

EE300 - CAPÍTULO 4

PROPRIEDADES ONDULATÓRIAS DA MATÉRIA

Romis Attux, Cristiano C. Cruz, Diogo C. Soriano

FEEC/UNICAMP, segundo semestre de 2012

Capítulo 4 – Propriedades Ondulatórias da Matéria

No capítulo 3, estudamos fenômenos cuja explicação dependeu essencialmente de uma análise do caráter “corpúscular” da radiação eletromagnética: fomos então introduzidos à noção de dualidade. Uma questão natural pode emergir: tal dualidade é exclusiva da radiação?

Na realidade, com alguma ousadia, não seria difícil questionar: se, como vimos, a luz pode exibir um caráter de “partícula”, não poderá, por outro lado, a matéria exibir um caráter de “onda”? Classicamente, vemos a radiação como sendo composta por ondas e a matéria como formada por “bolinhas” em número imenso. Como lidar, do ponto de vista conceitual, com a dualidade em ambas as frentes? Parte da resposta já foi dada no capítulo 3, e não sem produzir uma revolução. A outra parte da questão seria a gota d’água que firmaria de vez os alicerces da nova física e prepararia o terreno para os trabalhos magistrais de Heisenberg e Schrödinger.

Antes, porém, de penetrarmos nesse novo mundo, convém revisar brevemente alguns tópicos relacionados à teoria ondulatória clássica.

4.1 – Revisão de Ondas Clássicas

Como já tivemos a oportunidade de discutir em mais de uma ocasião, ondas eletromagnéticas estão ligadas a campos elétricos e magnéticos oscilantes. Trata-se de uma decorrência imediata das equações de Maxwell, a qual recebeu significativo suporte experimental por parte das experiências de Hertz.

Particularmente, serão de muito interesse para nós as interpretações ondulatórias de dois fenômenos: a interferência e a difração. Suponha que uma onda plana (formada por frentes de onda planas), incida sobre um aparato composto por uma única fenda, como na Fig. 4.1.

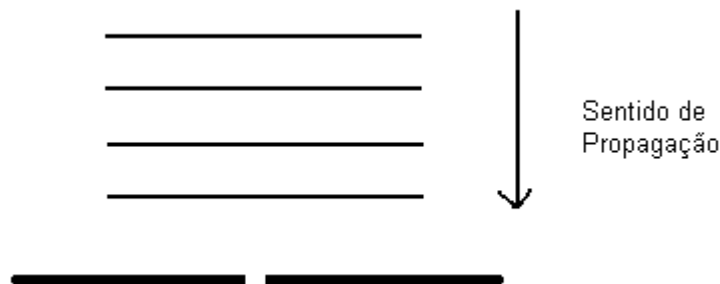


Figura 4.1

Poderíamos esperar que a luz fosse produzir um simples clarão “concentrado”, como mostrado na Fig. 4.2.

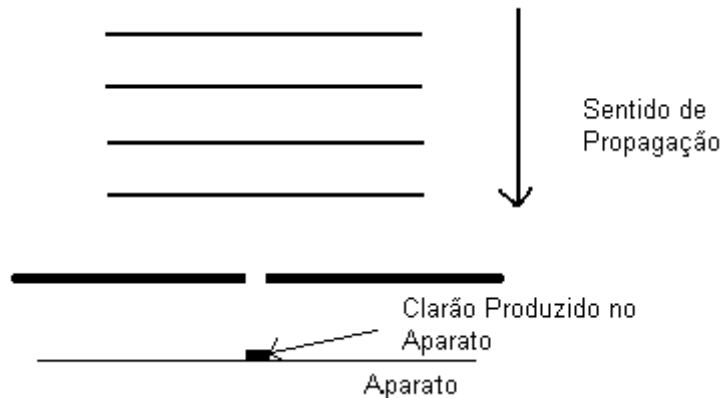


Figura 4.2

No entanto, não é necessariamente um comportamento desse tipo que a teoria ondulatória prevê. A ocorrência de um fenômeno denominado *difração* eventualmente produz um padrão muito mais complexo: de fato, é possível que surjam máximos e mínimos de luminosidade no aparato. Em termos simples, o fenômeno é tão mais “sensível” quanto menor for a fenda. Um resultado útil é que, para que se observem os máximos e mínimos, faz-se necessário usar uma fenda com abertura da ordem do comprimento de onda da luz.

Um resultado que ajuda a explicar a difração é o *princípio de Huygens*, que afirma que cada parte da fenda age como uma fonte de ondas. Assim, a luz proveniente de uma parte da fenda pode interferir com a luz proveniente de outra parte, o que termina por gerar um padrão de alternância entre zonas claras e escuras. Sob esse enfoque, completamente ligado à idéia ondulatória da luz, é possível buscar uma análise quantitativa das características do padrão exibido no aparato.

