

Física — 12.º ano

11 — Dualidade Onda-Partícula. Interferência e difração. Efeito fotoelétrico e energia dos fótons.



José Pedro do Amaral zp.amaral@colegiodestomas.com

1867–1934

Dualidade onda-partícula

- Um problema que a Física clássica não resolve bem por si só.
- Durante muito tempo parecia simples separar o mundo em duas categorias:
 - **Ondas:** espalham-se no espaço, podem interferir (reforçar-se ou anular-se), podem difractar (contornar obstáculos ou alargar ao passar por fendas), e transportam energia distribuída.
 - **Partículas:** são entidades localizadas, com trajectória (no sentido clássico), colidem e transferem energia em eventos bem definidos.
- O problema é que, quando estudamos fenómenos à escala muito pequena (átomos e electrões) e também certos fenómenos da luz, esta divisão começa a falhar: há situações em que a mesma entidade (luz, electrões, etc.) manifesta traços típicos de ondas e outras em que manifesta traços típicos de partículas, dependendo do tipo de experiência e do que medimos.
- A isto chama-se *dualidade onda-partícula*.

- **Complementaridade:**

- Há experiências em que só faz sentido descrever o comportamento com linguagem ondulatória.
- Há outras em que só faz sentido descrever o comportamento com linguagem corpuscular.
- E o ponto crucial: o resultado observado depende do tipo de medição ou da experiência que forem feitos.

- O que significa «manifestar aspecto ondulatório»? Quando dizemos que algo manifesta um aspecto ondulatório, queremos dizer que pode mostrar fenómenos como:
 - Interferência: padrões de máximos e mínimos (zonas de reforço e de anulação).
 - Difracção: alargamento ou espalhamento ao passar por fendas ou ao contornar obstáculos.
- O que significa «manifestar aspecto corpuscular»? Quando dizemos que algo manifesta um aspecto corpuscular, queremos dizer que:
 - A energia nem sempre aparece como um valor contínuo.
 - Em certas interacções, a energia e a quantidade de movimento são transferidas em eventos localizados. Um detector regista acontecimentos discretos: um registo individual num certo ponto e num certo instante. Isto liga directamente ao terceiro tema: efeito fotoeléctrico e energia dos fótons — onde a luz, em certas condições, se revela quantizada (em fótons), cada um dos quais com energia bem definida.

- Esta dualidade aplica-se também para a matéria (de Broglie). A ideia de de Broglie diz que também a matéria pode manifestar comportamento ondulatório.
- A uma partícula com quantidade de movimento p pode associar-se um comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- λ é o comprimento de onda associado,
- p é a quantidade de movimento,
- h é a constante de Planck ($h=6,62607015 \times 10^{-34}$ J.s). Como $J = \text{kg.m}^2/\text{s}$ então $h=6,62607015 \times 10^{-34}$ kg.m²/s

- Interpretação qualitativa: se p é grande (partícula muito rápida ou muito massiva), então λ é muito pequena e os efeitos ondulatórios são difíceis de observar: o mundo parece «clássico». Mas para partículas leves ou lentas, λ pode ser suficientemente grande para aparecerem efeitos de interferência ou de difracção.
- O papel da medição: o *tentar ver por onde passou* muda o resultado. E isto é um ponto conceptual importante!
- Em experiências de interferência, se se tenta obter informação sobre «por onde passou» a partícula, normalmente destrói-se o padrão de interferência. À escala quântica, medir não é «espreitar sem mexer»: a interacção do sistema de interesse com o aparelho de medida pode alterar decisivamente o fenómeno observado.
- Isto ajuda a perceber que a dualidade não é apenas por falta de instrumentos melhores, mas uma característica intrínseca do tipo de fenómenos estudados.

