

La disuguaglianza di Clausius

Consideriamo una generica macchina termica che opera prelevando il calore Q_c alla temperatura T_c e cedendo il calore Q_f alla temperatura T_f . Il rendimento di questa macchina termica è

$$\eta = 1 - \frac{|Q_f|}{Q_c}$$

mentre quello di una macchina reversibile che opera fra le stesse temperature è

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Per il teorema di Carnot $\eta \leq \eta_{\text{rev}}$, vale quindi la disuguaglianza

$$1 - \frac{|Q_f|}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

che si può mettere nella forma

$$\frac{|Q_f|}{T_f} \geq \frac{Q_c}{T_c}$$

Il calore ceduto al termostato freddo è negativo, per cui $|Q_f| = -Q_f$, quindi la relazione precedente diventa

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \quad (18)$$

dove l'uguaglianza sussiste solo nel caso di macchina termica reversibile.

La (18) stabilisce una importante caratteristica delle macchine termiche che operano fra due termostati: durante una trasformazione ciclica la somma dei rapporti Q/T , fra il calore scambiato con la sorgente e la temperatura della stessa, non può essere positiva.

La generalizzazione di questo risultato a un sistema termodinamico qualsiasi è nota come **disuguaglianza di Clausius**:

quando un sistema termodinamico compie una trasformazione ciclica tra n sorgenti, la somma dei rapporti fra i calori ΔQ_i scambiati con ciascuna sorgente e la temperatura T_i della sorgente è minore o uguale a zero:

$$\sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \leq 0 \quad (19)$$

e l'uguaglianza sussiste solo quando le trasformazioni sono reversibili.

DENTRO LA LEGGE

- Il simbolo di sommatoria \sum_i si legge «sommatoria per i che va da 1 a n ».
- Scrivendo in termini espliciti la somma al primo membro si ha:

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \frac{\Delta Q_3}{T_3} + \dots + \frac{\Delta Q_n}{T_n} \leq 0$$

Rendimento di una macchina termica

Lavoro compiuto in un ciclo

$$\eta = \frac{L}{Q_c} = 1 - \frac{|Q_f|}{Q_c}$$

Calore assorbito dal termostato caldo in un ciclo

Coefficiente di prestazione

Calore prelevato dalla sorgente fredda

$$\text{COP} = \frac{Q_f}{|L|}$$

Lavoro esterno compiuto

Coefficiente di guadagno

Calore ceduto dalla sorgente calda

$$\text{COP}_{\text{PC}} = \frac{Q_c}{|L|}$$

Rendimento di una macchina di Carnot

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\eta_{\text{rev}} > \eta_{\text{irr}}$$

Disuguaglianza di Clausius

$$\sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \leq 0$$

Uguaglianza se la macchina termica è reversibile

Entropia

$$S(A) = \left(\sum_i \frac{\Delta Q_{i\text{rev}}}{T_i} \right)_{O \rightarrow A} + S(O)$$

L'entropia è additiva

$$S(A) = S_1(A) + S_2(A)$$

Entropia in un'espansione libera

$$\Delta S > 0$$

Secondo principio della termodinamica: enunciato dell'entropia

$$\Delta S \geq 0$$

Variazione di entropia di un sistema isolato

Equazione di Boltzmann

Molteplicità di un macrostato

$$S = k \ln w + S(0)$$

Costante di Boltzmann: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

e compie un'oscillazione completa nel tempo

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4}{3}\pi G\rho}} = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}$$

Inserendo i valori della densità media della Terra ($\rho = 5,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) e della costante G si ha

$$T = \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14}{(6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(5,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3)}} = 5,1 \cdot 10^3 \text{ s}$$

ossia circa $1^{\text{h}} 24'$. La caduta dal Polo Nord al Polo Sud corrisponde a mezza oscillazione e quindi durerebbe circa $42'$.

4 Il pendolo

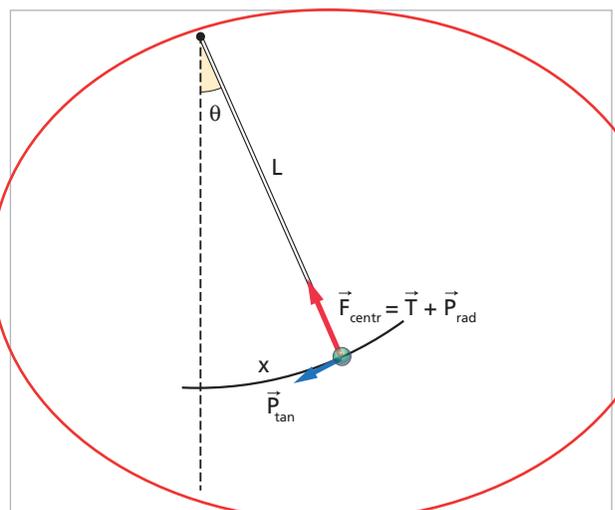
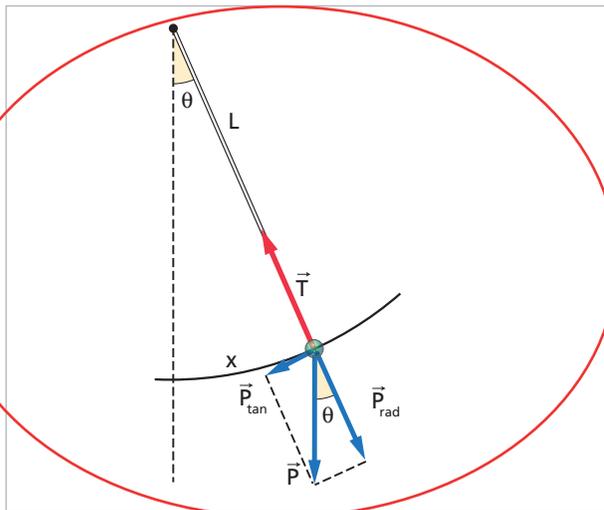
Il **pendolo** è un sistema formato da un piccolo corpo appeso all'estremo di un filo inestensibile e di massa trascurabile. Quando è spostato di un angolo θ dalla verticale e lasciato andare, il corpo oscilla attorno alla sua posizione di equilibrio. Se gli attriti sono trascurabili, il moto del corpo è periodico. Più precisamente:

per piccole oscillazioni, cioè quando l'angolo massimo di oscillazione è molto piccolo, il moto del pendolo è un moto armonico.

Per dimostrarlo dobbiamo verificare che l'accelerazione del corpo è proporzionale allo spostamento cambiato di segno. Determiniamo per prima cosa le forze a cui è sottoposto il corpo nel suo moto lungo un arco di circonferenza di raggio L .

1 Quando è spostato di un angolo θ rispetto alla verticale, sul corpo agiscono due forze: la tensione \vec{T} del filo e il peso $\vec{P} = m\vec{g}$, che può essere scomposto nei componenti \vec{P}_{rad} parallelo al filo e \vec{P}_{tan} perpendicolare al filo e quindi tangente alla traiettoria circolare.

2 La risultante delle forze $\vec{F}_{\text{centr}} = \vec{T} + \vec{P}_{\text{rad}}$ lungo la direzione del filo assicura la forza centripeta che mantiene il corpo nella traiettoria circolare. L'accelerazione del corpo in direzione tangente all'arco x della traiettoria è invece causata dalla forza \vec{P}_{tan} .



Quindi il corpo si muove lungo l'arco x sotto l'azione della forza totale

$$F = -mg \sin \theta$$

Il segno meno è dovuto al fatto che \vec{P}_{tan} è una forza di richiamo perché tende a riportare il corpo nella posizione di equilibrio ($\theta = 0^\circ$): quindi è diretta in verso opposto allo spostamento. L'espressione della forza può essere semplificata nel caso di piccole oscillazioni, cioè di oscillazioni in cui l'angolo θ rimane molto piccolo. Come mostra il grafico, la differenza fra il valore di θ e di $\sin \theta$ è praticamente trascurabile quando $\theta < 0,2$ rad ossia $\theta < 10^\circ$.

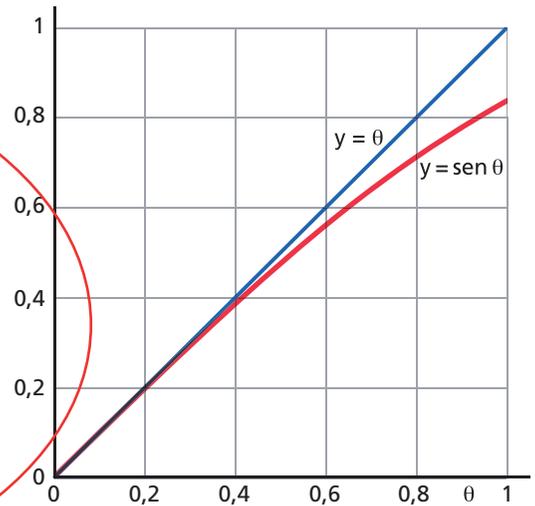
Quindi per piccole oscillazioni $\sin \theta \approx \theta$ e la forza tangenziale diviene

$$\vec{P}_{\text{tan}} = -mg\theta$$

Il corpo si muove lungo un arco di raggio L : lo spostamento x lungo l'arco è legato alla misura dell'angolo θ (in radianti) dalla relazione $\theta = x/L$. Sostituendo nell'equazione precedente si ha, in definitiva:

$$\vec{P}_{\text{tan}} = -\frac{mg}{L}x \quad (10)$$

La forza è proporzionale allo spostamento ma ha verso opposto ad esso: concludiamo quindi che il pendolo nelle piccole oscillazioni si muove di moto armonico.



Isocronismo del pendolo

Consideriamo un pendolo di massa m e lunghezza L . Nel caso di piccole oscillazioni la massa è soggetta alla forza F data dalla (10) e la sua accelerazione tangenziale a è data dal secondo principio della dinamica:

$$-\frac{mg}{L}x = ma \Rightarrow a = -\frac{g}{L}x$$

L'accelerazione del pendolo non dipende dalla sua massa: la forza di richiamo è proporzionale alla massa, proprio come nel caso della caduta libera. Possiamo quindi concludere che, nel caso di piccole oscillazioni, le caratteristiche del moto del pendolo non dipendono dalla sua massa.

Il moto del pendolo è un moto armonico: infatti la sua equazione ha la stessa struttura della relazione (4), cioè $a = -\omega^2 x$, in cui

$$\omega^2 = \frac{g}{L} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

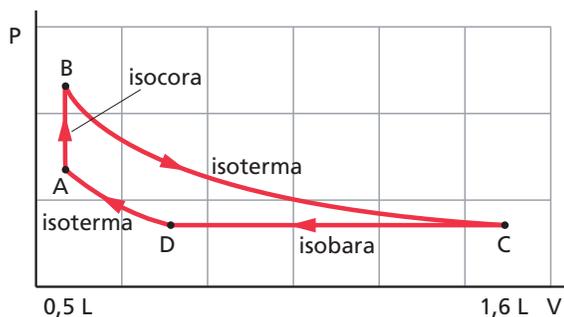
A partire dalla pulsazione possiamo determinare la frequenza del pendolo mediante la (6):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (11)$$

Dalla relazione $T = 1/f$ segue che il pendolo compie una oscillazione completa in un intervallo di tempo

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (12)$$

39 Il ciclo termico rappresentato in figura è costituito da quattro trasformazioni. Questo ciclo è effettuato da una macchina termica che contiene 0,15 moli di gas biatomico ($C_V = 5/2$). Nello stato iniziale, cioè nel punto *A*, il volume è $V_A = 0,500$ L e la temperatura è quella ambiente, $T_a = 293$ K. Dopo il riscaldamento a volume costante la temperatura è salita al valore $T_B = 620$ K. L'espansione isoterma porta il volume a 1,60 L mantenendo costante la temperatura. La compressione a pressione costante riporta il gas alla temperatura iniziale. La seconda isoterma è una compressione che ripristina il valore iniziale di pressione.



- Determina i valori di pressione, volume e temperatura nei punti *A*, *B*, *C* e *D* del ciclo.
- Calcola il lavoro, il calore e la variazione di energia interna per le quattro trasformazioni del ciclo.
- Quanto vale il rendimento del ciclo?

[Risposta:

	T (K)	P (Pa)	V (L)
<i>A</i>	293	$7,30 \cdot 10^5$	0,50
<i>B</i>	620	$1,54 \cdot 10^6$	0,50
<i>C</i>	620	$4,81 \cdot 10^5$	1,60
<i>D</i>	293	$4,81 \cdot 10^5$	0,76

	ΔU (J)	L (J)	Q (J)
Isocora $A \rightarrow B$	1019	0	1019
Isoterma $B \rightarrow C$	0	899	899
Isobara $C \rightarrow D$	-1019	-404	-1423
Isoterma $D \rightarrow A$	0	-153	-153

$\eta = 18\%$]

8 L'entropia

40 QUANTO?

- Un ragazzo nuota in un lago la cui temperatura è 20 °C. Per conduzione termica e per il movimento delle sue braccia e gambe, il lago assorbe circa 200 W di potenza termica.
- Di quanto aumenta l'entropia del lago in un'ora di nuoto?

[2,5 kJ/K]

41 QUANTO?

- 1,0 kg d'acqua a 0 °C diventa ghiaccio cedendo all'ambiente 334 kJ.
- Qual è la variazione di entropia dell'acqua divenuta ghiaccio?

[-1,2 kJ/K]

42

- Un corpo caldo a 400 K cede 720 J a un corpo freddo a 300 K. I due corpi hanno dimensioni tali che le loro temperature rimangono praticamente invariate.

- Qual è la variazione totale di entropia?

[0,600 J/K]

43

- Una resistenza mantiene calda l'acqua di una vasca alla temperatura di 30 °C, consumando una potenza $P = 400$ W.

- Qual è il tasso di produzione dell'entropia?

[1,3 J/(K·s)]

44

- Considera una situazione analoga a quella dell'esempio 29 in cui un recipiente contenente 5,10 moli di elio si trova a temperatura ambiente, $T_a = 20$ °C. L'altra metà è vuota. A mantenere bloccato il gas c'è un leggero setto mobile, anch'esso adiabatico, bloccato da alcuni fermi. I fermi vengono rimossi e il gas spinge sul setto di colpo, fino a riempire tutto il recipiente. A questo punto il setto viene spinto verso il basso e il gas è riportato al volume iniziale in modo reversibile. Trascura massa e spessore del setto mobile.

- Determina la variazione di entropia del gas prodotta nell'espansione irreversibile.

- Quanto vale la variazione totale di entropia?

[29 J/K; 12 J/K]

45

- Per fondere il ghiaccio occorrono 334 kJ/kg.

- Qual è la variazione di entropia di un cubetto di ghiaccio di 50,0 g che fonde in un bicchiere d'acqua a 0 °C?

[-61,2 J/K]

46

- In un recipiente termicamente isolato vengono mescolati 20 L di acqua a 15 °C con 30 L di acqua a 80 °C.

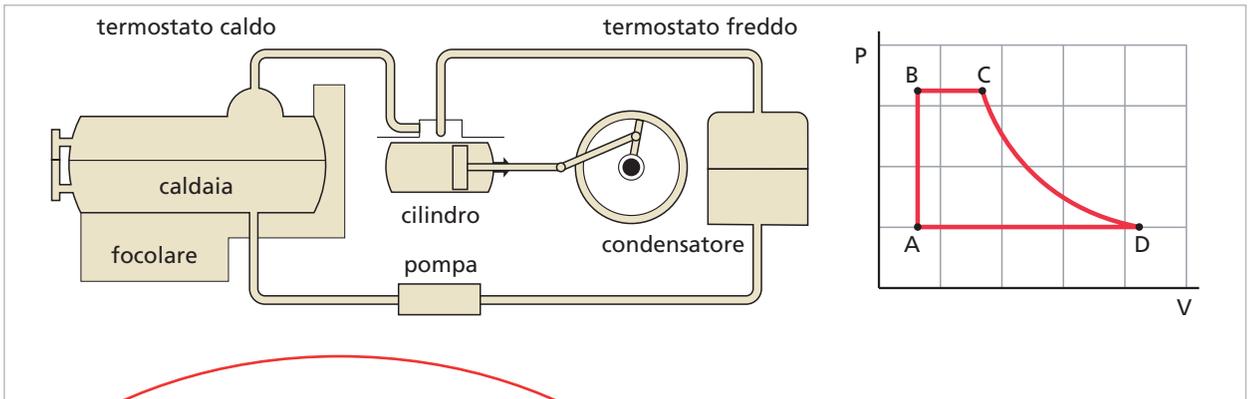
- Determina la temperatura di equilibrio.

- Calcola il calore scambiato tra le due quantità di acqua.

- Quanto valgono le loro variazioni di entropia?

- E la variazione complessiva di entropia?

[54 °C; 3,3 MJ; 11 kJ/K, -9,3 kJ/K; 1,7 kJ/K]



- Calcola i valori di pressione, volume e temperatura nei punti A, B, C e D del ciclo.
- Trova il rendimento del ciclo.

$[n = 0,205 \text{ mol}]$

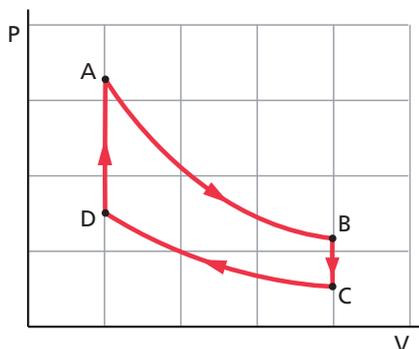
	P (Pa)	V (L)	T (K)	T (°C)
A	$1,00 \cdot 10^5$	5,00	293	20
B	$1,40 \cdot 10^5$	5,00	410	138
C	$1,40 \cdot 10^5$	5,50	451	179
D	$1,00 \cdot 10^5$	6,99	410	137

	L (J)	Q (J)	ΔU (J)
Isocora A → B	0	502	499
Isobara B → C	70	245	174
Adiabatica C → D	175	0	-179
Isobara D → A	-199	-698	-499

$[\eta = 6,7\%]$

71 Un motore tornato alla ribalta

●●● I motori Stirling fanno parte delle macchine termiche a combustione esterna: il gas che compie il ciclo termodinamico rimane sigillato e riceve calore per conduzione dall'esterno. Questi motori, inventati due secoli fa, stanno vivendo un nuovo periodo di interesse dovuto alla possibilità di recuperare calore «di scarto» e tramutarlo in energia meccanica (e quindi elettrica). Il ciclo è composto da due isocore separate da due isoterme. L'idea «geniale» del moto-



re Stirling è quella di immagazzinare una parte del calore del fluido in un *rigeneratore*, per fornirglielo internamente durante l'isocora ad alto volume.

- Ricava l'espressione che fornisce il rendimento del ciclo teorico.
- Nel caso sia presente il rigeneratore, a quale valore tende il rendimento?

$$\eta_S = \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{f}{\ln\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right)} + \eta_C}$$

dove f è il numero di gradi di libertà delle molecole e η_C è il rendimento del ciclo di Carnot; $\eta_S \rightarrow \eta_C$

72 Il motore a benzina

●●● Il ciclo Otto dei motori a benzina consiste di due trasformazioni isocore e due trasformazioni adiabatiche. Di fatto è caratterizzato da due valori di volume, V_A e V_B ; il loro rapporto $r = V_B/V_A$ viene definito rapporto di compressione. Considera un gas il cui calore specifico a volume costante è C_V .

- Dimostra che il rendimento del ciclo reversibile è $\eta = 1 - (1/r)^{\gamma-1}$.

73 Un processo irreversibile

●●● Una bottiglia, di capacità termica trascurabile, contiene 2,00 L di acqua a 5 °C. La bottiglia viene immersa in un grosso recipiente contenente acqua calda a 80 °C, assimilabile a un termostato. L'acqua fredda si riscalda fino a raggiungere gli 80 °C. Il processo è irreversibile e l'entropia complessiva aumenta.

- Determina la variazione di entropia dell'acqua, del termostato e quella complessiva.

$$[\Delta S_{\text{acqua}} = 2,00 \text{ kJ/K}; \Delta S_{\text{termostato}} = -1,78 \text{ kJ/K}; \Delta S_{\text{tot}} = 0,22 \text{ kJ/K}]$$

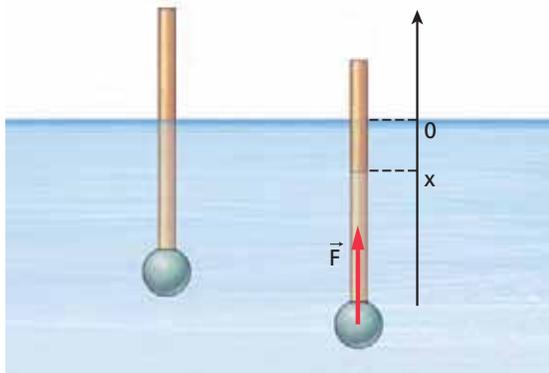
74 Un processo... meno irreversibile!

