

# O mundo físico: Materialismo ou Idealismo? Um olhar desde as ciências

Jorge Ernesto Horvath

Universidade de São Paulo

---

## Resumo

Apresentamos neste artigo uma discussão do velho problema da natureza do mundo natural. O Idealismo e o Materialismo são discutidos e contextualizados na Física Clássica e no mundo Quântico, mostrando que este último traz de volta velhas controvérsias num contexto novo. Poderemos estabelecer até que ponto a mente é responsável pela realidade física? Estas perguntas fundamentais podem servir como alicerce para uma discussão em sala de aula com interessantes desdobramentos interdisciplinares.

## Abstract

We present in this article a discussion of the old problem of the nature of the physical world. The Idealist and Materialist positions are discussed and put in context in Classical Physics and the Quantum world, showing that the latter brings back old controversies within a new context. Can we ever establish to which extent the mind is responsible for the physical reality? These fundamental questions can serve as starting points for a discussion in the classroom with interesting interdisciplinary spinoffs.

---

**Palavras-chave:** materialismo, idealismo, filosofia das ciências, mecânica quântica.

**Keywords:** materialism, idealism, philosophy of science, quantum mechanics

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43425](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43425)

## 1 Introdução: Materialismo e Idealismo no Mundo Antigo

Há mais de 25 séculos algo extraordinário aconteceu na Jônia (região grega que corresponde ao atual litoral sul da Turquia). Por razões que são discutidas intensamente até hoje, uma série de pensadores de Clazômenas, Mileto, Éfeso e outras cidades prósperas tentaram pela primeira vez uma grande síntese do mundo natural (e também de aspectos humanos, que não nos interessam aqui) sem recorrer a causas sobrenaturais ou mágicas. Esta atitude racionalista contrasta com outras abordagens onde a fonte do conhecimento não é tão somente a razão humana, mas também e principalmente um conjunto de fatores e fatos que hoje chamaríamos com propriedade de “mitológicos”.

Com esses primeiros filósofos gregos existe a consideração do princípio gerador de todas as coisas como problema fundamental. O princípio procurado recebeu o nome de *arché* (em grego, ἀρχή), e foi a primeira tentativa de unificação do

mundo físico, já que tentava-se explicar todo o observado com uma única coisa. Diz-se que os filósofos das primeiras gerações eram monistas, em oposição à ideia imediatamente considerada de uma possível pluralidade de objetos fundamentais como constituintes de tudo. Coube tentar a identificação racional, puramente intelectual e especulativa, dessa *arché*, já que no mundo grego, e especialmente nos primórdios, não cabia a realização de experimentos. As observações gerais e diretas do mundo existente eram aceitas, mas não uma intervenção à procura de qualquer resposta, já que se entendia que isto distorceria os fatos [1].

Chegaram até nós alguns nomes importantes e suas posturas perante a natureza da *arché*. Para Tales de Mileto (“o primeiro filósofo”), a água era o elemento formador de tudo, possivelmente encorajado pela constatação da transformação em gelo e vapor. Seu discípulo Anaximandro, no entanto, discordou do seu mestre e postulou uma substância, ou *ápeiron*, de natureza quantitativamente infinita e qualitativamente indeterminada



**Figura 1:** Esquerda: Escultura com a figura de Anaximandro. Direita: o primeiro mapa do mundo conhecido, desenhado por Anaximandro.

que conteria os contrários tais como frio-calor e outros. A diversidade em cada substância resultaria da separação destas duas essências opostas, construindo assim o mundo observado. Anaximandro formulou ainda o primeiro modelo cosmológico conhecido, com uma Terra cilíndrica flutuando num espaço infinito, e desenhou o primeiro mapa da História (Fig. 1).

O último nome importante deste período é o de Anaxímenes de Mileto, quem manteve que o ar era o elemento primordial ou *arché*. A rarefação ou condensação do ar seriam os processos que permitiriam a formação dos objetos conhecidos, como as rochas. O elemento comum em estas propostas é o caráter material atribuído ao elemento primordial. Isto é até mais importante que o monismo, e tem como consequência direta que o mundo decorre da organização da matéria, o *arché*. Veremos a seguir como haveria pensamentos muito diferentes a respeito.

