

## 10. LE LEGGI DEL MOTO

Le automobili percorrono le autostrade o si destreggiano nel traffico cittadino; gli aeroplani volano in alto sopra di noi, quelli a reazione e i satelliti artificiali sfrecciano nel cielo; le stelle compiono il loro regolare cammino. Che cosa li fa muovere? Che cosa fa muovere un oggetto qualsiasi? Esiste una causa unica, comune a tutti i movimenti? È necessaria una qualche causa?

Nello studio del moto svolto finora ci siamo occupati esclusivamente della descrizione dei moti senza considerarne le cause: questo ramo della fisica si chiama *cinematica* (dalla parola greca κίνημα (*kinema*) che significa movimento). Ma la sola descrizione non ci permetterà mai di soddisfare il nostro desiderio di fare qualcosa di nuovo, di controllare i moti, di non fermarci alla pura e semplice descrizione di ciò che accade. Faremo ora il passo successivo: esamineremo le cause dei moti o delle variazioni di moto. Questa parte della fisica è detta *dinamica* (dalla parola greca δυναμικ (*dynamis*) che significa forza).

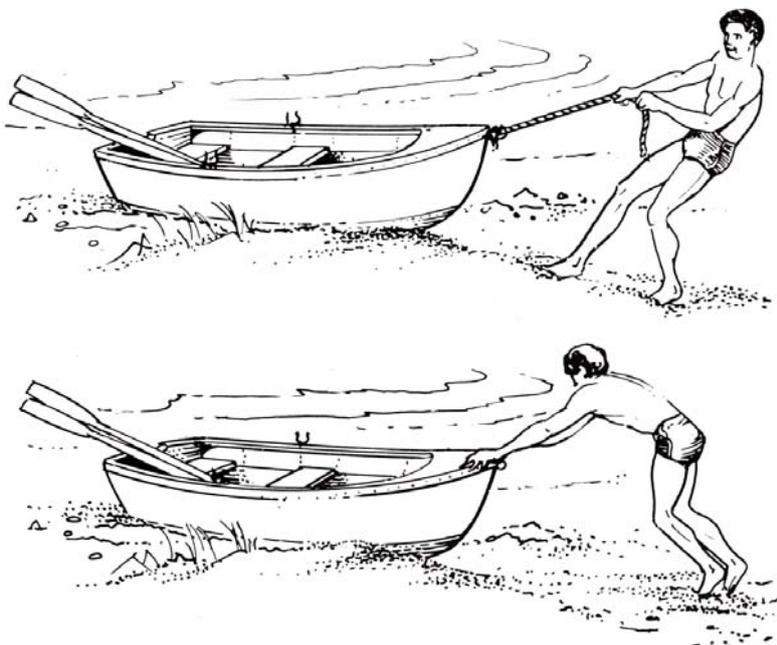
### 10.1. Idee sulla forza e il movimento

Gli interrogativi sulle cause del movimento si presentarono alla mente dell'uomo più di venticinque secoli fa, ma le risposte che possediamo attualmente furono trovate soltanto al tempo di Galileo Galilei (1564-1642) e di Isacco Newton (1642-1727).

Cominciamo col prendere in considerazione la nostra esperienza personale. Che cosa associamo all'idea di «causa del movimento»? La risposta è: lo sforzo muscolare di trazione o di spinta (Fig. 10.1). Per muovere un pianoforte attraverso una stanza, si deve spingere forte. Per allontanare un foglio di carta sul tavolo occorre invece uno sforzo piccolissimo. Queste trazioni e spinte sono chiamate forze e certamente la nozione di forza usata in fisica ha queste origini. In seguito, col progredire della conoscenza, l'idea di forza si è estesa fino a includervi tutte le cause del movimento. L'attrazione esercitata da una calamita su un chiodo è una forza: può far cambiare il movimento del chiodo nella stessa maniera della forza muscolare.

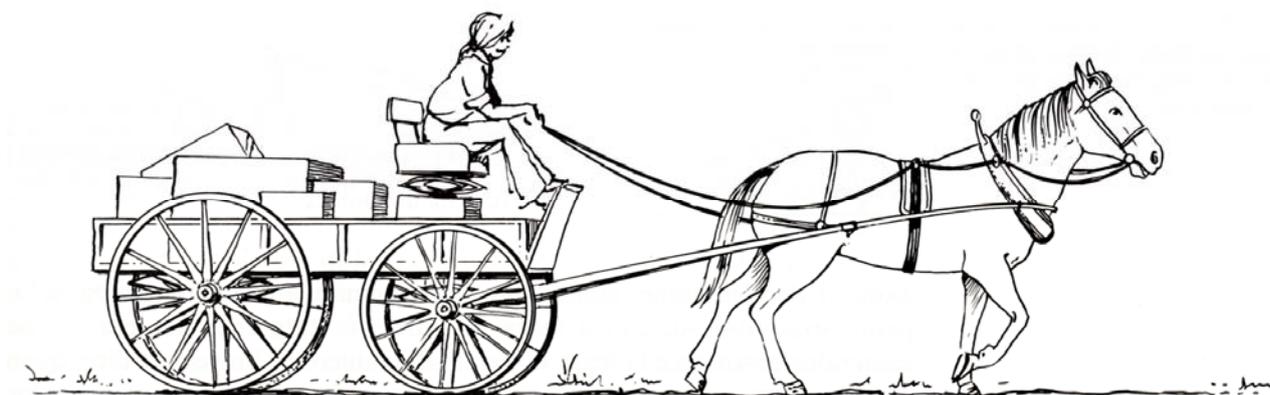
Più specificamente, che relazione c'è fra forza e movimento? Supponiamo di spostare un tavolo sul pavimento. Per mantenerlo in movimento con continuità da una parte all'altra della stanza, dobbiamo applicare costantemente una forza. Similmente un cavallo deve continuare a tirare un carro per mantenerlo in moto con velocità costante. L'esperienza di ogni giorno sembra indicare che è necessario esercitare costantemente una forza per mantenere un moto uniforme, come il moto in linea retta, con velocità costante (fig. 2.2). Aristotele (384-322 a. C.) notò questo fatto e concluse che occorre una forza costante per produrre una velocità costante, e ne dedusse che in assenza di forza i corpi si fermano.

L'ipotesi che in assenza di forze esterne i corpi si fermano e restano fermi, ci aiuta a capire un gran numero di movimenti che possiamo osservare attorno a noi, ma non spiega tutti i movimenti che avvengono in natura. Per esempio, i Greci erano a conoscenza del fatto che i corpi cadono con velocità crescente senza



l'applicazione di alcuna forza esterna apparente. Conoscevano anche i moti del Sole, della Luna e delle stelle che sembravano avvenire senza trazioni o spinte che li mantenessero. Ai Greci sembrava quindi che vi fossero tre tipi di moto da spiegare: non solo il moto degli oggetti che spingiamo qua e là sulla superficie della Terra, ma anche il moto dei corpi che cadono sulla Terra, e il moto continuo dei corpi celesti. Secondo Aristotele la materia terrestre cade verso la Terra perché la Terra è il centro dell'universo verso cui la materia si muove naturalmente. Egli suggerì l'ipotesi che la materia celeste fosse di natura fondamentale diversa dalla materia che si trova sulla Terra e

Fig. 10.1. Tutte le trazioni e le spinte sono chiamate forze.



