Piani di Orientamento e Tutorato
Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali

Compendio di Fisica

Elena Cerboneschi

Indice generale

1 Grandezze fisiche e unità di misura

Disse il fisico inglese Lord William Thomson Kelvin nel XIX secolo: «Quando siete capaci di misurare una cosa ed esprimerla per mezzo di numeri, voi conoscete effettivamente qualcosa.»

Si definisce **grandezza fisica** qualsiasi caratteristica di un oggetto o di un evento che possa essere misurata.

Lunghezza, massa, peso e temperatura sono esempi di grandezze fisiche.

Se si vuole quantificare una grandezza fisica, si deve misurare il suo valore in rapporto a una prescelta unità.

L'**unità di misura** di una grandezza è una ben definita quantità di tale grandezza che viene assunta come unitaria.

Le unità di misura che corrispondono, nell'ordine, alle grandezze fisiche sopra elencate sono il metro, il kilogrammo, il newton, il kelvin.

Misurare una grandezza fisica significa associare alla grandezza un numero, che esprime il suo rapporto con l'unità di misura.

Esempio. Indicando con *m* la massa di una valigia e volendo dire che essa vale 11 kilogrammi, devi scrivere:

$$m = 11 \text{ kg}$$

Non è corretto, invece, scrivere il simbolo dell'unità davanti al numero.

1.1 Grandezze fisiche fondamentali e derivate nel Sistema Internazionale

Per facilitare lo scambio di informazioni scientifiche e tecniche, è preferibile esprimere le misure delle varie grandezze fisiche usando un insieme di unità che sia adottato in tutto il mondo. Questo insieme di unità è denominato **Sistema Internazionale** e abbreviato in SI.

Il SI ha fissato un certo numero di grandezze fisiche non collegate tra loro, dette **grandezze fondamentali**, e le rispettive unità di misura; in funzione di tali grandezze possono essere espresse, mediante relazioni matematiche, tutte le altre grandezze fisiche, chiamate **grandezze derivate**.

Nel tempo il SI si è evoluto per adeguarsi alle esigenze del progresso scientifico. L'ultima modfica, entrata in vigore il 20 maggio 2019, è stata la **ridefinizione delle unità fondamentali** a partire dal valore di alcune **costanti fisiche**. Questa ridefinizione ha cambiato il modo di ottenere le unità di misura nei laboratori specializzati, ma non ha cambiato i valori delle unità: un kilogrammo è sempre un kilogrammo, un metro è sempre un metro eccetera.

Ciascuna grandezza fondamentale è indipendente da ogni altra, ma le definizioni delle loro unità sono interdipendenti (TABELLA 1).

TABELLA 1 *Grandezze fisiche fondamentali del SI.*

Grandezza	Unità SI	Abbreviazione	Definizione dell'unità
tempo	secondo	s	È posta uguale a 1 s la durata di 9 192 631 770 periodi di un particolare fenomeno oscillatorio che avviene negli atomi di Cesio-133.
lunghezza	metro	m	È posta uguale a 1 m la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in 1/299 792 458 di un secondo. Questa definizione presuppone di fissare la **velocità della luce nel vuoto** al valore esatto $c = 299\ 792\ 458\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$
massa	kilogrammo	kg	Prima del 20 maggio 2019 era posta uguale a 1 kg la massa di un campione di platino-iridio conservato a Sèvres, in Francia. Oggi il kilogrammo è definito a partire dalla cosiddetta **costante di Planck** h, a cui è assegnato il valore esatto $h = 6{,}626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$ dove il metro e il secondo sono definiti come specificato sopra.
temperatura	kelvin	K	La temperatura unitaria 1 K è definita a partire dalla cosiddetta **costante di Boltzmann** k_B, fissata al valore $k_B = 1{,}380\ 649 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$
intensità di corrente elettrica	ampere	A	L'unità di 1 A è definita a partire dalla **carica elementare** e (valore assoluto della carica dell'elettrone), il cui valore è fissato esattamente a $e = 1{,}602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}\ \text{A} \cdot \text{s}$
quantità di sostanza	mole	mol	È posta uguale a 1 mol la quantità di sostanza che contiene $6{,}022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$ entità elementari (molecole o atomi). Questo numero è il valore fissato per la **costante di Avogadro** N_A, espressa nell'unità mol^{-1}: $N_A = 6{,}022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$
intensità luminosa	candela	cd	Vale 1 cd l'intensità luminosa di una sorgente che emette luce della frequenza di $540 \cdot 10^{12}$ Hz e la cui potenza, in un'unità di angolo solido, è 1/683 di un watt.

Insieme alle grandezze fondamentali, sono necessarie altre grandezze per descrivere e misurare oggetti ed eventi. Quelle elencate nella **TABELLA 2** sono derivate dalle grandezze fondamentali mediante operazioni di moltiplicazione o divisione.

TABELLA 2 *Alcune grandezze fisiche derivate e le loro unità di misura.*

Grandezza	Unità SI	Abbreviazione	Relazione con le unità fondamentali
area	metro quadrato	m^2	
volume	metro cubo	m^3	
densità	kilogrammo fratto metro cubo	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
frequenza	hertz	Hz	$1\ \text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$
velocità	metro al secondo	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	
accelerazione	metro al secondo quadrato	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	

forza	newton	N	$1\ N = 1\ \frac{kg \cdot m}{s^2}$
pressione	pascal	Pa	$1\ Pa = 1\ \frac{N}{m^2} = 1\ \frac{kg}{m \cdot s^2}$
lavoro, energia, calore	joule	J	$1\ J = 1\ N \cdot m = 1\ \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
potenza	watt	W	$1\ W = 1\ \frac{J}{s} = 1\ \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$
carica elettrica	coulomb	C	$1\ C = 1\ A \cdot s$
tensione elettrica	volt	V	$1\ V = 1\ \frac{J}{C} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A}$
resistenza elettrica	ohm	Ω	$1\ \Omega = 1\ \frac{V}{A} = 1\ \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A^2}$

1.2 Conversione tra unità di misura

Le unità utilizzabili per esprimere la misura di una data grandezza fisica sono più di una, ma a grandezze fisiche diverse corrispondono unità di misura diverse. La grandezza fisica «lunghezza» può essere misurata in metri, in centimetri, in kilometri, in anni-luce ecc., ma non in kilogrammi (unità di misura della massa) o secondi (unità di tempo).

Per passare da un'unità a un'altra devi moltiplicare il valore della grandezza per l'appropriato **fattore di conversione**. Un fattore di conversione è un rapporto derivato da un'uguaglianza ed è sempre uguale a 1.

Considera che un'ora (1 h) è uguale a tremilaseicento secondi:

$$1\ h = 3600\ s$$

Poiché il rapporto tra due quantità uguali è sempre uguale a 1, puoi scrivere:

$$\frac{1\,h}{3600\,s} = 1 \quad e \quad \frac{3600\,s}{1\,h} = 1$$

Questi rapporti costituiscono due fattori di conversione.

Moltiplicare per un fattore di conversione (cioè per 1) non cambia il valore di una grandezza, ma cambia solo l'unità di misura.

Esempio. Supponi che la durata di un viaggio sia di 4 h. Puoi convertire questa durata in secondi moltiplicandola per il corretto fattore di conversione:

$$(4\ \cancel{h})\frac{3600\ s}{1\ \cancel{h}} = 14\ 400\ s$$

I due simboli h si elidono perché sono uno al numeratore e l'altro al denominatore.

Per derivare il fattore di conversione tra due unità di misura, puoi partire dalla relazione che lega le due unità (TABELLA 3). Ricorda di porre al numeratore l'unità che vuoi ottenere nella risposta e al denominatore l'unità che vuoi cancellare.

TABELLA 3 *Alcune relazioni tra unità di misura.*

Unità di tempo	Relazione
giorno (d) e ora (h)	1 d = 24 h
ora e minuto (min)	1 h = 60 min
ora e secondo	1 h = 3600 s
secondo e millisecondo (ms)	1 s = 1000 ms

Unità di lunghezza	Relazione
kilometro (km) e metro	1 km = 1000 m
metro e decimetro (dm)	1 m = 10 dm
metro e centimetro (cm)	1 m = 100 cm
centimetro e millimetro (mm)	1 cm = 10 mm
metro e millimetro	1 m = 1000 mm
Unità di massa	**Relazione**
kilogrammo e grammo (g)	1 kg = 1000 g
kilogrammo ed ettogrammo (hg)	1 kg = 10 hg
grammo e milligrammo (mg)	1 g = 1000 mg
kilogrammo e milligrammo	1 kg = 1 000 000 g

L'unità di misura SI dell'area è il **metro quadrato** (m^2), cioè il metro moltiplicato per sé stesso. Poiché il decimetro è 10 volte più piccolo del metro, il decimetro quadrato (dm^2) è $10 \cdot 10 = 100$ volte più piccolo del m^2; analogamente, il centimetro quadrato (cm^2) è 10 000 volte più piccolo del m^2:

$$1\ dm^2 = \frac{1}{100}\ m^2, \qquad 1\ cm^2 = \frac{1}{100}\ dm^2 = \frac{1}{10\,000}\ m^2$$

Perciò, nella conversione tra unità di area si va di 100 in 100.

Esempio. L'area di una pagina di quaderno è 623,4 cm^2, cioè 6,234 dm^2 o 0,06234 m^2.

L'unità di misura SI del volume è il **metro cubo** (m^3); tra le altre unità ci sono il decimetro cubo (dm^3) e il centimetro cubo (cm^3):

$$1\ dm^3 = \frac{1}{1000}\ m^3, \qquad 1\ cm^3 = \frac{1}{1000}\ dm^3 = \frac{1}{1000\,000}\ m^3$$

Queste uguaglianze mostrano che nella conversione tra unità di volume si va di 1000 in 1000.

Il decimetro cubo è chiamato anche litro (L). Un decilitro (dL), un centilitro (cL) e un millilitro (mL) sono, rispettivamente, un decimo, un centesimo e un millesimo di litro:

$$1\ dL = 0{,}1\ L = 0{,}1\ dm^3, \qquad 1\ cL = 0{,}01\ L = 10\ cm^3, \qquad 1\ mL = 0{,}001\ L = 1\ cm^3$$

1.3 Ordini di grandezza e notazione scientifica

Alcune misure sono espresse da numeri molto grandi o molto piccoli. Per esempio, la massa M_T della Terra e la massa m_p di un protone sono circa:

$$M_T = 5\,980\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\ kg$$
$$m_p = 0{,}000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001\,67\ kg$$

Osservando che la massa della Terra, in kilogrammi, è il prodotto dei due numeri

5,98 e 100 000 000 000 000 000 000 000 (ossia 10^{24})

puoi scrivere:

$$M_T = 5{,}98 \cdot 10^{24}\ kg$$

Allo stesso modo, poiché la massa in kilogrammi di un protone è il prodotto tra

1,67 e 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 (ossia 10^{-27})

ottieni:

$$m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ kg$$

Nota che la potenza di 10 utilizzata per esprimere in kilogrammi la massa della Terra (un numero maggiore di 1) ha esponente positivo; quella utilizzata per esprimere in kilogrammi la massa di un protone (un numero minore di 1) ha esponente negativo.
La scrittura di un numero mediante le potenze di 10 è detta **notazione scientifica**.

