

# Onde Fluidi e Termodinamica

**Riassunto da:**

*"FISICA: Meccanica e Termodinamica - P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci"*

corso A

Università degli studi di Torino, Torino

Maggio 2024

# Indice

<b>1</b>	<b>Onde</b>	<b>4</b>
1.1	Onde meccaniche	4
1.1.1	Onde in una sbarra solida	6
1.1.2	Onde in una corda tesa	8
1.1.3	Onde nei gas	9
	Densità	9
	Pressione	9
	Forza	10
	Modulo di compressibilità adiabatica	10
1.2	Onde piane armoniche	11
1.2.1	Propagazione dell'energia in una barra solida	12
	Energia per unità di volume	12
	Intensità dell'onda	13
1.2.2	Propagazione dell'energia in una corda tesa	13
	Energia per unità di lunghezza	14
1.3	Onde sonore	14
1.3.1	Pressione	14
1.3.2	Potenza	15
1.3.3	Intensità	15
1.3.4	Fonometria	15
	Livello sonoro	16
1.4	Onde in più dimensioni	16
1.4.1	Onde elastiche in una membrana tesa	16
1.4.2	Onde sferiche	17
	Intensità	18
1.5	Onde cilindriche	18
1.5.1	Assorbimento dell'energia	19
1.6	Pacchetti d'onde	20
1.6.1	Velocità di fase e velocità di gruppo	20
1.7	Effetto Doppler	22
1.7.1	Sorgente in moto	22
1.7.2	Rivelatore in moto	22
1.7.3	Espressione generale	23
1.7.4	Onda d'urto	23
1.8	Interferenza	24
1.8.1	Interferenza con stessa ampiezza	24
1.8.2	Interferenza costruttiva e distruttiva	25
1.8.3	Interferenza con ampiezze diverse	25
1.8.4	Interferenza costruttiva e distruttiva	26
1.8.5	Sorgenti puntiformi	26
1.9	Riflessione e trasmissione	27
1.10	Onde stazionarie	28

1.10.1	Corda tesa con due estremi fissi . . . . .	28
1.10.2	Corda tesa con un estremo fisso . . . . .	29
1.10.3	Onde stazionarie in una colonna di gas . . . . .	30
1.10.4	Timbro . . . . .	30
<b>2</b>	<b>Fluidodinamica</b>	<b>31</b>
2.1	Pressione . . . . .	31
2.1.1	Equilibrio statico di un fluido . . . . .	31
2.1.2	Lavoro della pressione . . . . .	33
2.1.3	Equilibrio in presenza di forza peso . . . . .	33
2.2	Principio di Archimede . . . . .	33
2.3	Liquido in rotazione . . . . .	34
2.4	Moto di un fluido . . . . .	35
2.4.1	Descrizioni del moto . . . . .	36
2.4.2	Tubi di flusso e portata . . . . .	36
2.4.3	Teorema di Bernoulli . . . . .	37
2.4.4	Moto laminare . . . . .	38
2.4.5	Moto turbolento . . . . .	38
2.4.6	Effetto Magnus e Portanza . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Termodinamica - I principio</b>	<b>41</b>
3.1	Termometria . . . . .	41
3.1.1	Variabili termodinamiche . . . . .	41
3.2	Equilibrio termico . . . . .	42
3.2.1	Termometro a gas . . . . .	44
3.2.2	Dilatazione termica . . . . .	44
3.3	Esperimenti di Joule . . . . .	44
3.3.1	Primo principio della termodinamica . . . . .	45
3.3.2	Energia interna . . . . .	45
3.3.3	Trasformazioni termodinamiche . . . . .	46
3.4	Calorimetria . . . . .	47
3.4.1	Calore specifico . . . . .	48
	Misura del calore specifico . . . . .	48
	Processi isotermi: cambiamenti di fase . . . . .	49
	Sorgenti di calore . . . . .	49
3.5	Trasmissione del calore . . . . .	49
3.5.1	Conduzione . . . . .	49
3.5.2	Convezione . . . . .	52
3.5.3	Irraggiamento . . . . .	52
3.5.4	Calore tra solido e fluido . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Gas ideali e reali</b>	<b>53</b>
4.0.1	Legge isoterma di Boyle . . . . .	53
4.0.2	Legge isobara di Gay-Lussac . . . . .	53
4.0.3	Legge isocora di Gay-Lussac . . . . .	53
4.0.4	Legge di avogadro . . . . .	54
4.0.5	Equazione di stato dei gas ideali . . . . .	54
4.1	Trasformazioni di un gas . . . . .	54
4.1.1	Calore e energia interna del gas ideale . . . . .	55
4.2	Relazione di Mayer . . . . .	55
4.3	Trasformazioni adiabatiche . . . . .	55
4.4	Trasformazioni . . . . .	55
4.5	Rendimento . . . . .	55
4.6	Cicli . . . . .	55
4.7	Gas reali . . . . .	55