**Fig. 10.2.** Un moto uniforme sembra richiedere una forza costante.

che perciò seguisse leggi diverse. Secondo Aristotele la materia celeste aveva la proprietà di provvedere essa stessa alla forza necessaria per mantenere i movimenti osservati.

Non dobbiamo pensare che questi modelli diversi per tre diverse classi di movimenti osservati in natura siano sciocchi. Tuttavia è preferibile cercare di spiegare il maggior numero possibile di fatti con il minor numero di ipotesi, facendo uso di un unico modello piuttosto che costruire un modello particolare per ogni nuova osservazione. Un Aristotele moderno difficilmente spiegherebbe la natura dei movimenti celesti ricorrendo a un tipo diverso di materia, soprattutto oggi che possiamo mandare la materia terrestre nello spazio. I movimenti sulla Terra, e i moti dei pianeti sono ora un tutto unico e i satelliti artificiali ci dimostrano in maniera eccellente che non v'è bisogno di supporre l'esistenza di una differenza tra materia terrestre e celeste. Il nostro modo di comprendere il moto dei corpi che cadono, dai corpi celesti, e dei corpi che noi stessi spingiamo o tiriamo sulla superficie della Terra, è ora esprimibile mediante un'unica legge fondamentale del moto. I satelliti sono progettati, costruiti e lanciati secondo questa legge e il loro comportamento è una delle molte prove a sostegno del fatto che la legge del moto di Newton abbraccia i tre tipi di moto descritti da Aristotele.

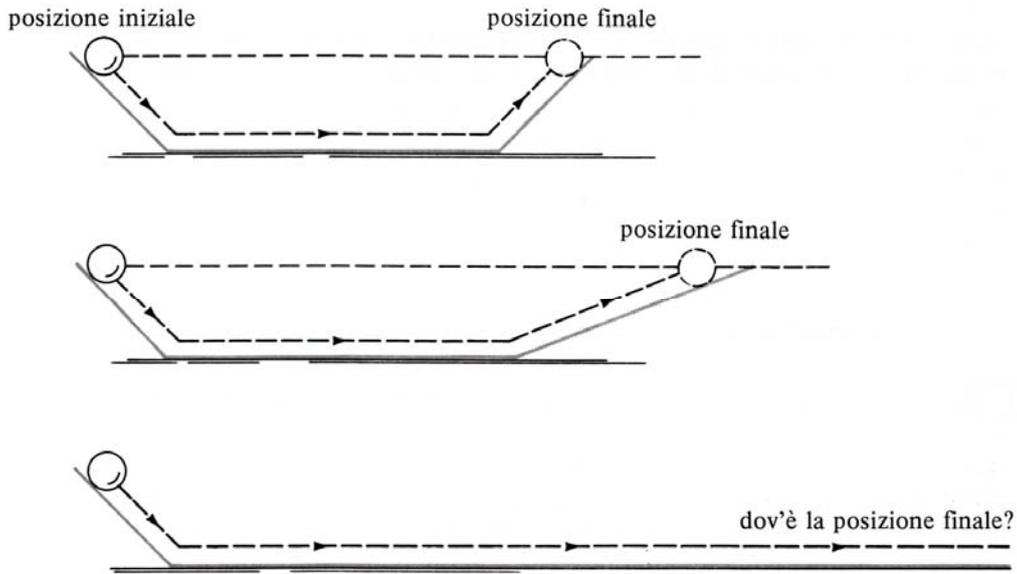
## 10.2. Movimento in assenza di forze

Per ben duemila anni dopo Aristotele la differenza apparente tra i moti dei corpi celesti e quelli dei corpi sulla Terra; impedì qualsiasi sviluppo significativo della dinamica. Poi nel secolo diciassettesimo Galileo fece il primo grande passo per arrivare a un'unica spiegazione di questi due tipi di moto. Egli affermò che «... se si impartisce a un corpo una velocità, questa sarà rigidamente mantenuta fintanto che non interverranno cause di accelerazione o decelerazione, condizione approssimativamente raggiunta solo su piani orizzontali su cui la forza di attrito è stata resa minima». Questa asserzione costituisce la legge d'inerzia di Galileo. In breve essa dice: quando nessuna forza agisce su un corpo, questo resta fermo o si muove con velocità costante.

Come poté giungere Galileo a questa sorprendente conclusione, così lontana dalla esperienza quotidiana, secondo la quale un moto rettilineo uniforme non richiede nessuna forza? Egli studiava il movimento di vari oggetti su un piano inclinato, e notò che «in discesa è sempre presente una causa di accelerazione, mentre in salita vi è decelerazione» (Fig. 10.3). Da questa esperienza egli dedusse che, quando non vi è né salita né discesa non vi deve essere né accelerazione né decelerazione: «... il movimento lungo un piano orizzontale deve essere uniforme». Naturalmente Galileo sapeva che tali movimenti orizzontali in realtà non erano uniformi, ma egli vedeva che quando l'attrito era ridotto, i corpi si muovevano più a lungo con velocità quasi costante. Per l'argomento precedente egli si convinse che fosse l'attrito a fornire le forze che fermano i corpi in moto orizzontale, e che in assenza di ogni forza i corpi avrebbero continuato a muoversi indefinitamente. Egli pertanto enunciò il suo risultato per la situazione ideale in cui non agisce nessuna forza.



**Fig. 10.3.** Osservando il moto su piani inclinati, Galileo dedusse che il moto lungo un piano orizzontale è uniforme.

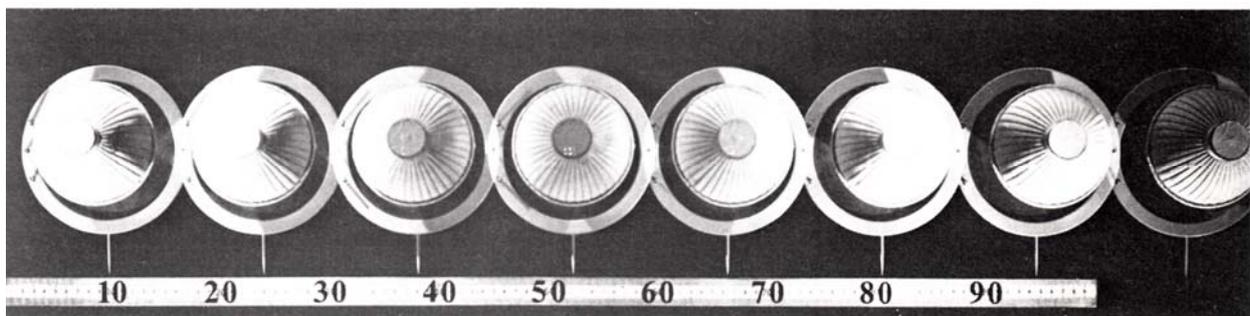


**Fig. 10.4.** Galileo osservò che una palla tende a raggiungere l'altezza di partenza indipendentemente dall'inclinazione dello scivolo. Quando l'inclinazione è zero, l'altezza iniziale non potrà mai essere raggiunta; perciò il moto lungo un piano orizzontale dovrebbe essere perpetuo.

