

Determinismo e Indeterminismo: uma ponte da física à filosofia*

Determinism and indeterminism: a link from physics to the philosophy

Ramiro Délio Borges de MENESES

Universidade Católica Portuguesa – Pôrto/Portugal

Resumo

No domínio macroscópico, as funções das leis dinâmicas objectivas recebem o seu fundamento no determinismo causal das formas imanentes dos entes. Porém, no âmbito microscópico, surgem as leis da natureza como enunciados estatísticos, porque radicam no indeterminismo objectivo da partícula-onda *in fieri*. Contudo, a discussão, neste artigo, do princípio de incerteza de W. Heisenberg conduz-nos a fundamentação epistemológica e ontológica das leis da natureza.

Palavras-chaves: Determinismo, lei da física e incerteza de W. Heisenberg.

Abstract

In this article, I explain the macroscopic aspect of the functions of Nature's Laws that they are based on actual causality from *n*-physic structures. However, in the microscopic situation, the Nature's Laws are statisticals and subjects sentences, that in metric and objective indeterminism of wave-particle duality *in fieri* are ground. Meanwhile, we propose the philosophical foundations of properties of Nature's Laws and your epistemological discussion, according to the W. Heisenberg's principles condition. The uncertainty principle describes limits imposed by nature on the precision of simultaneous measurements of the position and momentum of an object.

Keywords: Determinism, Nature's Laws, and W. Heisenberg principle.

Introdução

Antes de 1927, considerava-se, como ensinamento *communis* da natureza física, o

“determinismo” por pressuposto indispensável na leitura epistemológica das leis da física clássica (Galileu e Newton). Assim, ontologicamente pensando, a determinação refere-se como acto do

^(*) Para celebrar os cem anos da teoria da relatividade restrita de A. Einstein.

ente activo que condiciona o efeito ou o termo da acção física a que corresponde, também, a lei-relação entre os fenómenos (BORGES DE MENESES, 1986, p. 342).

Segundo a gnoseologia, o determinismo seria, para a Mecânica Clássica, a *conditio sine qua non* do saber científico. A ciência física ou é causalística ou não o é *sub eodem aspectu*.¹

Passaremos do determinismo ao indeterminismo que foi expresso a partir do “princípio da incerteza” de W. Heisenberg, formulado em 1927, abrindo caminho à Mecânica das Matrizes, com nova formulação quântica para a Mecânica Ondulatória. Com efeito, abriu-se o caminho para o indeterminismo das leis da física, surgindo uma mecânica renovada pelo carácter holístico e pelo carácter probabilístico (BORGES DE MENESES, 2001, p. 400). De acordo com as “relações de incerteza” de W. Heisenberg, poderemos, em princípio, definir com rigor a posição da partícula-onda num dado momento. Mas, esta certeza implica a indeterminação da velocidade ou da quantidade de movimento ($p = m \cdot v$).

Porém, a ponte entre o determinismo e o indeterminismo reside no “dualismo da onda-corpúsculo”, tal como L. De Broglie o referiu. Após o estudo do Indeterminismo, surgirá a interpretação de Copenhague sobre as incertezas quânticas, na procura de uma fundamentação gnoseológica e ontológica para a nova formulação da física moderna, que determinou novo rosto e nova expressão para o comportamento da partícula-onda.

1 – Determinismo: aspecto físico

O ideal da ciência física estava animado e fundamentado pela concepção determinística de que

a natureza funciona segundo leis, homogéneas e invariáveis. A natureza constitui um decurso no espaço e no tempo, cuja trajectória objectiva seria a meta indiscutível de toda a ciência exacta. Assim, se poderá ver na seguinte descrição da Dinâmica de I. Newton: no percurso circular, a velocidade de um corpo diminui, em módulo, devido à força gravítica, que agora realiza um trabalho sobre esta, fazendo variar a sua energia cinética. Contudo, o trabalho da força gravítica é igual ao simétrico da variação da energia potencial gravítica. O corpo inverte o seu movimento no ponto em que a sua energia cinética é momentaneamente nula. Se W_p é o trabalho da força gravítica e ΔE_p a variação da energia potencial gravítica, teremos, em percurso circular:

$$\Delta E_c = W_p = -\Delta E_p = -mg \cdot h.$$

A altura – h – do ponto P_2 será dada por:

$$h_{P_2} = -\frac{(0 - E_{c2})}{mg} = -\frac{1/2 m v_2^2}{mg} = \frac{v_2^2}{2g},$$

$$\text{sendo: } h_{P_2} \cdot 2g = v_2^2$$

Ou, então, virá, para a velocidade:

$$v_2 = \sqrt{2gh_{P_2}}$$

A altura do ponto P_2 pode, também, ser obtida por: $h_{P_2} = R(1 - \cos \theta)$, seguindo, uma lei geral da trigonometria.

Sendo R o raio da trajectória circular, θ é o ângulo entre a linha que une este ponto ao centro da trajectória e a vertical. Daqui se determina segundo a trigonometria:

$$\cos \theta \equiv \frac{R-h}{R}$$

Por aqui se poderá verificar que as leis, que definem o curso da natureza, com rigor e precisão

⁽¹⁾ A ciência física seria impossível se o curso da natureza não estivesse rigidamente determinado. Assim, o método usado pela ciência clássica articula-se em dois passos escalonados e estreitamente unidos entre si. Primeiramente, isolam-se e estudam-se alguns processos naturais com as experiências adequadas e pertinentes e, secundariamente, expressam-se em equações matemáticas a lei enunciada descritivamente. Logo, este método científico funcionava ao serviço daquilo que se pensava constituir o fim da física, calculando todo o decurso do Universo a partir de alguns dados. O fim seria então encontrar todas as leis da Natureza, que tivessem um sentido possível, com um cálculo semelhante, ao menos quanto ao princípio. (Heisenberg, 1978, p. 104).

matemática, seguem um processo determinado e eram, fenomenologicamente, requisito indispensável e garantia única para afrontar um estudo científico da natureza (HEISENBERG, 1978, p. 105-106). Com efeito, a concepção determinística implica o princípio de causalidade, podendo-se calcular e prever o estado do sistema em qualquer instante, isto é, o futuro do sistema, o qual pressupõe, de um lado, a possibilidade de isolar um sistema físico, do outro, determinar todos os seus elementos constitutivos e, ademais, ao tratar-se do mesmo sistema, estudando-o num momento posterior. A. Einstein sustentou que as equações diferenciais são a expressão insubstituível do determinismo, isto porque as estas equações estabelecem *naturaliter* uma ligação entre o estado do sistema, num instante dado, e o momento imediatamente posterior (EINSTEIN, 1945, p. 24-27).

