

Aula 2

5 Campos, Partículas e Forças: o Pano de Fundo da Teoria

Aqui iniciamos o prelúdio para descrever completamente as partículas apresentadas na seção anterior e suas interações. Para isso, é necessário explorar as características intrínsecas das partículas elementares, bem como alguns aspectos relacionados a conservação e simetria.

5.1 Quantidades conservadas e o teorema de Noether

Antes de mais nada, observemos que, no conjunto de partículas elementares mostrado na Figura 1, há três números no canto superior esquerdo de cada caixa que representa uma partícula. Esses números correspondem, respectivamente, à massa, à carga e ao spin de cada partícula — grandezas fundamentais para distinguir os constituintes elementares do Modelo Padrão.

A **Massa** é uma medida, frequentemente expressa em quilogramas (kg), que indica a dificuldade de alterar o estado de movimento de um objeto — isto é, colocá-lo em movimento quando está parado ou detê-lo quando está em movimento. Em outras palavras, a massa representa a resistência de um corpo à aplicação de uma força. Ela também desempenha papel central na gravidade, onde aparece de modo análogo à carga no eletromagnetismo.

Já a **Carga elétrica** é uma propriedade fundamental que algumas partículas possuem intrinsecamente — uma característica “de nascença”. Ela determina como essas partículas interagem através do eletromagnetismo, funcionando como um rótulo que define como a partícula responde a campos elétricos ou magnéticos, ou mesmo como pode gerá-los. Um elétron, por exemplo, tem carga negativa igual a -1 , enquanto quarks do tipo up possuem carga positiva fracionária de $2/3$; por outro lado, os neutrinos, como o próprio nome sugere, são neutros. A carga segue a célebre regra *os opostos se atraem*: cargas de sinais contrários se atraem. Além disso, diferentemente de outras quantidades físicas, a carga não se altera, em qualquer reação, ela permanece a mesma.

O **spin**, por sua vez, pode ser entendido, para fins introdutórios, como uma “seta”. Apesar do nome sugerir rotação, não se trata de uma rotação física literal, como a de um pião, mas sim de uma propriedade intrínseca das partículas fundamentais. O spin pode assumir valores inteiros ou semi-inteiros: 0 , $1/2$, 1 , $3/2$, 2 , e assim por diante. Esse número pode ser interpretado como o “tamanho” da seta: existem partículas sem spin, como o bóson de Higgs; partículas com spin $1/2$, como quarks e léptons; e partículas com spin 1 , que são os bósons mediadores das forças fundamentais.

Existem ainda outras propriedades intrínsecas relevantes, que serão mencionadas conforme necessário. Além delas, também encontramos grandezas relacionadas ao movimento, como o momento, a energia e o momento angular.

O **Momento** (ou quantidade de movimento), do latim *momentum*, é uma grandeza que combina a massa e a velocidade de um corpo. Um carro lento, por exemplo, pode ter o mesmo momento que uma bicicleta muito rápida, dependendo dos valores envolvidos. O momento é essencial na análise de colisões e processos de espalhamento, pois, na ausência de forças externas, permanece constante. Essa conservação é uma das características fundamentais da natureza e aparece em várias áreas da Física.

A **Energia** é um conceito mais amplo e está associada à capacidade de uma partícula realizar movimento ou modificar sua própria dinâmica. Ela pode se apresentar em diferentes formas — cinética (associada à velocidade), potencial (associada à posição), térmica (associada ao calor),

entre outras — e pode transformar-se de uma forma em outra. Assim como o momento, quando não há influências externas, a energia total também permanece constante, isto é, é uma quantidade conservada. Embora diferentes parcelas de energia possam se transformar, a energia total se mantém invariável.

Mas afinal, o que é “simetria” em um sistema físico? Simetria é algo que não se altera sob uma certa transformação — por exemplo, observar um mesmo experimento de diferentes pontos de vista e obter sempre o mesmo resultado. Com base no teorema de Noether, é possível associar essas simetrias a quantidades conservadas, como o momento ou a energia.

Partindo dessa ideia, podemos estabelecer as seguintes conexões:

- Quando há uma simetria temporal no sistema — isto é, quando o mesmo experimento realizado ontem ou hoje produz o mesmo resultado —, a energia total do sistema é conservada.
- Quando há uma simetria espacial — isto é, quando o mesmo experimento é feito simultaneamente em diferentes lugares e produz sempre o mesmo resultado —, o momento é uma quantidade conservada.

A beleza do teorema de Noether está justamente nisso: as leis da Física permanecem as mesmas para referenciais distintos e, além disso, há uma conexão profunda entre simetrias (inclusive geométricas) e quantidades conservadas.

Dessa forma, podemos afirmar que as grandezas apresentadas aqui — tanto as intrínsecas, como massa, carga e spin, quanto as dinâmicas, como energia e momento — não são apenas números isolados, mas sim pilares fundamentais que determinam quais processos são possíveis no universo.