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA: EQUAÇÕES-CHAVE

- Relação fundamental de onda: $v = \lambda f$ (para a luz no vácuo: $c = \lambda f$).
- O que diz: a velocidade de propagação de uma onda é o produto do comprimento de onda pela frequência.
- Significado dos símbolos: v , velocidade de propagação da onda (m/s). É a rapidez com que a onda se desloca; λ , comprimento de onda (m). Distância entre dois pontos equivalentes da onda (por exemplo, pico-a-pico); f , frequência (Hz = s⁻¹). Número de oscilações por segundo; c , velocidade da luz no vácuo (aprox. $3,00 \times 10^8$ m/s). Para a luz no vácuo, $v = c$. 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 nesse meio.
- Ideia física importante: se f aumenta e a velocidade se mantém (por exemplo, no vácuo), então λ diminui.
- Em interferência e difracção, λ determina o espaçamento das franjas e o alargamento do padrão

- Energia do fóton (Planck-Einstein): $E = h f$
- O que diz: a energia de um fóton (um «pacote» de luz) é proporcional à frequência da radiação.
- Significado dos símbolos: E , energia de um fóton (joule, J); h , constante de Planck ($h \approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$); f , frequência da luz (Hz).
- Ideia física importante: maior frequência implica fótons mais energéticos. É de salientar que «luz mais intensa» costuma significar mais fótons por segundo e não necessariamente fótons mais energéticos. Isto liga directamente ao efeito fotoeléctrico: o que conta para arrancar electrões é a energia por fóton, logo a frequência.

- Comprimento de onda associado a uma partícula (de Broglie): $\lambda = h / p$
- O que diz: uma partícula com quantidade de movimento p pode ser associada a um comprimento de onda λ .
- Significado dos símbolos: λ , comprimento de onda associado à partícula (m); h , constante de Planck; p , quantidade de movimento (kg·m/s).
- Ideia física importante: p grande implica λ muito pequeno o que faz com que os efeitos ondulatórios se tornem difíceis de observar (mundo «clássico»).
- p pequena implica um λ maior o que faz com que possa aparecer difracção ou interferência com partículas (por exemplo electrões). Se houver λ , poderá haver interferência e difracção.

- Quantidade de movimento (aproximação clássica, não-relativista): $p = m v$
- O que diz: para velocidades bem menores do que a velocidade da luz, a quantidade de movimento é massa vezes velocidade.
- Significado dos símbolos: p , quantidade de movimento ($\text{kg}\cdot\text{m/s}$); m , massa (kg); v , velocidade da partícula (m/s). Nota importante de notação: este v é a velocidade da partícula. Na relação fundamental de onda, v é a velocidade de propagação da onda. Uma vez mais, o símbolo é o mesmo, mas o significado depende do contexto. Se se quiser evitar confusão, poder-se-á escrever v_{onda} e $v_{\text{partícula}}$.
- Ligação com de Broglie: combinando $p = m v$ com $\lambda = h / p$ obtém-se $\lambda = h / (m v)$, o que mostra porque os objectos macroscópicos têm um λ extremamente pequeno.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Princípio de incerteza de Heisenberg: $\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$
- Como se chama $\hbar$ em português: $\hbar$ lê-se «h-barra» (isto é, h com barra).
- O que diz: existe um limite fundamental para a precisão com que podemos conhecer simultaneamente a posição e a quantidade de movimento de uma partícula.
- Significado dos símbolos: Δx , incerteza na posição (m), mede o grau de dispersão das posições possíveis ou medidas; Δp , incerteza na quantidade de movimento (kg·m/s); $\hbar$, definido por $\hbar = h / (2\pi)$.
- Ideia física importante: quanto mais se tenta fixar a posição (Δx pequeno), maior tende a ser a incerteza na quantidade de movimento (Δp cresce). Isto ajuda a perceber, conceptualmente, por que «tentar saber por onde passou» pode destruir padrões de interferência.

Onda

- 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, e as moléculas oscilam, mas não há transporte líquido de ar com a onda (a não ser por correntes, mas isso é outra coisa); na luz: a perturbação é electromagnética e não precisa de meio material e propaga-se no vácuo.
- Grandezas fundamentais de uma onda:
 - 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 ou magnético (unidades próprias). A amplitude está ligada à energia transportada: maior amplitude implica maior energia. Em muitos sistemas, a energia transportada é proporcional à 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.

