



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

As “Experiências de Pensamento” em Física: 4) Heisenberg.

O físico alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) propôs, em 1927 (*Zeitschrift für Physik* **43**, p. 172; *Forschungen und Fortschritte* **3**, p. 83), seu famoso **Princípio (Relação) da Incerteza** [PI(R)]: - *É impossível obter exatamente os valores simultâneos de duas variáveis, a não ser dentro de um limite mínimo de exatidão.* Para ilustrar esse PI, Heisenberg lançou mão de uma **“Experiência de Pensamento”**, cuja ideia decorreu de um diálogo que tivera alguns anos antes, com seu companheiro de estudos em Göttingen, Burkhard Drude. Quando os dois amigos procuravam uma maneira de “ver” as órbitas eletrônicas bohrianas, Drude sugeriu a possibilidade da construção de um microscópio que fosse capaz de dar uma visão direta do elétron em sua órbita. Ora, o Microscópio Óptico até então conhecido, era limitado apenas ao uso de luz visível ($4000 \text{ \AA} < \lambda < 7000 \text{ \AA}$; $1 \text{ \AA} = 1 \text{ angström} = 10^{-10} \text{ m}$), pois o **critério de Rayleigh** não permitia que fossem “vistos” com esse tipo de microscópio, as desejadas dimensões atômicas ($\sim 0,5 \text{ \AA}$). Em vista disso, Drude sugeriu que se usasse radiação gama (γ ; $\lambda < 0,1 \text{ \AA}$), em vez de radiação luminosa. Com esse **“microscópio γ ”** hipotético, Heisenberg idealizou uma experiência para mostrar que mesmo esse dispositivo maravilhoso não seria capaz de ultrapassar os limites de sua RI e, desta maneira, como veremos a seguir, a imagem mostrada por esse microscópio não representava, na realidade, aquilo que foi observado.

Antes de ver como Heisenberg idealizou essa experiência, vejamos o **critério de Rayleigh**. Em 1879 (*Philosophical Magazine* **8**, p. 261), o físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1910; PNF, 1904) havia observado que o limite de aplicação de qualquer instrumento óptico (IO) {p.e. microscópio óptico, inventado em 1590, pelo óptico holandês Hans Janssen [auxiliado por seu filho Zacharias (1580-c.1638)]} relacionava-se com o comprimento de onda (λ) da luz utilizada. Esse limite, que caracteriza o poder de separação (resolução) de um IO, ficou então conhecido como **critério de Rayleigh** [John Strong, **Concepts of Classical Optics** (W. H. Freeman and Company, 1958)], dado pela seguinte expressão: $\sin \theta \sim \lambda/d$, onde θ é a separação angular entre dois pontos distanciados de d (ou: $\sin \theta \sim 1.22 \lambda/d$, no caso de uma abertura circular de diâmetro d).

O microscópio hipotético de Heisenberg era bastante simples, pois bastava uma única lente e uma placa fotográfica para registrar a imagem. Imagine, pensou Heisenberg, que um elétron se aproxima do campo da lente, numa certa direção x e com um momento linear $p_x = m v_x$. Quando uma radiação γ “ilumina” o campo do microscópio, a incerteza da medida da coordenada x , isto é: Δx , é dada pelo **critério de Rayleigh**: $\Delta x \approx \lambda/\sin \theta$, onde θ PE a “abertura” angular do microscópio. Porém, prosseguiu Heisenberg, para que qualquer medida seja possível pelo menos um γ deve ser espalhado pelo elétron, penetrar na lente e ir a placa fotográfica. Porém, quando esse γ é espalhado pelo elétron, este sofre um recuo devido ao **efeito Compton** (1923) (ver verbete nesta série), que não pode ser exatamente conhecido, pois a direção do γ espalhado é indeterminada, já que ele pode penetrar na lente

por toda a sua “abertura”. Assim, a incerteza na direção de p_x , que foi transferido ao elétron por γ é dada pela expressão: $\Delta p_x = m \Delta v_x = p \sin \theta$. Considerando que, por essa época, já se conhecia que o elétron atômico bohriano (de massa m e velocidade v) era guiado por uma “onda-piloto” cujo comprimento de onda (λ) era dado pela expressão $\lambda = h/p$, onde $p = mv$ [segundo o físico francês, o Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987; PNF, 1929) havia proposto em sua Tese de Doutorado intitulada **Recherche sur la Théorie des Quanta** (“Pesquisa sobre a Teoria dos Quanta”) defendida, em 1924, na *Universidade de Paris*] e considerando-se a expressão para Δx , teremos: $m \Delta v_x \approx (h/\lambda) \sin \theta \approx h/\Delta x$ e, portanto: $\Delta v_x \Delta x \approx \lambda/m$, o que traduz a RI de Heisenberg.

Note-se que esse cálculo foi apresentado por Heisenberg, na primavera de 1929, por ocasião de um curso que ministrou na *Universidade de Chicago* intitulado **Die Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie** (“Os Princípios Físicos da Teoria Quântica”), publicado em 1930 (Verlag von S. Hirzel) e, sua versão inglesa, em 1949 (Dover). Ainda, em 1929 (*Naturwissenschaften* **17**, p. 490), Heisenberg descreveu a evolução da Teoria Quântica, entre 1918 e 1928



ANTERIOR