Caso dividamos a fenda em duas partes iguais, verificamos que podemos explicar o primeiro mínimo do padrão através da hipótese de que as ondas produzidas pelas fontes de Huygens de uma das metades da fenda sofrem interferência destrutiva com as produzidas pelas fontes da outra metade. Para que haja esse tipo de interferência, é necessário que haja uma defasagem de 180 graus entre as ondas, o que ocorre caso a onda produzida por uma das fontes percorra uma distância $\lambda/2$ maior que aquela percorrida pela onda produzida por sua “contraparte”. A partir de uma análise geométrica, mostra-se que o primeiro mínimo obedece à expressão:

$$\text{sen}(\theta) = (\lambda/a) \quad (4.1)$$

sendo a a abertura da fenda. Analogamente, dividindo a fenda em $2n$ partes, obtemos a equação para o n ésimo mínimo de intensidade (lembre-se de que lidamos com interferência destrutiva):

$$\text{sen}(\theta) = (n\lambda/a), \quad n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

Destacamos que, se interpretássemos a luz como um feixe de “partículas clássicas”, não teríamos como fugir de um padrão idêntico ao da Fig. 4.2.

Estudemos agora um fenômeno correlato: a interferência provocada por uma fenda dupla. A Fig. 4.3 traz o aparato envolvido.

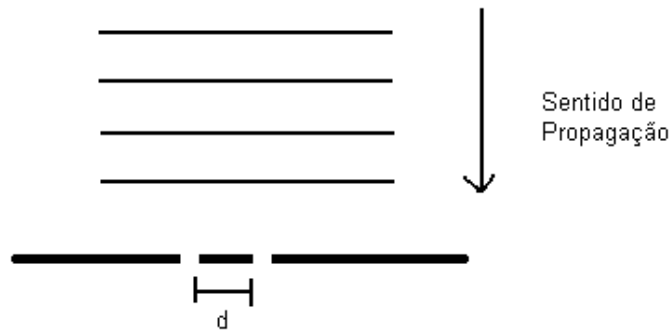


Figura 4.3

Novamente, poderíamos ser tentados a acreditar que o padrão observado seria:

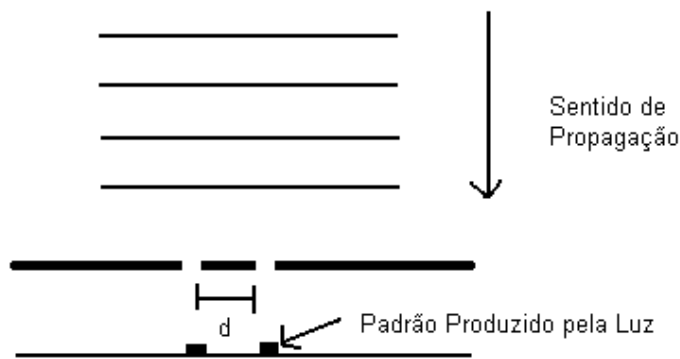


Figura 4.4

No entanto, se luz de um comprimento de onda apropriado for utilizada, surgirá mais uma vez um padrão de máximos e mínimos de luminosidade. Os máximos obedecerão à seguinte fórmula geral:

$$d \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda, \text{ com } m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

enquanto os mínimos serão descritos por:

$$d \cdot \sin(\theta) = (m + 1/2) \cdot \lambda, \text{ com } m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.4)$$

A chave para obter (4.3) e (4.4) à luz do princípio de Huygens é forçar que a distância percorrida por ondas provenientes de uma das fendas seja maior que a distância percorrida por ondas vindas da outra por uma quantidade de comprimentos de onda adequada à produção de interferência construtiva (equação (4.3)) ou destrutiva (equação (4.4)). Novamente, trata-se de um fenômeno essencialmente ondulatório. Thomas Young, em 1801, realizou o experimento da dupla fenda [Halliday e Resnick, 1994] e foi capaz de explicar satisfatoriamente os resultados obtidos e de determinar com satisfatória precisão o comprimento de onda da luz por ele utilizada.

Nesta seção, procuramos abordar de maneira simples dois fenômenos clássicos cujo entendimento se dá, via de regra, a partir de conceitos inerentes à teoria ondulatória. Nada haveria de surpreendente no capítulo se, nas próximas páginas, desfilassem ante os olhos do leitor as bem-conhecidas equações de uma onda eletromagnética. Entretanto, eis que falaremos de partículas como o elétron.

4.2 – A Proposta de de Broglie e os Experimentos de Davisson-Germer, Thomson e de Dupla Fenda

4.2.1 – A Proposta de de Broglie

Dentre os trabalhos ligados à hipótese quântica surgidos após o artigo de Einstein sobre o fóton, destacamos o de Louis Victor de Broglie. Após servir na I Guerra Mundial, esse físico francês juntou-se a seu irmão Maurice, que chefiava um laboratório de física em que se estudavam assuntos como o efeito fotoelétrico e espectroscopia.