O primeiro filósofo importante que sugeriu outro princípio fundamental para o mundo foi Heráclito de Éfeso (535-475 a.C.), quem parece ter sido autodidata e prescindente de toda a obra dos filósofos anteriores a ele e de seus contemporâneos. Heráclito identificou a mudança como o elemento realmente fundamental. É conhecida sua afirmação a respeito da impossibilidade de tomar banho duas vezes no mesmo rio, que expressaria que tanto a correnteza quanto os fatos que acontecem na vida do homem provocam uma fluidez inevitável. Mas aparentemente esse assunto é bem mais interessante e sutil: Heráclito afirma que a identidade das coisas decorre da sua constante mudança, sua metáfora é [2] “Naqueles que entram nos mesmos rios, sempre outras e outras águas fluem” (Tradução do autor do inglês). He-



**Figura 2:** Empédocles e os quatro elementos representados no século XV.

ráclito deu uma resposta para a questão da *arché* (presente nos fragmentos do Papiro de Derveni descoberto em 1962): afirmou que a *arché* é o logos, que para ele representa a ordem a racionalidade do Universo, colocando assim as leis acima da substância/matéria que o compõem.

Mas haveria outras visões contrastantes: Empédocles de Ácragas (atual Agrigento, 495-435 a.C.) quebrou esta postura monista e propôs a chamada teoria dos quatro elementos. Os quatro elementos comporiam os objetos reais em proporções várias, dependendo da quantidade de ar, fogo, água e terra que os integrassem. Note-se que, embora abandonasse o monismo, a proposta de Empédocles é ainda claramente materialista. Todo o mundo estaria composto por frações de matéria (Fig. 2).

A doutrina dos quatro elementos gozou de muita popularidade por 2000 anos, já que foi adotada por Aristóteles e outros pensadores dominantes. Somente quando os trabalhos de John Dalton nos começos do século XIX mostraram que a hipótese atômica explicava fatos concretos observados em laboratório, foi que sua aceitação diminuiu e finalmente acabou. Mas para apreciar este processo precisaremos primeiro repassar as ideias da estrutura do mundo que foram surgindo e se opondo aos quatro elementos ao longo dos séculos.

Ainda no período pré-socrático uma das alternativas mais interessantes e de longo fôlego na história do pensamento é a formulação do atomismo por Leucipo e Demócrito no século IV a.C. O atomismo postula que os objetos do mundo físico são produto da combinação de pequenas unidades indestrutíveis (*átomo*) que se movimentam num espaço vazio, este último uma novidade introduzida pelos atomistas para escapar dos paradoxos da impossibilidade do movimento que ti-

nham formulado os eleáticos. O atomismo foi elaborado e retomado muitas vezes na história, a primeira por Epicuro um século depois dos originais, por Lucrécio no século I a.C, pelo próprio Newton (chamado mais propriamente de corpuscularista), e começou a adotar a forma mais ou menos definitiva com Dalton, tudo isto antes da emergência da Física Quântica que trouxe novidades de importância para a constituição do mundo físico [3].

Embora não vamos embarcar numa discussão do atomismo como doutrina filosófica (vale lembrar de novo que não haveria nenhuma evidência em favor dos átomos até o século XIX), é importante enfatizar seu caráter fortemente materialista. “Todo é feito de átomos” ensinavam os atomistas, e até identificavam a alma humana com um tipo leve de átomo [4]. Podemos dizer que o *arché* atomista são os próprios átomos e o vazio no qual se movimentam.

Por outro lado, outra importante escola filosófica liderada por Pitágoras tinha chegado quase 5 séculos antes de Era Cristã a uma conclusão surpreendente. Os pitagóricos tinham forte interesse nas matemáticas e ficaram muito impressionados ao descobrir que havia relações matemáticas simples, por exemplo, entre os tons de uma corda vibrante [2]. Isto os levou a pensar que a essência do mundo é o número, ou seja, relações abstratas, não objetos físicos. Houve uma grande controvérsia ao redor da afirmação anterior, já que não era totalmente claro se os pitagóricos afirmaram que o mundo pode ser representado por números, ou se o mundo são os números, embora esta última versão parece verossímil. Vemos assim que a divergência em torno da natureza do mundo natural foi sempre muito forte e levou a posições antagônicas.