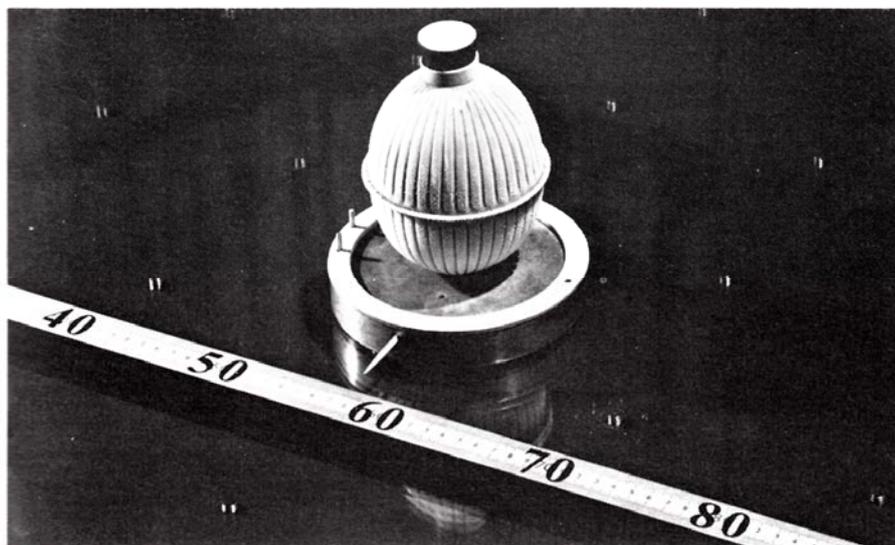
In una seconda serie di esperimenti, Galileo mostrò che se metteva due dei suoi piani inclinati uno di fronte all'altro (come in Fig. 10.4, in alto), un oggetto che partiva da fermo rotolava giù dal primo piano e su per il secondo fino a raggiungere quasi l'altezza iniziale. L'attrito impediva che esso raggiungesse esattamente questa altezza, ma Galileo osservò che questa altezza rappresentava il limite per il moto. Egli argomentò che se l'inclinazione del piano in salita venisse diminuita, come al centro di Fig. 10.4, aumenterebbe la distanza che l'oggetto deve percorrere per raggiungere la sua altezza iniziale. Se infine, come nella parte inferiore di Fig. 10.4, l'inclinazione venisse ridotta a zero e il secondo piano diventasse perciò una superficie orizzontale, l'oggetto non raggiungerebbe mai la sua altezza iniziale: continuerebbe a muoversi in perpetuo. «Da ciò – conclude ancora Galileo – segue che il moto lungo un piano orizzontale è perpetuo».

Gli esperimenti di Galileo non sono difficili, né vi è alcuna prova che egli li abbia condotti in condizioni eccezionali. Alcuni, come l'estrapolazione dell'esperimento rappresentato nella parte inferiore di Fig. 10.4 al caso idealizzato del moto perpetuo, non sono esperimenti «reali». Sono solo esperimenti concettuali, ma sono basati su fatti reali. È proprio questa combinazione di pensiero e di fatti che caratterizza il lavoro di Galileo ed è questa caratteristica che gli ha permesso di cogliere, mediante una feconda schematizzazione, gli aspetti essenziali in una grande varietà di movimenti osservati. Il suo principio di inerzia fu il grande varco che permise a Newton di costruire ciò che oggi costituisce la base per una comprensione della dinamica.

La maggior parte dei movimenti analizzati da Galileo e quelli studiati più tardi da Newton, erano così altamente idealizzati che sembravano aver molto poco a che fare con i movimenti dei sistemi reali quali noi li osserviamo. Ma fu solo attraverso un'attenta analisi di queste situazioni ideali che Galileo e Newton portarono i loro grandi contributi alla dinamica. Analogamente, noi dobbiamo esaminare attentamente movimenti molto semplici e idealizzati per ottenere una vera comprensione delle basi della dinamica. Allora, e solo allora, saremo in grado di applicare la dinamica al nostro complesso mondo ordinario.



**Fig. 10.5.** Moto di un disco a ghiaccio secco. Il disco si muoveva da sinistra verso destra mentre le istantanee venivano scattate 24 volte in 10 s, ossia un'istantanea ogni 0.42 s. La scala in basso è graduata in centimetri. Ecco una situazione quasi ideale di movimento in assenza di forze. In intervalli di tempo uguali, il disco subisce spostamenti quasi uguali.



**Fig. 10.6.** Un disco a ghiaccio secco com'è descritto nel testo poggia su una superficie liscia di vetro. Con questo dispositivo si possono studiare i moti in assenza quasi totale di attrito.

Con le apparecchiature moderne possiamo fare esperimenti che realizzano con buona approssimazione l'esperimento concettuale di Galileo sul moto in assenza di forza. Per ottenere la fotografia multiframe di Fig. 10.5, è stato usato un disco a ghiaccio secco, scorrevole su una superficie di vetro. In Fig. 10.6 si può vedere il disco usato. È un disco metallico, pesante, con la superficie inferiore molto levigata, e munito di un contenitore pieno di pezzi di ghiaccio secco. L'anidride carbonica solida sublima lentamente e il gas che si forma sfugge attraverso un forellino esistente al centro della faccia inferiore del disco metallico, e fluisce fra questa faccia del disco e la superficie di vetro (Fig. 10.7). Perciò, fra il disco di metallo e la superficie di vetro è interposto continuamente un sottile strato di gas; il disco galleggia sullo strato di gas e l'attrito è così eliminato quasi del tutto.

La fotografia di Fig. 10.5 è stata eseguita producendo 24 flash in 10 s, ossia un flash ogni 0.42 s circa, mentre il disco scivolava sulla superficie levigata di vetro. Come potete vedere, lo spostamento del disco tra un flash e il successivo è pressoché costante; cioè, la velocità praticamente non cambia quasi affatto. In base a esperimenti del genere, si può calcolare che questo disco, se gli si imprimesse una velocità iniziale di 10 km/h, su una superficie orizzontale abbastanza lunga, percorrerebbe circa un isolato!



**Fig. 10.7.** Il ghiaccio secco situato all'interno del disco si trasforma in gas che effluisce attraverso il forellino situato nella faccia inferiore della base del disco.

### Quesiti

- 10.1. Per arrivare all'estrapolazione che condusse Galileo a formulare la legge d'inerzia, era necessario che egli misurasse il tempo?
- 10.2. Una pallina di stucco, fatta rotolare all'interno di una ciotola, si arresta presto al centro di essa; una sferetta d'acciaio compirà invece molti giri prima di arrestarsi. Quale sarebbe il moto «ideale» di una sferetta in una ciotola?

**10.3.** Perché è particolarmente pericoloso guidare un veicolo su una strada gelata?

**10.4.** Se una sfera rotola con una velocità di 20 cm/s e su di essa non agisce alcuna forza, quale sarà la sua velocità dopo 5 s?

