

A Probabilidade segundo Max Born: da Mecânica Quântica à Filosofia

Ramiro Délio Borges de Meneses

Investigador do Instituto de Bioética da Universidade Católica Portuguesa

PORTO e Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Saúde do Norte

Gandra e Famalicão – Portugal

dr.ramiro@sapo.pt

Introdução

A interpretação probabilística da função de onda $\Psi^2 \cdot dV$, proposta por Max Born, considerou-se o terceiro alicerce que sustém, juntamente com o princípio de complementaridade de Niels Bohr, a realidade dos fenómenos físicos, apresenta-se sob duas imagens (corpuscular e ondulatória) que são *non sub eodem aspectu* recíprocas, bem como as relações de incerteza de Werner Heisenberg: $\Delta p_i \cdot \Delta x_i \sim h (i = 1, 2, 3)$ e $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$, segundo a conhecida interpretação de Copenhague.

O princípio da complementaridade refere a observação de dois aspectos antinómicos dos microfenómenos: a partícula e a onda, tendo sido enunciado por N. Bohr, em 1927. Nenhum dos formalismos matemáticos, equivalentes, nos dava a imagem clara e precisa do fenómeno total, como a simples passagem do electrão na câmara de Wilson. Schrödinger referiu que os electrões do átomo são ondas corpusculares a três dimensões, mas reduziu os níveis de energia a frequências de onda.

A Escola de Copenhague, para tentar clarificar o problema, na sua interpretação estatística, seguiu duas vias que levam à mesma solução, quer pelo princípio de indeterminação ou *relações de incerteza* de Heisenberg:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi; \quad \Delta E \cdot \Delta t \leq h/2\pi,$$

quer pelo princípio de complementaridade de Bohr, segundo o qual as duas “imagens” (corpuscular e ondulatória) são duas descrições recíprocas da mesma realidade.¹

Assim, não será possível o conhecimento rigoroso e simultâneo das grandezas físicas, que caracterizam a partícula e a onda, e estes conceitos são somente análogos aos da Mecânica Clássica.

In genere poderemos dizer que a orientação quântica de Copenhague, no âmbito epistemológico, é de matriz instrumentalista, parece, porém, que a crítica de M Born não poderá senão elaborar uma imagem não realista da ciência. Procura-se aceitar, de forma crítica, que o trabalho científico e filosófico se revela como de fundamentação neopositiva. O físico alemão ao abrir as portas ao indeterminismo de Heisenberg:

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim h; \quad \Delta E \cdot \Delta t \sim h$$

proporcionando, assim, uma visão intuitiva do mundo físico.

Mas, apesar de muitos textos afirmarem que a interpretação probabilística de Born conduz a uma violação do princípio de causalidade, será possível defender a existência de uma legalidade causal no domínio fenoménico das variáveis quânticas, desde o indeterminismo, que instaura a dita interpretação, rompendo com a equiparação clássica entre as noções de determinismo e de causalidade.

Naturalmente, pretende-se defender que a dita interpretação se mantém dentro de uma imagem realista da ciência, ainda que isto implique uma severa reconstrução da noção da realidade física. A última questão implicará definir o grau da realidade fenoménica, atribuível aos objectos o conhecimento oferecidos pela Física Quântica. Partindo da herança de Born, será desenvolvida a possibilidade de construir uma noção de realidade baseada em invariantes observáveis, capaz de restaurar uma imagem intuitiva do mundo físico dentro dos limites permitidos pelas leis, que regem o mundo quântico, reinterpretando o dualismo corpúsculo-onda.

1 – A dupla solução de L. de Broglie

L. de Broglie exemplifica a necessidade de resolver a dupla imagem. O físico francês segue os passos dados por Einstein, em 1909, ao pretender uma síntese entre a

¹ Cf. HEISENBERG, W. – *The Physical Principles of the Quantum Theory*, tradução do alemão, Dover Publications, Inc., New York, 1973, 10-26.

estrutura descontínua da energia radiante e os fenómenos ondulatórios. Assim, de Broglie estabelece a relação, $V = c/B$, entre o movimento de um corpúsculo livre e a propagação da onda associada, procurando dar uma interpretação das condições da estabilidade quântica para os movimentos intra-atômicos dos electrões, que se traduz no “dualismo partícula-onda”.

Assim se considerava que um corpo *mobile* coincide, no espaço e no tempo, com uma onda de frequência ν , que se propaga na mesma direcção, do que com a velocidade c/B :

$$\lambda_0 = h/m \cdot v_0; \quad \lambda_0 = h/m(v_0 + \Delta v_p)$$

$$p = E/c = hf/c = hc/c\lambda = h/\lambda; \quad f = E/h.$$

Esta onda não poderia corresponder ao transporte de energia e era considerada como onda fictícia, dada pelo movimento do *mobile*, sendo a velocidade do grupo de ondas pela forma da velocidade do *mobile*.² Desta maneira, de Broglie apresentava uma ideia de dualidade onda- corpúsculo intuitiva e física. As ondas associadas a partículas são entendidas como “feixes de ondas”, que as guiam. Este físico estabeleceu a aplicação das suas ideias ao caso dos fotões ($\varepsilon = h\nu$), esboçando uma teoria sobre os fenómenos de interferência e de difracção da luz, sendo compatível com a existência dos *quanta* de luz. Deste facto, surge a difracção dos átomos de luz para encontrar um marco teórico, em que as ondas e os corpúsculos se relacionam numa equação.

De Broglie apresenta uma sustentação para a radiação do “corpo negro” da lei de Planck, tendo este mostrado que, para altas frequências, a experiência impõe a equação:

$$h/e^{h\nu}/BT - 1,$$

ao estabelecer a correspondência entre o princípio da acção mínima, aplicado ao movimento onda-corpúsculo, e o princípio de Fermat, aplicado à propagação da onda.

Todas as aportações quânticas de de Broglie originaram uma nova Mecânica Ondulatória. A solidez desta nova teoria quântica consolidou a noção de – onda de Broglie – ou “onda de matéria” com o electrão na mesma relação, que ostentava a onda luminosa do fotão, empregando todos os feitos conhecidos e chegando a afirmar que inclusivamente os átomos e as moléculas comportam-se, na sua distribuição, no espaço

² Cf. DE BROGLIE, L. – “Sur les interférences et la théorie des quanta de lumière”, in: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 175 (Paris, 1922a), 811-813.

com as leis da teoria ondulatória, resultando, ao mesmo tempo, no que se refere aos seus efeitos mecânicos conservam as características das partículas.³

Todas estas aportações encontraram o seu fundamento experimental, pela difracção de electrões, realizada por Davisson, num primeiro momento, e posteriormente, com Germor e Thomson numa segunda oportunidade.