Todavia, pelo determinismo da física clássica, ao estabelecer-se que conhecido o estado presente de um sistema, poderemos calcular o estado futuro do mesmo e propõe-se a “predicibilidade” como condição da ciência para obter o mencionado – *finis operationis* –. Este exige que o decurso da natureza esteja determinado, ou seja, definido pela “causalidade actual”. O determinismo refere o fenómeno físico *in actu*. A partir de tal causa segue-se invariável e necessariamente um tal efeito – *omne ens agit propter finem* –. O estado actual de um sistema é causa que determina indefectivelmente o estado posterior do mesmo sistema físico.

Consequentemente, o determinismo, apresentado pela física clássica, desde Laplace até Einstein, passando por Newton, entende-se como a doutrina física, segundo a qual existem leis naturais fixas, que determinam o estado de um sistema (HEISENBERG, 1955, p. 34-36).

⁽²⁾ O determinismo causal (ontológico) revela-se, no ente físico, como relativo, condicionando-se por variados elementos e co-causas na sua evolução. Contudo, a forma imanente dos corpos é espaço-temporal e finita, sendo-o igualmente a sua actividade, sem se esquecer que a permanência das formas dinâmicas será “analógica”. Como as leis da Física se traduzem por relações quantitativas, entre variáveis e constantes, infere-se que são a expressão directa e imediata da causalidade formal, a qual é “simétrica” ontologicamente, dado revelar a relação entre estruturas proporcionadas, que são os n-efeitos significativos de variáveis quantitativas de n-actividades de n-entes dinâmicos. Pela causalidade formal, as leis determinísticas passam a ser uma correlação entre efeitos activos (Borges de Meneses, 1986, p. 343-344).

O determinismo clássico goza de quatro postulados, que se podem enumerar como qualidades gnoseológicas:

- 1.1 **Objectividade:** Considera-se o mundo como independente do cientista. O determinismo é expressão ontológica, fundamentada na “causalidade” das leis da física;
- 1.2 **Racionalidade:** Devido às potências operativas do físico, surge a correlação entre a causa e a razão lógica (equações diferenciais);
- 1.3 **Matematicidade:** O modo como se traduz a realidade física pelo modelo formal (matemático) e ainda a sucessão necessária e suficiente. Assim, se poderá asseverar (SELVAGGI, 1964, p. 108-112) pela equação diferencial de 2ª ordem será:

$$F = \frac{dp}{dt} \rightarrow dp = Fdt$$

$$\int dp = \int Fdt = p - p_0 = mv_2 - mv_1$$

Porém, o único limite existente provém da imprecisão da observação e da imperfeição dos instrumentos. Assim, surge como limite prático, não teórico, e como limite da actuação científica, mas não limite de princípio.

O determinismo refere-se mais à esfera gnoseológica do que ao domínio ontológico. Contudo, o “determinismo” necessita de uma fundamentação ontológica.²

O determinismo clássico é preciso, macroscópico e aproximativo nas leis da Mecânica de Newton, fundamentando-se na causalidade material e formal dos entes físicos.

2 – Dualismo: uma ponte em física

Segundo L. De Broglie, o dualismo da partícula-onda, que fundamenta a sua teoria, refere-se a uma mesma coisa, muito embora sob aspectos diversos e complementares.

Porém, a Mecânica Ondulatória e a dos Corpúsculos existiam, desde o século XVII, mas aplicadas em distintos exemplos. Com efeito, a questão surge quando se descobrem, na natureza, os fenómenos que mostram que um mesmo objecto aparece umas vezes, quer como onda quer como corpúsculo, surgindo ora discreto, ora contínuo.

Porém, A. Einstein descobriu o efeito fotoeléctrico, que assentava na luz monocromática, que incide numa placa metálica, arrancando electrões. A intensidade e a frequência da luz incidente podem variar, bem como a diferença de potencial entre a placa metálica e o colector. Uma vez que os electrões se movem de forma livre no átomo, requerem uma energia mínima para serem arrancados, de dentro para fora, do metal (Cf. VON NEWMAN, 1955, p. 16-24).

Para fundamentar o efeito foto-eléctrico, A. Einstein serviu-se do *quantum actionis* de Max Planck ($\epsilon = h \cdot \nu$; $\epsilon / \nu = h$), tendo considerado a luz ($h\nu$) como pacote de energia de corpúsculos e interpretou o efeito como resultado de um choque entre fotão e electrão, “verificando”, pela primeira vez, o “dualismo onda-corpúsculo” na radiação. Assim, a explicação de A. Einstein introduzia, na radiação, a mais flagrante contradição segundo a leitura de W. Heisenberg (1982, p. 44-45).

Mais tarde, em 1923, a descoberta do “efeito de Compton” voltou a suscitar a exigência para considerar a luz como natureza corpuscular. Da maneira como certos efeitos produzidos pela luz (difracção, interferência, etc.) explicam-se se se considera de natureza ondulatória e os outros que a considera de natureza corpuscular. Mas, o problema complicou-se, quando De Broglie estendeu o dualismo à matéria

(em 1924), associando a todo o corpúsculo em movimento uma onda material de comprimento proporcional à massa e à velocidade do corpúsculo. Após a experimentação de Davisson e Germer, a natureza mostra-se com um duplo rosto. A matéria não pode consistir simultaneamente em ondas e partículas.

A opção para buscar o modo de conciliar os modelos surge ante o intento de reduzir todos os fenómenos a um dos dois. A onda, extensa e divisível, e o corpúsculo, concentrado e indivisível, em sentido físico, não são compatíveis. A conciliação de ambos os modelos foi realizada por Max Born (1926) ao reler a equação de Schrödinger:

$$H\psi = E\psi$$

Segundo a mais importante equação da Mecânica Quântica, a função de onda ψ não possui “mediato” significado físico, dado que contém o número imaginário, ($i = \sqrt{-1}$) mas $|\psi|^2$ apresenta significado físico. Segundo Max Born, $|\psi|^2$ a não produz densidade eléctrica, como pensava Schrödinger; mas, antes, uma “densidade de probabilidade”, que determina a probabilidade de encontrar um electrão num ponto do espaço num dado momento.

