

## 1 Forza e massa

Nel linguaggio comune il concetto di **forza** è associato all'idea di qualcosa che spinge o che tira, come mostrano gli esempi della figura 1. Nella figura **1A** un giocatore di pallacanestro effettua un tiro *spingendo* la palla. Nella figura **1B** la corda attaccata al motoscafo *tira* la persona che fa sci nautico. Forza come quella che spinge la palla o tira lo sciatore sono chiamate **forze di contatto**, perché agiscono attraverso il contatto fisico tra due oggetti.

Ci sono però situazioni in cui due o più oggetti esercitano forze uno sull'altro senza essere in contatto. Le forze di questo tipo sono chiamate **forze a distanza o interazioni a distanza**. Un esempio di forza a distanza è la forza di gravità, come quella che nella figura **1C** attira il tuffatore verso il basso. La Terra esercita questa forza anche sugli oggetti che non sono a contatto con essa.

Nella figura 1 le forze sono rappresentate mediante frecce. In effetti, **le forze sono grandezze vettoriali**, caratterizzate da modulo, direzione e verso. La direzione e il verso della freccia indicano direzione e verso di azione della forza, mentre la lunghezza della freccia è proporzionale all'intensità della forza.

Anche il concetto di **massa** è usato nel linguaggio comune. La massa di un oggetto è completamente descritta dalla sua misura, quindi la massa è una grandezza scalare.

I concetti di forza e di massa sono alla base di tre importanti leggi enunciate nel XVII secolo da Isaac Newton, che completò gli studi iniziati da Galileo alcuni decenni prima. Oggi queste leggi sono chiamate **leggi del moto di Newton** o **principi della dinamica** e forniscono la base per la comprensione degli effetti delle forze sugli oggetti.

## 2 Il primo principio della dinamica

### ■ Il primo principio

Consideriamo quello che succede in una partita di hockey su ghiaccio (figura 2). Se il dischetto è fermo e nessun giocatore lo colpisce, resta fermo sulla pista ghiacciata. Quando è colpito, il dischetto si muove, rallentando a poco a poco a causa dell'attrito. La superficie del ghiaccio è molto scivolosa, cioè esercita un attrito molto piccolo sul dischetto. Se fosse possibile eliminare completamente sia l'attrito con la superficie ghiacciata sia la resistenza dell'aria, e se la pista fosse infinitamente grande, il dischetto continuerebbe a muoversi per sempre a velocità costante (in modulo, direzione e verso), cioè continuerebbe a muoversi in linea retta con la velocità che gli è stata impressa dalla mazza. L'esempio descritto è una situazione ideale che illustra ciò che afferma il primo principio della dinamica:

#### ■ PRIMO PRINCIPIO DELLA DINAMICA O PRINCIPIO DI INERZIA

Un oggetto rimane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a quando non agisce su di esso una forza risultante non nulla.

Nell'enunciato del primo principio sono fondamentali le parole «forza risultante». Spesso infatti su un oggetto agiscono contemporaneamente diverse forze, ma per valutare gli effetti che esse hanno sullo stato di moto dell'oggetto bisogna considerare la loro **somma vettoriale**. Le singole forze contano solo per determinare la forza totale.

Per esempio, se non ci fossero l'attrito e altre forze che si oppongono al moto, un'automobile con una velocità di 20 m/s potrebbe continuare a viaggiare per sempre in linea retta a quella velocità senza consumare carburante. In realtà per mantenere la stessa velocità il motore deve bruciare carburante; così facendo, genera una forza che annulla la forza totale che si oppone al moto. In questo modo, sull'auto-

mobilistica agisce una forza totale nulla e quindi, per il primo principio, l'automobile procede con velocità costante.

Il primo principio indica che lo stato di moto di un oggetto che si muove di moto rettilineo uniforme e lo stato di quiete sono equivalenti, perché nessuno di essi richiede una forza per essere mantenuto. *L'applicazione di una forza non serve per mantenere costante la velocità di un oggetto ma per cambiarla.*

### ■ Inerzia e massa

La forza che si deve applicare a un oggetto per cambiarne la velocità è diversa a seconda dell'oggetto. Per esempio, una forza sufficiente a far prendere velocità a una bicicletta provoca solo una variazione impercettibile dello stato di moto di un treno. Un treno ha una tendenza a rimanere fermo, cioè in uno stato di quiete, molto maggiore di quello di una bicicletta. Per questo motivo diciamo che il treno ha un'inerzia molto maggiore di quella di una bicicletta. La grandezza fisica che esprime quantitativamente l'inerzia di un oggetto è la **massa**, detta anche **massa inerziale**. La seguente definizione spiega perché il primo principio della dinamica è chiamato anche *principio d'inerzia*.

#### ■ DEFINIZIONI DI INERZIA E DI MASSA

L'**inerzia** è la tendenza naturale di un oggetto a rimanere nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme. La **massa** di un oggetto esprime quantitativamente l'inerzia dell'oggetto.