In notazione scientifica, i numeri sono indicati come prodotto di un numero decimale, maggiore o uguale a 1 ma minore di 10, per un'opportuna potenza di 10.

Nel Sistema Internazionale, la notazione scientifica può essere sostituita da prefissi che denotano determinate potenze di 10. Per esempio, il prefisso «kilo» corrisponde a 10^3, mentre il prefisso «micro» corrisponde a 10^{-6}.
Ciascun prefisso ha una sua abbreviazione (**TABELLA 4**). L'abbreviazione per «kilo» è k e l'abbreviazione per «micro» è μ. Così, 1000 m (mille metri) sono 10^3 m o 1 km (un kilometro), mentre 0,000 001 m (un milionesimo di metro) è 10^{-6} m o 1 μm (un micrometro).

TABELLA 4 *Alcuni prefissi del SI.*

Prefisso	Abbreviazione	Valore	Prefisso	Abbreviazione	Valore
pico	p	10^{-12}	kilo	K	10^3
nano	n	10^{-9}	mega	M	10^6
micro	μ	10^{-6}	giga	G	10^9
milli	m	10^{-3}	tera	T	10^{12}

In fisica è sempre necessario esprimersi in termini quantitativi. Talvolta, però, per poter fare dei confronti immediati o risolvere dei calcoli rapidamente, è sufficiente una stima grossolana dell'entità di una grandezza fisica. In questi casi, tralasciando di determinare il valore preciso della grandezza, ci si limita a considerare il suo *ordine di grandezza*.

L'**ordine di grandezza** di un numero è la potenza di 10 che meglio approssima il numero stesso.

Esempio. Come detto, la massa della Terra è $M_T = 5{,}98 \cdot 10^{24}$ kg. Il fattore 5,98, essendo maggiore di 5, è più vicino a 10 che a 1. Perciò l'ordine di grandezza di M_T è $10 \cdot 10^{24}$ kg, ossia 10^{25} kg.
Esempio. Con procedimento analogo si trova che l'ordine di grandezza della massa del protone, $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg, è 10^{-27} kg. L'ordine di grandezza di una grandezza fisica è ovviamente riferito all'unità di misura prescelta. Cambiando unità di misura, l'ordine di grandezza cambia: in grammi, l'ordine di grandezza della massa del protone è 10^{24} g.

1.4 Analisi dimensionale

La distanza tra due punti, l'altezza di un palo e lo spessore di un mobile sono delle lunghezze. Ciò si esprime con la notazione

$$[\text{distanza}] = [\text{altezza}] = [\text{spessore}] = [l]$$

che si legge: «distanza, altezza e spessore hanno le dimensioni fisiche di una lunghezza».
La scrittura […] significa «dimensioni fisiche di…».
Si indicano con:

- [t] le dimensioni fisiche di un intervallo di tempo;
- [l] le dimensioni fisiche di una lunghezza;
- [m] le dimensioni fisiche di una massa.

Un numero puro (come 2 o $\sqrt{2}$, o anche π) non ha dimensioni fisiche.

Esempio. Per ricavare le dimensioni fisiche dell'area puoi partire dalla formula che dà l'area di una figura geometrica qualunque, per esempio di un triangolo:

$$\text{area} = \frac{1}{2}\,\text{base} \cdot \text{altezza}$$

Ottieni:

$$[\text{area}] = \left[\frac{1}{2}\right][\text{base}]\,[\text{altezza}] = [\text{base}]\,[\text{altezza}] = [l]\,[l] = [l^2]$$

In questo calcolo bisogna sfruttare la relazione $\left[\frac{1}{2}\right] = 1$, che vale perché moltiplicare un'espressione per un numero puro non cambia le dimensioni fisiche dell'espressione, e tenere conto del fatto che la base e l'altezza hanno entrambe le dimensioni fisiche di una lunghezza. Il risultato ottenuto mostra che l'area è *dimensionalmente uguale* a una lunghezza al quadrato.

Esempio. La velocità è il rapporto tra la distanza percorsa e il tempo impiegato:

$$\text{velocità} = \frac{\text{distanza}}{\text{tempo}}$$

Da questa formula ottieni:

$$[\text{velocità}] = \frac{[\text{distanza}]}{[\text{tempo}]} = \frac{[l]}{[t]} = [l]\,[t^{-1}]$$

Quindi la velocità ha le dimensioni fisiche di una lunghezza divisa per un tempo (o di una lunghezza moltiplicata per un tempo elevato alla meno uno).

Le formule che legano le grandezze fisiche devono essere corrette dal punto di vista dimensionale:

- si possono sommare o sottrarre solo quantità con le stesse dimensioni fisiche;
- i due membri di un'uguaglianza devono avere le stesse dimensioni fisiche.

Quando risolvi un problema di fisica, devi sempre controllare le dimensioni fisiche o, in modo equivalente, le unità di misura del risultato. Per esempio, se il problema chiede di determinare una lunghezza e il risultato non è esprimibile in metri, allora nel procedimento hai certamente commesso qualche errore.

1.5 Grandezze scalari e vettoriali

Una **grandezza scalare** è una grandezza fisica completamente specificata da un singolo numero: tale numero misura la grandezza in una data scala, cioè ne esprime il valore rispetto a un'unità di misura appropriata.

La **distanza** è un esempio di grandezza scalare. Infatti, misurare una distanza significa stabilire quanti metri (o millimetri, kilometri ecc.) separano un punto da un altro. Altre grandezze scalari sono l'intervallo di tempo, la massa, l'energia, la temperatura.

Una **grandezza vettoriale** è caratterizzata da:

- un numero non negativo, detto **modulo** o **intensità**, che indica il suo valore rispetto all'unità di misura;
- una **direzione**;
- un **verso** (tra i due versi possibili che vi sono lungo la direzione data).

Uno **spostamento** è una grandezza vettoriale. Definire uno spostamento da un dato punto di partenza *A* significa fornire tutte le informazioni per individuare il punto di arrivo *B*: oltre alla distanza $\overline{AB}$, anche la direzione e il verso lungo cui ci si deve muovere da *A* per arrivare a *B* (per esempio ovest-est).
Anche una **forza** è una grandezza vettoriale. La forza con cui la Terra attrae per gravità un oggetto della massa di 1 kg è caratterizzata da un valore in newton (9,8 N), da una direzione (quella verticale) e da un verso (dall'alto verso il basso). Altri esempi di grandezze vettoriali sono la velocità e l'accelerazione.
Una grandezza vettoriale è rappresentata da un **vettore**, cioè, graficamente, da una freccia. La freccia ha direzione e verso corrispondenti a quelli della grandezza considerata e ha una lunghezza proporzionale al suo modulo, secondo una scala predefinita (**FIGURA 1**).
Le grandezze vettoriali si indicano con una lettera con sopra una freccetta (per esempio, $\vec{s}$ per indicare uno spostamento, $\vec{F}$ per una forza, $\vec{v}$ per una velocità) e il loro modulo con la sola lettera, senza la freccia (rispettivamente *s*, *F*, *v*).

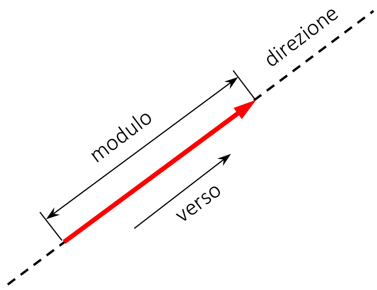


FIGURA 1 *La rappresentazione di un vettore.*

Uno spostamento $\vec{s}_{AB}$ da un punto *A* a un punto *B* e uno spostamento successivo $\vec{s}_{BC}$ da *B* a *C*, sommati assieme, danno lo spostamento totale $\vec{s}_{AC}$ da *A* a *C*. Analogamente, se su uno stesso oggetto agiscono simultaneamente due forze $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, la somma di $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ dà la forza totale a cui è sottoposto l'oggetto.
Per addizionare uno spostamento a un altro o una forza a un'altra bisogna tenere presente che la **somma di due vettori** non dipende solo dal loro modulo, ma anche dalla loro direzione e dal loro verso. Le **FIGURE 2** e **3** illustrano due metodi grafici tra loro equivalenti, detti **regola del parallelogramma** e **metodo punta-coda**, con cui puoi ottenere il vettore somma $\vec{a} + \vec{b}$ di due vettori qualsiasi $\vec{a}$ e $\vec{b}$.

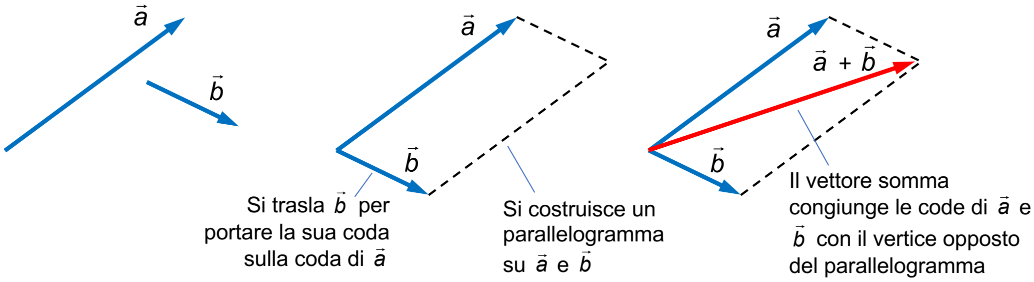


FIGURA 2 *La regola del parallelogramma per l'addizione di due vettori.*

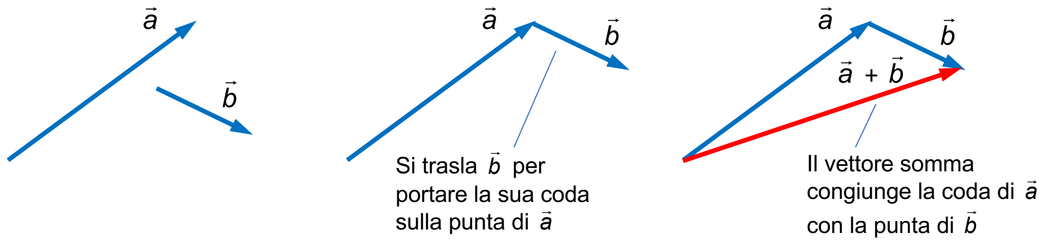
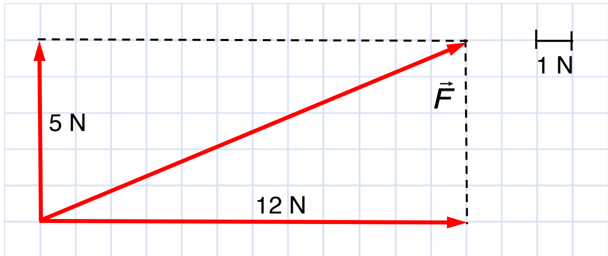


FIGURA 3 *Il metodo punta-coda per l'addizione di due vettori.*

Esempio. I vettori forza $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ qui disegnati sono mutuamente perpendicolari; quindi il parallelogramma costruito su di essi è il rettangolo che ha i moduli F_1 e F_2 delle due forze come lati.



