

Lo scopo della **fisica** è lo studio dei fenomeni naturali (non comprendendo peraltro i fenomeni chimici, biologici, geologici ecc. che sono oggetto di altre scienze), cioè degli eventi che possono essere descritti e quantificati attraverso opportune grandezze fisiche; lo scopo della fisica è stabilire principi e leggi che regolino le interazioni tra le grandezze coinvolte, fornendo uno schema semplificato (**modello**) del fenomeno descritto.

La fisica utilizza il **metodo sperimentale** (o *scientifico*) per arrivare a una conoscenza oggettiva, affidabile, verificabile e condivisibile della realtà. A partire da ipotesi e da teorie da indagare, il metodo raccoglie dati empirici che vengono poi gestiti da una rigorosa analisi matematica.

La fisica è per eccellenza una “*scienza dura*” dove la rigosità del metodo non è mai messa in discussione e non lascia spazio a valutazioni non oggettive (come accade nelle scienze umanistiche che, per contro, vengono definite “*scienze molli*”).

I procedimenti utilizzati nel metodo scientifico sono quello **induttivo** (partendo da singoli casi particolari cerca di stabilire una legge universale, dal particolare all'universale) e quello **deduttivo** (dall'universale al particolare; partendo da postulati, ipotesi, teorie iniziali, attraverso una serie di “deduzioni”, procede verso la spiegazione di casi particolari della realtà quotidiana).

Originariamente e fino al XVIII sec., la fisica era una branca della filosofia (*filosofia naturale*). Solo in seguito alla codifica del metodo scientifico di Galileo Galilei, negli ultimi tre-

cento anni si è grandemente sviluppata, raggiungendo una piena autonomia.

Suddivideremo lo studio della fisica nelle seguenti branche: **meccanica** (cinematica, dinamica, statica, meccanica dei fluidi), **termodinamica**, **studio delle onde**, **acustica**, **ottica**, **elettricità ed elettromagnetismo e fisica moderna**.

Prerequisito essenziale per lo studio della fisica è lo studio di gran parte delle sezioni della matematica.

## Le grandezze fisiche

In fisica le variabili che si incontrano (temperatura, pressione, velocità ecc.) sono di due tipi. Le **grandezze scalari** sono definite da un valore numerico (relativo a un'unità di misura), mentre quelle vettoriali sono definite da un numero (**intensità o modulo**), una **direzione** e un **verso**. Per esempio, indicando la velocità di un'auto siamo soliti parlare di 80 km/h, ma se indichiamo anche direzione (lungo l'autostrada Milano-Genova) e verso (verso Milano) risultiamo essere completamente esaustivi. Le **grandezze vettoriali** sono indicate con **vettori**, segmenti orientati con un'**origine**, il punto da cui origina il segmento orientato.

Mentre per confrontare due grandezze scalari è sufficiente confrontare la loro intensità, si può dire che due grandezze vettoriali sono *uguali* se hanno lo stesso modulo, la stessa direzione, lo stesso verso; si dicono *opposte* se ciò che cambia è solo il verso che è opposto.

I vettori sono indicati con una lettera sormontata da una freccia:

$$\vec{v}$$

Il modulo si indica anche con  $|\vec{v}|$ .

## Somma di vettori

La **somma di due vettori** rientra in tre casi.

Se  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$  hanno stessa direzione e verso, il vettore risultante  $\vec{V}$  ha stessa direzione e stesso verso e come modulo la somma dei moduli.

Se  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$  hanno la stessa direzione, ma verso opposto, il vettore risultante  $\vec{V}$  ha stessa direzione, il verso di quello che ha modulo maggiore e come modulo la differenza dei moduli.