A hipótese de L. de Broglie, que associava a cada partícula uma onda, foi prontamente elaborada numa nova mecânica. Se existem ondas, então deverá haver uma equação de onda. A nova mecânica, baseada numa tal equação, deverá possuir uma equação de onda, tal como E. Schroedinger elaborou:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - V)\psi \equiv 0$$

Gnoseologicamente, a nova mecânica, baseada em tal equação, deverá incluir a mecânica ordinária das partículas, como um caso limite.⁴

Quase ao mesmo tempo que Born propunha uma interpretação probabilística, o físico francês procurava reconciliar os *quanta lucis*, propostos por Einstein, com os fenómenos de interferência e de difracção, ao considerar os *quanta* de luz como singularidades de um campo de ondas.⁵

Na primavera de 1927, de Broglie amadureceu estas ideias e apresentou-as como uma teoria. As equações lineares da Mecânica Ondulatória admitem dois tipos de solução: uma função ψ contínua com significado estatístico e outra solução importante, cujas singularidades constituem partículas físicas.⁶

Mas, enquanto a solução contínua ψ , de acordo com a interpretação de Born, mede a probabilidade, a solução singular descreve a partícula *per se*.

Poderemos dizer que os corpúsculos são uma espécie de singularidades de carácter permanente no seio de uma onda contínua. Desta forma, de Broglie propunha uma versão da Mecânica Quântica, na qual o corpúsculo, identificado com uma concentração de energia, numa região do espaço, preserva a sua natureza clássica. Com efeito, a diferença da partícula clássica é guiada por uma onda extensa ψ e assim pode

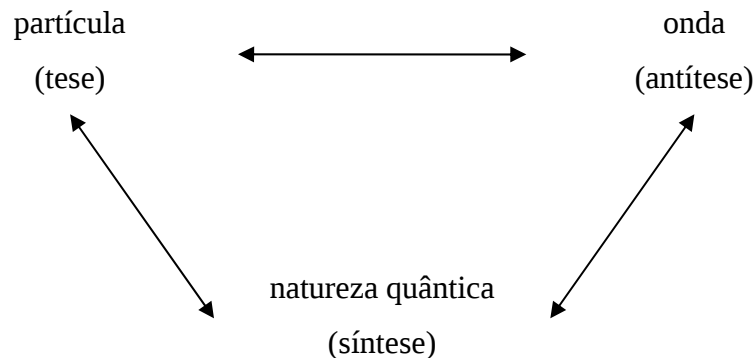
³ Cf. DE BROGLIE, L. – *Recherches sur la théorie des quanta*, Masson et Cie, Paris, 1924, 16-68.

⁴ Cf. DAVIES, P – *God and the New Physics*, Bertelsmans, München, 1986, 143-145.

⁵ Cf. DE BROGLIE, L. – “La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire”, in: *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 184 (Paris, 1927), 273-274.

⁶ Cf. *Idem* – “La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement”, in: *Journal de Physique et du Radium*, 8 (Paris, 1927), 225-241.

mostrar os efeitos da difracção ou da interferência. Dialecticamente, a dualidade partícula-onda foi reduzida, por Born, a uma síntese:



Não se trata de escolher uma imagem ou outra sem que a onda e a partícula constituem a “realidade física”.⁷ Cabe afirmar que De Broglie matizou a sua posição, atenuando-a com o nome da teoria da “onda- piloto”. Com esta teoria, renunciava incorporar o corpúsculo-onda e assim constatava o “dualismo onda-corpúsculo”.

2 – A leitura ondulatória de Schroedinger

Com a ajuda de Born e Jordan, Heisenberg apresenta a nova “mecânica das matrizes”, como a primeira tentativa explicativa e consistente dos fenómenos quânticos,⁸ pelo seguinte elemento da álgebra linear aplicada:

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{m1} & \dots & \alpha_{mn} \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \alpha_{mn} \end{bmatrix}$$

O formalismo matricial implicava, aos olhos de Heisenberg, num primeiro momento, a renúncia a todo o intento de descrição espaço-temporal dos acontecimentos baseando-se em “grandezas observáveis”. O formalismo exclusivamente matemático, proposto por Heisenberg, expressava-se em termos de uma álgebra não comutativa, para aquelas grandezas observáveis da teoria. Logo, Heisenberg oferecia-nos um cálculo matricial, que contemplava grandezas não cumulativas e que desafiava qualquer

⁷ Cf. BORN, M. – *Física Atómica*, tradução do inglês, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1968, 108-110.

⁸ Cf. BORN, M.; JORDAN, P. – “Zur Quantenmechanik”, in: *Zeitschrift fuer Physik*, 34 (Berlin, 1925), 858-890.

interpretação visualizável, enfatizando o elemento da descontinuidade. Na verdade, foi possível renunciar a uma descrição clássica no espaço e no tempo, proporcionando uma teoria, cuja concepção básica era o “corpúsculo”.⁹

L de Broglie já havia planeado a possibilidade de que o dualismo corpúsculo-onda possa ser uma propriedade do mundo microscópico, chegando à conclusão de que cada corpo em movimento poderia acompanhar-se de uma onda e que resultava impossível separar o movimento do corpo e da propagação da onda. Nesta perspectiva, poderemos afirmar que se teriam desenvolvido os primeiros elementos de uma Mecânica Ondulatória de partículas.

Pouco depois, E. Schroedinger conheceu os trabalhos de De Broglie e de Einstein e inspirado, por eles, chega a uma formulação completa da Mecânica Ondulatória das partículas materiais.

O problema dos estados estacionários de Bohr aparece sob uma nova perspectiva. Será um problema de valores próprios associados a uma equação diferencial específica, em derivadas parciais, que depois se chamará equação estacionária de Schroedinger:

$$i/h \text{Hop} \leftrightarrow \sum (\partial H / \partial p_i \cdot \partial / \partial i - \partial H / \partial q_i \cdot \partial / \partial p_i)$$

Os níveis energéticos corresponderão a valores próprios, enquanto que as respectivas soluções próprias corresponderão a valores complexos que, mediante o seu módulo ao quadrado, determinarão a densidade da distribuição da energia dos electrões.¹⁰

Schroedinger ofereceu uma teoria baseada no corpo familiar das equações diferenciais a fim da Mecânica Clássica dos fluidos e capaz de sugerir uma representação visualizável. Os electrões, que seguindo a equação De Broglie, serão considerados ondas de matéria, viriam definidos por uma função de amplitude de onda mecânica ψ cuja propagação era explicada mediante uma equação diferencial do segundo grau, em derivadas parciais, para a função de onda ψ e seus valores da energia. Tratava-se antes de um enfoque analítico que, procedendo de uma generalização das leis clássicas do movimento, sobressai o elemento de continuidade e

⁹ Cf. JAMMER, M. – *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Tomash Publishers, New York, 1989, 270-278.

¹⁰ Cf. SCHROEDINGER, E. – “Quantisierung als Eigenwertproblem”, in: *Annalen der Physik*, 79 (Leipzig, 1926), 361-376.

constituía uma teoria, cuja concepção básica era a onda. Naturalmente, Schroedinger garantia a conexão entre a física quântica e os tradicionais fundamentos clássicos.

