

## 5. INTRODUZIONE ALLE ONDE

### 5.1. Difficoltà presentate dal modello corpuscolare

L'intensità della luce in funzione della distanza da una sorgente puntiforme, il trasporto di energia per opera della luce, l'emissione di fotoelettroni e la pressione della luce sono tutti fenomeni interpretati dal modello corpuscolare. Le difficoltà sorgono quando cerchiamo di spiegare altri aspetti del comportamento della luce e per evidenziarli riesaminiamo la Fig. 2.10. Quando il fascio di luce colpisce la lastra di vetro, viene in parte riflesso e in parte trasmesso, e quando il fascio rifratto incide sull'altra faccia della lastra, esso viene di nuovo in parte riflesso e in parte rifratto. Che cosa fa sì che alcuni fotoni vengano riflessi e altri rifratti? Si potrebbe ipotizzare che ogni superficie sia costituita da minuscole parti riflettenti e minuscole parti rifrangenti; ma neppure questa ipotesi inverosimile è in grado di spiegare perché la parte di fotoni che viene riflessa e la parte che viene rifratta dipendono dall'angolo di incidenza.

Difficoltà più gravi sorgono quando cerchiamo di spiegare la diffrazione. Per esempio non è possibile descrivere con il modello corpuscolare la complicata figura di diffrazione che si forma quando la luce attraversa un foro molto piccolo (Fig. 1.19). Nel modello corpuscolare che abbiamo esposto nulla indica infatti che le dimensioni degli oggetti con cui la luce interagisce siano importanti per quanto riguarda il suo comportamento.

Nello sviluppare il modello corpuscolare della luce non abbiamo seguito l'evoluzione storica e ciononostante a questo punto ci troviamo in una situazione che è molto comune per i fisici. A volte avviene che una teoria riesca a mettere in relazione un intero gruppo di risultati e osservazioni sperimentali, ma non sia in grado di spiegare una nuova osservazione. Allora è necessario modificare la teoria oppure ripartire dall'inizio e tentare di costruirne una nuova. Quasi sempre però gli sforzi dedicati alla costruzione del vecchio modello non vanno sprecati, ma servono a due scopi: dimostrare che alcune osservazioni possono essere messe in relazione tra loro e suggerire nuovi esperimenti. Avremo occasione di parlare ancora del modello corpuscolare più avanti nel corso, ma per il momento, l'accantoniamo e tentiamo di costruire un nuovo modello.

### Quesiti

---

**5.1.** Abbiamo visto che un fascio di luce che incide dall'aria su una sostanza trasparente si divide in un fascio riflesso e un fascio rifratto.

- (a) Riesaminate le figure 2.5 e 2.14. L'angolo di incidenza influenza il rapporto fra la quantità di luce riflessa e la quantità di luce rifratta?
  - (b) La vostra risposta rende più facile o più difficile rappresentare un fascio di luce come un fascio di corpuscoli?
- 

### 5.2. Un'onda: qualcos'altro che si propaga

Il primo fatto che *ogni* modello della luce deve spiegare è la propagazione della luce attraverso lo spazio. Nel cercare una nuova teoria, ci chiediamo anzitutto se esista qualcosa che non sia un corpuscolo (o un fascio di corpuscoli) e che sia in grado di muoversi da un punto a un altro: la risposta è affermativa. Consideriamo, per esempio, ciò che accade quando lasciamo cadere un sasso in uno stagno calmo: una perturbazione circolare si propaga a partire dal punto dell'impatto. Tale perturbazione è chiamata *onda*. Se osserviamo l'acqua da vicino mentre l'onda si propaga sulla superficie, possiamo notare che l'acqua non si sposta con l'onda. Ciò appare evidente se osserviamo un pezzetto di legno o una chiazza d'olio che galleggia sullo stagno: il legno o l'olio si muovono su e giù, avanti e indietro mentre passa l'onda, ma non si spostano con essa. In altre parole, un'onda può viaggiare nell'acqua, ma, dopo che è passata, ogni goccia d'acqua rimane dove era prima.

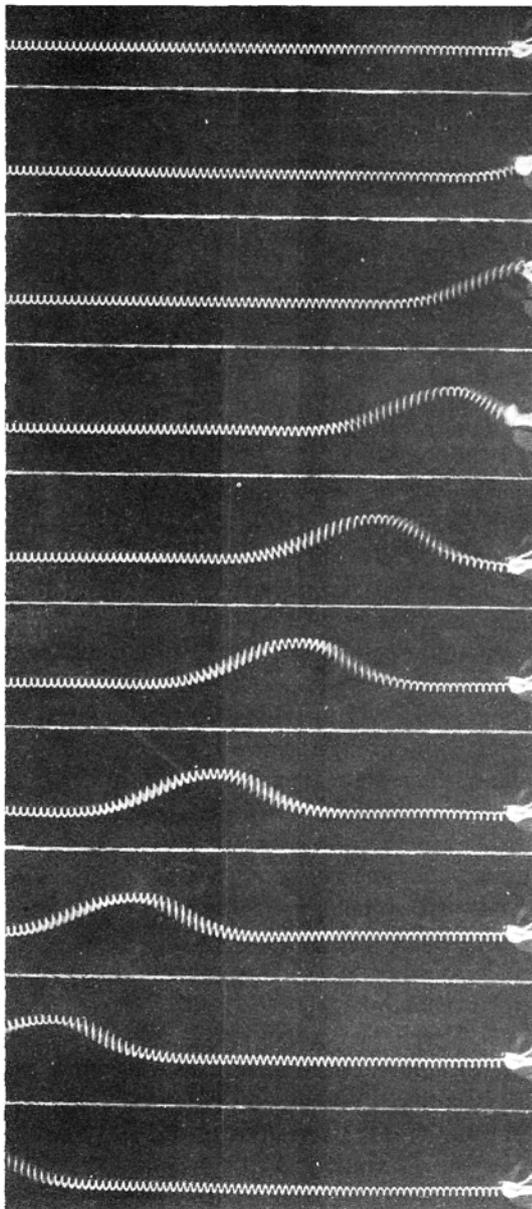
Se ci guardiamo attorno, troviamo molti esempi di onde. Per esempio, possiamo osservare una bandiera dell'Europa che sventola nella brezza in cima al pennone.

Le increspature o onde si propagano lungo il tessuto, ma i singoli punti sul tessuto della bandiera conservano la loro posizione mentre passa l'onda. La stella dorata posta nel punto più basso del cerchio, costituito dalle dodici stelle dorate, rimane sempre la più bassa e la sua distanza dai bordi della bandiera non cambia. Proprio come l'acqua non viaggia insieme all'onda, così il tessuto della bandiera rimane al suo posto dopo che le onde l'hanno attraversato.