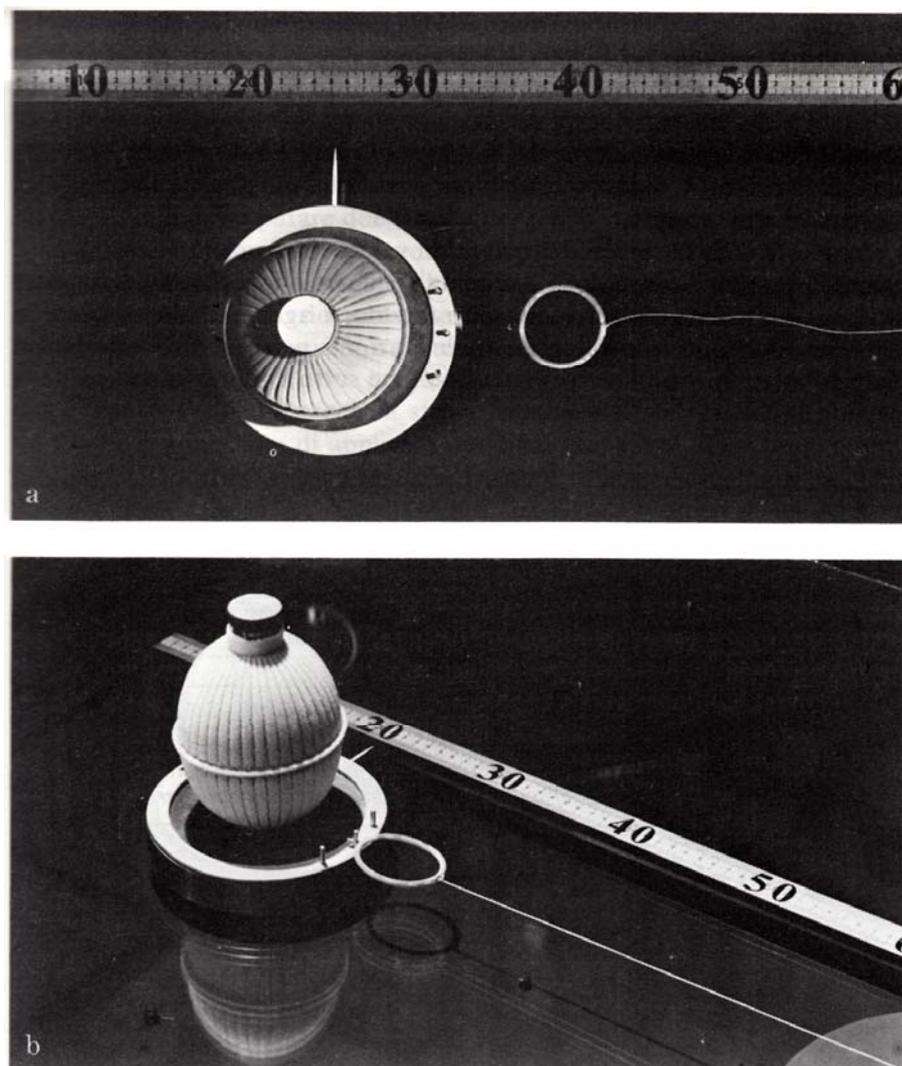
### 10.3. Variazioni di velocità sotto l'azione di una forza costante

La legge d'inerzia di Galileo dice che un oggetto sul quale non agisce alcuna forza si muove con velocità costante. Se la velocità varia, concludiamo che sull'oggetto agisce qualche forza. Qual è la relazione tra la forza e la variazione di velocità?

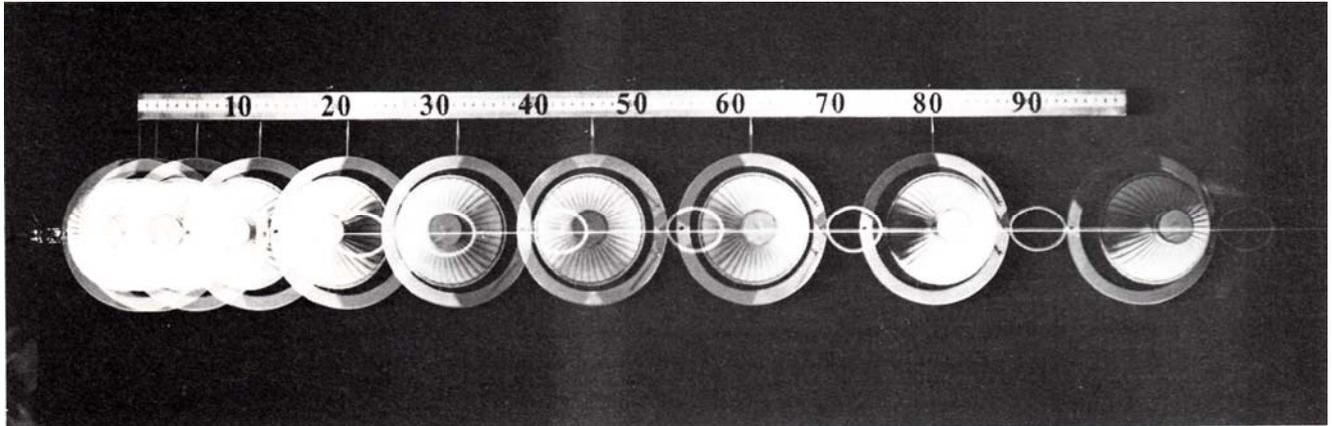
Cominceremo lo studio di questo problema con l'esperimento più semplice che si possa immaginare: applicheremo una sola forza a un oggetto solo e, per rendere minimo l'attrito, useremo uno degli stessi dischi a ghiaccio secco sulla stessa superficie di vetro con i quali abbiamo esaminato il moto in assenza di forze. La forza che applicheremo ora è quindi la sola forza che dobbiamo considerare.

Prima di tutto è necessario stabilire quando la forza applicata è costante. A questo scopo usiamo una molla costituita da un elastico a forma di anello attaccato al disco [Fig. 10.8 (a)]. È noto dall'esperienza comune che la forza esercitata da una molla aumenta in qualche modo con l'allungamento della molla. Perciò, supporremo che la forza esercitata dall'elastico sia la stessa ogni qual volta esso viene allungato della stessa quantità [Fig. 10.8 (b)].

Tiriamo ora il disco in modo che l'elastico sia sempre allungato della stessa quantità, e registriamo il moto del disco mediante una fotografia multiframe. Il risultato di tale esperimento è mostrato in Fig. 10.9. In questo esperimento i flash si sono succeduti a intervalli di 0.42 s. Si possono vedere le posizioni successive del disco e si può vedere che l'allungamento dell'elastico è rimasto costante. Il disco è partito da fermo e ha percorso una traiettoria rettilinea nella direzione e nel verso della forza applicata. Perciò possiamo analizzare questo moto usando i metodi appresi nel Cap. 9. Scegliamo la direzione del moto del



**Fig. 10.8.** (a) L'elastico ad anello non allungato, prima di essere montato sul disco. (b) L'anello allungato. Se questo anello viene allungato della stessa definita quantità, facciamo l'ipotesi che si ottenga la stessa forza.



**Fig. 10.9.** La fotografia multi-flash mostra il disco sollecitato a muoversi verso destra. I flash si succedono ogni 0.42 s. La forza applicata è costante perché è costante l'allungamento dell'elastico. È stato misurato lo spostamento del disco in ciascun intervallo segnato sulla fotografia e i risultati sono stati riportati nella Tab. 10.1.

disco come direzione positiva assumendola come asse delle  $x$ . È evidente che nei successivi intervalli di tempo lo spostamento  $\Delta x$  del disco è aumentato. Perciò, la velocità media  $v_{media} = \Delta x / \Delta t$  va aumentando (guardando da sinistra verso destra) in ciascun intervallo di tempo. Misurando gli spostamenti successivi, possiamo calcolare come è variata la velocità media. I risultati sono mostrati in Tab. 10.1. Per ogni intervallo di 0.42 s, dopo l'inizio del moto, la velocità media è aumentata di circa 5.7 cm/s, cioè di una quantità costante, entro i limiti di precisione dell'esperimento. Dividendo la variazione di velocità di 5.7 cm/s per l'intervallo di tempo di 0.42 s, si vede che la velocità media è variata con un ritmo costante di 13.6 cm al secondo per secondo. Poiché la velocità media è variata in maniera costante durante tutto il moto, è lecito supporre che la velocità istantanea sia variata anch'essa in maniera costante. Cioè, l'accelerazione è costante ed uguale a 14 cm al secondo per secondo ovvero  $14 \text{ cm/s}^2$ .

