

### 3: O princípio da incerteza

A experiência de Young" para elétrons, em particular a formação de uma figura de interferência mesmo quando o feixe de elétrons é tão rarefeito que não há dúvida de que os elétrons chegam um a um na tela, mostra que a física dos elétrons é incompatível com o conceito de trajetória.

*Não existe, na mecânica quântica, o conceito de trajetória*

Isto é o conteúdo do princípio da incerteza, um dos fundamentos da mecânica quântica, descoberto por Werner Heisenberg em 1927.

A maneira de se obter informações sobre um sistema quântico (que chamaremos, para simplificar, de *elétron*) é realizar interações entre ele e objetos clássicos, denominados aparelhos. Por hipótese esses aparelhos podem ser descritos pela mecânica clássica com a precisão que quisermos. Quando um elétron interage com um aparelho, o estado deste último é modificado. A natureza e magnitude dessa modificação dependem do estado do elétron, e servem, por isso, para caracterizá-lo quantitativamente. A interação entre o elétron e o aparelho é denominada medida. Um aparelho não precisa ser macroscópico. O movimento de um elétron numa câmara de Wilson é observado por meio da trajetória nebulosa que ele deixa; a espessura dessa trajetória é grande, comparada com as dimensões atômicas. Quando a trajetória de um elétron é determinada com essa baixa precisão, ele é um objeto inteiramente clássico.

A mecânica quântica, ao menos em seu estágio atual, ocupa um lugar pouco usual entre as teorias físicas: ela contém a mecânica clássica como um caso limite, e, ao mesmo tempo, necessita desse caso limite para estabelecer a sua linguagem.

O problema típico da mecânica quântica consiste em prever o resultado de uma medida a partir dos resultados de um certo número de medidas anteriores. Além disso, veremos mais tarde que, em comparação com a mecânica clássica, a mecânica quântica restringe os valores das quantidades físicas medidas (por exemplo, a energia). Os métodos da mecânica quântica permitem a determinação desses valores admissíveis.

O processo de medida na mecânica quântica tem uma propriedade muito importante: a medida sempre afeta o elétron medido, e é impossível, por questões de princípio, tornar o efeito da medida sobre o elétron arbitrariamente pequeno (como pode ser suposto na física clássica). Quanto mais exata a medida, mais intenso é o efeito sobre o elétron, e é somente em medidas de pouca precisão que o efeito da medida sobre o elétron pode ser considerado pequeno.

É um dos postulados fundamentais da mecânica quântica que as coordenadas, ou seja, a posição de um elétron pode sempre ser determinada com precisão arbitrária<sup>2</sup>. Suponhamos que, a intervalos definidos  $\Delta t$ , sejam feitas medidas sucessivas das coordenadas de um elétron. Os resultados não estarão, em geral, sobre uma curva lisa. Ao contrário, quanto menor o valor de  $\Delta t$ , mais descontínuos e desordenados serão os resultados, de acordo com o fato de que não existe uma trajetória para o elétron. Uma trajetória razoavelmente lisa só é obtida se as coordenadas do elétron forem medidas com pouca precisão, como no caso de uma câmara de Wilson. Para informações sobre o que é uma câmara de Wilson, veja

<http://rd11.web.cern.ch/RD11/rkb/PH14pp/node29.html#28>

Se, mantendo-se imutada a precisão das medidas de posição, diminuirmos os intervalos  $\Delta t$  entre as medidas, então medidas adjacentes darão valores vizinhos às coordenadas. Contudo, os

Autor: Henrique Fleming

resultados de uma série de medidas sucessivas, embora estejam em uma região reduzida do espaço, estarão distribuídas, nessa região, de uma forma totalmente irregular, e nunca em cima de uma curva lisa. Em particular, quando  $\Delta t$  tende a zero, os resultados das medidas adjacentes de nenhuma maneira tende a estar sobre uma reta. Ora, a velocidade tem a direção da reta que, na física clássica, é obtida nesse limite. Esta circunstância mostra que, na mecânica quântica, não existe a velocidade da partícula no sentido clássico do termo, isto é, o limite de  $(\Delta \vec{r} / \Delta t)$  quando  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Enquanto, na mecânica clássica, a partícula tem posição e velocidade bem definidas em cada instante, na mecânica quântica a situação é bem diferente. Se, como resultado de uma medida, determinam-se as coordenadas de um elétron, então sua velocidade é totalmente indefinida. Se, ao contrário, determina-se a velocidade de um elétron, então ele não pode ter uma posição definida no espaço. Assim, na mecânica quântica, a posições e a velocidade de um elétron são quantidades que não podem ter, simultaneamente, valores definidos.