

## FÍSICA QUÂNTICA

“A *Natureza não dá saltos*”. A tentação de recorrer (quase que instintivamente) a essa máxima quando se começa a escrever sobre a Mecânica Quântica é freqüente, mas pode ser tendenciosa, pois, embora se reconheça a relevância de discutir se os saltos existem ou não, ela tende a restringir o foco da abordagem à questão técnica da *descontinuidade* na Física, em detrimento de uma análise mais ampla do impacto revolucionário da Mecânica Quântica sobre a Ciência, a Tecnologia, a História das Idéias e, em última análise, sobre o próprio homem, mais apropriada ao espaço desse livro.

A dimensão mais imediata da revolução causada pela Teoria Quântica pode ser aferida pelo fato notável de que tantos conceitos basilares, como o de energia, de massa, de causalidade, de localidade, e os paradigmas de átomo e de vazio, tenham sido diretamente afetados e revistos à luz desta teoria. Obviamente há outras dimensões, mas discuti-las todas está fora de propósito. Pretende-se, apenas, ainda que resumidamente, mostrar que, de um ponto de vista internalista, a Teoria Quântica é fruto de um longo processo de ampliação das fronteiras da crise da Física clássica, que se seguiu ao famoso trabalho do físico alemão Max Planck, e, de um ponto de vista externalista, que ela – juntamente com a Teoria da Relatividade de Einstein – estabelece uma crise de paradigmas decisiva para a construção de uma nova *Weltanschauung* em substituição àquela mecanicista de Newton e de Laplace.

O clima de *fin-de-siècle* invariavelmente leva alguns pensadores a se pronunciarem sobre o pouco que resta a fazer em sua área e outros a decretarem o fim da história... Nesse sentido, é oportuno recordar que, com as primeiras luzes do século XX, a comunidade de físicos ouvia *Lord Kelvin* afirmar que a beleza e a clareza da descrição clássica da teoria do calor e da luz “encontravam-se obscurecidas por duas nuvens”. Difícil era prever que exatamente da dissipação destas nuvens resultaria um corte epistemológico notável, talvez só comparável, do ponto de vista da relação do homem com a natureza, à Revolução Copernicana. O homem, que já havia sido retirado do centro do Universo e colocado diante de um infinito macroscópico, perde agora seu caráter privilegiado de observador absoluto, filosoficamente determinado a ser determinista – como o observador newtoniano – vislumbra um infinito microscópico, e esse sujeito epistemológico, capaz de conhecer, entra em crise e se dá conta, sobretudo, de sua incapacidade de separar claramente o sujeito e o objeto da investigação científica no que concerne ao microcosmo.

A idéia de *quantum* de energia é introduzida na Física em 1900, por Planck, que estudava a emissão de energia pelos corpos negros. Durante cerca de 50 anos haviam se acumulado resultados que apontavam para uma série de regularidades e leis empíricas muito particulares nessa área. A tentativa de se explicar teoricamente essa fenomenologia fracassou; fracasso ao qual se convencionou chamar de “catástrofe do ultra-violeta”. O emprego da palavra *catástrofe* atesta o grau de perplexidade da comunidade científica ao verificar que, do ponto de vista teórico, a fabulosa estrutura da Física clássica – que compreende a Mecânica de Newton, o Eletromagnetismo de Maxwell e a Física Estatística de Maxwell-Boltzmann – previa que a densidade de energia emitida por um corpo negro cresce infinitamente, passando a divergir dos dados experimentais quando a freqüência se aproxima do ultra-violeta. Planck constatou que a melhor descrição dos dados era obtida com a hipótese de que a energia emitida ou absorvida pelo corpo negro sob forma de radiação é quantizada, ou seja, é um múltiplo inteiro de uma certa quantidade, e mais, que este quantum de energia é proporcional à freqüência da radiação. A constante de proporcionalidade  $h$ , conhecida como constante de Planck, é a constante universal