Esse fato é tão marcante que, por si só, revela uma ordem nas leis naturais: descobrir uma nova quantidade conservada pode indicar a existência de uma nova simetria, e vice-versa.

Na seção anterior, exploramos os principais conceitos relacionados à estrutura da matéria. Iniciamos pelos primórdios do que viria a ser um modelo atômico, com o atomismo de Leucipo e Demócrito no século V a.C., e percorremos os primeiros modelos científicos consolidados no século XIX. Em seguida, discutimos os fundamentos da matéria a partir da física moderna, o surgimento das partículas subatômicas e a organização dessas entidades no contexto do Modelo Padrão. Também destacamos os principais desafios e limitações dessa teoria.

Agora, avançaremos para os tópicos centrais da física contemporânea, abordando a *Teoria Quântica de Campos* (TQC). Essa teoria constitui a base formal da física de partículas moderna, e resulta da unificação de dois pilares fundamentais do século XX:

- A mecânica quântica, que descreve o comportamento de sistemas em escalas microscópicas;
- A relatividade restrita, que estabelece as leis da física para objetos que se movem em velocidades próximas à da luz.

Para compreender a estrutura e os conceitos da TQC, é necessário, antes, discutir como a física interpreta partículas e campos, e como esses elementos se relacionam nas formulações clássica e quântica. Pra isso, precisamos descrever os fundamentos da Relatividade Especial e da Mecânica Quântica e como esses conceitos se aplicam na descrição de campos físicos, explicitando as diferenças entre um campo clássico e um campo quântico.

Essa distinção conceitual é fundamental, pois é a partir dela que surge uma nova maneira de descrever as interações fundamentais da natureza: por meio da quantização dos campos e da interpretação das partículas como excitações desses campos.

Tendo explicado os conceitos da Mecânica Quântica, é hora de avançar para a outra grande revolução do século XX: a Relatividade Especial.

5.2 Relatividade Especial: Conceitos fundamentais

Para obter uma síntese geral acerca desta teoria, é necessário traçar um paralelo com a relatividade clássica de Galileu, o que será feito a seguir.

5.2.1 Relatividade Galileana

Quando falamos de Mecânica Clássica, estamos nos referindo àquela desenvolvida — com base nas contribuições de vários pensadores — por Isaac Newton. Ele resumiu a natureza do movimento dos corpos em três ideias principais, conhecidas como as três leis de Newton. São elas:

- 1ª Lei: Um corpo em repouso permanecerá em repouso, e um corpo em movimento retilíneo uniforme permanecerá em movimento retilíneo uniforme, a menos que uma força externa seja aplicada sobre ele, alterando seu estado de movimento.
- 2ª Lei: Em qualquer referencial inercial, a dinâmica de uma partícula é regida por $\vec{F} = d\vec{p}/dt$.
- 3ª Lei: A cada ação corresponde uma reação de mesma intensidade e de sentido oposto.

A primeira lei define o que são referenciais inerciais. Estes são, em palavras mais simples, observadores que estão parados ou em movimento retilíneo uniforme, a partir dos quais toda a descrição da mecânica é feita. Sendo assim, dadas essas leis para o movimento de corpos, é necessário conhecer como sua descrição é alterada em relação a dois referenciais inerciais diferentes.

Para entendermos este conceito, suponha que você esteja parado em uma calçada, por exemplo. Vamos chamá-lo de referencial S . Seu amigo passa de carro com uma velocidade constante V . Vamos chamá-lo de referencial S' . Agora suponha que seu amigo jogue uma pedra. Qual seria a velocidade da pedra em relação a você? Isto é, para você, a pedra estaria mais rápida, mais lenta ou igual àquela medida pelo seu amigo?

As expressões que nos fornecem tais relações são chamadas de transformações de Galileu. Logo, para resolver este problema, vamos utilizar tais transformações:

$$x = x' + Vt', \quad \text{assim como} \quad t = t'. \quad (1)$$

Esta equação nos diz que a posição dos objetos que você mede, representada pela letra x , é igual à posição medida pelo seu amigo, representada por x' , somada à velocidade do carro dele V multiplicada pelo tempo em que ele passou por você, representado por t' . Além disso, essa mesma expressão nos diz que os tempos medidos por você e por seu amigo em seus respectivos relógios são iguais, como se esperaria.

Daí, podemos extrair a transformação de velocidades. Ou seja, se seu amigo lançou a pedra com velocidade $v' = \Delta x' / \Delta t$, para você ela terá velocidade:

$$v = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} + V \frac{\Delta t'}{\Delta t'} = v' + V. \quad (2)$$

Em outras palavras, no seu referencial de observador, ela terá a velocidade com a qual foi lançada pelo seu amigo mais a velocidade do carro em que ele está, sendo, portanto, mais rápida para você do que para ele.