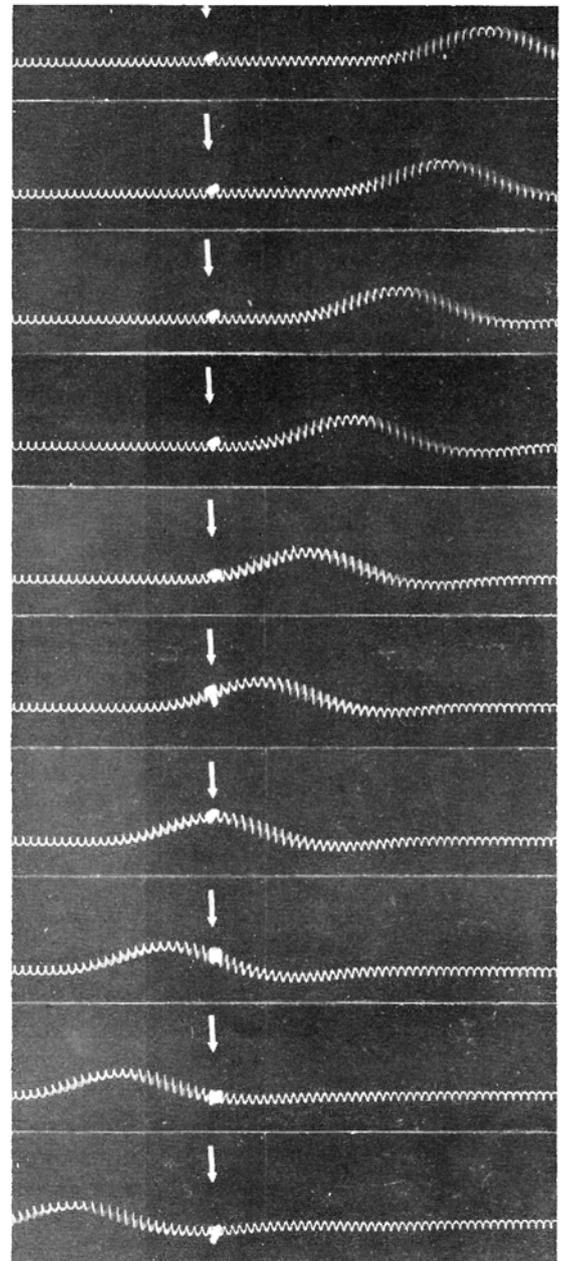
Alcune onde sono periodiche o quasi e il moto della sostanza si ripete più e più volte. Non tutte le onde, però, hanno questa proprietà; per esempio, quando sbattiamo la porta di una stanza, l'aria nella stanza subisce una compressione repentina. Questa singola breve compressione attraversa la stanza come una perturbazione, imprimendo una spinta improvvisa a una tenda appesa davanti alla finestra. Tale onda di breve durata è detta *impulso*.

Possiamo fare un altro esempio di un impulso servendoci di palle da biliardo. Allineiamo sei palle in modo che ciascuna sia a contatto con quella consecutiva. Poi facciamo rotolare un'altra palla in modo che colpisca frontalmente una estremità della fila: la palla all'altra estremità si allontana a una velocità uguale a quella della palla che ha colpito la fila. Un impulso si è propagato lungo la fila di palle da una estremità all'altra: ogni palla è stata perturbata e la perturbazione si è propagata lungo l'intera fila di palle, ma nessuna palla si è spostata da una estremità all'altra della fila.

Che cosa c'è di simile in questi esempi? In tutti i casi, la perturbazione si propaga attraverso un mezzo (l'acqua, il tessuto della bandiera, le palle da biliardo), ma il mezzo non si muove insieme alla perturbazione. Perturbazioni che si propagano attraverso un mezzo costituiscono ciò che intendiamo per onde.



**Fig. 5.1.** Generazione e moto di un impulso lungo una molla, illustrati con una serie di fotogrammi ottenuti con una cinepresa.



**Fig. 5.2.** Il moto di un impulso da destra a sinistra lungo una molla con un nastro legato a un punto. Il nastro si muove su e giù mentre passa l'impulso, ma non si muove nella direzione del moto dell'impulso.

Ora possiamo rispondere alla domanda che abbiamo formulato all'inizio di questo paragrafo: esiste qualcosa che non sia un corpuscolo e che sia in grado di muoversi da un punto a un altro?

Un'onda, un'entità che non è un corpuscolo materiale, è capace di muoversi da un punto a un altro.

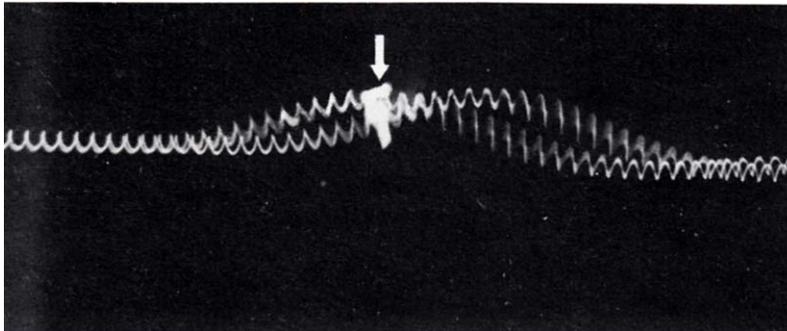
### 5.3. Onde in molle elicoidali

Le onde si comportano come la luce? Per scoprirlo, dobbiamo saperne di più; dopo potremo confrontare il loro comportamento con quello della luce. Come avete potuto vedere attraverso gli esempi precedenti, lo studio delle onde è importante di per sé.

Ci conviene iniziare il nostro studio eseguendo alcuni esperimenti con una molla elicoidale. La Fig.5.1 mostra le fotografie di un impulso che si propaga lungo una molla di questo tipo; le fotografie sono state ottenute con una cinepresa a intervalli di 1/24 di secondo.

Possiamo notare che mentre l'impulso si propaga la sua forma non varia e che, eccettuato il fatto che l'impulso si muove, la sua forma a un certo istante è identica alla sua forma in un istante successivo. Inoltre, vediamo che tra due successive fotografie l'impulso percorre la stessa distanza: esso si propaga lungo la molla a velocità costante.

La molla, nel suo insieme, non viene deformata permanentemente dal passaggio dell'impulso. Ma che cosa accade a ogni piccola parte della molla mentre passa l'impulso? Per fissare la nostra attenzione su un piccolo tratto, contrassegniamolo legandovi un nastro bianco come è indicato nella Fig. 5.2.

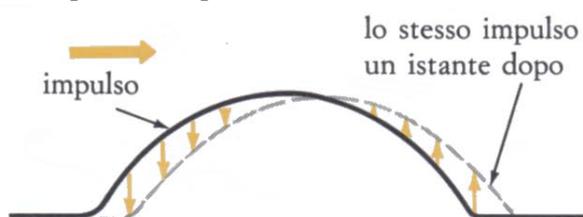


**Fig. 5.3.** La relazione tra il moto di un impulso che si propaga da destra a sinistra e il moto della molla. La fotografia mostra l'impulso in due posizioni successive. Le frecce nello schema indicano come si muove la molla mentre passa l'impulso. La freccia grande in colore indica la direzione e il verso del moto dell'impulso.

Se imprimiamo alla molla un impulso che si muove lungo di essa, possiamo vedere che il nastro, mentre l'impulso lo oltrepassa, si muove perpendicolarmente alla molla.

Anche altre parti della molla si spostano come il tratto a cui è legato il nastro. Possiamo vedere quali parti si stanno muovendo e in che modo osservando due fotografie prese a un breve intervallo l'una dall'altra. Un buon esempio è offerto da due fotogrammi successivi della Fig. 5.2; essi sono stampati insieme nella Fig. 5.3 in modo che possiamo vedere l'impulso in due posizioni successive così come li vedremmo in una doppia istantanea. Sotto la fotografia della Fig. 5.3 abbiamo disegnato l'impulso, in nero nella prima posizione e in grigio nella posizione successiva.

Come indicano le frecce, mentre l'impulso si muove da destra a sinistra, ciascun tratto della molla nella metà destra dell'impulso si è spostata verso il basso e ciascuna parte della molla nella metà sinistra dell'impulso si è spostata verso l'alto.