Tipos de Onda

transversais e longitudinais

- Onda transversal. A oscilação é **perpendicular** à direcção de propagação. Exemplo: onda numa corda (a corda oscila verticalmente, a onda propaga-se horizontalmente). A luz (onda electromagnética) é transversal: os campos eléctrico e magnético oscilam perpendicularmente à direcção de propagação.
- 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).

Fase

O que é estar em ou fora de fase

- A fase indica em que ponto do ciclo está a oscilação: pico, 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 de interacção de ondas

- 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 em pico ou as duas em vale), somam e reforçam. Contudo, e chegam com sinais opostos (uma em pico e a outra em vale), tendem a cancelar-se.
- Este princípio está na base da interferência e da difracção. Interferência é o reforço ou a anulação (o papel da diferença de caminho). A interferência é então 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 o conceito de diferença de caminho, Δ .

Diferença de caminho

A definição de Δ

- Se duas ondas percorrem distâncias $L1$ e $L2$ até chegarem ao mesmo ponto P , define-se como: $\Delta = |L2 - L1|$
Isto mede quanto a mais uma onda viajou em relação à outra.
- Porque é que Δ determina o resultado? O valor 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):
 $\Delta = m\lambda$, 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):
 $\Delta = (m + 1/2)\lambda$, 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 reaparecerão nas experiências com fenda dupla e nas redes de difracção.

Difracção

O que é quando é forte

- Difracção é o espalhamento (abertura angular) de uma onda ao passar por uma abertura (por exemplo, uma fenda com largura a) ou ao contornar um obstáculo. Em vez de sair a direito, a onda poderá alargar-se para os lados.
- Regra qualitativa central: a difracção é mais evidente, mais forte, quando o tamanho da abertura (por exemplo, a largura a de uma fenda) é comparável ao comprimento de onda λ , isto é, na mesma ordem de grandeza do comprimento de onda.
- 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 limita a onda).
- Exemplo de som versus luz:

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

- Na fenda simples, os mínimos do padrão satisfazem:

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

- 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 ficará o padrão.
- É este o sentido físico (angular) de dizer que a difracção é forte quando a abertura é da ordem de λ .

- Como vimos, a luz manifesta comportamento ondulatório (interferência e difracção), mas a energia pode ser trocada em pacotes (fótons).
- Adicionalmente, a matéria pode ter um comprimento de onda associado ($\lambda = h/p$), o que implica que partículas como electrões também manifestem difracção e interferência.

Ideias-chave

- Existe um conjunto de regras ondulatórias: fase, superposição, condições de máximos e mínimos, e difracção dependente de λ . Mais tarde, veremos como é que a luz e até a matéria se enquadram nessas regras, apesar de a detecção ocorrer em eventos localizados.
- Uma onda é uma perturbação que se propaga, transportando energia e **informação(!)**.
- Grandezas: A (amplitude), T ou τ (período), f (frequência), λ (comprimento de onda), v (velocidade).
- Relações: $f = 1/\tau$ e $v = \lambda f$ (para luz no vácuo: $c = \lambda f$).
- Onda transversal: oscilação perpendicular; onda longitudinal: oscilação paralela.
- Superposição: o efeito resultante é a soma das ondas o que resulta em graus de cancelamento ou amplificação.
- Diferença de caminho: $\Delta = |L_2 - L_1|$. Anulação (cancelamento) quando $\Delta = (m + 1/2)\lambda$; reforço (amplificação) quando $\Delta = m\lambda$;
- Difracção: espalhamento ao passar por aberturas ou obstáculos; é forte quando a abertura é comparável a λ ($a \sim \lambda$) e fraca quando $a \gg \lambda$.

Partícula

- O que quer dizer comportamento como partícula; o aspecto corpuscular?
- Dizer que um fenómeno manifesta um aspecto corpuscular significa que a energia e a quantidade de movimento são trocadas em acontecimentos localizados, discretos. Em vez de uma distribuição contínua, observamos registos pontuais discretos: um detector assinala um evento num ponto e num instante. É a esta característica (eventos localizados e discretos) que chamamos “corpuscular”.
- Podemos então descrever essas partículas no sentido clássico com massa, velocidade, quantidade de movimento, e energia cinética.
- Assim, a luz apesar de ser onda electromagnética, também manifesta aspecto corpuscular através dos *fótons*.

