim, uma imagem de mundo que é ao mesmo tempo dualística e monística. É dualística enquanto as potencialidades são tais somente em relação às possíveis realizações ou atualizações; e monística enquanto as realizações ou atualizações não determinam só potencialidades, mas se pode dizer, afirma Popper, que são elas mesmas as potencialidades.

Assim também o mundo físico pode ser descrito como consistindo de “mudança de propensão à mudança”. Embora esta propensão não determine as mudanças futuras, em vários campos da Física podem determinar a distribuição de probabilidade de possíveis mudanças futuras.

Para Popper, esta abordagem sugere uma teoria da matéria, das partículas, interpretada como realizações de potencialidade ou propensões. Um dos pontos fundamentais desta abordagem é a sugestão que, deste modo, é possível uma interpretação *indeterminista do programa determinístico de Einstein, e ao mesmo tempo, uma reinterpretção objetivista e realista da teoria quântica* (ibid., p. 168, grifo nosso).

O objetivo, defende Popper – que se declara indeterminista, é obter uma visão de mundo em que haja espaço para os fenômenos biológicos, para a liberdade humana e para a racionalidade humana.

## IMPLICAÇÕES À EDUCAÇÃO CIENTÍFICA CONTEMPORÂNEA

No dizer de Aristóteles, o ser humano é um ser político. Hegel reforça essa concepção ao colocar a teoria dialética e, Platão, inicia sua obra, *A República*, precisamente tratando da justiça, o que de imediato remete a discussão à “injustiça”, conceito que no sentido da filosofia grega significa “ausência de equilíbrio”. Sendo a educação o resultado de escolhas e de tensões no campo de disputas (por exemplo, sobre o que deve constar nos currículos), pode-se dizer que é também e antes de tudo política, resulta de disputas, discussões e tensões em instâncias que, muitas vezes, excluem os professores (VILLANI, PACCA & FREITAS, 2009) e menos ainda dá voz aos estudantes.

A noção de dualismos presente na dinâmica do pensamento grego (racional e instintivo; bem e mal, harmonia e discórdia, aparência e realidade), por sua grande influência na civilização ocidental, pode nos ajudar a repensar a educação científica, porque também aqui podemos (e mesmo devemos) perceber e criticar outras formas de dualismos hoje perceptíveis. Embora a democratização da educação seja um fenômeno recente em nosso País, data da década de 1990, com a LDB 9.394/96 (BRASIL, 1996) que tornou o ensino médio a etapa conclusiva da educação básica como direito a todos os brasileiros, nossa educação carrega um dualismo latente: temos uma escola de qualidade, geralmente privada, para as elites, e uma outra escola, pública e desestruturada e de baixa qualidade, para os mais pobres; temos uma formação geral para as elites e uma formação profissionalizante para as massas. Esta realidade dualista e silenciosa, muitas vezes naturalizada, precisa ser compreendida e debatida.

Neste texto defendemos que a educação científica básica não pode prescindir de conteúdos da Física Moderna e Contemporânea, em especial da Física Quântica, porque ela pode oferecer aos jovens, futuros cidadãos, instrumentos capazes de evitar, ou pelo menos reduzir drasticamente o aceite acrítico, o uso inadequado de noções, princípios e conceitos da Física Moderna e Contemporânea, incluindo a Física Quântica, que povoam a Internet e favorecem a construção e a propagação de misticismos, curas milagrosas e fetichismos. Ghirdelli (2019), em uma crítica ao neoliberalismo de nossos tempos, remete-se ao filósofo alemão Peter Sloterdijk, que faz analogia entre as aventuras de Cabral (navegador português que chegou à Terra de Vera Cruz) e as de um viajante-herói de um livro popular em 1500 na Europa, chamado *Fortunatus* (cujo dinheiro nunca faltava pois carregava uma bolsa mágica, fazendo dinheiro brotar de si mesmo - diferente da história real de Cabral); essa analogia do Renascimento com os tempos atuais, na visão de Ghirdelli (2019, p. 12-13), pode ser útil para compreender que crenças em situações “mágicas”, especialmente dos jovens do séc. XXI, podem encontrar explicação no capitalismo financeiro (a rentização, a financeirização, a mágica do “cartão de crédito” que tudo pode, tudo compra...). Como libertar nossos jovens dessas noções fetichistas sem educação em ciências de qualidade e acesso aos bens materiais e simbólicos que as ciências podem nos prover?

