

Ondas, Acústica e Óptica

Faculdade de Ciências
Universidade de Lisboa

Aulas Teóricas (T) Rui Santos

Terça-feira		15:00 – 16:00
Quarta-feira		18:00 – 19:00
Sexta-feira		14:30 – 15:30

Aulas Teórico-Práticas (TP)

Tânia Gonçalves

Segunda-feira		14:30 – 16:00
Quarta-feira		14:00 – 15:30

Gabriel Lourenço

Quinta-feira		16:30 – 18:00
--------------	--	---------------

Todas as aulas, materiais e séries de problemas estarão disponíveis no FENIX.

Avaliação

1. Exame final

- Peso: **70 %** da nota final
- Nota mínima: **10** valores

2. Exercício na TP (no fim da aula)

- Quatro exercícios ao longo do semestre, com duração máxima de 15 minutos
- Sem recurso a calculadoras ou qualquer dispositivo electrónico
- Peso total: **30 %** da nota final
- Não é obrigatório — só conta para melhorar a nota final
- Não há nota mínima
- Semanas dos exercícios são as com início a 12 Out, 2 Nov, 23 Nov e 14 Dez

Cálculo da componente dos exercícios na TP

1.º exercício

10 %

2.º exercício

20 %

3.º exercício

30 %

4.º exercício

40 %

$$\text{Nota final} = \max(\text{exame}, 0,70 \times \text{exame} + 0,30 \times \text{TP})$$

Objetivos

- A** – Conhecer os princípios fundamentais das oscilações e dos fenómenos ondulatórios, desde o oscilador harmónico e sistemas acoplados até à propagação de ondas mecânicas e electromagnéticas.
- B** – Conhecer os principais conceitos físicos da acústica.
- C** – Identificar os principais enquadramentos dos fenómenos luminosos: aproximações geométrica, ondulatória e electromagnética.
- D** – Reconhecer a generalidade dos fenómenos ondulatórios e as suas aplicações em diferentes sistemas físicos.

Programa

A – OSCILAÇÕES E ONDAS

1. **Oscilador harmónico:** massa–mola; energia; pequenas oscilações; amortecimento, forçamento e ressonância
2. **Osciladores acoplados:** frequências próprias; modos normais; cadeias de osciladores; limite contínuo
3. **Ondas:** descritores; equação da onda; soluções harmónicas; dispersão; velocidades de fase e de grupo; pacotes de onda
4. **Ondas planas, cilíndricas e esféricas:** energia, fluxo e intensidade
5. **Condições de fronteira:** reflexão, transmissão, impedância; ondas estacionárias; interferência, batimentos e modulação

B – ACÚSTICA

1. **Ondas mecânicas e som:** meios, velocidade, pressão, densidade e impedância
2. **Intensidade, potência e pressão:** dB; fontes; efeito Doppler
3. **Ultrassons:** geração, detecção, focalização, resolução e aplicações
4. **Cavidades:** ondas estacionárias, modos acústicos e ressonância

C – ÓPTICA GEOMÉTRICA

1. **Natureza da luz:** raios; índice de refração; princípios de Fermat e Huygens
2. **Reflexão, refração e reflexão interna total**
3. **Espelhos e lentes:** conjugação, aproximação paraxial, sistemas ópticos e aberrações
4. **Olho, microscópios e telescópios**

Programa

D – ÓPTICA ONDULATÓRIA

1. Luz como onda; polarização e coerência
2. Interferência e interferometria
3. Difracção: Fresnel, Fraunhofer, aberturas e redes
4. Feixes gaussianos; óptica de Fourier; resolução

E – ÓPTICA ELECTROMAGNÉTICA

1. Luz como onda electromagnética; energia e vector de Poynting
2. Fenómenos de superfície: reflexão, refracção e equações de Fresnel; fenómenos de volume: Lorentz e Drude; dispersão, absorção e óptica não linear