Negli altri casi si usa la **regola del parallelogramma**: si tracciano i due vettori  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$  fino a che la loro origine coincide, poi, partendo dalle due estremità libere (le punte), si traccia una retta parallela all'altro vettore, disegnando un parallelogramma. La risultante  $\vec{V}$ , diagonale del parallelogramma, è la somma dei due vettori. Viceversa, partendo da  $\vec{V}$ , è possibile definire i due vettori  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$ , ottenendo la scomposizione del vettore lungo due direzioni assegnate. Se i due vettori vengono rappresentati in un piano cartesiano (per esempio a tre dimensioni), proiettandoli sugli assi si ottengono le componenti lungo gli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Le componenti del *vettore somma* sono le somme delle rispettive componenti di  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$ .

Per calcolare la **somma di più vettori** si utilizza la proprietà associativa: si sommano con la regola del parallelogramma i vettori a due a due, poi le loro risultanti ecc. fino ad avere la somma finale.

## Differenza di vettori

La differenza fra due vettori  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$  si ottiene sommando a  $\vec{V}_1$  l'opposto di  $\vec{V}_2$ :  $\vec{V}_1 - \vec{V}_2 = \vec{V}_1 + (-\vec{V}_2)$ .

## I vettori: la moltiplicazione

Vediamo innanzitutto il **prodotto di un vettore per uno scalare**.

Nel mondo reale è l'equivalente della locuzione "raddoppiare la velocità" ( $2 \times \vec{V}_1$ ). Il prodotto è un vettore con uguali verso e direzione e come modulo il prodotto dello scalare per il modulo di  $\vec{V}_1$ .

Non si deve confondere l'operazione di moltiplicazione fra un vettore e uno scalare con il prodotto scalare di due vettori.

Il **prodotto scalare**  $V$  di  $\vec{V}_1$  per  $\vec{V}_2$  (indicato come  $\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2$ , si legge " $V_1$  scalare  $V_2$ ") è uno scalare che ha come modulo il prodotto fra il modulo di  $\vec{V}_1$  e la proiezione di  $\vec{V}_2$  nella direzione di  $\vec{V}_1$ . Richiamando concetti trigonometrici,  $V_1 = V_1 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha$ , dove  $\alpha$  è l'angolo fra i due vettori.

Il **prodotto vettoriale** fra  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$  ( $\vec{V}_1 \times \vec{V}_2$ , letto come " $V_1$  vettore  $V_2$ ") è un vettore  $\vec{V}$  che ha come modulo l'area del parallelogramma con lati  $\vec{V}_1$  e  $\vec{V}_2$  e direzione perpendicolare al piano del parallelogramma; per trovare il verso del

prodotto vettoriale si ricorre alla **regola della mano destra**: si dispone il pollice nella direzione e nel verso del primo vettore e l'indice nella direzione e nel verso del secondo vettore. Distendendo il dito medio perpendicolarmente a pollice e indice, si ha il verso cui punta il prodotto. Trigonometricamente, il modulo  $V$  risulta ( $\alpha$  è l'angolo fra i due vettori):

$$V = V_1 \cdot V_2 \sin \alpha$$

## Cinematica

La **cinematica** è la branca della meccanica che si occupa dello studio del **moto dei corpi**, senza tener conto delle cause che lo producono. Gli elementi fondamentali, studiati dalla cinematica con l'analisi matematica, sono la **velocità**, lo **spostamento**, il **tempo**, l'**accelerazione**.

Per studiare il moto di un corpo si procede con la definizione di un **sistema di riferimento** all'interno del quale il moto del corpo, usualmente considerato puntiforme, viene studiato in base alla sua traiettoria.

In fisica esistono molti sistemi di riferimento; il più semplice è quello costituito da **assi cartesiani** in due (piano) o tre dimensioni (spazio); gli assi sono perpendicolari fra loro e hanno nell'origine (indicata usualmente con O) il punto comune. Grazie a questo sistema di riferimento, la posizione del corpo puntiforme può essere rappresentata dalle sue coordinate che sono la proiezione della posizione del punto sui vari assi. Scriveremo così, per esempio, che le coordinate del punto P nel piano  $x, y$  sono 2 e 3 e indicheremo la posizione con P(2,3).