**Unità di misura:** kilogrammo (kg).

Se invece l'automobile frena improvvisamente, la parte inferiore della massa oscillante continua a muoversi per inerzia nella stessa direzione in cui si stava muovendo prima della frenata. Oscillando attorno al perno a cui è appesa, la massa arriva nella posizione indicata in rosso nella figura e la barra di bloccaggio va a incastrarsi in uno dei denti della ruota dentata, impedendole di ruotare e quindi impedendo alla cintura di sicurezza di srotolarsi.

## ■ Un sistema di riferimento inerziale

In particolari situazioni può sembrare che il primo principio della dinamica non sia valido. Supponi per esempio di trovarti su un'automobile guidata da un'altra persona. Mentre l'auto viaggia a velocità costante, non avverti nessuna spinta particolare dallo schienale del sedile. Questo è in accordo con il primo principio: se viaggi a velocità costante la somma delle forze che agiscono su di te è nulla.

Se però il guidatore frena improvvisamente, senti agire su di te una forza che ti spinge in avanti. Conoscendo la prima legge del moto, pensi che il tuo stato di moto dovrebbe cambiare. In effetti, il tuo stato di moto cambia relativamente alla strada su cui l'automobile sta viaggiando perché l'automobile rallenta. Ma se osservi il tuo stato di moto *relativamente all'automobile*, puoi osservare che il tuo stato di moto non cambia, perché resti nello stesso stato in cui eri prima.

Questo non significa che la prima legge di Newton non sia valida, ma solo che essa non vale per un osservatore che usa un sistema di riferimento che, come l'automobile su cui stai viaggiando, si muove con moto accelerato. Per questo motivo i sistemi di riferimento che si muovono di moto accelerato sono chiamati *non inerziali*. Viceversa, tutti i sistemi di riferimento in cui è valida la prima legge di Newton sono chiamati *sistemi di riferimento inerziali*.

### ■ DEFINIZIONE DI SISTEMA DI RIFERIMENTO INERZIALE

Un sistema di riferimento inerziale è un sistema di riferimento in cui è valido il principio d'inerzia.

Si verifica sperimentalmente che la Terra è, con buona approssimazione, un sistema di riferimento inerziale.

Considera il punto di vista di un osservatore fermo che guarda passare la tua automobile; il suo sistema di riferimento, essendo solidale con la Terra, è un sistema inerziale. Finché la tua auto viaggia a velocità costante, anche il tuo sistema è inerziale, mentre quando frena diventa non inerziale. Queste considerazioni ammettono un'importante generalizzazione.

Ogni sistema di riferimento che si muova a velocità costante rispetto a un sistema inerziale è un sistema inerziale.

Pertanto ogni sistema di riferimento in moto rettilineo uniforme rispetto alla Terra è un sistema inerziale.

## ■ Le trasformazioni di Galileo

Le posizioni di un corpo relative a due sistemi inerziali sono legate da un'importante relazione che deriviamo a partire da una particolare scelta dei sistemi. Consideriamo un sistema inerziale  $A$  e un sistema inerziale  $B$  con gli assi rispettivamente paralleli e aventi lo stesso verso;  $B$  si muove rispetto ad  $A$  con velocità costante  $v$  diretta nel verso positivo dell'asse  $x$ .

Il tempo  $t$  è lo stesso per i due sistemi di riferimento: impostiamo per entrambi  $t = 0$  s nell'istante in cui le origini dei due sistemi coincidono.

Nel sistema  $A$  misuriamo la coordinata  $x$  di un oggetto che si trova nel punto  $P$  all'istante  $t$  e otteniamo  $x_A$ . Nel sistema  $B$ , l'oggetto, nello stesso punto  $P$  e sempre all'istante  $t$ , ha una diversa coordinata  $x_B$  (figura 5). Per determinare la relazione che

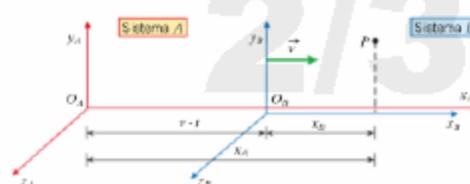


Figura 5  
Due sistemi di riferimento in moto relativo a velocità costante.

lega  $x_A$  e  $x_B$ , ricordiamo che ciascuna delle due coordinate è relativa all'origine del proprio sistema, rispettivamente  $O_A$  e  $O_B$ . Per effetto del moto relativo dei due sistemi, l'origine di  $B$  si allontana con velocità costante  $v$  da  $O_A$  e all'istante  $t$  dista da questa della quantità  $vt$ . Come suggerisce la figura, vale dunque la relazione

$$x_A = x_B + vt$$

Esplicitando  $x_B$  in termini di  $x_A$ , si ottiene la coordinata nel sistema  $B$  rispetto a quella del sistema  $A$ :

$$x_B = x_A - vt$$

Notiamo che le due relazioni precedenti si ottengono l'una dall'altra cambiando il segno della velocità relativa: osservato da  $B$ , il sistema  $A$  si muove con velocità  $-v$  lungo l'asse  $x$ .

Poiché i due sistemi traslano parallelamente all'asse  $x$ , le coordinate lungo gli altri assi rimangono uguali:  $y_B = y_A$  e  $z_B = z_A$ . Valgono quindi le seguenti relazioni note come trasformazioni di Galileo.