●●● Per questo esercizio è meglio usare il foglio elettronico. Ripeti il riscaldamento della bottiglia d'acqua dell'esercizio precedente con un processo più gra-

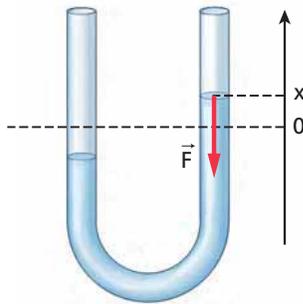
immerso in acqua ($d_{\text{H}_2\text{O}} = 1,00 \text{ g/cm}^3$). Se lo immergi un poco e lo lasci andare, il galleggiante effettuerà alcune oscillazioni. Trascura l'attrito.

- ▶ Calcola il periodo di queste oscillazioni.

[$T = 1,3 \text{ s}$]



- 17** Un tubo a U di sezione $A = 1,6 \text{ cm}^2$ contiene 100 g di mercurio ($d_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$). Se sposti il mercurio dalla posizione di equilibrio di un piccolo tratto x e lasci andare, il mercurio oscillerà su e giù. Trascura gli attriti.

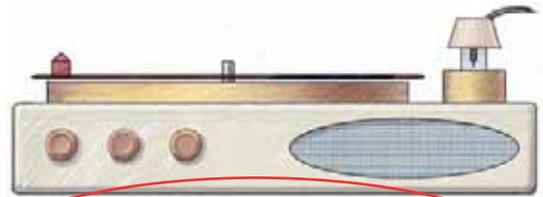


- ▶ Quanto vale il periodo di queste oscillazioni?
- ▶ Se il tubo è di sezione costante e la lunghezza del mercurio nel tubo è L , mostra che il periodo è $T = \pi \sqrt{2L/g}$. [$T = 0,30 \text{ s}$]

- 18** Per vedere che un moto circolare uniforme proiettato su un diametro è un moto armonico, prendi un vecchio giradischi e appoggia sul piatto un oggetto a 15 cm dal perno di rotazione. Osserva poi il moto dell'oggetto mettendoti all'altezza del piatto, in modo che l'oggetto sembri muoversi lungo un segmento. La frequenza del giradischi è 33,3 giri al minuto.

- ▶ Scrivi la legge oraria del moto armonico che osservi.

[$x = (0,15 \text{ m}) \cos(3,5t + \phi)$; ϕ è una costante che dipende dall'istante in cui si inizia a osservare il moto; $\phi = 0$ se nell'istante iniziale l'oggetto è all'estremità positiva del diametro]



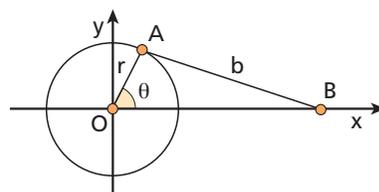
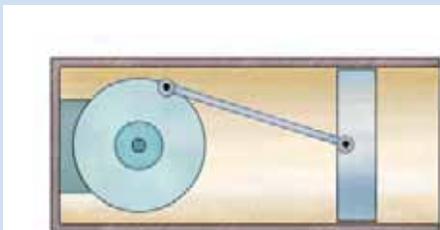
- 19** Considera l'esercizio precedente. Sulla verticale del perno del giradischi è fissato un pendolo di lunghezza L . Vista lateralmente la massa del pendolo sembra muoversi sopra la massa posta sul piatto.

- ▶ Calcola L . [$0,80 \text{ m}$]

20 ESEMPIO

Un motore fa ruotare un disco di raggio r a velocità angolare ω costante. Sul disco è imperniato un braccio di lunghezza b che sposta un pistone, come rappresentato in figura.

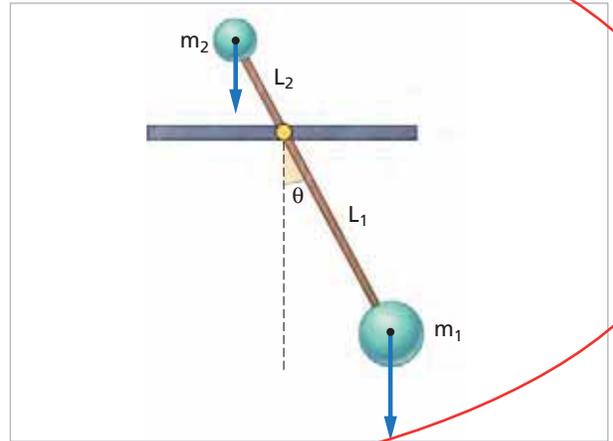
- ▶ Determina il moto del pistone.
- ▶ È un moto periodico?
- ▶ È un moto armonico?



28 Considera il pendolo con contrappeso mostrato in figura. L'asta è rigida e la sua massa è trascurabile. Osserva che il pendolo non si capovolge se risulta $m_1 L_1 > m_2 L_2$.

► Determina il periodo di oscillazione per piccoli angoli.

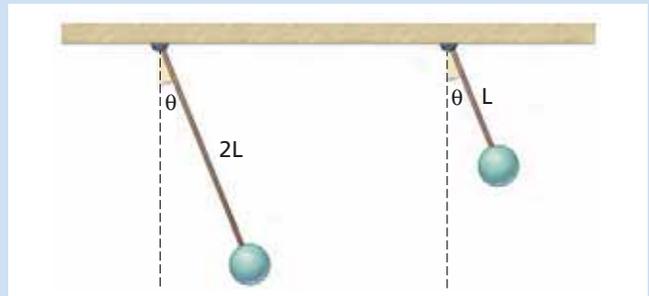
$$[T = 2\pi \sqrt{(m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2) / [g(m_1 L_1 - m_2 L_2)]}]$$



29 **ESEMPIO**

Due pendoli *A* e *B*, uno di lunghezza doppia dell'altro, sono stati spostati di un piccolo angolo uguale per entrambi e sono stati fatti oscillare.

► Dopo quanto tempo i due pendoli saranno contemporaneamente nella posizione di partenza?



■ **RISOLUZIONE**

I periodi di oscillazione dei pendoli sono:

$$T_A = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{g}}$$

$$T_B = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Supponiamo che tornino contemporaneamente nella posizione di partenza dopo n_A oscillazioni del primo e n_B oscillazioni del secondo (n_A e n_B numeri naturali). Ciò avviene nell'istante di tempo in cui è verificata la condizione:

$$\begin{aligned} n_A T_A &= n_B T_B \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{n_B}{n_A} &= \frac{T_A}{T_B} = \frac{2\pi \sqrt{2L/g}}{2\pi \sqrt{L/g}} = \sqrt{2} \end{aligned}$$

I due pendoli non saranno più contemporaneamente nella posizione di partenza.

È possibile però avere una coincidenza approssimata nei casi in cui la frazione n_B/n_A abbia un valore molto vicino a $\sqrt{2}$.

Infatti $\sqrt{2}$ è un numero irrazionale, per cui non esistono due numeri interi n_1 e n_2 il cui rapporto è $\sqrt{2}$.

Per esempio $7/5$: $(7/5)^2 = 49/25$ che differisce da 2 di solo $1/25$. I pendoli tornano quasi contemporaneamente nella posizione iniziale dopo 7 oscillazioni di quello più corto e 5 dell'altro.

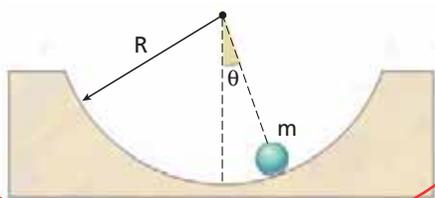
30 Con riferimento all'esercizio svolto, considera due pendoli, uno lungo $L_1 = 1,00$ m e l'altro lungo $L_2 = 2,00$ m, che partono nello stesso istante da un angolo di 10° .

► Determina l'angolo del pendolo più lungo quando il pendolo più corto ha effettuato esattamente 7 oscillazioni.

[9,5°]

39 Una sferetta di massa m e raggio r rotola senza strisciare sul fondo di una ciotola a forma di calotta sferica di raggio R . La sferetta ha un momento d'inerzia $I = (2/5)mr^2$ e la sua energia cinetica totale è la somma di una componente di traslazione e di una di rotazione. Supponi che la sferetta compia piccole oscillazioni attorno alla posizione di equilibrio.

► Utilizzando la conservazione dell'energia, mostra che il moto della sferetta ha pulsazione angolare $\omega = \sqrt{5g/7r}$.



6 Onde meccaniche

7 Dall'oscillazione delle particelle del mezzo alla propagazione dell'onda

40 QUANTO?

Un pipistrello per «vedere» nel buio emette onde sonore di frequenza $1 \cdot 10^5$ Hz, che viaggiano nell'aria a circa 340 m/s.

► Quanto vale la loro lunghezza d'onda? [3 mm]



41 QUANTO?

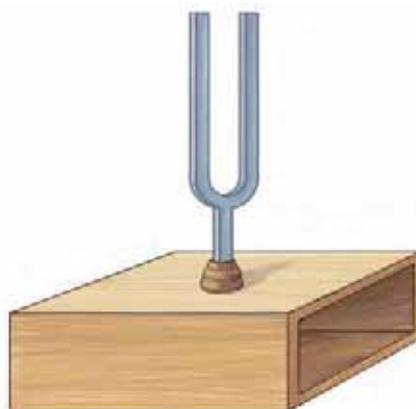
Le microonde prodotte in un forno hanno una frequenza di $2,45 \cdot 10^9$ Hz e viaggiano alla velocità della luce, cioè a $3,00 \cdot 10^8$ m/s.

► Quanto vale la loro lunghezza d'onda? [12 cm]



42 Il diapason è una forchetta metallica costruita in modo da vibrare a una ben determinata frequenza. Per esempio il diapason del *la* normale vibra a 440 Hz. Per amplificare il segnale si mette il diapason su una scatoletta di legno aperta da un lato e lunga un quarto della lunghezza d'onda del suono emesso.

► Determinare la dimensione della cassetta per il diapason del *la* normale. [19 cm]



43 ESEMPIO

La velocità del suono è circa 340 m/s in aria, mentre in acqua è 1440 m/s. Il *do* medio è una nota con una frequenza di 262 Hz.

► Calcola il valore della lunghezza d'onda di questa nota quando si propaga in aria e quando si propaga in acqua.

■ RISOLUZIONE

La frequenza non cambia nel passaggio tra aria e acqua, per cui avremo:

$$\lambda_{\text{aria}} = \frac{v_{\text{aria}}}{f} \quad \lambda_{\text{acqua}} = \frac{v_{\text{acqua}}}{f}$$

$$I = 2 \cdot 3,14^2 (4,4 \cdot 10^2 \text{ Hz})^2 (1,23 \text{ kg/m}^3) (3,43 \cdot 10^2 \text{ m/s}) (1 \cdot 10^{-10} \text{ m})^2 = 2 \cdot 10^{-11} \text{ W/m}^2$$

Questa intensità è veramente minima: come paragone equivale all'intensità di un fronte sferico di luce prodotto da un led di potenza 0,1 W (per esempio, l'indicatore di un carica-batteria) osservato alla distanza di oltre 10 km.

MINDBUILDING Legame fra intensità dell'onda e spostamento delle particelle del mezzo

Per giustificare la validità della relazione (7), supponiamo che un elemento di massa m di un mezzo elastico sia investito da un'onda e oscilli con moto armonico di ampiezza A ed energia

$$E = \frac{1}{2} k A^2 \quad (9)$$

Per la (9) del capitolo precedente il moto avviene con frequenza

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

e la «costante elastica della forza di richiamo» è quindi

$$k = 4\pi^2 f^2 m \quad (10)$$

Notiamo che:

- la massa di un elemento con volume V è $m = \rho V$, dove ρ è la densità del mezzo;
- nell'intervallo di tempo Δt , l'onda si propaga con velocità v per una distanza $L = v \Delta t$ e interessa un elemento del mezzo con area S e volume $V = LS = (v \Delta t) S$.

Quindi la (10) diventa

$$k = 4\pi^2 f^2 \rho v \Delta t S$$

Sostituendo nella (9) scriviamo l'energia acquistata dall'elemento del mezzo come

$$E = \frac{1}{2} 4\pi^2 f^2 \rho v \Delta t S A^2 = 2\pi^2 f^2 \rho v \Delta t S A^2$$

Questa energia transita nell'intervallo di tempo Δt attraverso la superficie di area S : per l'intensità dell'onda otteniamo quindi la relazione (7):

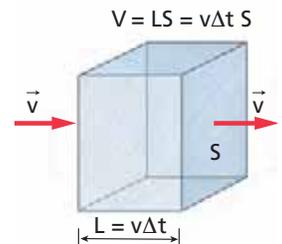
$$I = \frac{E}{\Delta t S} = 2\pi^2 f^2 \rho v A^2$$

La pressione massima p_0 e l'ampiezza A sono legate dalla relazione (4) $p_0 = 2\pi f \rho v A$, da cui si ricava:

$$A = \frac{p_0}{2\pi f \rho v}$$

Sostituendo nella relazione (7) segue direttamente la (8):

$$I = \frac{2\pi^2 f^2 \rho v}{4\pi^2 f^2 \rho^2 v^2} p_0^2 \Rightarrow I = \frac{p_0^2}{2\rho v}$$



DENTRO LA FORMULA

- Nel Sistema Internazionale l'unità di misura del livello di intensità sonora è il *decibel* (dB). Poiché il rapporto I/I_0 è un numero, il decibel è un'unità priva di dimensioni.
- Il livello di intensità sonora dà una valutazione relativa e non assoluta dell'intensità di un suono: non siamo in grado di stabilire qual è l'intensità di un suono, ma solo di valutare quanto un suono è più forte o più debole rispetto a un suono di riferimento.
- Il livello di intensità sonora si misura con uno strumento detto *fonometro*.

La tabella riporta i livelli di intensità sonora relativi ad alcune tipologie di suono.

Sorgente e relativa distanza dall'ascoltatore	Livello di intensità sonora (dB)	Volume
Zanzara (a qualche metro)	10	Appena udibile
Bisbiglio o sussurro (a qualche metro)	20	
Interno di un cinema vuoto	30	
Stanza di un appartamento	40	
Ufficio	50	Moderato
Conversazione (a 1 m)	60	
Interno di un'automobile a grande velocità	70	Intenso
Strada con traffico, musica negli auricolari	80	Danno entro 8 ore
Martello pneumatico (a 1 m)	90	Molto intenso
Moto senza marmitta	100	Danno entro 2 ore
Transito della metropolitana (a qualche metro)	110	
Urlo nell'orecchio, gruppo rock in locale chiuso	120	Per alcuni soggetti soglia del dolore
Jet al decollo (a 50 m)	130	Dolore intollerabile
	160	Rottura del timpano



QUANTO? Se raddoppia allora aumenta di 3

Un ascoltatore riceve un suono di 70 dB dal primo chitarrista di un gruppo rock. Quando anche il secondo chitarrista emette lo stesso suono, l'ascoltatore riceve un suono con intensità doppia e percepisce un livello di intensità sonora pari a:

$$\begin{aligned}
 I_s &= 10 \log_{10} \frac{2I}{I_0} = 10 \left(\log_{10} 2 + \log_{10} \frac{I}{I_0} \right) = \\
 &= 10 \left(0,30 + \log_{10} \frac{I}{I_0} \right) = 3 \text{ dB} + 70 \text{ dB} = 73 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

In generale

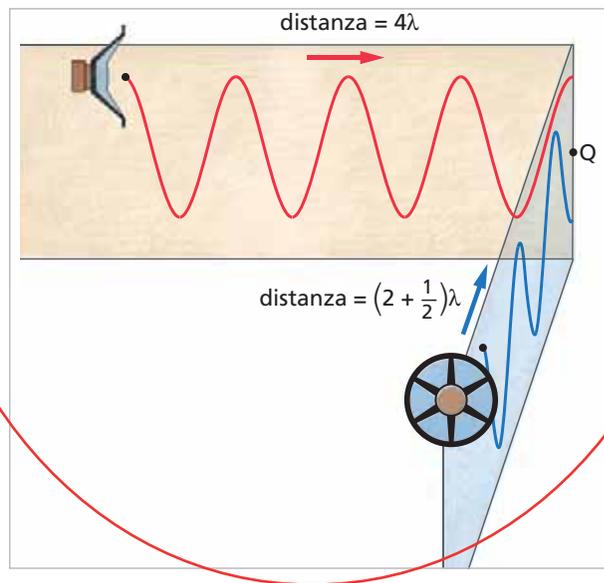
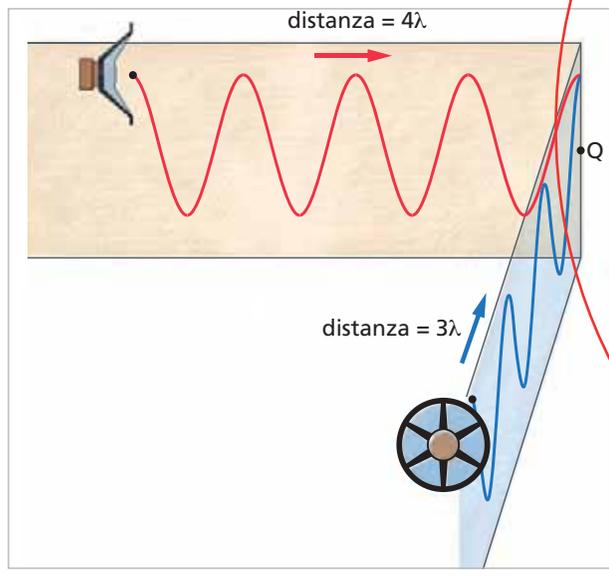
se l'intensità del suono raddoppia, il livello di intensità sonora aumenta di 3 dB.

4 L'interferenza di onde sonore

Le caratteristiche della propagazione ondulatoria sono determinate da una proprietà fondamentale che accomuna vari tipi di onde, indipendentemente dalla loro natura: il **principio di sovrapposizione**.

1 Si realizza un'interferenza costruttiva nei punti che hanno la stessa distanza dalle due sorgenti oppure tali che la differenza delle distanze dalle due sorgenti è un numero intero di lunghezze d'onda.

2 Si realizza un'interferenza distruttiva nei punti tali che la differenza delle distanze dalle due sorgenti è un numero intero di lunghezze d'onda più mezza lunghezza d'onda.



In generale

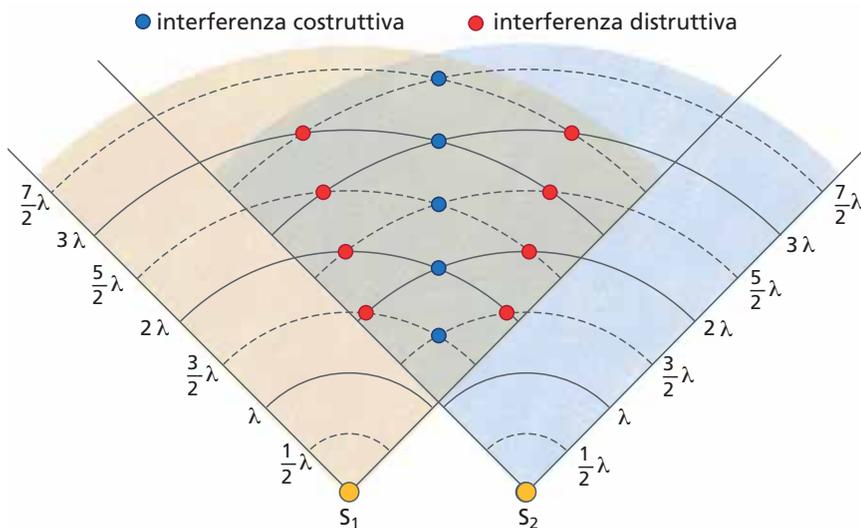
due onde emesse in fase danno luogo a

- interferenza costruttiva nei punti in cui la differenza delle distanze dalle due sorgenti è

$$n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

- interferenza distruttiva nei punti in cui la differenza delle distanze dalle due sorgenti è

$$\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$



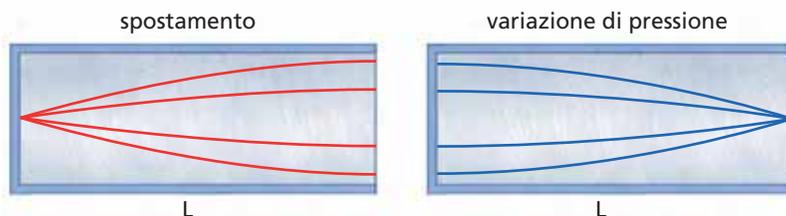
Negli altri punti, le onde si sovrappongono e producono un suono che ha un'intensità compresa fra zero e quattro volte l'intensità di una delle due onde.

La figura a fianco mostra gli effetti di due sorgenti in fase che emettono la stessa onda armonica con lunghezza d'onda λ : un microfono non rileva alcun suono se è collocato in uno dei punti rossi (interferenza distruttiva), mentre rileva il segnale massimo nei punti blu (interferenza costruttiva).