F – FENÓMENOS ONDULATÓRIOS EM FÍSICA CONTEMPORÂNEA

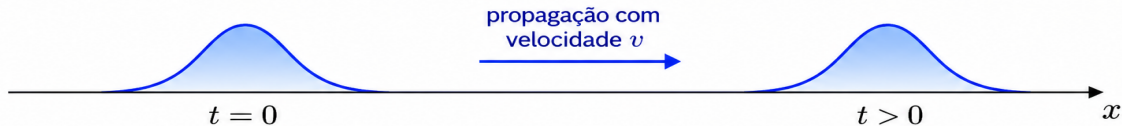
1. Ondas gravitacionais
2. Ondas de matéria e Mecânica Quântica; pacotes de onda e dispersão
3. Ondas sísmicas e ondas em plasmas
4. Síntese dos fenómenos ondulatórios e aplicações

Uma equação, muitos fenómenos

A equação de onda linear (não dispersiva) em uma dimensão

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2}$$

$\Psi(x, t)$ campo que se propaga (deslocamento, pressão, campo eléctrico, ...)
 v velocidade de propagação (depende do meio)



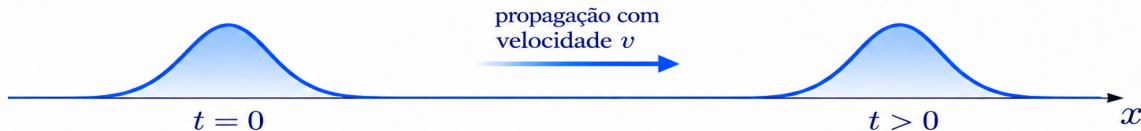
Esta estrutura matemática aparece em sistemas físicos muito diferentes.

Uma equação, muitos fenómenos

A equação de onda linear (não dispersiva)

$$\frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t)$$

$\Psi(\vec{r}, t)$ campo que se propaga (deslocamento, pressão, campo eléctrico, ...)
 v velocidade de propagação (depende do meio)



Esta estrutura matemática aparece em sistemas físicos muito diferentes.

A mesma equação, diferentes ondas

A equação de onda linear (não dispersiva)

$$\frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t)$$

$\Psi(\vec{r}, t)$ — campo que se propaga
 v — velocidade de propagação
(depende do meio)

Corda

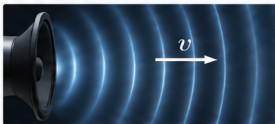
Ondas transversais numa corda estendida.



$\Psi(\bar{x}, t) = y(\bar{x}, t)$
deslocamento transversal

Som

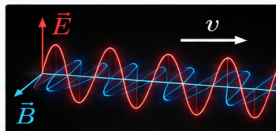
Ondas de pressão no ar, na água ou noutros meios materiais.



$\Psi(\vec{r}, t) = p(\vec{r}, t)$
pressão (variação)

Luz

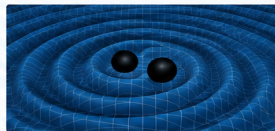
Ondas electromagnéticas no vácuo ou num meio material.



$\Psi(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t), \vec{B}(\vec{r}, t)$
campos electromagnéticos

Ondas gravitacionais

Ondulações da geometria do espaço-tempo.



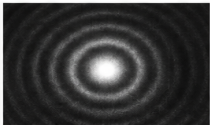
$\Psi(\vec{r}, t) \rightarrow h_{\mu\nu}(\vec{r}, t)$
perturbação da métrica

**Muda a grandeza física.
A propagação ondulatória permanece.**

Ondas em todas as escalas da Física

O comportamento ondulatório aparece desde o mundo microscópico até ao cosmos.