In questo esperimento si è ottenuto un valore medio di circa  $14 \text{ cm/s}^2$  perché si è esercitata una forza particolare su un oggetto particolare. Quando si esercitano altre forze o si agisce su altri oggetti, in genere si ottengono altri valori dell'accelerazione; però tutti gli esperimenti analoghi a quello ora descritto mostrano che sotto l'influenza di una forza costante l'accelerazione è costante.

**Tab. 10.1.** Dati ricavati nell'esperimento illustrato nella Fig. 10.9.

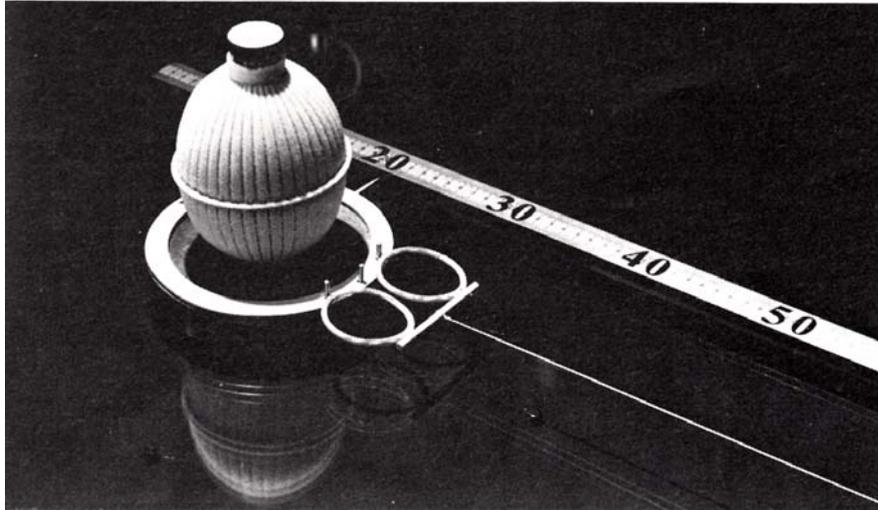
Intervallo	$x$ (cm)	$\Delta x$ (cm)	$\Delta x / \Delta t$ (cm/s)	$\Delta v$ (cm/s)	$\Delta v / \Delta t$ (cm/s <sup>2</sup> )
1	4.1	4.1	10		
2	10.4	6.3	15	5	12
3	19.2	8.8	21	6	14
4	30.4	11.2	27	6	14
5	44.0	13.6	32	5	12
6	60.1	16.1	38	6	14
7	78.6	18.5	44	6	14

Come origine delle posizioni è stata assunta quella del disco nell'istante del primo flash. Il valore di  $x$  dà la posizione del disco al termine dell'intervallo considerato.

### Quesiti

- 10.5.** La Fig. A mostra un tratto di nastro registrato durante un esperimento in cui un carrello da laboratorio viene tirato da un elastico teso. Che cosa potete dire sulla forza che agisce sul carrello?
- 10.6.** (a) Misurate l'allungamento dell'elastico negli ultimi sei fotogrammi di Fig. 10.9. L'elastico è allungato della stessa quantità durante tutto il percorso?  
 (b) Perché la risposta a questa domanda è importante nell'analisi dell'esperimento descritto nel testo?
- 10.7.** Quali sarebbero stati in Tab. 1 i dati relativi all'intervallo 8, se questo fosse stato incluso?
- 10.8.** Supponete che la fotografia di Fig. 10.9 rappresenti un corpo in moto da destra verso sinistra. In quale direzione e verso agirebbe la forza in questo caso?

**Fig. A**



**Fig. 10.10.** Per applicare una forza doppia di quella originaria, si attaccano al disco due elastici identici.

#### 10.4. Come l'accelerazione dipende dal modulo della forza

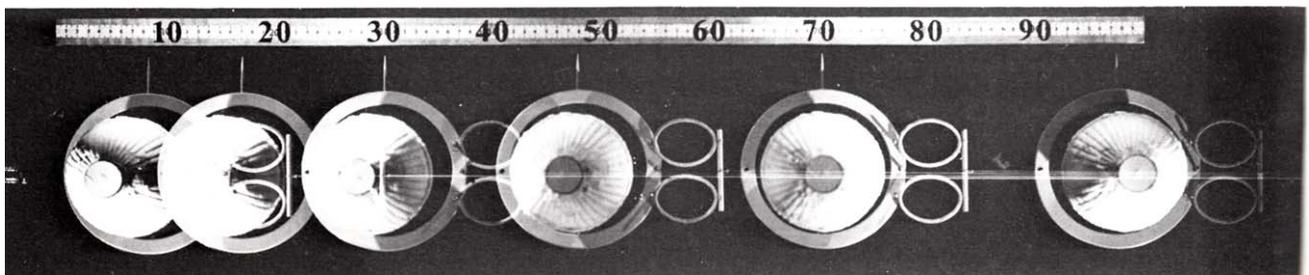
Che cosa accade quando applichiamo allo stesso corpo una forza costante diversa? Applichiamo una forza doppia e vediamo cosa succede. Questa semplice proposta solleva un nuovo problema. Abbiamo visto che possiamo usare un elastico per sostituire l'elemento umano nell'operazione di applicare una forza di un particolare valore, garantendoci così di avere applicato la stessa forza durante tutto il nostro ultimo esperimento. Come possiamo ora usare l'elastico a forma di anello per applicare una forza doppia?

Un modo semplice di ottenere una forza doppia ci è suggerito dal fatto che due uomini spingono più di uno. Per esempio, due uomini riuscirebbero a spingere un carro che un solo uomo potrebbe non essere in grado di muovere. Possiamo quindi preparare due elastici per avere una forza doppia di quella data da uno. Costruiamo un secondo elastico, cercando di farlo uguale al primo per quanto è possibile. Se allunghiamo il secondo elastico della stessa quantità del primo, esso dovrebbe esercitare una forza uguale e per assicurarci di ciò possiamo ripetere il nostro ultimo esperimento con il nuovo elastico. Se la forza è la stessa, il disco accelera nella stessa maniera ed è così provato che il nuovo elastico esercita la stessa forza dell'altro.

Siamo ora in grado di applicare una forza doppia al disco. Agganciamo ambedue gli elastici al disco fianco a fianco e tiriamo ciascuno di essi nella stessa direzione (Fig. 10.10). Assicuriamoci che ciascun elastico sia allungato di una quantità uguale a quella usata nell'esperimento con un solo elastico e osserviamo il moto come abbiamo fatto prima. In questo modo possiamo raddoppiare la forza agente sul disco, lasciando inalterata ogni altra cosa.