**Fig. 5.4.** La relazione tra il moto di un impulso che si propaga da sinistra a destra e il moto della molla.

Se l'impulso si muovesse da sinistra verso destra, accadrebbe esattamente l'inverso, come è illustrato nella Fig. 5.4. In questa figura l'impulso è stato disegnato in modo schematico perché in questo modo il suo studio è più semplice e l'intervallo di tempo tra le due posizioni può essere preso piccolo quanto si vuole: riusciamo così a determinare il moto istantaneo della molla. Perciò se conosciamo il

verso in cui si muove l'impulso, possiamo determinare come si muove ciascun punto della molla in un particolare istante del passaggio dell'impulso. D'altra parte, se conosciamo come si muovono le parti della molla, possiamo determinare il verso in cui si propaga l'impulso.

Giunti a questo punto, conosciamo in modo soddisfacente come si muovono le parti della molla, anche se in nessuna delle fotografie si può vedere il suo moto.

In realtà abbiamo osservato: (1) che ogni impulso si muove senza subire deformazioni, a velocità costante, lungo la molla e (2) che la molla stessa si muove soltanto perpendicolarmente alla direzione del moto dell'impulso. Questi due fatti, insieme, ci fanno comprendere come si muove in ogni istante ciascuna parte della molla.

Un impulso in una molla elicoidale non si origina spontaneamente: se vogliamo generare un impulso a una estremità della molla, dobbiamo muovere vigorosamente la mano che tiene quell'estremità. La parte della molla che si muove insieme alla mano acquista una certa energia cinetica e anche una certa energia potenziale dovuta al fatto che la molla viene deformata.

Dopo che la mano è ritornata nella posizione di riposo e mentre l'impulso si sta propagando lungo la molla, l'estremità della molla è di nuovo ferma e non deformata. Se l'altra estremità della molla non è tenuta abbastanza saldamente, la maggior parte dell'impulso scompare e qualsiasi cosa trattenga la molla si riscalda un po'. Da questo si deduce che un impulso trasporta energia. Questa è una proprietà fondamentale che gli impulsi o le onde devono avere per poter essere utilizzati nella costruzione di un modello per la luce.

### Quesiti

- 5.2. Secondo la Fig. 5.4, in quale parte dell'impulso la molla è momentaneamente ferma?
- 5.3. Nella Fig. 5.2, il nastro prima si muove all'insù e poi all'ingìù mentre l'onda l'oltrepassa propagandosi da destra a sinistra. Il nastro si muoverebbe prima all'insù o prima all'ingìù se lo stesso impulso si propagasse da sinistra a destra?
- 5.4. La Fig. 5.2 mostra lo spostamento di un punto di una molla al passaggio di un impulso. Disegnate un grafico che rappresenti lo spostamento di questo punto in funzione del tempo. Rappresentate lo spostamento sull'asse delle ordinate e il tempo sull'asse delle ascisse con intervalli di 1/24 di secondo (l'intervallo tra i fotogrammi della Fig. 5.2).
- 5.5. Disegnate schematicamente il moto della molla al passaggio dell'impulso rappresentato nella Fig. A.

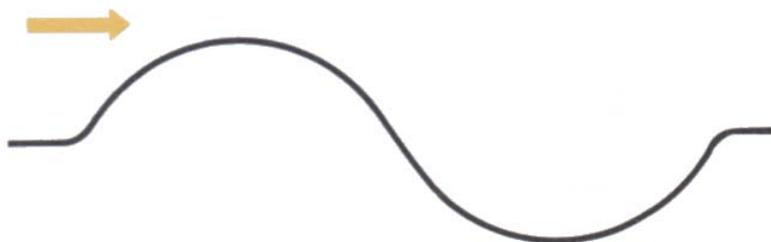


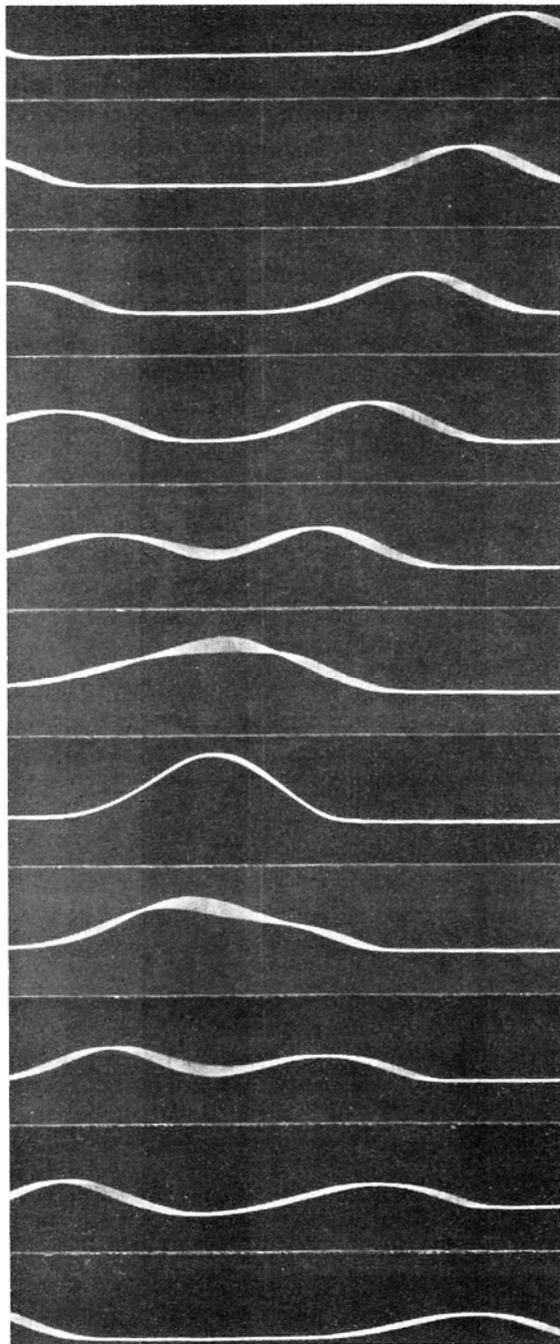
Fig. A

- 5.6. Lanciate un sasso in uno stagno calmo e osservate una successione di onde che si muovono verso l'esterno, a partire dal punto in cui il sasso ha colpito l'acqua. Qual è stata la sorgente dell'energia trasportata dalle onde?

### 5.4. Sovrapposizione: intersezione di impulsi

Finora abbiamo esaminato il comportamento di un singolo impulso che si propaga lungo una molla in una direzione. Ma che cosa avviene quando un impulso si propaga da destra verso sinistra e simultaneamente un altro impulso si propaga da sinistra verso destra? In particolare, che cosa avviene quando i due impulsi si incontrano? Passano l'uno attraverso l'altro, oppure, in qualche modo, si eliminano?