Ottieni il modulo F della forza totale $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ applicando il teorema di Pitagora:

$$F = \sqrt{(5\,\mathrm{N})^2 + (12\,\mathrm{N})^2} = 13\ \mathrm{N}$$

Il **prodotto di un vettore per un numero** è un nuovo vettore, che rispetto al vettore di partenza ha:

- la stessa direzione,
- lo stesso verso o verso opposto a seconda che il numero sia positivo o negativo,
- modulo moltiplicato per il valore assoluto del numero.

Moltiplicando un vettore $\vec{a}$ per −1 si ottiene il **vettore opposto** di $\vec{a}$, di solito indicato con $-\vec{a}$ (**FIGURA 4**).

La **differenza tra due vettori** è il risultato dell'addizione del primo con l'opposto del secondo.

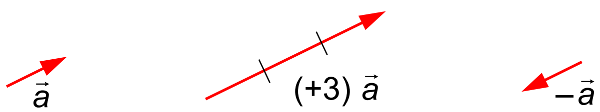
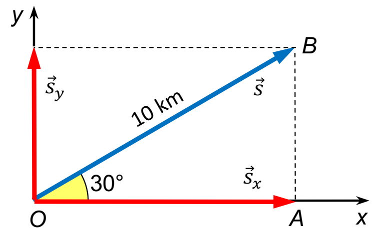


FIGURA 4 *Un vettore, il suo triplo e il suo opposto.*

Dato un vettore su un piano, può essere utile determinare i suoi **vettori componenti** lungo due assi cartesiani. Si chiamano vettori componenti di un vettore $\vec{a}$ lungo gli assi x e y i vettori $\vec{a}_x$ e $\vec{a}_y$ che:

- sono rispettivamente paralleli all'asse x e all'asse y;
- hanno come somma il vettore $\vec{a}$.

Esempio. Qui sotto sono rappresentati un vettore spostamento $\vec{s}$ e i suoi vettori componenti $\vec{s}_x$ e $\vec{s}_y$ lungo due assi cartesiani. Osserva che $\vec{s}_x$ e $\vec{s}_y$ soddisfano le condizioni descritte sopra: sono rispettivamente paralleli agli assi x e y e, sommati assieme, danno $\vec{s}$ per la regola del parallelogramma.



Lo spostamento $\vec{s}$ ha modulo s = 10 km e forma un angolo di 30° con l'asse x. Per determinare i moduli s_x e s_y dei suoi vettori componenti puoi sfruttare le formule di geometria che valgono per il triangolo rettangolo OAB, che ha un angolo interno di 30° e l'ipotenusa di lunghezza nota: $\overline{OB} = s = 10$ km.
In questo particolare triangolo rettangolo, le misure del cateto OA e del cateto AB, rispettivamente adiacente e opposto all'angolo di 30°, sono:

$$\overline{OA} = \frac{\sqrt{3}}{2}\,\overline{OB} = \frac{\sqrt{3}}{2}\,(10\text{ km}) = 8{,}7\text{ km} \qquad \text{e} \qquad \overline{AB} = \frac{1}{2}\,\overline{OB} = \frac{1}{2}\,(10\text{ km}) = 5{,}0\text{ km}$$

Dal disegno puoi notare che il vettore componente $\vec{s}_x$ è lungo come OA e il vettore componente $\vec{s}_y$ è lungo come AB. Perciò i moduli cercati sono:

$$s_x = \overline{OA} = 8{,}7\text{ km} \quad \text{e} \quad s_y = \overline{AB} = 5{,}0\text{ km}$$

2 Meccanica

La **meccanica** è la parte della fisica che descrive e prevede i movimenti dei corpi e determina le condizioni per l'assenza di movimenti.
Uno dei primi ad affrontare lo studio del moto fu **Aristotele**, eminente filosofo dell'antica Grecia, vissuto nel IV secolo a. C. Una sua affermazione (errata) condizionò il pensiero scientifico per circa 2000 anni: secondo Aristotele *gli oggetti in movimento dovevano essere soggetti a forze affinché potessero continuare a muoversi*.
Questa idea, sottoposta alla prova degli esperimenti, fu completamente capovolta nel XVII secolo dallo scienziato pisano **Galileo Galilei**. Dopo aver osservato i moti di sferette ben levigate lasciate rotolare lungo piani inclinati a diversi angoli, egli concluse che ogni oggetto, se già in movimento, continua a muoversi *senza* bisogno di forze.

2.1 Velocità e accelerazione

La **velocità media** v_m è il rapporto tra la distanza d percorsa lungo una determinata traiettoria e l'intervallo di tempo Δt impiegato a percorrerla (la lettera greca Δ, «delta», è spesso usata come simbolo di «intervallo», «variazione», o «differenza»):

$$v_m = \frac{d}{\Delta t}$$

Esempio. Supponi che in un viaggio di 4 h la velocità media di un'automobile sia di 80 km/h. Conoscendo Δt = 4 h e v_m = 80 m/s, dalla definizione precedente puoi ricavare la distanza percorsa d:

$$d = v_m\ \Delta t = (80\ \text{m/s})\ (4\ \text{h}) = 320\ \text{km}$$

Ogni rapporto tra un'unità di distanza e un'unità di tempo può essere usato come unità di misura per la velocità. L'unità del SI è il **metro al secondo** (m/s), ma un'altra unità di uso comune sono i kilometri all'ora. Dalle uguaglianze

$$1\ \text{km} = 1000\ \text{m} \qquad \text{e} \qquad 1\ \text{h} = 3600\ \text{s}$$

si ottengono i seguenti fattori di conversione:

$$\frac{1\,\text{km/h}}{3{,}6\,\text{m/s}} = 1 \qquad \text{e} \qquad \frac{3{,}6\,\text{m/s}}{1\,\text{km/h}} = 1$$

In pratica, per passare da m/s a km/h bisogna dividere per 3,6 e per passare da km/h a m/s moltiplicare per 3,6.

Gli oggetti in movimento subiscono spesso variazioni di velocità. Un'automobile, per esempio, può viaggiare lungo una strada a 50 km/h, rallentare fino a fermarsi a un semaforo rosso, poi riprendere velocità, ma solo fino a 30 km/h a causa del traffico. In ogni istante il conducente può leggere la velocità dell'automobile sul **tachimetro**.

La velocità in un dato istante o, più precisamente, la velocità media in un intervallo di tempo molto piccolo in confronto alla durata del moto è chiamata **velocità istantanea** e indicata con v.

La velocità è una grandezza vettoriale:

quando, oltre al valore istantaneo della velocità, si conoscono anche la direzione e il verso del moto, allora è nota la **velocità vettoriale istantanea** $\vec{v}$.

Il modulo della velocità vettoriale istantanea specifica «quanto velocemente» si svolge il moto; la velocità vettoriale istantanea, nel suo complesso, indica «quanto velocemente» e «in quale direzione e quale verso».

Ogni cosa può sempre essere considerata in movimento. Anche se, per esempio, siamo fermi rispetto alla Terra, ci stiamo muovendo rispetto al Sole (insieme alla Terra) a una velocità di circa 100 000 km/h.

Quando ci riferiamo alla velocità di un oggetto, intendiamo sempre la **velocità relativa** a qualche altro oggetto, preso come **sistema di riferimento**.

Esempio. Immagina di guardare fuori dal finestrino di un aereo e vedere un altro aereo, che vola alla stessa velocità del tuo, su una rotta parallela e in verso opposto. L'aereo che vedi ti apparirà in movimento a velocità doppia. I due aerei hanno velocità di uguale modulo v rispetto alla Terra, ma, poiché essi volano uno incontro all'altro, il modulo della loro velocità relativa è la somma $v + v = 2\ v$.

Se i due aerei volassero nella stessa direzione e nello stesso verso, la loro velocità relativa sarebbe nulla; gli aerei, cioè, sarebbero fermi l'uno rispetto all'altro.

Quando il moto di un oggetto varia, si dice che l'oggetto presenta un'*accelerazione*.

Si definisce **accelerazione** il rapporto tra la variazione della velocità e l'intervallo di tempo in cui si verifica tale variazione.

Per esprimere questa definizione con una formula, si indica con $\Delta\vec{v}$ la variazione del vettore velocità tra due istanti dati: $\Delta\vec{v}$ è il vettore che, addizionato al vettore che rappresenta la velocità nell'istante iniziale, dà il vettore che rappresenta la velocità nell'istante finale.
Allora l'accelerazione $\vec{a}$, che come la velocità è una grandezza vettoriale, è espressa come segue:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

L'unità di misura dell'accelerazione è il rapporto tra l'unità di velocità e l'unità di tempo, cioè nel SI, il **metro al secondo quadrato** (m/s^2).
Percorrendo una curva, un veicolo accelera anche se il valore della sua velocità resta invariato. In questo caso l'accelerazione è dovuta al cambio di direzione.
Si ha un'accelerazione ogni volta che la velocità vettoriale presenta una variazione, o nel valore o nella direzione.

2.2 Moto rettilineo uniforme e uniformemente accelerato

Quando la velocità vettoriale è costante, non mutano nel tempo né il valore della velocità, misurato in m/s, in km/h o in altre unità compatibili, né la direzione del moto. Una direzione costante corrisponde a una linea retta (la traiettoria di un oggetto che non curva). Quindi:
un moto con velocità vettoriale costante è un **moto rettilineo uniforme**, cioè un moto che si svolge in linea retta e che percorre lo stesso numero di metri in ogni secondo di tempo.
La FIGURA 5 illustra il moto rettilineo uniforme di una palla da bowling. La traiettoria della palla è rappresentata da un asse *x* orientato nel verso del moto, sul quale è evidenziato il punto *O* prescelto come punto di riferimento, o *origine*.