A maioria dos físicos admite como compatível com os fenómenos, em que semelhante dualismo é patente, a interpretação dada por Max Born: o quadrado da função de onda $|\psi|^2$ é proporcional à probabilidade de encontrar a partícula no ponto de coordenadas e no tempo (HEISENBERG, 1982, p. 54).

A onda expressa só a probabilidade de encontrar o corpúsculo num dado lugar. Mas os dois aspectos conciliam-se bem.

Todavia, os dois fenómenos (partícula-onda) são descrições “complementares” de uma mesma realidade. Cada uma é parcialmente verdadeira e limitada com indeterminação intrínseca.

Nem uma, nem outra leitura podem evitar a “contradição”. Com efeito, se se têm em conta os

limites da aplicabilidade de tais modelos, assinalados pelo princípio de indeterminação, o conflito entre a imagem ondulatória e a corpuscular não implica contradição lógica.³

3 – Relações de Incerteza

A experiência de Heisenberg mostra que, em virtude da estrutura quântica da natureza, não se podem conhecer simultaneamente a posição e o momento de uma partícula com uma indeterminação inferior à constante h — h^{-4} . Assim, se demonstrou que não é possível determinar, às vezes, a posição e velocidade de uma partícula atômica com um grau de precisão arbitrariamente fixo (HEISENBERG, 1958, p. 9-10).

Se na experiência de Heisenberg se trabalha com um microscópio, é evidente que devem empregar-se proposições da óptica.

Como consequência lógica das relações de permutação do cálculo de matrizes, elaborado por W. Heisenberg em 1925, o princípio de indeterminação encontra-se na base da mecânica quântica. Tanto é assim que esta é aplicável unicamente se, e só se, existem as relações de indeterminação, de maneira que as referidas relações são condições necessárias:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/2$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h/2$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq h/2.^5$$

Com efeito, W. Heisenberg não encontrou as relações de indeterminação por casualidade. A imagem quântica do modelo planetário do átomo de N. Bohr e de Sommerfeld e o dualismo na radiação e na matéria mostravam o conflito da mecânica clássica ao aplicá-la aos fenómenos atômicos.

Mas, W. Heisenberg pensou que deveria haver algo de errado numa tal aplicação. Seguindo os passos de A. Einstein, que começou a análise crítica da física clássica, no domínio relativístico, foi atacando um conceito tão determinante como é o da “simultaneidade” dos acontecimentos.

Na verdade, W. Heisenberg iniciou a sua análise por um conceito elementar da mecânica: a trajectória de um corpo, que se move no espaço. A noção de trajectória de um electrão estava legitimada pelas experiências de Wilson.⁶

Mas como o espectro atômico e o espectro clássico de um sistema de electrões não coincidem, existia uma diferença entre a frequência orbital calculada segundo a teoria de Bohr e a frequência de radiação emitida. Utiliza-se, então, a luz com um comprimento de onda dessa ordem de grandeza. A mínima quantidade da luz utilizável é um fotão ($h\nu$). Todavia, a energia correspondente do fotão é tal que,

⁽³⁾ W. Heisenberg refere uma afirmação de N. Bohr que levanta o problema da dualidade, remetendo-a à estrutura unitária dos eventos físicos. Todo aquele que entendeu realmente a teoria quântica, jamais conceberá a ideia de falar aqui de um “dualismo” (HEISENBERG, 1987, p. 259).

⁽⁴⁾ Em concreto, são errôneas tanto as analogias ópticas como a da difracção da luz para um sistema de dupla natureza como a do microscópio por raios gama de Heisenberg. Nestes casos, o raciocínio é falaz, porque emprega proposições que pertencem à óptica, não à mecânica quântica. Várias fórmulas são implicáveis concretamente no caso de um fotão individual, dado que se refere a sistemas macrofísicos, formados por milhões de fotões de diferente comprimento de onda.

⁽⁵⁾ W. Heisenberg encontrou a mecânica. Mas, em 1926, Einstein disse a W. Heisenberg, numa prática muito interessante, que este estava no erro de acreditar que poderia iniciar a mecânica quântica, só descrevendo as quantidades observáveis, porque, a não ser que se obtenha a teoria, não saberá o que é observável. Somente a teoria diz o que é observável. Logo, W. Heisenberg captou o aspecto crítico de A. Einstein e, em 1927, apresentou uma resposta: o “princípio de incerteza quântica”.

A posição e o momento não existem simultaneamente no formalismo, no espaço de Hilbert, ainda que W. Heisenberg, nesse tempo, não usava o termo — espaço de Hilbert —. Não existe um — quantum actionis — observável teoricamente que, ao mesmo tempo, expresse a posição e o momento. Daqui se aúfere ser impossível observá-los simultaneamente. Uma “Gedankenexperiment” prova a consistência da teoria, mostrando que de facto é impossível medi-los. Heisenberg mostrou, primeiramente, por uma “Gedankenexperiment” que não se pode observar a posição e o momento ao mesmo tempo e então conclui, de forma absolutamente falsa, que, já que não podemos observar, não existem. (Von Wertsäcker, 1991, p. 10).

⁽⁶⁾ Poderemos ver, numa câmara de neve a trajectória de um electrão e, portanto, pensa-se que deve existir numa órbita no átomo. A referida órbita calculava-se de acordo com a Mecânica de Newton. Mas, segundo as condições quânticas, atribuíu-se uma estabilidade que segundo a referida Mecânica não podia, de algum modo, possuir o que seria contraditório e absurdo. Desta sorte, deveria ser abandonado o conceito de órbita, segundo razões teóricas e experimentais.

ao golpear o electrão, o tira, pelo efeito de Compton, da órbita, de maneira que só se observaria um único ponto de cada vez, não uma trajectória. (HEISENBERG, 1969, p. 60-61)

3.1 – Em virtude da estabilidade da matéria, a física newtoniana não tem uma aplicação exacta no interior do átomo.

