

AULA — ONDAS (com interferência e difracção explicadas)

O que é uma onda?

Uma onda é uma perturbação que se propaga no espaço e no tempo, transportando energia e informação, sem (em geral) transportar matéria de forma líquida. Os pontos do meio oscilam em torno de uma posição de equilíbrio, mas a perturbação avança.

Exemplos:

Numa corda: a corda oscila para cima e para baixo, mas a corda não “viaja” com a onda.

No som: o ar sofre compressões e rarefacções; as moléculas oscilam, mas não há transporte líquido de ar com a onda (a não ser por correntes, que é outra coisa).

Na luz: a perturbação é electromagnética; não precisa de meio material e propaga-se no vácuo.

Grandezas fundamentais de uma onda (com unidades)

a) Amplitude, A (a unidade depende do fenómeno)

A amplitude é o valor máximo da oscilação em relação à posição de equilíbrio. É, em linguagem simples, o “tamanho” da oscilação.

Numa corda: A é deslocamento (m).

No som: A relaciona-se com variações de pressão (Pa).

Na luz: A relaciona-se com a intensidade do campo eléctrico/magnético (unidades próprias).

A amplitude está ligada à energia transportada: maior amplitude implica maior energia. Em muitos sistemas, a energia transportada é proporcional a A^2 .

b) Período, T (segundos, s)

O período é o tempo necessário para uma oscilação completa.

c) Frequência, f (hertz, $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)

A frequência é o número de oscilações por segundo.

Relação entre período e frequência:

$$f = 1/T$$

d) Comprimento de onda, λ (metros, m)

O comprimento de onda é a distância entre dois pontos em fase, por exemplo crista–crista, vale–vale, ou compressão–compressão.

e) Velocidade de propagação, v (m/s)

É a rapidez com que a perturbação (o padrão da onda) avança no espaço.

Relação essencial: $v = \lambda f$ (e o caso da luz)

Para uma onda periódica:

$$v = \lambda f$$

Interpretação:

Se v se mantém e f aumenta, então λ diminui.

Se v se mantém e f diminui, então λ aumenta.

Se f se mantém e v aumenta, então λ aumenta.

Caso particular da luz no vácuo:

$$c = \lambda f$$

onde $c \approx 3,00 \times 10^8$ m/s.

Nota:

Num meio material transparente (ar, vidro, água), a velocidade da luz é menor do que c , mas continua a valer $v = \lambda f$. O que muda é o valor de v no meio.

Tipos de ondas: transversais e longitudinais

a) **Onda transversal**

A oscilação é perpendicular à direcção de propagação.

Exemplo: onda numa corda (a corda oscila verticalmente, a onda propaga-se horizontalmente).

b) **Onda longitudinal**

A oscilação é paralela à direcção de propagação.

Exemplo: som no ar (as partículas oscilam ao longo da direcção em que o som se propaga, criando compressões e rarefacções).

A luz (onda electromagnética) é transversal: os campos eléctrico e magnético oscilam perpendicularmente à direcção de propagação.

Fase e “estar em fase”

A fase indica “em que ponto do ciclo” está a oscilação: crista, a subir, a descer, vale, etc.

Dois pontos estão:

Em fase: quando estão no mesmo ponto do ciclo (por exemplo, crista com crista). Numa linguagem geométrica, isto costuma corresponder a uma diferença de caminho igual a um múltiplo inteiro de λ .

Em oposição de fase: quando um está em crista e o outro em vale (diferença de fase de 180°). Isto corresponde a uma diferença de caminho igual a $(m + 1/2)\lambda$.

A noção de fase é essencial para perceber interferência.

Princípio da superposição (a regra de ouro)

Quando duas ondas se encontram no mesmo ponto do espaço, o efeito resultante é a soma dos efeitos que cada onda produziria separadamente. Isto chama-se princípio da superposição.

Consequência:

Se duas ondas chegam ao mesmo ponto “com o mesmo sinal” (as duas para cima, ou as duas em crista), somam e reforçam.

Se chegam com sinais opostos (uma em crista e outra em vale), tendem a cancelar-se.

Este princípio está na base da interferência e da difracção.

Interferência: reforço e anulação (o papel da diferença de caminho)

Interferência é o fenómeno em que duas (ou mais) ondas se combinam e produzem regiões de reforço (máximos) e regiões de anulação (mínimos), por causa da fase com que chegam a cada ponto.

Para tratar isto de forma simples, introduz-se a diferença de caminho, Δ .

Definição de diferença de caminho:

Se duas ondas percorrem distâncias L_1 e L_2 até chegarem ao mesmo ponto P, define-se:

$$\Delta = |L_2 - L_1|$$

Isto mede “quanto a mais” uma onda viajou em relação à outra.

Porque é que Δ determina o resultado?

O “a mais” corresponde a um atraso na fase. Se o atraso equivale a um ciclo completo, a onda atrasada volta a estar na mesma fase; se equivale a meio ciclo, fica em oposição de fase.

Condição de reforço (interferência construtiva):

$$\Delta = m\lambda, \text{ com } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Isto quer dizer que a diferença de caminho é um número inteiro de comprimentos de onda. Um atraso de 1λ corresponde a um ciclo completo; ao fim de um ciclo completo a onda volta à mesma fase. Logo, quando Δ é $m\lambda$, as ondas chegam em fase e somam-se, produzindo um máximo de intensidade.