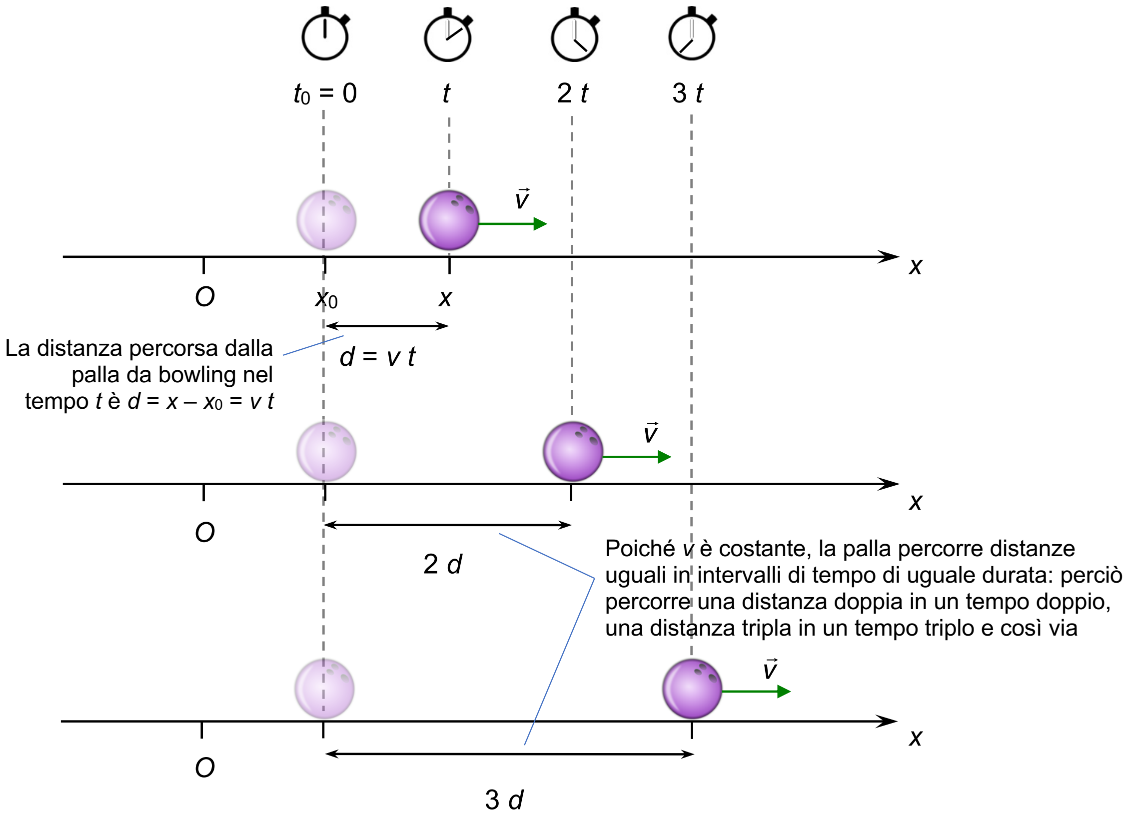


FIGURA 5 *Un moto rettilineo uniforme. In questo tipo di moto la distanza percorsa è direttamente proporzionale al tempo trascorso.*

Se la coordinata della palla è x_0 all'istante iniziale $t_0 = 0$ e x a un istante successivo t, vuol dire che la distanza percorsa dalla palla nell'intervallo di tempo $\Delta t = t - t_0 = t$ è:

$$d = x - x_0$$

Per definizione, la sua velocità v è quindi:

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{x - x_0}{t}$$

Da questa espressione si ricava la **legge oraria del moto rettilineo uniforme**:

$$x = x_0 + v\,t$$

Conoscendo v e la coordinata iniziale x_0, la legge oraria fornisce la coordinata x raggiunta dopo un tempo t qualsiasi.

Un moto che mantiene costante la sua direzione, cioè si svolge lungo una retta, e ha un'accelerazione costante è detto **moto rettilineo uniformemente accelerato**.

In questo tipo di moto l'accelerazione $\vec{a}$ è un vettore parallelo alla traiettoria, altrimenti la velocità $\vec{v}$ cambierebbe direzione e la traiettoria si incurverebbe. In altre parole, l'accelerazione vettoriale $\vec{a}$ e la velocità vettoriale $\vec{v}$ hanno in ogni istante la medesima direzione fissata, che è quella dell'asse x lungo cui avviene il moto.

Perciò, è sufficiente trattare l'accelerazione e la velocità come due grandezze scalari a e v, di valori assoluti uguali, rispettivamente, ai moduli dei vettori $\vec{a}$ e $\vec{v}$ e dotate di segno: positivo a indicare verso concorde con quello dell'asse x e negativo a indicare verso discorde.

Se la velocità è v_0 all'istante iniziale $t_0 = 0$ ed è v a un istante successivo t, cioè se la variazione di velocità (in forma scalare) è $\Delta v = v - v_0$ nell'intervallo di tempo $\Delta t = t - t_0 = t$, si ha:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t}$$

Da questa relazione si ricava la **legge della velocità nel moto rettilineo uniformemente accelerato**, che permette di calcolare la velocità v raggiunta dopo un tempo t dall'istante iniziale:

$$v = v_0 + a\,t$$

Poiché l'accelerazione a è costante, la velocità varia a un ritmo costante (l'accelerazione è infatti la rapidità di variazione della velocità): allora la velocità media v_m in un dato intervallo di tempo è la *media aritmetica* delle velocità istantanee iniziale e finale.

- La velocità iniziale, in $t_0 = 0$, e la velocità finale, in t, sono:

$$v_0 \qquad \text{e} \qquad v = v_0 + a\,t$$

- La velocità media in $\Delta t = t$ è quindi:

$$v_m = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{v_0 + v_0 + a\,t}{2} = v_0 + \frac{a\,t}{2}$$

- Dalla definizione di velocità media, $v_m = \frac{d}{\Delta t} = \frac{d}{t}$, si ricava la distanza percorsa:

$$d = v_m\,t = \left(v_0 + \frac{a\,t}{2}\right)t = v_0\,t + \frac{1}{2}\,a\,t^2$$

Il risultato ottenuto è la **legge oraria del moto rettilineo uniformemente accelerato**. Ponendo $d = x - x_0$, dove x è la coordinata nell'istante t e x_0 la coordinata iniziale, essa diventa:

$$x = x_0 + v_0\, t + \frac{1}{2}\, a\, t^2$$

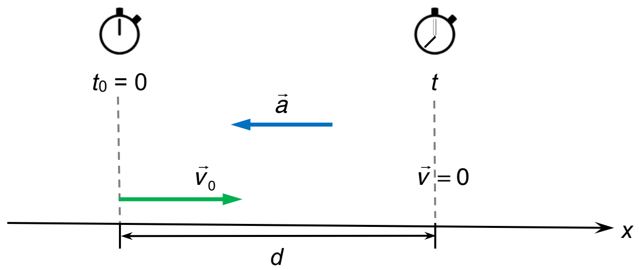
Esempio. Un'automobile parte da ferma con un'accelerazione costante di 2 m/s^2.Rispetto al punto di partenza:

- in 1 s l'automobile si allontana di $d_1 = \frac{1}{2}\, a\, t^2 = \frac{1}{2}$ (2 m/s^2) (1 s)^2 = 1 m;
- in 2 s si allontana di $d_2 = \frac{1}{2}$ (2 m/s^2) (2 s)^2 = 4 m;
- in 3 s si allontana di d_3 = = $\frac{1}{2}$ (2 m/s^2) (3 s)^2 = 9 m.

Nota che, in un moto ad accelerazione costante *con velocità iniziale nulla*, la distanza percorsa in un tempo t è direttamente proporzionale al quadrato di t.

Esempio. Un'automobile viaggia a 20 m/s (72 km/h) e decelera in modo uniforme di 2,5 m/s^2 fino a fermarsi. Quanto tempo passa prima che l'automobile si arresti? Quale distanza percorre nel frattempo?

Il problema è schematizzato nel disegno: poiché l'automobile rallenta di 2,5 m/s ogni secondo, la sua accelerazione $\vec{a}$ ha verso opposto a quello del moto e, in forma scalare, è rappresentata dalla quantità negativa $a = -2{,}5$ m/s^2.



Per trovare il tempo t che deve trascorre dall'istante iniziale $t_0 = 0$ affinché la velocità dell'automobile passi da v_0 = 20 m/s a v = 0, utilizza la legge della velocità:

$$v = v_0 + a\, t \quad \Rightarrow \quad t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{-v_0}{a} = \frac{-20\ \text{m/s}}{-2{,}5\ \text{m/s}^2} = 8{,}0\ \text{s}$$

Per trovare la distanza di frenata, $d = x - x_0$, utilizza la legge oraria ponendo in essa t = 8,0 s:

$$d = v_0\, t + \frac{1}{2}\, a\, t^2 = \left(20\ \text{m/s}\right)\left(8{,}0\ \text{s}\right) + \frac{1}{2}\left(-2{,}5\ \text{m/s}^2\right)\left(8{,}0\ \text{s}\right)^2 = 80\ \text{m}$$

2.3 Moto circolare

La velocità vettoriale $\vec{v}$ è sempre tangente alla traiettoria del moto. Perciò, in un moto che si svolge lungo una circonferenza, la direzione di $\vec{v}$ cambia necessariamente da un istante all'altro, mentre il suo modulo v può essere variabile o anche costante.

Il moto di un oggetto che percorre una circonferenza con velocità di modulo v costante è detto **moto circolare uniforme**.

Il moto circolare uniforme è periodico, cioè si ripete identico a ogni giro.

Il tempo T necessario a compiere un giro è chiamato **periodo**; il suo reciproco, $f = \frac{1}{T}$, è chiamato **frequenza** e indica il numero di giri per unità di tempo, ossia il rapporto tra il numero di giri compiuti e il tempo impiegato.

In alternativa a v e a f, per esprimere la rapidità con cui si svolge un moto circolare o la rotazione di un corpo intorno a un asse, si usa la *velocità angolare*, indicata con ω (lettera greca «omega»).

La **velocità angolare** di un corpo in moto circolare o in rotazione è il rapporto tra la misura in radianti dell'angolo descritto dal corpo in un certo intervallo di tempo e l'intervallo di tempo stesso.

Il **radiante** (rad) è l'unità di misura degli angoli nel SI. Data una circonferenza di raggio r, la misura in radianti di un angolo al centro α è uguale alla lunghezza L dell'arco di circonferenza corrispondente ad α divisa per r (FIGURA 6).

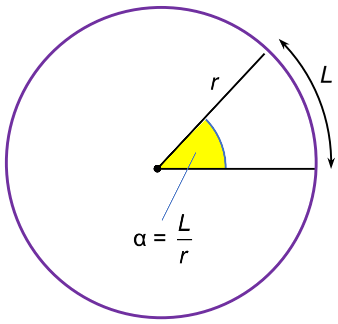


FIGURA 6 *L'angolo in radianti.*

Per esprimere in radianti l'ampiezza di un angolo data in gradi, o viceversa, puoi usare la seguente proporzione:

$$\alpha \text{ (in gradi)} : 360° = \alpha \text{ (in radianti)} : 2\,\pi$$

Esempio. La misura in radianti di un angolo di 30° è:

$$\alpha = \frac{30° \cdot 2\,\pi}{360°} = \frac{\pi}{6}$$

Poiché, in un moto circolare uniforme, il tempo per percorrere un giro è il periodo T e ciascun giro corrisponde a un angolo di $2\,\pi$, le relazioni tra la velocità angolare ω e T e tra ω e f sono:

$$\omega = \frac{2\,\pi}{T} = 2\,\pi\, f$$

La velocità angolare è sempre misurata in **radianti al secondo** (rad/s), mentre la frequenza è misurata in **hertz** (Hz), ossia in s^{-1}.

Detto r il raggio della traiettoria, la lunghezza del cammino percorso a ogni giro è $2\,\pi\, r$. Di conseguenza la velocità v è:

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

Confrontando le ultime due formule si ottiene che v è uguale al prodotto di r per ω:

$$v = r\,\omega$$

Il moto circolare uniforme è un moto accelerato, nonostante che in esso venga percorso lo stesso numero di metri in ogni secondo di tempo: come detto, infatti, in questo tipo di moto la velocità vettoriale $\vec{v}$ cambia continuamente direzione, per mantenersi tangente alla traiettoria.

Si può dimostrare che (**FIGURA 7**):

l'accelerazione del moto circolare uniforme è un'**accelerazione centripeta**, cioè descritta in ogni istante da un vettore $\vec{a}_c$ orientato verso il centro della traiettoria.