Modelo corpuscular clássico

grandezas e equações

a) Massa, m (kg)

A massa mede a inércia: a resistência a mudar de movimento. Representa a quantidade de matéria.

b) Velocidade, v (m/s)

É a taxa de variação da posição no tempo. É um vector (tem direcção e sentido).

c) Quantidade de movimento (momento linear), p (kg·m/s)

No regime não relativista (v muito menor do que a velocidade da luz):

$$p = m v$$

A quantidade de movimento é também vectorial e aponta na direcção do movimento.

d) Energia cinética, K (joule, J)

No regime não relativista:

$$K = (1/2) m v^2$$

Relação útil entre K e p :

Como $p = m v$, pode escrever-se:

$$K = p^2 / (2m)$$

Conservação

porque as partículas são um modelo tão poderoso

- Em muitos problemas, as interações são rápidas, instantâneas (colisões) e podemos prever resultados usando leis de conservação:
 - a) Conservação da quantidade de movimento
Num sistema isolado, a soma vectorial de p antes é igual à soma depois.
 - b) Conservação da energia
A energia total conserva-se. A energia cinética só se conserva em colisões elásticas; em colisões inelásticas, parte de K transforma-se em energia interna (calor, deformação), mas a energia total mantém-se.
- Estas ideias são a linguagem natural do *mundo das partículas* que já tínhamos abordado: trajectórias, choques e transferências localizadas.

O fóton

a luz também tem aspecto corpuscular

- Quando discutimos as ondas, descrevemos a luz como onda electromagnética, com comprimento de onda λ e frequência f , e no vácuo:
 $c = \lambda f$
- Mas há situações em que a luz se comporta como se fosse constituída por pacotes (*quanta*, singular *quantum*) de energia: fótons. A luz pode ser emitida, absorvida e detectada em eventos discretos, como se cada evento envolvesse um pacote indivisível de energia.
- Energia de um fóton: $E = h f$

E: energia de um fóton (J).

h: constante de Planck (J·s).

f: frequência da luz (Hz).
- Então, para uma maior frequência haverá maior energia por fóton. Então para o mesmo tipo de luz, luz mais intensa significará, em geral, mais fótons por segundo (mais quanta) e não fótons mais energéticos.
- Usando $c = \lambda f$, também se obtém: $E = h c / \lambda$. Consequentemente, menor λ (maior «cor») corresponde a maior energia por fóton.
- Quantidade de movimento do fóton: $p = E/c = h/\lambda$. Um fóton transporta quantidade de movimento, apesar de não ter massa de repouso (poderíamos discutir a presença de massa quando o fóton está em movimento). Então se $p = E / c$, substituindo $E = h f$ e $c = \lambda f$, ficamos com $p = h / \lambda$
- Isto é importante por duas razões: 1. mostra que a luz tem um traço corpuscular também no movimento (materializado em p), e 2. mostra uma ligação profunda entre comprimento de onda e quantidade de movimento, que reaparece na dualidade para a matéria.

Detecção

porque o fóton é parecido com uma partícula

- Quando a luz é detectada (num sensor, num detector, num fotodíodo), o registo é local: acontece num ponto do detector e num instante. A energia chega em acontecimentos discretos via absorção de fótons. Mesmo que a distribuição no ecrã venha a formar padrões ondulatórios (isso será estudado em interferência e difracção), cada registo individual é localizado.
- O fóton ajuda-nos a compreender o efeito fotoeléctrico: se a energia chegar em pacotes $E = h f$, então a emissão de electrões por um metal poderá depender da frequência (energia por fóton) e não apenas da intensidade. Isto será tratado mais tarde com detalhe.