Condição de anulação (interferência destrutiva):

$$\Delta = (m + 1/2)\lambda, \text{ com } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Isto quer dizer que a diferença de caminho é meio comprimento de onda, ou um e meio, ou dois e meio, etc. Meio comprimento de onda corresponde a meio ciclo (180°), o que faz coincidir crista com vale. Logo, quando Δ é $(m + 1/2)\lambda$, as ondas tendem a cancelar-se, produzindo um mínimo de intensidade.

Estas condições são a forma mais directa de ligar geometria (diferença de distâncias percorridas) a resultados observáveis (máximos e mínimos). Elas vão reaparecer na dupla fenda e nas redes de difracção.

Difracção: o que é e quando é “forte”

Difracção é o espalhamento (abertura angular) de uma onda ao passar por uma abertura (por exemplo, uma fenda) ou ao contornar um obstáculo. Em vez de sair “a direito”, a onda pode alargar-se para os lados.

Regra qualitativa central:

A difracção é mais evidente quando o tamanho da abertura (por exemplo, a largura de uma fenda) é comparável ao comprimento de onda λ .

A frase “a difracção é forte quando a abertura é da ordem de λ ” significa precisamente isso: o tamanho da abertura está na mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. “Da ordem de” quer dizer “comparável”, não significa “igual exactamente”.

Em termos qualitativos:

Se a abertura a é muito maior do que o comprimento de onda ($a \gg \lambda$), a difracção é fraca: a onda passa quase em linha recta e as sombras ficam nítidas.

Se a abertura a é comparável ao comprimento de onda ($a \sim \lambda$), a difracção é forte: a onda espalha-se muito e o padrão abre.

Se a abertura a é menor do que o comprimento de onda ($a < \lambda$), o espalhamento pode ser muito grande, mas passa pouca energia (a abertura “estrangula” a onda).

Exemplo intuitivo (som vs luz):

O som tem comprimentos de onda frequentemente na ordem de dezenas de centímetros, comparáveis a portas e esquinas; por isso, o som pode “dobrar a esquina” e ainda ser ouvido (difracção notória). A luz visível tem comprimento de onda da ordem de 10^{-7} m (frações de micrómetro), muito menor do que objectos do dia-a-dia; por isso, a luz quase não difracta em portas e produz sombras bem definidas.

Ligação a uma fórmula que aparecerá no Tema 2:

Na fenda simples, os mínimos do padrão satisfazem:

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

Esta expressão mostra que, quanto menor for a abertura a em comparação com λ , maior pode ser o ângulo θ dos mínimos, e mais aberto fica o padrão. É este o sentido físico de dizer que a difracção é forte quando a abertura é da ordem de λ .

Ligação ao Tema 1 (dualidade onda–partícula) sem entrar em detalhes quânticos

Até aqui tratámos ondas “clássicas”. No Tema 1 foi introduzida a ideia de dualidade:

A luz manifesta comportamento ondulatório (interferência/difracção), mas a energia pode ser trocada em pacotes (fótons).

A matéria pode ter um comprimento de onda associado ($\lambda = h/p$), o que permite que partículas como electrões também manifestem difracção e interferência.

A mensagem a reter nesta aula é simples:

As regras ondulatórias (fase, superposição, condições de máximos e mínimos, difracção dependente de λ) são exactamente as que vamos aplicar no Tema 2. Mais tarde, veremos como é que a luz e até a matéria se enquadram nessas regras, apesar de a detecção ocorrer em eventos localizados.

Resumo curto para copiar

Uma onda é uma perturbação que se propaga, transportando energia e informação.

Grandezas: A (amplitude), T (período), f (frequência), λ (comprimento de onda), v (velocidade).

Relações: $f = 1/T$ e $v = \lambda f$ (para luz no vácuo: $c = \lambda f$).

Transversal: oscilação perpendicular; longitudinal: oscilação paralela.

Superposição: o efeito resultante é a soma das ondas.

Diferença de caminho: $\Delta = |L_2 - L_1|$. Reforço quando $\Delta = m\lambda$; anulação quando $\Delta = (m + 1/2)\lambda$.

Difracção: espalhamento ao passar por aberturas/obstáculos; é forte quando a abertura é comparável a λ ($a \sim \lambda$) e fraca quando $a \gg \lambda$.

QUATRO LEIS (MAXWELL)

1. Cargas eléctricas geram campo eléctrico.
2. Não há “cargas magnéticas” isoladas observadas; as linhas do campo magnético B formam sempre circuitos fechados.
3. Um campo magnético variável induz um campo eléctrico (lei de Faraday–Lenz).
4. Correntes eléctricas e também um campo eléctrico variável geram campo magnético (lei de Ampère–Maxwell).

A GRANDE IDEIA

Um campo eléctrico E variável cria um campo magnético B, e um campo magnético B variável cria um campo eléctrico E. Esta “alimentação mútua” permite a existência de uma onda que se propaga sem precisar de um meio material: a luz (onda electromagnética).

A CONCLUSÃO-CHAVE

A teoria prevê uma velocidade de propagação para essas ondas que coincide com a velocidade da luz no vácuo, c.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

FIM DA AULA — (próximo passo: fenda simples, dupla fenda e rede de difracção, com as fórmulas e interpretação do padrão no ecrã)