Outro ponto a se notar é que, pela primeira lei de Newton, está implícito que o tempo é absoluto, apesar de isso estar expresso de forma explícita nas transformações de Galileu. Em outras palavras,

a distância temporal entre dois eventos é a mesma em qualquer referencial. Resta-nos verificar o que ocorre com a distância espacial entre dois pontos, a tempo fixo.

Para isso, vamos pensar o seguinte: podemos dizer que a distância que você mede entre os pontos final x_f e inicial x_i , representada por Δx , utilizando uma régua, pode ser escrita como:

$$\Delta x = x_f - x_i. \quad (3)$$

Mas, pelas transformações de Galileu, da equação (1), essa mesma distância pode ser associada àquela que seu amigo mede com a régua dele. Fazemos isso da seguinte forma:

$$\Delta x = x_f - x_i = (x'_f - Vt') - (x'_i - Vt') = x'_f - x'_i - Vt' + Vt' = x'_f - x'_i. \quad (4)$$

Se representarmos a distância que seu amigo mede com uma régua, entre x'_f e x'_i , por $\Delta x' = x'_f - x'_i$, teremos a seguinte relação:

$$\Delta x = \Delta x'. \quad (5)$$

Ou seja, as medidas de distância entre objetos realizadas por você e aquelas realizadas pelo seu amigo são idênticas, como se esperava.

Sendo assim, como nos dois referenciais valem as três leis de Newton e as medidas de intervalo de tempo e distância são idênticas entre referenciais inerciais, podemos dizer que *todas as leis da mecânica são invariantes por transformações de Galileu*. A explicação disso é muito simples: não é possível distinguir um referencial do outro através de nenhum experimento puramente mecânico. Ou seja, a mesma física vista por um é vista pelo outro, como se esperava.

Isso pode ser observado no exemplo anterior: para você, seu amigo está se movendo em uma certa direção com velocidade V , e a pedra parece mais rápida para você do que para ele. Para ele, você é quem se move em direção contrária com velocidade $-V$, e a pedra parece mais lenta para você, pois você está “fugindo” dela. A isso damos o nome de *Relatividade Galileana*.

Agora, suponha que, em vez de uma pedra, seu amigo esteja segurando uma lanterna. Ao ligá-la, a luz sai com uma certa velocidade c . Com base nas transformações de Galileu e no exemplo anterior, você mediria a velocidade da luz como

$$v = c + V, \quad (6)$$

pois c é a velocidade da luz para seu amigo.

Aqui surge um problema: embora as leis da mecânica sejam as mesmas para vocês dois, as leis do eletromagnetismo não seriam. Uma forma mais direta de perceber isso é imaginar que seu amigo segura uma carga elétrica parada em suas mãos. Para ele, nada acontece. Mas, para você, essa carga está em movimento, gerando uma corrente elétrica. Ou seja, em um referencial não há nada de especial e, no outro, existe uma corrente. Assim, conseguimos distinguir os referenciais, mostrando que o eletromagnetismo não é invariante sob as transformações de Galileu.

Como na física buscamos trabalhar com quantidades invariantes e simetrias que, como vimos pelo teorema de Noether, estão associadas a quantidades conservadas, é necessário resolver esse problema. Havia dois caminhos possíveis: (1) modificar toda a teoria eletromagnética, que já descrevia com precisão inúmeros fenômenos e possuía vasto respaldo experimental; ou (2) reformular as transformações de Galileu, tratando-as como um caso limite. Albert Einstein seguiu a segunda opção, criando a relatividade restrita (ou especial).

Em contraste com a mecânica clássica, a relatividade especial se baseia nas transformações de Lorentz, trazendo a mecânica de Newton como um caso particular. Ela obedece a dois postulados:

1. Todos os referenciais inerciais são equivalentes, não existe observador privilegiado, e todas as leis físicas são invariantes nessas transformações.
2. A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os referenciais inerciais, valendo $c = 299792458$ m/s.

As transformações de coordenadas são dadas por:

$$x = \gamma(x' + Vt'), \quad \text{bem como} \quad t = \gamma\left(t' + V\frac{x'}{c^2}\right). \quad (7)$$

onde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$.

A partir daqui, o tempo deixa de ser apenas o parâmetro que acompanha a variação da posição, e, junto com as coordenadas espaciais, passa a formar um conjunto quadridimensional chamado espaço-tempo. Para isso, usamos ct como a coordenada temporal.

Voltando ao exemplo do amigo no carro, imagine que ele tem dois espelhos, um em cima e outro embaixo, com um pulso de luz quicando entre eles. No referencial dele, a luz percorre um caminho vertical de vai e volta. Para você, que o vê em movimento, a luz faz um caminho diagonal (como a hipotenusa de um triângulo), percorrendo uma distância maior. Como a velocidade da luz é constante, isso significa que o intervalo de tempo entre os “tiques” do relógio do seu amigo é maior para você — esse é o efeito da dilatação temporal.