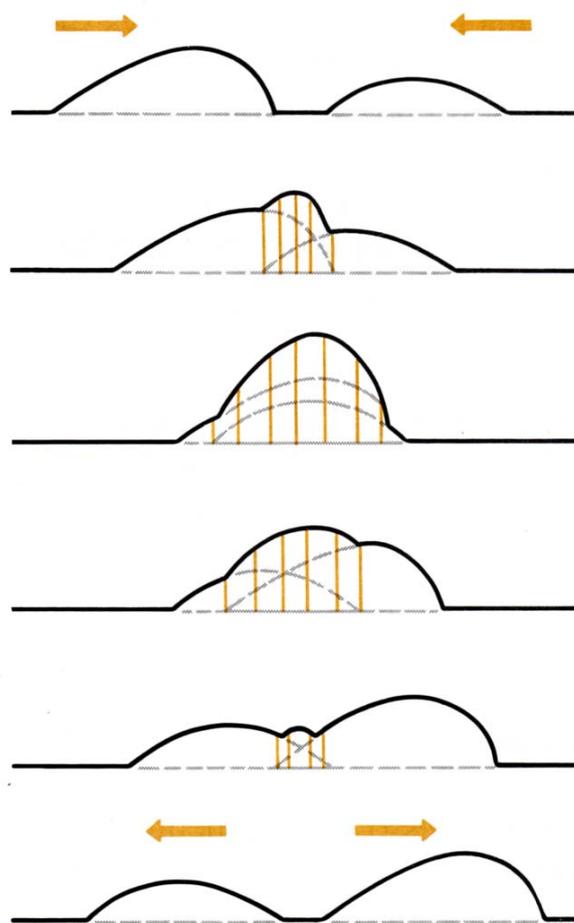
La via migliore per scoprirlo è la via sperimentale. Le fotografie della Fig. 5.5 mostrano ciò che avviene quando alle opposte estremità di una molla vengono generati simultaneamente due impulsi, uno dei quali si propaga da sinistra verso destra e l'altro da destra verso sinistra. Le fotografie in alto mostrano gli impulsi che si avvicinano l'uno all'altro come se ciascuno disponesse della molla per se stesso. Quando si intersecano, i due impulsi si combinano generando forme complicate. Ma, dopo essersi intersecati, essi riassumono le forme iniziali e si propagano lungo la molla come se nulla fosse accaduto, come è indicato dai fotogrammi in basso.



**Fig. 5.5.** Due impulsi che si intersecano. È importante notare che i due impulsi hanno forme diverse. Si può così vedere che quello che era a sinistra all'inizio è a destra dopo l'intersezione e viceversa.

Osserviamo ora più da vicino i due impulsi che si intersecano (Fig. 5.5). La forma dell'impulso risultante non ha la forma di nessuno dei due impulsi originali. Possiamo tuttavia vedere qual è la sua relazione con essi se immaginiamo ciascuno degli impulsi iniziali nella posizione che occuperebbe da solo e poi sommiamo gli spostamenti delle parti della molla corrispondenti agli impulsi iniziali in modo da ottenere un nuovo impulso. Troviamo così che lo spostamento totale di un punto qualsiasi della molla in ogni istante è uguale alla somma degli spostamenti dei due impulsi. Questo metodo, illustrato nella Fig. 5.6, è valido per due impulsi qualsiasi, e in realtà anche per un numero maggiore di impulsi; gli spostamenti dovuti a un numero qualsiasi di impulsi possono essere sommati.

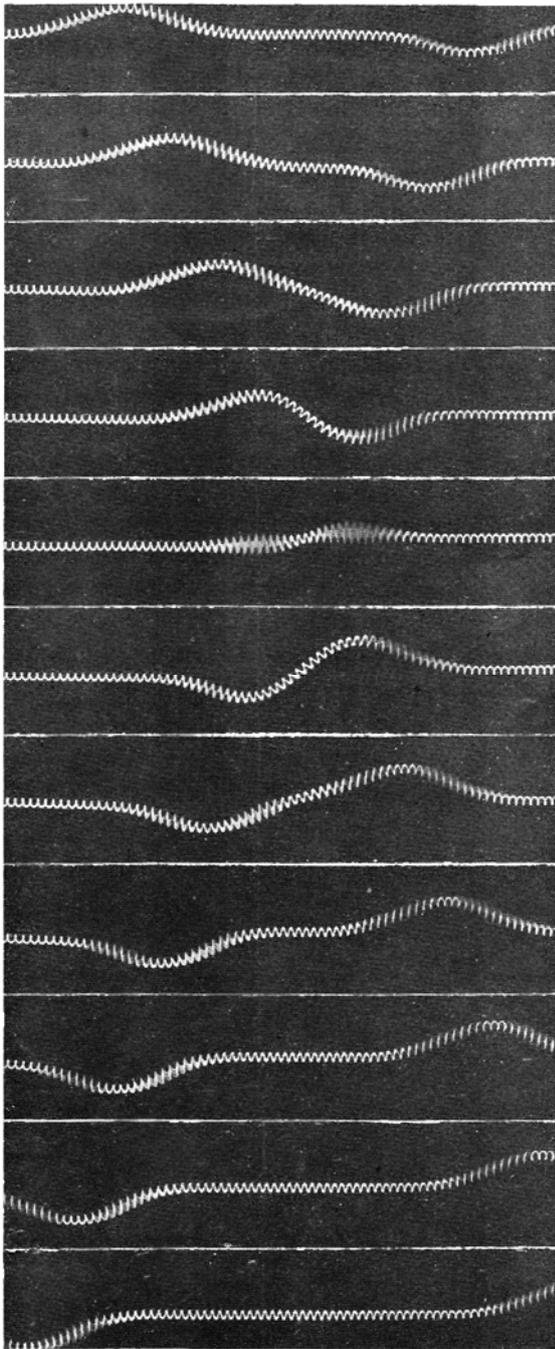
Possiamo riassumere l'intera situazione nel modo seguente: per trovare in ogni istante la forma dell'impulso risultante si sommano gli spostamenti dovuti ai singoli impulsi. Il fatto che gli impulsi si combinino in questo modo è detto *principio di sovrapposizione*.



**Fig. 5.6.** Sovrapposizione di due impulsi. Lo spostamento dell'impulso risultante è la somma dei singoli spostamenti.

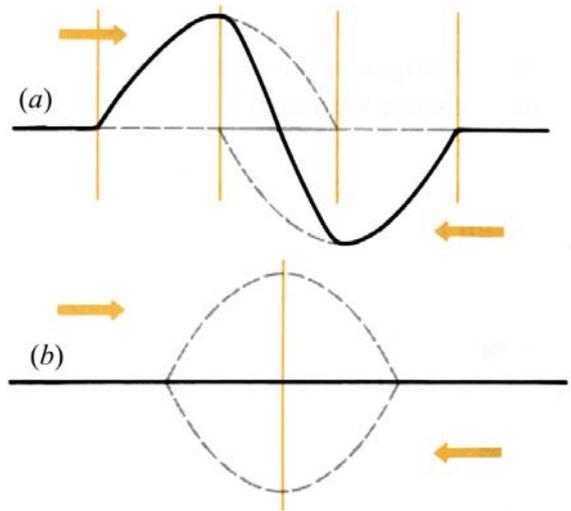
L'impulso che si propaga verso sinistra continua a propagarsi verso sinistra con la sua forma iniziale; l'impulso che si propaga verso destra continua a propagarsi verso destra anch'esso con la sua forma iniziale. Possiamo eseguire questo esperimento più e più volte con differenti impulsi: otteniamo sempre lo stesso risultato.

Il fatto che due impulsi passino l'uno attraverso l'altro senza subire alterazioni è una proprietà fondamentale delle onde. Se lanciamo due palle in direzioni opposte ed esse si urtano, il loro moto subisce una variazione violenta. Perciò, l'intersezione di onde e l'intersezione di fasci di palle di materia solida sono due processi molto diversi.