Ondas de matéria
(mecânica quântica)



Electrões, átomos,
moléculas

$10^{-12} - 10^{-9} \text{ m}$

Luz
(ondas electromagnéticas)



Do rádio aos raios gama
(visível: $\sim 10^{-7} \text{ m}$)

$10^{-12} - 10^4 \text{ m}$

Som e ultrassons
(meios materiais)



Som no ar,
ultrassons em tecidos

$10^{-3} - 10^{-1} \text{ m}$

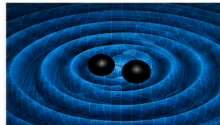
Ondas sísmicas
(Terra)



Ondas P e S
no interior da Terra

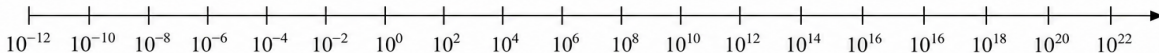
$10^1 - 10^6 \text{ m}$

Ondas gravitacionais
(cosmos)



Fusão de buracos negros
e outros sistemas compactos

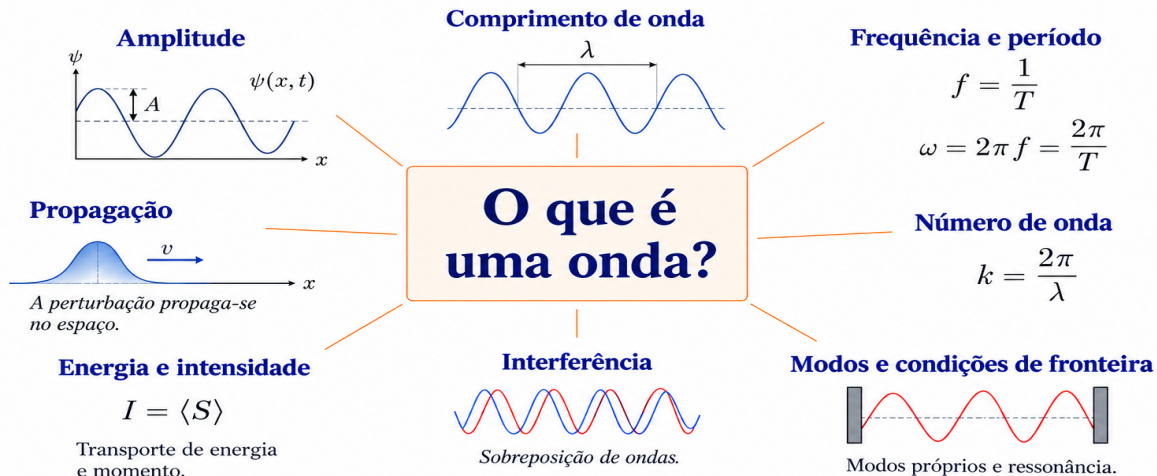
$10^9 - 10^{22} \text{ m}$



Comprimento de onda λ (m)

**O comportamento ondulatório atravessa
praticamente todas as escalas da Física.**

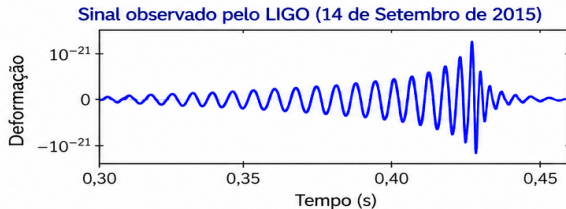
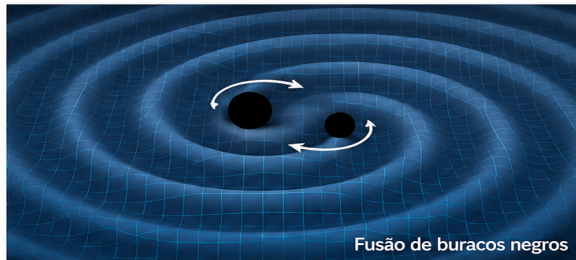
O que vamos estudar nas ondas?



O objectivo é compreender as propriedades gerais das ondas e a sua manifestação em diferentes sistemas físicos.

Ondas gravitacionais: uma nova janela sobre o Universo

- Previstas por Einstein em 1916 como perturbações da geometria do espaço-tempo.
- Propagam-se à velocidade da luz (no vácuo).
- Produzidas por massas aceleradas, por exemplo sistemas binários de buracos negros ou estrelas de nêutrons.
- Transportam informação sobre regiões do Universo que não podem ser observadas por luz.