Se il punto si muove, descrive una traiettoria che può essere espressa come una funzione del tempo; le sue coordinate sono (nel piano) funzioni del tempo del tipo  $x(t)$  e  $y(t)$ ; per esempio, se un punto parte da una posizione (2,3) e si muove parallelamente all'asse delle  $x$ , dopo un'unità di tempo, potrebbe essere nella posizione (4,3): significa che nell'unità di tempo si è spostato di due unità spaziali (nella pratica quotidiana, per esempio, si è spostato in un secondo di 2 cm).

## Moto rettilineo

Il moto più semplice è quello **rettilineo**, tipico del punto che si muove con traiettoria rettilinea (per esempio lungo l'asse delle  $x$ ); in questo caso lo studio del moto è semplificato perché basta studiare la variazione dell'unica coordinata. La **posizione** è rappresentata da un vettore che ha come direzione quella della retta lungo cui avviene il moto, come verso quello del senso del movimento del punto e come intensità la distanza dall'origine del sistema di riferimento.

La **velocità** è una grandezza fisica vettoriale che misura la rapidità di movimento di un corpo, definita come rapporto tra lo spazio percorso e l'intervallo di tempo impiegato a percorrerlo (*velocità media*). Quando l'intervallo di tempo diventa infinitesimo si parla di *velocità istantanea*.

In altri termini, se si considera il punto che si muove di moto rettilineo da un punto  $x_1$  in cui si trova al tempo  $t_1$  a un punto  $x_2$  cui giunge al tempo  $t_2$ , il rapporto

$$v_m = (x_2 - x_1) / (t_2 - t_1)$$

è la velocità media che può anche essere indicata come il rapporto fra la variazione di spazio  $\Delta x$  divisa per la variazione di tempo  $\Delta t$  ( $\Delta x / \Delta t$  è detto *rapporto incrementale*). Se al variare del tempo il rapporto incrementale non cambia, il moto è detto **uniforme** (la velocità media è sempre la stessa). La velocità può essere espressa come un vettore  $\bar{v}$  avente come direzione quella del moto, come verso quello del senso del movimento e come intensità la velocità media.

## Moto rettilineo uniforme

Nel **moto rettilineo uniforme** la velocità ( $v$ ) può essere espressa come lo spazio percorso ( $s$ ), diviso il tempo ( $t$ ) impiegato a percorrerlo. Per fissare le idee è il caso di un'auto che si muove lungo una strada rettilinea a velocità costante. Se la velocità è di 50 km/h, in tre ore percorrerà 150 km. Quindi le leggi del moto rettilineo uniforme sono:

- $v = s/t$
- $s = vt$

Come unità di misura nel Sistema Internazionale (SI) si usa il **metro** per lo spazio e il **secondo** per il tempo, quindi la velocità si esprime in m/s (metri al secondo).

## Moto rettilineo non uniforme

Cosa accade se la nostra auto (come accade nella realtà), pur procedendo in linea retta, non si muove a velocità costante? In questo caso, considerati due intervalli di tempo diversi, lo spazio percorso può essere diverso.

Per studiare la velocità di un tale moto si definisce la **velocità istantanea**; dal punto di vista matematico, si considera il tempo  $t_2$  sempre più vicino a  $t_1$ , cioè si considera il limite del rapporto incrementale al tendere di  $t_2$  a  $t_1$  ( $\Delta t$  tende a zero); l'analisi matematica ci dice che tale limite è la derivata della funzione spazio  $s(t)$  rispetto al tempo e si indica con

$$v = \frac{ds}{dt}$$

Si consideri un'auto che parte e raggiunge i 100 km/h in 11 s. La sua velocità cresce dalla velocità iniziale (che è nulla). Analogamente a quanto fatto per la velocità, si può definire come **accelerazione media** il rapporto

$$a_m = (v_2 - v_1) / (t_2 - t_1) = \Delta v / \Delta t$$

Nel Sistema internazionale l'accelerazione viene misurata in **m/s<sup>2</sup>** (metri al secondo al quadrato) perché s'intende la variazione di velocità di 1 m/s in un secondo.