Nenhum sistema planetário, regido pela mecânica newtoniana, recuperaria o seu estado original perante a colisão com outro sistema. Mais ainda, um electrão distante do núcleo, pela diferença de massa, seria atraído pelo núcleo com força electrostática muito maior do que a força repulsiva. Se, em contrapartida, o electrão gira em redor do núcleo, de maneira que possua uma força centrífuga igual e contrária à força atractiva, então de acordo com a teoria clássica da emissão electromagnética deve irradiar energia, perdendo toda a sua energia num cem milionésimo do segundo, permitindo que o electrão se precipitasse no núcleo, deixando o átomo de existir. A interacção mútua de diversos átomos produziria um colapso semelhante. Assim, o modelo planetário do átomo estava fundamentado nas experiências de Rutherford.

Deveremos renunciar à descrição intuitiva do átomo e à mecânica clássica, tal como é salientado na mesma mecânica. (HEISENBERG, 1982, p. 46)

Entretanto, o conceito de órbita electrónica pode manter-se, mas somente para os grandes números quânticos que representam o caso limite em conformidade com o princípio de correspondência de N. Bohr. (HEISENBERG, 1953, p. 44-46)

A experiência do microscópio, com uma potência de resolução tão elevada, permitiria observar directamente a órbita do electrão, foi sugerida, a Heisenberg, quando ainda era estudante, por um

companheiro, B. Drude, que pretendia, com tal instrumento, eliminar o receio de Heisenberg perante as imagens intuitivas do átomo. Como se verá, a experiência é sumamente esclarecedora para definir as relações de indeterminação. (HEISENBERG, 1969, p. 60-61)

3.2 – No ano de 1927, E. Schrödinger demonstrou que o princípio era necessariamente válido na mecânica ondulatória. De tal forma que as relações de indeterminação, a que se chega, utilizando o modelo ondulatório, oferecem os limites dentro dos quais é aplicável o modelo corpuscular e no sentido inverso. O princípio da indeterminação, segundo o modelo corpuscular, apresenta os limites do modelo ondulatório.⁷

O facto de que a posição do electrão seja conhecido, com certa exactidão Δq , poderá exprimir-se notoriamente no modelo ondulatório, mediante uma função de onda, cuja amplitude é sensivelmente diferente de zero, somente num pequeno domínio da ordem de grandeza Δq .

Uma função de onda pode pensar-se como resultante de um certo número de ondas, as quais interferem, entre si, de modo tal que se reforçam no pequeno domínio espacial de amplitude Δq . Mas, ao longo do tempo, um tal pacote de ondas variará *in genere* a sua grandeza e a sua forma e, em definitivo, se difundirá em todo o espaço. A velocidade de translação do pacote de ondas deve corresponder à velocidade do electrão.

Todavia, mediante o pacote de ondas não é possível definir, exactamente, uma velocidade, dado que isso, como se disse, atendendo à sua propagação, alarga-se e difunde-se. Esta difusão leva a um indeterminismo na definição do impulso ou da quantidade de movimento ($m \cdot v$), dada por Δp .

⁷⁾ A mecânica ondulatória, na descrição do movimento das partículas, vem em auxílio da quântica, na descrição do movimento das partículas mediante a função de onda Ψ , precisamente enquanto interpretada como probabilidade de encontrar um electrão num dado ponto antes da descoberta de Heisenberg. A trajectória de um electrão, na câmara de Wilson, não poderia descrever-se pela mecânica de Schrödinger, pois o pacote de ondas, que devia representar o electrão, aumentando durante o movimento, alcançaria um diâmetro de um centímetro ou mais, muito superior ao que realmente se observa.

Com efeito, descobertas as relações de indeterminação, interpreta-se que o pacote de ondas varia em cada ponto de observação (cada gotícula de água na câmara de nevoeiro – câmara de Wilson) e o estado do electrão descreve-se, matematicamente, mediante um vector no espaço de Hilbert. (HEISENBERG, 1987, p. 98)

A partir das mais simples leis da óptica, relacionando as seguintes equações:

$$\lambda = \frac{h}{p}; \quad v = \frac{E}{h}$$

surgirá a seguinte relação: $\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2}$.

Esta relação indica dentro de que limites se podem empregar os conceitos da teoria corpuscular. Nela vê-se como a determinação da posição implica uma indeterminação da velocidade e vice-versa. Pretender um significado das palavras – posição – e – velocidade –, mais exacto do que ele, que nos proporciona a fórmula, seria uma vã pretensão (HEISENBERG, 1953, p. 27). Muitos físicos pretenderam, mediante subtis experiências, ultrapassar o limite, isto é, determinar, com maior precisão, o valor da posição e da quantidade de movimento, pensando que semelhante limite não provém senão da imperfeição do agir humano e dos instrumentos utilizados. Entretanto, incluso se actuarmos em condições ideais, o limite manter-se-á. A experiência ideal “Gedankenexperiment” de Heisenberg demonstrou esta insuperabilidade do limite.⁸

Suponhamos um microscópio, perfeitamente construído, que recebe luz de uma fonte luminosa punctiforme A e de uma placa S deixa passar por uma perfuração punctiforme A', a luz proveniente de uma lâmpada. O objecto Φ , de acordo com as leis da óptica geométrica, faz convergir a luz na placa fotográfica L, concentrando os raios num ponto A. A teoria da formação das imagens estabelece a existência de uma correspondência biunívoca entre o ponto-objecto e o ponto-imagem. Deste modo, quem vê a imagem A', pode determinar exactamente o ponto A na placa S.

Consideremos, agora, a natureza ondulatória da luz que se não propaga exactamente em linha recta, segundo o fenómeno da “difracção”.

Por este motivo, a luz converge não sobre um ponto, mas sobre uma zona, que não tem limites precisos. Logo pode estabelecer-se como um círculo de “difracção”, no qual se concentra a quase totalidade da energia luminosa. O raio deste círculo expressa-se pelo valor aproximado: $R \equiv \lambda \operatorname{sen} \epsilon$. Com efeito, a imagem será menos imperfeita, quanto menor for o raio do dito círculo e, então, este raio pode tornar-se tão pequeno, quanto se use luz de pequeno comprimento de onda.

Todavia, seria possível determinar A a partir de A', pois o centro do círculo de difracção (A') coincide com A.

Porém, tal efeito não sucede se tivermos em conta a natureza corpuscular da luz. Suponhamos que se trata de um só fotão: este cairá no círculo de difracção, mas não sabemos donde, ainda que se possa reduzir a indeterminação, reduzindo l. Somente em certa indeterminação se pode “ubicar” A a partir A'.