Uma temática dessa natureza colocou de Broglie em contato íntimo com os então recentes questionamentos acerca da natureza da radiação eletromagnética. Desse fato surgiram, *inter alia*, alguns trabalhos importantes sobre o fóton. No entanto, a consagração definitiva viria em 1923, quando, movido pela intuição, de Broglie sugeriu que não só a radiação, mas também a matéria, devia ter um caráter dual. Em 1963, escreveu a respeito: “Após longa reflexão em isolamento, ocorreu-me repentinamente a idéia, durante o ano de 1923, de que a descoberta feita por Einstein em 1905 (o caráter dual da radiação) devia ser generalizada e estendida a todas as partículas, particularmente aos elétrons” [Pais, 1995]. Basicamente, de Broglie atribuiu aos elétrons (e às demais partículas) uma “onda fictícia associada” [Pais, 1995] dotada, naturalmente, de comprimento de onda e frequência. Com isso, emergiu a visão de uma partícula como onda, interpretação de imensa ousadia e simplicidade¹. De Broglie completava a idéia com um comentário da maior agudeza: uma corrente de elétrons que atravesse uma abertura de pequena dimensão (em relação ao comprimento de onda associado ao elétron) “deve sofrer fenômenos de difração”.

As idéias de de Broglie estavam incluídas em sua tese de doutoramento, defendida em 25 de novembro de 1924. Uma declaração do autor nos ajuda a entender o quão revolucionária foi sua proposta e, além disso, ressalta o grande apoio de Einstein à nova concepção: “Quando, em 1923, escrevi o texto da tese de doutoramento que queria apresentar para obter o *Doctorat ès Sciences*, mandei fazer três cópias. Entreguei uma destas ao sr. Langevin para que ele decidisse se o texto escrito podia ser aceito como uma tese. Langevin, provavelmente um pouco perplexo pela novidade de minhas idéias, pediu-me que lhe fornecesse uma segunda cópia datilografada da tese para enviá-la a Einstein. Foi então que Einstein declarou, após a leitura, que minhas idéias pareciam muito interessantes, o que levou Langevin a decidir aceitar meu trabalho.” Essa carta está em [Pais, 1997].

Vemos que o apoio de um cientista renomado como Einstein foi importante para que a nova idéia fosse levada em conta. Einstein, inclusive, não tardou a aplicar as idéias de de Broglie ao estudo de outros fenômenos, o que o coloca mais perto ainda da nova concepção. Como comenta Pais, o físico alemão, além de um dos pais da Física Quântica, foi “o único padrinho da mecânica ondulatória” [Pais, 1995].

Passemos então à formalização da proposta de de Broglie. Ele propôs que, a uma partícula com momento linear p , fosse associada uma onda com comprimento de onda igual a:

$$\lambda = h/p \tag{4.5}$$

¹ Entenderemos melhor o caráter dessa onda ao longo deste e do próximo capítulo.

sendo h a constante de Planck. Trata-se de uma expressão idêntica à por nós obtida quando analisamos o modelo do fóton. A frequência dessas ondas, por sua vez, deveria ser igual a:

$$f = E/h \quad (4.6)$$

sendo E a energia relativística total. Observe que a velocidade $w = \lambda f$ desta onda vale:

$$w = \lambda f = \frac{E}{p} = \frac{\sqrt{c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2}}{p} = c \sqrt{1 + \left(\frac{m_0 c}{p}\right)^2} > c \quad (4.7)$$

À primeira vista, isso nos causa estranheza, uma vez que, segundo a relatividade, um ente com massa de repouso não-nula é incapaz de atingir uma velocidade igual à da luz. Aparentemente, somos levados a concluir que a onda associada à partícula é mais rápida que a própria partícula! Trata-se, não obstante, de uma impressão infiel à teoria ondulatória. É razoável assumir que a onda associada deva ser dotada de um aspecto de “pacote”, uma espécie de “grupo de ondas” concentrado na região em que se localiza a partícula. Se adotássemos apenas uma dimensão espacial (eixo x), poderíamos conceber algo como o que mostramos na Fig. 4.5.