Analogamente a quanto fatto per la velocità, si definisce come **accelerazione istantanea** la derivata della funzione velocità  $v(t)$  rispetto al tempo:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Si noti che, se l'accelerazione è costante,  $a = v/t$ , oppure  $v = at$ .

## Moto rettilineo uniformemente accelerato

Supponiamo che l'accelerazione sia costante e che il punto parta con una velocità nulla all'inizio del suo moto e raggiunga la velocità finale  $v_f$ . Facendo la media fra velocità iniziale (0) e velocità finale, si trova che la velocità media è uguale a  $v_f/2$ . Se riconduciamo il moto in questione a quello di un moto rettilineo uniforme, con una velocità costante pari alla velocità media che abbiamo trovato, applicando la relativa legge del moto uniforme dove  $s = vt$ , otteniamo

$$s = \left( \frac{v_f}{2} \right) t$$

Poiché  $v = at$ , avremo

$$s = \frac{a t^2}{2}$$

Analogamente, nel caso in cui la velocità iniziale non fosse nulla, ma  $v_0$  e il punto si trovasse in un punto  $s_0$ , rifacendo lo stesso percorso si troverebbe che

$$s = \frac{a t^2}{2} + v_0 t + s_0$$

che nel piano cartesiano ( $t, s$ ) è una parabola.

## Moti curvilinei

Ovviamente la traiettoria rettilinea è una semplificazione del concetto più generale di traiettoria lungo una curva. Come tutti sanno, se una macchina effettua una curva a grande velocità, essa tende a uscire per la tangente. Questo perché in un **moto curvilineo** la **velocità istantanea** è un vettore tangente alla traiettoria con verso il senso del movimento.

Nel caso dell'accelerazione le cose sono più complesse. L'accelerazione fa muovere il punto più o meno velocemente lungo la traiettoria, ma nello stesso tempo gli permette di seguire una traiettoria curvilinea. Tale accelerazione ha due componenti:

- l'accelerazione **centripeta**, diretta verso il centro di curvatura della traiettoria, cioè verso il centro del cerchio che meglio si adatta alla traiettoria nel punto considerato;
- l'accelerazione **tangenziale**, diretta lungo la tangente alla traiettoria che permette al punto di modificare il valore della sua velocità tangenziale.

Applicando il teorema di Pitagora (le due accelerazioni sono perpendicolari fra di loro) si ottiene che:

$$a = \sqrt{a_c^2 + a_t^2}$$

## Moto circolare uniforme

Se la traiettoria è una circonferenza di centro  $O$  e raggio  $r$  e il punto si muove con velocità costante, il moto si dice **circolare uniforme**. Il **periodo** è il tempo impiegato dal punto a percorrere un giro della circonferenza, mentre la **frequenza** è il numero di giri che il punto compie nell'unità di tempo (un secondo). Vale la relazione  $f = 1/T$  dove  $f$  è la frequenza e  $T$  è il periodo. Ovviamente  $T = 1/f$ .

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della frequenza è l'**hertz**, con  $1 \text{ Hz} = \text{s}^{-1}$ .

Poiché la velocità è costante e in un periodo il punto compie un tratto lungo  $2\pi r$ , dividendo lo spazio per il tempo si ottiene che la velocità costante è:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

cioè  $v = 2\pi r f$ .

Da un punto di vista vettoriale, la direzione della velocità è quella della tangente alla circonferenza nel punto considerato e il verso è quello del senso del moto. Si può anche definire la velocità angolare  $\omega$  come rapporto tra l'angolo al centro e il tempo impiegato dal raggio vettore a spazzare tale angolo. Vale la relazione  $\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} r$ , che si comprende considerando che in un periodo il punto compie un angolo pari a  $2\pi$ .