Abbiamo usato questo procedimento per applicare una forza doppia sullo stesso disco di prima. I risultati sono mostrati in Fig. 10.11. Che cosa si trova? I dati contenuti in Tab. 10.2, ricavati esattamente con lo stesso procedimento di prima, ma con una forza doppia, mostrano che anche l'accelerazione raddoppia.

Ulteriori esperimenti mostrano che questo risultato è generale. Quando la forza agente su un dato oggetto raddoppia, raddoppia anche l'accelerazione. Inoltre, se triplichiamo la forza, ponendo tre elastici identici fianco a fianco, si triplica anche l'accelerazione. Da numerose misure di questo tipo concludiamo che l'accelerazione di un corpo è proporzionale alla forza che agisce su esso.



**Fig. 10.11.** Il disco usato nell'esperimento precedente è accelerato da una forza doppia di quella usata in precedenza. L'intervallo fra i flash è sempre 0.42 s.

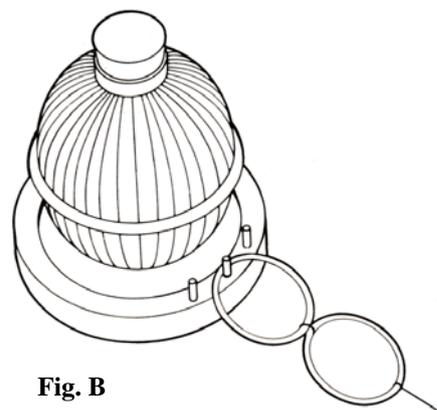
**Tab. 10.2.** Dati ricavati nell'esperimento illustrato nella Fig. 10.11.

Intervallo	$x$ (cm)	$\Delta x$ (cm)	$\Delta x/\Delta t$ (cm/s)	$\Delta v$ (cm/s)	$\Delta v/\Delta t$ (cm/s <sup>2</sup> )
1	8.4	8.4	20		
2	21.5	13.1	31	11	26
3	39.3	17.8	42	11	26
4	61.9	22.6	54	12	29
5	89.3	27.4	65	11	26

I dati sono stati ottenuti in un esperimento in cui la forza applicata era doppia di quella usata nel primo esperimento (Tab. 10.1). Anche in questo caso i flash si susseguivano ogni 0.42 s. Si noti che le variazioni della velocità media e quindi della velocità istantanea sono doppie rispetto a quelle della Tab. 10.1.

### Quesiti

- 10.9.** Un corpo viene trascinato da un elastico ad anello sottoposto a un allungamento costante su una superficie orizzontale levigata. In tali condizioni il corpo acquista una accelerazione di  $15 \text{ cm/s}^2$ . Quale sarà l'accelerazione del corpo se su questo agiscono due elastici identici al precedente messi a fianco a fianco e sottoposti allo stesso allungamento (Fig. 10.10)?
- 10.10.** Un oggetto che può scorrere su di una guida rettilinea ad attrito trascurabile è soggetto ad una forza costante. In un intervallo di tempo di 0.3 s la velocità varia da 0.2 m/s a 0.4 m/s. In una seconda prova, l'oggetto è soggetto a un'altra forza e nello stesso intervallo di tempo la velocità varia ora da 0.5 m/s a 0.8 m/s.
- (a) Qual è il rapporto tra l'intensità della seconda forza e quella della prima?
- (b) Se il corpo è soggetto per 0.9 s alla seconda forza, di quanto varierà la velocità?
- 10.11.** In un altro esperimento, il disco di Fig. 10.8 è tirato verso destra da due elastici ad anello collegati l'uno dopo l'altro, come mostrato in Fig. B. Ogni anello ha lo stesso allungamento che aveva l'anello singolo di Fig. 10.9. Com'è l'accelerazione del disco in questo caso rispetto all'accelerazione del disco di Fig. 10.9?



### 10.5. La legge di Newton: la massa inerziale

L'accelerazione prodotta da una data forza  $F$  dipende dall'oggetto su cui la forza agisce. L'applicazione di forze uguali per lo stesso tempo a una palla da tennis e ad un camion produce un'accelerazione più piccola nel caso del camion.

Poiché i corpi più grandi richiedono forze più grandi per ottenere la stessa accelerazione, è conveniente scrivere la proporzionalità tra  $F$  e  $a$  nella forma:

$$F = m \cdot a. \quad [10.1]$$

Questa relazione esprime la legge di Newton del moto (\*). La costante di proporzionalità  $m$  dipende dall'oggetto. Il suo valore aumenta con le dimensioni del corpo, almeno per gli oggetti fatti di materiali omogenei.

La costante  $m$  è chiamata massa inerziale del corpo. Ordinando diversamente la relazione sopra scritta, per un dato oggetto  $m$  è definita da  $F/a$ . Questo rapporto è costante per un dato corpo e ci dice quale

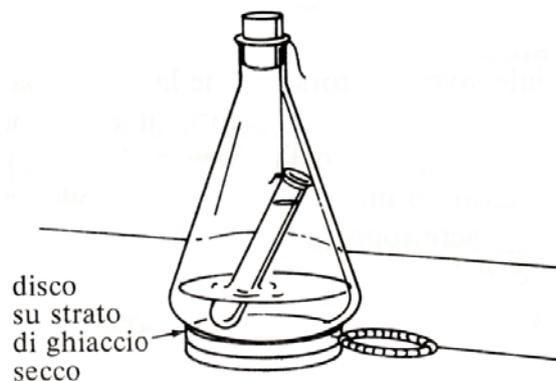
(\*) Ciò che noi definiamo come legge di Newton è spesso chiamata la sua seconda legge; il principio di inerzia di Galileo è chiamato a volte prima legge di Newton. Le denominazioni di prima e seconda legge di Newton non cambiano il contenuto, ma può essere importante conoscere questi termini per capire ciò che si intende dicendo: «Secondo la prima legge di Newton...».

difficoltà si incontra per accelerare il corpo. Più è grande la forza necessaria per produrre una data accelerazione, più grande è la massa inerziale dell'oggetto.

È naturale ora chiedersi se la massa inerziale, questa misura della difficoltà di accelerare un corpo, sia una nuova proprietà del corpo. È qualcosa che non ha alcun rapporto con ciò che già conosciamo, oppure è una proprietà nota espressa in forma diversa?

Per rispondere a queste domande dobbiamo fare alcuni esperimenti. In primo luogo consideriamo due oggetti, cioè un disco d'acciaio ed un altro d'ottone. Spingendoli con la stessa forza e misurando le loro accelerazioni, troviamo che le loro masse inerziali sono rispettivamente  $m_1$  e  $m_2$ . Supponiamo ora di agganciare fra loro i due dischi e di spingerli con la stessa forza: troviamo che la loro massa inerziale totale è  $m = m_1 + m_2$ . Questo risultato è del tutto generale, e vale per tutte le combinazioni di qualsiasi numero di oggetti: la massa inerziale è additiva.

Le reazioni chimiche hanno qualche effetto sulla massa inerziale? Supponiamo di porre in un recipiente chiuso due soluzioni separate di carbonato di sodio (soda per bucato) e di cloruro di calcio (Fig. 10.12). Misuriamo la massa inerziale del sistema, poi capovolgiamo il recipiente in modo che le sostanze reagiscano formando carbonato di calcio (un solido bianco insolubile) e una soluzione di sale da cucina. Misurando di nuovo la massa inerziale, troviamo che essa non è cambiata. Anche le altre reazioni chimiche non fanno variare la massa inerziale totale dei reattivi: la massa inerziale si conserva nelle reazioni chimiche.