4.8	Teoria cinetica dei gas ideali . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Termodinamica - II principio</b>	<b>56</b>
5.1	Secondo principio della termodinamica . . . . .	56
5.1.1	Enunciato di Kelvin-Planck . . . . .	56
5.1.2	Enunciato di Clausius . . . . .	56
	Ciclo monoterme . . . . .	57
5.2	Teorema di Carnot - espressione matematica . . . . .	57
	Studio del rendimento massimo . . . . .	58
5.2.1	Teorema di Clausius . . . . .	58
5.2.2	Temperatura termodinamica assoluta . . . . .	59
5.3	Entropia . . . . .	61
5.3.1	Principio di aumento dell'entropia . . . . .	61
5.3.2	Calcoli di variazione di entropia . . . . .	62
	Scambi di calore con sorgenti . . . . .	62
	Scambi di calore tra corpi . . . . .	62
	Cambiamenti di fase . . . . .	62

# Onde

## 1.1 Onde meccaniche

Se in casi come il pendolo o un corpo attaccato ad una molla l'oscillazione è **macroscopica** perché tutto il sistema oscilla, in corpi continui elastici possono prodursi moti oscillatori locali, provocati in una zona specifica del corpo. Questa oscillazione indotta localmente si **propaga nel mezzo** con una certa velocità costituendo così un'onda.

Definizione: **Onda**

Un'onda è una perturbazione locale impulsiva e periodica che si propaga in un mezzo (corpo continuo ed elastico) con una certa velocità  $v$ . Nel caso unidimensionale parliamo di **onda piana**  $\xi(x, t)$  la cui deformazione è costante in tutti i punti con stessa  $x$

Per descrivere l'andamento di un'onda possiamo: **fissare un istante**  $t$  e osservare la deformazione su tutto lo spazio  $x$ , come se fosse una foto dell'onda; oppure **fissare un punto dello spazio**  $x$  e osservare al variare del tempo come varia la forma dell'onda, come se fosse un filmato.

inserire grafici

Vediamo ora come possiamo scrivere l'equazione che descrive la perturbazione in funzione della posizione  $\mathbf{x}$  e del tempo  $\mathbf{t}$ : per farlo serviamoci di un sistema di riferimento  $\mathbf{O}$  solidale con l'istante  $t = 0$  e un sistema di riferimento  $\mathbf{O}'$  solidale con lo spostamento dell'onda che viaggia a velocità  $v$ .

Possiamo quindi descrivere la posizione l'andamento di un'onda piana tramite una funzione del tipo

$$\begin{cases} x' = x \pm vt \\ \xi' = \xi \end{cases} \Rightarrow \xi(x, t) = \mathbf{f}(\mathbf{x} \pm \mathbf{vt})$$

Una funzione del tipo  $\mathbf{f}(\mathbf{x} \pm \mathbf{vt})$  soddisfa l'equazione differenziale detta **equazione delle onde** o **equazione di d'Alembert**:

$$\nabla_{\xi}^2 - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}}$$

— dimostrazione —

$$\mathbf{z} = \mathbf{x} - \mathbf{v}t \iff \boxed{\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{x}} = 1} \quad \boxed{\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial t} = -\mathbf{v}} \iff \mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{z})$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( -v \frac{\partial f}{\partial z} \right) = -v \frac{\partial}{\partial z} \left( -v \frac{\partial f}{\partial z} \right) = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Il passaggio più ambiguo è quello evidenziato in **ciano**, in cui viene cambiata variabile di derivazione da  $t$  a  $z$ . Trattando una funzione qualsiasi, la derivata di qualsiasi funzione rispetto a  $t$  è uguale a  $-v$  derivata rispetto a  $z$  ( $-v$  rappresenta il  $dz$  che va a moltiplicare).

Notare che l'equazione delle onde è soddisfatta solo per funzioni che hanno come argomento combinazioni lineari di  $x$  e  $t$  ( $\xi(x \pm vt)$ ); è perciò **l'argomento che importa e non la funzione in sè**. Una combinazione lineare di soluzioni è ancora soluzione dell'equazione, la soluzione generale ha forma

$$G(x, t) = f(x - vt) + g(x + vt)$$