Tubo chiuso a un'estremità

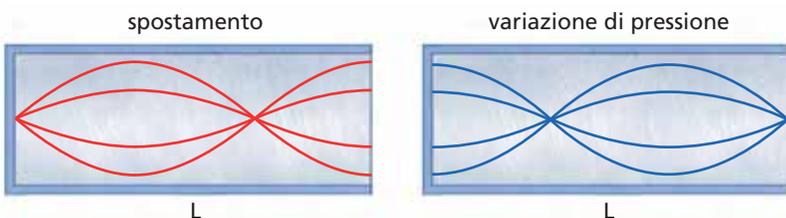
1 Prima armonica:

$$\lambda_1 = 4L \quad f_1 = \frac{v}{4L}$$



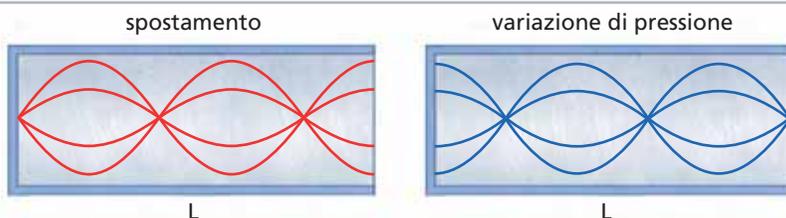
2 Terza armonica:

$$\lambda_3 = \frac{4}{3}L \quad f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$



3 Quinta armonica:

$$\lambda_5 = \frac{4}{5}L \quad f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$$



Notiamo che in un tubo aperto si formano tutte le armoniche, cioè tutte le frequenze multiple della frequenza fondamentale, mentre in un tubo chiuso a un'estremità si formano solo le armoniche dispari.

QUANTO? Quanto è lunga una nota grave

Per emettere una nota a 35 Hz, un organo deve avere una canna aperta lunga ben

$$L = \frac{v}{2f} = \frac{3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}}{2(3,5 \cdot 10 \text{ Hz})} = 5 \text{ m}$$

Il temperamento equabile

I primi esperimenti musicali di cui si ha notizia risalgono al VI secolo a.C. nell'ambito della Scuola pitagorica. Utilizzando il monocordo, un semplice strumento formato da una corda con estremi fissati su una cassa armonica, si scoprirono importanti proprietà dei suoni emessi da una corda:

- l'altezza del suono (frequenza) aumenta quando la lunghezza della corda diminuisce;
- il suono prodotto dalla vibrazione di due corde provoca una sensazione piacevole di armonia (**accordi consonanti**) solo quando le lunghezze delle corde stanno in rapporti semplici, come 2:1, 3:2 o 5:4;
- perché un accordo sia consonante non sono importanti le lunghezze delle corde ma solo il loro rapporto, detto **intervallo**;
- gli intervalli più piacevoli sono: l'**ottava** 2:1, la **quarta** 4:3 e la **quinta** 3:2; nel II secolo d. C. Tolomeo scopre l'intervallo di **terza maggiore** 5:4.

La velocità del suono è minore nell'aria, quindi il segnale trasmesso nell'aria arriva dopo quello trasmesso nell'acqua. L'intervallo di tempo τ tra i due arrivi è:

$$\tau = \Delta t_{\text{aria}} - \Delta t_{\text{acqua}}$$

■ Risultato numerico

$$\Delta s = 30 \text{ km} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ m}$$

$$v_{\text{acqua}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{aria}} = 3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

$$\tau = \frac{3,0 \cdot 10^4 \text{ m}}{3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}} - \frac{3,0 \cdot 10^4 \text{ m}}{1,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}} = 88 \text{ s} - 20 \text{ s} = 68 \text{ s}$$

10 Un cannone punta su un bersaglio posto a 20 km di distanza e spara. La componente orizzontale della velocità del proiettile è $6,1 \cdot 10^2 \text{ m/s}$.

► Dopo quanti secondi si ode il rumore dello sparo rispetto l'arrivo del proiettile? [26 s]

11 Un uomo lascia cadere una pietra da un ponte molto alto e sente il tonfo nell'acqua dopo 4,0 s. Trascura il tempo che il suono impiega per raggiungere l'uomo.

► Calcola l'altezza del ponte.
 ► Utilizza il risultato ottenuto per calcolare il tempo impiegato dal suono per raggiungere l'uomo.
 ► Utilizza il risultato ottenuto per migliorare la stima dell'altezza del ponte. [78 m; 0,23 s; 69 m]

12 Alla stazione la distanza tra un passeggero fermo sul binario e l'altoparlante è di 3,8 m. La frequenza del suono è di $5,0 \cdot 10^2 \text{ Hz}$.

► Dopo quanto tempo il passeggero sente il suono emesso dall'altoparlante?
 ► Calcola il numero di nodi contenuti nell'onda tra l'uomo e l'altoparlante. [$1,1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$; 11]

13 A 10 km da una spiaggia oceanica viene fatta esplodere una mina subacquea.

► Dopo quanto tempo un bagnante sulla spiaggia vede gli spruzzi d'acqua che si formano a causa dell'esplosione (velocità della luce nell'aria = $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)?
 ► Dopo quanto tempo lo stesso bagnante sente l'esplosione?
 ► Dopo quanto tempo un pesce vicino a riva percepisce l'esplosione? [$3,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$; 29 s; 6,6 s]

14 Seduti sulla riva del mare, due ragazzi osservano un temporale in lontananza. Inizialmente passano 6,0 s tra un lampo e un tuono. Un minuto dopo il lampo e il tuono sono separati da un intervallo di tempo di 4,0 s e così i ragazzi decidono di correre, con una

velocità di 10 km/h, per rifugiarsi nella tenda che dista 2,0 km dalla riva. Supponi che il temporale viaggi a velocità costante verso di loro.

► Quanto dista il temporale dalla spiaggia?
 ► Stabilisci se i ragazzi riescono a non bagnarsi. [$2,1 \cdot 10^3 \text{ m}$; no]

2 L'altezza e il timbro dei suoni

15 QUANTO?

I delfini percepiscono suoni in acqua con lunghezze d'onda superiori a 1 cm.

► Quanto vale la frequenza minima per il «loro» ultrasuoni? [$1,5 \cdot 10^5 \text{ Hz}$]

16 QUANTO?

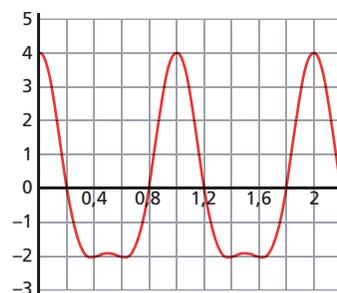
Gli elefanti percepiscono suoni con lunghezze d'onda inferiori a 25 m.

► Qual è la frequenza massima per il «loro» infrasuoni? [14 Hz]

17 Un'onda periodica è composta da due onde con frequenze $f = 1 \text{ Hz}$ e $2f$. L'onda con frequenza maggiore ha intensità relativa uguale a un terzo dell'altra.

► Traccia il grafico dell'onda con un software a tua scelta (per esempio GeoGebra o un foglio elettronico).

Risposta



Il livello di intensità sonora, in decibel, prodotta da n persone e data da:

- Sostituiamo l'espressione di I_1 e otteniamo l'intensità prodotta da n persone in decibel:

■ Risultato numerico

$$n = 40$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$$I_{1s} = 72 \text{ dB}$$

$$I_{ns} = 10 \log_{10} \frac{I_n}{I_0} =$$

$$= 10 \log_{10} \frac{n I_1}{I_0}$$

$$I_{ns} = 10 \log_{10} (n \cdot 10^{I_{1s}/10}) =$$

$$= 10 \left(\log_{10} n + \frac{I_{1s}}{10} \right) I_{ns} =$$

$$= 10 \log_{10} n + I_{1s}$$

$$I_{ns} = (10 \log_{10} 40 + 72) \text{ dB} =$$

$$= (16 + 72) \text{ dB} = 88 \text{ dB}$$

- 28** Il livello di rumore in un'aula vuota è di 40 dB. Quando ci sono 100 studenti che sostengono un esame scritto, il suono prodotto dalla respirazione e dal rapido scorrere delle penne sulla carta (sono studenti preparati!) fa aumentare il livello di rumore a 60 dB. Supponi che ogni studente dia un identico contributo alla potenza del rumore generale.
- Calcola il livello di intensità del rumore quando 50 studenti sono usciti dall'aula. [57 dB]

- 29** Il livello sonoro della lavastoviglie A è di 55 dB, mentre quello della lavastoviglie B è di 45 dB.
- Determina, in percentuale, di quanto è maggiore l'intensità del rumore della lavastoviglie A rispetto alla B . [90%]

- 30** Al piano terreno di una palazzina c'è una tipografia con 10 macchine uguali che producono un livello di rumore di intensità pari a 90 dB. I condomini chiedono di abbassare il livello a 85 dB.
- Calcola quante macchine il tipografo dovrà spegnere. [7]

- 31** Durante un concerto, il livello di intensità sonora di un violino è di 69 dB. Supponi che n violini suonino simultaneamente per ottenere un livello di intensità di 74 dB.
- Determina n . [3]

- 32** Un suono di intensità prossimo alla soglia di rottura del timpano (160 dB) si propaga in aria e investe un timpano umano di 85 mm^2 di superficie.

- Calcola la massima variazione di pressione che subisce il timpano.
- Qual è la massima forza che può sopportare? [3kPa; 0,25 N]

4 L'interferenza di onde sonore

33 QUANTO?

- Due onde sonore armoniche emesse da due altoparlanti in fase hanno, in un punto di interferenza costruttiva, una intensità di $2 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$ ciascuna.
- Quanto vale l'intensità del suono in quel punto? [$7 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$]

34 QUANTO?

- Due usignoli emettono onde sonore che giungono a un microfono con una intensità di $5 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$ ciascuna.
- Quanto vale l'intensità totale rilevata dal microfono? [10^{-6} W/m^2]

35

- Due onde sonore con lunghezze d'onda rispettivamente di 60 cm e 65 cm si propagano in aria e interferiscono tra loro.
- Calcola la frequenza di battimento. [44 Hz]

36

- Due diapason emettono frequenze rispettivamente di 256 Hz e 260 Hz.
- Calcola la frequenza di battimento se i due diapason vibrano simultaneamente. [4,00 Hz]

■ Risultato numerico

$$v = 3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

- Se invece la canna d'organo è chiusa a una estremità, la frequenza fondamentale è data da:

■ Risultato numerico

$$v = 3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$f_1 = \frac{3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}}{2 \cdot 10 \text{ m}} = 17 \text{ Hz}$$

$$f_1 = \frac{v}{4L}$$

$$f_1 = \frac{3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}}{4 \cdot 10 \text{ m}} = 8,5 \text{ Hz}$$

- 60** Il campo di udibilità normale va da circa 20 Hz a 20 kHz. Calcola qual è la massima lunghezza di una canna d'organo che abbia il suo modo fondamentale in questo intervallo se:

- è chiusa a un'estremità. [4,3 m; 8,6 m]
 ► è aperta a entrambe le estremità.

- 61** Le canne più corte usate in un organo sono lunghe circa 7,5 cm.

- Qual è la frequenza fondamentale di una canna di questa lunghezza aperta a entrambe le estremità?
 ► Qual è la più alta armonica compresa nel campo di udibilità per una tale canna?

[2,3 kHz; 18 kHz]

- 62** La corda *sol* di violino è lunga 32,8 cm. Se la si pone in vibrazione con l'arco, essa vibra a 196 Hz. Le note immediatamente più alte sulla scala sono: *la* (220 Hz), *si* (247 Hz), *do* (262 Hz), *re* (294 Hz).

- A quale distanza dall'estremità della corda bisogna mettere un dito per suonare queste note?

[3,6 cm; 6,8 cm; 8,3 cm; 10,9 cm]

- 63** Tre frequenze di risonanza consecutive in una canna d'organo sono 1310 Hz, 1834 Hz e 2358 Hz.

- Stabilisci se la canna è chiusa a una estremità o è aperta a entrambe le estremità.
 ► Calcola la lunghezza della canna.

[Chiusa a una estremità ; 32 cm]

- 64** Una corda fissata alle estremità ha due risonanze successive con lunghezze d'onda di 0,54 m per l' n -esima armonica e 0,48 m per la $(n + 1)$ -esima armonica.

- Determina n .
 ► Calcola la lunghezza della corda.

[$n = 8$, $n + 1 = 9$; 2,16 m]

PROBLEMI FINALI

65 Il richiamo della specie

- I delfini sono in grado di percepire ed emettere ultrasuoni, con frequenze comprese tra 20 kHz e 200 kHz. Li utilizzano principalmente per comunicare, arrivando a usare suoni diversi per identificare i differenti membri di un gruppo o i loro parenti.

- Calcola l'intervallo di lunghezza d'onda degli ultrasuoni emessi dai delfini. [7,5 mm ÷ 7,5 cm]

66 Copiando la natura...

- Così come fanno i cetacei, anche i moderni pescherecci utilizzano sistemi sonar per localizzare i banchi di pesci. I sonar sono composti da un emettitore e un microfono che, misurando il tempo impiegato dall'onda riflessa dai pesci per tornare alla nave, individua la presenza del banco e la sua profondità.

- Determina il tempo impiegato da un'onda riflessa da un banco di pesci situato a 25 m di profondità. [3,3 · 10⁻² s]

67 Il timbro da corridore

- Un cavallo al galoppo riesce a raggiungere la velocità di 70 km/h. Se il fantino si sta avvicinando a una persona ferma a bordo pista e lo chiama, la sua



avere uno strumento del genere in un solido come il rame. [4 nm]

73 Piccole ma rumorose

Il periodo in cui risuona il canto delle cicale è l'estate. L'apparato sonoro delle cicale è costituito da lamine (timballi) tese da tendini che le collegano a muscoli, sui lati dell'addome; per produrre il suono l'insetto fa vibrare le lamine e camere d'aria provengono alla risonanza. Alla cicala australiana spetta il titolo della più rumorosa, visto che riesce a emettere ben 100 decibel alla frequenza di 4,3 kHz.

- Calcola l'ampiezza della vibrazione dei timballi. [2,5 · 10⁻⁴ mm]

74 Che botto!

Quando assistiamo a uno spettacolo pirotecnico le esplosioni che ascoltiamo sono aggiunte di proposito per rendere più suggestivo l'evento. Infatti, quando i fuochi d'artificio sono accompagnati dalla musica, quelle cariche di esplosivo non vengono utilizzate. A capodanno viene sparato verticalmente un razzo luminoso che esplose a un'altezza di 200 m e produce un «botto» di intensità 7,20 · 10⁻⁴ W/m², misurata nel punto dove è stato lanciato.

- Calcola l'intensità del suono in decibel a una distanza di 1 m dal razzo.
- Calcola la potenza sonora irradiata durante l'esplosione. [135 dB; 362 W]

75 Un concerto in condizioni difficili

Un appuntamento tipico di ferragosto nella provincia di Cuneo è il concerto musicale che si tiene in montagna. Nel 2010 si è svolto nel vallone di Sant'Anna di Vinadio, in Valle Stura, a 2400 m di altitudine. Il flautista ha accordato il suo strumento al livello del mare a una temperatura di 30 °C. Durante il concerto la temperatura scende a 3 °C.

- Determina di quanto deve variare la lunghezza del suo strumento (con l'apposita vite) per accordarlo correttamente alle condizioni in cui si tiene il concerto (supponi che l'aria all'interno del flauto rimanga 3 °C). [5%]

76 Effetti del vento

Durante un concerto all'aperto soffia un vento, verso il pubblico, a 15 km/h.

- Quale variazione della frequenza del *la* centrale è percepita dagli ascoltatori? [circa 5 Hz]

77 Non hanno bisogno del cellulare

Per comunicare con altri esemplari della sua specie la balena blu emette vocalizzi a bassa frequenza con una intensità che può raggiungere i 190 dB (misurati a 1 m di distanza). Ipotizza che l'intensità decresca con il quadrato della distanza (in realtà in mare a grande distanza decresce più lentamente a causa delle riflessioni alla superficie e sul fondo).

- Calcola a quale distanza il suono ha ancora un'intensità superiore al rumore di fondo dell'oceano, che è circa 71 dB, e può quindi essere percepito da un'altra balena. [890 km]



John Caramelli / Shutterstock

78 Pesca con la dinamite

Alcune balene sono in grado di emettere dei «bang» di intensità pari a 216 dB. Questi suoni sono così intensi da stordire le prede, in particolare le aringhe.

- Qual è la massima forza a cui è sottoposta un'aringa se la sua superficie è di 28 cm²?

[3,1 · 10⁵ N]

79 Uno spreco di energia

La durata della batteria di un computer portatile è legata inevitabilmente al consumo di energia dei suoi componenti. Ipotizza che le casse del PC emettano frontalmente, al volume massimo, una intensità di 70 dB a 0,5 m di distanza e consumino 1,2 W ciascuna. L'efficienza di questo sistema si può definire come il rapporto tra la potenza fornita e la potenza emessa.

- Che efficienza hanno le casse? [1,3 · 10⁻⁵]

80 Musica di potenza

Un comune impianto stereo casalingo ha delle casse con una potenza di circa 100 W. Immagina che le casse siano posizionate a circa 2 m dal divano, su cui sei seduto, e che stiano fornendo tutta la potenza come onda sonora sferica (per fortuna normalmente la potenza emessa è sempre minore).

- ▶ Calcola i decibel dell'onda sonora.
- ▶ Calcola la pressione massima delle molecole di azoto e ossigeno sul timpano. [~ 123 dB; 41 Pa]

81 Un cammino tortuoso

●●● Dal punto di vista acustico il nostro corpo è ben approssimabile a un corpo fatto di acqua. Una persona con un addome spesso 30 cm viene investita da un'onda acustica di frequenza 200 Hz. Trascura il fatto che l'onda venga parzialmente riflessa e che la potenza risulti molto attenuata. In ogni caso una piccola parte dell'onda riuscirà a oltrepassare il corpo e ritornerà a propagarsi nell'aria.

- ▶ Determina la differenza di fase tra l'onda che ha attraversato il corpo e quella che è sempre stata nell'aria. [$2\pi \cdot 0,13$ rad]

82 Un localizzatore di balene

●●● Per individuare i cetacei, nel Mar Ligure si sta mettendo a punto un sistema basato su microfoni che sono in grado di triangolare la posizione dei mammiferi marini tramite l'ascolto dei loro richiami. Il sistema funziona misurando la differenza tra i tempi con cui un certo richiamo viene sentito da almeno tre differenti microfoni. Conoscendo la velocità di propagazione del suono nel mare è possibile individuare sia le coordinate sia la profondità a cui si trova il cetaceo. Supponi che in mare aperto siano posizionati tre microfoni ai vertici di un triangolo equilatero con lato 10 km. I primi due sensori sono nei punti di coordinate (0, 0) e (0, 10 km). In questa zona è presente una balena in superficie nel punto (0, 2 km).

- ▶ Calcola i ritardi con cui il richiamo della balena arriva sul secondo e sul terzo sensore.

$$[2^\circ \text{ sensore} = 3,9 \text{ s}, 3^\circ \text{ sensore} = 4,7 \text{ s}]$$

83 Conti riguardo al sonar

●●● La potenza del segnale che un sonar riceve dipende dalla distanza dell'oggetto, dalla superficie che riflette l'onda e dalle dimensioni dell'antenna. Un dispositivo commerciale per la pesca ha una potenza d'uscita massima $P_{\text{out}} = 150 \text{ W}$ e riesce a rilevare pesci a una profondità $d = 180 \text{ m}$. Supponi di avere un'antenna ricevente di superficie $S_a = 1 \text{ m}^2$, che i pesci abbiano una superficie totale $S_p = 10 \text{ m}^2$ (non si può pretendere che veda una singola sardina!).

- ▶ Ricava la formula che fornisce la potenza ricevuta dall'antenna.
- ▶ Calcola la potenza minima che l'apparato è in grado di rilevare. [$P = (P_{\text{out}} S_a S_p) / (16\pi^2 d^4); 10^{-8} \text{ W}$]

84 Acoustic Thermometry of Ocean Climate

●●● Dal 1996 al 2006 si è svolto l'esperimento *Acoustic Thermometry of Ocean Climate* per misurare sistematicamente le variazioni di temperatura degli oceani. La misurazione si basa sull'osservazione che le variazioni di temperatura sono la principale causa di variazione della velocità del suono in acqua. Più precisamente, variazioni di 1°C causano una variazione di 4 m/s della velocità di propagazione delle onde acustiche.

- ▶ Calcola la sensibilità in temperatura dell'esperimento, sapendo che sorgente e rivelatore si trovavano a 5324 km di distanza e che era possibile apprezzare differenze di tempo di 20 ms.

$$[\text{circa } 2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ \text{C}]$$

L'ARTE DELLA STIMA

85 I limiti del cacciatore

●●● I pipistrelli emettono ultrasuoni sia per orientarsi, percependone la riflessione contro le rocce, sia per cacciare, utilizzandoli per individuare gli insetti. Una delle specie più comuni di pipistrello, il *Pipistrellus pipistrellus*, emette ultrasuoni con frequenze comprese tra i 45 e 76 kHz.

- ▶ Stima la dimensione sotto la quale un insetto risulta «invisibile» al pipistrello. [4 mm]



sbornelifeandnature.com

86 Organo naturale e organo artificiale

●●● La frequenza fondamentale della voce umana dipende dalla lunghezza e dallo spessore delle corde vocali. Per un maschio essa ha valori compresi tra 85 Hz e 155 Hz.