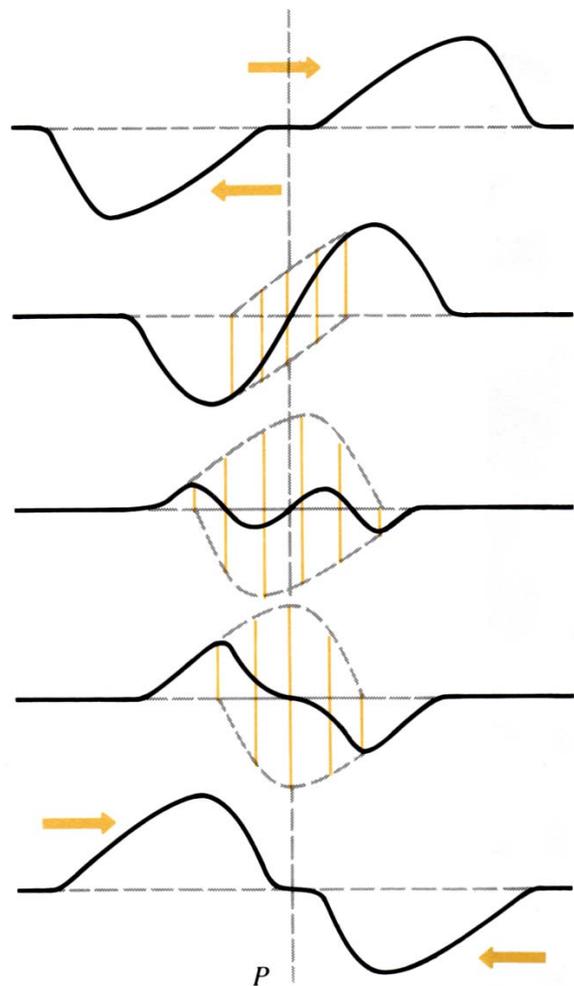


**Fig. 5.7.** Sovrapposizione di due impulsi uguali e opposti in una molla elicoidale. Nel quinto fotogramma, gli impulsi praticamente si elidono.

Applichiamo il principio di sovrapposizione a due casi particolari. In primo luogo, consideriamo l'esperimento illustrato nella successione di fotogrammi della Fig. 5.7. Esaminiamo la combinazione di un impulso che sposta la molla all'ingiù e proviene da destra con un impulso che sposta la molla all'insù e proviene da sinistra. Supponiamo che i due impulsi abbiano esattamente la stessa forma, le stesse dimensioni e una configurazione simmetrica. Potete notare che nella fotografia la somma di due spostamenti uguali, uno all'insù (positivo) e l'altro all'ingiù (negativo), ha come risultato uno spostamento totale nullo. Esiste chiaramente un istante, mentre i due impulsi si oltrepassano, in cui l'intera molla non subisce nessuno spostamento (vedi anche il disegno della Fig. 5.8). Perché la fotografia non mostra chiaramente una molla ferma?



**Fig. 5.8.** Sovrapposizione di due impulsi uguali e opposti. (a) Prima dell'elisione. (b) Ad elisione completa.



**Fig. 5.9.** Sovrapposizione di due impulsi asimmetrici, ma simili. È importante notare che il punto P a metà strada fra gli impulsi rimane sempre fermo.

Consideriamo la differenza tra una molla non soggetta a spostamenti percorsa da due impulsi uguali e opposti e una molla, anch'essa priva di spostamenti, ma in cui non si muove nessun impulso. Quando la molla non è percorsa da impulsi, tutte le sue parti sono ferme in ogni istante; quando invece si propagano due impulsi uguali e opposti, esiste soltanto un istante in cui la molla passa per la sua posizione di riposo, e in quell'istante la molla è in moto. Per questo il moto appare confuso nella fotografia, come appare confusa un'istantanea di un aeroplano che si muove molto rapidamente.

Il secondo caso particolare è illustrato nella Fig. 5.9. In questo caso si hanno due impulsi simili, uno proveniente da destra e l'altro da sinistra; in un impulso gli spostamenti sono orientati all'insù, nell'altro sono orientati all'ingiù. Questi impulsi differiscono da quelli della Fig. 5.7 in quanto sono simili nella forma e nelle dimensioni, ma non simmetrici.

Questi due impulsi non si elidono mai completamente l'un l'altro perché non sono simmetrici, ma esiste sempre un punto P della molla che non si muove: questo punto è esattamente a metà strada fra i due impulsi. Quando gli impulsi si oltrepassano, essi passano simultaneamente per questo punto in modo tale che il punto più alto di un impulso e il punto più basso dell'altro si annullano esattamente. Lo stesso ragionamento vale per qualsiasi altra coppia di punti corrispondenti degli impulsi. Essi arrivano sempre insieme nel punto medio della molla, uno in alto e l'altro in basso; di conseguenza, il punto medio della molla rimane fermo.

### Quesiti

- 5.7. Se due impulsi che si propagano l'uno verso l'altro su una molla elicoidale producono spostamenti nello stesso verso, i due impulsi si annullano mutuamente quando si intersecano?
- 5.8. Due impulsi hanno spostamenti massimi di 3 cm e 4 cm nello stesso verso. Quale sarà lo spostamento massimo quando si incrociano?
- 5.9. Determinate le dimensioni e la forma dell'impulso totale risultante dalla sovrapposizione dei due impulsi della Fig. B in quell'istante. Ripetete l'esercizio per l'istante in cui gli impulsi si sovrappongono completamente.

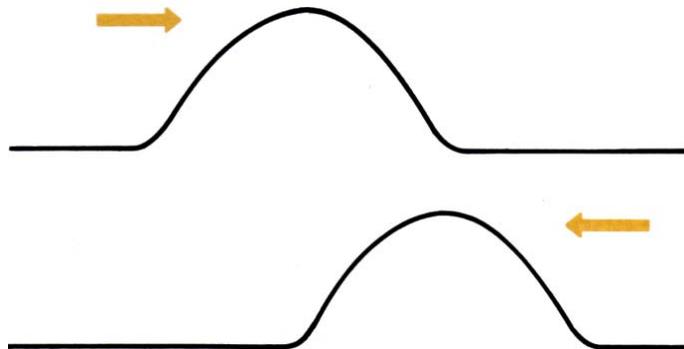
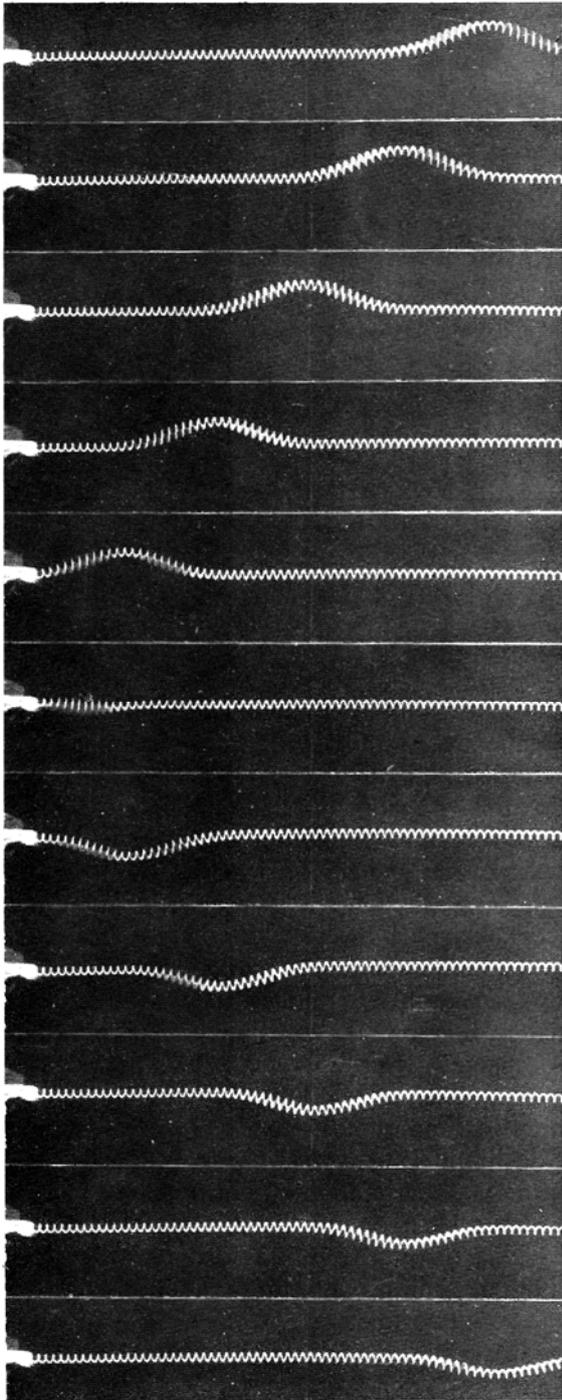