Assim, Schroedinger identificava as partículas com “feixes de onda”, uma superposição de ondas monocromáticas, que se concentravam espacialmente. Toda a partícula supõe uma concentração de carga eléctrica, numa pequena zona de espaço, com uma localização quase pontual. Os feixes de ondas dispersavam-se rapidamente ao longo de uma ampla região. A não dispersão dos feixes de onda, comprovada experimentalmente, e a estabilidade das partículas, que se observavam nos procedimentos de colisão são fenómenos, que atentam contra o seu planeamento. Durante o processo de medida, ψ muda-se descontinuamente para nova configuração, resultava inexplicável se nos encontramos ante uma onda física, expandindo-se de maneira contínua no espaço. Outro aspecto problemático vinculava-se à questão de que a função ψ é uma métrica num espaço abstracto de configuração(não um espaço real), dependendo o seu número das dimensões do número de graus de liberdade do sistema. Na verdade, a aporética questão de que ψ se define como função complexa, expressa-se mediante “números complexos”: $a + bi$; $i = \sqrt{-1}$.

Estes problemas, junto com a demonstração da sua identidade formal com Mecânica Matricial de Heisenberg, significam o começo da derrota dos aspectos interpretativos propostos por Schrödinger, e assim necessário seria nova interpretação da dita “função de onda”, que foi proposta por Max Born.

3 – A hermenêutica probabilística de M. Born

Born já havia realizado aportações à nova mecânica. Com a regra da correspondência, conseguiu traduzir fórmulas clássicas nas análogas quânticas. Mas, uma vez que foi demonstrado por Schroedinger, que tanto a Mecânica Matricial como a sua própria Mecânica Ondulatória conduziam aos mesmos resultados, Born assumiu outro repto ao propor uma nova interpretação para a função de onda de Schroedinger em alternativa aos “feixes de onda”.

Foi em conexão com o estudo da Mecânica Quântica dos processos de colisão que sugeriu esta nova interpretação da “função de onda”. Born afirmou que se oporia à

interpretação de Schroedinger, porque este não explicava os fenómenos da colisão do electrão que evidenciavam a natureza corpuscular.¹¹

Born começou a buscar uma explicação para os processos de colisão entre partículas livres, como uma partícula α , um electrão ou um átomo, desde os princípios da Mecânica Quântica. Para isso, adoptou o formalismo da Mecânica Ondulatória por considerar o único adequado ao problema a estudar. Born ofereceu uma análise de tratamento dos processos de colisão. Um desenvolvimento mais pormenorizado do assunto teria lugar em dois escritos posteriores.¹² Aqui, considerando que as funções de onda ψ inicial e final do electrão, antes e depois da interpretação com o átomo e em qualquer caso suficientemente longe do centro da dispersão, são aproximadamente ondas planas. O procedimento usado para o desenvolvimento do que se conhece como aproximação de Born foi o da aplicação da teoria das perturbações ao problema da dispersão das ondas planas.

Assim, denotando por $\psi_m^0(qi)$, as funções próprias do átomo e no suposto de que o electrão teria massa m e energia $E = h^2/2m\lambda^2$, sendo λ o comprimento de onda associado, que se aproximasse do átomo na direcção do eixo z , encontrava Born, para função de onda dispersa, pela grande distância, do átomo, a seguinte expressão:

$$\psi_{mE}^{(1)}(x, y, z, qj) = \iiint \phi_{nm}^E(\alpha x + \beta y + \gamma z + \delta) \cdot \psi_m^0(qj),$$

onde dw é o elemento do ângulo sólido, na direcção definida, para os co-senos directores de α, β, γ .

Born afirmava que a única possibilidade, para uma interpretação corpuscular, residia em que se considerava $\psi_{nm}^{(E)}$, ou melhor dito $|\psi_{nm}^{(E)}|^2$, como a probabilidade de encontrar o electrão disperso na direcção determinada para α, β, γ .¹³

A Mecânica Ondulatória de Schroedinger é capaz de dar uma resposta completa à pergunta sobre o “efeito de colisão”, mas não pode estabelecer nenhuma relação de causalidade. Não tem resposta para a pergunta: qual é o estado depois da colisão?. Ou a pergunta: qual é a possibilidade de um determinado efeito de colisão?

¹¹ Cf. BORN, M. – “Ueber Quantenmechanik”, in: *Zeitschrift fuer Physik*, 26 (Berlin, 1924), 379-395.

¹² Cf. BORN, M. – “Quantenmechanik der Stossvorgaenge”, in: *Zeitschrift fuer Physik*, (Berlin, 1926b), 803-827.

¹³ Cf. BORN, M. – “Zur Wellenmechanik der Stossvorgang”, in: *Goettinger Nachrichten*, (Goettingen, 1926), 146-160.

Justificando a necessidade de uma interpretação, que supera os aspectos contraditórios aos quais se haveria chegado e que reconciliaria a teoria da matéria, Born torna claro que ainda que Schroedinger tentasse interpretar os corpúsculos, e, em particular os electrões, como “feixes de ondas”, elaborando para eles fórmulas totalmente correctas, as duas conclusões não eram sustentáveis, dado que os “feixes de ondas” se dispersavam, ao longo do tempo, e apareciam graves dificuldades ao descrever a interacção dos electrões, como a colisão de dois feixes de ondas, no espaço tridimensional.

Born propôs nova interpretação, onde o decurso interno será determinado pelas leis da probabilidade, onde a um estado no espaço corresponde uma probabilidade definida, que seja dada pela onda De Broglie, associada ao mesmo estado.

Segundo a interpretação estatística de Max Born, $|\psi(\vec{r}, t)|^2 d\vec{r}$ é proporcional à probabilidade, no instante t , de encontrar a partícula no elemento de volume $d\vec{r}$, centrado em $\vec{r}$.

Se o integral: $\int |\psi|^2 d\vec{r}$ converge, é usual multiplicar ψ por uma constante numérica apropriada, de modo que o valor do integral seja igual a 1. Diz-se, então, que a função de onda ψ está normalizada. Procuremos a solução geral sob a forma:

$$\psi = \psi(\vec{r})e^{-iE/\hbar t},$$

o que exige a equação independente do tempo:

$$-\hbar^2/2m \cdot \nabla^2 \psi + v\psi = E \quad \text{ou} \quad \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + v \right) \psi = E \cdot \psi$$

O operador $-\hbar^2/2m \cdot \nabla^2 + v = H$ é um hamiltoniano, aplicado na leitura quântica de Born. As equações de Schroedinger escrever-se-ão, então da seguinte forma:

$$H \cdot \psi = -\frac{\hbar}{i} \cdot \partial \psi / \partial t; \quad H \cdot \psi \equiv E \cdot \psi$$

Segundo Born, uma função de onda ψ , para a qual H é equivalente a uma constante E , chama-se uma função própria de H e E pelo correspondente “valor próprio”. As funções próprias de H chamam-se “estados estacionários”.¹⁴

¹⁴ Cf. MESSIAH, W. – *Mécanique Quantique*, tradução Masson et Cie, Paris, 1965, 16-99.