3.3 – Suponhamos que o impulso do electrão, antes da experiência, é conhecido e queremos determinar a sua posição. Para o distribuir o menos possível, deve-se utilizar uma radiação pouco intensa. A energia mínima pertence ao fotão ($h\nu$). Com efeito, um electrão é de massa tão pequena, que basta um só fotão para o perturbar pelo efeito de Compton.

Para evitar isto é necessário uma radiação de pequena frequência, dado que a energia do fotão é directamente proporcional à frequência. Daqui se inferem duas exigências, que são contraditórias, a saber, para determinar a posição do electrão, devemos utilizar uma radiação de pequeno comprimento de onda e, assim, determinamos o seu impulso. Sempre que o comprimento de onda e a frequência se relacionam inversamente, devemos utilizar uma radiação de grande comprimento de onda (λ).

⁽⁸⁾ Assim, Heisenberg introduz frequentemente as experiências ideais, realizadas nessas condições, prescindindo do defeito natural da operação e dos instrumentos usados. Evita, entretanto, a objecção que pretende fundamentar, mostrando que os limites que possa revelar a experiência proveniente da natureza das coisas. Não importa se tais experiências possam ou não ser realizadas, basta, em princípio, que sejam “realizáveis”, mesmo que a técnica possa ser muito complicada. Basta que a experiência não entre em contradição com as leis fundamentais da física. O uso de tais experiências permite-lhe tirar todas as consequências teóricas possíveis, que, certamente, a realização prática reduziria consideravelmente. (HEISENBERG, 1982, p. 49). Pelo impacto com o fotão, o electrão recebe, pelo efeito de Compton, um impulso de retrocesso da ordem de $h\nu/c$.

○ fotão, que deve ser reflectido pelo electrão, possui uma energia $h\nu$, que corresponde à quantidade de movimento.⁹

○ impulso de retrocesso não é exactamente conhecido, mas somente com certa “indeterminação”, pelo facto de que a direcção do fotão incidente é desconhecida. Pois, pode formar com o “eixo óptico” um ângulo qualquer, nunca superior a ϵ , podendo tornar pequeno o objectivo e precisando melhor o impulso. Logo, deste modo, se determina de forma incorrecta a “posição”. Assim, para a indeterminação do impulso do fotão, teremos:

$$\Delta p = h\nu |c \cdot \text{sen}\epsilon$$

Mas, a indeterminação da posição segundo as leis da óptica, será:

$$\Delta q \approx \frac{\lambda}{\text{sen}\epsilon}$$

sendo: $v = c/\lambda$, surgindo para o produto de ambas as indeterminações:

$$\Delta p \cdot \Delta q \approx h$$

Isto significa que ambas as indeterminações se relacionam inversamente. Uma maior precisão, na posição, implica uma maior indeterminação no impulso e *vice-versa*, sendo impossível determinar ambas conjuntamente.¹⁰

Há uma insistência por parte de W. Heisenberg para assinalar que as relações de indeterminação

afectam a medida de um par de variáveis canonicamente conjugadas. As relações de incerteza não afectam o passado.

Por meio deste passado é, então, $\Delta p \cdot \Delta q$, o mais pequeno valor limite. Mas, Heisenberg apresenta, também, uma série de experiências para medir a posição que se descreve nas relações de indeterminação e uma outra série orientada para medir a velocidade ou o impulso (HEISENBERG, 1953, p. 31-41).

Uma vez que o impulso é proporcional à massa ($p = m \cdot v$), a imprecisão da medida, para as duas grandezas, depende da massa das partículas em jogo e não da imperfeição da operação humana nem dos instrumentos.¹¹

Aquilo que impede a precisão, na medida simultânea da posição e do momento, não é devido a nenhum tipo de defeito, mas trata-se, como diz Heisenberg, de uma lei natural da física.¹²

Gnoseologicamente referida, a indeterminação é um facto geral. A relação de incerteza valida para qualquer conjunto de grandeza canonicamente conjugada como é o caso da energia e do tempo: $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$.¹³

Existe, assim, uma complementaridade entre as diversas propriedades observáveis no átomo, no sentido que o conhecimento de uma propriedade pode excluir o conhecimento contemporâneo de outra. (HEISENBERG, 1978, p. 113)

⁽⁹⁾ O valor de $h\nu/c$ resulta da relação métrica e dedutiva entre: $E = m \cdot c^2$ e $p = m \cdot v$, resultando: $p = mc = E/c$. Como $E = h\nu$, segue-se: $p = m \cdot c = h\nu/c$.

Pelo impacto com o fotão, o electrão recebe, pelo efeito de Compton, um impulso de retrocesso da ordem de $h\nu/c$.

⁽¹⁰⁾ “Le relazioni di indeterminazione riguardano il grado di esattezza raggiungibile nella conoscenza dei valori assunti simultaneamente dalle diverse grandezze che intervengono nella teoria dei quanti. Poiché queste relazioni non limitano la esattezza raggiungibili, per esempio, in una data misura isolata di posizione o di velocità, la loro importanza proviene soltanto dal fatto che ogni esperimento, il quale renda possibile una misura, per esempio, di posizione, perturba necessariamente fino a un certo punto la conoscenza della velocità.” (HEISENBERG, 1953, p. 27-28)

⁽¹¹⁾ Uma vez que é inversamente proporcional à massa, a indeterminação aumenta quando esta diminui, sendo alarmante a nível atómico e subatómico (podemos considerar um electrão). No sistema C.G.S., a constante de Planck – quantum actionis – é da ordem de $10^{-27} \cdot (h=6,6256 \times 10^{-27} \text{ erg. seg.})$, sendo a massa do electrão, também, da ordem dos 10^{-27} . O produto das indeterminações da sua velocidade (Dp) e da posição (Dxi) será aproximadamente a unidade, o que quer dizer que o valor de uma indeterminação é o recíproco do valor da outra e, portanto, quando uma tende para zero, a outra tende para infinito: $Dxi \neq 0; Dp \neq \infty$. A precisão na medida da velocidade implica a impossibilidade absoluta da determinação da posição.

⁽¹²⁾ As relações de “incerteza” são, segundo W. H. Heisenberg leis naturais da física atómica, não sendo puramente métodos.