**Fig. 10.12.** Dispositivo sperimentale usato per mostrare che la massa inerziale è invariante per reazioni chimiche.

### Quesiti

- 10.12.** Un'automobile può accelerare di  $3.0 \text{ m/s}^2$ . Qual è la sua accelerazione se rimorchia un'altra automobile uguale?
- 10.13.** Perché la beuta di Fig. 10.12 è chiusa? Preparatevi a spiegarlo in classe.
- 10.14.** (a) Supponete che due dischi uguali a quello di Fig. 10.8 siano uniti fra loro, e che vengano tirati da due elastici ad anello in parallelo fra loro, come in Fig. 10.11. Com'è l'accelerazione di questi due dischi rispetto all'accelerazione del disco di Fig. 10.9?
- (b) Supponete che tre di questi dischi siano uniti insieme, e che siano tirati da due elastici ad anello sistemati come in Fig. 10.11. Com'è l'accelerazione di questi tre dischi rispetto all'accelerazione del disco di Fig. 10.9?
- 10.15.** Il motore di un camion imprime al camion, quando è vuoto, una accelerazione tre volte maggiore di quando è a pieno carico. Qual è il rapporto fra la massa inerziale del camion carico e quella del camion vuoto?

### 10.6. Massa inerziale e massa gravitazionale

Nei vostri primi approcci con la scienza avete imparato a misurare la massa con la bilancia a bracci uguali. La massa così misurata è detta *massa gravitazionale* perché la misura consiste nel confronto di due forze gravitazionali: sull'oggetto di cui si vuole conoscere la massa, e su una serie di masse standard (i valori delle forze possono variare da luogo a luogo, ma se due oggetti sono in equilibrio in un luogo, sono in equilibrio dappertutto).

La massa gravitazionale e la massa inerziale sono state determinate con metodi di misura completamente diversi fra loro: per misurare una massa inerziale applichiamo una forza ad un oggetto e

misuriamo la sua accelerazione senza alcun riferimento alla gravità; per misurare invece la massa gravitazionale con una bilancia a bracci uguali, sfruttiamo le forze gravitazionali, ma nessuna accelerazione. I due metodi di misura difficilmente potrebbero essere più differenti, tuttavia le proprietà della massa gravitazionale sono molto simili a quelle che abbiamo già preso in considerazione per la massa inerziale: entrambe le masse sono additive ed entrambe si conservano nelle reazioni chimiche. Cioè, per entrambi i tipi di massa, la massa dei due oggetti è data dalla somma delle masse degli oggetti singoli, e né l'una né l'altra massa variano durante una reazione chimica.

Esiste forse un legame fra massa inerziale e massa gravitazionale? In particolare, se due oggetti, come un sasso e un cilindro pieno d'acqua, hanno la stessa massa inerziale, avranno forse anche la stessa massa gravitazionale? A questa domanda occorre rispondere con un esperimento. Parlando in termini concreti, se due corpi sotto l'influenza della stessa forza hanno la stessa accelerazione, staranno in equilibrio su una bilancia a bracci uguali? Esperimenti di questo genere sono stati ripetuti molte volte con vari gradi di precisione. Il risultato del più accurato degli esperimenti è «si» con una precisione di uno su  $10^{11}$ .

L'equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale suggerisce di usare la stessa unità di misura per entrambe le masse. Il chilogrammo campione – un cilindro di una lega di platino-iridio accuratamente conservato a Sèvres in Francia – è il campione internazionale dell'unità di misura per entrambe le masse. Poiché la massa inerziale e la massa gravitazionale sono equivalenti, la misura della massa gravitazionale di un corpo è anche la misura della sua massa inerziale. Non è necessario che ci preoccupiamo sempre di distinguere le due masse: possiamo utilizzare abitualmente la parola «massa» da sola per riferirci all'una o all'altra.

### Quesiti

- 
- 10.16.** Perché si fa un'accurata distinzione fra massa gravitazionale e massa inerziale, invece di parlare di una sola massa?
- 10.17.** Su una bilancia, due scatole di latta identiche fanno equilibrio a una scatola di cartone. Una certa forza imprime alla scatola di cartone un'accelerazione di  $2 \text{ m/s}^2$ . Quale accelerazione imprimerà la stessa forza a una delle due scatole di latta?
- 

### 10.7. Unità di misura della forza

La legge di Newton del moto,  $F = m \cdot a$ , e l'equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale ci forniscono un'unità di misura della forza e con questa un metodo generale per misurare le forze.

Iniziamo con una massa di un chilogrammo: la forza che gli imprime una accelerazione di 1 metro al secondo per secondo sarà l'unità di misura per la forza. Si definisce come *newton* (N) la quantità:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2. \quad [10.2]$$

Una forza che imprime a una massa di 2 kg una accelerazione di  $5 \text{ m/s}^2$  sarà una forza di:

$$2 \text{ kg} \times 5 \text{ m/s}^2 = 10 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 10 \text{ N}. \quad [10.3]$$

In generale, dall'espressione  $F = m \cdot a$  possiamo determinare qualsiasi forza che agisca su una massa nota, misurando l'accelerazione che essa imprime. L'accelerazione espressa in metri al secondo per secondo moltiplicata per la massa in chilogrammi dà la forza in newton.

### Quesiti

- 
- 10.18.** Ad un pompelmo di massa 0.5 kg viene impressa un'accelerazione di  $10 \text{ m/s}^2$ . Che intensità ha la forza agente su di esso?
- 10.19.** Una palla da baseball ha una massa di 0.10 kg e un buon lanciatore riesce a imprimerle una velocità di 45 m/s. Se il lanciatore impiega 0.15 s per accelerare la palla, quale forza ha applicato?
-

## 10.8. La legge di Newton e i corpi in movimento

Abbiamo discusso la legge del moto di Newton in condizioni apparentemente piuttosto particolari. Per semplicità, abbiamo accelerato le masse da ferme usando una forza costante. La relazione trovata fra forza e accelerazione è ugualmente valida se facciamo variare l'intensità della forza agente su un corpo in movimento?

Supponiamo di spingere un oggetto, inizialmente fermo, con una forza costante, per un tempo definito. Esso accelererà finché lo spingiamo. Se smettiamo di spingerlo, l'accelerazione cessa e il corpo si muove con velocità costante. Se ricominciamo a spingerlo, gli faremo acquistare di nuovo accelerazione. Supponiamo ora di applicare una forza in senso contrario al moto: possiamo prevedere che l'accelerazione avrà la stessa direzione della forza e poiché essa ha verso opposto al moto, l'oggetto rallenterà anziché aumentare la propria velocità nel tempo. Gli esperimenti mostrano che rallenta proprio e che la decelerazione è  $F/m$ .

Sia che un corpo sia fermo, sia che si muova nello spazio esterno a una velocità di  $10^5$  m/s, sottoposto a una forza, accelera e si trova sempre che  $a = F/m$ . Non è necessario considerare quale sia la velocità del corpo, né da quale processo sia prodotta questa velocità. Indipendentemente dalle forze che precedentemente hanno agito o dalla velocità che il corpo possiede all'istante, una data forza applicata lungo la traiettoria produrrà sempre la stessa accelerazione. Comunque dobbiamo sempre tenere presente che queste generalizzazioni sono basate sul comportamento degli oggetti che noi vediamo, tocchiamo o sperimentiamo in laboratorio. Se si possono applicare o no anche ad oggetti infinitamente piccoli che si muovono ad altissime velocità è una domanda a cui si può dare risposta soltanto attraverso ulteriori esperimenti.