A equação de Schroedinger, independente do tempo, será:

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E + \frac{e^2}{r}\right)\psi = 0$$

Resolvendo, encontram-se, para valores possíveis de energia, do átomo de hidrogénio, isto é, os valores da energia do electrão no átomo:

$$E = -m \cdot e^4 / -2n^2 \cdot \hbar^2, \text{ onde } n \text{ é número inteiro } (n \geq 1).$$

A equação de Schroedinger tem solução finita somente se a energia tem um dos valores de E_n e os diferentes valores de E_n dão os diferentes estados da energia do átomo.

Consequentemente, um processo mecânico estará acompanhado por um elemento ondulatório, “onda-piloto”, descrito pela equação de Schroedinger, cujo significado será o de dar a probabilidade para determinada evolução do processo mecânico. Assim, a amplitude da “onda-piloto” será zero, em certo ponto do espaço, e significará que a probabilidade de encontrar o electrão, neste ponto, será nula.

Poderá determinar-se que o facto mais significativo da interpretação probabilística, associada à função de onda, radica na lei de composição. Segundo Born, se se sobrepõe uma onda de função ψ_1 e de densidade de probabilidade $|\psi_1|^2$, e outra onda de função ψ_2 , e de densidade de probabilidade $|\psi_2|^2$, a densidade da onda resultante, da função aditiva $\psi_1 + \psi_2$, não será $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$, como ocorreria com as probabilidades clássicas, senão $|\psi_1 + \psi_2|^2$, seria diferente, *in genere*, da anterior. Esta noção de probabilidade, único conhecimento que, para Born, se pode ter dos fenómenos naturais, daria lugar a novo conceito de causalidade, sendo esta que impõe o valor e limites à probabilidade em Born.

Enquanto, pela interpretação probabilística de Born, para a função de onda ψ de uma partícula, pode dizer-se que $|\psi|^2 dt$ indica a probabilidade de encontrar a partícula no volume elementar dt , entendida no seu sentido clássico, como ponto material com posição e momento definidos, em cada instante t . Contrariamente à interpretação de Schroedinger, a função de onda ψ não representa o sistema nem nenhum dos seus atributos físicos, senão o conhecimento, que se tem do mesmo.

Tendo interpretado ψ , como onda de probabilidade, Born deu-se conta de que ψ se podia expandir em termos de um conjunto ortonormal de funções próprias de ψ_n pela equação de Schroedinger: $[H - W, \psi] = 0$.

$$\text{A partir de } \psi = \int_n c_n \psi_n ,$$

seguir-se-à, de acordo com a relação de “complitude” que :

$$\int |\psi(q)|^2 dq = \int_n |c_n|^2 .^{15}$$

Born teve que perguntar pelo significado que devia ser outorgado por c_n . O facto de que para uma única fundamentação normalizada $\psi(q)$, correspondente a única partícula, a parte direita da anterior equação, fora da unidade, sugeriu também que a integral seria naturalmente:

$$\int |\psi(q)|^2 \cdot dq ,$$

Considerando-se como o número de partículas $|c_n|^2$ e a frequência estatística, que sucede ao estado caracterizado pelo índice n.

Para justificar esta proposição, Born calculou o que mais tarde foi chamado de valor médio da energia. W para ψ e obteve:

$$W = \int_n |c_n|^2 \cdot W_n ,$$

onde W_n é o valor próprio da energia de ψ_n .¹⁶

Born ao estabelecer que o módulo no quadrado da função de onda não representava mais do que a densidade da probabilidade para encontrar a partícula no espaço logrado, ao ultrapassar a ruptura conceptual existente na Mecânica Matricial de Heisenberg, cujo objectivo de estudo se centrava em torno da noção de partícula, e a Mecânica Ondulatória, cujo objecto de estudo continuava a ser as ondas, ruptura que persistia apesar da unificação formal. Logo, o formalismo de uma interpretação significava ao estabelecer que o valor esperado do operador, associado a uma variável dinâmica, num estado quântico descrito por determinada função de onda, teria de

¹⁵ Cf. BORN, M. – *Física Atómica*, tradução do inglês, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1968, pp.110-111.

¹⁶ Cf. JAMMER, M. – *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 304-306.

contemplar a perdição teórica do valor médio da própria variável, tal como resultaria medindo réplicas do sistema físico, neste estado, com o qual as noções de posição, velocidade, órbita de uma partícula, seguiam sendo utilizadas implicitamente. Desta forma, gnoseologicamente, a interpretação probabilística de Born passará a fazer parte integrante da leitura ortodoxa da Mecânica Quântica, juntamente com as incertezas de Heisenberg.

4 – Da probabilidade à causalidade em M. Born

No momento de abordar a questão do indeterminismo de Heisenberg e a “causalidade”, Born fez afincos no determinismo clássico, defendendo que pela imagem do mundo, que a causalidade estará presente na base da cognoscibilidade científica. Sem a possibilidade de estabelecer uma conexão necessária, entre fenómenos, não há ciência. Assim, falar de ciência implica falar de relações causais interfenoménicas.

Como afirma Born, a Mecânica Quântica de Schroedinger proporciona uma resposta quase definida, pelo efeito de colisão, mas não se trata de uma descrição causal. Não responde à questão: qual é o estado que está para além da colisão ?. Mas, somente à questão :qual é a probabilidade de um resultado específico da colisão ou o seu efeito ou n-efeitos. Aqui estamos perante o problema do determinismo. Desde o ponto de vista da Mecânica Quântica, não existe nenhuma grandeza que, num caso individual, estabeleça, causalmente, o efeito das colisões. Assim, Born estabeleceu uma renúncia ao mundo do determinismo em Mecânica Quântica.¹⁷

Naturalmente, entendemos que o indeterminismo é a consequência directa do estabelecimento de uma noção de probabilidade diferente da clássica. A interpretação estatística de Born estabelece a impossibilidade de um conhecimento completo e perfeito dos fenómenos, como algo de inerente aos fenómenos, significando uma leitura holística das realidades quânticas.

O que está causalmente determinado não é o “salto quântico”, mas a probabilidade *a priori* de que ocorra. Esta é determinada pela equação de Schroedinger:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - e^2/r) \psi = 0 ,$$

¹⁷ Cf. BORN, M. – “Zur Quantenmechanik”, 865-867.

que de forma completamente análoga à correspondente da Mecânica Clássica coloca, em relação mútua, dois intervalos de tempo estacionários com um tempo finito entre eles. O “salto quântico” produz-se sobre um verdadeiro vazio relativo. Aquilo que se passa, durante o “salto quântico”, dificilmente poderá descrever-se mediante uma linguagem, que sugira imagens para a nossa capacidade da intuição, quer *a priori* quer *a posteriori*.