A figura fundamental da Filosofia do Mundo Antigo (e de todas as épocas) é o grego Platão. Sua própria visão do mundo difere substancialmente de todos os antecessores, com os quais estava em sério desacordo. Platão foi o criador da ideia de forma, acreditava que havia um mundo de ideias perfeitas (formas ou arquétipos platônicos), dos quais o nosso mundo é uma cópia imperfeita. O mundo “real” era para Platão, o mundo das ideias. Mas como Platão jamais afirma que os objetos em torno a nós são produto da mente, também difere das posições posteriores do Idea-



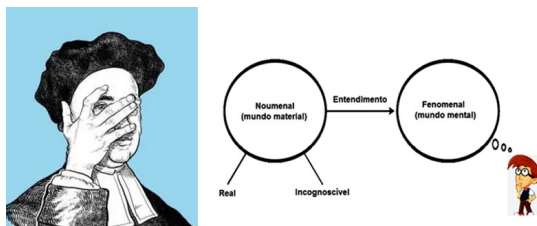
**Figura 3:** Platão e o mundo natural. Os sólidos regulares da imagem da direita foram tentativamente associados por ele aos quatro elementos de Empédocles, formando o mundo imperfeito no qual vivemos. Sem saber muito bem o que fazer com o dodecaedro, o atribuiu às constelações do céu. No entanto, as formas perfeitas do mundo real permaneceriam num plano diferente.

lismo (vide a seguir). Platão procurou associar os elementos fundamentais da realidade física aos sólidos regulares (ou platônicos), dando assim um novo cariz à doutrina dos elementos de Empédocles. O platonismo foi ofuscado por séculos em favor das doutrinas aristotélicas (as quais não acrescentaram muito ao problema da constituição do mundo físico), mas ressurgiu com força cada tanto, como poderemos apreciar nas seções seguintes.

É evidente que há inúmeras coisas que não foram incluídas aqui, mas temos agora a base para discutirmos a evolução das ideias a respeito do mundo natural para chegarmos depois à situação atual, nos começos do século XXI.

## 2 O debate durante o Iluminismo

Dar um “pulo” de quase 2000 anos é sem dúvida arriscado, já que houve um grande número de tentativas com sucessos e fracassos para estabelecer a natureza material ou mental do mundo, a maioria esquecidas no tempo. Mas com o chamado Iluminismo decorrente da Revolução Científica, no século XVII, o problema da realidade e a natureza dos objetos do mundo é seriamente considerado e debatido num contexto diferente, onde as evidências mais do que as doutrinas têm um papel fundamental. Porém são ainda os filósofos os que levam adiante o debate, começando com as ideias de John Locke (1632-1704), cuja posição a respeito da percepção e seu papel na formação da imagem do mundo e da consciência estimulou vários trabalhos posteriores. Nos seus trabalhos



**Figura 4:** Esquerda: Berkeley praticando sua máxima “ser é ser percebido”. Direita: o esquema kantiano da realidade e suas manifestações, dentro do denominado Idealismo Transcendental.

Locke admite que existe um mundo exterior independente da mente, em uma espécie de acerto entre Aristóteles e Descartes, mas também afirma que como o conhecimento empírico tem sempre um grau de incerteza, sempre haverá aspectos do mundo que não poderão ser confirmados além de qualquer suspeita. Locke é considerado um pioneiro do Empirismo, corrente científica que propõe que todo conhecimento deriva da experiência e que ficou identificada principalmente com as Ilhas Britânicas.

Na sequência, o bispo George Berkeley (1685-1753) desenvolve as consequências do Empirismo de Locke até o fim. Berkeley considera evidente que, se todas as ideias são produto da percepção da mente, então o ser e o ser percebido são a mesma coisa, ou em latim: *Esse est percipi*. Esta posição converte logo os objetos do mundo físico em produtos da mente do observador, ou seja, funda um Idealismo radical com sérias consequências em potencial para as Ciências [5]. A primeira e principal é que converte a matéria em uma abstração desnecessária. Se para o atomismo a mente é produto da matéria, para Berkeley a matéria é produto da mente.

Não é nada fácil descartar o Idealismo de Berkeley definitivamente, embora leve a problemas sérios. Um deles é que a existência simultânea de todo o mundo físico exige a presença de algo como um Deus-observador, o qual resulta difícil de aceitar. Por outro lado, veremos que a moderna versão da Física do micro-mundo parece conter elementos idealistas que pareciam descartados, de tal forma que o Idealismo forma parte do debate da interpretação do mundo ainda hoje.

O último nome que contribui de forma decisiva para o campo idealista é o de Immanuel Kant (1724-1804). Kant deu várias contribuições im-

portantes para este problema nas suas obras, e o conjunto passou a ser denominado Idealismo Transcendental. Kant separa os objetos “em si” (*noumena*) das suas manifestações (*phenomena*) que a mente processa. Assim, limita o mundo material ao conhecimento das suas manifestações, já que é inocognoscível em si próprio. Sua obra contém uma análise das categorias de pensamento que permitem organizar os fenômenos, expressadas sinteticamente assim:

“Espaço e tempo são estruturas dentro da qual a mente está restrita para construir sua experiência da realidade” Immanuel Kant, 1802

Kant analisa também a existência de juízos sintéticos e encontra que há coisas que produzem conhecimento a priori, sem intervenção de qualquer experiência empírica. Isto abre a possibilidade de conhecer ao menos uma fração da realidade sem experimentá-la diretamente, tendo como exemplo os resultados matemáticos.