Na abordagem histórico-epistemológica de Prigogine, Morin e Popper, discutidos brevemente neste texto, é perceptível que, de um lado, se aceita um indeterminismo social e biológico (e até mesmo em alguns campos da Física, como na Física Quântica discutido por Popper, e na termodinâmica de sistemas de não equilíbrio como discutido por Prigogine), enquanto que, de outro, revela-se o determinismo de currículos escolares de Física, ainda hoje

em pleno século XXI, dado que nos diferentes níveis da educação científica básica os currículos se expressam em grandes listas de conteúdos, em geral, na mesma ordem como são estudados na graduação, em disciplinas de físicas básicas. Também aqui aparece, então, uma forma de dualismo que precisa ser questionado.

A articulação da história e da filosofia da ciência nos ajuda a perceber que somos herdeiros não só do pensamento grego, da filosofia e da ciência, mas também de toda uma metafísica que, segundo Popper (2012, p. 168), desde que prestemos atenção às ideias metafísicas que contribuem a criar as situações problemáticas e, em larga medida, determinam a direção em que procuramos uma solução. Na ciência, adverte Popper, diferentemente da política, há pelo menos três fatores que podem resultar em situações problemáticas: 1) a descoberta de incoerências na teoria em uso; 2) a descoberta de contradições entre teoria e experimento (que ele conceitua como “falsificações experimentais da teoria”) e 3) a relação entre a teoria e o “programa de pesquisa metafísico”. E os programas de pesquisa metafísicos incorporam visões de mundo que podem/devem ser vistos historicamente e que foram altamente influenciados pelos pensadores gregos (Popper cita Pitágoras, Eráclito, Parmênides, Aristóteles, depois Copérnico, Bruno, Kepler, Galileu, Descartes, depois Newton, depois Faraday e Maxwell – até chegar aos pilares da Física do início do século XX).

Para Platão, em *Russell e Caldera*, o Estado e sua função, a democracia, o conceito de justiça – que nos remete ao de injustiça (enquanto falta de equilíbrio social, de distribuição de riquezas e bem estar) também tiveram berço no pensamento grego; retomar esses conceitos ajuda-nos a melhor compreender o papel social da escola, dos sistemas de ensino e do estado no atual momento. Refletir a escola nos remete a situações de necessária valorização do papel do educador, reinterpretar o currículo, e valorizar a educação científica, como formas de evitar erros do passado. Esta é, talvez, uma das grandes contribuições da história da ciência e de seu ensino, ou articulação na educação científica. Há que se considerar que a escola pública é para milhões de brasileiros a única via capaz de transformar sua profunda realidade; o conhecimento é fundamental não apenas como forma de compreender a tecnologia presente na sociedade moderna, sem por ela se deixar dominar, mas como forma de refletir, de politizar-se e tomar parte ativa nas grandes questões sociocientíficas atuais.

É nesta linha que defendemos que a Física Contemporânea precisa estar na escola, a escola precisa se aproximar da ciência, a academia se articular com a escola de modo cooperativo, e o ensino de Física Quântica, que representa um dos pilares da física moderna do século XX, pode contribuir para que jovens compreendam melhor o seu tempo. Trabalhar Física Quântica através de aspectos conceituais, históricos e epistemológicos parece ser uma das tendências atuais na pesquisa, quer na formação de professores de física (Zanotello, 2020), mobilizando saberes e construindo nos estudantes de graduação sentidos às questões relacionadas à inserção da Quântica na Educação Básica, como na construção, aplicação e análise propostas que se mostram positivas para discutir no ensino médio uma física quântica conceitual, sem necessariamente aprofundar o formalismo algorítmico (Hoernig, 2020).