Naturalmente a “probabilidade”, desde o momento em que está unida à função de onda ψ , não pode explicar-se como um conhecimento imperfeito, mas também não completamente perfeito, mas antes um conhecimento *in fieri*, não sendo já uma mera ficção matemática, mas algo possuidor de algum grau de realidade física, que se desenvolve num tempo métrico (cinemática quântica) e se propaga num espaço de acordo com a equação de Schroedinger.

Certo é que estamos em sintonia com Born, segundo o qual o carácter determinista das leis mecânicas resulta inquestionável no âmbito da Física Clássica. De facto não será assim. A dita Mecânica não permite a absoluta determinação das variáveis de um sistema em todas as circunstâncias.¹⁸

As leis da Mecânica Clássica *sub specie* e as leis da Física Clássica *in genere* estão construídas de tal forma, que se as variáveis de um sistema fechado são dadas num momento inicial, podem ser calculadas para qualquer outro instante (t), ainda que se encontrem mais além da habilidade humana para desenvolver as matemáticas implicadas.

O elemento aleatório começa a condicionar a sistemática científica, muito embora da forma tangencial, uma vez que se recorre à probabilidade no momento de definir o estado inicial de um sistema. Mas ,o comportamento estatístico de qualquer estado futuro seria determinado por completo, seguindo as leis deterministas da Mecânica Clássica.

Partindo deste facto, os métodos estatísticos devem ser, de maneira mais ou menos provisional, aceites. Por outras palavras, como não temos toda essa informação sobre os detalhes do sistema, devemos servir-nos de cálculos estatísticos.¹⁹

¹⁸ Cf. BORN, M. – *Physics in my generation*, Springer-Verlag, New York, 1955, 79-80.

¹⁹ Cf. SCHROEDINGER, E. – *Collected Papers on Wave Mechanics*, Blackie, London, 1928, 10-16.

Analizando a questão, com maior rigor, deveríamos falar de um débil determinismo. O determinismo da Física Clássica resulta como quimera, produzida por sobre-estima dos conceitos lógico-matemáticos. Será antes um ídolo, não um ideal das ciências naturais e por isso não pode esgrimir-se como objecção contra a interpretação estatística, pelo princípio indeterminista da Mecânica Quântica.

Enquanto a Mecânica Clássica procurou reconciliar todas as observações realizadas dentro do seu domínio teórico, com uma ideia pré-concebida de causalidade, vinculada à noção de determinismo, até aceitar esta última como postulado metafísico na luta constante contra a introdução do azar, defendemos que a teoria quântica nasceu com uma consciência clara do seu carácter estatístico e indeterminista.

A noção da probabilidade clássica muda substancialmente na nova Mecânica Quântica, já que, no "contexto quântico", o conceito de probabilidade desempenha importante papel *a priori*. Na Mecânica Quântica, um conhecimento de certa função permite-nos seguir o curso de um processo físico, na medida em que está determinado não em sentido determinista, dado numa causalidade actual, mas antes em sentido estatístico, determinado pela causalidade potencial ou *in fieri*.

Um sistema fechado define-se mediante um processo estacionário ou uma mescla de tais estadios, dados por: $p(q, q') \equiv \int P(\lambda) \cdot \psi(\lambda, q) \cdot \psi^*(\lambda, q')$, a partir dos quais se obtêm, tendo em conta que para: $q = q'$, com a função $p(t, q, q) = n(t, q)n(a, q) = |\psi(a, q)|^2$, será: $A = a$, $n(q) = p(q, q) = \int P(\lambda) |\psi(\lambda, q)|^2 = \int P(\lambda) n(\lambda, q)$.

Assim, o coeficiente arbitrário $P(\lambda)$ é a probabilidade de encontrar o sistema no estado estacionário λ . O sistema não está determinado pelas leis, tal como as conhecemos até ao momento.

Enquanto a teoria clássica introduz as coordenadas que determinam os processos individuais, são para os eliminar por causa da nossa ignorância, generalizando os seus valores, pela nova teoria obteremos os mesmos resultados, sem os introduzir. A Mecânica Quântica apresenta-se-nos afirmando indubitavelmente que a observação, de algum modo, é inócua e que a interacção, que se opera entre o objecto e o dispositivo experimental, usado, não é reduzível. As questões dinâmicas da teoria quântica, diferentemente da física clássica, não podem definir-se sem uma decisão subjectiva do investigador sobre o objecto de estudo.

A Mecânica Quântica, na linha de Born, não descreverá um estado objectivo independente do mundo exterior, sem ser um aspecto desse mundo, obtido ao considerá-lo desde certo ponto de vista subjectivo, que naturalmente determinará certa expressão experimental. Será necessário estabelecer uma decisão. Mas esta, que supõe um limite, não se pode cruzar e vem dada por h , que é o *quantum actionis*.²⁰

Logo teremos que reconhecer que a Mecânica Quântica aceita que a sua ignorância é estrutural e que o dispositivo experimental define um todo com o objecto de estudo e que a perturbação que aquele exerce sobre este não pode ser infinitamente reduzível, nem mesmo em teoria. Segundo a Mecânica Quântica, o determinismo foi abandonado. Mas, isto implicará uma renúncia à causalidade? Implicará a probabilidade uma completa arbitrariedade de certos fenómenos? Será a causalidade a base da ciência?

Deveremos dizer que a probabilidade funciona conforme as leis que possuem características essenciais das leis causais. Sustentamos que, na perspectiva de Born, a probabilidade se converte numa “certeza prática”, dado que o princípio de causalidade se mantém válido.

A conexão causal faz referência à existência de leis, segundo as quais o aparecimento de uma entidade B, de certa classe, depende do aparecimento de uma entidade A de outra classe, sendo a entidade: objecto físico, fenómeno ou acontecimento.

Assim, será considerado a causa, enquanto que B será o efeito da referida causa. Se a dita conexão se refere a sucessos individuais, então as noções de antecedente, onde a causa deve ser anterior ou, ao menos, simultânea ao efeito de contiguidade (a causa e o efeito devem estar em contacto espacial ou em conexões, mediante uma cadeia de eventos intermédios em contacto) e entrarão a fazer parte da ideia de causalidade.

A forma mais fundamental e necessária para o *fieri* do fenómeno quântico está na causa eficiente. Esta causa influi no ser do efeito, enquanto determina a passagem do não ser ao ser. Daqui que a causa eficiente não é só origem do movimento, mas do ser, como refere Aristóteles.²¹

Parece que esta possa ser definida como crença na existência de uma dependência física mútua, entre situações observacionais. Todas as especificações desta

²⁰ Cf. BORN, M. – *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Dover Publications, New York, 1964, 127-130.

²¹ Cf. BROCK, S. – *L'attualità di Aristótle*, Armando Editore, Roma, 2000, 16-62.

dependência, no que se refere ao espaço e ao tempo (contiguidade e antecedente), e a agudização infinita da observação, não nos parecem de acordo com a opinião de Born, sem consequências das leis empíricas actuais. A causalidade e seus atributos são só o resultado de um processo de inferência mediante indução, que transcende a experiência. São ideias filosóficas que tiveram uma grande influência no desenvolvimento da física clássica e que se consolidaram dentro do edifício físico-matemático pré-quântico.