Mais ideias-chave

- Aspecto corpuscular: a energia e quantidade de movimento são trocadas em acontecimentos localizados e sua detecção ocorre em eventos discretos.
- Conservação: em sistemas isolados conserva-se a quantidade de movimento; a energia total também é conservada.
- Para as partículas clássicas é: $p = m v$; $K = (1/2) m v^2$ e $K = p^2/(2m)$.
- O Fóton: é um pacote (um quantum) de luz.
- Energia do fóton é $E = h f = h c/\lambda$.
- E a sua quantidade de movimento é $p = E/c = h/\lambda$.

As equações de Maxwell

- A teoria unificada do electromagnetismo. Maxwell demonstrou que as ondas electromagnéticas são a consequência natural das leis fundamentais expressas em quatro equações.
- As **quatro** leis de Maxwell são:
 1. Cargas eléctricas geram campos eléctricos (lei de Gauss para o campo eléctrico).
 2. Não há cargas magnéticas isoladas observadas; as linhas do Campo magnético B formam sempre circuitos fechados (lei de Gauss para o magnetismo: não há monopolos magnéticos observados).
 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 ideia principal: um campo eléctrico E variável gera um campo magnético B e um campo magnético B variável gera um campo eléctrico E . Esta alimentação mútua permite a existência de uma onda que se propaga sem precisar de um meio material: a onda electromagnética.
- Conclusão-chave: teoricamente, prevê-se uma velocidade de propagação para essas ondas que coincide com a velocidade empírica da luz no vácuo, c .

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

**Apêndice: um pouco mais de
detalhe (*não-programático*)
acerca das equações de Maxwell**

Equações de Maxwell:

$$\oiint E \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint B \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint E \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint B \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- **Significado de cada componente das equações de Maxwell:**

A. Integrais,

- Duplo com elipse: integral de *superfície* fechada (quanto atravessa a superfície que encerra um volume).
- Singular com círculo: integral de *linha* fechada (quanto circula num trajecto fechado).

B. Símbolos dos campos,

E — campo eléctrico (vector). Representa a força eléctrica por unidade de carga (V/m ou N/C).

B — campo magnético, indução magnética (vector). Representa o campo magnético (T).

C. Quantidades de carga e corrente,

Q — carga total encerrada no interior da superfície fechada. É a soma algébrica de todas as cargas dentro da superfície (C).

I — corrente total que atravessa a superfície associada ao contorno fechado. É a corrente «encadeada» pela volta (A).

D. Constantes físicas,

ϵ_0 — permissividade eléctrica do vácuo (F/m).

μ_0 — permeabilidade magnética do vácuo (H/m ou N/A²).

E. Elementos diferenciais de integração,

$d\mathbf{A}$ — elemento vectorial de área. Módulo: área pequena. Direcção: normal à superfície. Usa-se em integrais de superfície.

$d\mathbf{s}$ — elemento vectorial de comprimento ao longo do caminho (contorno). Pequeno segmento orientado da curva. Usa-se em integrais de linha.

F. Produtos escalares que aparecem,

$E \cdot d\mathbf{A}$ — fluxo eléctrico elementar através de um pequeno elemento de área. Mede a componente de E que atravessa a superfície.

$B \cdot d\mathbf{A}$ — fluxo magnético elementar através de um pequeno elemento de área. Mede a componente de B que atravessa a superfície.

$E \cdot d\mathbf{s}$ — circulação elementar do campo eléctrico ao longo do contorno.

$B \cdot d\mathbf{s}$ — circulação elementar do campo magnético ao longo do contorno.

G. Fluxos,

Φ_E — fluxo eléctrico através de uma superfície. É a forma compacta do integral de superfície de $E \cdot d\mathbf{A}$.

Φ_B — fluxo magnético através de uma superfície. É a forma compacta do integral de superfície de $B \cdot d\mathbf{A}$.

H. Derivadas temporais dos fluxos,

$d\Phi_B / dt$ — taxa de variação temporal do fluxo magnético (aparece na lei de Faraday).

$d\Phi_E / dt$ — taxa de variação temporal do fluxo eléctrico (aparece no termo de Maxwell da lei de Ampère-Maxwell).