Assim, no contexto de que há múltiplas interpretações possíveis, como já referido, pode ser importante se ter clareza do que Popper aponta como “confusão” (conforme seu pós-escrito de 1982) gerada pela chamada Interpretação de Copenhagen, evitando-se os perigos de se aludir ao subjetivismo, pois tal subjetivismo parece estar na base de maus usos da mecânica quântica, permitindo que uma teoria física fundamental para a ciência moderna gere inadequadas e místicas interpretações, que não encontram fundamento científico, mas têm grande apelo popular.



Ensinar a Física Quântica de forma consistente, conceitual, histórico e epistemologicamente alinhadas é talvez uma das vias mais profícuas para conscientizar os jovens, para enfrentar as *fake news*, as concepções negacionistas e os usos indevidos e inadequados da ciência, e inclusive, tornando a ciência mais popular, mais próxima da sociedade, favorecendo uma educação mais inclusiva e diversa.

## REFERÊNCIAS:

Alves-Brito, A.; Massoni, N. T; Guerra, A & Macedo, J. R. (2020). Histórias (in)visíveis nas Ciências. I. Cheikh Anta Diop: um corpo negro na Física. *Revista da ABPN*, v. 12, n. 3, 290.

Brasil. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as Diretrizes e Bases da Educação Nacional. *Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]*, Brasília, DF, v. 134, n. 248, 23 dez. 1996.

Caldera, A. S. (2007). *Os filósofos e seus caminhos*. Novo Hamburgo: Editora Nova Harmonia.

Chauí, M. (2002). *Introdução à história da filosofia: dos pré-socráticos a Aristóteles*. Volume 1. São Paulo: Companhia das Letras.

Cuesta, Y. & Mosquera, C. (2017). Algunas Reflexiones en torno a las Implicaciones de la NdC en Educación en Ciencias: el caso de la Enseñanza de la Mecánica Cuántica. *TED: Tecné, Episteme y Didaxis*. Extraordinario, p. 921-927.

Freire Jr., O. (2015). *The Quantum Dissidents: rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*. New York: Springer Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-662-44662-1.

Hegel, G. W. F. (1959). *La introducción a la historia de la Filosofía*. Buenos Aires: Grijalbo.

Heisenberg, W. (2005). *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Society*. London: Penguin Books, 2005.

Hoernig, A. F. (2020). *Física Quântica e História e Filosofia da ciência: conceitos, vida, crenças e religiosidade como motivadores na aprendizagem de Física*. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (Instituto de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Kuhn, T. S. (2003). *A Estrutura das Revoluções Científicas* (8a. ed.). São Paulo: Perspectiva.

Massoni, N. T. (2008). Ilya Prigogine: uma contribuição à filosofia da ciência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(2).

Massoni, N. & Moreira, M. A. (2010). Un enfoque epistemológico de la enseñanza de la Física: una contribución para el aprendizaje significativo de la Física, con muchas cuestiones sin respuesta. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 9(2), 283-308.

Morin, E. (2000). *Os sete saberes necessários à educação do futuro* (2a. ed.). São Paulo: Cortez.

Morin, E. (2003). *A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento*. 8a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

Matthews, M. (1994). *Science teaching: The role of history and philosophy of science*. New York: Routledge.

Pessoa, Jr. (2011). *O fenômeno cultural do misticismo quântico*. Em: Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais. (Orgs): Olival Freire Jr., Osvaldo Pessoa Jr, Joan Lisa Bromberg. Campina Grande: EDUEPB. Livraria da Física.

Popper, K. R. (2012). *La teoria dei quanti e lo scisma nella Fisica*. Milano, il Saggiatore Ed.

Prigogine, Ilya. (1996). *O Fim das Certezas Tempo, Caos e Leis da Natureza*. São Paulo: Editora UNESP, São Paulo.

Prigogine, Ilya. (2002). *As Leis do Caos*. São Paulo: Editora UNESP.

Villani, A., Pacca, J. L. A., Freitas, D. (2009). Science teacher education in Brazil: 1950-2000. *Science & Education*, v.18, p.125-148.

Zanotello, M. (2020). Uma Análise da Constituição de Saberes Relativos ao Ensino de Física Quântica em um Curso de Licenciatura. *Ciência & Educação*, 26(20006), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1516-731320200006>.

---