Fig. B

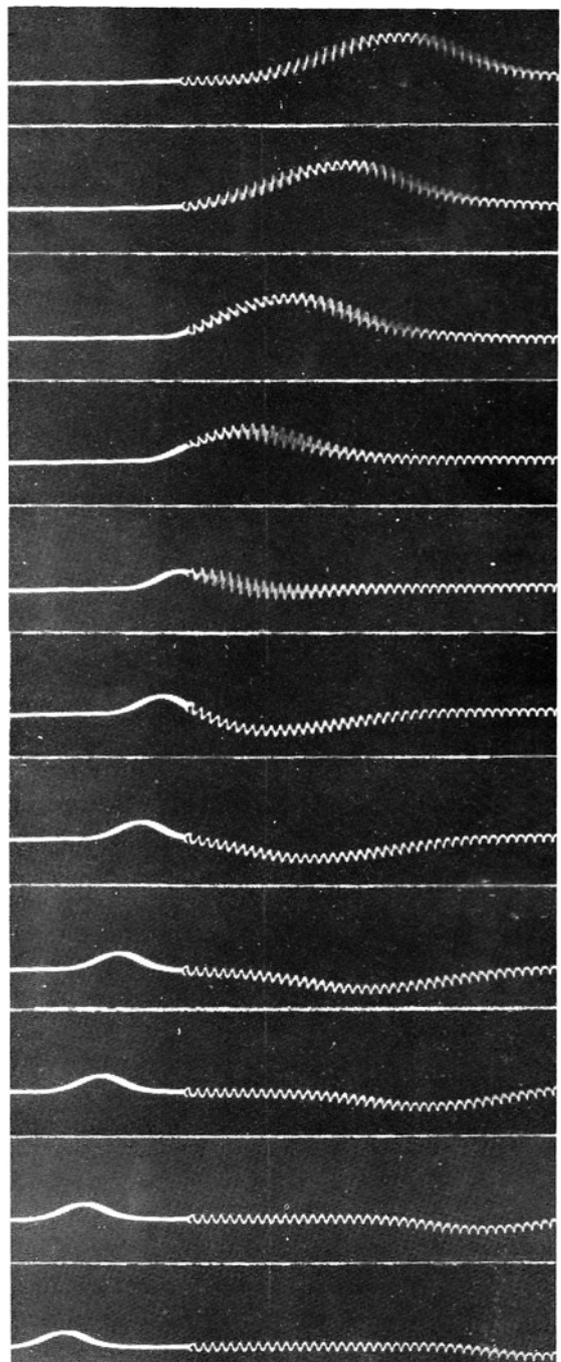
- 5.10. Il settimo fotogramma dall'alto della Fig. 5.5 mostra due impulsi nell'istante a cui si intersecano. Specificate le parti della molla che sono in moto e la direzione e il verso del loro moto.
- 5.11. Nel quinto fotogramma dall'alto nella Fig. 5.7, quali punti sono in moto e in quale direzione e verso si muovono?
- 5.12. Un impulso, come quello rappresentato nella Fig. C, viene inviato lungo una molla verso destra. Disegnate l'impulso propagantesi verso sinistra che potrebbe elidere istantaneamente l'impulso rappresentato.



Fig. C



**Fig. 5.10.** Riflessione di un impulso su un estremo fisso. L'impulso riflesso è capovolto.

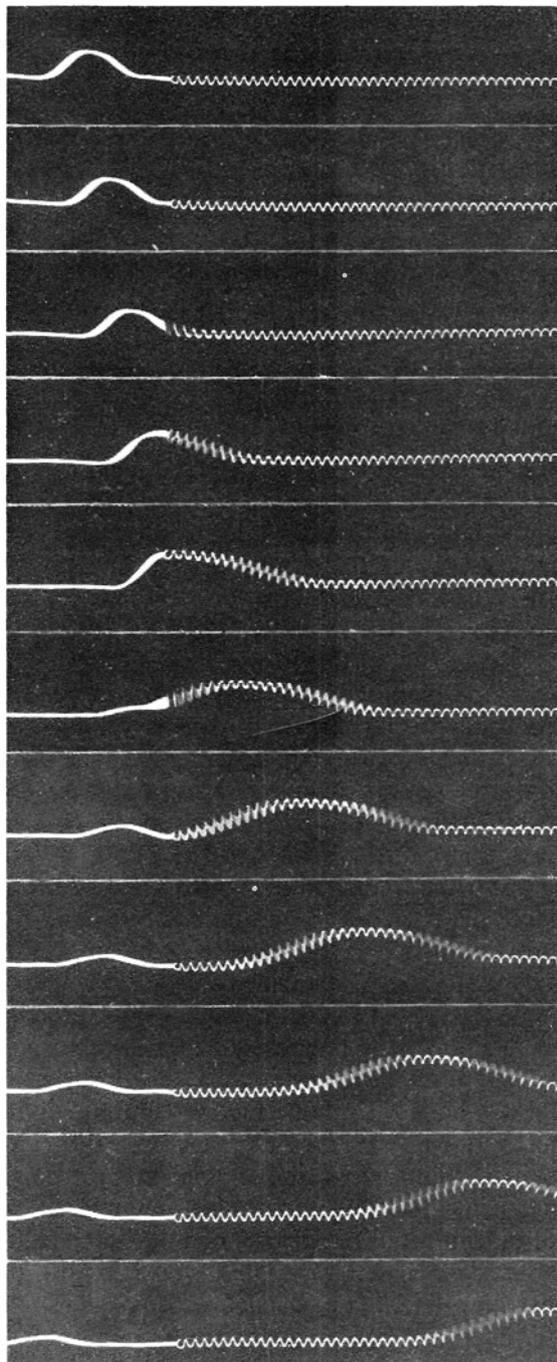


**Fig. 5.11.** Un impulso che si propaga da una molla leggera (a destra) a una molla pesante. Alla giunzione l'impulso è parzialmente trasmesso e parzialmente riflesso. Si nota che l'impulso riflesso è capovolto.