### Quesiti

- 10.20.** Un disco a ghiaccio secco di massa 1.0 kg scivola su una superficie levigata alla velocità di 1.5 m/s. Una forza di 3.0 N viene applicata sul disco nella direzione del moto per 2.0 s. Qual è la velocità finale del disco?
- 10.21.** Un disco a ghiaccio secco di massa 1,0 kg scivola su una superficie levigata alla velocità di 1.5 m/s. Una forza di 3.0 N viene applicata sul disco nella direzione del moto per un tratto di 2.0 m. Qual è la velocità finale del disco?

### Problemi di fine capitolo

- 10.22.** Una palla, inizialmente ferma, viene lasciata libera, sul piano inclinato di sinistra di Fig. 10.4 ad un'altezza di 10 cm al di sopra del punto più basso.
- Se non vi è attrito, quale altezza essa raggiungerà sul piano inclinato di destra?
  - Se il piano inclinato di destra si eleva di 1.0 cm per ogni 10 cm di distanza orizzontale, quale sarà la componente orizzontale dello spostamento della palla su di esso?
  - Se il piano inclinato si eleva solo di 0.5 cm per ogni 10 cm di distanza orizzontale, di quanto si sposterà la palla
- 10.23.** Un blocchetto viene trascinato lungo una superficie orizzontale, successivamente da 2, 4, 6 e 8 elastici fra loro paralleli. Gli elastici sono tutti uguali e ciascuno viene allungato della stessa quantità in ciascun esperimento. Il grafico (Fig. C) mostra le accelerazioni impresse in funzione del numero degli elastici.

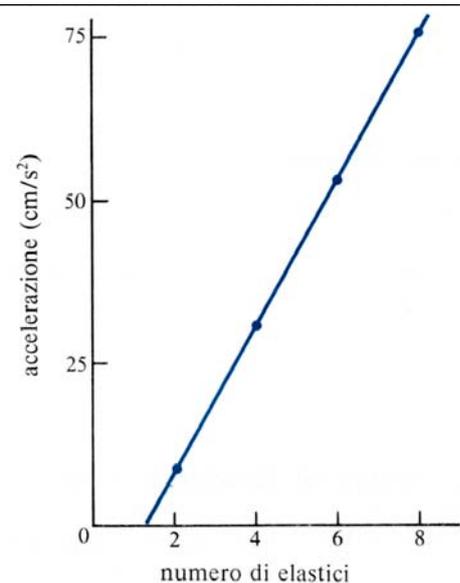


Fig. C

- Quale conclusione potete trarre dal fatto che il grafico è una retta?
- Che cosa rappresenta l'intersezione del grafico con l'asse orizzontale?

- (c) In base al grafico, quale prevedete sia l'accelerazione impressa al blocchetto da un solo elastico allungato della stessa quantità di prima?
- (d) Supponete di ripetere l'esperimento, cambiando solo la superficie sulla quale viene trascinato il blocchetto. Come sarà il nuovo grafico rispetto al precedente?
- 10.24.** Modellate un pezzo di plastilina in modo da appoggiarla sulla parte superiore del disco di Fig. 10.11, e ripetete l'esperimento mostrato: in questo caso trovate che l'accelerazione del disco è di  $16 \text{ cm/s}^2$ .
- (a) Qual è il rapporto fra la massa inerziale del disco e quella della plastilina?
- (b) Ora lavorate la plastilina in modo tale che assuma una forma concava, e ripetete l'esperimento: prevedete che l'accelerazione che si misura in questo caso sia maggiore, uguale o minore di  $16 \text{ cm/s}^2$ ? Spiegare il motivo.
- 10.25.** Una forza di  $5 \text{ N}$  imprime a una massa  $m_1$  un'accelerazione di  $8 \text{ m/s}^2$ , e a una massa  $m_2$  un'accelerazione di  $24 \text{ m/s}^2$ . Quale accelerazione imprimerebbe alle due masse, se venissero fissate l'una all'altra?
- 10.26.** Sappiamo che lo spostamento di un oggetto è direttamente proporzionale a  $t^3$ , dove  $t$  è il tempo impiegato.
- (a) Quali conclusioni possiamo trarre riguardo l'accelerazione? È costante? Aumenta? Diminuisce? È nulla?
- (b) Che cosa si può concludere riguardo le forze? Preparatevi a discutere questo problema in classe.
- 10.27.** Il grafico di Fig. D mostra la velocità in funzione del tempo, di un oggetto di  $2 \text{ kg}$  di massa che si muove lungo una retta. Disegnare un grafico della forza agente in funzione del tempo.
- 10.28.** Un blocco della massa di  $3.0 \text{ kg}$  si muove lungo una superficie orizzontale levigata con una velocità  $v_0$ , all'istante  $t = 0$ . A questo corpo viene applicata una forza di  $10 \text{ N}$  nella stessa direzione e in verso opposto a quello del suo moto. La forza rallenta il moto del blocco riducendo la sua velocità a metà del valore iniziale mentre il corpo si sposta di  $9.0 \text{ m}$ .
- (a) Quanto tempo occorre perché ciò avvenga?
- (b) Qual è il valore di  $v_0$ ?
- 10.29.** Si considerino le due masse  $m_1$  e  $m_2$  nella Fig. E. All'istante  $t = 0$ ,  $m_1$  è ferma e  $m_2$  si muove con velocità  $v_0$ . È possibile applicare la stessa forza costante (in modulo, direzione e verso) per lo stesso tempo a entrambe le masse per portarle alla stessa velocità in un dato istante? Tentate di risolvere questo problema con un ragionamento qualitativo e quindi controllate la conclusione alla quale giungete, scrivendo le equazioni necessarie. Considerate tutti i casi:  $m_1 < m_2$ ,  $m_1 = m_2$ ,  $m_1 > m_2$ .
- 10.30.** Un blocco della massa di  $8.0 \text{ kg}$ , inizialmente fermo, è sollecitato da una forza costante di  $2.0 \text{ N}$  lungo un piano orizzontale. Si trova che questo corpo percorre una distanza di  $3.0 \text{ m}$  in  $6.0 \text{ s}$ .
- (a) Qual è l'accelerazione del corpo?
- (b) Qual è il rapporto tra la forza applicata e la massa?
- (c) Poiché la risposta alla domanda (b) è diversa da quella alla domanda (a) (almeno dovrebbe essere diversa), che conclusioni traete a proposito di questo moto? Se è possibile, fornire risultati numerici.
- 10.31.** Aristotele pensava che fosse necessaria una forza costante per produrre una velocità costante e da ciò concludeva che, in assenza di forze, i corpi avrebbero dovuto restare fermi.
- (a) Indicare alcuni casi in cui sembra che una forza costante produca una velocità costante.
- (b) Come si spiegano i casi indicati in (a) alla luce della legge del moto di Newton?
- 10.32.** Come definireste una unità di massa se a Sèvres vi fosse una molla campione invece di una massa campione?