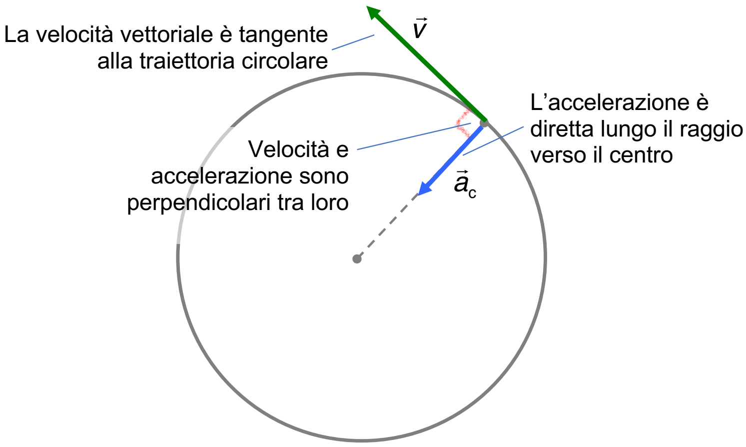


FIGURA 7 *Velocità e accelerazione nel moto circolare uniforme.*

L'accelerazione centripeta $\vec{a}_c$ è sempre perpendicolare a $\vec{v}$: ciò fa sì che $\vec{v}$ cambi direzione, ma mantenga invariato il modulo v.

Il modulo a_c dell'accelerazione centripeta soddisfa la seguente equazione, che lo lega a v:

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

In modo equivalente si ha:

$$a_c = r\,\omega^2$$

2.4 Concetto di forza

Nella sua forma più intuitiva, una forza è una spinta o una trazione. Quando è in azione una forza, sono coinvolti sempre due corpi. Un corpo da solo non può esercitare né subire alcuna forza.

La **forza** è una grandezza fisica che descrive l'interazione tra due corpi o due sistemi.

Una forza *non contrastata da altre forze*:

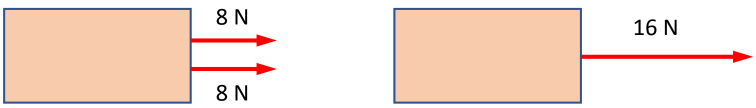
- applicata a un corpo fermo, mette in movimento il corpo;
- applicata a un corpo in movimento, può fermarlo e in tutti i casi cambia la sua velocità.

Nel tiro alla fune i giocatori compiono grandi sforzi, ma se le due squadre tirano da una parte e dall'altra con uguale intensità, la fune resta ferma. Questo esempio mostra che:

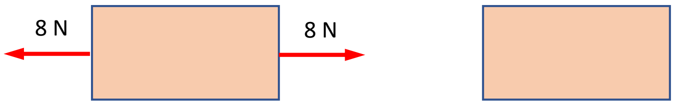
più forze applicate a uno stesso corpo possono bilanciarsi tra loro e annullare, l'una, l'effetto delle altre.

Se un corpo è soggetto a una forza e ciò nonostante non cambia velocità, è perché su di esso agisce almeno un'altra forza che bilancia la prima. In questo caso la forza totale, o **forza risultante**, che agisce sul corpo è uguale a zero.
La forza è una grandezza vettoriale. Perciò, quando un corpo è soggetto a più forze, per calcolare la risultante bisogna applicare una delle due regole per l'addizione dei vettori.

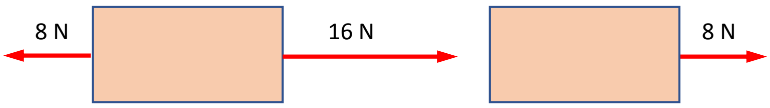
Esempio. Se tiri una scatola con una forza di 8 N e un tuo amico la tira insieme a te con una forza identica, nella stessa direzione e nello stesso verso, la forza risultante sulla scatola è di 16 N.



Se invece il tuo amico tira la scatola con una forza della stessa intensità e lungo la stessa direzione, ma in verso opposto, la forza risultante sulla scatola è zero.



Se raddoppi la forza con cui stai tirando, portandola a 16 N, e il tuo amico continua a tirare in verso opposto con una forza di 8 N, la forza risultante è di 8 N verso di te.



Tutti i corpi sulla Terra hanno un peso, cioè sono attratti verso il basso (verso il centro del globo terrestre) dalla **forza di gravità** esercitata dalla Terra.
Nelle nostre case molti oggetti sono posti sul pavimento o su dei ripiani, o sono appesi. Ognuno di essi è soggetto alla forza di gravità della Terra, eppure non cade perché c'è un vincolo che lo sorregge.
Un **vincolo** è un corpo fisso che impedisce a un altro corpo di compiere alcuni movimenti.
I vincoli possono esercitare delle forze:

- la **reazione vincolare di una superficie rigida** su un oggetto è sempre *perpendicolare alla superficie* e ha verso tale da respingere l'oggetto;
- la **forza di tensione di una corda** è sempre *parallela alla corda* e ha verso tale da tirare l'oggetto.

La reazione vincolare *non* ha un'intensità prestabilita: la sua intensità cambia di caso in caso, a seconda delle altre forze che con essa agiscono su un corpo.

Esempio. Su un libro appoggiato sopra un tavolo agiscono la forza gravitazionale terrestre, diretta lungo la verticale verso il basso, e la reazione vincolare del tavolo: il fatto che il libro sia fermo e resti fermo indica che la reazione vincolare è uguale e opposta alla forza gravitazionale, cioè ha lo stesso modulo e la stessa direzione, ma ha verso opposto (cioè agisce dal basso verso l'alto). Le due forze, sommate assieme come vettori, producono una risultante nulla.

Una forza di cui si ha comunemente esperienza è quella esercitata da una molla. Una molla tirata per un'estremità con una mano, e fissata all'altra estremità, si allunga: di più se la forza esercitata dalla mano è più intensa, di meno se la forza è più debole. A sua volta la molla, che tende a ritornare alla sua lunghezza originaria, detta *lunghezza a riposo*, esercita una forza sulla mano che la tira, tanto maggiore quanto più grande è l'allungamento.
La forza esercitata da una molla, dilatata o compressa rispetto alla lunghezza a riposo, è detta **forza elastica**.
Il **dinamometro** è uno strumento di misura delle forze che sfrutta le proprietà della forza elastica di una molla.
Altre forze con cui si ha a che fare nella vita quotidiana sono quelle di attrito.

Le **forze di attrito** si oppongono sempre al movimento, oppure al tentativo di mettere in movimento un corpo fermo: su un corpo in movimento esse agiscono nella direzione della velocità, ma in verso opposto; su un corpo fermo agiscono in direzione e verso tali da controbilanciare la risultante delle altre forze.

Si sviluppa attrito, per esempio, quando un corpo solido sfrega contro la superficie di un altro solido, ma l'attrito riguarda anche i liquidi e i gas. Se un blocco solido viene spinto lungo un pavimento verso destra, la forza di attrito agisce sul blocco verso sinistra. Quando un oggetto cade verso il basso attraverso l'aria, l'attrito dell'aria agisce verso l'alto.
Le forze finora discusse sono elencate nella **TABELLA 5**, con le loro principali caratteristiche e con le formule matematiche che permettono di calcolarle.

TABELLA 5 *Alcune forze.*

	Proprietà	**Direzione e verso**	**Modulo**
Forza di gravità, $\vec{F}_G$	È esercitata da ogni corpo su ogni altro, ma ha un'intensità apprezzabile solo se almeno uno dei due corpi interagenti ha una massa «astronomicamente grande» (per esempio, è un pianeta o una stella).	È una forza attrattiva, orientata dal centro di un corpo verso il centro dell'altro lungo la congiungente.	$F_G = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$ dove $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N · m²/kg² è la cosiddetta **costante di gravitazione universale**, m_1 e m_2 sono le masse dei due corpi interagenti e r è la distanza reciproca dei loro centri.
Forza peso, $\vec{F}_p$	Agisce su tutti i corpi che si trovano sulla superficie terrestre o a una distanza da essa molto piccola rispetto al raggio della Terra. È la forma particolare che assume la forza di gravità $\vec{F}_G$ nelle vicinanze della superficie terrestre.	Ha direzione verticale, dall'alto verso il basso.	$F_p = m\,g$ dove m è la massa del corpo e $g = 9{,}8$ m/s² è l'**accelerazione di gravità**, uguale per tutti i corpi.
Forza elastica, $\vec{F}_e$	È esercitata da una molla dilatata o compressa rispetto alla lunghezza a riposo; agisce sull'oggetto a contatto con la molla.	È parallela all'asse longitudinale della molla, in verso entrante se la molla è dilatata e in verso uscente se è compressa.	$F_e = k\,\Delta x$ dove k è un coefficiente caratteristico della molla, misurato in N/m e detto **costante elastica** e Δx è la differenza di lunghezza della molla rispetto alla lunghezza a riposo.
Reazione vincolare di una superficie rigida, $\vec{R}$	È esercitata da una superficie rigida su un oggetto a contatto con essa.	È perpendicolare alla superficie in verso da essa uscente.	Cambia di caso in caso, a seconda delle altre forze che agiscono sul corpo.

Tensione di una corda, $\vec{T}$	È esercitata da una corda tesa su un oggetto a essa legato.	È parallela alla corda, in verso entrante.	Cambia di caso in caso, a seconda delle altre forze che agiscono sul corpo.
Forza di attrito statico, $\vec{F}_s$	È esercitata da una superficie su un corpo a contatto, quando il corpo è fermo, ma è sottoposto ad altre forze la cui risultante sia diversa da zero.	È parallela alla superficie e opposta alla risultante delle altre forze.	Cambia di caso in caso, a seconda delle altre forze che agiscono sul corpo. Tuttavia non può superare un valore massimo, dato dal modulo *R* della reazione vincolare che la superficie esercita simultaneamente sul corpo moltiplicato per il **coefficiente di attrito statico** μ_s, caratteristico dei materiali a contatto: $F_s \leq \mu_s R$
Forza di attrito dinamico, $\vec{F}_d$	È esercitata da una superficie su un corpo che striscia su di essa.	È parallela alla superficie, in verso opposto a quello della velocità vettoriale del corpo.	$F_d = \mu_d R$ dove μ_d è il **coefficiente di attrito dinamico**, caratteristico dei materiali a contatto, e *R* è il modulo della reazione vincolare della superficie.
Forza di attrito di un fluido	È esercitata da un fluido (come l'acqua o l'aria) su un corpo che si muove attraverso di esso.	È parallela alla velocità vettoriale del corpo, in verso opposto.	È direttamente proporzionale alla velocità del corpo (purché sufficientemente bassa, altrimenti dipende da essa in altro modo).

2.5 Leggi fondamentali della dinamica

Il ruolo delle forze è descritto dai tre **principi della dinamica di Newton**.

Il **primo principio della dinamica**, o **principio di inerzia**, è una riformulazione dell'idea di Galileo:

ogni oggetto continua a stare nella propria condizione di quiete o di moto rettilineo uniforme (con velocità vettoriale costante), se la forza risultante su di esso è nulla.

La proprietà dei corpi di resistere alle variazioni di moto è chiamata **inerzia.**

Il principio di inerzia dipende dalla scelta del sistema di riferimento: in alcuni sistemi è valido, in altri non lo è. Un sistema di riferimento in cui vale il principio di inerzia è detto **sistema di riferimento inerziale**.