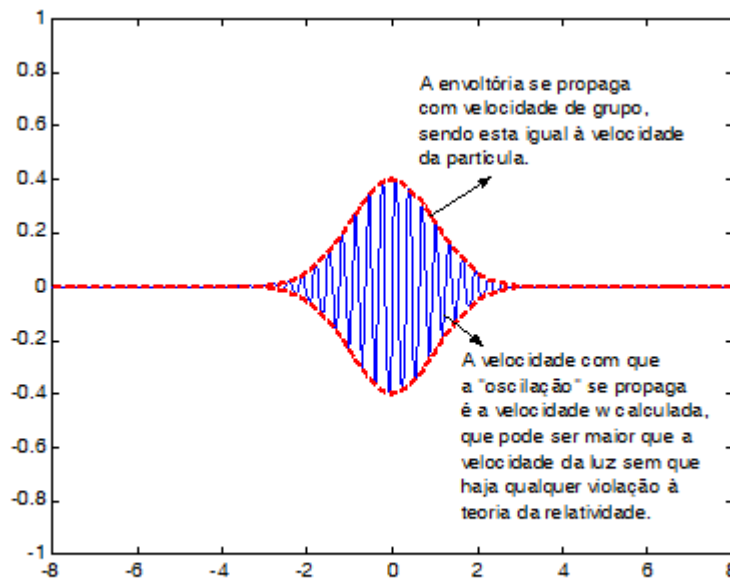


Figura 4.5

Se analisarmos uma onda como a mostrada na Fig. 4.8, descobriremos que a velocidade de propagação da envoltória (velocidade de grupo) é que será igual à velocidade v da partícula. Isso pode ser demonstrado a partir de (4.5) e (4.6), e é, ademais, bastante intuitivo. A relação entre w e v é simples [Born, 1986]:

$$w = c^2/v \quad (4.8)$$

Vale destacar que f , λ e w estão diretamente ligados à parte oscilante de uma onda como a mostrada na Fig. 4.5.

De (4.5), percebemos que o comprimento de onda de de Broglie depende da constante de Planck, que sabemos ter um valor muito baixo. Assim, partículas macroscópicas (bolas de bilhar ou de futebol, por exemplo), terão usualmente um comprimento de onda “infinitesimal”, o que mostra por que não são para nós intuitivas as propriedades ondulatórias da matéria. No entanto, no domínio atômico e sub-atômico, é possível pôr à prova as idéias de de Broglie. Foi isso que fizeram, entre outros, Davisson, Germer e Thomson, cujos experimentos analisaremos a seguir.

4.2.2 - Experimentos

Clinton Joseph Davisson e Lester Germer trabalhavam nos famosos Laboratórios Bell quando, em 1926, conduziram a experiência que forneceu os primeiros resultados experimentais favoráveis à idéia de de Broglie. Basicamente, eles estudaram o espalhamento de elétrons que incidiam sobre um cristal de níquel com a ajuda de um aparato como o mostrado na Fig. 4.6.

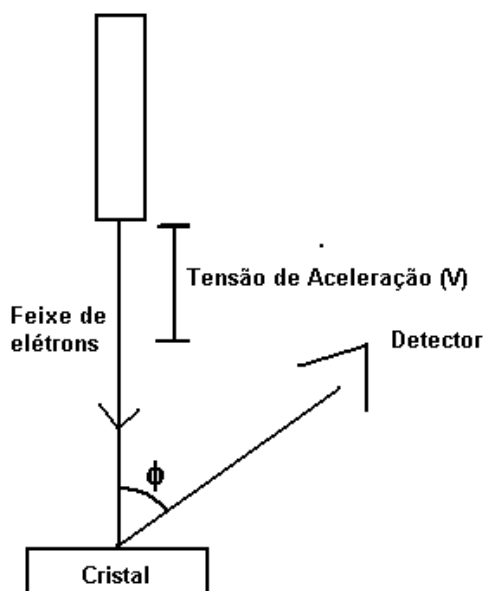


Figura 4.6

Não foi à toa que os cientistas usaram um cristal. Cristais são compostos por um arranjo reticular extremamente ordenado de átomos, o que lhes permite, em tese, fazer o papel de uma *grade de difração* composta por inúmeras “fendas”, como as que estudamos na seção 4.1. Estruturas desse tipo já haviam sido usadas por Max von Laue em experimentos relacionados à determinação da natureza eletromagnética dos raios-X, e, posteriormente, coube a William e Lawrence Bragg, pai e filho, investigá-las de maneira mais sistemática².

Do trabalho dos Bragg surgiu um resultado muito importante, a saber, a *condição de Bragg* para interferência construtiva. Tal condição relaciona a distância d entre sucessivos *planos de Bragg*, o comprimento de onda e o ângulo θ (relativo ao plano) para o qual se verifica o máximo de intensidade [Ohanian, 1995]. Essa relação é:

$$2d \cdot \text{sen}(\theta) = n \cdot \lambda, \text{ sendo } n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.9)$$

² Max von Laue, um dos primeiros entusiastas da teoria da relatividade, recebeu o prêmio Nobel de Física em 1914. Os Bragg foram premiados em 1915.

sendo $\theta = 90^\circ - \phi/2$. O plano de Bragg consiste de um conjunto (planar) de átomos com a mesma distribuição espacial. Um exemplo trivial pode ser:

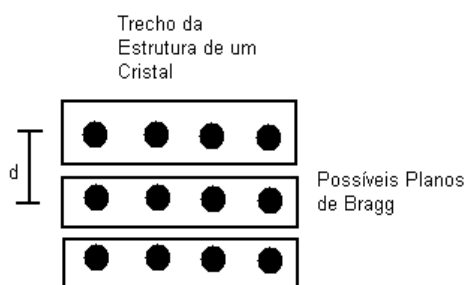


Figura 4.7

O ponto de partida de Davisson e Germer era verificar se a relação de Bragg poderia também valer para elétrons. E, de fato, através do aparato da Fig. 4.6, eles notaram que a intensidade do feixe espalhado apresentava um primeiro máximo que obedecia à equação (4.9). O comprimento de onda calculado a partir do padrão de interferência detectado levou-os a um valor muito próximo do que se esperava de (4.5). Tratava-se de uma evidência enorme em favor do caráter ondulatório da matéria, pois, como vimos na seção 4.1, esse tipo de característica não encontra fundamento na noção de partícula.

É importante destacar que o padrão é respeitado mesmo se incidir na rede um elétron por vez³ [Ohanian, 1995]. Não há, portanto, mais sentido na pergunta: por qual fenda da rede cristalina passou o elétron? Essa é uma indagação que faria sentido apenas para partículas clássicas!

Em 1927, George Paget Thomson apresentou uma segunda confirmação da hipótese de de Broglie. Para tanto, ele dirigiu um feixe de elétrons com energia cinética de 15 keV contra uma fina folha de metal. Nesse caso, o alvo não era uma única rede cristalina, mas um conjunto de redes dispostas aleatoriamente. Assim, havia sempre uma boa chance de que houvesse alguma rede orientada adequadamente de forma a produzir um padrão de difração. Os padrões por ele obtidos foram absolutamente similares aos obtidos a partir da difração de raios-X, o que reafirmou o caráter ondulatório do feixe de elétrons. Davisson e Thomson dividiram o prêmio Nobel de Física de 1937. Curiosamente, George Thomson era filho do grande J. J. Thomson, o que produziu uma curiosa afirmação: Thomson pai ganhou o Nobel por mostrar que o elétron é uma partícula, e o filho, por mostrar que ele é uma onda [Halliday e Resnick, 1994].

Houve ainda mais um trabalho que destacaremos. Claus Jönsson, em 1961, acelerou um feixe de elétrons com a ajuda de uma tensão de 50kV e fez com que eles incidissem sobre uma fenda dupla com largura de 500 nm e separação de 2000nm [Krane, 1983]. O padrão de interferência fotografado pelo cientista foi bastante similar ao padrão estudado por nós na seção 4.1, o que, mais uma vez, deu suporte à hipótese ondulatória.

Experimentos como os que descrevemos acima deixaram pouca dúvida acerca da “existência” de um caráter ondulatório da matéria. Assim como a radiação, a matéria apresentava um comportamento dual, marcado pela exibição separada de facetas de

³ Nesse caso, diversas incidências individuais terminariam por delinear o velho padrão de máximos e mínimos.

onda e de corpúsculo, de acordo com o experimental utilizado. Teremos mais a dizer sobre as implicações filosóficas disso na seção 4.4.

4.3 – O Princípio da Incerteza

Werner Heisenberg tem seu nome associado a um dos mais conhecidos resultados da física quântica: *o princípio da incerteza*. O motivo pelo qual esse princípio se tornou parte corriqueira de muitas das modernas discussões sobre filosofia da ciência e teoria do conhecimento é que ele expressa uma restrição inexorável ao conhecimento que podemos extrair da análise de um fenômeno.

Estamos acostumados a pensar nas limitações de nosso conhecimento como decorrentes apenas de impossibilidades práticas idealmente suplantáveis. Por exemplo, sabemos que seria praticamente impossível medir o momento linear e a velocidade de todas as moléculas de um gás num certo instante. Que instrumentos poderiam ser usados? Quanto tempo levaria? Enfim, há uma série de barreiras.

No entanto, são barreiras que podem ser suplantadas num experimento mental. Em princípio, nada impede que essas variáveis possam ser conhecidas, embora seja impossível medi-las com os equipamentos que concebemos hoje. Qualquer astrônomo do século XIX, por exemplo, jamais duvidaria de sua capacidade de medir o momento e a posição de um planeta ao mesmo tempo, e dificilmente poderíamos questionar a nossa capacidade de medir o momento e a posição de um carro em um certo instante. A visão de mundo clássica não impõe limites à nossa possibilidade de conhecer variáveis interrelacionadas, como momento linear e posição. Se essas limitações existem, elas devem antes ser atribuídas à qualidade dos instrumentos, e não à “natureza em si”.