- ▶ Stima la lunghezza che dovrebbe avere una canna d'organo per riprodurre la frequenza fondamentale della voce maschile. [Da 1 m a 2 m]

L'immagine di una sorgente prodotta da uno specchio piano

- è virtuale;
- è diritta;
- ha le stesse dimensioni della sorgente;
- ha la stessa distanza dallo specchio della sorgente.

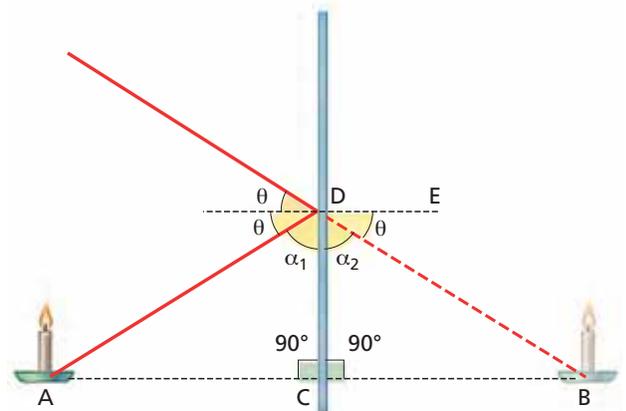
Dimostriamo che l'immagine e la sorgente hanno la stessa distanza dallo specchio. In particolare vogliamo dimostrare che $AC = CB$.

Tracciamo la normale allo specchio nel punto d'incidenza D . Per la legge della riflessione, gli angoli di incidenza e di riflessione θ sono uguali. Inoltre l'angolo BDE è uguale a θ perché è opposto al vertice dell'angolo di riflessione. Consideriamo quindi i triangoli ACD e CDB ; essi hanno:

- il lato CD in comune;
- l'angolo in C retto;
- $\alpha_1 = \alpha_2$ perché angoli complementari ($90^\circ - \theta$) di angoli uguali.

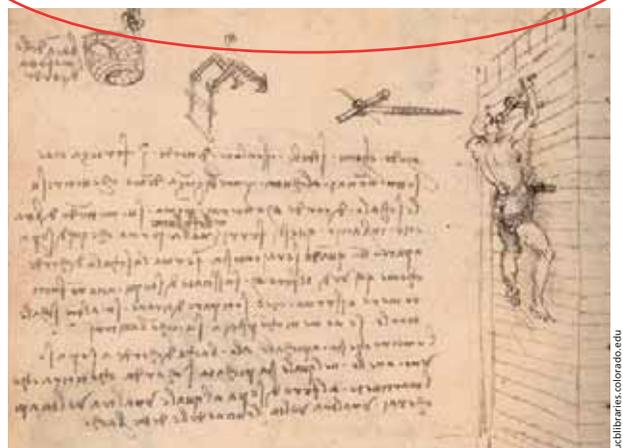
Per il secondo criterio i due triangoli sono uguali e in particolare $AC = CB$, come si voleva dimostrare.

L'immagine di un oggetto riflessa da uno specchio piano non è in generale uguale all'oggetto: pur avendo le stesse dimensioni non è sovrapponibile a esso.



1 Verifichiamo quotidianamente questo fatto quando notiamo che allo specchio la nostra mano sinistra «si trasforma» nella destra e viceversa.

2 Leonardo scriveva da destra verso sinistra, in modo che i suoi manoscritti fossero leggibili solo mediante riflessione in un piccolo specchio piano.



QUANTO? Quanto è grande lo specchio più piccolo in cui puoi vederti in piedi a figura intera?

La risposta è imprevista: metà della tua altezza. Supponiamo, per semplicità, che la donna in figura a pagina seguente abbia gli occhi in cima al capo.

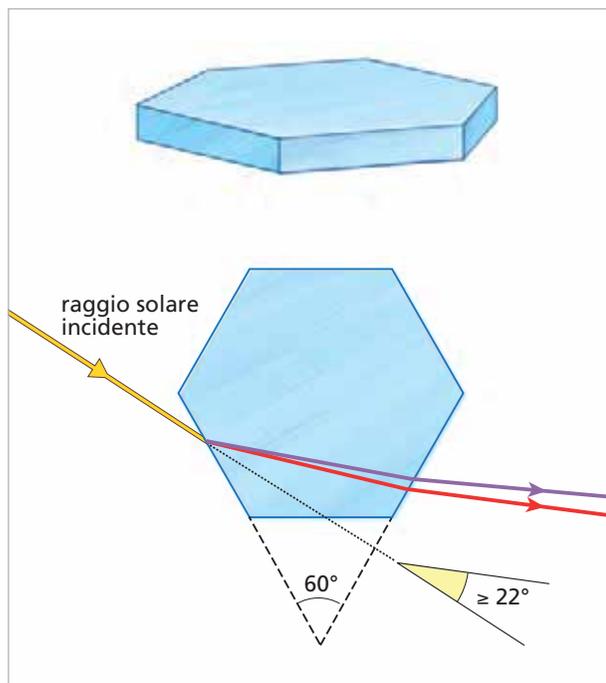
Parelio Il parelio è un fenomeno atmosferico dovuto alla dispersione della luce solare da parte di cristalli di ghiaccio.



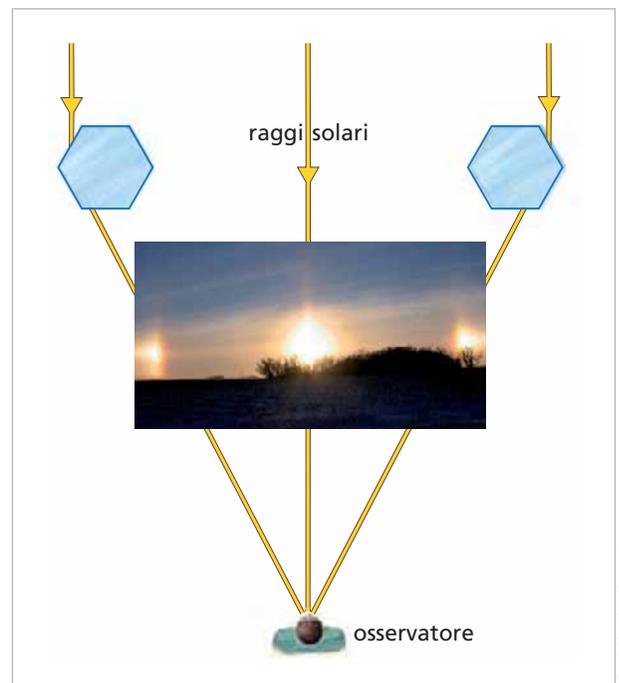
Giulia Romerli

Si presenta in giornate serene quando è presente una velatura nuvolosa di cirri, nubi quasi trasparenti di alta quota formate da cristalli di ghiaccio.

1 La luce solare incide sui cristalli esagonali e, come nel caso delle gocce d'acqua, per effetto della dispersione si formano raggi rifratti monocromatici. Questi raggi escono con un angolo maggiore o uguale a 22° rispetto alla direzione di incidenza.



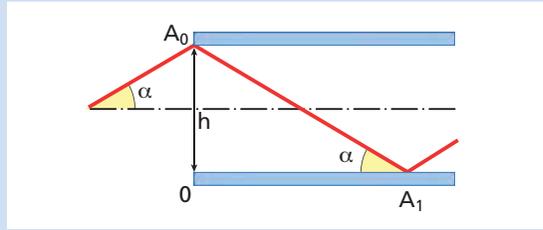
2 Quando non c'è vento in quota, i cristalli fluttuano con le basi parallele al suolo e formano due immagini del Sole, dette **pareli**, distanti 22° dal Sole stesso. Poiché i raggi rossi sono meno deviati di quelli violetti, l'alone rosso è più interno rispetto a quello degli altri colori.



Erik Avdanti / Wikimedia Commons

RISOLUZIONE

Per semplicità, ipotizziamo che la prima e l'ultima riflessione avvengano esattamente all'inizio e alla fine dello specchio. Poniamo in A_0 l'origine delle coordinate.



La seconda riflessione avviene in A_1 , che si trova a distanza $h/\text{tg } \alpha$ dall'origine. Il cammino della luce fra A_0 e A_1 è lungo $h/\text{sen } \alpha$.

Le riflessioni si susseguono a zig-zag, tutte uguali, fino ad arrivare alla fine dei due specchi. Il loro numero n è

$$n = \frac{L}{h/\text{tg } \alpha} = \frac{L}{h} \text{tg } \alpha$$

La lunghezza del percorso p della luce è

$$p = n \frac{h}{\text{sen } \alpha} = \left(\frac{L}{h} \text{tg } \alpha \right) \left(\frac{h}{\text{sen } \alpha} \right) = \frac{L}{\cos \alpha}$$

Il percorso non dipende dalla separazione degli specchi: è lo stesso di un raggio che va dritto con l'inclinazione iniziale α fino ad arrivare in fondo. Il ritardo r è perciò

$$r = \frac{p - L}{c} = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$$

Risultato numerico

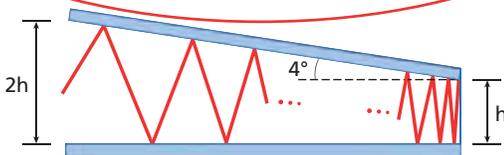
$\alpha = 60^\circ$
 $L = 2,0 \text{ m}$

$$r = \frac{2,0 \text{ m}}{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \left(\frac{1}{\cos 60^\circ} - 1 \right) = 6,7 \text{ ns}$$

13 Due specchi sono inclinati tra loro di 4° . Da un lato la distanza tra i due specchi è doppia rispetto all'altro. Un raggio entra dalla parte in cui la separazione tra gli specchi è maggiore (angolo di incidenza 60°), effettua una serie di riflessioni e arriva all'altra estremità in modo da riflettersi esattamente a 90° (in questo modo tornerà indietro seguendo lo stesso percorso dell'andata).

► Quante riflessioni effettua il raggio?

[30, 15 all'andata e 15 al ritorno]



14 Un oggetto puntiforme è posto fra due specchi piani paralleli. L'oggetto dista L da ciascuno specchio. In teoria si formano infinite immagini dell'oggetto, anche se in pratica se ne vedono solo alcune a cau-

sa dell'attenuazione della luce e dei difetti delle superfici riflettenti.

► Determina le distanze delle immagini dall'oggetto.

[$2L, 4L, 6L, \dots$; in generale $2nL$, con $n = 1, 2, 3, \dots$]

15 Un oggetto puntiforme è posto fra due specchi piani paralleli che distano 40 cm. L'oggetto dista 30 cm dallo specchio 1 e a 10 cm dallo specchio 2.

► Calcola le distanze delle due immagini, tra quelle che si formano, che sono più vicine a ciascuno specchio.

[Dallo specchio 1: 30 cm, 50 cm; dallo specchio 2: 10 cm, 70 cm]

3 La rifrazione dei raggi luminosi

16 QUANTO?

Lo zaffiro ha indice di rifrazione $n = 1,77$.

► Quanto vale l'angolo di rifrazione per un'incidenza di 30° sulla superficie dello zaffiro? [16°]

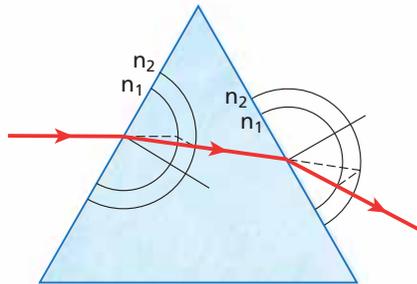
22 Considera il metodo grafico descritto nell'esercizio precedente.

► Questo metodo funziona anche per il raggio rifratto nel caso in cui $n_1 > n_2$?

[Sì; per ottenere B occorre tornare indietro e incontrare la circonferenza di raggio n_2 ; se ciò non avviene significa che non esiste alcun raggio rifratto]

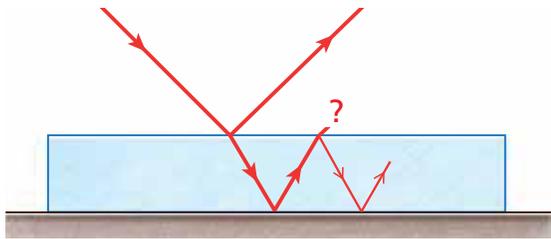
23 Utilizza il metodo grafico precedentemente descritto per determinare la deviazione prodotta da un prisma.

Rispos...



24 Un raggio colpisce una spessa lastra di vetro appoggiata su un tavolo: in parte viene riflesso e in parte viene trasmesso, subendo rifrazione nel vetro. Il raggio rifratto colpisce il fondo della lastra e viene riflesso, poi emerge dalla lastra.

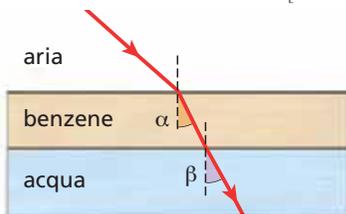
► Questo secondo raggio è parallelo al primo raggio riflesso?



25 Un sottile strato di benzene ($n_b = 1,50$) galleggia sull'acqua ($n_a = 1,33$). Un raggio incide con un angolo di 50° sul benzene.

► Calcola l'ampiezza degli angoli α e β .

$[\alpha = 31^\circ; \beta = 35^\circ]$



26 Un raggio di luce incide con un angolo di 35° sulla superficie di un liquido. Il raggio è deviato di 10°

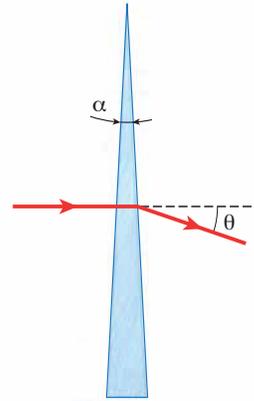
dalla sua direzione iniziale e si avvicina alla normale alla superficie nel punto di incidenza.

► Calcola l'indice di rifrazione del liquido. [1,36]

27 Quando un angolo β è piccolo, allora (esprimendo gli angoli in radianti) $\sin \beta \approx \beta$.

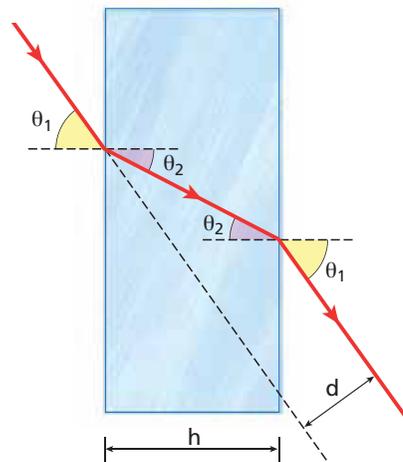
► Usa questa approssimazione per mostrare che un prisma sottile produce una deviazione angolare $\theta \approx (n - 1)\alpha$, dove n è l'indice di rifrazione del prisma e α il suo piccolo angolo.

► Questa formula si può esprimere anche in gradi? [No]



28 Un raggio che attraversa una lastra di vetro riemerge parallelo al raggio incidente, ma subisce uno spostamento d per effetto della rifrazione. Il vetro ha un indice di rifrazione $n = 1,5$ e lo spessore della lastra è $h = 2,0$ cm.

► Trova lo spostamento d per un angolo di incidenza $\theta_1 = 60^\circ$. $[d = h \sin(\theta_1 - \theta_2) / \cos \theta_2 = 1,0 \text{ cm}]$



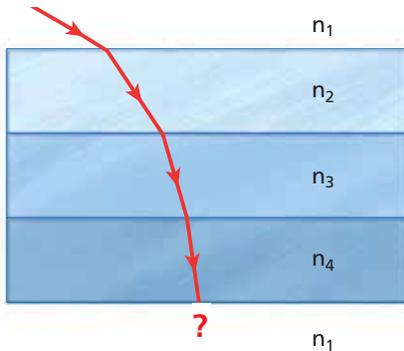
29 Supponi che la lastra del problema precedente sia immersa in acqua ($n_a = 1,33$).

► Determina lo spostamento d . [0,53 cm]

30 Tre lastre di vetro, aventi indici di rifrazione $n_2 = 1,52$, $n_3 = 1,63$ e $n_4 = 1,72$, sono impilate come in figura e immerse in acqua ($n = 1,33$). Un raggio di luce incide con un angolo di 30° .

- ▶ Calcola la deviazione del raggio uscente.
- ▶ Il risultato cambia se le lastre sono circondate dall'aria?
- ▶ Il risultato cambia se si invertono fra loro la seconda e la terza lastra?

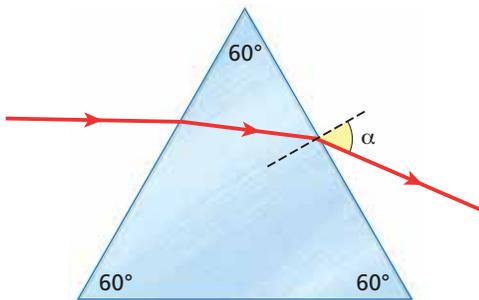
[0° poiché il raggio uscente è parallelo a quello iniziale; no; no]



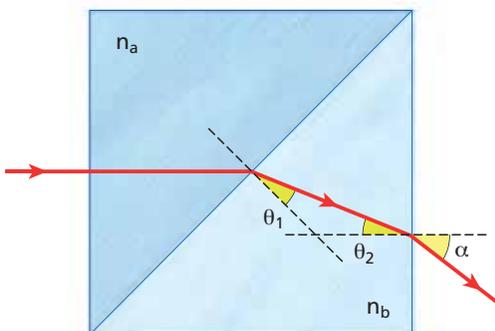
- 31** Un raggio luminoso incide su un prisma di vetro ($n = 1,5$), a sezione di triangolo equilatero, parallelamente a una faccia.

- ▶ Calcola l'ampiezza dell'angolo α con cui emerge dalla faccia successiva.
- ▶ Calcola la deviazione dalla direzione iniziale.

[77°; 47°]



- 32** Un cubo è formato da due prismi uguali di diverso materiale trasparente, rispettivamente di indice di rifrazione n_a e n_b . Un raggio colpisce il cubo perpendicolarmente sulla faccia del materiale con n_a .



- ▶ Determina l'angolo di deviazione α .
- Suggerimento: nota che $\theta_1 + \theta_2 = 45^\circ$ e ricorda che

$$\sin(45^\circ - x) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\cos x - \sin x)$$

$$[\sin \alpha = (1/2)(\sqrt{2n_b^2 - n_a} - n_a)]$$

- 33** I vetri crown sono vetri con minore indice di rifrazione e bassa dispersione, mentre i vetri di tipo flint sono quelli con maggiore indice di rifrazione e più alta dispersione. Per caratterizzare la dispersione del vetro si usano tre colori e perciò tre indici di rifrazione: quello principale si misura usando luce verde (esattamente la lunghezza d'onda verde del mercurio $\lambda_v = 546 \text{ nm}$) e si indica con n_e . Poi si usano due colori ai lati dello spettro: il rosso del cadmio ($\lambda_r = 644 \text{ nm}$), con indice di rifrazione n_C , e il blu del cadmio ($\lambda_b = 480 \text{ nm}$), con indice di rifrazione n_F . Con questi indici si costruisce un parametro detto *numero di Abbe*:

$$n = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}$$

Questo numero è basso quando la dispersione è alta e viceversa. I vetri con n_e piccolo e n maggiore di 55 sono chiamati vetri crown, quelli con n_e grande e con valori di n inferiori a 50, vetri flint.

- ▶ Usa la formula di Cauchy per l'indice di rifrazione dato da:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

e determina il numero di Abbe per il vetro crown borosilicato ($A = 1,5046$ e $B = 4200 \text{ nm}^2$) e il vetro flint denso ($A = 1,7280$ e $B = 13400 \text{ nm}^2$).

[$n_{\text{crown}} = 64$; $n_{\text{flint}} = 30$]

4 La riflessione totale

34 QUANTO?

- Lo zaffiro ha indice di rifrazione $n = 1,77$.

- ▶ Quanto vale il suo angolo limite? [34°]

35 QUANTO?

- L'angolo limite del topazio è circa 38°.

- ▶ Quanto vale l'indice di rifrazione? [1,6]

36 QUANTO?

- Considera un raggio che incide perpendicolarmente su una superficie di acqua calma.

- ▶ Quanto vale la percentuale di luce riflessa? [2%]

nuvole e laghi di metano ($n = 1,27$), esattamente come fa l'acqua sulla Terra.

- ▶ Se un pesce potesse vivere in un lago su Titano, che ampiezza avrebbe il suo cono visuale? [104°]

56 Il migliore amico di Marilyn

Nella parte teorica del capitolo hai visto che il taglio delle facce di un diamante viene eseguito tenendo conto dell'angolo limite θ_L per avere una riflessione interna totale della luce incidente, in modo tale da farla uscire nuovamente dalla faccia di ingresso.

- ▶ Calcola l'angolo minimo tra due facce di un diamante perché un raggio di luce non esca da entrambe. [20 $^\circ$]

57 Le varietà del Sistema Solare

I pianeti del Sistema Solare e alcuni dei loro satelliti hanno atmosfere molto diversificate e, in almeno due casi, composte quasi esclusivamente da un unico gas: Venere, da CO_2 ($n = 1,00045$), e Giove da H_2 ($n = 1,00014$). Un raggio di luce rossa, con lunghezza d'onda di 700 nm, emesso dal Sole entra nell'atmosfera dei due pianeti.