característica dos fenômenos quânticos, assim como a velocidade da luz é a constante característica da Relatividade. Com essa hipótese, Planck reacende um velho debate sobre a natureza corpuscular ou ondulatória da luz, o qual envolveu, durante séculos, nomes como os de Newton, Biot, Boscovich e Laplace, defendendo a visão corpuscular, e de Grimaldi, Huygens, Hook, Young, Fizeau e Foucault, sustentando a ondulatória. Esta última parecia ter recebido sua comprovação maior com a descoberta das ondas eletromagnéticas por Hertz, previstas na grande síntese que foi a teoria eletromagnética de Maxwell. No entanto, Planck acreditava que a descontinuidade era inerente apenas aos processos de absorção e emissão da luz, e não uma característica intrínseca da natureza da luz. Ele próprio trabalhou cerca de 12 anos tentando encontrar alternativas à sua hipótese quântica.

A explicação de Einstein do efeito fotoelétrico, em 1905, baseada na hipótese de Planck, pressupõe que a luz é quantizada. Parece, então, que a luz *apresenta* um caráter dual: ora se manifesta como ondas, ora como partículas (os quanta de energia). Pela primeira vez na história da Física a questão do *Ser* é colocada de forma tão peculiar. Este termo *dualidade* esconde, na verdade, o início de uma profunda crise epistemológica da Ciência, capaz de abalar os alicerces do determinismo mecanicista no nível do microcosmo, cuja solução dependeu, crucialmente, das contribuições de Niels Bohr e de Louis de Broglie. O primeiro compreendeu que a constante de Planck é fundamental para assegurar a estabilidade do átomo e da matéria. A partir dessa idéia, Bohr introduz um conjunto de três postulados sobre a estrutura atômica, que contradizem algumas leis do eletromagnetismo clássico e cuja compreensão ainda levará algum tempo. De fato, ele define como órbita estacionária de um elétron no interior de um átomo aquela na qual, embora esteja acelerado, o elétron não emite energia eletromagnética. A energia emitida que se mede, segundo Bohr, é quantizada e depende da diferença de energia entre um par de órbitas. Desta forma, a constante fundamental  $h$  introduzida no estudo de fenômenos luminosos passa a ter um papel central também na descrição do átomo. O significado profundo desse trabalho de Bohr foi percebido por de Broglie, que em sua tese de doutorado de 1924 amplia as fronteiras da crise, afirmando que se a constante de Planck é, em última análise, responsável pela dualidade onda-partícula da luz, tal dualidade deve se manifestar igualmente na matéria atômica. De Broglie postula, assim, a existência de uma onda associada a cada partícula livre (e ondas são descritas por campos). É nesse sentido que ele generaliza a crise a qual se aludiu acima.

Mas como modificar as idéias de L. de Broglie para descrever a dinâmica do microcosmo? Em particular, como aplicá-las a partículas submetidas à ação de campos, como no caso dos elétrons orbitais dos átomos, submetidos aos campos do núcleo? A resposta a estas questões foi dada, em 1926, por Erwin Schrödinger, ao postular que a onda proposta por L. de Broglie é solução de uma equação diferencial (equação de onda) fundamental, que hoje leva o seu nome. Entretanto, a consistência dessa idéia exige que a função de onda de Schrödinger seja necessariamente uma função matemática complexa. Ora, todas as grandezas físicas são descritas por números e funções reais. Portanto, qual o sentido físico dessa onda? A resposta mais aceita até hoje faz parte do que se convencionou chamar de interpretação de Copenhague, e foi dada por Max Born, podendo ser resumida assim: a função de onda de Schrödinger é uma densidade de probabilidade, a partir da qual se pode calcular os valores médios das grandezas físicas, como posição, momento linear, momento angular, energia *etc.* Esse é um ponto crucial no que tange à questão do observador e de seus limites. Tratamentos estatísticos são frequentes em sistemas físicos com um número enorme de partículas ou em sistemas contínuos como nas áreas da Teoria Cinética dos Gases, da Termodinâmica, da Física Estatística e da Hidrodinâmica. Tomam-se médias devido à dificuldade técnica de cálculo e isso nada tem a ver com o

determinismo. Entretanto, na interpretação de Born, deve-se falar em descrição probabilística mesmo para um sistema de *um único* elétron. Embora a equação fundamental da Mecânica Quântica seja determinista, a evolução de *qualquer* sistema quântico só pode ser prevista probabilisticamente e, *a priori*, as possibilidades de evolução entre dois estados fixos são infinitas. “Deus não joga dados com o Universo”, retruca Einstein defendendo sua visão realista, i.e., sua crença na existência de um mundo independente do observador.