A grande conclusão da relatividade especial é que tempo e espaço não são absolutos, mas relativos. Dois efeitos surgem disso:

- **Dilatação temporal:** quanto mais rápido um referencial se move em relação a você, mais lentamente o relógio dele avança no seu ponto de vista.
- **Contração espacial:** objetos em movimento medidos por você terão comprimento menor na direção do movimento do que no referencial próprio.

Além disso, a relatividade redefine as grandezas dinâmicas da mecânica clássica. Por exemplo:

$$s = (ct, x, y, z), \quad v = \gamma(c, v_x, v_y, v_z), \quad p = \gamma m(c, v_x, v_y, v_z). \quad (8)$$

A energia relativística é:

$$E = \gamma mc^2. \quad (9)$$

No repouso ($\gamma = 1$), isso se reduz à famosa equação de Einstein:

$$E = mc^2, \quad (10)$$

que expressa a equivalência entre massa e energia. Isto nos indica que massa e energia são “*duas faces da mesma moeda*”. Ou seja, a massa de um corpo é uma forma de energia armazenada, implicando que massa pode se transformar em energia e vice-versa.

Com esses fundamentos, temos a base para avançar em direção a uma teoria de campos, sendo a mecânica quântica a outra grande revolução da física no século XX

5.3 Mecânica Quântica: Conceitos fundamentais

A mecânica quântica é a teoria responsável por responder aos problemas que, até então, no século XX, não conseguiam mais ser explicados pela física clássica. As limitações quanto ao entendimento do mundo microscópico começaram a aparecer ao se tentar descrever o mundo atômico e subatômico.

No fim do século XIX e início do XX, conceitos como a radiação do corpo negro, estudada por Max Planck em 1900, desafiaram o conhecimento físico da época. Nesse contexto, a física clássica previa que a energia irradiada por um corpo muito quente deveria tender ao infinito em altas frequências, um resultado conhecido como catástrofe ultravioleta. Para resolver esse problema, Planck propôs que a energia não era emitida de forma contínua, mas sim em pacotes discretos chamados de *quanta*. Assim, surgiu a ideia de quantização da energia.

Outro experimento fundamental para o surgimento da mecânica quântica foi o efeito fotoelétrico, explicado por Albert Einstein em 1905. Nesse experimento, a incidência de luz sobre uma placa metálica causava a ejeção de elétrons, o que não era compatível com a teoria clássica da luz como uma onda contínua. Einstein propôs que a luz era composta por partículas, chamadas de fótons, e que cada fóton possuía uma energia proporcional à sua frequência. Essa explicação marcou o início da noção de dualidade onda-partícula.

Ao longo das décadas seguintes, outros resultados experimentais reforçaram a necessidade de uma nova teoria. Finalmente, em 1926 e 1927, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e Max Born desenvolveram uma formulação consistente do comportamento da matéria em escalas atômicas.

Sabendo que o comportamento quântico é bastante distinto do comportamento clássico, podemos agora analisar os elementos básicos que caracterizam essa nova teoria. Um bom ponto de partida é o estudo de um experimento que evidencia os principais fundamentos da mecânica quântica.

5.3.1 Experimento com projéteis

Para compreender o comportamento quântico da matéria, vamos propor um experimento idealizado no qual comparamos o comportamento de balas, ondas e, mais tarde, partículas quânticas.

Considere a Figura (2). Nessa representação, temos uma arma de fogo (por exemplo, uma metralhadora) que dispara balas com uma certa dispersão angular, formando um cone. No ponto (a), há uma parede com dois orifícios, por onde algumas balas conseguem passar, ricocheteando parcialmente nas bordas. Após essa parede, há um anteparo com um detector móvel, que permite registrar a posição de impacto de cada bala ao longo do tempo.

Ao executar o experimento, como não é possível prever o trajeto exato de cada bala individualmente, utilizamos o conceito de **probabilidade de chegada**. Essa é medida como a razão entre o número de balas detectadas em um ponto específico do anteparo e o total de balas disparadas.