⁽¹³⁾ Assim, na 6º Congresso Solvay (Bruxelas, 1993), N. Bohr, fazendo uso da teoria da relatividade, refutou a “gadanhenexperiment”, considerado o mais duro ataque contra as relações de indeterminação. Einstein, pretendeu, também, mostrar uma alteração ao princípio da indeterminação (HEISENBERG, 1974, p. 62).

Logo, o limite que, na realização de medidas, admitia o físico clássico como proveniente do defeito na execução, nas relações de indeterminação demonstram que não se trata de um limite prático, mas antes deveremos falar de um limite teórico, imposto pela natureza mesma.

3.4 – O esquema da física clássica deve objectivar-se como existente no espaço e no tempo dos processos que seguem leis fixas. Mas, finalmente, releva-se o limite intrínseco no aspecto não intuitivo dos fenómenos atómicos, referenciados pela constante de Planck.

As relações de indeterminação, em oposição ao determinismo clássico, põem de manifesto a impossibilidade de um conhecimento exacto do estado presente de um sistema e, portanto, limita o cálculo do seu estado futuro.

Epistemologicamente, o conhecimento do sistema é possível só dentro de uma certa indeterminação, isto é, conhecemos, somente, com certa probabilidade. Esta manifesta o carácter essencialmente estatístico das leis da mecânica quântica.

Todas as experiências estão submetidas às leis da mecânica quântica e, particularmente, às relações de indeterminação, parecendo que a lei de causalidade estará verificada pela Mecânica Quântica (HEISENBERG, 1927, p. 197-198). Sem as incertezas de Heisenberg não seria possível quer a Mecânica das Matrizes, quer a Mecânica Quântica.

4 – Interpretação de Copenhague

4.1 – O resultado surpreendente a que se chegou, mediante a experiência de W. Heisenberg, provocou a estupefacção dos estudiosos da natureza física, suscitando múltiplas leituras, que se poderão sintetizar nas seguintes afirmações:

- O electrão possui, em cada instante, uma posição e uma velocidade indeterminadas e não as poderemos conhecer;
- Não será lícito atribuir simultaneamente ao electrão a posição e a velocidade, bem determinadas. Parece incompreensível, se colocarmos a ilicitude como uma atribuição de parte do observador.

Será conveniente desenvolver alguns aspectos da posição de Copenhague (defendida por N. Bohr, M. Born, W. Heisenberg, P. Dirac; etc.) e que se conhece como interpretação “ortodoxa”.¹⁴

A leitura de Copenhague não recebe igual adesão, tendo como adversário: A. Einstein; L. DeBroglie e E. Schroedinger.

A interpretação de Copenhague inicia-se com um paradoxo: não poderemos, não medir o mundo microscópico com instrumentos macroscópicos. Qualquer experiência é descrita em termos de Mecânica Clássica, sendo utilizados, também, para expressar o resultado. Assim, resulta que os referidos termos se encontram limitados, na sua aplicação, pelas relações de indeterminação. Não concordam com a natureza e, muito embora, não se pode nem se deve evitar o seu uso. Em mecânica quântica, para se traduzir o resultado de uma observação será escrita em “função da probabilidade”, a qual inclui o facto, com precisão limitada, pelas relações de indeterminação, o nosso conhecimento *de facto* e o possível erro na medição. Mas, se esta função vem determinada só no momento inicial da observação, é possível segundo as leis da teoria quântica, calculá-la em todo o tempo. Contudo, a função de probabilidade, ou de matriz estatística, não representa um decurso de sucessos que se desenvolve ao longo do tempo, sem que se realize uma nova medida, dado que representa somente uma tendência para os sucessos e para o conhecimento dos mesmos. (HEISENBERG, 1982, p. 58-61)

⁽¹⁴⁾ A interpretação da Escola de Copenhague foi introduzida, poucos meses após a sua elaboração, ao ser apresentada perante a opinião pública, em Outubro de 1927, na física primeiramente na Assembleia Geral, no Congresso de Volta em Como e, posteriormente, no Congresso Internacional de Física, Solvay, em Bruxelas. (HEISENBERG, 1982, p.56).

Logo, a “função de probabilidade” contém um elemento objectivo (a tendência ôntica da partícula onda) e um elemento subjectivo (conhecimento incompleto). O resultado não pode ser previsto, mas somente a probabilidade de certo resultado.¹⁵

É a própria observação que muda a “função de probabilidade” de maneira descontínua, onde os eventos são possíveis, o que realmente tem lugar.

A mecânica quântica substitui a descrição objectiva da natureza pela mais modesta leitura das situações. Aquilo que se observa não é a natureza *per se*, mas, antes a natureza que está exposta aos métodos de investigação.

4.2 – Segundo a interpretação de Copenhague, é fundamental o princípio de complementaridade de N. Bohr, segundo o qual: dois aspectos são complementares um do outro, sendo ambos necessários para a descrição de fenómenos que se excluem mutuamente. Logo, a confirmação corpuscular do mundo atômico é complementar da configuração ondulatória. A referida complementaridade salienta-se em muitos aspectos da teoria dos *quanta* de Max Planck.

A interpretação de Copenhague considera como completa e definitiva a teoria quântica com as características de indeterminação, complementaridade e probabilidade.

Heisenberg classifica as críticas em três grupos:

1. mudar a filosofia, aceitando a física;
2. admitir como adequada a interpretação de Copenhague, se os resultados são os previstos, procurando modificar a teoria quântica;
3. manifestar insatisfação no tempo pelas conclusões filosóficas da interpretação

ortodoxa. (HEISENBERG, 1982, p. 96-100)

Alguns dos oponentes à interpretação de Copenhague movem-se na linha dos supostos “variáveis ocultos”, cuja crítica se toma como modelo. As leis da teoria quântica determinam estatisticamente o resultado de uma experiência, de maneira que supõem a existência de variáveis desconhecidas, que escapam à observação, mas que determinam a experiência. Entretanto, se a teoria quântica, na qual se apoia o próprio Bohm, permanece invariante, as variáveis desconhecidas não podem ser encontradas na descrição de processos reais.

Na realidade, a existência de tais variáveis não poderão ser uma suposição motivada pela utilização de modelos intuitivos na interpretação do mundo atômico.¹⁶

4.3 – Como a natureza que estuda a ciência física é a natureza submetida a uma série de experiências, que põem a claro certos fenómenos, é fácil apreciar que esta manipulação tem que fazer parte da interpretação da teoria, sobretudo, porque não temos conhecimento intuitivo da natureza, mas somente através das experiências.