- ▶ In quale dei due pianeti la luce viaggia più velocemente che sulla Terra?
- ▶ Quanto vale la differenza percentuale della lunghezza d'onda del raggio di luce sulla Terra rispetto al pianeta su cui la velocità è minore?

[Giove; - 0,015%]



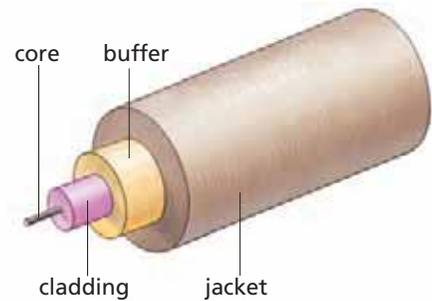
58 Un fiume di dati in un capillare di silicio

Una fibra ottica è composta da quattro strati concentrici: *core*, *cladding*, *buffer* e *jacket*. I primi due hanno la funzione di ottenere la riflessione interna totale, il buffer assorbe i raggi che sfuggono al cladding e il jacket è un semplice rivestimento. La tipologia con diametro più piccolo è chiamata *single mode* (SM) e ha un core con diametro di circa 10 μm e un cladding di 125 μm . L'indice di rifrazione del core è circa 1,5 mentre per il cladding vale circa 1,475.

- ▶ Calcola l'angolo limite per avere riflessione interna totale.

- ▶ Determina la distanza e il tempo minimi tra due riflessioni di un raggio luminoso.
- ▶ Calcola la variazione dei tempi tra due riflessioni considerando un angolo più realistico di 89°.

[80°; 55 μm ; 0,27 ps; 10 volte minori]



59 La sicurezza invisibile

I vetri delle automobili sono realizzati con tre strati differenti, due esterni di vetro crown (indice di rifrazione 1,52) e uno interno di un materiale plastico (indice di rifrazione 1,49). In questo modo, durante gli incidenti, il cristallo non esplosa per l'impatto, ma rimane incollato alla plastica posta tra i due vetri. Considera un raggio di luce con incidenza perpendicolare al cristallo.

- ▶ Calcola la percentuale di luce trasmessa all'interno della vettura, trascurando le riflessioni multiple interne.
- ▶ L'effetto del plexiglass è rilevante? Perché?

[92%; no]



60 Riflessioni multiple

L'intensità della luce riflessa da una superficie di vetro è il 4% di quella incidente in direzione perpendicolare al vetro. Questa percentuale aumenta se si considera che il raggio di luce trasmesso rimbalza nuovamente dall'altro lato del vetro stesso, dividendosi nuovamente in una parte trasmessa (nell'aria) e

una riflessa all'indietro (nel vetro). Questo processo va avanti finché tutta la potenza luminosa non viene o riflessa o trasmessa o assorbita dal vetro (che non è mai perfettamente trasparente). Per semplicità considera il vetro perfettamente trasparente.

- ▶ Calcola la percentuale della potenza luminosa che va a sommarsi alla luce riflessa, considerando una sola riflessione sulla faccia opposta del vetro.
- ▶ Calcola la frazione di luce trasmessa per un numero n generico di riflessioni interne.

[3,7%; 92%]

61 La legge della giungla

Alcuni uccelli acquatici si procurano il cibo infilzando i pesci con il becco. Questi uccelli sanno correggere la traiettoria del becco tenendo conto della differenza dell'indice di rifrazione tra aria e acqua. Un uccello tiene la testa a 20 cm dall'acqua e vuole acchiappare un pesce immerso di 10 cm. Il pesce si trova a 7 cm dalla perpendicolare passante per l'occhio del predatore.

- ▶ Determina la correzione all'angolo della traiettoria che l'uccello deve applicare per prendere il pesce (nel calcolo approssima il valore della tangente con quello del seno).

[0,07 rad]



Daniel Heber / Shutterstock

62 Dietro una lastra

Quando un oggetto è visto attraverso una lastra di vetro di spessore h , appare spostato di un tratto Δ rispetto alla posizione che avrebbe se non ci fosse la lastra.

- ▶ Dimostra che

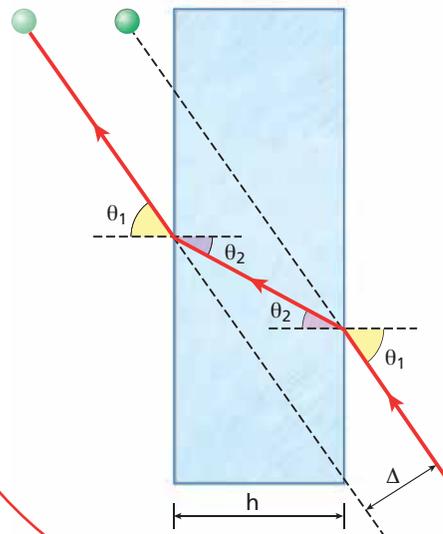
$$\Delta = h \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2}$$

- ▶ Usa la legge di Snell e, indicando con n l'indice di rifrazione del vetro, mostra che

$$\Delta = h \sin \theta_1 \left(1 - \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}} \right)$$

- ▶ Verifica che, se guardi l'oggetto perpendicolarmente rispetto alla lastra ($\theta_1 = 0$) allora si ha:

$$\Delta = h \theta_1 \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

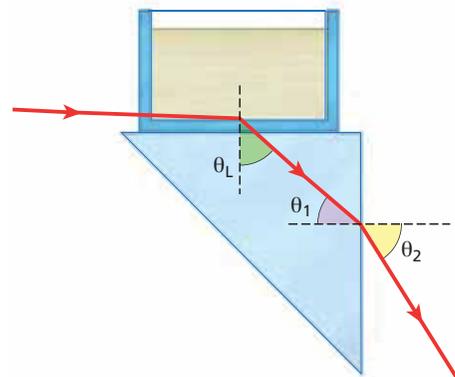


63 Pulfrich, chi era costui?

Il rifrattometro di Pulfrich è uno strumento preciso per la misurazione dell'indice di rifrazione dei liquidi. Alla base dello strumento sta un prisma di un materiale con indice di rifrazione abbastanza alto (deve essere più grande dell'indice di rifrazione del liquido che si deve misurare), sul quale è appoggiato un recipiente cilindrico trasparente che contiene il liquido in esame. Si fa passare un raggio di luce monocromatica attraverso il recipiente il più radente possibile, in modo che il raggio rifratto arrivi a formare un angolo limite θ_L con la normale, come indicato in figura. In ogni caso l'angolo limite corrisponde al minimo valore possibile dell'angolo θ_2 di uscita.

- ▶ Dimostra che l'indice di rifrazione del liquido è

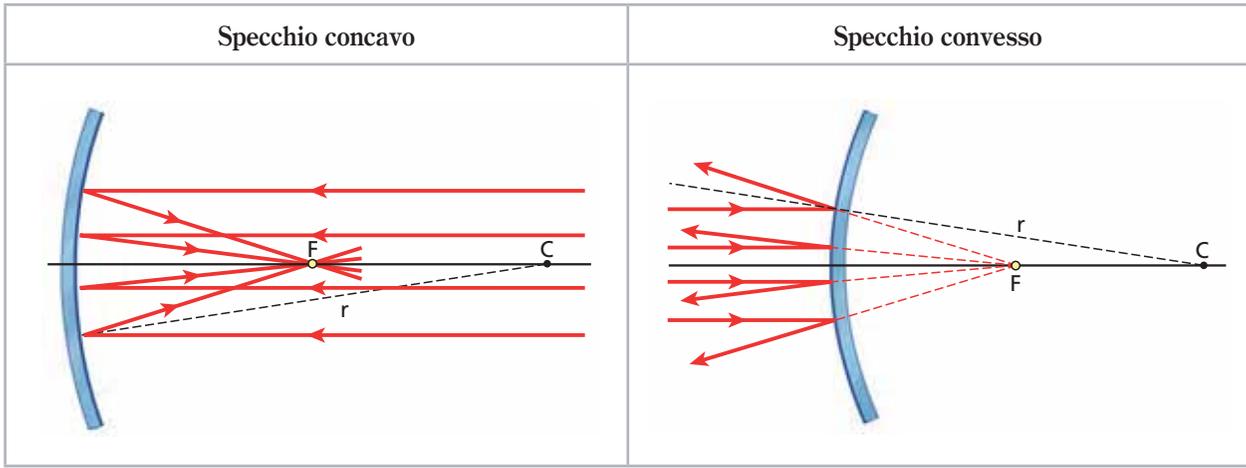
$$n_{liq} = \sqrt{n_{prisma}^2 - \sin^2 \theta_2}$$



Nel seguito prendiamo in considerazione solo specchi con dimensioni piccole rispetto al raggio di curvatura e **raggi parassiali**, cioè raggi che incidono sullo specchio con direzioni poco inclinate rispetto all'asse ottico e non molto distanti da questo.

Fuoco di uno specchio sferico Gli specchi sferici godono di una proprietà fondamentale:

quando i raggi incidenti su uno specchio sferico sono paralleli all'asse ottico e non molto distanti da esso, i raggi riflessi o i loro prolungamenti passano per uno stesso punto F dell'asse ottico, detto **fuoco** dello specchio.

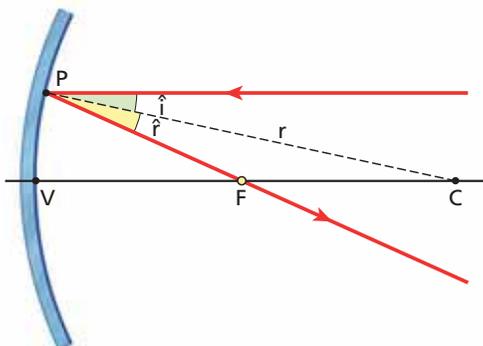


La **distanza** (o **lunghezza**) **focale** f è la distanza del fuoco dallo specchio.
 La distanza focale di uno specchio sferico di raggio r è

$$f = \frac{r}{2} \quad (1)$$

DENTRO LA LEGGE

- La distanza focale si misura in *metri*.
- Ogni specchio sferico ha una sua distanza focale.
- Perché il raggio riflesso (o il suo prolungamento) passi per il fuoco, il raggio incidente parallelo all'asse ottico deve essere molto vicino a questo.



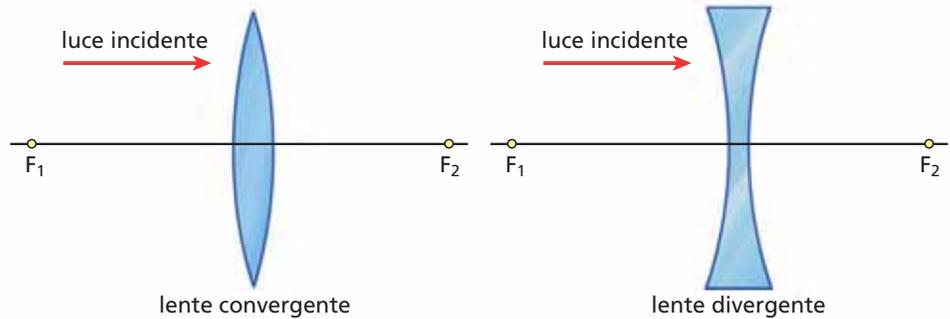
Per dimostrare la proprietà (1) nel caso di uno specchio concavo con raggio di curvatura r , consideriamo un raggio parallelo all'asse ottico e molto vicino a esso, che incide sullo specchio nel punto P .

Il raggio PC della sfera è la normale allo specchio nel punto di incidenza P . Notiamo che $\hat{i} = \hat{PCF}$ perché angoli alterni interni rispetto alle parallele raggio incidente-asse ottico tagliate dalla trasversale PC .

Il triangolo CPF è isoscele sulla base PC . Infatti:

- $\hat{i} = \hat{r}$ per la legge della riflessione;
- $\hat{r} = \hat{PCF}$ perché angoli uguali a \hat{i} .

Le costruzioni precedenti valgono anche quando i raggi luminosi provengono da destra: ogni lente ha quindi due fuochi, posizionati da parti opposte rispetto alla lente. Si dice **primo fuoco** F_1 il fuoco dalla parte della luce incidente e **secondo fuoco** F_2 quello dalla parte della luce rifratta.



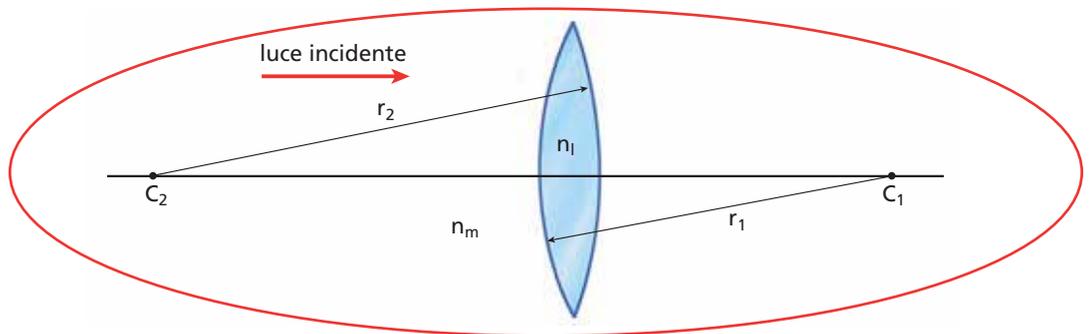
Si verifica che i due fuochi di una lente hanno la stessa distanza dal centro della lente e quindi che una lente è caratterizzata da una sola distanza focale f .

La distanza focale f di una lente si calcola mediante l'**equazione del costruttore di lenti**

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

in cui:

- n_1 è l'indice di rifrazione del materiale di cui è fatta la lente;
- n_m è l'indice di rifrazione del mezzo in cui è posta la lente;
- r_1 è il raggio di curvatura della superficie sulla quale incide la luce;
- r_2 è il raggio di curvatura della superficie dalla quale emerge la luce.



DENTRO LA FORMULA

- La (5) può essere messa nella forma equivalente

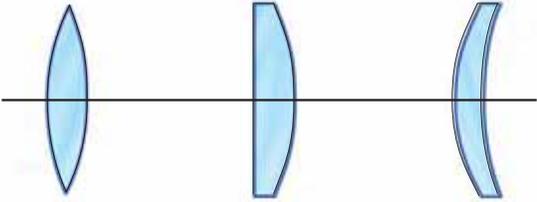
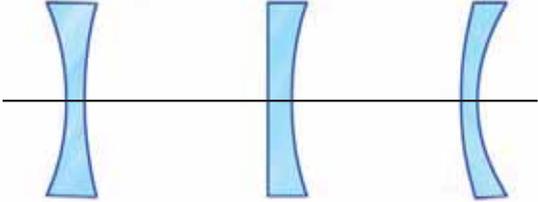
$$f = \frac{n_m}{n_1 - n_m} \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \quad (6)$$

- Se la lente opera nell'aria, $n_m = 1$ e

$$f = \frac{1}{n_1 - 1} \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \quad (7)$$

- r_1 e r_2 sono positivi quando il centro di curvatura è dalla parte della luce rifratta e negativi quando il centro di curvatura è dalla parte della luce incidente.

- f è positiva quando il fuoco è dalla parte della luce rifratta e quindi la lente è convergente.
- f è negativa quando il fuoco è dalla parte della luce incidente e quindi la lente è divergente.
- Se una superficie della lente è piana, il suo raggio di curvatura è infinito e quindi si pone $r = \infty$.
- Se l'indice di rifrazione della lente è maggiore di quello del mezzo ($n_1 > n_m$), le lenti più spesse al centro sono convergenti, mentre le lenti più spesse ai bordi sono divergenti.

Lenti convergenti			Lenti divergenti		
					
Biconvessa	Piano-convessa	Menisco	Biconcava	Piano-concava	Menisco
$r_1 > 0$ $r_2 < 0$	$r_1 = \infty$ $r_2 < 0$	$r_2 > r_1 > 0$	$r_1 < 0$ $r_2 > 0$	$r_1 = \infty$ $r_2 > 0$	$r_1 > r_2 > 0$

ESEMPIO

Per costruire una lente biconvessa di vetro flint ($n = 1,66$) con $f = 30$ cm e con le due superfici con lo stesso raggio di curvatura R , deve essere $r_1 = R$ e $r_2 = -r_1 = -R$ e quindi la (7) diventa

$$f = \frac{1}{n_1 - 1} \frac{R(-R)}{-R - R} \Rightarrow f = \frac{1}{n_1 - 1} \frac{R}{2}$$

da cui segue

$$R = 2(n_1 - 1)f = 2(1,66 - 1)(3 \cdot 10^{-1} \text{ m}) = 4 \cdot 10^{-1} \text{ m}$$

Potere diottrico di una lente. Diottrie

Una lente è considerata tanto più «forte» o «potente» quanto più devia i raggi parassiali che incidono su di essa, cioè quanto più è piccolo il valore assoluto di f .

Si chiama **potere diottrico** P di una lente l'inverso della sua distanza focale

$$P = \frac{1}{f}$$

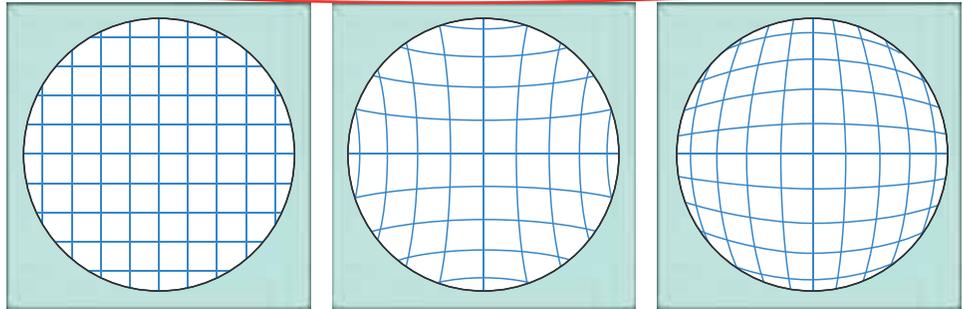
Il potere diottrico di una lente si misura in m^{-1} o *diottrie* (D). Una lente convergente con $f = 0,20$ m ha un potere diottrico di $1/(0,2 \text{ m}) = 5$ D, mentre una lente divergente con $f = -30$ cm ha un potere diottrico di $1/(-0,3 \text{ m}) = -3,3$ D.

L'equazione (5) del costruttore di lenti fornisce direttamente il potere diottrico $1/f$ di una lente.

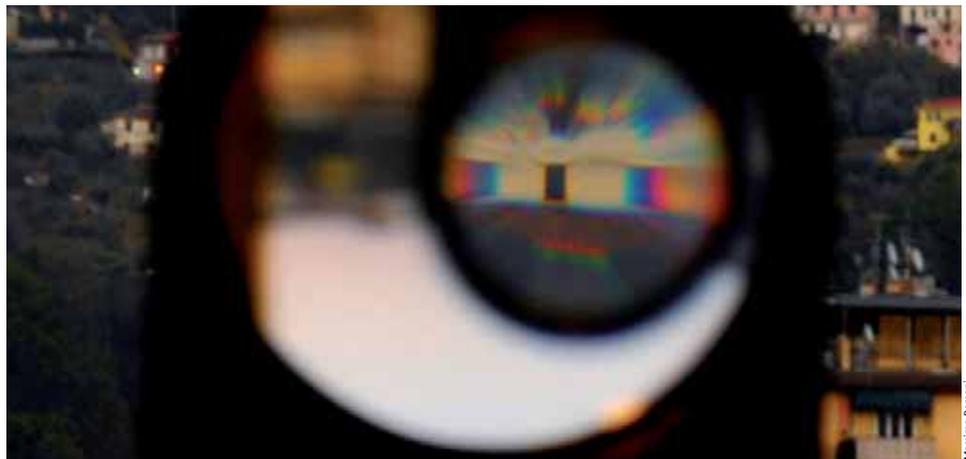
Distorsioni

Una lente ideale forma un'immagine che è geometricamente simile a quella dell'oggetto: l'immagine appare così un ingrandimento o una riduzione in scala dell'oggetto. Al contrario, le lenti reali manifestano il problema della **distorsione dell'immagine**, che in genere cresce allontanandosi dall'asse ottico. Ciò è una conseguenza del fatto che l'ingrandimento di una lente non è costante ma dipende dall'angolo che i raggi incidenti formano con l'asse ottico.

Gli effetti della distorsione di una lente rispettivamente divergente (al centro) e convergente (a destra) sono messi a confronto con l'immagine non deformata (a sinistra).