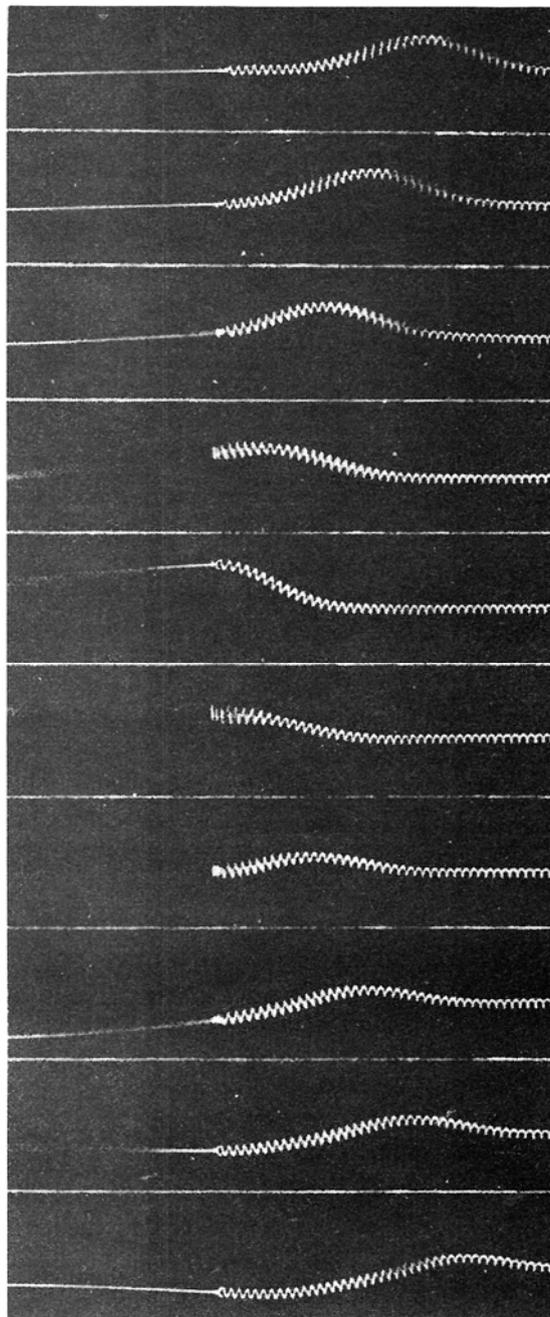
### 5.5. Riflessione e trasmissione

Quando un impulso che si propaga in una molla arriva a una delle due estremità mantenuta fissa, rimbalza indietro, ossia viene riflesso. L'impulso che torna indietro è detto impulso riflesso. Nella Fig. 5.10, l'estremità fissa della molla è a sinistra. Nell'impulso iniziale o impulso incidente, che si muove verso sinistra, lo spostamento è verso l'alto; l'impulso torna indietro capovolto, ma con la stessa forma che aveva prima di essere riflesso.

Supponiamo ora che, invece di fissare la molla a una estremità, la colleghiamo a un'altra molla più pesante e quindi più difficile da muovere. La nuova sistemazione sarà compresa tra il caso (1) in cui la molla iniziale è fissata a un estremo e il caso (2) in cui la molla iniziale è allungata di un tratto dello stesso materiale. Nel primo caso l'intero impulso si riflette capovolgendosi, mentre nel secondo l'impulso continua a propagarsi nella stessa direzione. Possiamo quindi attenderci che nella nuova sistemazione una parte dell'impulso si rifletta capovolgendosi e una parte prosegua, cioè si trasmetta. Questo effetto è illustrato nella Fig. 5.11, in cui l'impulso iniziale proviene da destra e la molla più pesante è a sinistra.



**Fig. 5.12.** Un impulso che passa da una molla di grande massa (a sinistra) a una molla di piccola massa. Alla giunzione fra le due molle, l'impulso si trasmette parzialmente e si riflette parzialmente. L'impulso riflesso è diritto.



**Fig. 5.13.** Un impulso in una molla riflesso dal punto di giunzione con un filo molto sottile. Tutto l'impulso torna indietro diritto. La parte confusa del filo nei fotogrammi centrali della successione di immagini indica che le particelle del filo si muovono con velocità elevata mentre passa l'impulso. Qual è il verso del moto dell'impulso in ciascuno dei fotogrammi?

Vediamo che nella giunzione (o punto di contatto) tra le due molle, che sono i mezzi in cui l'impulso si propaga, l'impulso si sdoppia in due impulsi, uno riflesso e uno trasmesso. Come la sovrapposizione, lo sdoppiamento in una parte riflessa e una parte trasmessa è una proprietà tipica delle onde.

Che cosa accade quando un impulso si propaga nel verso opposto, viaggiando lungo la molla pesante e arrivando alla giunzione fra questa e la molla leggera? Non è facile prevederlo. Non possiamo più ricorrere, come prima, a due situazioni di cui conosciamo la risposta, tuttavia l'esperimento ci aiuterà a capire. Nella Fig. 5.12, vediamo un impulso che si muove da sinistra verso destra, da una molla pesante verso una molla leggera. In questo caso, come in quello opposto illustrato nella Fig. 5.11, una parte dell'impulso si trasmette e una parte si riflette, ma questa volta l'impulso riflesso è diritto.

Riassumendo, dunque, quando un impulso viene inviato lungo una molla verso una giunzione con una seconda molla, osserviamo che l'intero impulso si riflette capovolgendosi quando la seconda molla è

molto più pesante della prima. Quando la seconda molla viene sostituita con molle sempre più leggere, l'impulso riflesso diventa sempre più piccolo e l'impulso trasmesso oltre la giunzione sempre più grande. Quando le due molle hanno lo stesso peso, non c'è impulso riflesso e l'impulso iniziale si trasmette completamente. Se la seconda molla è più leggera della prima, si ha un impulso riflesso diritto. Quanto più leggera è la seconda molla, tanto più grande è l'impulso riflesso. Quando la seconda molla ha una massa trascurabile, l'impulso riflesso è quasi uguale all'impulso incidente, come si può dimostrare sperimentalmente con una molla pesante legata a un filo di nylon (Fig. 5.13).

### Quesiti

- 
- 5.13.** Il sesto fotogramma della Fig. 5.10 mostra la molla in un istante in cui la molla è quasi rettilinea. Spiegate perché ciò avviene.
- 5.14.** Considerate l'impulso asimmetrico proveniente da sinistra della Fig. 5.6. Disegnate la forma che avrà dopo essere stato riflesso a un estremo fisso.
- 5.15.** Nella Fig. 5.11, quale impulso provoca lo spostamento massimo, quello incidente o quello trasmesso?
- 5.16.** Nella Fig. 5.11, qual è il rapporto tra la velocità dell'impulso nella molla leggera e la velocità dell'impulso nella molla pesante?
- 5.17.** Come si potrebbe stabilire nella Fig. 5.11 che la successione di eventi procede dall'alto al basso e non dal basso all'alto?
- 

## 5.6. Astrazioni e approssimazioni

La maggior parte dei problemi che vengono affrontati dalla scienza sono piuttosto complicati e per cercare di risolverli si deve separare l'essenziale dal non essenziale, cioè operare un processo di astrazione. In questo testo abbiamo fatto spesso ricorso all'astrazione. Per esempio, nel capitolo 1, abbiamo sostituito pennelli di luce reali con raggi di luce, cioè, con pennelli senza spessore.

Nella descrizione delle onde lungo una molla abbiamo detto che la forma o le dimensioni dell'onda rimangono invariate durante il moto. In effetti, se osserviamo di nuovo la Fig. 5.1, riusciamo difficilmente a notare una variazione delle dimensioni dell'impulso mentre esso si propaga. Tuttavia, l'esperienza ci dice che un impulso diminuisce lentamente e che dopo parecchie riflessioni si estingue completamente. È ragionevole ignorare lo smorzamento dell'impulso? Oppure la nostra descrizione del comportamento delle onde è sbagliata in qualche aspetto fondamentale?

Per rispondere a queste domande, cominciamo con l'osservare che il tempo che un impulso impiega per estinguersi varia al variare delle condizioni. Per esempio, se la molla è immersa nell'acqua, l'impulso si estingue più rapidamente che nell'aria: l'acqua offre al moto della molla una resistenza maggiore di quella offerta dall'aria. Possiamo attenderci che nel vuoto l'impulso impieghi per estinguersi un tempo maggiore di quello che impiega nell'aria; esistono esperimenti, non facili da eseguire, che verificano questa ipotesi.