Entretanto, a visão de mundo clássica concebe as partículas como “bolinhas”, ou seja, desconsidera totalmente o caráter ondulatório que, como discutimos, também lhes é próprio. Como vimos na seção anterior, uma partícula pode ter a si associada uma onda como a mostrada na Fig. 4.5. Uma entidade desse tipo recebe usualmente o nome de *pacote de onda*, nome, aliás, bastante natural à luz da figura mostrada.

Sob o manto da dualidade, voltemo-nos agora para uma investigação acerca de nosso conhecimento de ondas clássicas. Imaginemos, em primeiro lugar, uma senóide pura, mostrada na Fig. 4.8. Denominemos a função que descreve a onda $\psi(x,t)$, onde x é a posição e t é o tempo. Desconsideremos por ora a componente temporal da onda (suposta fixa).

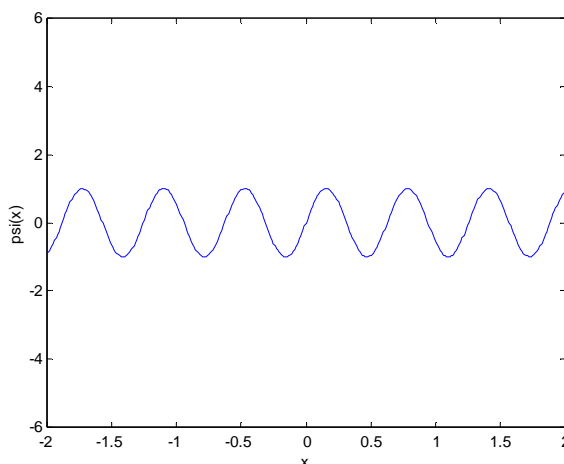


Figura 4.8

A onda mostrada está perfeitamente espalhada ao longo do eixo x. Nenhum valor dessa coordenada, por si só, é capaz de “localizá-la” minimamente, pois ela é “uniforme” ao longo de x, sem acidentes ou variações de comportamento. Destarte, temos uma incerteza total sobre a posição de uma partícula à qual estivesse, hipoteticamente, associada tal onda. Não obstante, ela tem um comprimento de onda perfeitamente determinado, o que nos permite concluir que seu momento não teria incerteza alguma a ele associada [Krane, 1983].

Imaginemos agora uma onda como a da Fig. 4.5. Nela, não há uniformidade em relação ao eixo x, ou seja, há uma certa “concentração” em torno de zero. O fato de dizermos “em torno de”, por outro lado, mostra que não há uma certeza completa, mas apenas uma maior que àquela subjacente à Fig. 4.8. Dessa maneira, temos uma incerteza finita acerca da posição da partícula associada. No entanto, não temos mais uma onda “pura”, e sim, uma onda resultante da sobreposição de senóides puras. Com a ajuda da teoria de Fourier, é possível mostrar que, quanto mais concentrado for o pacote, maior será a incerteza associada a seu comprimento de onda. Portanto, na Fig. 4.5, ganhamos algum conhecimento da posição da partícula à custa de uma perda de informação sobre o momento linear a ela associado.

Do que discutimos acima, vem que, quanto maior for a precisão na determinação da posição, menor a precisão no que se refere ao momento, e vice-versa. Não se trata de uma “imprecisão experimental”, mas sim de uma incerteza inerente à própria estrutura ondulatória dos pacotes de onda associados às partículas⁴. Em roupagem matemática, temos⁵:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \quad (4.10)$$

Essa é a expressão clássica do princípio da incerteza para variáveis unidimensionais. Relações semelhantes seriam válidas para as coordenadas y e z. Muitas vezes, a expressão (4.10) aparece com um sinal de “maior que” ou com $h/2\pi$ no segundo membro, o que não consideramos de grande importância neste curso.

A linha de raciocínio que seguimos revela que a relação (4.10) só causa estranheza quando nos atemos à visão clássica de “partícula” como ente dotado de posição e velocidade “bem-definidas”. Num mundo dual, o princípio da incerteza, ironicamente, é lugar-comum. O que (4.10) quer dizer? Basicamente, que há um limite fundamental para a precisão com que podemos conhecer conjuntamente pares de variáveis diretamente relacionados. Quanto maior for o meu conhecimento acerca da posição de uma partícula, obrigatoriamente será menor o meu conhecimento de seu momento linear. O fator de proporcionalidade é a “onipresente” constante de Planck.

