

O Princípio de Incertezaⁱ

Quando tentamos aplicar a mecânica clássica e a eletrodinâmica para explicar fenômenos atômicos, eles levam a resultados que estão em óbvio conflito com o experimento. Isso é muito claramente constatado a partir da contradição obtida aplicando-se a eletrodinâmica ordinária a um modelo de átomo no qual o elétron se move em torno do núcleo em órbitas clássicas. Durante tal movimento, como em qualquer movimento acelerado de cargas, os elétrons terão que emitir ondas eletromagnéticas continuamente. Através dessa emissão, os elétrons perderão sua energia, e isso causaria eventualmente sua queda no núcleo. Portanto, de acordo com a eletrodinâmica clássica, o átomo seria instável, o que absolutamente não concorda com a realidade.

Essa contradição marcante entre a teoria e o experimento indica que a construção de uma teoria aplicável a fenômenos atômicos – ou seja, fenômenos que ocorrem em partículas de massas muito pequenas em distâncias muito pequenas – demanda uma modificação fundamental dos conceitos básicos e leis.

Como um ponto de partida para investigação dessas modificações, é conveniente tomarmos o fenômeno experimentalmente observado da difração de elétrons¹. Observa-se que quando um feixe homogêneo de elétrons passa através de um cristal, o feixe emergente exibe um padrão de máximos e mínimos alternados de intensidade, completamente similar ao padrão de difração de ondas eletromagnéticas. Portanto, sob certas condições, o comportamento de partículas materiais – neste caso os elétrons – apresentam características que pertencem a fenômenos ondulatórios.

Quão marcadamente esse fenômeno contradiz as ideias usuais de movimento é melhor visualizado do experimento imaginário que segue, uma idealização do experimento de difração de elétrons por um cristal. Imaginemos uma tela impermeável aos elétrons, na qual são abertas duas fendas. Observando-se a passagem de um feixe de elétrons através de uma das fendas, enquanto a outra está fechada, obtemos em uma tela colocada atrás da fenda algum padrão, ou seja, alguma distribuição de intensidades; da mesma maneira, descobrindo a segunda enquanto a primeira é coberta, obtemos outro padrão. Observando a passagem do feixe por ambas as fendas, deveríamos esperar, com base nas ideias clássicas ordinárias, um padrão que seria a simples sobreposição dos outros dois: cada elétron, movendo-se em sua trajetória passa através de uma das fendas e não tem efeito sobre os elétrons passando na outra fenda. O fenômeno da difração de elétrons mostra, entretanto, que em realidade obtemos um padrão de difração, o qual, devido à interferência, não corresponde absolutamente à soma dos padrões dados por cada fenda separadamente. É claro que esse resultado não pode de maneira alguma ser reconciliado com a ideia de que os elétrons se movem em trajetórias.

Portanto a mecânica que governa os fenômenos atômicos - mecânica quântica ou mecânica ondulatória – deve ser baseada em ideias de movimento que são fundamentalmente diferentes daquelas da mecânica clássica. Na mecânica quântica não existe o conceito de trajetória da partícula. Isso constitui-se no conteúdo chamado de princípio de incerteza, um dos princípios fundamentais da mecânica quântica, enunciado por W. Heisenberg em 1927.

Como este rejeita as ideias da mecânica clássica, o princípio de incerteza pode ser dito um princípio de conteúdo negativo. Naturalmente, esse princípio sozinho não é suficiente para estabelecer as bases nas quais se pode construir uma nova mecânica das partículas. Tal teoria deve naturalmente ser fundada em asserções positivas, as quais discutiremos na sequência. Entretanto para formular essas afirmativas, devemos primeiro definir os problemas que serão abordados pela mecânica quântica. Para

¹ O fenômeno da difração de elétrons foi descoberto de fato depois da invenção da mecânica quântica. Nessa nossa discussão, entretanto, não vamos aderir à sequência histórica do desenvolvimento da teoria, mas nos empenharemos em construí-la de maneira tal que a conexão entre os princípios básicos da mecânica quântica e os fenômenos experimentalmente observados sejam mais claramente mostrados.

fazer isso, primeiramente examinaremos a natureza especial da inter-relação entre mecânica clássica e mecânica quântica. Uma teoria mais geral pode usualmente ser formulada de maneira logicamente completa, independentemente de uma teoria menos geral que forma um caso limite daquela primeira. Dessa maneira, a mecânica relativística pode ser construída com base em seus próprios princípios fundamentais, sem referência à mecânica Newtoniana. É em princípio impossível, entretanto, formular os conceitos básicos da mecânica quântica sem usar mecânica clássica. O fato de que um elétron não tem trajetória definida significa que ele não tem também, por si, qualquer outra característica dinâmica. Portanto, torna-se claro que para um sistema composto apenas por objetos quânticos seria inteiramente impossível construir qualquer mecânica logicamente independente. A possibilidade de uma descrição quantitativa do movimento de um elétron requer a presença de objetos que obedeçam a mecânica clássica dentro de um suficiente grau de exatidão. Se um elétron interage com tal “objeto clássico”, o estado do elétron é, falando de maneira geral, alterado. A natureza e magnitude dessa mudança depende do estado do elétron, e, portanto, serve para caracterizá-lo quantitativamente.