Werner Heisenberg, que construiu uma Mecânica Quântica formalmente equivalente à de Schrödinger, na qual as grandezas físicas observáveis correspondem a operadores matriciais, vai além: a Física só deve se preocupar com o que é observável e a posição de um elétron, por exemplo, com base em seu famoso *princípio da incerteza*, não pode ser determinada com precisão absoluta. Os conceitos de trajetória e de *uma* órbita de Bohr não são importantes e devem, portanto, ser abandonados. Para ele as quantidades físicas observáveis estão associadas a *duas* órbitas de Bohr, ou seja, relacionam-se às transições dos elétrons entre órbitas hipotéticas, incapazes de serem aferidas. Foi esse raciocínio que o levou a representar matematicamente as quantidades físicas por matrizes.

Por volta do início da década de 30, o físico inglês P.A.M. Dirac dará uma das maiores contribuições da Física do século XX, fundando as bases de uma descrição quântico-relativística do elétron. Do ponto de vista filosófico, é enorme o impacto das idéias de Dirac, pois ele é levado a redefinir o vácuo, como consequência de seu esforço de compatibilizar a Mecânica Quântica com a Teoria da Relatividade (*Cf.* verbete RELATIVIDADE); o paradigma de vazio pré-socrático é finalmente abandonado e o vácuo da teoria quântica passa a ser uma estrutura complexa. Do ponto de vista da prática, lançam-se as bases para o desenvolvimento da Eletrônica, da Física Nuclear e da Física do Estado Sólido, cujo impacto sobre a sociedade contemporânea é gigantesco. Basta lembrar-se de Hiroshima, da Guerra Fria e da revolução da mídia. Pode-se afirmar, com certeza, que todo o avanço das comunicações, que tem início com o rádio e ainda vai longe com o computador, é fruto, em última análise, da Teoria Quântica da matéria e da luz. Esse fato é notável e remete à distinção entre técnica e tecnologia, pois é bom recordar que enquanto se pôde construir belíssimas catedrais góticas sem que se tivesse uma teoria completa da Mecânica, não se pode construir um simples diodo ou um transistor de dimensões comparáveis à da ponta de uma caneta, sem o domínio da Mecânica Quântica.

Os princípios e as interpretações da Mecânica Quântica são, ainda hoje, motivos de pesquisas científicas e debates filosóficos. Do ponto de vista histórico, resta ainda uma grande questão, cuja resposta vai requerer um esforço intelectual multidisciplinar capaz de superar as fronteiras cada vez mais rígidas dos saberes acadêmicos. O desafio é compreender, a partir do cenário cultural europeu e do movimento das idéias das primeiras décadas do séc. XX, em que medida essa revolução na Física se relaciona com outras contemporâneas a ela, como o surrealismo e a psicanálise, no que se refere aos limites da mente e a um novo olhar do homem sobre o homem, que se afasta do determinismo e do cartesianismo, e acaba por contribuir para a formação do que Bachelard chama de razão aberta – em contraposição à razão cartesiana –, por redimensionar o próprio homem e por lhe dar um lugar novo no mundo, talvez nem melhor, nem pior, mas diferente.

#### Referências:

- Thomas S. Kuhn, *Black Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, Oxford, 1978.
- Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1966.

- Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, John Wiley, New York, 1974.
- J.M. Jauch, *Are Quanta Real?: A Galilean Dialogue*, Indiana University Press, Bloomington, 1989.

Francisco Caruso  
CBPF & UERJ

#### Referências:

- Albert Einstein, *Relativity: The Special and the General Theory (a popular exposition)*, Wings Book, New York, 1961.
- M. Amoroso Costa, *Introdução à Teoria da Relatividade*, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- Arthur I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1981.
- M.A. Tonnelat, *Histoire du Principe de Relativité*, Flammarion, Paris, 1971.