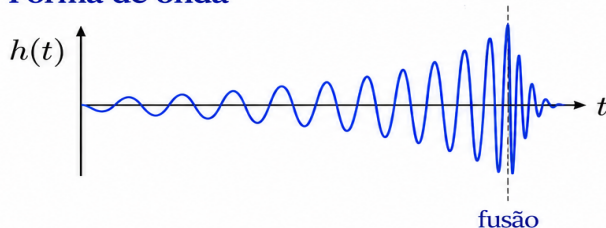


As ondas gravitacionais abrem uma nova forma de observar o Universo e marcaram uma das grandes descobertas da Física recente.

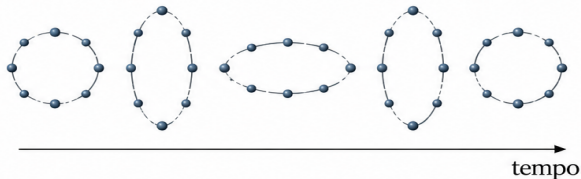
Ondas gravitacionais

- Perturbações da geometria do espaço-tempo.
- Propagam-se à velocidade da luz no vácuo: c .
- São produzidas por massas aceleradas, por exemplo sistemas binários de objectos compactos.
- São ondas transversais com duas polarizações independentes.

Forma de onda



Deformação do espaço-tempo por uma onda gravitacional



A onda gravitacional é descrita por uma pequena perturbação da métrica:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

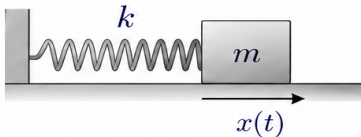
$\eta_{\mu\nu}$ — métrica do espaço-tempo plano

$h_{\mu\nu}$ — perturbação muito pequena
($|h_{\mu\nu}| \ll 1$)

O mesmo oscilador em sistemas muito diferentes

Oscilador harmónico

Movimento de uma massa ligada a uma mola.



Equação do movimento

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

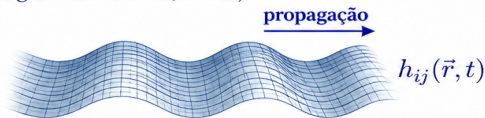
Solução

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

$$x(t) \longleftrightarrow q_{\vec{k}}(t)$$

Onda gravitacional

Perturbações da geometria do espaço-tempo (regime linearizado, vácuo).



Equação de onda

$$\ddot{h}_{ij} - c^2 \nabla^2 h_{ij} = 0$$

Decomposição em modos de Fourier

$$h_{ij}(\vec{r}, t) = \epsilon_{ij} q_{\vec{k}}(t) e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

Equação para cada modo

$$\ddot{q}_{\vec{k}} + \omega_k^2 q_{\vec{k}} = 0 \quad \omega_k = c|\vec{k}|$$

Cada modo de uma onda linear comporta-se no tempo como um oscilador harmónico.

Do electromagnetismo às ondas de luz

Equações de Maxwell no vácuo

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Equação de onda para
o campo eléctrico

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$



Velocidade de propagação

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

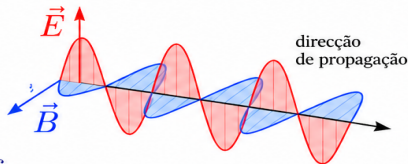
No vácuo,

$$v = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} = c$$

Equação de onda para
o campo magnético

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Onda electromagnética plana

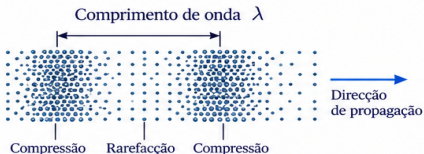


**A luz é uma onda electromagnética.
A sua velocidade é determinada por ϵ_0 e μ_0 .**

Ultrassons: ondas sonoras de alta frequência

- Ondas mecânicas longitudinais num meio material.
- Frequências superiores ao limiar da audição humana:
 $f > 20 \text{ kHz}$.
- Produzidos e detectados com transdutores piezoeléctricos.
- Grande variedade de aplicações em ciência, engenharia e medicina.