A maturidade da Física Clássica atingida no século XIX deixou em boa medida para trás estas controvérsias, já que a maior parte dos Físicos adotou uma posição materialista-realista e muitos insistiram no Empirismo como conceito fundacional. Ernest Mach (1838-1916) considerava, por exemplo, o conceito kantiano de *noumena* como “perigoso”, porque introduzia elementos metafísicos que, segundo ele, eram inaceitáveis. Mas veremos que o debate ressurgiu um século depois para provocar uma profunda reflexão a respeito da realidade.

### 3 A Mecânica Quântica entra em cena

Enquanto a Física lidou com fenômenos à escala humana, a principal fonte de conhecimento empírico ficou restrita aos sentidos e experiências diretas. Embora houve uma progressiva matematização da descrição física, com o desenvolvimento dos conceitos mecânicos e térmicos que hoje resultam bem conhecidos, nunca foi difícil estabelecer o significado dos mesmos. Por exemplo, a ideia de “velocidade” sofreu poucos ajustes em séculos, e embora as teorias que envolvem a dinâmica de corpos fossem mudando, o faziam sem alterar ou questionar em extremo estas grandezas. Antes, a questão era a de estabelecer as leis que seguem e conferir sua validade. A atribui-



ção de significado concreto para as quantidades e grandezas principais e auxiliares numa teoria, no contexto da mesma, leva o nome de interpretação, isto é, dar sentido físico às quantidades matemáticas abstratas. Assim, e levando em conta que houve discussão em alguns casos pontuais, a Física Clássica não teve problemas sérios para achar interpretações, e em boa parte dos casos estas últimas foram imediatas ou quase.

Já nos começos do século XX a exploração do mundo do muito pequeno, começada por Rutherford e Thompson com as descobertas do núcleo atômico e o elétron respectivamente, apresentou um desafio maiúsculo para os físicos. A matéria em escala microscópica não se comportava como as bolas e pedras da Física Clássica. Isto levou ao primeiro modelo de Bohr, onde a estranha noção de quantização das energias dos elétrons no átomo foi introduzida, na sequência da hipótese de Max Planck em 1900 que introduziu a absorção e emissão de energia em “pacotes discretos” para resolver a chamada catástrofe do ultravioleta [6].

Se no princípio o modelo de Bohr era mais do que nada uma extensão semi-clássica das órbitas planetárias aplicada ao átomo, a aplicação para outros fenômenos microscópicos levou a questionamentos e desenvolvimentos que chacoalharam os alicerces das ciências físicas e até hoje o fazem. Vejamos os principais pontos da teoria e as consequências para a questão da realidade do mundo físico.

Em contraste com a Física Clássica, onde a medida das variáveis como posição e impulso pode ser melhorada sem limites, tanto com a utilização de aparelhos tecnologicamente superiores quanto pela repetência de muitas determinações para diminuir o erro, na Mecânica Quântica esta precisão tem um limite inferior absoluto. As variáveis como a posição  $x_0$  e o momento linear de um objeto quântico  $p_0$  (chamadas de conjugadas) não podem ser medidas simultaneamente com precisão arbitraria, já que o produto dos erros das duas variáveis é sempre maior que o quantum de ação  $\hbar = h/2\pi$ . Em termos das dispersões dessas variáveis temos

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar, \quad (1)$$

conhecida como relação de incerteza, uma delas para cada direção espacial. Ou seja, um objeto quântico não pode ser localizado com grande precisão sem que seu momento adquira uma disper-

são cada vez maior, e vice-versa. A Natureza não permite reduzir o desvio padrão de  $x_0$  e  $p_0$  além de um valor mínimo. De forma análoga, a dispersão da energia  $E$  medida a um tempo  $t$  deve satisfazer

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar. \quad (2)$$

Estas relações, que limitam a precisão do conhecimento da dinâmica de elétrons e partículas microscópicas, levam a questionar a natureza das variáveis quânticas: as partículas não podem estar totalmente localizadas com momento finito, ou ter velocidade determinada: portanto, era necessária uma descrição diferente, para alguns evidentemente não determinística (no sentido de especificar variáveis probabilísticas e não clássicas) que admitisse esta novidade introduzida pelas relações de incerteza.