A relação de incerteza de Heisenberg não pode ser superada por instrumentos de melhor qualidade ou por avanços tecnológicos: ela é inerente à estrutura física dos fenômenos naturais, segundo o ponto de vista quântico. Em termos filosóficos, a expressão (4.10) significou um abalo enorme na concepção determinística do mundo. Essa concepção é não raro associada ao nome de Pierre Simon, o marquês de Laplace, em grande parte graças a uma célebre obra, *Ensaio Filosófico sobre Probabilidades*. Nela, Laplace menciona, em harmonia com o espírito da época e com a própria estrutura da mecânica clássica, que uma inteligência superior que conhecesse, num certo instante,

⁴ Por ora, contentar-nos-emos com a imagem de um “pacote de onda”. No próximo capítulo, teremos acesso aos meios necessários para melhor formalizar a descrição do caráter ondulatório de uma partícula.

⁵ Há uma outra relação de incerteza importante: $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$, que relaciona a incerteza sobre uma variação de energia ΔE e o tempo demandado na sua medida.

a situação de todos os seres que compõem a natureza e as leis que a regem seria capaz de determinar todo o passado e todo o futuro do universo. No entanto, essa idéia é logo descartada pelo princípio da incerteza, pois essa inteligência não poderia, do ponto de vista de (4.10), conhecer “a situação de todos os seres”.

Um célebre exemplo da “inevitabilidade do princípio da incerteza” é imaginar como se poderia determinar a posição de um elétron através de um microscópio ótico. Sabemos que a resolução de um microscópio tem a ver com o comprimento de onda da luz utilizada; portanto, quanto menor for o comprimento de onda, menores serão os objetos visíveis com nitidez. Por conseguinte, se quisermos determinar mais precisamente a posição de nosso elétron, seremos forçados a diminuir o comprimento de onda da radiação incidente, o que, por sua vez, se refletirá num aumento da frequência da luz, ou seja, da energia (e o momento) dos fótons. Isso produziria colisões “mais intensas” com o próprio elétron que se deseja observar, o que aumentaria a incerteza sobre o seu momento. Eis o inevitável!

Não há como projetar um aparato que burle (4.10). Qualquer inovação que melhore a precisão da determinação de x irá necessariamente interferir na precisão sobre o momento linear. Tal fato mostra claramente que, na Física Quântica, não tem lugar a “clara distinção” entre o objeto de estudo e o sujeito que o investiga. A própria investigação de um fenômeno influi decisivamente sobre o mesmo: a nossa medição sempre alterará o que procuramos medir.

Para que concluamos a seção, recordaremos uma história curiosa. Heisenberg quase foi reprovado em seu doutorado por não ter respondido adequadamente a uma questão formulada por Wilhelm Wien (que era membro da banca) justamente sobre como calcular a resolução de um microscópio ótico.

Na época, era exigido que o candidato, mesmo sendo um teórico, demonstrasse conhecimento elementar de física experimental. Wien perguntou sobre a resolução de um interferômetro, de um telescópio e do citado microscópio. Heisenberg não conseguiu dar uma explicação adequada. A sabatina fez com que Wien se dispusesse a reprová-lo, surgindo daí um debate entre o experimentalista e Arnold Sömmerfeld, físico teórico e orientador de Heisenberg. Por fim, o candidato foi aprovado com uma nota intermediária (possivelmente entre os extremos de aprovação e reprovação de Sömmerfeld e Wien) [Aip, homepage]. Embora tenha ficado abatido, o jovem físico (ele tinha 22 anos quando defendeu sua tese de doutoramento) talvez tenha mantido em algum lugar de sua mente o problema experimental que hoje tão bem ilustra o princípio que o consagrou.

4.4 – Complementaridade e o Impacto Filosófico da Física Quântica

Como temos provado ao longo deste capítulo e do anterior, uma das mais fortes e recorrentes interpretações da física quântica é aquela que se baseia na idéia de *complementaridade*. Tal noção se refere ao caráter dual necessário à descrição tanto da radiação quanto da matéria. Tomemos como exemplo a radiação. Caso façamos um feixe de luz incidir sobre uma fenda dupla, veremos um padrão de interferência como o discutido na seção 4.1. Para explicar esse padrão, é essencial que se considere a radiação como sendo composta por ondas. No entanto, caso realizemos a experiência de Compton, não chegaremos a uma explicação adequada sem supor que a luz é composta por corpúsculos - fótons. Ambos os aspectos se complementam.

Para a matéria, temos o mesmo cenário. Se quisermos entender a experiência da gota de óleo de Millikan, precisamos entender o elétron como sendo uma partícula. Caso queiramos explicar os resultados de Davisson, Germer e Thomson, precisaremos

recorrer às idéias de de Broglie. Novamente, uma descrição adequada exige que os aspectos “onda e partícula” sejam contemplados.

A complementaridade conduz à conclusão de que *ambos os aspectos* - de onda e de partícula - são necessários para um adequado entendimento da radiação e da matéria. Tais aspectos se manifestam separadamente, dependendo do tipo de experimento conduzido. Essa noção é fortemente suportada pela estrutura da física moderna, e forma um dos pilares da consagrada *interpretação de Copenhagen* dos fenômenos quânticos. Tal interpretação, que deve muito ao dinamarquês Niels Bohr (não surgiu por acaso o nome da cidade de Copenhagen), ganhou muita força com o amadurecimento da teoria quântica [Bohr, 1996].

