

O Princípio da Complementaridade e o papel do observador na Mecânica Quântica

AULA 3

Metas da aula

Descrever a experiência de interferência por uma fenda dupla com elétrons, na qual a trajetória destes é observada por partículas de luz (fótons), e discutir o Princípio da Complementaridade e o papel do observador na Mecânica Quântica.

objetivos

- analisar o desaparecimento do padrão de interferência de elétrons, quando tentamos observá-los com fótons;
- rever o conceito de fótons, as partículas de luz;
- discutir o Princípio da Complementaridade;
- discutir o papel do observador na Mecânica Quântica.

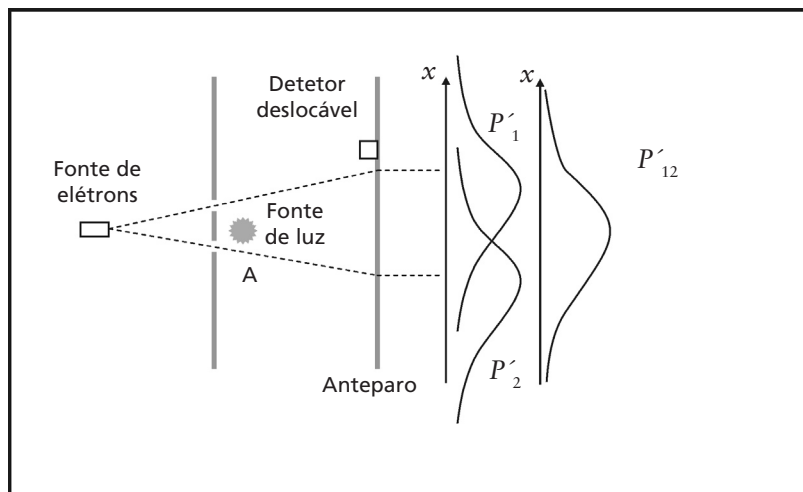
Pré-requisitos

Para uma melhor compreensão desta aula, é importante que você revise: fótons e dualidade onda-partícula (Aula 8 de Física 4B); ondas de matéria e o comprimento de onda de de Broglie (Aula 9 de Física 4B).

OBSERVANDO OS ELÉTRONS

Como prometemos na Aula 2, vamos agora modificar um pouco nosso experimento para tentar observar os elétrons. Atrás da parede com fenda dupla, introduzimos uma fonte de luz muito brilhante, como mostra a **Figura 3.1**. Sabemos que os elétrons espalham a luz, de maneira que veremos um *flash* luminoso toda vez que um elétron passar próximo à fonte de luz. Se o *flash* estiver vindo das proximidades do buraco 2, como por exemplo do ponto *A* da **Figura 3.1**, saberemos que o elétron passou pelo buraco 2. Idem para o buraco 1. Se virmos *flashes* simultâneos vindos das proximidades dos dois buracos, poderemos concluir que o elétron se dividiu em dois. Parece simples, vamos então fazer o experimento!

Figura 3.1: Esquema do experimento de fenda dupla com elétrons sendo observados por fótons. As probabilidades P'_1 e P'_2 correspondem às situações nas quais apenas os buracos 1 ou 2 estão abertos, respectivamente. Já a probabilidade P'_{12} corresponde à situação em que os dois buracos estão abertos simultaneamente.



ATIVIDADE



1. Vamos voltar ao nosso experimento virtual da fenda dupla descrito na Aula 2. Ajuste as condições do experimento de forma idêntica ao que foi feito na Atividade 1 da Aula 2, com uma única diferença: ajuste a lâmpada, para que ela tenha uma intensidade máxima (100%) e um comprimento de onda de 380nm (cor azul). Execute o experimento com a lâmpada ligada. O que você observa?

RESPOSTA

Veja que a interferência desaparece quando ligamos a lâmpada!