O mais representativo dos oponentes à interpretação ortodoxa, na linha de uma transformação da teoria que permita uma interpretação diversa, trata de modificar a Mecânica Quântica, para acertar a sua estrutura à clássica expressão, que não pode ser deduzida do formalismo e nele crê-se encontrar uma inconsistência na interpretação de Copenhague.

4.4 – Entre os opositores que se movem na linha do ideal de objectividade, há que contar com Schrödinger, que quer acrescentar a objectividade, rejeitando o que sejam as ondas de probabilidade, acabando-se por negar os saltos quânticos. Mas,

⁽¹⁵⁾ Si-può dire forse che la teoria dei quanta corresponde a questo ideale nel modo più ampio possibile. Indubbiamente la teoria dei quanta non contiene dei veri e propri tratti soggettivi, non introduce la mente del fisico come parte dello evento atomico. Ma esse parte della divisione del mondo in “oggetto” e resto del mondo e dal fatto che al meno par il resto del mondo ci serviamo dei concetti classici per la nostra discrizione.

⁽¹⁶⁾ “Le leggi della teoria del quanta sono tali che i parametri ignoti inventati ad hoc non possono mai venire osservati. Le decisive proprietè de simmetria sono così distrutte se introducano i parametri ignoti come un entità fittizia nell’interpretazione della teoria.” (HEISENBERG, 1982, p. 161).

esquecem que só as ondas, no espaço de configuração, são ondas de probabilidade, enquanto que as ondas tridimensionais da matéria ou da radiação são tão “reais” como as partículas, manifestando a continuidade dos processos.

Contudo, o elemento de descontinuidade aparece. Na interpretação de Copenhague está contido na passagem do possível ao efectivo e Schrödinger não apresenta alternativa.

4.5 – Igualmente, a oposição de físicos como A. Einstein e M. von Lawe à interpretação de Copenhague enveredam como pelos adversários da objectividade. Mas, é necessário dizer que a Mecânica Quântica não é uma teoria completa, pois não nos informa sobre aquilo que sucede, independentemente das observações, nem do que sucede entre duas observações. Heisenberg responde que a física aspira à descrição e inteligência da natureza, enquanto tal depende da “linguagem” como único meio de comunicação. (HEISENBERG, 1982, p. 168-169)

As palavras da linguagem representam os conceitos da vida quotidiana e da física clássica e neste domínio é onde se apresentam com meios não ambíguos de comunicação.¹⁷

Heisenberg adverte que a interpretação da Escola de Copenhague não é positiva, pois não considera as percepções sensíveis do observador como elementos da realidade, unicamente coloca em relevo a ilegitimidade, melhor, a impossibilidade de uma extrapolação para o mundo atómico dos conceitos, provenientes da vida quotidiana ou da física clássica.¹⁸

Na mecânica clássica, conhecido o estado do sistema, todo o resto se deduz com precisão

matemática. As grandezas são objectiva e univocamente determinadas, se medirmos e soubermos que encontraremos um valor determinado. O previsto pelo cálculo, supondo a imperfeição do agir humano e dos instrumentos, dados os mesmos antecedentes, refere as consequências.

Entretanto, em mecânica quântica, dado esse prévio conhecimento, o valor de uma grandeza não está geralmente determinada de modo unívoco, sendo marcada pela analogia de variáveis. Poderemos encontrar muitos valores, não se podendo prever o êxito da operação, pois dados os mesmos antecedentes podem dar-se resultados diversos, cuja verificação pode ser prevista só em relação com a sua probabilidade. Assim, enquanto que em mecânica clássica a categoria dominante será a “predeterminação”, em mecânica quântica afirma-se pela “probabilidade”.

5 – Da Epistemologia à Ontologia

5.1 – Uma teoria é uma estrutura matemática com uma semântica na física. A intenção da interpretação de Copenhague teria que ser uma semântica mínima da teoria quântica.

Assim, se julgou da interpretação de Copenhague que o colapso da função de onda, por um observador, pareceu algo de diferente.

A onda não é nada senão “probabilidade”. É probabilidade e isto significa que é uma expressão do conhecimento, que pode ser adquirido por experiências. (VON WEIZÄCKER, 1991, p. 13-15)

N. Bohr sempre insistiu que o observador separado é pre-condição do que assumiu, que era a

⁽¹⁷⁾ “La richiesta di descrivere ciò che accade nel processo teoretico quantico fra due successive conservazioni é una contraddizione in adiecto, giacché la parola descrivere si riferisce allo del concetti classici, mentre questi concetti non possono venire applicati nello spazio che intercorre fra la conservazioni; possono sob tanto venire applicari nei ponti d'osservatione” (HEISENBERG, 1982, p. 171-172.)

⁽¹⁸⁾ “Si possono aggiungere alcune osservazioni sulla struttura formale di tutte le controproposte fin qui avanzate contro l'interpretazione de Copenhagen della teoria dei quanta. Tutte queste proposte si sono trovarte concrete e sacrificare le essenziali proprietà di simmetria della teoria dei quanta (ad esempio, la simmetria fra onde e particelle o fra posizione e velocità. Perciò possiamo bien supporte che l'interpretazione de Copenhagen no più essere evitata se el considerato queste proprietà di simmetria. come l'invariante di Lorentz nelle teoria della relativita come un carattere genuino della natura; ed ogni nuovo esperimenti viene e convalidare questa concrezione” (HEISENBERG, 1982, p. 172-173).

interpretação concreta da teoria quântica. O físico dinamarquês nunca procurou descrever o observador pela teoria quântica e permaneceu completamente céptico.

Mas, segundo K. Von Weizsäcker, o observador pode ser incluído na interpretação de Copenhague.

Contudo, Kochen afirmou que é a estrutura matemática que expressa a ideia de que uma parte do mundo está observando a outra parte. Trata-se de uma posição correcta e que resume a interpretação de Copenhague, porque tradicionalmente o observador não estava incluído. (VON WEIZÄCKER, 1991, p. 19-21)

5.2 – A dinâmica será definida no espaço de Hilbert como representação unitária do grupo aditivo de translações, no tempo, sem uma lei dinâmica. A teoria quântica não se pode explicar, tal como se encontra na indeterminação, a qual necessita do tempo (HOUSTON, 1959, p. 30):

$$\begin{aligned}\Delta x \cdot \Delta p_x &\geq h/4 \pi \\ \Delta y \cdot \Delta p_y &\geq h/4 \pi \\ \Delta z \cdot \Delta p_z &\geq h/4 \pi \\ \Delta E \cdot \Delta t &\geq h/4 \pi.\end{aligned}$$

Segundo o esquematismo matemático, o princípio da indeterminação de W. Heisenberg, pela lógica formal moderna, não é um axioma, mas antes trata-se de um “teorema”, dado que se deduz e é apresentado como forma de o apresentar metricamente pelo espaço de Hilbert.