Aberrazione cromatica



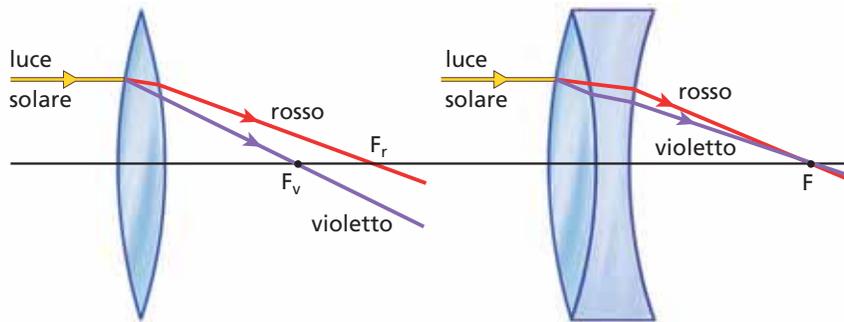
Osservando un fascio di luce bianca rifratta da una lente si notano zone colorate. Questo effetto è noto come **aberrazione cromatica** ed è una conseguenza della dispersione, cioè del fatto che l'indice di rifrazione di un mezzo dipende dal colore della luce.

All'interno di una lente, un raggio di luce bianca viene suddiviso in vari raggi monocromatici. La distanza focale della lente dipende dall'indice di rifrazione n_1 del materiale di cui è formata, come stabilisce l'equazione (5):

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

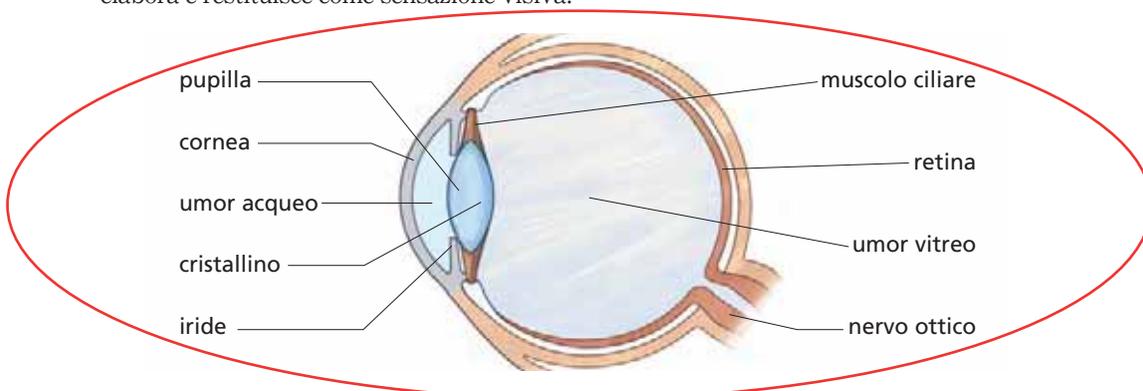
Poiché n_1 varia con il colore del raggio luminoso, la lente non ha un unico fuoco ma tanti fuochi a distanze focali che dipendono dal colore del raggio. Non si forma quindi un'unica immagine, ma tante immagini monocromatiche che si sovrappongono parzialmente, eccetto che nelle zone estreme dello spettro, cioè il rosso e il blu-violetto. Questo spiega perché, osservandole attentamente, le immagini prodotte da una lente hanno i bordi colorati proprio di rosso e blu-violetto.

Per ridurre l'aberrazione cromatica si costruiscono sistemi di lenti detti **acromatici**, in cui i vari componenti introducono effetti opposti sui vari colori. Molto diffuso, negli obiettivi fotografici, è il *doppietto acromatico*, formato da una lente biconvessa di vetro crown incollata a una lente biconcava di vetro flint.



8 L'occhio

L'occhio è un dispositivo ottico che fa convergere i raggi luminosi sulla retina, nella quale cellule specializzate (i *coni* e i *bastoncelli*) li trasformano in segnali elettrici che il cervello elabora e restituisce come sensazione visiva.



Nel suo percorso all'interno dell'occhio un raggio luminoso attraversa una successione di mezzi trasparenti che contribuiscono alla sua rifrazione sulla retina. Si distinguono, in particolare:

- la *cornea*, che con la sua marcata curvatura e il suo indice di rifrazione ($n = 1,376$) molto più elevato di quello dell'aria, fornisce ai raggi luminosi la deviazione più grande fra quelle che subiscono nell'occhio;
- l'*iride*, che è un diaframma con un foro centrale (la *pupilla*) che delimita l'ampiezza angolare dei raggi, assorbendo quelli molto lontani dall'asse ottico dell'occhio; grazie a muscoli particolari, il diametro della pupilla può cambiare per regolare l'intensità della luce trasmessa;
- il *cristallino*, una lente biconvessa che focalizza i raggi luminosi sulla retina; il suo indice di rifrazione varia da 1,407 nel centro a 1,386 ai bordi; la sua forma può cambiare sotto l'azione dei *muscoli ciliari*.

Accomodamento

L'occhio è in grado di mettere a fuoco sulla retina l'immagine di una sorgente indipendentemente dalla sua distanza grazie a un processo, realizzato dal cristallino, detto **accomodamento**.

GLI STRUMENTI OTTICI

Distanza focale dello specchio sferico

$$f = \frac{r}{2}$$

unità: m

$f > 0$ specchi concavi
 $f < 0$ specchi convessi

Equazione dei punti coniugati

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Distanza oggetto
 unità: m

Distanza immagine
 unità: m

$p > 0$ oggetti reali $g > 0$ immagine reale
 $p < 0$ oggetti virtuali $g < 0$ immagine virtuale

Ingrandimento lineare

$$G = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p}$$

Altezza oggetto

$G > 0$ immagine dritta
 $G < 0$ immagine capovolta
 $|G| > 1$ immagine ingrandita
 $|G| < 1$ immagine rimpicciolita

Equazione del costruttore di lenti

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Indice di rifrazione della lente

Indice di rifrazione del mezzo

$f > 0$ lente convergente
 $f < 0$ lente divergente

Potere diottrico

$$P = \frac{1}{f}$$

unità: diottria (D) = m^{-1}

Combinazioni di lenti

$$G_{\text{tot}} = G_1 G_2$$

Ingrandimento totale

$$\frac{1}{f_{\text{tot}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Potere diottrico combinazione lenti a contatto

■ RISOLUZIONE

- Utilizziamo l'equazione (2) dei punti coniugati. Isoliamo l'incognita q e utilizziamo la tabella per il segno della distanza focale. Nel caso di specchio concavo f è positiva.

$$\begin{aligned} \frac{1}{p} + \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \quad \text{con } f = \frac{r}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{q} &= \frac{2}{r} - \frac{1}{p} \end{aligned}$$

■ Risultato numerico

$$\begin{aligned} r &= 8,0 \text{ m} \\ p &= 3,8 \cdot 10^8 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{q} &= \frac{2}{8,0 \text{ m}} - \frac{1}{3,8 \cdot 10^8 \text{ m}} = 0,25 \text{ m}^{-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow q &= 4,0 \text{ m} \end{aligned}$$

- Per calcolare il diametro dell'immagine formata dallo specchio dobbiamo calcolare l'ingrandimento lineare dato dalla (3), che è anche definito come il rapporto tra l'altezza dell'immagine d_i , in questo caso il diametro, e quella reale d_o .

$$\left. \begin{aligned} |G| &= \frac{q}{p} \\ G &= \frac{d_i}{d_o} \end{aligned} \right\} \Rightarrow d_i = \frac{q}{p} d_o$$

■ Risultato numerico

$$\begin{aligned} d_o &= 3,5 \cdot 10^6 \text{ m} \\ p &= 3,8 \cdot 10^8 \text{ m} \\ q &= 4,0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$d_i = \frac{q}{p} d_o = \frac{(4,0 \text{ m})}{(3,8 \cdot 10^8 \text{ m})} (3,5 \cdot 10^6 \text{ m}) = 3,7 \text{ cm}$$

10 Misurato dalla Terra, il diametro angolare del Sole è $32'$. Lo specchio sferico di un osservatorio, avente raggio di curvatura $r = 2,8 \text{ m}$, proietta l'immagine del Sole su uno schermo traslucido.

- A quale distanza dallo specchio si deve posizionare lo schermo in modo che l'immagine del Sole sia a fuoco?
► Quanto vale il diametro dell'immagine del Sole sullo schermo? [1,4 m; 1,3 cm]

11 Un ragazzo si rade davanti a uno specchio che forma un'immagine diritta, virtuale e ingrandita di 1,5 volte quando il viso è a 30 cm dallo specchio.

- Determina il tipo di specchio e la sua distanza focale. [90 cm]

12 Un oggetto viene posto sull'asse ottico di uno specchio sferico concavo. La distanza tra l'oggetto e il vertice dello specchio è 78 cm e la distanza dell'immagine dal vertice è 28 cm.

- Calcola la distanza focale dello specchio.
► Determina il raggio di curvatura dello specchio.

- Individua il tipo di immagine formata.

[21 cm; 41 cm]

13 Uno specchio concavo ha un raggio di curvatura di 40 cm e un oggetto, se è disposto lungo l'asse ottico a 17 cm dal vertice, subisce un ingrandimento.

- Quanto vale il fattore di ingrandimento? [6,7]

14 Uno specchietto (convesso) laterale di una bicicletta crea un'immagine riflessa che ha dimensioni pari all'8‰ dell'oggetto. Fermo a un semaforo, osservi l'immagine di un palazzo, alta 1,2 cm e a $-4,0 \text{ cm}$ dalla superficie dello specchio.

- Calcola la distanza del palazzo.
► Determina la dimensione del palazzo.

[50 cm; 15 m]

15 Per rifarsi il trucco, una donna si mette a 50 cm da uno specchio concavo e nota che l'immagine del suo occhio è 3 volte più grande.

- Qual è il raggio di curvatura dello specchio?

[150 cm]

16 ●●● Uno specchio sferico concavo ha un raggio di 70 cm. Si vuole ottenere l'immagine capovolta di una candela oltre il centro dello specchio.

- ▶ A quale distanza d dal vertice bisogna porre la candela?
- ▶ Quanto vale il fattore di ingrandimento G in questa zona? [(35 cm, 70 cm); $(-\infty; -1)$]

17 ●●● Considera un oggetto e l'immagine che ne forma uno specchio sferico convesso.

- ▶ Dimostra che la dimensione dell'immagine è sempre minore della dimensione dell'oggetto.

4 Lenti sottili

5 Immagini formate da lenti sottili: costruzione grafica

6 Immagini formate da lenti sottili: l'equazione delle lenti

18 QUANTO?

●●● Un fiore di primula è posto a 0,1 m da una lente con distanza focale 0,2 m.

- ▶ Quanto vale l'ingrandimento lineare? [2]

19 QUANTO?

●●● La primula dell'esercizio precedente è alta 2 cm.

- ▶ Quanto è alta l'immagine? [4 cm]

20 QUANTO?

●●● Considera una lente divergente con fuoco posto a -40 cm.

- ▶ Quanto vale il potere diottrico? [−2,5 D]

21 QUANTO?

●●● Considera una lente da +3,5 D.

- ▶ Quanto vale la sua distanza focale? [0,29 m]

22 ●●● L'immagine di un insetto è grande il triplo dell'insetto se la lente è posta a 1,0 cm da esso.

- ▶ Calcola la distanza focale della lente. [1,5 cm]

23 ●●● La lente di un proiettore di diapositive produce un'immagine rovesciata e ingrandita su uno schermo posto a 1,5 m. La diapositiva dista 5,0 cm dalla lente.

- ▶ Determina la distanza focale della lente. [4,8 cm]

24 ●●● Le seguenti lenti sottili sono state realizzate con un vetro avente indice di rifrazione 1,6:

- a) biconvessa, $r_1 = 10$ cm e $r_2 = -21$ cm;
- b) piano-convessa, $r_1 = \infty$ e $r_2 = -10$ cm;
- c) biconcava, $r_1 = -10$ cm e $r_2 = 10$ cm;
- d) piano-concava, $r_1 = \infty$ e $r_2 = 20$ cm.

- ▶ Quanto vale, per ciascuna lente, la distanza focale in aria? [a) 11 cm; b) 17 cm; c) $-8,3$ cm; d) -33 cm]

25 ●●● Per costruire una lente sottile, che ha i raggi di curvatura di uguale valore assoluto, si usa un vetro con indice di rifrazione 1,5. Considera le distanze focali in aria a 5,0 cm e $-5,0$ cm.

- ▶ Calcola dove si trovano i rispettivi centri di curvatura.

$$[r_1 = 5,0 \text{ cm}, r_2 = -5,0 \text{ cm}; r_1 = -5,0 \text{ cm}, r_2 = 5,0 \text{ cm}]$$

26 ESEMPIO ●●●

Le seguenti lenti sottili sono state realizzate con vetro avente indice di rifrazione 1,6:

- a) $r_1 = 20$ cm e $r_2 = 10$ cm;
- b) $r_1 = 10$ cm e $r_2 = 20$ cm;
- c) $r_1 = -10$ cm e $r_2 = -20$ cm.

- ▶ Individua il tipo di lente e calcola, per ciascuna di esse, la distanza focale in aria.

■ RISOLUZIONE

Per stabilire il tipo di lente consultiamo la tabella del paragrafo 4:

- a) $r_1 > r_2 > 0 \Rightarrow$ lente divergente: menisco
- b) $r_2 > r_1 > 0 \Rightarrow$ lente convergente: menisco
- c) $r_2 < r_1 < 0 \Rightarrow$ lente divergente: menisco

La distanza focale f si calcola mediante l'equazione del costruttore di lenti:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

■ Risultato numerico

$$n_1 = 1,6$$

$$n_m = 1$$

$$a) r_1 = 20 \text{ cm}, r_2 = 10 \text{ cm}$$

$$b) r_1 = 10 \text{ cm}, r_2 = 20 \text{ cm}$$

$$c) r_1 = -10 \text{ cm}, r_2 = -20 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_a} = \left(\frac{1,6}{1} - 1 \right) \left(\frac{1}{20 \text{ cm}} - \frac{1}{10 \text{ cm}} \right) = -0,03 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_a = -33 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_b} = \left(\frac{1,6}{1} - 1 \right) \left(\frac{1}{10 \text{ cm}} - \frac{1}{20 \text{ cm}} \right) = 0,03 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_b = 33 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_c} = \left(\frac{1,6}{1} - 1 \right) \left(\frac{1}{-10 \text{ cm}} - \frac{1}{-20 \text{ cm}} \right) = -0,03 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_c = -33 \text{ cm}$$

27 Considera le seguenti situazioni per le distanze dell'oggetto e le distanze focali di lenti in aria:

$$a) p = 40 \text{ cm}, f = 20 \text{ cm};$$

$$b) p = 10 \text{ cm}, f = 20 \text{ cm};$$

$$c) p = 40 \text{ cm}, f = -30 \text{ cm};$$

$$d) p = 10 \text{ cm}, f = -30 \text{ cm}.$$

► Calcola la distanza dell'immagine e l'ingrandimento e stabilisci se l'immagine è reale o virtuale, diritta o capovolta.

$$[a) q = 40 \text{ cm}, G = -1,0, \text{ reale e capovolta};$$

$$b) q = -20 \text{ cm}, G = -2,0, \text{ virtuale e diritta};$$

$$c) q = -17 \text{ cm}, G = 0,43, \text{ virtuale e diritta};$$

$$d) q = -7,5 \text{ cm}, G = 0,75, \text{ virtuale e diritta}]$$

28 Un oggetto alto 3,0 cm è posto a 20 cm da una lente che ha un potere diottrico di 20 D.

► Esegui una costruzione grafica per trovare la posizione e l'altezza dell'immagine.

► Verifica il risultato mediante la formula delle lenti sottili.

$$[q = 6,7 \text{ cm}; h_i = -1,0 \text{ cm}]$$

29 Una lente convergente, avente una distanza focale di 10 cm, è usata per ottenere un'immagine la cui altezza è il doppio di quella di un piccolo oggetto. Calcola la distanza dell'oggetto e dell'immagine nei seguenti casi:

► l'immagine è diritta.

► l'immagine è capovolta.

► Esegui la costruzione grafica dell'immagine per i due casi.

$$[p = 5,0 \text{ cm}, q = -10 \text{ cm}; p = 15 \text{ cm}, q = 30 \text{ cm}]$$

30 Un oggetto è posto a 20 cm da una lente convergente. L'immagine formata dalla lente ha le stesse dimensioni dell'oggetto.

► Quanto vale la distanza focale della lente? [10 cm]

31 Un LED viene posto a 70 cm da una lente convergente. L'immagine reale è ottenuta su un foglio che dista 25 cm dalla lente. Successivamente il LED viene posto a una distanza doppia rispetto alla precedente.

► Di quanti centimetri si avvicina l'immagine alla lente? [4 cm]

32 Una lente convergente ha $f = 50 \text{ cm}$.

► A quale distanza bisogna porre un oggetto perché la lente ne formi un'immagine con dimensioni doppie? [75 cm; 25 cm]

33 Un oggetto è posto 10 cm prima del fuoco di una lente convergente. La sua immagine si forma 40 cm dopo l'altro fuoco della lente.

► Calcola la distanza focale della lente. [20 cm]

34 Un ragazzo, miope e senza occhiali, mette a fuoco oggetti che si trovano entro i 3,5 m. Per correggere la miopia, quando guarda un oggetto infinitamente distante, gli occhiali devono produrre un'immagine diritta e virtuale a una distanza di 3,5 m.

► Determina la distanza focale degli occhiali e la forma delle lenti. [- 3,5 m]

35 Un sistema formato da due lenti convergenti è tale che un fascio di raggi che entra parallelamente all'asse ottico del sistema esce rimanendo parallelo all'asse ottico.

► Come sono posizionate le due lenti?

37 ●●● Due lenti convergenti con $f = 30,0$ cm sono poste a una distanza di $30,0$ cm. Una sorgente puntiforme è posta sull'asse ottico del sistema a $40,0$ cm dalla prima lente.

- A quale distanza dalla seconda lente si forma l'immagine? [45 cm]

38 ●●● Una lente sottile con distanza focale di 30 cm è posta davanti a uno specchio concavo con distanza focale di 55 cm. Gli assi ottici coincidono e il centro della lente dista $1,5$ m dal centro dello specchio. Una candela è posta a 40 cm dalla lente al di là dello specchio.

- A quale distanza dall'oggetto si forma l'immagine? [2,6 m]

39 ●●● A 30 cm da una lente si pone una sorgente luminosa brillante e si vede un'immagine diritta a $7,5$ cm. Esiste anche una debole immagine capovolta, 6 cm davanti alla lente, dovuta alla riflessione sulla superficie frontale della lente. Se si ruota la lente di 180° intorno a un suo diametro, questa immagine capovolta più debole si trova a 10 cm davanti alla lente.

- Calcola l'indice di rifrazione della lente. [1,6]

40 ●●● Un paio di occhialini per immersioni possono essere schematizzati come due lenti piano-convesse di raggio 30 cm. L'indice di rifrazione dell'acqua è $1,3$ mentre l'indice di rifrazione della plastica è $1,5$ e la parte curva è a contatto con l'acqua.

- Calcola il potere diottrico degli occhialini.
► Quanto è ingrandita una moneta posta a 1 m dalla lente? [0,51 D; 2,0]

41 ●●● Una lente sottile convessa con distanza focale di 20 cm è posta a contatto di uno specchio piano. Un oggetto è posto a 30 cm dalla lente.

- Calcola a quale distanza si forma la sua immagine. [15 cm]

7 Aberrazioni

42 ●●● Una lente biconvessa, con raggi $r_1 = 10,0$ cm e $r_2 = -10,0$ cm, è realizzata con un vetro che ha indice di rifrazione $1,53$ per la luce violetta e $1,47$ per la luce rossa.

- Calcola le distanze focali di questa lente per la luce violetta e per quella rossa. [9,40 cm, 10,6 cm]

43 ●●● Una lente convergente biconvessa di raggi r_1 e r_2 è realizzata con vetro che ha indice di rifrazione $1,57$ per la luce violetta e $1,50$ per la luce rossa.

- Di quanto aumenta, in percentuale, la distanza focale della lente per la luce rossa rispetto alla luce violetta? [14%]

8 L'occhio

44 QUANTO?

●●● Un ragazzo miope vuole osservare una nave all'orizzonte. I suoi occhiali hanno una distanza focale di -3 m.

- Quanto vale il potere diottrico delle lenti degli occhiali? [-0,3 D]

45 QUANTO?

●●● Un presbite per leggere un giornale confortevolmente (cioè tenendolo a una distanza di $0,4$ m) utilizza occhiali da $+1$ D.

- A che distanza riesce a leggere il giornale senza occhiali? [0,7 m]

46 ●●● Un oggetto, posto inizialmente a $3,0$ m dall'occhio, viene avvicinato fino a una distanza di 30 cm. La distanza tra la cornea e la retina è di $2,5$ cm.

- Quanto vale la variazione della distanza focale dell'occhio? [0,17 cm]

47 ESEMPIO ●●●

Il punto prossimo di una certa persona è a 80 cm. Le vengono prescritti occhiali che le permettono di leggere un libro posto a 25 cm dagli occhi. Le lenti sono a $2,0$ cm dagli occhi.

- Quante diottrie hanno le lenti usate per questi occhiali?

■ RISOLUZIONE

La persona è un ipermetrope, dato che la distanza del punto prossimo è maggiore della distanza a cui mette il libro per leggere.

i punti di una superficie S investita da un'onda luminosa monocromatica divengono sorgenti secondarie di quell'onda; al di là della superficie S la perturbazione luminosa è generata dalla sovrapposizione di queste onde secondarie.