È inerziale un sistema di riferimento che ha l'origine nel centro nel Sole e i tre assi che puntano a tre stelle molto lontane; ugualmente, sono inerziali tutti i sistemi di riferimento che si muovono di moto rettilineo uniforme rispetto al sistema del Sole.

In linea di principio, il sistema di riferimento della Terra non è inerziale, perché la Terra compie due moti accelerati: il moto annuale di rivoluzione attorno al Sole e il moto giornaliero di rotazione attorno al proprio asse. Tuttavia, le due accelerazioni sono troppo piccole per essere avvertite nei fenomeni quotidiani. Perciò la Terra può essere normalmente considerata come un sistema di riferimento inerziale.

Esempio. Immagina che un'automobile viaggi con velocità $\vec{v}$, con un pacco appoggiato sul sedile. Se l'automobile frena bruscamente, il pacco si sposta in avanti senza che nessuna forza lo spinga in avanti.

In questo comportamento non c'è niente di strano: scivolando in avanti sul sedile, il pacco tende a mantenere la propria velocità iniziale $\vec{v}$ rispetto al sistema di riferimento inerziale della strada.

Non ci si deve aspettare, invece, che il primo principio sia soddisfatto rispetto all'automobile che frena, cioè rispetto a un sistema di riferimento accelerato (una frenata è un'accelerazione in verso opposto a quello del moto) e quindi non inerziale.

Il primo principio afferma che un corpo fermo (rispetto a un sistema di riferimento inerziale) resta fermo se e solo se la somma $\vec{F}_{tot}$ di tutte le forze $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$… agenti su di esso è nulla:

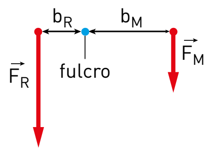
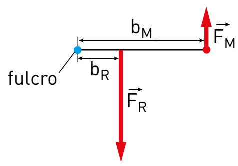
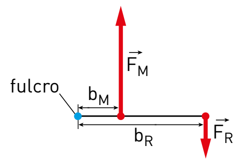
$$\vec{F}_{tot} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots = 0$$

Questa formula rappresenta la **condizione di equilibrio per un punto materiale**.
Un **punto materiale** è un oggetto che è considerato un punto, perché è piccolo rispetto all'ambiente in cui si trova ed entro cui può muoversi. Esso può traslare, ma, non avendo dimensioni, non può ruotare né deformarsi.
La **condizione di equilibrio per un corpo rigido**, cioè per un oggetto esteso che non subisce deformazioni, ma che può traslare e anche ruotare, è più complicata perché deve tenere conto del punto di applicazione di ogni singola forza. Esempi di corpi rigidi sono le leve.
Una **leva** è una macchina che permette di bilanciare una forza $\vec{F}_R$, detta *forza resistente*, applicando un'altra forza $\vec{F}_M$, detta *forza motrice*, che non sia semplicemente l'opposto della prima, ma abbia intensità diversa: tale macchina consiste in un'asta rigida che può ruotare attorno a un punto fisso chiamato *fulcro*.
Il rapporto $e = \frac{F_R}{F_M}$ tra l'intensità della forza resistente e l'intensità della forza motrice, all'equilibrio, è detto *vantaggio della leva*.
A seconda della reciproca posizione del fulcro, del punto di applicazione di $\vec{F}_R$ e di quello di $\vec{F}_M$, si distinguono tre tipi di leve (**Tabella 6**). In ogni caso, dette b_R e b_M le distanze dal fulcro dei punti di applicazione di $\vec{F}_R$ e $\vec{F}_M$, affinché una leva sia in equilibrio deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$F_R\, b_R = F_M\, b_M$$

Perciò, per $b_R > b_M$ la forza resistente è più debole della forza motrice e la leva è svantaggiosa ($e < 1$); viceversa, per $b_R < b_M$ la leva è vantaggiosa ($e > 1$)

Tabella 6 *Classificazione delle leve.*

	Leve di primo genere	Leve di secondo genere	Leve di terzo genere
Descrizione	Il fulcro è tra i punti di applicazione delle due forze 	La forza resistente è applicata tra il fulcro e la forza motrice 	La forza motrice è applicata tra il fulcro e la forza resistente 
Proprietà	Possono essere vantaggiose, svantaggiose o indifferenti (e = 1)	Sono sempre vantaggiose	Sono sempre svantaggiose
Esempi	Forbici, bilancia a bracci uguali	Schiaccianoci, carriola	Pinzette, avambraccio

Il **secondo principio della dinamica** dice che la forza risultante $\vec{F}_{tot}$ applicata a un corpo è uguale al prodotto della massa *m* per l'accelerazione $\vec{a}$ del corpo:

$$\vec{F}_{tot} = m\,\vec{a}$$

Da questa legge segue che vale 1 N (un'unità di forza nel SI) una forza che accelera di 1 m/s^2 una massa di 1 kg.
Anche il secondo principio vale solo nei sistemi di riferimento inerziali. Da esso si deduce che, a parità di forza applicata, un corpo di massa maggiore acquista un'accelerazione minore: in questo senso *la massa misura l'inerzia di un corpo*.
Se sono note le forze, il secondo principio permette di determinare l'accelerazione di un corpo e quindi prevedere, istante dopo istante, come cambiano la sua velocità e la sua posizione. Quando la forza risultante $\vec{F}_{tot}$ è costante, allora è evidente (ammesso che il corpo rimanga integro, cioè la sua massa non cambi durante il moto) che l'accelerazione $\vec{a}$ è costante: in questo caso il corpo compie un moto rettilineo uniformemente accelerato.
Dal secondo principio si deducono, per esempio, le caratteristiche del moto di una pallina che oscilla attaccata a una molla (FIGURA 8). Le oscillazioni prodotte dalla forza elastica della molla sono un particolare tipo di moto periodico, chiamato **moto armonico**.
Si può dimostrare che, se *m* è la massa della pallina e *k* è la costante elastica della molla, il periodo del moto è:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

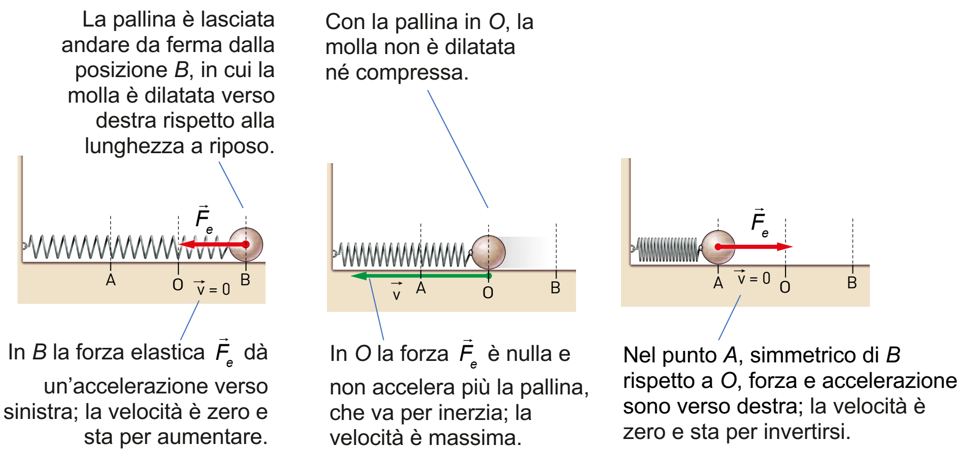


FIGURA 8 *Le oscillazioni di una massa attaccata a una molla.*

Un altro caso di moto armonico sono le piccole oscillazioni di un pendolo: quelle compiute, cioè, da una pallina che va avanti e indietro appesa a un filo. Sfruttando il secondo principio si trova che, se le oscillazioni non superano una certa ampiezza (in pratica se l'angolo tra il filo e la verticale resta al di sotto dei 10°) il periodo del moto è:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

con *l* lunghezza del filo e g = 9,8 m/s^2 accelerazione di gravità.
Il moto armonico del pendolo avviene sotto l'azione della forza peso e della tensione del filo che agiscono sulla pallina. Nota che il suo periodo *T* non dipende dalla massa della pallina.

Il **terzo principio della dinamica**, o **principio di azione e reazione**, dice che:
Ogni volta che un oggetto esercita una forza su un secondo oggetto, il secondo esercita sul primo una forza uguale e opposta.
Non importa quale forza debba essa considerata azione e quale reazione. Ciò che conta è che entrambe fanno parte della stessa *interazione* e che nessuna delle due esiste senza l'altra.
Tutti i sistemi di locomozione si basano sul terzo principio della dinamica. Quando cammini spingi indietro il terreno e il terreno ti spinge in avanti con una forza uguale e opposta: all'azione del piede sul suolo corrisponde una reazione uguale e contraria del suolo sul piede. Analogamente, una ruota di automobile spinge indietro la strada e dalla strada è spinta in avanti.
Il terzo principio spiega anche la propulsione a reazione: un razzo espelle all'indietro con una certa forza i gas di scarico; allo stesso tempo i gas di scarico esercitano una forza uguale e opposta sul razzo, accelerandolo in avanti.
Ai tre principi della dinamica si aggiunge un'altra importante legge dovuta a Newton: la **legge di gravitazione universale**, che esprime la forza di gravità $\vec{F}_G$ con cui interagiscono tutti i corpi (vedi TABELLA 5). L'esempio che segue mostra come si applica questa legge al moto di un satellite terrestre.

Esempio. Un satellite artificiale è in moto circolare uniforme attorno alla Terra, a distanza r dal suo centro. Qual è la velocità del satellite?

Il satellite, che ha un'accelerazione centripeta $\vec{a}_c$ di modulo $a_c = \frac{v^2}{r}$, è soggetto alla sola forza di gravità $\vec{F}_G$ esercitata dalla Terra. Dette M_T e m la massa della Terra e quella del satellite, il modulo di $\vec{F}_G$ è:

$$F_G = G\,\frac{M_T\, m}{r^2}$$

Poiché $\vec{F}_G$ è orientata verso il centro della Terra come $\vec{a}_c$, il secondo principio della dinamica equivale alla seguente relazione tra i moduli di F_G e a_c:

$$F_G = m\, a_c \qquad \Rightarrow \qquad G\,\frac{M_T\,\cancel{m}}{r^{\cancel{2}}} = \cancel{m}\,\frac{v^2}{\cancel{r}}$$

da essa si ricava il modulo della velocità del satellite:

$$v = \sqrt{\frac{G\,M_T}{r}}$$

Poiché r è al denominatore, questo risultato mostra che i satelliti più vicini alla Terra sono i più veloci.

2.6 Forza peso e accelerazione di gravità

La forza di gravità che la Terra esercita su tutti i corpi posti sulla sua superficie (o a una distanza dalla superficie molto minore del raggio terrestre) è chiamata **forza peso**.

La forza peso $\vec{F}_p$ che agisce su un corpo di massa m coincide con la forza gravitazionale $\vec{F}_G$ dalla Terra calcolata per un valore della distanza r uguale al raggio terrestre R_T. Per il modulo di $\vec{F}_p$ vale quindi la seguente relazione, in cui M_T indica la massa della Terra e $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$ è la costante di gravitazione universale:

$$F_p = G\,\frac{M_T\, m}{R_T^2}$$

La quantità $g = \dfrac{G\,M_T}{R_T^2}$ è una costante che ha le dimensioni fisiche di un'accelerazione, vale 9,8 m/s^2 ed è chiamata **accelerazione di gravità**.