O que aconteceu? Se pudéssemos analisar o experimento com mais detalhe, iríamos observar que sempre que ouvimos um “clique” do nosso detector, não importa onde ele esteja, vemos também um *flash* vindo do buraco 1 *ou* do buraco 2, mas nunca dos dois ao mesmo tempo. Ficamos um pouco aliviados: seria mesmo um pouco complicado descrever um elétron que se divide. Concluímos, por esse experimento, que a hipótese A é correta, ou seja, que os elétrons passam por um buraco ou pelo outro! Mas espere um minuto... Na aula passada, tínhamos concluído exatamente o oposto, a partir da análise das probabilidades (ou seja, que $P_{12} \neq P_1 + P_2$).

Vamos então computar novamente as probabilidades, desta vez com a nossa fonte de luz ligada. Cada vez que um elétron chega ao detector, olhamos a posição do *flash* para sabermos por onde ele passou. Assim, podemos computar duas curvas de probabilidade: P'_1 (contendo apenas os elétrons que passaram pelo buraco 1) e P'_2 (contendo apenas os elétrons que passaram pelo buraco 2). Essas curvas estão mostradas na **Figura 3.1**. Note que elas são bem parecidas com as curvas P'_1 e P'_2 , que computamos na Aula 2, fechando um dos buracos de cada vez. De fato, as curvas são idênticas, ou seja, $P'_1 = P_1$ e $P'_2 = P_2$. Isto é ótimo! Significa que não faz diferença a maneira como determinamos por qual buraco o elétron passa, o resultado final é o mesmo. Ou seja, não importa se essa determinação é feita bloqueando um dos buracos ou observando a trajetória do elétron com luz, pois obteremos o mesmo resultado para as distribuições de probabilidade. Temos a sensação de que estamos aos poucos “domando” nosso experimento.

Mas o que obtemos agora para a probabilidade total P'_{12} ? Na verdade, é bem simples obtê-la, basta somarmos: $P'_{12} = P'_1 + P'_2 = P_1 + P_2$. É como se fizéssemos de conta que não prestamos atenção no *flash* que indica por qual buraco o elétron passou. A distribuição de probabilidades total é também mostrada na **Figura 3.1**. Ora, então concluímos que, *quando observamos os elétrons, o padrão de interferência desaparece!* Se desligamos a fonte de luz, a interferência volta a existir.

Como pode acontecer isto? A luz parece alterar o movimento dos elétrons de alguma forma, pois com luz eles se distribuem de uma forma no anteparo, sem luz, de outra forma. É como se os elétrons fossem muito delicados, e a luz desse um “empurrão” neles, quando o *flash* fosse produzido, alterando seu movimento. Isso faz algum sentido, pois, como sabemos, a luz é uma onda eletromagnética, e o campo elétrico da luz pode produzir uma força no elétron.

Bem, talvez possamos usar uma fonte de luz não tão brilhante. Pode ser que, diminuindo a intensidade da luz, possamos diminuir o “empurrão” que ela dá no elétron, recuperando assim o padrão de interferência e, ainda assim, observarmos o buraco por onde passa o elétron. Vamos tentar?

Diminuindo cada vez mais a intensidade da luz, observamos um efeito interessante. Nem todos os elétrons que chegam ao anteparo têm sua trajetória marcada por um *flash*. Alguns passam sem serem vistos. Porém, *todos os flashes que ocorrem têm a mesma intensidade*. Interessante... Você se lembra do conceito de fóton, que foi introduzido na Aula 8 de Física 4B? Naquela ocasião, já sabíamos que a luz era uma onda, mas aprendemos que ela também pode se comportar como um “pacote” ou partícula, da mesma forma que os elétrons. Essas partículas de luz são chamadas fótons. Quando diminuímos a intensidade da luz, reduzimos a taxa em que os fótons são emitidos. É por isso que às vezes os elétrons passam sem serem vistos. Provavelmente, não havia um fóton nas proximidades dos buracos, quando eles passaram. Mas cada fóton é idêntico aos demais. Por isso, produzem o mesmo *flash*, quando esbarram nos elétrons.