La definizione dell'accelerazione del punto può essere compresa notando che il vettore velocità resta costante in intensità, ma con una direzione che continua a variare, essendo uguale a quella della tangente. Nel moto circolare uniforme:

- la componente tangenziale dell'accelerazione risulta nulla;
- la componente centripeta (così detta perché punta verso il centro) risulta  $a = 4\pi^2 r / T^2$ , cioè  $a = \omega^2 r$ .

## Moto armonico

Il **moto armonico** è il movimento compiuto lungo il diametro di una circonferenza dalla proiezione di un punto che si muove lungo la circonferenza stessa (traiettoria) con velocità costante. Si noti che il moto armonico è un moto rettilineo.

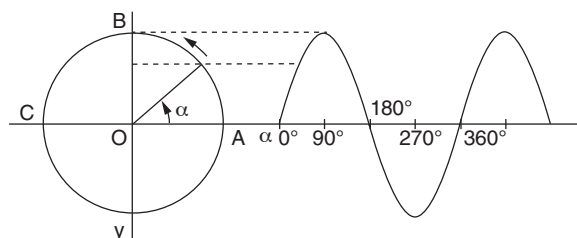


Figura 1 • Il moto armonico

Immaginiamo il movimento del punto che parte da A, arriva in B e poi passa in C. Poiché si muove a velocità costante sulla circonferenza, la velocità della sua proiezione sul diametro varierà: sarà minima in A o in C e massima in B, dipende dalla direzione della tangente alla circonferenza;

quando questa è (quasi) parallela al diametro, la proiezione si muoverà più velocemente (pensiamo che se fosse perpendicolare, la proiezione del punto sarebbe sempre nella stessa posizione sul diametro e quindi la velocità sarebbe nulla). La velocità del punto oscilla fra due valori (massimo e minimo), infatti il moto della proiezione risulta accelerato dagli estremi verso il centro, decelerato dal centro verso gli estremi. Infatti, il grafico del moto armonico è una sinusoide la cui **ampiezza**  $A$  dipende dal raggio della circonferenza e da un **periodo** che è il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa; la **frequenza** (sempre l'inverso del periodo) è il numero di oscillazioni compiute nell'unità di tempo. La legge del moto armonico può essere desunta da semplici considerazioni trigonometriche ed è (semplificata nel caso in cui il punto parta dalla posizione A sull'asse della  $x$ ; le coordinate di A sono  $A, 0$ , dove  $A$  è l'ampiezza del moto, pari al raggio della circonferenza):

$$x = A \cos(\omega t).$$

La grandezza  $\omega$  (che nel moto circolare uniforme era la velocità angolare) nel moto armonico prende il nome di **pulsazione**. Ricordando la definizione del moto circolare uniforme, l'angolo  $\alpha$  formato dal raggio che raggiunge il punto e l'asse delle  $x$  è uguale a  $\omega t$ ;  $\omega = 2\pi/T$ .

Se, anziché partire da A, partisse da un'altra posizione, il raggio in quel punto formerebbe un angolo  $\varphi_0$  con la direzione orizzontale. La legge oraria diventa:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$\omega t + \varphi_0$  si chiama **fase**, mentre  $\varphi_0$  si chiama **costante di fase** (o **fase iniziale**).

Derivando rispetto al tempo una e due volte, si ottengono la **velocità** e l'**accelerazione** del moto armonico:

$$\begin{aligned} v &= -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0) \\ a &= -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) \end{aligned}$$

Sembra un caso molto astratto, ma il moto armonico è molto importante in fisica (esempi di tale moto si trovano nel **pendolo** e nella **molla**).

## Dinamica

La **dinamica** è la branca della meccanica che si occupa del moto dei corpi in relazione alle cause che lo provocano. Le prime nozioni di dinamica vennero elaborate da Galileo Galilei, anche se il contributo più significativo si ebbe da I. Newton.