Imaginar um experimento pode nos ajudar a ter melhor idéia da importância da noção de complementaridade. Assumamos que um feixe de elétrons incida sobre uma fenda dupla. A partir do que vimos neste capítulo, podemos esperar que se forme após a fenda um padrão de interferência. Será então lícito imaginar: “colocarei um amperímetro em cada fenda, assim será viável conhecer por qual fenda um certo elétron passou”. Entretanto, a adição desses instrumentos de medida modifica totalmente o aparato. Novas interações até então inexistentes passam a existir e, o que é mais importante, o padrão de interferência some completamente e dá lugar às “duas manchas” que esperaríamos de uma partícula “clássica” (vide a Fig. 4.4). Como isso pode ser entendido?

À luz da complementaridade, percebemos que, ao introduzir o amperímetro, buscamos vislumbrar um aspecto típico de partícula (uma onda pode muito bem “passar” por ambas as fendas, mas uma partícula não!), o que destruiu o caráter ondulatório verificado! Quisemos ver o elétron como partícula e conseguimos. O que não conseguimos e não podíamos conseguir é ver o elétron como partícula e onda ao mesmo tempo.

As novas interações impostas pelo aparato podem ser analisadas a partir de relações de Heisenberg. Este, aliás, é um exemplo típico de verificação do princípio da incerteza. Quando há o padrão de interferência, não faz sentido perguntar por que fenda o elétron passou! A sua trajetória não é “perfeitamente determinada”, mas sim dotada de um caráter de nebulosidade, de indeterminação. Se quisermos conhecer esta trajetória com precisão, alteraremos o experimento e terminaremos por desvelar um comportamento “de partícula”. Note como isto se assemelha às limitações de (4.10).

Perde o sentido, em física quântica, a idéia de que é possível conhecer arbitrariamente as grandezas relevantes subjacentes a um fenômeno qualquer. Perde força a idéia de uma teoria científica sem limites para o conhecimento⁶. Como veremos no próximo capítulo, as previsões da teoria quântica têm um caráter *essencialmente estatístico*, em contraste com a física clássica, permeada pela noção de determinismo. Falaremos em probabilidades de uma partícula estar numa certa região como algo essencial, e não uma simples aproximação.

Tudo o que discutimos sempre gerou um grande desconforto em Einstein. Em sua visão de mundo, não havia lugar para indeterminações essenciais ou para uma física fundada inapelavelmente na estatística. Einstein buscava “conhecer a verdade”, e isso a teoria quântica não podia, pelo menos em sua opinião, proporcionar. Sua célebre frase “Deus não joga dados com o mundo” manifesta justamente essa fé numa concepção que se distanciava cada vez mais dos rumos que tomava a ciência.

Niels Bohr, um grande expoente da “nova física”, incorporou à sua visão de mundo a idéia de complementaridade. Ele não deixou de ver uma similaridade entre os

⁶ Pelo menos um conhecimento baseado na “roupagem conceitual” clássica.

rumos da teoria quântica e as antigas idéias presentes no taoísmo chinês, que põe em destaque a idéia da existência de princípios opostos, Yin e Yang. Isso explica o seu brasão, que contém a clássica ilustração destes princípios emoldurada por uma frase em latim: “Contraria sunt complementa”.

Bibliografia do Capítulo 4:

[Bohr 1996] **N. Bohr**, *Física Atômica e Conhecimento Humano: Ensaio (1932-1957)*, Contraponto, 1996.

[Born 1986] **M. Born**, *Física Atômica*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

[Eisberg 1961] **R. Eisberg**, *Fundamentals of Modern Physics*, Wiley, 1961.

[Halliday e Resnick 1994] **D. Halliday, R. Resnick**, *Fundamentos da Física*, LTC, 1994.

[Heisenberg 1995] **W. Heisenberg**, *Física e Filosofia*, Editora UnB, 1995.

[Krane, 1983] **K. Krane**, *Modern Physics*, Wiley, 1983.

[Ohanian 1995] **H. Ohanian**, *Modern Physics*, Prentice Hall, Second Edition, 1995.

[Pais 1995] **A. Pais**, *Sutil é o Senhor: a Ciência e a Vida de Albert Einstein*, Nova Fronteira, 1995.

[Pais, 1997] **A. Pais**, *Einstein Viveu Aqui*, Nova Fronteira, 1997.

[Serway 1990] **R. Serway**, *Physics for Scientists and Engineers*, Saunders College Publishing, Third Edition, 1990.

[Aip, homepage] <http://www.aip.org/history/heisenberg/>