Os físicos mais jovens foram muito ousados na construção da teoria, tal como o próprio Heisenberg na discussão das relações eqs.(1) e (2). Heisenberg, inspirado na descrição das transições atômicas do átomo de hidrogênio, desenvolveu a chamada mecânica matricial, que permitia níveis de energia discretos nesse problema e era compatível com as relações de incerteza. Mas suas ideias não só inspiraram “repulsão” em Einstein e a velha guarda, também não conseguiram emplacar na comunidade simplesmente porque os físicos não dominavam o cálculo matricial e estranharam do formalismo [7].

A tentativa de Erwin Schrödinger (1887-1961) teve mais sucesso, principalmente porque utilizou ferramentas muito mais palatáveis para exprimir a descrição almejada. Schrödinger formula a dinâmica quântica em termos de uma função de onda  $\Psi$  (cujo nome já é um problema...) que satisfaz a equação

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + (E - V) \Psi = 0. \quad (3)$$

À qual chegou depois de estudar a quantização de um problema de autovalores [3] partindo da ação da Mecânica Clássica. Mas os elementos quânticos não tão somente se limitaram a isto, também precisou incorporar a relação de Louis de Broglie ( $\lambda = h/p$ ) que atribui propriedades ondulatórias às partículas de impulso  $p$ , que se põe de manifesto na difração de elétrons e que é normalmente conhecida como dualidade. Temos aqui uma série de problemas a serem resolvidos:

o primeiro é que a função de onda não satisfaz uma equação de onda. A eq.(3) é uma equação de difusão, com tempo imaginário, mas isto foi minimizado pelo fato que Schrödinger formulou uma equação não-relativística, enquanto as ondas são intrinsecamente relativísticas (invariantes de Lorentz). Porém, não houve como dar um significado direto para a função de onda  $\Psi$ : em geral, ela tem uma componente imaginária, o qual mostrava que não poderia ser uma onda “real”. Em soma, a confusão foi grande desde o princípio e demoraria a ser resolvida.

Além das dificuldades flagrantes com  $\Psi$ , o caráter probabilístico que paira na descrição contido nas relações de incerteza levaram a Max Born (1882-1970) a procurar uma interpretação para a função de onda que, desde sua publicação, ficou fixa como a ortodoxia pela aceitação do grupo de Copenhagen. Born postulou que o quadrado da função de onda representava a probabilidade de achar a partícula descrita numa região do espaço  $(x_1, x_2)$  para um dado tempo, isto é

$$P(x) = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi(x)|^2 dx. \quad (4)$$

Assim, o quadrado eliminava o potencial da indesejável parte imaginária de  $\Psi$ , e as relações de incerteza eram totalmente incorporadas. A variável  $\Psi$  foi assim identificada com uma onda de probabilidade. Mas isto não foi satisfatório nem para Einstein, nem para o próprio Schrödinger. Eles e outros reagiram muito mal ao caráter probabilístico como característica dos objetos quânticos.

A crítica principal estava dirigida à impossibilidade de descrever com acurácia um fenômeno microscópico, tendo que se contentar com um conjunto de probabilidades decorrentes da interpretação de Born construídas com as funções de onda solução da eq.(3). Além de Schrödinger e Einstein, o personagem central do lado dos inovadores foi o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962). Bohr assumiu o papel de porta-voz e mentor da nova teoria, discutindo com Heisenberg, Pauli e toda a nova geração o significado e cada ponto obscuro e foi o antagonista principal dos “realistas” que a questionavam. Seus embates e discussões públicas e particulares com Einstein ficaram na História. Vejamos o porquê desta controvérsia no seu cerne, já que terá muito a ver com a questão que motiva este artigo.

Certamente a Mecânica Quântica está longe de ser intuitiva, e resulta absurda se olhada com um viés tradicional. A objeção mais séria em contra da Mecânica Quântica formulada por Einstein e Schrödinger e de Broglie entre outros, dizia que um resultado probabilístico não é o que a Física deveria oferecer, mas antes uma verdadeira descrição da Realidade, ou seja, dos objetos quânticos devia ser desenvolvida. Embora aceitaram o sucesso da Mecânica Quântica, afirmaram que a teoria deveria estar incompleta, e esperavam que ela fosse substituída por uma teoria mais fundamental, da qual ela emergiria como uma versão estatística muito geral. Este grupo esperava restaurar a situação em que os quanta poderiam ser descritos como entidades reais com propriedades definidas o tempo todo.