Per studiare le cause, la dinamica introduce il concetto di **forza** applicato al punto e, più in generale, delle azioni che il punto subisce durante il suo moto.

## La forza

In fisica la **forza** è la causa che tende ad alterare lo stato di quiete o di moto di un corpo o a produrre una deformazione dei vincoli che impediscono il movimento del corpo. Si tratta di una grandezza vettoriale, la cui unità di misura nel

Sistema Internazionale è il **newton** (N). Fu infatti I. Newton a definire, in dinamica, la causa del moto, enunciando le tre leggi fondamentali e introducendo il concetto di **azione a distanza**.

In epoca moderna, al concetto di azione a distanza è stato opposto quello delle **teorie di campo**: secondo queste teorie, le forze esercitate su un corpo sono l'azione sul corpo di un campo di forze che pervade tutto lo spazio, generato da tutte le sorgenti di quella forza. In natura esistono quattro tipi di forze considerate fondamentali e generatrici di tutte le altre: si tratta delle forze **gravitazionale** (comune a tutta la materia, tutti i corpi si attraggono), **elettromagnetica** (prodotta dalle cariche elettriche), **nucleare debole** (responsabile della radioattività) e **nucleare forte** (nel nucleo tiene insieme protoni e neutroni).

Quando un corpo è sottoposto a una o più forze, può variare la sua velocità, ma, se le forze si annullano a vicenda, potrebbe anche rimanere fermo. Poiché la forza è un vettore, l'azione di più forze si calcola con la regola della somma di vettori e la forza che si ottiene è detta **risultante**.

## Primo principio della dinamica

Questa legge è anche detta **principio d'inerzia**. Afferma che *ogni corpo tende a mantenere il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a quando non intervengono forze esterne a modificarne lo stato*.

Su un campo da calcio, il pallone resta fermo finché non gli si dà un calcio. Il primo principio rende conto anche del fatto che il pallone, per esempio, dopo una trentina di metri si ferma. Deve esistere una forza che si è opposta al movimento impresso dal calcio iniziale: questa forza è l'**attrito** con la superficie del terreno di gioco (forza che nel vuoto non ci sarebbe).

## Secondo principio della dinamica

La seconda legge della dinamica (detta anche **principio di proporzionalità**) afferma che *l'accelerazione è proporzionale alla forza e la costante di proporzionalità è la massa*.

Ciò si esprime con l'uguaglianza  $a = F/m$  che in forma vettoriale si scrive usualmente come:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Come si vede, se si applica la stessa forza a due corpi diversi, quello con massa minore accelera di più; se la massa del primo corpo è doppia rispetto a quella del secondo, l'accelerazione del primo corpo sarà la metà di quella del secondo.

La **massa** (simbolo  $m$ , detta anche *massa inerziale*) rappresenta la misura dell'inerzia (la tendenza di un corpo materiale a mantenere il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme) di un corpo.

Nel Sistema Internazionale, l'unità di misura della massa è una delle sette unità fondamentali da cui derivano tutte le altre. All'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure, a Sèvres, è conservato un cilindro di platino-iridio (una lega molto stabile nel tempo) che viene assunta come l'unità di

misura campione della massa (**chilogrammo** o anche chilogrammo-massa) e indicata con il simbolo **kg**.

Applicando il secondo principio della dinamica, l'unità di misura della forza è il **newton** (N) che è la forza che si deve applicare a una massa di un kg per imprimerle un'accelerazione di  $1 \text{ m/s}^2$ . Lo strumento di misurazione statica delle forze è il **dinamometro**, inventato a metà del XVIII sec. da Le Roy. I tipi più semplici sono considerati quelli elastici, costituiti generalmente da una molla elicoidale: la misura della forza è data dalla deformazione elastica della molla.