- Se apenas **um** dos orifícios estiver aberto, obtemos uma distribuição de impactos com pico central próximo ao orifício correspondente. Essa distribuição é representada pelas curvas P_1 ou P_2 .
- Por outro lado, se **ambas** as aberturas estiverem livres, observa-se que a distribuição de probabilidade de projéteis detectados, representada em (c), ocupa boa parte do anteparo, com pico central em $x = 0$, sendo descrita matematicamente pela soma das probabilidades individuais:

$$P_{12} = P_1 + P_2.$$

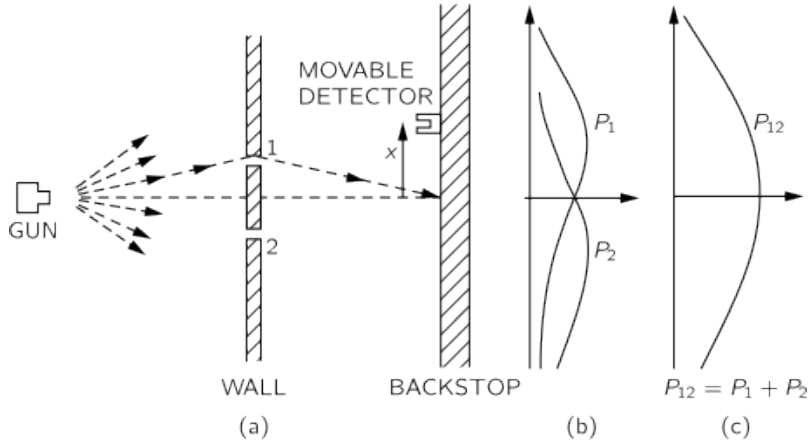


Figura 2: Representação idealizada do experimento da dupla fenda. Da esquerda para a direita, temos uma metralhadora, seguida de uma parede com dois orifícios, em (a). Após a parede, há um anteparo com um detector. O ponto (b) projeta os pontos onde as balas atingiram após o experimento.

Esse experimento serve como uma referência clássica para a descrição de densidade de probabilidade. Em seguida, iremos compará-lo com o comportamento de ondas e, posteriormente, com partículas quânticas, onde resultados surpreendentes começam a surgir.

5.3.2 Experimento com ondas

No tópico anterior, realizamos o experimento da dupla fenda sob a perspectiva de partículas clássicas, apresentando a distribuição de probabilidade para esse caso. Agora, vamos repetir a mesma análise, mas considerando ondas mecânicas, por exemplo, ondas na água. Esse novo aparato está representado na Figura (3).

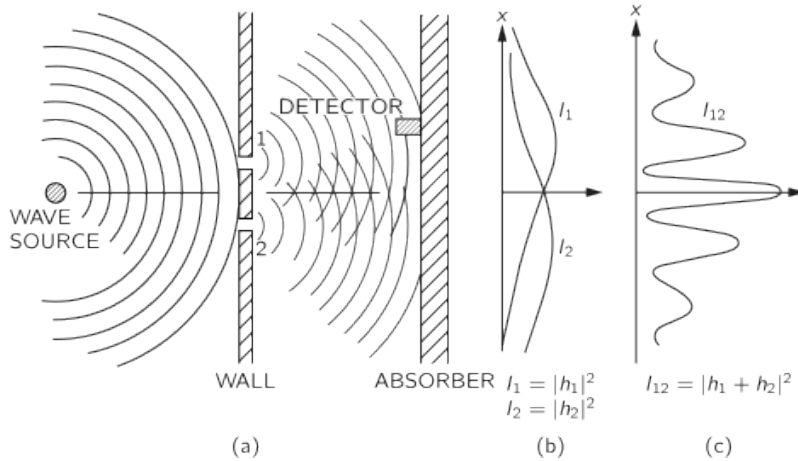


Figura 3: Dupla fenda com ondas mecânicas. Da esquerda para a direita, temos uma fonte que cria ondas, seguida de uma parede com dois orifícios, em (a). Após a parede, há um anteparo com um detector. O ponto (b) projeta os pontos onde as ondas atingiram após o experimento, e (c) representa a intensidade total.

Uma fonte vibratória cria frentes de ondas circulares que se propagam até uma parede com

duas aberturas. Atrás dessa parede, há um absorvedor que evita reflexões, e um detector móvel mede a intensidade da onda em diferentes posições ao longo do eixo x .

Diferente das balas, onde lidávamos com a *probabilidade de chegada*, agora definimos o conceito de **intensidade da onda**, isto é, a energia transportada pela onda em determinada posição, proporcional ao quadrado da amplitude da frente de onda.

- Suponha que o detector seja capaz de medir a altura (amplitude) das frentes de onda que chegam até ele. Como essa altura é proporcional à energia carregada pela onda, a intensidade medida pode assumir **qualquer valor contínuo**.
- Se a fonte vibratória for ajustada para oscilar com menor intensidade ou deslocada ligeiramente, o detector registrará uma menor amplitude, e conseqüentemente, menor intensidade.
- Isso difere do caso das partículas (balas), que só podem chegar inteiras ao detector, em outras palavras, ou chegam, ou não chegam. Ondas, por outro lado, permitem registros parciais de energia.

Essa distinção entre partículas e ondas é crucial. A possibilidade de interferência, característica típica de ondas, é justamente o que permite um novo comportamento na distribuição observada no anteparo.