Para a ciência física, o indeterminismo de Heisenberg terá de ser apresentado como um princípio ou axioma por necessidade e universalidade da gnoseologia da Mecânica Quântica.

5.3 – O indeterminismo das leis estatísticas da Mecânica Quântica é simultaneamente métrico e real.

5.3.1 – Métrico, porque as variáveis simbólicas são “aleatórias”, tal como se define no princípio;

5.3.2 – Real, porque a partícula-onda pode tomar n-posições e n-variações no espaço-tempo.

Assim, esta forma de indeterminismo funda-se na causalidade potencial ou probabilidade da partícula-onda, que está *in fieri*. O fundamento ontológico, para a indeterminação real, encontra-se na probabilidade de x, y, z e $p = m\mathbf{v}$ da partícula-onda, a qual vai adquirindo novos estados de perfeição, como se visualiza pela equação de Heisenberg (BORGES DE MENESES, 1986, p. 345):

$$\begin{aligned}\Delta(m \cdot v) \Delta x &= \Delta p \cdot \Delta x \geq h \\ \Delta E \cdot \Delta t &= (p \cdot \Delta p | m) \Delta r | v = \Delta p \cdot \Delta r \\ &\geq h; \Delta E \cdot \Delta t \geq h.\end{aligned}$$

Um dos grandes avanços quânticos está implícito neste axioma fundamental, o qual definiu as características holísticas e aleatórias para as medidas, tendo conduzido a uma nova perspectiva de ordem filosófica, desde a ontologia até à fenomenologia passando pela epistemologia geral. (KANE; STERNHEIM, 1988, p. 677)

Conclusão

Não é certo que o determinismo seja – *conditio sine qua non* – para a existência da ciência. Se bem que é verdade que existe certo nexo entre ciência e determinismo, que não se dá em exacta correspondência entre antecedentes e consequentes.¹⁹

Logo, a natureza está determinada pelas relações de incerteza para actuar segundo leis expressas pela mecânica quântica. A interpretação da Escola de Copenhague em mecânica quântica, longe de destruir a imagem do Universo microscópico, como

⁽¹⁹⁾ Fundamentalmente, o indeterminismo que se descobriu no mundo atómico poderá, gnoseologicamente, chamar-se um determinismo atenuado. Mesmo que na física atómica não se diga que, dados certos antecedentes, tudo possa acontecer. Se diz que só, dados os mesmos antecedentes, surgem novas possibilidades para a evolução do sistema, mas as possibilidades são bem determinadas relativamente à probabilidade.

“cosmos”, pretende descobrir esta imagem até às próprias partículas constitutivas da natureza com as suas propriedades de simetria.²⁰

Com efeito, pensou-se que o princípio de indeterminação negava e invalidava o princípio de causalidade (JANS, 1963, p. 79-81). Devemos ter em consideração que os dois princípios se movem em planos distintos, enquanto que o princípio de indeterminação de Heisenberg é um princípio “físico”, o princípio de causalidade é “metafísico”. Mas, não se pode dizer que o princípio de causalidade já não tenha aplicação na física atômica (GOMIDE, 2001, p. 211-214).

O determinismo físico pretende ir da causa para o efeito e o princípio de causalidade, ao nível ôntico, do efeito para a causa, ultrapassando a ordem da temporalidade.

Referências Bibliográficas

- BORGES DE MENESES, R. D. Leis da Física: ciência, filosofia e teologia. **Humanística e Teologia**, Porto, n. 7, 1986.
- _____. O princípio de incerteza de W. Heisenberg: física e filosofia. **Humanística e Teologia**, Porto, n. 22, 2001.
- EINSTEIN, A. **The Meaning of Relativity**. 2. ed. New Jersey: Princeton University Press, 1945.
- GOMIDE, F. U. Consciência Livre e Indeterminismo da Física Moderna. **Communio**, Rio de Janeiro, n. 14, 2001.
- HEISENBERG, W. K. **Física e Filosofia**. Milano: Il Saggiatore, 1982.
- _____. **I principi fisici della teoria dei quanti**. Torino: Boringhieri, 1953.
- _____. **Diálogos**. Lisboa: Verbo, 1987.
- _____. **Mutamenti nella basi della Scienza**. Torino: UTET, 1978.
- _____. **Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie**. Stuttgart: Herzel Verlag, 1958.
- _____. **La imagen de la naturaleza en la física actua**. 2.ed. Barcelona: F. Seiz Barral, 1969.
- _____. Über den anschaulichen Inhalt der Quanten theoretischen Kinematik und Mechanik. **Zeitschrift für Physik**, Berlin, n. 43, 1927.
- _____. **Das Naturbild der heutigen Physik**. Hamburg: Rowolt Verlag, 1955.
- _____. Más allá de la física. In: _____. **Atravesando fronteiras**. Madrid: BAC, 1974.
- HOUSTON, W. V. **Principles of Quantum Mechanics**. New York: Dover Publications, 1959.
- JANS, H. Causaliteit in the quantum mechanics. **Bijdragen**, Nijmegen, n. 24, 1963.
- KANE, J. W.; STERNHEIM, M. M. **Physics**. 3. ed., New York: John Wiley and Sons, 1988.
- SELVAGGI, F. **Causalità e Indeterminismo**. Roma: Pontificia Università Gregoriana, 1964.
- VON NEWMAN, J. **Mathematical Foundations of Quantum Mechanics**. New Jersey: Princeton University Press, 1955.
- VON WEIZSÄCKER, C. F., F. El significado de la teoría cuántica. **Analogia**, México, n. 5, 1991.

⁽²⁰⁾ Apesar das propriedades de simetria, Heisenberg fala da harmonia oculta do Universo e de que a observação da ciência se levanta e essa alta região, donde procede a ordenação do mundo. (HEISENBERG, 1974, p. 76)