O princípio de causalidade, que repousa sobre a suposição de que o estado inicial de um sistema pode ser determinado exactamente, deve ser abandonado e a lei causal, assim entendida, perderia o seu sentido.

A M. Born colocou-se a necessidade de elaborar uma nova lei da causalidade, que seja capaz de explicar a validade objectiva das leis estatísticas. Mas, dado que num processo se determinam as condições iniciais tão exactamente como o permitiam as relações de incerteza:

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim h; \quad \Delta E \cdot \Delta t \sim h,$$

as probabilidades de todos os estados ulteriores estão determinadas por leis exactas. Pensemos, pois, que a relação causa-efeito se usa de forma ordinária de duas maneiras diferentes: estabelecendo uma lei geral, independentemente do tempo, ou fazendo com que um acontecimento, definido e necessário como consequente de outro efeito. A Física Clássica, aceitando oficialmente a segunda forma de causalidade, que defende uma sequência necessária no tempo, estabelece leis deterministas. A Mecânica Quântica, através da interpretação estatística de Born, optou pela primeira: o simples estabelecimento de uma lei geral de fenómenos holísticos e diferentemente da Mecânica de Newton.

Desta forma, vemos como Born defendeu que a indeterminação é causalmente legislável e que o carácter probabilístico, submetido às leis da realidade mais fundamental, se apresenta como facto inquestionável a partir da Mecânica Quântica. Poderemos sustentar que esta nova mecânica, que é essencialmente estatística e causa de distribuição de partículas, completamente indeterminada, mantém, contudo, uma "legalidade causal".

Negar a relação causa-efeito, implicaria negar o parecer da ciência, muito embora o abandono do determinismo não signifique uma perda do princípio de causalidade.

A causalidade deve limitar-se às perdições das amplitudes de probabilidade. Naturalmente, substituiu-se a evolução do estado de um sistema pela probabilidade dos diferentes estados possíveis, ainda que se conserve a causalidade na lei da solução temporal das probabilidades. Assim se obtém um objectivo que será estabelecer, no mundo quântico, a legalidade causal indeterminista. A interpretação estatística de M.Born não só afecta o esclarecimento de uma causalidade indeterminista, bem como implica a revisão do conceito de realidade física, à luz da noção de probabilidade.²²

A interpretação probabilística de Max Born parece ter sido vinculada a uma imagem positivista do fazer científico. Longe de referir M. Born, num marco instrumentalista, queremos tornar claro que a sua proposta poderá ser considerada “realista”.

Born propôs um critério de objectividade que, em nossa opinião, não é senão a defesa de uma imagem realista da ciência e, particularmente, ainda que a dita imagem seja em grande medida diferente da clássica. Mas, para argumentar esta questão deveremos analisar como forja Born a noção de realidade a partir de “invariantes observacionais”.

Com efeito, que tipo de realidade poderemos atribuir aos objectos últimos do conhecimento, que nos oferece a Física Quântica? É esta questão que se coloca a Born, que o induz a definir um critério de objectividade. O dito critério não pode ser concebido mais do que como um meio, que possibilite a distinção entre as impressões subjectivas e os feitos objectivos, procurando-se obter uma intersubjectividade comum. O objectivo desta intersubjectividade implica poder explicar como as percepções sensoriais dos indivíduos, particulares e suas posteriores elaborações conceptuais podem alcançar um carácter objectivo, válido para todos os indivíduos, estabelecendo-se os alicerces do saber científico.

Desde o momento em que nos introduzimos no âmbito quântico, o princípio da objectividade sofre diferentes “modalidades”. Tal como as relações de incerteza sustentam ($\Delta p \cdot \Delta x \sim h$; $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$), o investigador deve renunciar a investigar todas as probabilidades de um sistema físico de forma simultânea e deve abandonar a ideia de observar o curso dos acontecimentos sem os perturbar. Daqui que poderemos dizer que a subjectividade não é eliminável e o conhecimento objectivo se problematiza. Este é o

²² Cf. BORN, M. – *El inquieto Universo*, traducción del ingles, Eudiba, Buenos Aires, 1960, 167-168.

status quaestionis que Born encontra a partir do qual empreende o labor de dotar de significação intuitiva as “noções quânticas”. Tem realidade física a existência de ondas e partículas? A resposta a esta questão não será senão a resultante de uma orientação realista e, em grande medida, ingénua. Já verificamos que não tem sentido considerar esta onda como “onda harmónica” de extensão indefinida. Deve considerar-se como um “feixe de ondas” consistente num pequeno grupo de números de ondas infinitamente próximas ou de grande extensão espacial. A velocidade de grupo é idêntica à velocidade da partícula, o que será o mesmo dizer que o feixe de ondas se move juntamente com a partícula.

Em que lugar do feixe de ondas está a partícula? Como poderemos definir a dita partícula? Parece claro que devemos matizar a forma de nos aproximarmos do mundo físico.

Segundo a perspectiva de Born, a teoria quântica exige um sacrifício intelectual, que reside na renúncia à completa determinabilidade da posição e do tempo, com respeito a uma partícula, cujo impulso e energia se conhecem, bem como a renúncia à predição dos factos futuros, dado que a natureza parece exigir aspectos irracionais e ininteligíveis, que devem colocar alguns limites à razão.²³

De que limites se trata? Daqueles que nos impõem as relações de incerteza no contexto experimental. A partir daqui será possível redefinir a noção de realidade física.

Será necessário uma mudança na racionalidade científica e renunciar à contradição existente entre teorias, modificando a noção de realidade física. Foi isto que cremos que conseguiu realizar Born, uma empresa tão cara, como alheia a uma perspectiva instrumentalista da ciência.

Born defende que o que entendemos por realidade externa e objectiva se configura na nossa mente por meio de um processo inconsciente, que une as diferentes impressões sensíveis recebidas, sustentando que a mente constitui inconscientemente invariantes de percepção e que estes são o que o homem comum denomina de coisas reais. Segundo o pensamento de Born, a ciência faz exactamente o mesmo, só que num nível diferente de percepção, usando os mecanismos próprios de observação e de

²³ Cf. BORN, M. – *Physics in my Generation*, 27-36.

medida. Desta forma a realidade será entendida como soma de invariantes de observação.²⁴

Born propõe uma aproximação intuitiva àquilo que a ciência considera como real, partindo do facto de que intuitivamente se afirma que a realidade de algum objecto, sucesso ou situação implicam pressupor que as nossas impressões sensíveis não são uma alucinação permanente, mas são indicadores de um mundo. que existe independentemente de nós.

Trata-se, pois, de afirmar que, mesmo que os sinais mudem constantemente, damo-nos conta que existem objectos com propriedades invariantes. O conjunto destes invariantes das nossas impressões sensíveis é a realidade física, que a nossa mente constitui de forma inconsciente.

A ciência não será senão a construção firme desses invariantes de observação, quando são óbvios.