Um exemplo notável de experimento mental que põe de manifesto os questionamentos é o do chamado gato de Schrödinger. A situação exposta por Schrödinger é a de uma caixa com um vidro de veneno acionado aleatoriamente por um decaimento radioativo. Um gato é colocado na caixa e, depois de certo tempo, abre-se para ver se foi ou não envenenado e morto. A questão é que, segundo a Mecânica Quântica, o estado do gato é descrito como uma mistura dos estados “vivo” e “morto” antes de abrir a caixa. Sua função de onda é

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{morto}\rangle, \quad (5)$$

onde os coeficientes resultam da normalização da probabilidade. Agora bem, Schrödinger explicitamente coloca um gato, bicho macroscópico e familiar, para mostrar que a descrição quântica que diz que o gato está vivo e morto ao mesmo tempo é absurda. Não podemos simplesmente dizer que não sabemos se está vivo ou morto, mas que realmente está em um dos dois estados, já que isto é incompatível com a teoria quântica. Não vale aplicar as probabilidades clássicas e extrapolar, porque isto seria inconsistente com a nova teoria. Agora vemos em toda sua extensão por que a descrição quântica espantava os físicos: falar de um elétron e não de um gato faria a eq.(5) passar como aceita, substituindo  $|\text{vivo}\rangle$  e  $|\text{morto}\rangle$  por  $|\uparrow\rangle$  e  $|\downarrow\rangle$  dos estados de spin, por exemplo. Isto último não espantaria ninguém, embora o cerne do problema é exatamente o mesmo.

## Procura-se Vivo e Morto



**Figura 5:** O gato de Schrödinger e seu trágico destino: há uma probabilidade  $P$  de ficar vivo e uma probabilidade  $(1 - P)$  de estar morto quando a caixa for aberta, mas o importante é que ele precisou estar vivo e morto antes da caixa ser aberta segundo a Mecânica Quântica. Os estados “vivo” e “morto” estão misturados antes da abertura, e colapsam para um deles quando a medida é efetivada. Schrödinger imaginou esta situação com algo bem conhecido e macroscópico (o gato) para mostrar que a interpretação ortodoxa de Copenhague é absurda, já que ninguém se espanta se a mesma coisa acontece com elétron com *spin up e down*, como se não fosse um grande problema.

Os ataques e questionamentos dos “realistas” provocaram que as versões posteriores da Mecânica Quântica fossem ainda mais radicais, ainda mais afastadas da Física Clássica e sua Filosofia. Por exemplo, em 1929 Bohr afirmava que a Mecânica Quântica não versava sobre a Realidade, mas sim sobre o que pode ser dito sobre a Realidade [8]. Pior ainda, esta última Realidade foi uns anos mais tarde por ele negada, no sentido de que o formalismo da Mecânica Quântica não descreve nenhuma “Realidade quântica profunda”, negando-lhe à teoria qualquer caráter ontológico, e reduzindo-a a tarefa do estudo e previsão de fenômenos. Isto último é o oposto que afirmavam Einstein e outros, que a Física devia ser uma descrição de um mundo real, não um mero instrumento de cálculo. Por último, segundo a escola de Copenhague, toda a definição das propriedades de um sistema acontecem no ato da medida, quando de todos os possíveis estados com probabilidades calculáveis, a medida força a definição de um deles por meio do chamado colapso

da função de onda. Isto pode ser considerado misticismo puro: não há na Mecânica Quântica nenhuma menção de como isto acontece, não existe nenhuma indicação de como calcular este colapso, e realmente parece com um ato de magia. Mais ainda, físicos muito gabaritados como o Prêmio Nobel húngaro Eugene Wigner (1902-1995) chegaram à conclusão que o colapso se produz na mente do observador. Desta forma, a porta para um Idealismo subjacente ficou aberta. E para piorar de vez, como os objetos macroscópicos estão evidentemente compostos de objetos quânticos, devemos aceitar uma ontologia inconsistente: se os micro não têm existência até ser medidos, por que existem os macro? [9].