Le onde secondarie hanno la stessa lunghezza d'onda, e quindi la stessa frequenza, dell'onda primaria, e quindi la stessa lunghezza d'onda se continuano a propagarsi nello stesso mezzo.

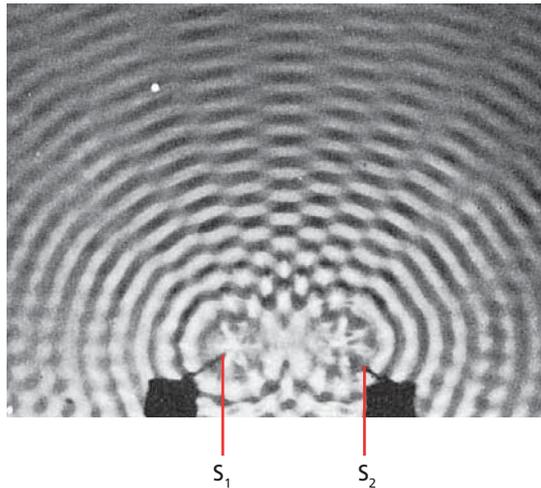
Nel caso in cui su un punto giungano onde monocromatiche con la stessa frequenza ma provenienti da sorgenti diverse, il **principio di sovrapposizione** assicura che la perturbazione totale è la somma delle perturbazioni che produrrebbe ciascuna di esse.

Sorgenti coerenti

I fenomeni di interferenza si manifestano quando si sovrappongono fasci di luce generati da sorgenti coerenti:

due sorgenti si dicono **coerenti** quando emettono onde mantenendo nel tempo una relazione di fase costante.

Le onde prodotte da due punte che oscillano sulla superficie dell'acqua evidenziano effetti di interferenza perché le due punte compiono oscillazioni con la stessa frequenza e la differenza delle loro fasi rimane costante nel tempo.



Se la differenza di fase nel moto delle punte non rimanesse costante, la superficie dell'acqua presenterebbe increspature non regolari.

Riflessione e rifrazione secondo il modello ondulatorio

Le leggi della riflessione e della rifrazione delle onde luminose possono essere dimostrate a partire dal principio di Huygens-Fresnel.

Riflessione Consideriamo un fronte d'onda che incide su una superficie piana. Quando il fronte arriva su un punto della superficie, questo diventa una sorgente di onde sferiche secondarie. Il fronte d'onda riflesso si forma come sovrapposizione dei fronti d'onda secondari emessi dai punti della superficie.

QUANTO? La distanza fra archi adiacenti nel DVD

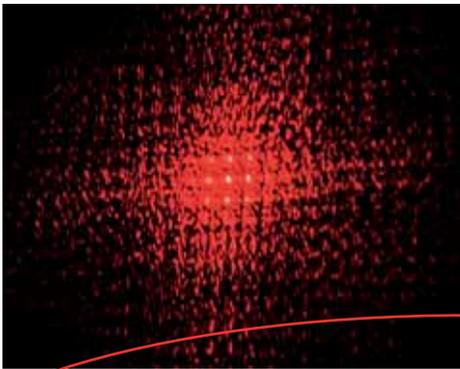
Un DVD illuminato da luce bianca presenta il massimo di ordine 1 per la luce rossa ($\lambda = 6,5 \cdot 10^{-7}$ m) a un angolo di circa 60° . Quindi la distanza fra due archi successivi è

$$a = \frac{\lambda}{\sin 60^\circ} = \frac{6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{0,87} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

In realtà nei DVD la spaziatura è $7,4 \cdot 10^{-7}$ m.

Reticoli bidimensionali

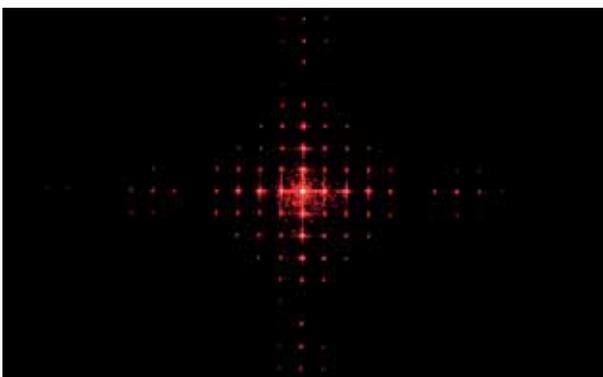
Nella vita quotidiana i reticoli di diffrazione che capita di osservare più frequentemente sono bidimensionali. Per esempio, i fili di tessuto che formano la trama delle stoffe hanno spesso una disposizione spaziale molto regolare. Guardando una sorgente di luce attraverso un pezzo di stoffa, si vedono distintamente figure di diffrazione che evidenziano la stessa geometria della trama del tessuto (foto a sinistra).



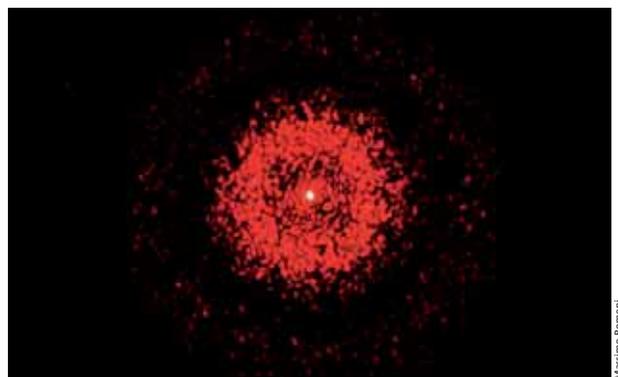
Un altro esempio di diffrazione bidimensionale è quello fornito da uno specchio ricoperto uniformemente di polvere (foto a destra). In questo caso la diffrazione è dovuta a un insieme di granelli di polvere che sono disposti a caso e quindi non presentano alcuna regolarità geometrica. La figura di diffrazione è formata da frange colorate.

Le due fotografie seguenti mostrano gli effetti di due reticoli bidimensionali molto diversi fra loro e illuminati con un laser.

1 Il reticolo è composto da piccoli forellini disposti sui vertici di quadrati: la figura di diffrazione ha la stessa simmetria dei forellini.



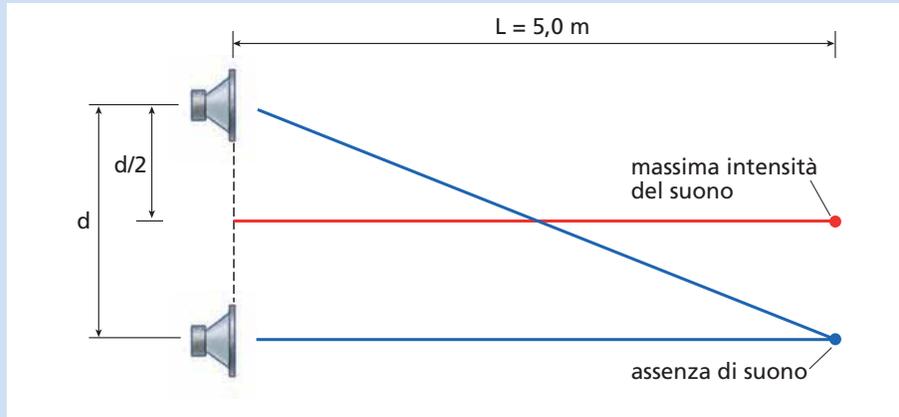
2 Il reticolo è composto da piccoli forellini praticati a caso, senza alcuna regolarità: la figura di diffrazione ha simmetria centrale.



12 ■ ESEMPIO

Si può effettuare l'esperimento di Young usando onde sonore invece di onde di luce e due altoparlanti in fase al posto delle fenditure. Due altoparlanti emettono due onde sonore in fase a 440 Hz. A metà tra i due altoparlanti, a una distanza $L = 5,0$ m, il suono ha massima intensità, mentre, se ti sposti lateralmente, il suono si affievolisce e scompare quando sei davanti a uno dei due altoparlanti.

► Qual è la distanza d tra i due altoparlanti?



■ RISOLUZIONE

Detta v la velocità del suono e f la frequenza, la lunghezza d'onda λ del suono è

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Davanti a un altoparlante, la differenza di percorso Δl tra le onde emesse dai due altoparlanti vale

$$\Delta l = \sqrt{L^2 + d^2} - L$$

Si ha la prima interferenza distruttiva davanti a un altoparlante quando Δl è mezza lunghezza d'onda:

$$\sqrt{L^2 + d^2} - L = \frac{1}{2} \lambda$$

Esplicitiamo d :

$$\begin{aligned} \sqrt{L^2 + d^2} &= L + \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow d^2 = \left(L + \frac{1}{2} \lambda\right)^2 - L^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow d &= \sqrt{L\lambda + \frac{1}{4} \lambda^2} \end{aligned}$$

Dato che $\lambda \ll L$ il termine $\frac{1}{4} \lambda^2$ è trascurabile rispetto a λ :

$$d \approx \sqrt{L\lambda} = \sqrt{\frac{Lv}{f}}$$

■ Risultato numerico

$L = 5,0$ m
 $v = 340$ m/s $f = 440$ Hz

$$d \approx \sqrt{\frac{(5,0 \text{ m})(340 \text{ m/s})}{440 \text{ Hz}}} \approx 2,0 \text{ m}$$

13 Considera l'esempio precedente.

► Quanto devi spostarti, sempre nella stessa direzione, per sentire nuovamente il suono con la massima intensità? [0,9 m]

14 In un esperimento con due fenditure la sorgente che emette luce non è monocromatica, ma mescola un rosso di lunghezza d'onda 672 nm con un giallo di lunghezza d'onda 576 nm. La figura di interfe-

L'interferenza è costruttiva per quelle lunghezze d'onda per le quali m è intero:

Tra i due valori di m trovati, per le lunghezze d'onda nel visibile ci sono solo due numeri interi: $m = 2$ e $m = 3$.

La lamina appare verde-rosa.

Con luce rossa il valore di m è

$$m_r = 2 \cdot 1,46 \frac{0,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{700 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 0,5 = 1,6$$

Con luce viola il valore di m è

$$m_v = 2 \cdot 1,46 \frac{0,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{400 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 0,5 = 3,2$$

Con $m = 2$ si ha

$$\lambda = \frac{4nd}{2m+1} = 4 \cdot 1,46 \frac{0,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{5} = 580 \text{ nm}$$

che corrisponde a luce gialla.

Con $m = 3$ si ha

$$\lambda = \frac{4nd}{2m+1} = 4 \cdot 1,46 \frac{0,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{7} = 420 \text{ nm}$$

che corrisponde a luce rosa-viola.

- 23** Considera una lamina simile a quella dell'esercizio 22 ma 6 volte più spessa.

► Spiega perché la riflessione della luce bianca non dà più iridescenza.

[Con questo spessore ci sono 10 lunghezze d'onda nel visibile che danno interferenza costruttiva: con 10 colori riflessi si ha una luce che appare bianca]

- 24** Una lamina, con indice di rifrazione 1,46, colpita da luce bianca non riflette alcun colore.

► Qual è il suo spessore?
► Man mano che la lamina si assottiglia, qual è l'ul-

timo colore a essere riflesso: il rosso o il viola?

[$\approx 0,2 \mu\text{m}$, viola]

- 25** Una lamina sottile con indice di rifrazione 1,46 è posta in aria ed è illuminata da luce bianca. La luce riflessa non ha più le lunghezze d'onda pari a 360 nm, 450 nm e 600 nm perché sono state cancellate dall'interferenza distruttiva.

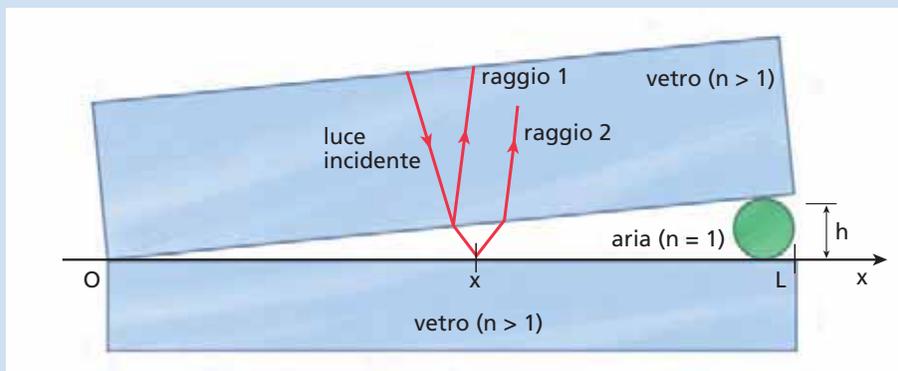
► Calcola lo spessore della lamina.
► Quali sono le lunghezze d'onda che per riflessione appaiono più visibili?

[616 nm; 720 nm, 514 nm, 400 nm]

26 ESEMPIO

Due vetri di lunghezza $L = 5,00$ cm sono quasi a contatto, formando un cuneo di altezza $h = 10,0 \mu\text{m}$. I due vetri sono illuminati, perpendicolarmente, con luce verde di lunghezza d'onda $\lambda = 566$ nm.

► Quante frange di interferenza si formano tra i due vetri?



Ricordando ancora che $n \sin \theta_2 = \sin \theta_1$ risulta:

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}} = \\ &= \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} \end{aligned}$$

Quindi in definitiva si ha:

$$d = \frac{1}{2} \lambda + 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}$$

- 33** Una lamina sottile, di 750 nm di spessore, è fatta di un materiale con indice di rifrazione 1,46 e viene colpita da luce di lunghezza d'onda pari a 587 nm.
- ▶ Per quale angolo di incidenza si ha interferenza costruttiva tra i due raggi riflessi? [$\approx 30^\circ$]

4 Diffrazione

34 QUANTO?

- Una luce rossa ($\lambda = 680$ nm) viene proiettata su uno schermo, distante 1 m, attraverso un foro di diametro 1 mm.
- ▶ Quanto vale il diametro della macchia centrale che si crea sullo schermo? [≈ 1 mm]

- 35** Una fenditura, illuminata da una luce rossa ($\lambda = 680$ nm), dà origine, su uno schermo distante 1 m, a una figura di diffrazione avente una fascia centrale larga 1 cm.
- ▶ Quanto vale la larghezza della fenditura? [0,14 mm]

- 36** Mediante luce rossa ($\lambda = 680$ nm) si realizza una figura di interferenza con fenditure di larghezza finita b . La figura è proiettata su uno schermo distante 4,0 m. La parte centrale della figura di diffrazione è larga 1,2 cm e contiene 10 frange di interferenza.
- ▶ Calcola la larghezza delle fenditure e la loro distanza. [$b = 0,45$ mm; $d = 0,23$ mm]

- 37** Il numero- f (denotato di solito con $f/\#$) è il rapporto adimensionale f/d tra lunghezza focale f di un sistema ottico e il diametro d della sua apertura.

Per esempio, un obiettivo $f/2,8$ ha la lunghezza focale 2,8 volte maggiore del diaframma. Se usi un sistema ottico per mettere a fuoco un'immagine su uno schermo, la distanza focale f è approssimativamente l'equivalente della distanza del sistema dallo schermo, cioè $L \approx f$.

- ▶ Con l'equazione $\theta = 1,22 \lambda/d$ mostra che per un obiettivo il cui numero f è $f/\#$, l'immagine di un punto luminoso, per effetto della diffrazione, è un dischetto di diametro $D_s \approx 2,44 \lambda f/\#$.
- ▶ Determina il diametro, per unità di $f/\#$, del dischetto prodotto dalla luce visibile. [$1,0 \div 1,7$ m/($f/\#$)]

- 38** L'obiettivo di una fotocamera è regolato su $f/16$.

- ▶ Quanto misura il diametro di un punto di luce rossa ($\lambda = 680$ nm) sul sensore CCD?
- ▶ Se il sensore CCD è da 6 Mpixel con dimensioni 7,2 mm \times 5,3 mm, quanti pixel sono colpiti dalla luce? [27 μ m; la dimensione di un pixel è circa 2,5 μ m per cui sono interessati circa 10^2 pixel]

- 39** Il numero- f dell'occhio non è costante perché il diametro della pupilla aumenta in condizioni di scarsa luminosità. La lunghezza focale dell'occhio è circa 25 mm, mentre il diametro della pupilla varia da 3 mm fino a 8 mm circa.

- ▶ Determina la variazione del numero- f per l'occhio.
- ▶ Nella notte vedi un lontano lumino rosso: qual è il diametro del dischetto di luce che si proietta sulla tua retina?

[Da $f/8,3$, in condizioni di luce intensa, a $f/3,1$, in condizioni di scarsa luminosità; 5 μ m]

40 ESEMPIO

Le luci rosse ($\lambda = 680$ nm) dei fanalini posteriori di un'automobile distano fra loro 1,2 m. Al crepuscolo il tuo occhio ha un diametro di circa 7,0 mm.

- ▶ In condizioni atmosferiche ottimali, fino a che distanza riesci a capire se il veicolo che si sta allontanando è un'auto o una moto?

■ RISOLUZIONE

I fanalini dell'auto sono due, la moto ne ha uno solo. Il tuo occhio deve risolvere le due luci. Usiamo il criterio di Rayleigh.

Se d è il diametro dello strumento ottico, che in questo caso è l'occhio, la separazione angolare deve essere maggiore di

Indica con L la distanza tra te e il veicolo e con h la distanza tra i fanalini. L'angolo θ sotteso dai due fanalini è piccolissimo, per cui

I due fanalini sono distinti se $\theta > \theta_{\min}$ cioè se

$$\theta_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta \approx \frac{h}{L}$$

$$\frac{h}{L} > \theta_{\min} \Rightarrow L < \frac{h}{\theta_{\min}}$$

■ Risultato numerico

$$\lambda \approx 680 \text{ nm} = 6,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$d = 7,0 \text{ mm} = 7,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h = 1,2 \text{ m}$$

$$\theta_{\min} = 1,22 \frac{6,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{7,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

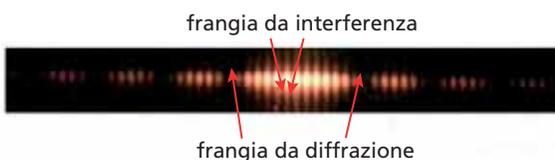
$$L = \frac{1,2 \text{ m}}{1,2 \cdot 10^{-4} \text{ rad}} \approx 10 \text{ km}$$

41 La Luna dista circa $3,8 \cdot 10^8$ m dalla Terra.

- ▶ Quale distanza devono avere due oggetti sulla Luna per essere risolti dall'occhio umano (quando osservi la Luna piena, il diametro della tua pupilla è circa 5 mm)?
- ▶ E per essere risolti da un telescopio del diametro di 8,2 m? [56 km; 34 m]

42 La larghezza angolare α della fascia centrale di una figura di diffrazione è data dall'equazione $\alpha = 2\lambda/b$, dove b è la larghezza della fenditura. Più sottile è b , più larga è la fascia. Se si realizza l'esperimento di Young con fenditure estremamente sottili e distanziate della quantità d , l'interferenza origina una serie di frange luminose in corrispondenza degli angoli $\theta_m = m\lambda/d$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$). Se si realizza l'interferenza con due fenditure di larghezza finita b , poste a una distanza d molto più grande di b , allora α contiene molti angoli θ_m .

- ▶ Mostra che se $d = kb$, con k numero naturale, dentro la fascia centrale della figura di diffrazione ci sono $2k$ frange chiare dovute all'interferenza.



43 Il grafico nel paragrafo 4 rappresenta l'intensità della luce su uno schermo prodotta dalla diffrazione, in funzione dell'angolo θ (piccolo).

- ▶ Usa il foglio elettronico per verificare che quella figura corrisponde alla funzione

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2$$

dove $x = (\pi d/\lambda) \sin \theta$. La figura del testo è stata realizzata usando $d/\lambda = 100$, ma tu puoi inserire d/λ come parametro. Fai variare θ da $-0,05$ rad a $+0,05$ rad usando 200 passi.