### ■ TRASFORMAZIONI DI GALILEO

Siano  $A$  e  $B$  due sistemi di riferimento inerziali, aventi gli assi corrispondenti paralleli. Il sistema  $B$  sia in moto lungo l'asse  $x$  con velocità costante  $v$  misurata da  $A$ . Posto  $t = 0$  s nell'istante in cui le origini di  $A$  e  $B$  coincidono, le coordinate di un punto  $P$  misurate in  $A$  e in  $B$  sono legate dalle relazioni seguenti:

$$x_B = x_A - vt$$

$$y_B = y_A$$

$$z_B = z_A$$

Come già notato, scambiare fra loro i due sistemi di riferimento equivale a cambiare il segno della velocità relativa. Le trasformazioni di Galileo da  $B$  ad  $A$  sono pertanto:

$$x_A = x_B + vt$$

$$y_A = y_B$$

$$z_A = z_B$$

Le trasformazioni di Galileo possono essere generalizzate al caso di due sistemi inerziali  $A$  e  $B$  aventi assi corrispondenti paralleli e coincidenti all'istante  $t = 0$  s, ma in moto relativo con velocità  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$  lungo una direzione generica. Come nel caso precedente,  $\vec{v}$  è il vettore velocità di  $B$ , misurato da  $A$ . In questo caso i vettori posizione  $\vec{s}_A$  e  $\vec{s}_B$  sono legati dalla relazione vettoriale (figura 6)

$$\vec{s}_B = \vec{s}_A - \vec{v}t$$

In componenti cartesiane:

$$s_{Bx} = s_{Ax} - v_x t$$

$$s_{By} = s_{Ay} - v_y t$$

$$s_{Bz} = s_{Az} - v_z t$$

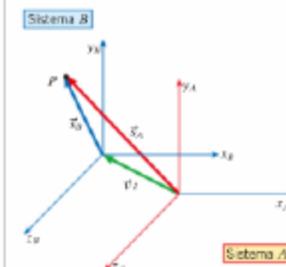


Figura 6  
Vettori posizione relativi a due sistemi di riferimento in moto a velocità costante.

**ESEMPIO 1 Giochi sul mare visti da terra**

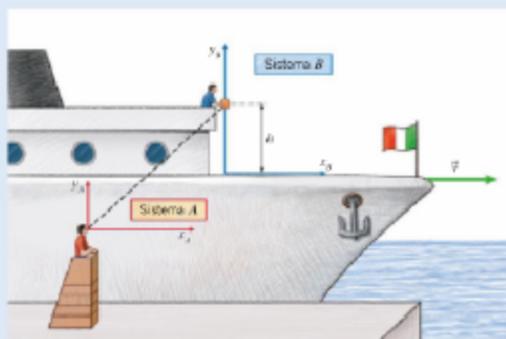
Una nave da crociera sta uscendo dal porto e si muove parallelamente al molo dove si trova un pescatore. Sul ponte di passeggiata, posto a un' altezza  $h$  sopra il ponte principale, un bambino lascia cadere una pallina da tennis.

- Determina la traiettoria della pallina nel sistema di riferimento del pescatore.

**Il ragionamento e la soluzione**

Nel sistema di riferimento  $B$  della nave, scegliamo un sistema di coordinate cartesiane con l'origine sul ponte, l'asse delle ascisse parallelo al ponte e l'asse delle ordinate verticale con il verso in alto passante per la posizione iniziale della pallina (figura 7). Quest'ultima ha velocità iniziale pari a zero, parte da quota  $h$  e cade con accelerazione  $-g$ , per cui nel sistema  $B$  le sue equazioni del moto sono

$$\begin{aligned}x_B &= 0 \\y_B &= h - \frac{1}{2}gt^2\end{aligned}$$



Nel sistema di riferimento  $B$ , quindi, la traiettoria della pallina è un segmento verticale di equazione

$$x_B = 0 \quad \text{tra } y_B = h \text{ e } y_B = 0$$

Il sistema di riferimento  $A$  del pescatore fermo sul molo ha gli assi  $x_A$  e  $y_A$  rispettivamente paralleli agli assi del riferimento  $B$ . Scegliamo l'origine del sistema di riferimento del pescatore all'altezza del ponte della nave, in modo che anche per il pescatore la pallina parta da quota  $h$ . Il pescatore vede la nave allontanarsi con velocità  $v$ . Le trasformazioni di Galileo dal sistema  $B$  al sistema  $A$  sono le seguenti:

$$\begin{aligned}x_A &= x_B + vt \Rightarrow x_A = 0 + vt = vt \\y_A &= y_B \Rightarrow y_A = h - \frac{1}{2}gt^2\end{aligned}$$

Dalla prima equazione ricaviamo un'espressione per  $t$  che sostituiamo nella seconda equazione ottenendo

$$y_A = h - \frac{1}{2}g\left(\frac{x_A}{v}\right)^2 = -\frac{g}{2v^2}x_A^2 + h$$

Quindi, nel sistema di riferimento  $A$  del pescatore, la pallina si muove lungo una traiettoria parabolica.