Bem, vamos levar adiante o experimento com a luz de intensidade reduzida. Desta vez, podemos classificar os elétrons em três tipos: (1) aqueles que são vistos passar pelo buraco 1; (2) aqueles que são vistos passar pelo buraco 2; (3) e aqueles que não são vistos. Ao computarmos as distribuições de probabilidades para cada um dos três tipos de elétrons, encontramos o seguinte: os elétrons do tipo 1 se distribuem como P'_1 , os do tipo 2 se distribuem como P'_2 e os do tipo 3 (aqueles que não são vistos) se distribuem como P_{12} , ou seja, com interferência. Bem, parece ser esta a conclusão de nosso experimento: *elétrons que são vistos não mostram interferência, elétrons que não são vistos mostram interferência*. Parece ser impossível, reduzindo a intensidade da luz, observar os elétrons e ao mesmo tempo manter o padrão de interferência.



ATIVIDADE

2. Verifique, no experimento virtual, o fenômeno que acabamos de discutir. Para isso, reduza a intensidade da luz para 50% e execute o experimento novamente.

RESPOSTA COMENTADA

Você verá que o padrão observado na tela parece ser uma mistura dos padrões com interferência e sem interferência. Isso corresponde exatamente ao que discutimos anteriormente, ou seja, elétrons que são observados não interferem, enquanto os elétrons que não são observados interferem.

A dificuldade essencial é que, ao reduzirmos a intensidade da luz, não reduzimos a “intensidade” de cada fóton ou, de forma mais precisa, a energia que ele transporta. Apenas reduzimos o número de fótons. Como é possível reduzir a energia de cada fóton? Como vimos na Aula 8 de Física 4B, uma das primeiras hipóteses da teoria quântica diz que a energia de cada fóton é proporcional à frequência da onda associada a ele:

$$E = h\nu, \quad (2.1)$$

onde ν é a frequência da luz e h é a constante de Planck. Por exemplo, fótons de luz vermelha (frequência menor) têm energia menor do que fótons de luz azul (frequência maior). Eis então uma saída possível para o nosso enigma: em vez de diminuirmos a intensidade da luz, vamos mudar sua cor. Assim, os fótons terão energia e momento linear menores e vão dar “empurrões” menores nos elétrons. Quem sabe poderemos chegar a uma situação em que os elétrons poderão ser vistos e, ainda assim, mostrar interferência?

Voltamos ao laboratório. Fazemos o experimento. Iniciamos com luz de alta frequência (pequeno comprimento de onda): como antes, enxergamos os elétrons passar pelos buracos 1 ou 2, mas não há interferência. Vamos, gradualmente, diminuindo a frequência da luz (aumentando seu comprimento de onda) até um certo ponto em que

recuperamos o padrão de interferência. Tudo parece funcionar bem. Mas quando olhamos agora para os *flashes*, temos uma surpresa desagradável. Continuamos a vê-los, mas eles agora estão maiores, mais difusos, como grandes borrões. Tão grandes que não conseguimos dizer se vêm da região do buraco 1 ou do buraco 2! Ou seja, ao tentarmos usar fótons de baixa energia, de modo que eles não atrapalhem o movimento dos elétrons, esses fótons não permitem uma definição da trajetória do elétron.

Desistimos...

O que aconteceu? Na verdade, este é um efeito familiar da ótica. Se temos dois objetos muito próximos, eles só são distinguíveis entre si se forem observados com uma luz de comprimento de onda menor que a distância entre eles. Caso contrário, os dois objetos aparecerão juntos, como um borrão, sem que possamos distingui-los. Diz-se, então, que não temos *resolução* para identificar os dois objetos separadamente.

Esta é a razão fundamental pela qual os microscópios óticos têm um poder de aumento limitado. Não importa o quão poderoso seja o sistema de lentes destes aparelhos, sua capacidade de amplificação está fundamentalmente limitada pelo comprimento da luz visível, ou seja, não é possível distinguir objetos ou características menores que este comprimento de onda. Mas você já deve ter ouvido falar que os microscópios eletrônicos têm maior poder de aumento que os microscópios óticos, certo? E agora você pode entender como isto ocorre. Como estamos percebendo, os elétrons se comportam como ondas, e essas ondas podem ter comprimento de onda muito menor que o da luz visível, permitindo que possamos "enxergar" objetos muito menores com essas ondas eletrônicas.

O PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE E O PAPEL DO OBSERVADOR NA MECÂNICA QUÂNTICA

As conclusões finais do nosso experimento são as seguintes:

1. Elétrons são descritos por *funções de onda* ψ que fornecem a *amplitude de probabilidade* de que certos eventos aconteçam. A probabilidade é dada pelo módulo quadrado da função de onda:

$$P = |\psi|^2.$$

2. Quando um evento pode ocorrer de duas formas distintas, a função de onda é dada pela soma das funções de onda correspondentes a cada uma das possibilidades: $\psi = \psi_1 + \psi_2$, e a probabilidade é dada por $P = |\psi_1 + \psi_2|^2$. Portanto, há *interferência*.

3. Quando fazemos uma medida que permita determinar de qual das duas maneiras o evento ocorreu, perdemos a interferência, e a probabilidade é dada por $P = P_1 + P_2$.

Esta última conclusão merece uma discussão mais profunda. Você se lembra de que falamos sobre a dualidade onda-partícula, isto é, que os objetos quânticos apresentavam características tanto de partículas como de ondas? Pois bem, há um outro princípio quântico relacionado a este conceito: o *Princípio da Complementaridade*, enunciado pela primeira vez pelo físico dinamarquês Niels Bohr. Segundo ele, as características de onda e partícula são complementares e nunca se manifestam simultaneamente, ou seja, se fizermos um experimento no qual fique claramente caracterizada a natureza ondulatória de um objeto quântico, suas características de partícula não irão se manifestar; e vice-versa. No caso da experiência da fenda dupla, assim que conseguimos determinar a trajetória (um conceito típico das partículas) do elétron, o padrão de interferências (um conceito típico das ondas) desapareceu completamente.

Toda esta discussão traz consigo aspectos interessantes no que se refere ao papel do observador na Mecânica Quântica. Ao observarmos a trajetória do elétron, destruimos sua natureza ondulatória. Na Física clássica, sempre imaginamos o “observador”, isto é, a pessoa que realiza o experimento, como um ente passivo, que não interfere com o objeto de medida. É assim, por exemplo, quando observamos as estrelas no céu: elas não alteram seu movimento por causa de nossa observação. Porém, na Mecânica Quântica, o observador adquire um papel “ativo” e fundamental para a teoria. Torna-se impossível realizar uma medida sem interferir com o objeto que estamos medindo. A medição destrói a interferência quântica, causando o chamado “colapso da função de onda”. Assim, o efeito de observar o estado do sistema faz, como consequência, que esse estado seja alterado. É importante enfatizar que isso ocorre não apenas no caso do elétron passando pela fenda dupla, mas com todos os sistemas quânticos. Dessa forma, na Física Quântica, a distinção entre observador e observado deixa de ser clara; deve-se considerar que o observador é também um sistema físico que interage com o objeto de medida.

A interpretação probabilística e do papel do observador na Física Quântica que descrevemos aqui é conhecida como *interpretação de Copenhagen*, e seu principal formulador e defensor foi o físico dinamarquês Niels Bohr. Essa é a interpretação aceita pela grande maioria dos físicos hoje em dia. Mas sempre houve físicos que discordaram dessa interpretação, entre eles ninguém menos que Albert Einstein. Segundo este, “a crença em um mundo exterior independente do observador é a base de toda a ciência natural”.

Os debates entre Bohr e Einstein sobre esse e outros aspectos da Física Quântica são uma das páginas mais interessantes da Física e de seus aspectos filosóficos. Você pode aprender mais sobre esses debates em http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr-Einstein_debates, por exemplo.

Intrigante a Mecânica Quântica, não? É certamente uma das disciplinas mais fascinantes de toda a Física. Nas próximas aulas, entraremos a fundo em seus aspectos mais formais. Com isso, iremos nos capacitar para prosseguir em nossa exploração do mundo quântico.

RESUMO

Podemos utilizar fótons para visualizar a trajetória dos elétrons, quando estes passam por uma fenda dupla. Mas, quando isso acontece, a natureza ondulatória dos elétrons, caracterizada pelo padrão de interferência, desaparece completamente. Entendemos isso como uma manifestação do Princípio da Complementaridade.

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula, iniciaremos nosso estudo dos aspectos mais formais da Mecânica Quântica, enunciando seus postulados fundamentais.