Anche nel vuoto l'impulso finisce per estinguersi a causa della resistenza interna nella molla. L'entità di questa resistenza dipende dal materiale di cui è fatta la molla: per alcuni materiali è molto piccola e l'impulso continua a propagarsi per lungo tempo.

Immaginiamo una molla priva di resistenza interna e mantenuta nel vuoto: in tale molla un impulso si propagherebbe indefinitamente. Trascurando lo smorzamento dell'impulso, abbiamo idealizzato le molle reali e le abbiamo trattate come se fossero esenti sia da attrito esterno che da attrito interno. Siamo autorizzati a farlo purché consideriamo il comportamento di un impulso soltanto per intervalli di tempo durante i quali le dimensioni dell'impulso variano così poco che difficilmente riusciamo a osservare la variazione. Per tali intervalli di tempo la molla ideale priva di resistenza rappresenta una buona approssimazione della molla reale e perciò possiamo utilizzarla nella nostra trattazione delle onde. Ciò offre un chiaro vantaggio, poiché il comportamento della molla ideale è molto più semplice di quello della molla reale.

Un'astrazione analoga è stata adottata nella descrizione della sovrapposizione di due impulsi. Abbiamo visto che lo spostamento prodotto dagli impulsi combinati è uguale alla somma degli spostamenti dovuti ai singoli impulsi. Ma se rendiamo troppo grandi i singoli impulsi, troviamo che lo spostamento totale è minore della somma dei due spostamenti. Ancora una volta, quando trascuriamo questa deviazione dalla sovrapposizione semplice, ci riferiamo a una molla ideale anziché a una molla reale: facciamo un'approssimazione, anziché una descrizione completa della situazione reale. Ma, finché manteniamo

abbastanza piccoli gli spostamenti in modo che difficilmente possiamo osservare queste deviazioni, la molla ideale sarà una buona approssimazione di quella reale e ha il vantaggio della semplicità.

### *Quesiti*

---

**5.18.** Quando un impulso si propaga lungo una molla, le sue dimensioni diminuiscono.

(a) In quali condizioni è giustificato trascurare questa diminuzione?

(b) Quale vantaggio procura trascurare questa diminuzione?

**5.19.** Che cosa si intende per molla ideale nel contesto di questo capitolo?

---

### **5.7. Un modello ondulatorio per la luce?**

In questo capitolo abbiamo conosciuto due proprietà importanti delle onde che indicano chiaramente i vantaggi di un modello ondulatorio della luce rispetto a un modello corpuscolare. Abbiamo trovato in primo luogo che le onde passano indisturbate l'una attraverso l'altra senza perturbarsi. Se incrociamo i fasci di due torce elettriche, ogni fascio procede dopo l'intersezione come se l'altro non esistesse (vedi Fig. 1.13). Analogamente, riusciamo a vedere questa pagina nonostante che la luce si intersechi in tutte le direzioni tra noi e la pagina. Ciò significa che l'intersezione dei fasci di luce è simile all'intersezione di onde molto più di quanto somigli all'intersezione di fasci di corpuscoli.

La seconda proprietà importante delle onde è quella della riflessione parziale e della trasmissione parziale in corrispondenza di una giunzione. Ricordiamo ora ciò che avviene quando la luce passa da un mezzo a un altro: una parte della luce si riflette e una parte si trasmette, come è stato illustrato nella Fig.2.4. Questo comportamento è proprio quello delle onde, mentre i fasci di corpuscoli non si separano in questo modo.

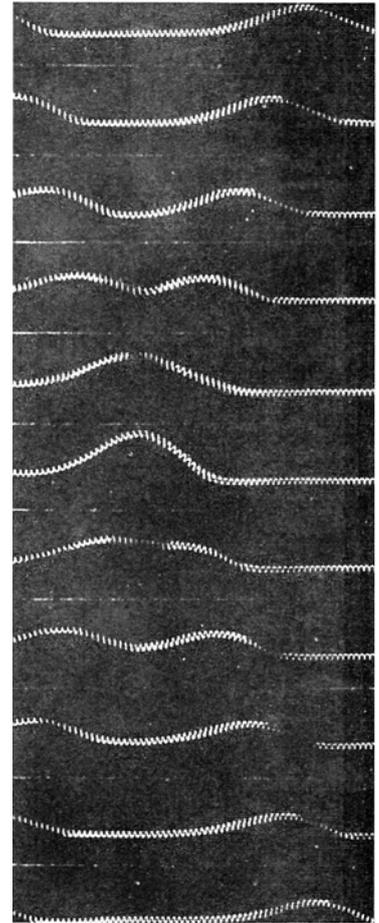
Queste due proprietà delle onde, riscontrabili anche per la luce, sono validi motivi per continuare nella costruzione di un modello ondulatorio per la luce, ma non sono sufficienti a dimostrare che il modello ondulatorio è un modello adeguato per la luce. Per esempio, quando un fascio di luce incide su una superficie di vetro, l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza e la direzione del raggio rifratto è descritta dalla seconda legge di Snellius-Cartesio.

Sulla base di quanto abbiamo studiato finora, non siamo in grado di dire se un modello ondulatorio spiega i cambiamenti di direzione del raggio di luce. Le onde nella nostra molla si muovono lungo una retta, cioè lungo una sola dimensione e perciò non è possibile cambiare la direzione di propagazione, tranne che invertirla.

Per stabilire se le onde sono realmente capaci di spiegare il comportamento della luce, dobbiamo disporre di onde che si propagano nello spazio o almeno in un piano, in modo da potere effettuare un confronto diretto. È quanto faremo nel capitolo seguente, dove studieremo le onde sulla superficie dell'acqua.

## Problemi di fine capitolo

- 5.20. Da un estremo di una molla mandate un impulso che ritorna a voi capovolto e rimpicciolito. Che cosa siete in grado di dedurre riguardo alla velocità dell'impulso lungo una seconda molla che è fissata all'altro estremo della prima?
- 5.21. Quando la luce passa dall'aria all'acqua, o viceversa, una parte di essa si riflette. Se questa situazione somiglia al passaggio di un impulso da una molla elicoidale a un'altra, in quale caso vi attendete che l'impulso luminoso si rifletta capovolgendosi?
- 5.22. Tenete in mano l'estremità di una lunga fune, dopo avere fissato l'altra a un sostegno rigido. Generate un'onda facendo compiere alla mano tre movimenti circolari rapidi in senso orario e guardate lungo la fune.
- Descrivete l'onda generata.
  - Descrivere l'onda riflessa.
  - Descrivete il moto di una particella della fune mentre l'onda si propaga avanti e indietro.
- 5.23. Possiamo affermare che la superficie del mare è approssimativamente piana. Fate alcuni esempi in cui questa è una buona approssimazione e alcuni esempi in cui è una cattiva approssimazione.
- 5.24. Nelle onde che abbiamo visto finora, le spire della molla si muovono perpendicolarmente alla molla (*onde trasversali*). Esiste qualche altro modo in cui le spire si possono muovere mentre un'onda si propaga lungo la molla? Provate a comprimere insieme alcune spire a un estremo della molla, abbandonandole poi a se stesse. Descrivete ciò che osservate.
- 5.25. Nel sesto fotogramma della Fig. D, vediamo la sovrapposizione di due impulsi uguali, ciascuno dei quali è simmetrico rispetto all'asse centrale.
- Il fatto che l'immagine appaia nitida indica che in questo istante non c'è moto.
  - Supponete di deformare la molla nel modo illustrato nel sesto fotogramma. Che cosa accade alla molla quando viene abbandonata a se stessa?



**Fig. D**