In funzione di g, il **modulo della forza peso** è:

$$F_p = m\,g$$

Il modulo della forza peso è spesso chiamato semplicemente «peso» e, come si vede, è direttamente proporzionale alla massa. Nonostante «massa» e «peso» siano usati come sinonimi nel linguaggio comune, le due grandezze sono diverse. In primo luogo, il peso si misura in newton e la massa in kilogrammi. Inoltre, la massa è una caratteristica del corpo, ossia è la stessa dappertutto, mentre il peso è diverso a seconda del luogo: per esempio, su un aereo a 10 000 m il peso di una persona è più piccolo del 3 per mille rispetto a quello della stessa persona al livello del mare.

Esempio. Sulla Terra, un rover per l'esplorazione spaziale della massa di 100 kg pesa

$$(100\ \mathrm{kg}) \cdot (9{,}8\ \mathrm{m/s^2}) = 980\ \mathrm{N}$$

Sulla Luna, dove la forza peso non è dovuta all'attrazione gravitazionale della Terra, ma a quella della Luna, che ha massa $M_L = 7{,}3 \cdot 10^{22}$ kg e raggio $R_L = 1{,}7 \cdot 10^6$ m, il peso del rover è

$$F_p(\text{Luna}) = \frac{G\,M_L}{R_L^2}\,m = \frac{\left(6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}\right)\left(7{,}3 \cdot 10^{22}\ \mathrm{kg}\right)}{\left(1{,}7 \cdot 10^6\ \mathrm{m}\right)^2}\left(100\ \mathrm{kg}\right) = 168\ \mathrm{N}$$

La forza peso $\vec{F}_p$ è una forza costante e, come vettore, è orientata verticalmente verso il basso (ossia verso il centro della Terra). Indicando con $\vec{g}$ il vettore di modulo $g = 9{,}8$ m/s^2, di direzione verticale e rivolto verso il basso, si può scrivere:

$$\vec{F}_p = m\,\vec{g}$$

Per il secondo principio della dinamica, quando la forza $\vec{F}_p$ agisce da sola su un corpo di massa m, essa produce un'accelerazione $\vec{a}$ tale che:

$$\vec{F}_p = m\,\vec{a} \quad \Rightarrow \quad \cancel{m}\,\vec{g} = \cancel{m}\,\vec{a} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = \vec{g}$$

L'accelerazione prodotta dalla forza peso è dunque costante ed è la stessa per ogni corpo, qualunque sia la sua massa.

Il moto di un corpo soggetto soltanto alla forza peso è chiamato **caduta libera**.

A rigore, la caduta libera può avvenire solo nel vuoto, cioè in completa assenza di attrito.

Un **corpo che cade da fermo** compie un moto rettilineo uniformemente accelerato, scendendo lungo la verticale con una velocità che aumenta di 9,8 m/s ogni secondo. Rispetto a un asse *y* orientato verticalmente verso il basso, le leggi che danno la sua velocità in funzione del tempo e la sua coordinata rispetto alla posizione di partenza sono:

$$v = g\,t \qquad \text{e} \qquad y = \frac{1}{2}\,g\,t^2$$

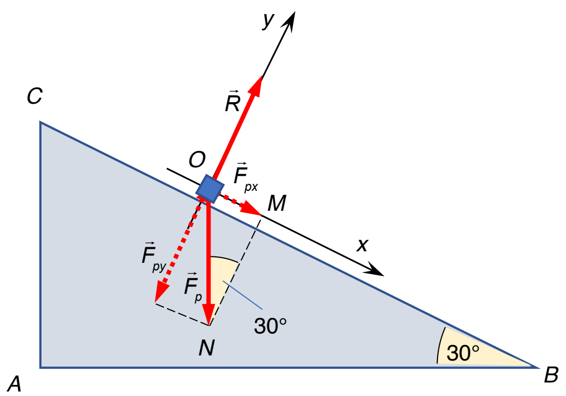
La **discesa lungo un piano inclinato**, in condizioni di attrito trascurabile, è un moto analogo a quello di caduta libera, con la differenza che la direzione del moto è quella obliqua del piano e il modulo *a* dell'accelerazione (costante) è minore di *g*: regolando l'inclinazione del piano si può variare a piacere l'accelerazione, ma non oltre il limite di 9,8 m/s^2.

Esempio. Qual è l'accelerazione di un blocco che cade con attrito trascurabile lungo un piano inclinato, se l'angolo formato dal piano con l'orizzontale è di 30°?

Nel disegno mostrato sotto, la forza peso $\vec{F}_p$ è rappresentata come somma dei vettori componenti $\vec{F}_{px}$, parallelo al piano, e $\vec{F}_{py}$, perpendicolare. Il fatto che non ci sia moto lungo l'asse *y* (il corpo non sprofonda dentro al piano né si stacca) indica che la «porzione» $\vec{F}_{py}$ della forza peso è esattamente bilanciata dalla reazione vincolare $\vec{R}$ del piano:

$$\vec{R} = -\vec{F}_{py}$$

Perciò, la forza che accelera il blocco lungo l'asse *x* è $\vec{F}_{px}$.



Dalla similitudine dei due triangoli *ABC* e *MNO*, che sono triangoli rettangoli con un angolo interno di 30°, si deduce che il modulo di $\vec{F}_{px}$ è la metà di quello di $\vec{F}_p$:

$$F_{px} = \frac{F_p}{2} = \frac{m\,g}{2}$$

Dal secondo principio della dinamica si ottiene quindi il modulo *a* dell'accelerazione:

$$\vec{F}_{px} = m\,\vec{a} \quad \Rightarrow \quad \frac{\cancel{m}\,g}{2} = \cancel{m}\,a \Rightarrow \quad a = \frac{g}{2}$$

Anche il moto di un **corpo lanciato verso l'alto in verticale** è rettilineo e uniformemente accelerato. In questo caso, però, l'accelerazione ha verso contrario rispetto alla velocità iniziale. Quindi il corpo prima sale e rallenta, fino a fermarsi istantaneamente, poi inverte il suo moto e comincia a cadere: durante la salita la sua velocità diminuisce di 9,8 m/s ogni secondo e durante la discesa aumenta con la stessa rapidità (ma in verso opposto rispetto all'inizio). In riferimento a un asse y orientato verticalmente verso l'alto, se v_0 e y_0 sono la velocità iniziale e la coordinata iniziale del corpo, la legge della velocità e la legge oraria sono:

$$v = v_0 - g\,t \qquad \text{e} \qquad y = y_0 + v_0\,t - \frac{1}{2}\,g\,t^2$$

In un **lancio obliquo**, come nello sparo di un proiettile o nel getto del peso nelle gare di atletica, il moto ha inizio con una velocità vettoriale $\vec{v}_0$ data dalla somma di un vettore componente orizzontale $\vec{v}_{0x}$ e un vettore componente verticale $\vec{v}_{0y}$. Perciò, sotto l'azione della sola forza peso, il moto di un proiettile è la sovrapposizione di:

- un moto rettilineo uniforme con velocità $\vec{v}_{0x}$ nella direzione orizzontale, lungo la quale non ci sono forze;
- un moto rettilineo uniformemente accelerato con accelerazione $\vec{g}$ e velocità iniziale $\vec{v}_{0y}$ lungo la direzione verticale.

Il moto risultante si svolge lungo una traiettoria parabolica.
Lo spostamento orizzontale che compie il proiettile dal lancio all'atterraggio (alla stessa quota del lancio) è detto **gittata**. Per una velocità iniziale $\vec{v}_0$ di modulo fissato, si può dimostrare che in assenza di attrito la gittata è massima quando l'angolo di inclinazione di $\vec{v}_0$ rispetto all'orizzontale è di 45° (**FIGURA 9**).

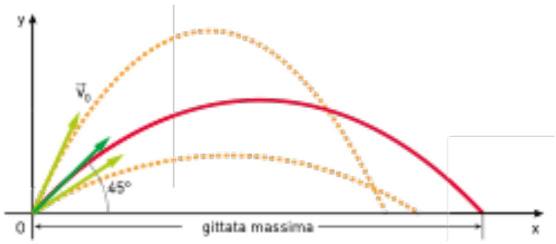


FIGURA 9 *La gittata di un proiettile.*

2.7 Lavoro di una forza

Perché si compia del **lavoro**, nel senso che la fisica attribuisce a questo termine, è necessario che una forza sia applicata a un corpo che si sposta.

Il caso più semplice è quello in cui la forza $\vec{F}$ non varia nel tempo.

- Se la forza costante $\vec{F}$ e lo spostamento $\vec{s}$ hanno la stessa direzione e lo stesso verso, il lavoro W è detto **lavoro motore** ed è definito come il prodotto dei moduli di $\vec{F}$ e di $\vec{s}$:

$$W = F\,s$$

- Se $\vec{F}$ e $\vec{s}$ hanno la stessa direzione, ma versi opposti, il lavoro W è detto **lavoro resistente** ed è il prodotto dei moduli di $\vec{F}$ e di $\vec{s}$ preceduto dal segno meno:

$$W = -F\,s$$

- Se $\vec{F}$ è perpendicolare a $\vec{s}$, il lavoro W, per definizione, è nullo:

$$W = 0$$

Nel SI l'unità di misura del lavoro è il **joule**, indicato con il simbolo J (1 J = 1 N · m).

Quando le forze applicate a un corpo sono più d'una, i lavori si sommano, ognuno con il proprio segno:

il **lavoro totale** è la somma algebrica dei lavori compiuti dalle singole forze.

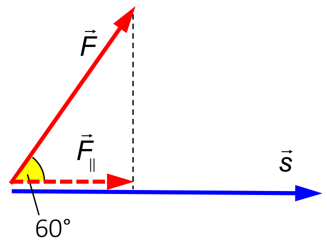
Se una forza $\vec{F}$ e lo spostamento $\vec{s}$ del corpo a cui essa è applicata hanno direzioni diverse, si deve considerare $\vec{F}$ come somma dei due vettori componenti $\vec{F}_{\parallel}$, nella direzione di $\vec{s}$, e $\vec{F}_{\perp}$, nella direzione perpendicolare a $\vec{s}$. Ci si riconduce, così, ai casi esaminati prima.

Infatti, il lavoro W compiuto da $\vec{F}$ è la somma del lavoro W_1 di $\vec{F}_{\parallel}$ e del lavoro W_2 di $\vec{F}_{\perp}$; tuttavia, poiché W_2 è nullo, resta soltanto W_1. Quindi, in generale:

il lavoro W compiuto da una forza costante $\vec{F}$ durante uno spostamento $\vec{s}$ è uguale al lavoro di $\vec{F}_{\parallel}$, vettore componente di $\vec{F}$ nella direzione di $\vec{s}$.