- Quando **apenas um** dos furos está aberto, mede-se uma distribuição simples de intensidade: I_1 para o primeiro furo ou I_2 para o segundo.
- Com **ambos** os furos abertos, a distribuição de intensidade resultante, I_{12} , **não** é dada por uma simples soma $I_1 + I_2$, como ocorria no caso das partículas clássicas.

Essa discrepância surge devido à **interferência entre as ondas** que emergem de cada fenda. Existem dois tipos principais de interferência:

- **Construtiva**: quando as ondas chegam com fases alinhadas, suas amplitudes se somam, resultando em maior intensidade.
- **Destrutiva**: quando chegam em oposição de fase, suas amplitudes se cancelam parcialmente ou totalmente, reduzindo a intensidade.

Nesse caso, a intensidade total no anteparo pode ser descrita por:

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (11)$$

onde δ representa a diferença de fase entre as ondas provenientes de cada fenda.

Não é necessário se aprofundar na expressão matemática neste momento. O mais importante é compreender que o **terceiro termo** é o chamado *termo de interferência*, responsável pelos padrões característicos observados.

Esse resultado mostra que ondas se combinam de forma **coerente**, ou seja, sua interação depende da fase relativa entre elas. Já partículas clássicas, como balas, não apresentam esse comportamento coletivo: suas probabilidades de chegada simplesmente se somam, sem qualquer tipo de interferência.

5.3.3 Experimento com elétrons

Nos dois últimos tópicos, abordamos com detalhes o experimento da dupla fenda sob dois pontos de vista: o comportamento **corpúscular** de partículas clássicas (como balas) e o comportamento **ondulatório** de ondas mecânicas. Agora, vamos de fato adentrar na ideia de **partículas quânticas**.

Imagine o mesmo experimento, mas agora com a fonte sendo substituída por uma fonte de **elétrons**. A fonte emite elétrons da mesma forma que a metralhadora do primeiro caso: com uma certa dispersão angular, mas todos com aproximadamente a mesma energia. Esse aparato está representado na Figura (4).

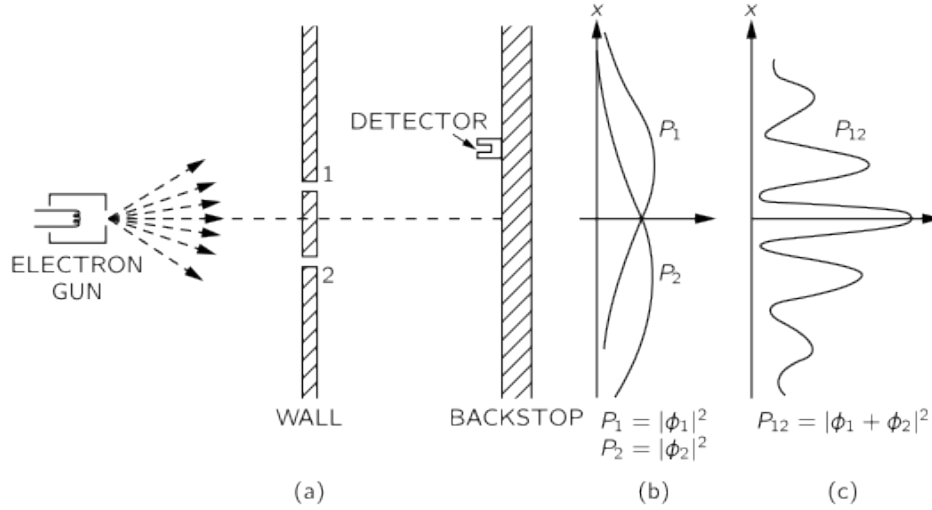


Figura 4: Dupla fenda com elétrons. Da esquerda para a direita, temos uma fonte que emite elétrons em sequência, seguida de uma parede com dois orifícios, em (a). Após a parede, há um anteparo com um detector com um emissor de som acoplado. O ponto (b) projeta os pontos onde os elétrons atingiram após o experimento, e (c) representa a probabilidade relativa.

Outra pequena mudança feita no experimento é que o detector acoplado ao anteparo possui também um dispositivo que, além de registrar o ponto onde o elétron atinge, emite um som, um *click*, toda vez que o elétron colide com o anteparo. Importantes observações podem ser feitas:

- Todos os *clicks* são iguais. Não existe meio *click*, ou variações em sua intensidade.
- A frequência com que os *clicks* ocorrem é aleatória. Não segue um padrão regular ou periódico.

Se realizarmos o experimento por um determinado período de tempo, digamos, vários minutos, e repetirmos a medição, observaremos que o número total de *clicks* será aproximadamente o mesmo. Isso nos permite falar em uma **taxa média** de *clicks* por unidade de tempo.