Nessa conexão, o “objeto clássico” é usualmente chamado de “aparato”, e sua interação com o elétron é denominada “medição”. Entretanto, deve ser enfatizado aqui que não estamos nos referindo ao um processo no qual o físico-observador toma parte. Por “medição”, em mecânica quântica, entendemos qualquer processo de interação entre objetos clássicos e quânticos, ocorrendo separada e independentemente de qualquer observador.

Definimos um “aparato” como um objeto físico que é governado, com exatidão suficiente, pela mecânica clássica. Tal, portanto, é um corpo com massa grande o suficiente. Entretanto, não se deve supor que o aparato seja necessariamente macroscópico, já que a ideia de “suficiente exatidão” depende do problema real proposto. Portanto, o movimento de um elétron em uma câmara de Wilson é observado por meio da trilha nebulosa que ele deixa, e a espessura da trilha é grande comparada com as dimensões atômicas; quando a trajetória é determinada com essa baixa exatidão, o elétron é um objeto inteiramente clássico.

Portanto a mecânica quântica ocupa um lugar bastante não usual entre as teorias físicas: ela contém a mecânica clássica como um caso limite, e ainda requer ao mesmo tempo esse caso limite para sua própria formulação.

Podemos agora formular um problema da mecânica quântica. Um problema típico consiste em prever o resultado de uma medida subsequente, a partir do resultado conhecido de medidas anteriores. Além disso, veremos mais tarde que, em comparação com a mecânica clássica, a mecânica quântica, geralmente, restringe o conjunto de valores que podem ser obtidos de por várias quantidades físicas (por exemplo, energia): ou seja, os valores que podem ser obtidos como resultado de uma medida em consideração. Os métodos da mecânica quântica devem possibilitar a determinação desses valores admissíveis.

O processo de medida tem na mecânica quântica uma propriedade muito importante: ele sempre afeta os elétrons sujeitos a ele, e é em princípio impossível fazê-lo arbitrariamente pequeno, para uma dada exatidão da medida. Quanto mais exata a medida, mais forte é o efeito exercido por ela. Essa propriedade das medidas está logicamente ligada ao fato de que as características dinâmicas do elétron aparecem apenas como resultado da própria medida. É claro que, se o efeito do processo de medida puder ser feito arbitrariamente pequeno, isso significaria que a quantidade medida teria por si mesma um valor definido independente da medida.

Entre os vários tipos de medidas, a determinação das coordenadas de um elétron desempenha papel fundamental. Dentro dos limites de aplicabilidade da mecânica quântica, uma medida das coordenadas de um elétron pode sempre ser realizada² com qualquer exatidão desejada.

Suponhamos que, em intervalos de tempo definidos Δt , sucessivas medidas das coordenadas de um elétron sejam feitas. Os resultados não repousarão em geral sobre uma curva suave. Ao contrário, quanto mais precisas forem as medidas, mais descontínua e desordenada será a variação dos resultados, de acordo com a não existência de uma trajetória para o elétron. Uma trajetória razoavelmente contínua será obtida apenas se as coordenadas do elétron forem medidas com baixa precisão, como por exemplo na condensação de gotículas de vapor em uma câmara de Wilson.

Se agora, deixando a acurácia das medidas inalterada, diminuirmos o intervalo de tempo Δt entre as medidas, então as medidas adjacentes, darão valores próximos das coordenadas. Entretanto, os resultados de uma série sucessiva de medidas, embora residam em uma região pequena do espaço, estarão distribuídos nesta região de uma maneira completamente irregular, e não descrevem uma curva suave. Em particular, quando Δt tende a zero, os resultados de medidas adjacentes não tendem de maneira alguma a descrever uma linha reta.