## La forza di gravità

La **forza di gravità** è la forza di accelerazione che agisce su tutti i corpi sottoposti al campo gravitazionale di un pianeta. In virtù di tale forza, qualsiasi corpo tende a cadere verticalmente verso la superficie del pianeta stesso. La forza di gravità è regolata dalle leggi della gravitazione universale, modificate dalla forza centrifuga prodotta dalla rotazione di ogni singolo corpo celeste. Il valore della forza centrifuga della Terra diminuisce l'accelerazione di gravità (usualmente indicata con  $g$ ) di un corpo posto all'equatore di un valore pari a  $1/289$ , mentre non ha alcun effetto in corrispondenza dei poli. L'accelerazione di gravità terrestre, oltre a essere direttamente proporzionale alla latitudine, diminuisce anche con l'altitudine; misurata a livello del mare e a  $45^\circ$  di latitudine ha un valore di circa  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Sulla Terra il peso corrisponde alla forza di gravità, proporzionale alla massa del corpo in questione; infatti si può scrivere:

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

In altri termini, nel vuoto, una piuma o una palla di piombo, lasciate cadere da una certa altezza, arriverebbero al suolo nello stesso istante. Il fatto che la palla arrivi prima, dipende dalla resistenza dell'aria. Ricordando la legge del moto uniformemente accelerato si trova che lo spazio percorso dall'oggetto che cade è:

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

Pertanto, nel vuoto un oggetto che cade da 490 m arriverà a terra dopo circa 10 secondi:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}}$$

Si noti infine che, mentre la massa è uno scalare, il peso è un vettore.

## Terzo principio della dinamica

La terza legge della dinamica (detta anche **principio di azione e reazione**) afferma che *a ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria*.

Da un punto di vista pratico, equivale ad affermare che se un corpo A esercita una forza su un corpo B, allora il corpo B esercita su A una forza uguale e contraria.

Mentre i primi due principi prendevano in considerazione le forze che agiscono su un corpo, il terzo studia le forze che agiscono su due corpi. Riprendendo l'esempio del calciatore che batte una punizione e dà un calcio al pallone, il terzo principio ci dice che, sì, il pallone avanza, ma esercita una forza uguale e contraria sul giocatore. Il secondo principio ci dice che, essendo la massa del pallone molto minore rispetto a quella del calciatore, lo spostamento all'indietro del calciatore è minimo rispetto alla traiettoria che viene impressa al pallone. Stesso discorso per il rinculo di un'arma, solo che qui è più evidente lo spostamento all'indietro del tiratore.

## Forze apparenti

Una **forza apparente** è una forza che un osservatore solidale con un sistema di riferimento non inerziale (cioè che si muove di moto non rettilineo uniforme rispetto a un altro sistema di riferimento inerziale, ruotando o accelerando rispetto a esso) vede come agente, al pari delle altre forze (forze reali); essa non è provocata da un'interazione fisica diretta, ma nasce dall'accelerazione del sistema di riferimento medesimo. Una forza apparente è cioè una forza che agisce su un corpo anche se non vi viene applicata direttamente.

Coerentemente con il secondo principio ( $F = ma$ ), le forze apparenti sono proporzionali alle masse e alle accelerazioni dei corpi su cui agiscono.

Fra le forze apparenti più note vi sono la **forza centrifuga** e la **forza di Coriolis**.

Si consideri un sasso applicato a una fune che un conduttore fa ruotare intorno alla propria testa con un moto circolare a velocità costante. Ricordando le leggi del moto circolare uniforme, avremo un'accelerazione diretta verso il centro che corrisponde all'azione della forza centripeta secondo la relazione  $\vec{F} = m\vec{a}$ . In modulo, avremo che  $F = m\omega^2 r$ .

Questa forza fa muovere il sasso attorno al conduttore. Il conduttore osserverà quindi la forza centripeta che fa ruotare il sasso attorno a lui.