À medida que o detector se move ao longo do anteparo, a *taxa* de detecção (ou frequência média dos *clicks*) varia dependendo da posição. No entanto:

- O *tamanho* do *click* (ou seja, sua intensidade sonora) é sempre o mesmo.
- Se utilizássemos dois detectores em posições distintas, perceberíamos que eles nunca *clicam* ao mesmo tempo.

Essas observações nos levam a uma conclusão importante: o que quer que esteja atingindo o anteparo, o faz em pequenos **pedaços**, individualmente, um de cada vez. Esse tipo de comportamento remete àquele das partículas clássicas, como balas, ou seja, um comportamento **corpuscular**.

No experimento com balas, vimos que a distribuição dos impactos podia ser tratada como uma distribuição de **probabilidade**. Supõe-se inicialmente que cada elétron passe ou pela fenda 1 ou pela fenda 2, como uma partícula clássica faria. Assim, seria esperado que a distribuição final de elétrons no anteparo fosse a soma das distribuições individuais:

$$P_{12} = P_1 + P_2. \quad (12)$$

Ao medir a distribuição dos elétrons com apenas uma fenda aberta (P_1 ou P_2), o resultado é simples e esperado. No entanto, com ambas as fendas abertas, o padrão observado não é a soma das duas distribuições individuais, o que é curioso! O que se observa é:

$$P_{12} \neq P_1 + P_2, \quad (13)$$

na qual surge um padrão de interferência, como no experimento com ondas. A interferência sugere que não é válido pensar que o elétron passa por apenas uma das fendas. Mesmo que os elétrons cheguem ao detector como pedaços individuais (partículas), seu comportamento de distribuição segue o padrão de uma onda.

- Esse resultado indica que a suposição de que o elétron passa apenas por uma das fendas está incorreta.

Portanto, notamos um ponto central na descrição quântica da matéria: o elétron se comporta de maneira dual, como partícula e onda ao mesmo tempo. Como partícula, o elétron chega ao detector como um corpo localizado, semelhante a uma bala. Contudo, os locais onde ele pode ser detectado são determinados por uma distribuição com natureza ondulatória. Portanto, a mecânica quântica não permite uma descrição em termos de trajetórias bem definidas, como na física clássica.

5.3.4 Observando os elétrons

Até o momento, vimos como a ideia de dualidade onda-partícula pode ser interpretada a partir do experimento de dupla fenda. Abordamos duas descrições clássicas: a de balas (partículas) e a de ondas na água, e então partimos para a análise com elétrons. Curiosamente, o elétron se comporta tanto como partícula quanto como onda.

Vamos agora analisar o mesmo aparato anterior, mas com uma modificação: vamos “observar” o elétron. Para isso, acoplamos uma fonte de luz atrás da barreira, entre os dois orifícios, como mostrado na Fig. (5).

Sabemos que elétrons espalham luz. Assim, quando um elétron passa por uma das fendas, ele espalha luz, o que nos permite “ver” por qual fenda ele passou. Suponha que, ao realizar o experimento, conseguimos ver um flash de luz na região da fenda 1 ou na fenda 2. Se a luz viesse das duas fendas ao mesmo tempo, seria como se o elétron tivesse se dividido, o que não acontece.

Ao realizar o experimento com a luz, observamos que:

- Toda vez que ouvimos o *click* do detector, vemos um clarão vindo *ou* da fenda 1 *ou* da fenda 2, **nunca** dos dois ao mesmo tempo.

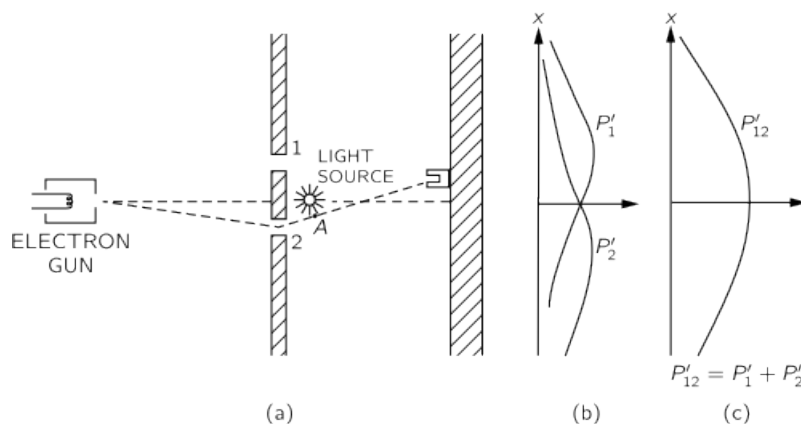


Figura 5: Dupla fenda com elétrons. Da esquerda para a direita, temos uma fonte que emite elétrons em sequência, seguida de uma parede com dois orifícios, em (a), além de uma fonte de luz entre as fendas. Após a parede, há um anteparo com um detector com um emissor de som acoplado. O ponto (b) projeta os pontos onde os elétrons atingiram após o experimento, e (c) representa a probabilidade relativa.