- ▶ Determina numericamente le intensità relative dei tre massimi laterali. [4,5%; 1,6%; 0,8%]

5 Reticoli di diffrazione

44 QUANTO?

- ▶ Considera un reticolo con 500 righe al centimetro.
- ▶ Quanto vale l'angolo del primo massimo ($m = 1$) della luce arancione ($\lambda = 600$ nm) prodotto dal reticolo? [$\approx 2^\circ$]

45 Un reticolo produce il primo massimo a un angolo di 5° quando è investito da una luce verde con $\lambda = 550$ nm.

- ▶ Calcola il numero di righe al centimetro del reticolo. [≈ 1600 righe/cm]

La differenza al primo membro si può scrivere come prodotto mediante l'identità

$$\sin x - \sin y = 2 \sin \frac{x-y}{2} \cos \frac{x+y}{2}$$

Con le corrispondenze $x = \theta + \Delta\theta$ e $y = \theta$ si ottiene:

$$\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin \theta = 2 \sin \frac{\Delta\theta}{2} \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

Notiamo che per angoli piccoli il seno dell'angolo, espresso in radianti, è circa uguale all'angolo:

$$\sin \frac{\Delta\theta}{2} \approx \frac{\Delta\theta}{2}$$

Inoltre, se θ non è troppo piccolo, si può scrivere:

$$\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \approx \theta$$

Applicando queste approssimazioni si ottiene:

$$\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin \theta \approx \Delta\theta \cos \theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta\theta \cos \theta = \frac{\Delta\lambda}{a}$$

L'espressione cercata si ottiene esplicitando $\Delta\theta$ nell'ultima formula:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{a \cos \theta}$$

50 Considera un reticolo da 5000 righe al centimetro.

- Qual è la separazione angolare tra le due righe del sodio $\lambda = 589,6 \text{ nm}$ e $\lambda = 589,0 \text{ nm}$ ottenuta col reticolo? [$\approx 2'$]

51 L'atomo di idrogeno emette radiazione elettromagnetica a diverse lunghezze d'onda. Le lunghezze d'onda nel visibile furono osservate da Fraunhofer nel 1814 e appartengono a un insieme di lunghezze d'onda, associate ai numeri interi, detto *serie di Balmer*.

$$\lambda_n = (91,127 \text{ nm}) \frac{4n^2}{n^2 - 4} \quad n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

- Quali sono i colori associati a queste lunghezze d'onda?
- Determina quante righe al centimetro deve avere un reticolo per separare di $5'$ le lunghezze d'onda con $n = 8$ e $n = 9$ (usa la seguente approssimazione: $\cos \theta = \cos 5' \approx 1$).

[Rosso, verde, violetto, violetto; $\approx 2700/\text{cm}$]



threebond.co.uk

53 La vecchia generazione

- Il passo tra le piste di un DVD determina l'angolo di diffrazione di un fascio laser. I CD, che sono una tecnologia precedente a quella dei DVD, hanno un passo tra le piste di $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ (v. teoria).

- Calcola l'angolo a cui si forma il picco di diffrazione. [24°]



cayocompanies.com

PROBLEMI FINALI

52 Minimo di iridescenza

- Una macchia d'olio ($n = 1,47$) molto sottile galleggia sull'acqua.
- Determina lo spessore minimo del velo d'olio perché appaia iridescente, cioè produca frange colorate. [130 nm]

68 Bracci uguali, anzi diversi!

Un interferometro di Michelson funziona con luce di lunghezza d'onda $\lambda = 589 \text{ nm}$.

- Che cosa si vede se i due bracci sono rigorosamente uguali?
- Quanti anelli luminosi si vedono se la differenza tra i due bracci è $6,65 \mu\text{m}$?

[Un disco scuro, perché c'è solo una interferenza distruttiva; 22 anelli: deve essere $\cos \theta_m < 1$, cioè $(m + 1/2)\lambda / (2d) < 1$, ossia $m < 2d/\lambda - 1/2 = 22,1$]

L'ARTE DELLA STIMA**69 Non solo luce**

Gli effetti di interferenza e diffrazione sono tipici di tutti i fenomeni ondulatori, non solo della luce. Anche le onde sonore subiscono diffrazione e interferenza. Considera un suono con lunghezza d'onda di circa 5 cm.

- Stima l'apertura angolare dovuta alla diffrazione da una finestra. [10^{-1} rad]

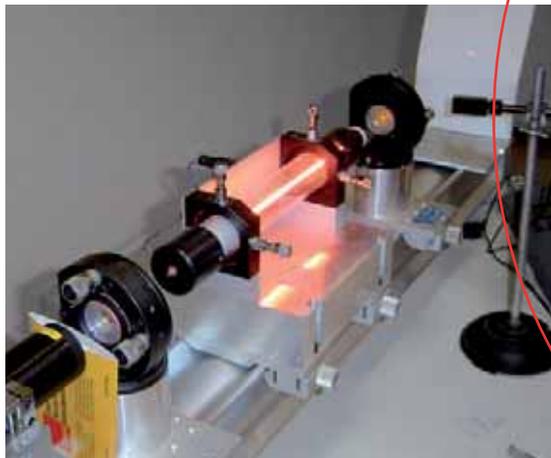


cristianforumfree.it

70 Il limite di costruzione

I laser da laboratorio He-Ne hanno una divergenza intrinseca del fascio di luce dovuta alle dimensioni della fenditura da cui esce il fascio stesso.

- Stima la divergenza del laser. [$5 \cdot 10^{-4}$ rad]



David Monniaux / Wikimedia Commons

71 Il marchio di Superman

Una delle armi più forti di Superman è la «vista laser calorifica». Dato che la vista è, appunto, «laser», si dovrebbero avere effetti di interferenza e quindi avere stampato sulla fronte del cattivo di turno (distante 5 m) un bel codice a barre.

- Stima la distanza tra le frange sulla fronte del nemico di Superman. [$3 \cdot 10^{-5}$ m]



vannibal.it

72 Perché non vedo interferenze?

Nei mezzi trasparenti con spessori macroscopici (dal millimetro in su) è molto difficile osservare effetti di interferenza. Questo sia perché le onde luminose non si possono approssimare come un'unica onda piana sia per le inevitabili imperfezioni che modificano punto per punto le condizioni di interferenza costruttiva o distruttiva. Questo non vuol dire ovviamente che le singole onde non interferiscano, ma solo che noi non siamo in grado di osservare tale fenomeno perché il nostro occhio rileva solo un effetto medio. Considera, per esempio, il vetro ($n = 1,66$) di un finestrino su cui incide perpendicolarmente luce bianca.

- Stima il numero m per cui si ha interferenza costruttiva per la luce viola e la luce rossa.
- Stima la variazione percentuale di spessore del vetro nel caso in cui l'interferenza della luce rossa passa da distruttiva a costruttiva.

[$4 \cdot 10^4$; $2 \cdot 10^5$; 0,0004%]



FORMULAE

SUBJECT	IN SYMBOLS	IN WORDS
Temperature scale conversion	$T = T_c + 273.15$	Temperature T on the Kelvin scale equals temperature T_c on the Celsius scale plus 273.15.
Heat and temperature change	$Q = cm\Delta T$	The amount of heat transferred to a substance equals the product of its specific heat c , its mass m and its temperature change ΔT .
Heat capacity	$C = \frac{\Delta E}{\Delta T} = cm$	The heat capacity of a substance equals the ratio of the amount of heat energy ΔE transferred to it and its temperature change ΔT , which in turn equals the specific heat capacity of the substance c multiplied by its mass m .
Stefan-Boltzmann law of radiation	$\frac{\Delta E}{\Delta T} = e\sigma AT^4$	The energy radiated by a blackbody radiator over time equals the product of the emissivity of the object e , Stefan's constant σ , the radiating area A , and the fourth power of its absolute temperature T .
Number of moles in a sample	$n = \frac{N}{N_A}$	The number of moles in a sample equals the number of molecules N present in the sample divided by Avogadro's number N_A .
Equation of state for ideal gases	$pV = nRT$	The product of the absolute pressure p and volume V of an ideal gas equals the product of the number of moles of the gas n , the universal gas constant R , and the absolute temperature of the gas T .
First Gay-Lussac law	$\frac{V_T}{T} = \frac{V_0}{T_0}$	At constant pressure the ratio of the volume of a gas to its temperature is constant.
Second Gay-Lussac law	$\frac{p_T}{T} = \frac{p_0}{T_0}$	At constant volume the ratio of the pressure of a gas to its temperature is constant.
Boyle's law	$p_i V_i = p_f V_f$	At constant temperature the product of the pressure of a gas and its volume is constant.
Temperature on the microscopic level	$KE_{av} = \frac{3}{2} k_B T$	Every molecule of a monatomic ideal gas that is in thermal equilibrium has an average kinetic energy of three halves of the product of the Boltzmann constant k_B and the absolute temperature of the gas T .
Internal energy of an ideal gas	$U = \frac{3}{2} nRT$	The internal energy U of a monatomic ideal gas equals three halves of the product of the number of moles of the gas n , the universal gas constant R , and the absolute temperature of the gas T .



FORMULAE

SUBJECT	IN SYMBOLS	IN WORDS
First law of thermodynamics	$\Delta U = U_f - U_i = Q - W$	The change in internal energy of a closed thermodynamic system is equal to the difference between the heat supplied to the system Q and the amount of work done by the system W on its surroundings.
Work done during an isobaric process	$W = p\Delta V = p(V_f - V_i)$	The work done during an isobaric process equals the product of the pressure and the change in volume between the initial and final states.
Efficiency of a heat engine	$\eta = \frac{ L }{ Q_H } = 1 - \frac{ Q_C }{ Q_H }$	The efficiency of a heat engine η is equal to the ratio of the work done by the engine L to the heat absorbed by the engine Q_H , which in turn is equal to one minus the ratio of the rejected heat Q_C (cold reservoir) to the absorbed heat Q_H (hot reservoir).
Change in entropy	$\Delta S = \left(\frac{Q}{T}\right)_R$	The change in entropy for a system is the ratio of the heat flow Q into the system and the temperature T at which the change takes place. [The subscript R indicates that the change is reversible.]
Periodic waves	$f = \frac{1}{T}$	The frequency of a periodic wave f is the reciprocal of the period T of the wave.
	$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$	The phase velocity of a wave is equal to the ratio of its wavelength λ to its period T , or the product of its frequency f and its wavelength λ .
Mirror equation	$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$	The sum of the reciprocals of the object distance d_o and the image distance d_i equals the reciprocal of the focal length of the mirror f .
Refractive index or index of refraction	$n = \frac{c}{v}$	The refractive index n of a medium equals the ratio of the speed of light in a vacuum c to the speed of light in the medium v .
Snell's law of refraction	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$	For light or other waves passing through a boundary between two different isotropic media, the product of the refractive index of the first medium n_1 and the sine of the angle of incidence θ_1 at the boundary equals the product of the refractive index of the second medium n_2 and the sine of the angle of refraction θ_2 .



How does a refrigerator work?

In the summertime, have you ever come out of a swimming pool and then felt very cold standing in the sun? That's because the water on your skin is evaporating. The air carries off the water vapour, and with it some of the heat is being taken away from your skin. This is similar to what happens inside older refrigerators. Instead of water, though, the refrigerator uses chemicals to do the cooling.

If you look at the back or bottom of an older refrigerator, you'll see a long thin tube that loops back and forth. This tube is connected to a pump, which is powered by an electric motor. Inside the tube is Freon, a type of gas. Freon is the brand name of the gas. Chemically, this gas is called chlorofluorocarbon or CFC for short. This gas was found to hurt the environment if it leaks from refrigerators. So now, other chemicals are used in a slightly different process.

CFC starts out as a liquid. The pump pushes the CFC through a series of coils in the freezer area. There the chemical turns to a vapour. When it does,

it soaks up some of the heat that may be in the freezer compartment. As it does this, the coils get colder and the freezer begins to get colder. In the regular part of your refrigerator, there are fewer coils and a larger space. Therefore, the coils and CFC vapour absorb less heat.

The pump then sucks the CFC as a vapour and forces it through thinner pipes which are on the outside of the refrigerator. By compressing it, the CFC turns back into a liquid and heat is given off and is absorbed by the surrounding air around it. That's why it might be a little warmer behind or under your refrigerator. Once the CFC passes through the outside coils, the liquid is ready to go back through the freezer and refrigerator over and over again.

Modern refrigerators don't use CFCs because they are harmful to the atmosphere if released. Instead they use another type of gas called HFC-134a, also called tetrafluoroethane.

Taken from http://www.energyquest.ca.gov/how_it_works/refrigerator.html

EXERCISES

1 True or false?

- a. CFC gases do not hurt the environment. T F
- b. Modern refrigerators don't use CFC gases. T F
- c. Refrigerators use water for cooling. T F
- d. Freon is the chemical name for CFC gases. T F

2 Order the sentences.

- The CFCs start out as a liquid. The pump pushes the CFC through a series of coils.
- The pump forces the CFCs through thinner pipes.
- The CFC gases turn back into a liquid.
- The CFC gases turn into vapour.
- The coils get colder. The pump sucks the CFCs as a vapour.
- Heat is given off and is absorbed by the air surrounding the refrigerator.
- The CFC gases soak up some of the heat.
- Liquid CFC is ready to go back through the freezer and refrigerator over and over again.

3 Match questions and answers.

QUESTIONS		ANSWERS	
A	What happens to the water on your body when you get out of a swimming pool in the summertime?	1	If the CFC gas leaks from the refrigerator it can be dangerous for the environment as the gas plays a role in the depletion of the ozone layer and is more potent as a greenhouse gas than carbon dioxide.
B	How can CFC gas hurt the environment?	2	The water on your body evaporates. Through this process heat is taken away from your body and you feel cold.
C	Why is it a little warmer behind or under your refrigerator?	3	When the CFC gas is compressed it turns into a liquid: during this process heat is given off and absorbed by the air surrounding the refrigerator.
A		B	
B		C	



Echo vs reverberation

Sound is a mechanical wave, which travels through a medium from one location to another. This motion through a medium occurs as one particle of the medium interacts with its neighbouring particle, transmitting the mechanical motion and corresponding energy to it. This transport of mechanical energy through a medium by particle interaction is what makes a sound wave a mechanical wave.

Reflection of sound waves off of barriers results in some observable behaviours, which you have likely experienced. If you have ever been inside of a large canyon, you have likely observed an echo resulting from the reflection of sound waves off the canyon walls. Suppose you are in a canyon and you give a *holler*. Shortly after the *holler*, you would hear the echo of the *holler*, a faint sound resembling the original sound. This echo results from the reflection of sound off the distant canyon walls and its ultimate return to your ear. If the canyon wall is more than approximately 17 metres away from where you are standing, then the sound wave will take more than 0.1 seconds to reflect and return to you. Since the perception of a sound usually endures in memory

for only 0.1 seconds, there will be a small time delay between the perception of the original sound and the perception of the reflected sound.

A reverberation is quite different than an echo. A reverberation is perceived when the reflected sound wave reaches your ear in less than 0.1 seconds after the original sound wave. Since the original sound wave is still held in memory, there is no time delay between the perception of the reflected sound wave and the original sound wave. The two sound waves tend to combine as one very prolonged sound wave. If you have ever sung in the shower (and we know that you have), then you have probably experienced a reverberation. The Pavarotti-like sound, which you hear, is the result of the reflection of the sounds you created combining with the original sounds. Because the shower walls are typically less than 17 metres away, these reflected sound waves combine with your original sound waves to create a prolonged sound: a reverberation.

Taken from <http://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/er.cfm>

EXERCISES

1 True or false?

- a. The perception of a sound endures in memory for 1 second. T F
- b. Sound is a mechanical wave, which travels through a medium. T F
- c. A reverberation is quite different than an echo. T F
- d. You have probably never experienced a reverberation. T F

2 Order the words to make sentences.

- a. medium • wave • Sound • through • is • travels • a • mechanical • which • a
- b. sound • An • faint • echo • sound • is • a • the • original • resembling
- c. seconds • The • endures • of • a • memory • sound • in • for • usually • only • 0.1 • perception
- d. sound • wave • is • perceived • when • the • reaches • A • reverberation • seconds • your • ear • in • less • than • 0.1 • reflected • sound • wave • after • the • original

3 Match questions and answers.

QUESTIONS		ANSWERS	
A	What happens during a reverberation?	1	The time that the reflected sound takes to reach your ear: if it is less then 0.1 seconds it is a reverberation, otherwise an echo is heard.
B	What is the main difference between an echo and a reverberation?	2	Sound travelling through a medium transports mechanical energy, for this reason it is a mechanical wave.
C	Why is sound a mechanical wave?	3	You hear the two sound waves as one very prolonged sound wave, because the original sound is still in your memory when the reflected sound arrives back.

A	B	C
---------	---------	---------



Optics

The work that first brought Newton to the attention of the scientific community was not a theoretical or even a mathematical effort; it was a prodigious technical achievement. In 1668, shortly before his appointment as Lucasian Professor, Newton designed and constructed a “reflecting” telescope. In previous telescopes, beginning with the Dutch invention and Galileo’s improvement, light was refracted and focused by lenses. Newton’s telescope *reflected* and focused light with a concave mirror. Refracting telescopes had limited resolution and to achieve high magnification had to be inconveniently long.

Newton’s design was a considerable improvement on both counts.

Newton’s telescope project was even more impressive than that of Galileo. With no assistance (Galileo employed a talented instrument maker), Newton cast and ground the mirror. Using a copper alloy he had prepared, he polished the mirror, and built the tube, the mount, and the fittings. The

finished product was just six inches in length and had a magnification of forty, equivalent to a refracting telescope six feet long.

Newton was not the first to describe a reflecting telescope. James Gregory, professor of mathematics at St. Andrews University in Scotland, has earlier published a design similar to Newton’s, but could not find craftsmen skilled enough to construct it.

No less than Galileo’s, Newton’s telescope was vastly admired. In 1671, Barrow demonstrated it to the London gathering of prominent natural philosophers known as the *Royal Society*. The secretary of the society, Henry Oldenburg, wrote to Newton that his telescope had been “examined here by some of the most eminent in optical science and practice, and applauded by them.” Newton was promptly elected a fellow of the *Royal Society*.

Taken from W. H. Cropper, “Great Physicists”, OUP, New York, 2001, p. 25-26

EXERCISES

1 True or false?

- a. Newton employed a talented instrument maker to create his telescope. T F
- b. Newton used silver in building his telescope. T F
- c. Newton’s telescope was shorter but had less magnification than Galileo’s. T F
- d. Newton became a member of the *Royal Society* because of his telescope. T F

2 Complete.

..... presented his telescope in 1668. The first of his work the scientist to the attention of the community, which made him a of the *Royal Society*. Newton’s principal was the use of a instead of Through this modification Newton’s telescope could be , only six inches, and with a greater than the refracting telescopes used at that time.

innovation • lenses • fellow • Newton • brought • scientific • demonstration • magnification • shorter • mirror.

3 Match questions and answers.

QUESTIONS		ANSWERS	
A	How did Newton build his telescope?	1	A professor of mathematics called James Gregory had published something similar, but he could not find adequately skilled craftsmen to construct his project.
B	How was light managed in Galileo’s telescope?	2	In Galileo’s telescope light was refracted and focused by lenses.
C	Had anybody else proposed a project similar to Newton’s telescope?	3	He used a copper alloy, he polished the mirror, and built all the parts of his telescope.
A	B	C	



What is light?

Light is part of the electromagnetic spectrum. The spectrum is the collection of all waves and includes visible light, microwaves, radio waves, X-rays, and gamma rays.

In the late 1600s, important questions were raised, asking whether light is made up of particles or waves.

Sir Isaac Newton held the theory that light was made up of tiny particles. In 1678, the Dutch physicist Christiaan Huygens proposed that light was made up of waves that vibrated up and down perpendicular to the direction of travel of the light, and therefore formulated a way of visualising wave propagation. This became known as Huygens' Principle. Huygens' theory was the first successful theory of light wave motion in three dimensions. Huygens suggested that the peaks of light waves form surfaces like the layers of an onion. In a vacuum, or other uniform medium, the light waves are spherical, and these wave surfaces advance or spread out as they travel at the speed of light. This theory explains why light shining through

a pin hole or slit will spread out rather than going in a straight line.

Newton's theory came first, but Huygens' theory better described early experiments. Huygens' principle enables one to predict where a given wavefront will be in the future, if you have the knowledge of where the given wave front is at the present time.

At that time, some of the experiments conducted on light theory for both the wave theory and particle theory, had some unexplained phenomenon. Newton could not explain the phenomenon of light interference and this favour the wave theory over Newton's particle theory. This difficulty was due to the unexplained phenomenon of light polarisation: scientists were familiar with the idea that wave motion was parallel to the direction of travel of a wave, NOT perpendicular to the direction of travel, as is the case for light.

Taken from <http://www.nightlase.com.au/education/optics/light.htm>

EXERCISES

1 True or false?

- a. The electromagnetic spectrum does not include microwaves. T F
- b. According to Newton's theory, light is made of waves. T F
- c. Christiaan Huygens was born in Germany. T F
- d. Using Huygens' principle the position of a given wavefront can be predicted. T F

2 Complete.

Light theory started to be in the late 1600s. and Huygens elaborated the important light According to the first, is made of tiny, according to the second it is composed of Huygens theory some questions that Newton's couldn't According to this second theory, the light waves are in mediums, and these wave surfaces at the of light. This theory explained why light through a pinhole out rather than proceeding in a straight

resolve • Newton • explained • shining • most • light • formulated • waves • line • theories • advance • particles • speed • spherical • uniform • spreads

3 Match questions and answers.

QUESTIONS		ANSWERS	
A	What is the main difference between Newton's and Huygens' theories?	1	It is a way of visualising wave propagation based on the hypothesis that light is made up of waves vibrating up and down perpendicular to the direction of travel of the light.
B	What is Huygens' principle?	2	According to Newton light was made up of tiny particles, whilst Huygens believed that light was made up of waves.
C	According to Huygens how can we describe light motion?	3	Light waves are spherical and vibrate up and down perpendicular to the direction of motion. In a uniform medium they travel at the speed of light.
A	B	C	