La cinematica e la dinamica studiano il moto dei corpi in un sistema di riferimento inerziale, ossia in un sistema di riferimento che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema ritenuto inerziale (quello rappresentato dalle stelle fisse). Un sistema solidale con il corpo che curva (il sasso) è di tipo non inerziale: in quest'ultimo si manifestano delle forze apparenti, legate all'inerzia dei corpi, ossia alla loro propensione a non curvare, a mantenere cioè il moto rettilineo uniforme. Un osservatore sul sasso non osserverà alcuna forza centripeta, in quanto solidale con il sasso, ma vedrà il conduttore fermo, soggetto a una reazione vincolare che lo mantiene solidale con il sasso, misurerà una forza che tende a spingere i corpi radialmente verso l'esterno (infatti, se il conduttore rilascia la fune, il sasso schizzerà secondo la tangente alla traiettoria nel punto di rilascio). Tale forza è la forza centrifuga (che in modulo è uguale alla forza centripeta).

Un altro semplice esempio di forza centrifuga si ha nel caso in cui un passeggero di un'auto viene spinto verso l'esterno quando l'auto curva bruscamente.

La forza di Coriolis è invece la forza apparente cui è soggetto un corpo che si muove sulla superficie terrestre, dovuta al contemporaneo movimento di rotazione della Terra attorno al suo asse con velocità angolare costante. L'effetto della forza di Coriolis dipende dalla latitudine e nel nostro emisfero tende a far deviare verso destra (verso sinistra nell'emisfero sud) un oggetto (compresi venti e acque degli oceani).

## Gli stati di aggregazione della materia

La fisica e la chimica si incontrano quando prendono in esame lo **stato di aggregazione** della materia che può presentarsi agli stati gassoso, liquido o solido. Nonostante siano fisici quei fenomeni che spiegano l'ebollizione, la fusione ecc., è anche la chimica generale che tende a occuparsene (pensiamo alle leggi dei gas, alla teoria cinetica ecc.), pertanto rimandiamo alla sezione *Chimica* per la trattazione.

In questa sede ricordiamo solo che la densità  $\rho$  di un corpo è il rapporto fra la massa e il volume:  $\rho = m/V$ .

## L'attrito

L'**attrito** è la forza che ha luogo tra corpi a contatto attraverso superfici scabre e che si pone come causa della resistenza al moto; si palesa all'inizio e nel corso del moto relativo di due corpi. Si chiamano forze d'attrito **statico** quelle che sorgono tra superfici di contatto ferme, tipiche del tentativo di mettere in moto un corpo fermo. Le forze di attrito **dinamico** sono quelle che intervengono quando si vuole mantenere in moto un oggetto in movimento: l'attrito **radente** è proprio di un corpo che durante il moto striscia su un altro corpo; se un corpo rotola su un altro, si parla di attrito **volvente** che, a sua volta, si può dividere in attrito di **rotolamento** e attrito di **giro**.

Per esempio, nel caso di una pesante scatola che viene spinta su un tavolo, la forza di attrito radente (parallela al piano del tavolo e di verso opposto al moto),  $F_a$ , è:

$$F_a = \mu_r F_n$$

dove  $F_n$  è il modulo della risultante delle forze esterne che agiscono perpendicolarmente alla superficie di contatto tra scatola e tavola, cioè il peso, e  $\mu_r$  è una costante di proporzionalità (**coefficiente di attrito radente**) che dipende dalla natura delle superfici a contatto. Si noti che in caso di attrito statico (i corpi sono a riposo, cioè si deve mettere in moto la scatola sul tavolo), il coefficiente di attrito statico è leggermente superiore a quello radente, cosa comprensibile, visto che si deve vincere l'inerzia iniziale.

Nel caso di attrito volvente (una pallina che rotola su un tavolo) il modulo della forza di attrito è sempre inferiore rispetto al caso dell'attrito radente, risulta ancora direttamente proporzionale alla componente perpendicolare del peso, ma è anche inversamente proporzionale al raggio ( $r$ ) del corpo che rotola:

$$F_a = \frac{\mu_v F_n}{r}$$

dove  $\mu_v$  è il coefficiente di attrito volvente.