- Isso ocorre independentemente da posição do detector no anteparo.

Portanto, quando observamos o caminho do elétron, ele se comporta como uma partícula clássica, passando por apenas uma das fendas. O padrão de interferência desaparece. Isso levanta uma questão: como pode o resultado mudar, se no caso anterior a probabilidade total *não* era simplesmente $P_{12} = P_1 + P_2$?

Essa é uma das propriedades fundamentais da Mecânica Quântica: o ato de medir afeta o sistema. Mais especificamente:

- A luz usada para observar o elétron interage com ele, alterando sua trajetória.
- Diminuir a intensidade da luz não resolve o problema, apenas reduz a chance de detecção.
- Quando não há interação com a luz (nenhum fóton detectado), o padrão de interferência reaparece.

Esse resultado está intimamente relacionado ao **Princípio da Incerteza de Heisenberg**. Não é possível determinar com precisão o caminho (ou a fenda) que o elétron percorre sem destruir o padrão de interferência. Sempre que tentamos obter informação sobre “qual caminho”, perturbamos o sistema de forma irreversível para a interferência.

Assim, surge uma pergunta essencial: afinal, o elétron passou por uma fenda ou pelas duas?

- Se o experimento nos permite saber por onde o elétron passou, então ele passou por uma *ou* por outra.
- Se não temos como obter essa informação, então não faz sentido dizer que ele passou por uma só. Essa suposição levaria a previsões incorretas.

Essa é a lógica que devemos seguir se quisermos descrever corretamente a natureza segundo a Mecânica Quântica. Isso já nos dá um prenúncio de que partículas quânticas vão ser descritas por funções de onda.

Ao longo do desenvolvimento da física clássica, um dos pilares fundamentais era a previsibilidade. Dado o estado inicial de um sistema (posição e velocidade), as leis de Newton permitiam determinar com exatidão seu comportamento futuro. Essa visão determinista influenciou profundamente a filosofia da ciência até o século XX.

Com o avanço dos experimentos no domínio atômico e subatômico, no entanto, esse paradigma começou a ruir. A mecânica quântica surge justamente como uma resposta a fenômenos que não podiam mais ser explicados pela física clássica.

Na mecânica quântica, mesmo com a melhor preparação possível de um experimento, não é possível prever com certeza o resultado de uma medição individual. A única coisa que podemos calcular é a **probabilidade** de ocorrência de cada possível resultado.

Isso representa uma mudança profunda no ideal científico: a física moderna não busca mais determinar exatamente o que acontecerá, mas sim com que probabilidade cada evento pode ocorrer. Como afirmou Feynman:

“Sim! A física desistiu. Não sabemos como prever exatamente o que acontecerá em uma determinada circunstância, e agora acreditamos que isso é impossível. O máximo que podemos prever são as probabilidades.”

Diante desse novo cenário, alguns físicos sugeriram que talvez existam mecanismos internos às partículas, variáveis que ainda não conhecemos, que determinam seu comportamento. Por exemplo, talvez um elétron já “decida” previamente por qual fenda passará e onde irá chegar no anteparo.

Entretanto, essa hipótese entra em conflito com os resultados experimentais. Se existissem tais variáveis internas determinísticas, os padrões observados com as duas fendas abertas seriam simplesmente a soma dos padrões de cada fenda isoladamente. No entanto, o que se observa é um padrão de interferência, que só pode ser explicado pela **superposição de estados quânticos**:

$$P = |\psi_1 + \psi_2|^2 \neq P_1 + P_2$$

A presença do termo de interferência mostra que o comportamento do elétron depende do arranjo experimental como um todo, inclusive de escolhas feitas após sua emissão. Esse resultado sugere que não há um mecanismo determinístico oculto que rege o comportamento das partículas. A aleatoriedade parece ser uma característica fundamental da natureza.

Enquanto na física clássica um sistema evolui de forma contínua e determinista, na quântica lidamos com:

- Superposição de estados: uma partícula pode estar em múltiplos estados simultaneamente;
- Colapso da função de onda: a medição define o resultado, de forma aleatória, mas com probabilidades bem definidas;
- Dualidade onda-partícula: partículas como elétrons e fótons exibem comportamento ora corpuscular, ora ondulatório;
- Impossibilidade de conhecer simultaneamente certas grandezas (princípio da incerteza de Heisenberg).

Esses elementos não representam apenas uma nova teoria, mas uma mudança radical na forma de compreender a realidade física. A mecânica quântica não é apenas um conjunto de fórmulas

eficientes. Ela nos obriga a repensar o que significa “conhecer” o mundo. A noção de realidade objetiva, independente do observador, é desafiada por esse novo paradigma. Podemos então afirmar com segurança que ninguém entende a mecânica quântica.