Nesta perspectiva teórica, Born pretende dirimir o aspecto *a priori* da natureza dual (corpuscular e ondulatória) da realidade elementar. Naturalmente, que as partículas são reais, segundo o qual não poderiam ser reduzidas unicamente a uma explicação ondulatória, porque apresentam invariantes de observação. Acreditamos que um electrão seja real, que exista, porque tem carga(e^-) e uma massa (m) e “spin” ($+\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$), o que implica que, independentemente, de quaisquer que sejam as condições ou circunstâncias experimentais, observa-se um efeito que a teoria aceita pela presença de electrões, e encontraremos, para estas quantidades, e , m , s com os mesmos valores numéricos. Claro está que não implica que um electrão possa ser entendido como um pequeno grão de areia com uma posição e um momento bem definidos, simultaneamente, no espaço. Assim, se formula a imagem intuitiva do mundo natural. Ainda que na nossa experiência diária atribuamos aos corpos posições e velocidades definidas, não havendo nenhuma razão para crer o mesmo para outras dimensões, que estão mais além dos limites da experiência diária. É, deste modo, como Born fundamenta que a posição e velocidade de uma partícula não são consideradas invariantes de observação. São, na verdade, atributos da ideia de partícula, que usamos quando queremos descrever certo fenómeno, em termos de partículas. As partículas,

²⁴ Cf. BORN, M.; EINSTEIN, A. – *Correspondência 1916-1955*, Siglo XXI, Editores, México, 1973, 210-211.

bem como as ondas, são reais, porque têm certas propriedades invariantes, aquelas que não estão sujeitas às relações de incerteza.²⁵

Assim observamos como a noção de “invariantes de observação”, que M. Born instituiu, não é senão uma maneira de explicar o que pode ser considerado como realidade, sem esquecer os limites que no “mundo quântico” determinam a nossa percepção da “realidade quântica”, possibilitando uma interpretação intuitiva.

Poderemos falar do aspecto dual da matéria como vem definido pelo princípio de complementaridade de N. Bohr: a natureza quântica é uma realidade física com dois aspectos complementares, a imagem ondulatória e a corpuscular. Só num caso limite se opera uma interpretação que trabalha com partículas ou com ondas de forma exclusiva. Não se trata de que um electrão apareça umas vezes como onda e outras como partícula, mas simplesmente resulta necessário usar ambos os modelos para se descrever o estado de um “sistema quântico”. Para descrever uma situação física, teríamos que usar ambos os conceitos (ondas e partículas). Naturalmente, as ondas para descrever um estado, isto é, a situação experimental como um todo, e a partícula como os próprios objectos de investigação, tal como se afirma pelo princípio de complementaridade de N. Bohr.

Deveremos reconhecer que, dentro de uma imagem dual, o carácter corpuscular adquire maior peso, mas ambos são recíprocos quanticamente.²⁶

Claro está que temos que afirmar que a “onda de probabilidade” não é entendida por M. Born como uma mera ferramenta, dado que este se coloca na probabilidade das predições, sempre que a esta noção não nos referimos a algo de real ou objectivo.

Born assume, quiçá, de forma acrítica, que a sua interpretação reflexa revela o mundo da realidade elementar. A onda de probabilidade permite-nos saber que resultados são obtidos pelas experiências, que realizaram nas mesmas condições experimentais.

Esta consideração tem tanto a ver com a função de distribuição clássica, $f(t, p, q)$, quanto com a matriz da “densidade quântica” $\rho(t, p, q)$. A probabilidade tem alguma classe de realidade quântica, que não pode ser negada. Mas, como tornar inteligível o carácter objectivo da probabilidade, que Born defendeu?

²⁵ Cf. BORN, M. – *Natural philosophy of cause and chance*, 1964, 104-106.

²⁶ Cf. BORN, M. – *Physics in my Generation*, 1955, 97-100.

Sabemos que a probabilidade, desde o momento em que vai unida à “função de onda”, não é uma mera função matemática, senão algo inbuído de algum tipo de realidade física, já que se desenvolve num tempo e propaga-se num espaço, de acordo com a equação de Schroedinger:

$$i\hbar/2\pi \cdot \partial\psi/\partial t \equiv \frac{h^2}{8m\pi^2} \cdot \Delta\psi + Ep(x, y, z, t)\psi.$$

Esta é, na teoria clássica do quadrado da amplitude de onda, expressa num estado físico real, enquanto que o quadrado da função de onda expressa um estado físico real. Agora o quadrado da função de onda unicamente refere-se à probabilidade de encontrar as partículas, num dado volume, ou, num estado definido.

Resulta daqui que, na interpretação de Born, segundo a função de onda de Schroedinger, as ondas da Mecânica Ondulatória converteram-se em “ondas de probabilidade”. A reiterada repetição de uma experiência permite-nos fixar a probabilidade de um resultado e o seu carácter invariante dentro das mesmas condições experimentais. No caso das ondas, o critério da realidade objectiva aplica-se à probabilidade. As ondas de probabilidade são “invariantes” e “reais”.²⁷

O critério da invariância, de que faz uso Born, desenvolvido por Einstein na Teoria da Relatividade Restrita, ao referir-se às “ondas de probabilidade”, não é o mesmo que se aplica à massa, a carga e ao “spin” das partículas, isto é, às propriedades possuídas pelos sistemas com valor assinalável em todo o tempo à margem do contexto experimental. Reconhecemos que, como já vimos, Born conseguiu compatibilizar a dualidade “onda-corpúsculo” graças ao conceito de probabilidade. Na sua perspectiva, usa-se o conceito de partícula para fazer referência a objectos através de observacionais, uns possuídos pelo sistema, outros latentes e precisa-se do conceito de onda para determinar a probabilidade de que um observador tenha um dos valores possíveis, no caso de uma medida se leve a cabo. Assim, será necessário dizer que não existe relação de exclusão entre o aspecto corpuscular e o ondulatório dos fenómenos e esta dualidade não integra elementos incompatíveis e foi asseverada por N. Bohr²⁸ no princípio da complementaridade, hoje em desuso em Mecânica Quântica.

²⁷ Cf. JAMMER, M. – *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 1989, 303-306.

²⁸ Cf. JAMMER, M. – *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1974, 27-30.

A invariância, como critério da realidade, segundo M. Born, proporciona um princípio de objectividade, na nossa opinião, indubitavelmente vantajosa para o labor científico. A “probabilidade” converte-se numa peça –chave, tão real quanto ininteligível. Segundo M. Born, as ondas descrevem um estado probabilístico, isto é, toda a situação experimental, enquanto que as partículas são objectos próprios da investigação. As funções de onda representam, através dos seus quadrados, probabilidades:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 \cdot dV = 1; |\psi|^2 = dP/dV; dP = |\psi|^2 \cdot dV; \psi(x, y, z, t).$$

Consequentemente, a probabilidade tem um certo tipo de realidade quântica pela leitura de M. Born, que não pode ser negada, nem sequer se poderá conceber de forma, mais ou menos, “intuitiva”.²⁹

A probabilidade, segundo M. Born, vai determinar uma “causalidade circular”, dinâmica e recíproca, que existe na função de onda: $\int |\psi|^2 \cdot dV$, de tal forma que poderá determinar uma grande variedade de efeitos, provenientes da mesma causa, sendo esta potencial, uma vez que a partícula-onda na sua densidade quântica aparece como um *fieri* dual, acto-potencial, pela função de onda. Poderemos, assim, falar de uma causalidade probabilística, onde a partícula-onda tem uma nova condição ontológica.