Propagação num meio



Equação de onda (meio homogéneo)

$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2}$$

$p(x, t)$ — variação da pressão acústica

v — velocidade do som no meio

Ultrassons em imagem médica



O transdutor emite pulsos de ultrassons que se propagam no corpo.

As reflexões nas interfaces entre tecidos são detectadas e usadas para construir a imagem.

Resolução axial

Determinada pela duração do pulso:

$$\Delta z \simeq \frac{v \tau}{2}$$

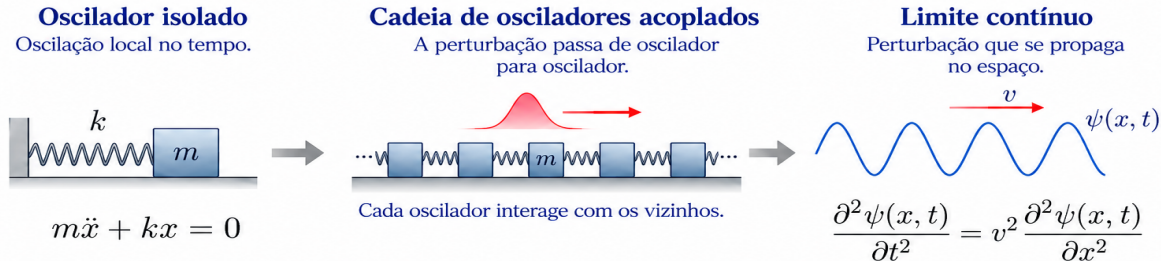
τ — duração do pulso

v — velocidade do som no meio

Os ultrassons permitem ver o interior do corpo humano usando apenas ondas mecânicas.

Como nasce uma onda?

Uma onda é o resultado do acoplamento de osciladores locais.



- Cada ponto do meio apenas **oscila localmente** em torno da sua posição de equilíbrio.
- O **acoplamento** entre pontos permite que a perturbação se propague **sem transporte de matéria**.
- No limite contínuo obtemos uma onda, descrita pela equação de onda.

Uma onda é uma oscilação que se propaga, resultando do acoplamento de oscilações locais.

Conhecemos o invisível através das ondas

As ondas permitem observar o que não podemos ver directamente.

Ondas electromagnéticas

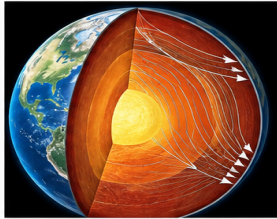
Universo distante



Galáxias, estrelas, planetas,
radiação de fundo, ...

Ondas sísmicas

Interior da Terra



Estrutura interna da Terra
a partir da propagação
de ondas sísmicas.

Ultrassons

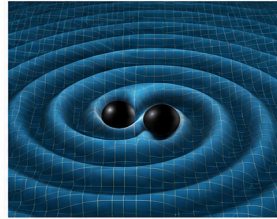
Interior do corpo humano



Imagem de estruturas internas
com elevada resolução.

Ondas gravitacionais

Eventos extremos



Fusão de buracos negros
e outros fenómenos violentos.

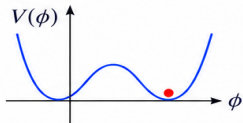
**As ondas transportam informação.
Permitem-nos ver o Universo e o que está dentro da matéria.**

O que é que eu faço?

Explorar questões fundamentais da Física de Partículas e do Universo.

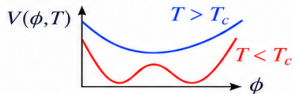
Sector de Higgs

Propriedades do bóson de Higgs e extensões do sector escalar.



Transições de fase

Evolução do vácuo no Universo primitivo e consequências cosmológicas.



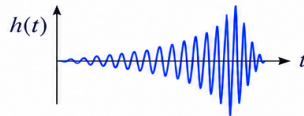
Matéria escura

A natureza da matéria escura e as suas interações.



Ondas gravitacionais

Mensageiros do Universo extremo.



**Física
para além do
Modelo Padrão**

Confrontar ideias com dados
e contribuir para responder a
questões fundamentais.

**Compreender as leis da Natureza
do mais pequeno ao maior.**