Essas circunstâncias mostram que, em mecânica quântica, não há o conceito de velocidade da partícula no sentido clássico da palavra, ou seja, o limite para o qual a diferença de coordenadas em dois instantes, dividida pelo intervalo de tempo Δt entre esses instantes, tende quando Δt tende a zero. Entretanto, veremos mais tarde em mecânica quântica, que uma definição razoável de velocidade da partícula em um dado instante pode ser construída, e essa velocidade tende à velocidade clássica quando passamos ao limite da física clássica. Mas enquanto na mecânica clássica a partícula apresenta coordenadas e velocidade definidas em qualquer instante dado, na mecânica quântica a situação é totalmente diferente. Se, como resultado de uma medição, o elétron apresentar coordenadas bem definidas, então ele não terá qualquer definição da velocidade. Inversamente, se o elétron tiver uma velocidade definida, ele não terá uma posição definida no espaço, já que a existência simultânea de coordenadas e velocidade significará a existência de uma trajetória definida, a qual o elétron não tem. Portanto, na mecânica quântica, as coordenadas e velocidade de um elétron são quantidades que não podem ser medidas exatamente de maneira simultânea, ou seja, elas não podem ter simultaneamente valores definidos. No que segue iremos estabelecer uma relação quantitativa que determina a possibilidade de realizar uma medida inexata de coordenadas e velocidade no mesmo instante.

Uma descrição completa do estado de um sistema físico em mecânica clássica é efetuada estabelecendo as coordenadas e a velocidade em um dado instante; com esses dados iniciais, as equações do movimento completamente determinam o comportamento do sistema em todos os instantes posteriores. Na mecânica quântica é impossível em princípio, já que as coordenadas e velocidades correspondentes não podem existir simultaneamente. Portanto uma descrição do estado de um sistema quântico é efetuada usando um número menor de quantidades que na mecânica clássica, ou seja, ela é menos detalhada que a descrição clássica.

Uma consequência muito importante deriva disso em relação à natureza das predições feitas em mecânica quântica. Enquanto a descrição clássica é suficiente para prever o movimento futuro de um sistema mecânico com exatidão completa, a descrição menos detalhada de um sistema mecânico quântico evidentemente não pode ser suficiente para fazer isso. Isso significa que se um elétron está em um estado descrito da melhor maneira possível em mecânica quântica, seu comportamento em instantes subsequentes é em princípio incerto. Portanto a mecânica quântica não pode fazer previsões completamente definidas a respeito do comportamento futuro do elétron. Para um dado estado inicial

² Enfatizamos novamente que, quando dizemos “realizar uma medição”, nos referimos à interação de um elétron com um “aparato” clássico, o que de maneira alguma pressupõe a presença de um observador externo.

do elétron, uma medida subsequente pode dar vários resultados. O problema em mecânica quântica consiste em determinar a possibilidade de obter os vários resultados possíveis quando se realiza essa medida. Deve-se entender, entretanto, que em alguns casos especiais a probabilidade de um dado resultado pode ser igual à unidade, constituindo-se, portanto, em uma certeza, de maneira que o resultado daquela medida seja único.

Todos os processos de medição em mecânica quântica podem ser divididos em duas classes. Em uma, a qual contém a maioria das medidas, nós encontramos aqueles que não levam com certeza a um único resultado, qualquer que seja o estado do sistema. A outra classe contém medidas tais que para cada resultado possível da medida há um estado no qual a medida leva com certeza a esse resultado. Essas últimas medições, as quais podem ser chamadas de *previsíveis*, desempenham um papel importante na mecânica quântica. As características quantitativas de um estado que são determinadas por tais medidas são chamadas de *quantidades físicas* em mecânica quântica. Se em algum estado uma medida dá com certeza um resultado único, dizemos que neste estado a quantidade física correspondente tem valor definido. No que segue iremos sempre entender a expressão “*quantidade física*” no sentido apresentado aqui.

Frequentemente observaremos em estudos de mecânica quântica que um conjunto de quantidades físicas não pode ser medido simultaneamente, ou seja, não poderão todas terem valores definidos ao mesmo tempo. Já mencionamos o exemplo da velocidade e das coordenadas de um elétron. Um papel importante na mecânica quântica é desempenhado por conjuntos de quantidades físicas que tem a seguinte propriedade: essas quantidades podem ser medidas simultaneamente, mas se elas simultaneamente tiverem valores definidos, nenhuma outra quantidade física (não resultante de uma função destas) poderá ter um valor definido naquele estado. Nos referiremos a tais conjuntos como *conjuntos completos*.

Qualquer descrição do estado de um elétron aparece como resultado de alguma medida. Formularemos o significado de uma *descrição completa* de um estado em mecânica quântica. Estados completamente descritos ocorrem como resultado de medidas simultâneas de um conjunto completo de quantidades físicas. Dos resultados de tais medidas podemos, em particular, determinar as probabilidades de vários resultados de qualquer medida subsequente, sem levar em conta a história do elétron antes da primeira medida.

ⁱ Traduzido de L. Landau. Quantum Mechanics, para a disciplina Física IV. (Prof. Humberto, Unesp-Bauru, dez. 2015).