Conclusão

Reconhecendo a dualidade onda-partícula, tanto da radiação electromagnética, quanto da matéria, poderemos argumentar que existe uma proporcionalidade paralela para uma partícula material. A probabilidade, por unidade de volume, para encontrar uma partícula, é proporcional ao quadrado da amplitude da onda, representando a partícula:

$$\frac{\text{probabilidade}}{V} \cdot \alpha E^2$$

Descobrimos que a amplitude de onda, associada a uma partícula, não é uma grandeza mensurável, como é o campo eléctrico para uma onda electromagnética. Não

²⁹ Cf. BORN, M. – *My Life Recollections of a Nobel Laureate*, Charles Schribner’s Sons, New York, 1978, 16-88.

poderemos relacionar essa amplitude, com outro comportamento físico, como poderemos fazer para o campo eléctrico. A única conexão que temos será a analogia material de: $P/V \cdot \alpha E^2$; $N/V \cdot \alpha I$; $I \alpha E^2$, relacionando o quadrado da amplitude da onda com a probabilidade por unidade de volume. Chamamos simplesmente a amplitude da onda associada à partícula (amplitude de probabilidade) ou de “função de onda” com o símbolo ψ . Em geral, a função de onda ψ é uma função de variável complexa. O quadrado absoluto $|\psi|^2 = \psi \cdot \psi^*$, onde ψ^* é o complexo conjugado de ψ , será real e positivo, sendo proporcional à probabilidade por unidade de volume ao encontrar uma partícula, num certo ponto, em algum instante. A função de onda $|\psi|^2 \cdot dV$ contém dentro de si toda a informação, que pode ser conhecida sobre a partícula. Esta interpretação probabilística da função de onda, como vimos, foi inicialmente sugerida por Max Born, em 1928.

A função de onda ψ , como a apresentamos, contém apenas informação espacial sobre a partícula. Uma função de onda mais complexa ψ depende das posições de todas as partículas num espaço e num tempo dados, e será escrita frequentemente da forma seguinte:

$$\psi(x, y, z, t).$$

Essa interpretação também pode ser expressa da seguinte maneira: se dV é um pequeno elemento do volume, ao redor de algum ponto, então a probabilidade de encontrar a partícula, nesse elemento de volume, será $|\psi|^2 \cdot dV$. A probabilidade de encontrar a partícula, no intervalo de tamanho arbitrário: $a \leq x \leq b$, será:

$$P_{ab} = \int_a^b |\psi|^2 \cdot dx.^{30}$$

Assim, Born elaborou uma interpretação que contribuirá para expressar uma nova maneira de entender o procedimento científico, fora dos pressupostos clássicos, que defendiam um férreo determinismo. Mas, uma tal interpretação probabilística da função de onda $|\psi|^2 \cdot dV$ não implicará um abandono do princípio da causalidade, já

³⁰ Cf. SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. – *Princípios da Física*, Volume IV, tradução do inglês, Thomson, S. Paulo, 2002, 1121-1122.

que observamos como a conexão, necessária entre fenómenos, permanece vigente e justificando a tão necessária legalidade científica.

A filosofia da Mecânica Quântica de Born demarca-se de qualquer leitura neopositivista, propugnando uma concepção da ciência, que não abandona o seu propósito de objectividade, na busca de leis objectivas seguras, defendendo uma concepção do real reformulada, como a possibilidade da aceitação intersubjectiva de toda a aportação teórica, avaliada por meio de dados experimentais.³¹

Poderemos sustentar, na raiz do seu legado, uma espécie de fenomenismo, que modifica os compromissos ontológicos tradicionais, dado que redefine a realidade dos objectos a partir das suas invariantes de observação, constituindo uma “débil realidade”, primando, para M. Born, o aspecto corpuscular frente ao ondulatório, apesar de ser uma hermenêutica da função de onda: $|\psi|^2 \cdot dV$.

Com M. Born, surge a noção de “probabilidade objectiva”, de tal forma que esta é entendida como “real”, abandonando o âmbito da nossa inteligibilidade.³²

Em conclusão, poderemos acrescentar algumas notas gerais sobre o aspecto filosófico da questão quântica. Em primeiro lugar, é claro que o dualismo onda-corpúsculo e a indeterminação nele essencialmente envolvida nos coage a abandonar qualquer tentativa de instituir uma teoria determinística. Na verdade, a lei da causalidade, segundo a qual o curso dos eventos num sistema isolado será completamente determinado pelo estado do sistema no instante t , perde a sua validade, pelo menos no sentido da Física Clássica. Em resposta, à questão de saber se ainda persiste, na nova teoria, uma lei de causalidade, são possíveis dois pontos de vista. Ou encaramos os processos pelo lado intuitivo, agarrando-nos à imagem ondulatória e corpuscular e, neste caso, a lei da causalidade deixa certamente de ser válida; ou, como se processa no desenvolvimento ulterior da teoria, descrevemos o estado instantâneo do sistema por uma grandeza estatística, complexa, como “função de onda”, que satisfaz uma equação diferencial e, portanto, varia com o tempo de maneira completamente determinada pela sua forma no instante $t = 0$, de modo que o seu comportamento é rigorosamente causal. Esta maneira de ver a questão será equivalente a afirmar que os acontecimentos se sucedem na realidade de uma maneira estritamente causal, mas que

³¹ Cf. BORN, M. – *Experiment and Theory in Physics*, Dover Publications, New York, 1956, 19-38.

³² Cf. BORN, M. – “Continuity, Determinism and Reality”, in: *Dan Math. Medd.*, 30, 2 (Copenhagen, 1955), 16-76.

não conhecemos exactamente o estado inicial. Por conseguinte, neste sentido, a lei da causalidade seria vazia e a Física apresenta-se como indeterminista, pela natureza das coisas e, portanto, pelo domínio da estatística.

Na verdade, a concepção é ontológica, procurando definir o sentido da realidade física e como esta se comporta no mundo real. Assim, deixará de ser uma noção de função de probabilidade puramente em sentido gnoseológico, oriunda dos erros do nosso conhecimento. Logo, a interpretação probabilística de M. Born apresenta-se como um *proprium* da Mecânica Quântica. Esta leitura da probabilidade em Mecânica Quântica permitiu uma nova visualização da causalidade, chamado a si o aspecto potencial da mesma, ao terminar com o determinismo das leis da Física. Os fenómenos quânticos estão *in fieri*.