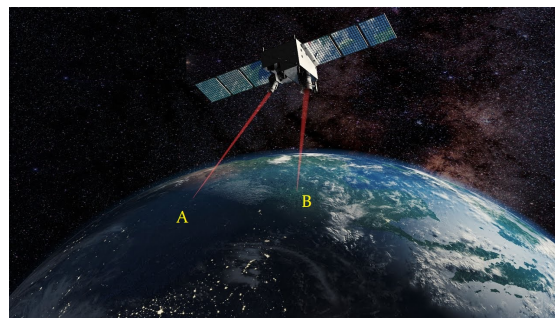
Uma das tentativas pontuais mais famosas de arguir em favor de um caráter realistas objetos físicos, provando que a Mecânica Quântica era falsa ou incompleta, é o trabalho de Einstein, Podolsky e Rosen [10]. Os três imaginam um experimento que faria possível trazer o que eles chamaram de “elementos da realidade” para alcançar uma descrição completa da Natureza. De fato, um ingrediente importante do argumento do experimento de EPR era a localidade da Realidade, esta última vista como uma propriedade geral da descrição do mundo. A proposta consistia em considerar um par de partículas em estados inicialmente correlacionados. Desta forma, medir a primeira partícula permitia prever o resultado da segunda. Isto seria feito quando as duas partículas estivessem a uma distância suficientemente grande, de tal forma que a comunicação causal entre elas fosse impossível. Da medida da primeira partícula, eles deduziam que a variável de interesse da sua companheira podia ser conhecida com certeza sem mesmo ter sido medida, contrariando a descrição da Mecânica Quântica. Este trabalho [10] apareceu junto com uma réplica de Bohr na mesma edição dizendo que a interpretação de EPR não atingia realmente os postulados das variáveis complementares e que a Mecânica Quântica não resultava incompleta como argumentado. Mas Einstein posteriormente focou sua atenção na aparente ausência de causalidade, que seria necessária para que a correlação se mantivesse, e insistiu na construção de uma quântica dentro da classe de teorias construídas com variáveis ocultas locais [11], quantidades ainda desconhecidas que devem ser introduzidas para trazer

a Mecânica Quântica para o reino do que Einstein e outros considerassem aceitável, o realismo local. Mas, de alguma forma, o tiro de Einstein saiu pela culatra...

Esta última afirmação decorre da constatação conseguida, depois de poucas décadas, da realização de experimentos reais do tipo proposto por EPR. Utilizaram-se fótons, elétrons em estado de spin total zero que viajaram em direções opostas e outros sistemas. Sempre foi a Mecânica Quântica a que levou à predição correta, sem importar a distância entre as partículas ao momento da medida. Uma última versão no espaço da mesma ideia foi publicada em 2017 por um grupo chinês que utilizou o satélite Micius para transmitir os pares de fótons “emaranhados” para duas estações em terra separadas por 1200 km. De novo, a chegada quase simultânea dos fótons em cada estação e a medida de um deles não estragou a correlação misteriosa (no sentido de Einstein): os fótons não se comunicam, mas formam um conjunto que não pode ser isolado. Assim, a objeção de Einstein contra a causalidade, na verdade, é a constatação que os objetos quânticos têm um caráter não-local, decorrente do chamado emaranhamento das fases das funções de onda.

Esta última afirmação decorre da constatação conseguida, depois de poucas décadas, da realização de experimentos reais do tipo proposto por EPR. Utilizaram-se fótons, elétrons em estado de spin total zero que viajaram em direções opostas e outros sistemas. Sempre foi a Mecânica Quântica a que levou à predição correta, sem importar a distância entre as partículas ao momento da medida. Uma última versão no espaço da mesma ideia foi publicada em 2017 por um grupo chinês que utilizou o satélite Micius para transmitir os pares de fótons “emaranhados” para duas estações em terra separadas por 1200 km. De novo, a chegada quase simultânea dos fótons em cada estação e a medida de um deles não estragou a correlação misteriosa (no sentido de Einstein): os fótons não se comunicam, mas formam um conjunto que não pode ser isolado. Assim, a objeção de Einstein contra a causalidade, na verdade, é a constatação que os objetos quânticos têm um caráter não-local, decorrente do chamado emaranhamento das fases das funções de onda.

Em suma, a Mecânica Quântica prediz correlações de alcance infinito (que não decaem com



**Figura 6:** O emaranhamento de fases sendo testado pelo satélite chinês Micius no espaço [12]. As estações A e B estavam separadas por mais de 1200 km, no entanto, os fótons que chegaram conservaram a correlação.

a distância), verificadas em experimentos terrestres e espaciais. O mundo microscópico parece ser não local contrariando Einstein. Esta estranha propriedade está ligada à descrição quântica probabilística, já que as fases embaralhadas da função de onda não se independizam nunca.

#### 4 Onde estamos hoje?

Chegando ao final do artigo cabe retomar a questão de fundo e reconsiderar o que aprendemos da realidade do mundo físico. Duas posturas encontradas coexistem, o Materialismo, que faz a mente, a consciência e tudo mais um produto da matéria organizada; e o Idealismo que diz o oposto: a mente cria o mundo e seus objetos. Embora possamos descartar as versões mais simples do Idealismo e do Materialismo, não podemos hoje taxativamente nos inclinar por nenhuma numa análise a fundo.

Enquanto o debate se manteve no plano filosófico “puro” até o último século, a construção da Mecânica Quântica como necessidade alternativa ao mundo Clássico que não consegue lidar com a microfísica trouxe questionamentos concretos à realidade materialista, já que embora não podemos afirmar que é uma teoria Idealista, pelo menos traz elementos que a deslocam nessa direção. Isto é particularmente verdadeiro na formulação tardia, vista por alguns como um apanhado místico inconsistente (mas que funciona, sem que saibamos exatamente como, Bunge [13]). Os físicos não são muito chegados em questionamentos fundamentais, desde que estão em posse uma ferramenta comprovada que produziu resultados



corretos cada vez que foi aplicada em quase um século. Mas isto não diminui nem um pouco o sabor agridoce que esta situação produz para quem a estuda a fundo [14, 15]. Ou nos dedicamos a resolver os paradoxos ou ficaremos sempre na dúvida a respeito da natureza do que nos rodeia.

Como sugestão final, este tema é muito atrativo e formativo para os estudantes. Muito mais que os exercícios formais do movimento, termometria e demais assuntos da Física. Reservar um tempo curto para exposição e debate na sala de aula, começando, por exemplo, por uma leitura aprofundada das Refs. [2] e [3] seria muito formativo, fora das práticas normais que os estudantes conhecem e detestam, e os confrontaria com um verdadeiro problema de enormes dimensões, ao qual gerações de pensadores dedicaram seus melhores esforços. Longe de se tratar de um tecnicismo para passar no Vestibular, estaria recuperando a essência da Educação perdida há tempos, e os aproximando da Academia de Platão em Atenas nos primórdios do pensamento Ocidental. Achamos que vale muito a pena.

---

### Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath ([foton@iag.usp.br](mailto:foton@iag.usp.br)), Professor Titular no IAG-USP é graduado em Física (1985), Doutor em Ciências em 1989 na Universidad Nacional de La Plata (Argentina) e Livre-Docente pela USP em 1997. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de Educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na University of Arizona (1998-1999). Fundador e Editor da Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP.

### Referências

- [1] D. C. Lindberg, *Los Inicios De La Ciencia Occidental* (Paidós, 2002).
- [2] J. E. Horvath et al., *A Natureza do mundo físico: do que é feito o Universo? Volume 1* – *Dos pré-Socráticos a Revolução Científica* (Livraria da Física, São Paulo, 2023).
- [3] J. E. Horvath et al., *A Natureza do mundo físico: do que é feito o Universo? Volume 2* – *Do Iluminismo a Ciência Contemporânea* (Livraria da Física, São Paulo, 2023).
- [4] B. Russel, *História do pensamento ocidental* (Ediouro, Rio de Janeiro, 2001).
- [5] B. Duignan, *George Berkeley*, in *Encyclopedia Britannica* (2024). Disponível em <https://www.britannica.com/biography/George-Berkeley>, acesso em fev. 2024.
- [6] J. E. Horvath, *As estrelas na sala de aula* (Livraria da Física, São Paulo, 2019).
- [7] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York City, 1966).
- [8] A. Petersen, *The Philosophy of Niels Bohr*, *Bulletin of the Atomic Scientists* **19**(7), 8 (1963).
- [9] J. E. Horvath, R. R. Fernandes e T. E. Idart, *On the ontological ambiguity of physics facing reality*, *Astronomische Nachrichten* **344**(1-2) (2023).
- [10] A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, *Physical Review* **47**(10), 777 (1935).
- [11] D. Bohm, *Wholeness and the Implicate Order* (Routledge, Oxfordshire, 1980).
- [12] J.-G. Ren et al., *Ground-to-satellite quantum teleportation*, *Nature* **549**(70-73) (2017). [ArXiv:1707.00934](https://arxiv.org/abs/1707.00934).
- [13] M. Bunge, *Física e Filosofia* (Perspectiva, São Paulo, 2007).
- [14] L. de la Peña, *Introducción a la Mecánica Cuántica* (Ediciones Científicas Universitarias, México, 2010).
- [15] N. Pinto-Neto, *Teorias e interpretações da mecânica quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2023).