Esempio. Per una forza $\vec{F}$ di 20 N inclinata di 60° rispetto allo spostamento $\vec{s}$, il vettore componente parallelo $\vec{F}_{\parallel}$ ha modulo

$$F_{\parallel} = \frac{F}{2} = \frac{20\ \text{N}}{2} = 10\ \text{N}$$



Se lo spostamento è di 2 m. Il lavoro della forza è

$$W = F_{\parallel}\ s = (10\ \text{N})\ (2\ \text{m}) = 20\ \text{J}$$

Per produrre un dato lavoro può essere necessario più o meno tempo. La grandezza che misura la rapidità con cui un sistema compie un lavoro è chiamata *potenza*.

La **potenza** P di un sistema è il rapporto tra il lavoro W compiuto dal sistema e l'intervallo di tempo Δt impiegato:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

Nel SI l'unità di misura di questa grandezza è il **watt**, indicato con W (1 W = 1 J/s).

Spesso, come unità di lavoro, si usa il **kilowattora** (kWh) in alternativa al joule. Un kilowattora è il lavoro compiuto in un tempo Δt = 1 h = 3600 s da un sistema che produce una potenza P = 1 kW = 10^3 W. Dalla formula della potenza si ottiene quindi:

$$1\ \text{kWh} = P\ \Delta t = (10^3\ \text{W})\ (3{,}6 \times 10^3\ \text{s}) = 3{,}6 \times 10^6\ \text{W} \cdot \text{s} = 3{,}6 \times 10^6\ \text{J}$$

2.8 Energia cinetica e potenziale

Un corpo che si muove ha energia perché è capace di azione, ossia è in grado di compiere lavoro: per esempio può urtare un altro corpo e spostarlo.

L'**energia cinetica** K di un corpo di massa m che si muove con velocità di modulo v è il semiprodotto di m per il quadrato di v:

$$K = \frac{1}{2}\, m\, v^2$$

Supponi che un corpo abbia un'energia cinetica K_A. Se il lavoro totale W_{tot} compiuto dalle forze a esso applicate è diverso da zero, il suo moto cambia. Così, alla fine, il corpo ha una diversa energia cinetica K_B.

Il **teorema dell'energia cinetica** afferma che la variazione ΔK dell'energia cinetica di un corpo è uguale al lavoro totale W_{tot} compiuto su di esso:

$$\Delta K = K_B - K_A = W_{tot}$$

Se W_{tot} è positivo anche ΔK è positiva e se W_{tot} è negativo anche ΔK è negativa. Quindi:

- un lavoro motore aumenta l'energia cinetica;
- un lavoro resistente diminuisce l'energia cinetica.

Un corpo fermo non ha energia cinetica; se però si trova in alto, può compiere lavoro quando cade e prende velocità. Per la posizione che occupa, un corpo sollevato da terra ha un'energia, che è detta *energia potenziale gravitazionale* (o *della forza peso*) perché è dovuta all'attrazione di gravità terrestre. L'energia potenziale gravitazionale, come l'energia cinetica, è una misura della capacità del corpo di compiere lavoro.

Per un corpo vicino alla superficie della Terra, si definisce l'**energia potenziale gravitazionale** U_p come il lavoro che compie la forza peso quando il corpo, dalla sua posizione, è portato a una posizione di riferimento scelta ad arbitrio.

D'altra parte, il lavoro che compie la forza peso ogni volta che un corpo di massa m scende per un dislivello y è:

$$W_p = m\, g\, y$$

Questa formula vale anche se la discesa del corpo non è verticale: dipende dal dislivello verticale y tra i punti di partenza e di arrivo, ma non dalla traiettoria percorsa dal corpo.

Per definizione, l'energia potenziale gravitazionale di un corpo di massa m che si trova ad altezza y dal livello zero a cui è fissata la posizione di riferimento è dunque:

$$U_p = m\, g\, y$$

A seconda della scelta del livello zero il valore di U_p cambia e può anche essere negativo (lo è se il livello zero è posto più in alto rispetto al corpo, nel qual caso y è negativo). Tuttavia, il significato della formula $U_p = m\, g\, y$ è sempre lo stesso:

- più un corpo è in alto e più la sua massa è grande, maggiore è l'energia potenziale gravitazionale;
- se l'altezza a cui si trova il corpo varia di una quantità Δy, l'energia potenziale gravitazionale aumenta o diminuisce di $m\, g\, \Delta y$.

La *variazione* di altezza Δy non dipende dalla scelta del livello zero; quindi, poiché m e g sono due costanti, neanche la *variazione* di energia $m\, g\, \Delta y$ dipende da questa scelta.

Esempio. Un pacco di 1 kg viene spostato di 1 m più in basso, da una mensola a un tavolo. Allora è $\Delta y = -1$ m e, indipendentemente dal livello di riferimento, l'energia potenziale gravitazionale subisce la variazione negativa

$$\Delta U_p = m\, g\, \Delta y = (1\text{ kg})\,(9{,}8\text{ m/s}^2)\,(-1\text{ m}) = -9{,}8\text{ J}$$

ossia *diminuisce* di 9,8 J.

Una molla dilatata o compressa può compiere del lavoro quando viene lasciata andare. Quindi anche la molla può avere un'energia, detta *energia potenziale elastica*.

L'**energia potenziale elastica** U_e di una molla è il lavoro che compie la forza elastica quando la molla, dilatata o compressa, torna alla sua lunghezza a riposo.

Con questa definizione:

- si attribuisce all'energia U_e il valore zero nel caso in cui la molla sia a riposo;
- l'energia U_e è sempre positiva, perché la forza elastica si oppone in tutti i casi all'allungamento o alla compressione della molla e quindi compie un lavoro positivo quando la molla torna a riposo.

Calcolando tale lavoro si trova che, se Δx è la differenza di lunghezza rispetto alla lunghezza a riposo e k è la costante elastica della molla, l'energia potenziale elastica è:

$$U_e = \frac{1}{2} k \left(\Delta x\right)^2$$

L'energia cinetica e tutte le forme di energia potenziale hanno la stessa unità di misura del lavoro; quindi, nel SI, sono espresse in joule.

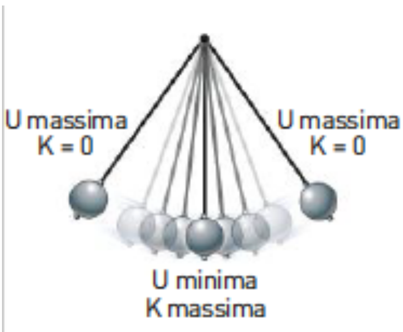
2.9 Conservazione dell'energia

Se il lavoro di una forza su un corpo dipende dalla posizione di partenza e dalla posizione di arrivo del corpo, ma non dai punti intermedi della traiettoria, allora si ha a che fare con una **forza conservativa**.

Solo alle forze conservative, come la forza peso e la forza elastica, può essere associata un'energia potenziale. Un altro esempio di forza conservativa è la forza di gravità $\vec{F}_G$ espressa dalla legge di gravitazione universale; invece, non sono conservative le forze di attrito.

La somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale di un sistema è detta **energia meccanica totale** del sistema. Ogni volta che una forza conservativa compie del lavoro, una parte dell'energia meccanica di un sistema cambia forma.

Esempio. Durante le oscillazioni di un pendolo l'energia meccanica si trasforma da potenziale in cinetica e viceversa.



- Nel punto da cui la pallina è lasciata andare da ferma, l'energia potenziale U è massima e l'energia cinetica K è nulla.
- Mentre la pallina scende, la forza peso $\vec{F}_p$ compie un lavoro positivo. Allora U diminuisce e K aumenta. Il massimo valore di K si ha nel punto più basso, dove U è minima.

- Mentre la pallina risale, $\vec{F}_p$ compie un lavoro negativo. Allora U aumenta e K diminuisce.

In generale, se W è il lavoro compiuto da una forza conservativa, la corrispondente variazione di energia potenziale ΔU è l'opposto di W:

$$\Delta U = -W$$

D'altra parte, per il teorema dell'energia cinetica si può scrivere:

$$W = \Delta K$$

Unendo queste due equazioni si trova:

$$\Delta U = -\Delta K$$

La formula ottenuta esprime la **legge di conservazione dell'energia meccanica**. Poiché ΔU è la differenza tra il valore finale U_B e il valore iniziale U_A dell'energia potenziale e, analogamente, ΔK è la differenza tra i valori K_B e K_A, finale e iniziale, dell'energia cinetica, essa può essere scritta come segue:

$$U_A - U_B = K_B - K_A$$

o anche

$$K_A + U_A = K_B + U_B$$

In conclusione:

se non ci sono attriti (o, più precisamente, se nessuna forza non conservativa compie lavoro), la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale di un sistema si conserva, cioè non cambia nel tempo.

La legge di conservazione dell'energia meccanica vale anche per i sistemi composti da più corpi e nei casi in cui più forze conservative siano simultaneamente in azione: allora l'energia potenziale deve essere considerata come la somma delle energie potenziali associate a ciascuna forza e l'energia cinetica come la somma delle energie cinetiche di tutti i corpi.

L'energia meccanica di un sistema si conserva solo in condizioni ideali di assenza di attrito e quasi mai nella realtà. Tuttavia, l'energia meccanica che manca alla fine di ogni processo reale non è andata distrutta, ma si è trasformata in *energia interna* dei corpi e dell'ambiente.

L'**energia interna** di un corpo è l'energia complessiva delle molecole che lo costituiscono; un aumento di questa energia si manifesta, di solito, come un aumento di temperatura.

Se nel bilancio si tiene conto non solo dell'energia meccanica, ma anche di tutte le altre forme di energia, si osserva che:

l'**energia totale** (meccanica, interna, elettrica, elettromagnetica...) si conserva.

3 Meccanica dei fluidi e termodinamica

Un solido ha una forma fissa e un volume proprio. Invece un **liquido** può scorrere e quindi assume la forma del recipiente; tuttavia, ha anch'esso un volume proprio ed è difficile da comprimere.

Anche un **gas** può scorrere, ma, a differenza di un liquido, occupa sempre tutto il volume interno del recipiente ed è facilmente comprimibile.

Per la loro proprietà di scorrere, cioè di *fluire*, i liquidi e i gas sono detti **fluidi**.

3.1 Densità e pressione

La **densità** ρ (lettera greca «rho») di un materiale omogeneo è il rapporto tra la massa m e il volume V di un suo campione:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Per un corpo non omogeneo, costituito da materiali di diversa densità, questa formula definisce la *densità media*.
La densità si misura in kg/m^3; quella dell'acqua vale 1000 kg/m^3.

Esempio. Conoscendo la densità, puoi determinare la massa di un dato volume di una sostanza. La massa di 1 m^3 di acqua è

$$m = \rho\, V = (1000\ \mathrm{kg/m^3})\ (1\ \mathrm{m^3}) = 1000\ \mathrm{kg}$$

Quella di 1 L d'acqua, essendo 1 L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3, è 1000 volte più piccola, cioè vale 1 kg.

La **pressione** p è la grandezza scalare che misura la spinta perpendicolare a cui è sottoposta una superficie per unità di area.
Data una forza $\vec{F}$ applicata in modo uniforme a una superficie di area S, se $F_{\perp}$ è il modulo del vettore componente di $\vec{F}$ perpendicolare alla superficie, si ha:

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}$$

Nel SI l'unità di misura della pressione è il **pascal**, indicato con Pa (1 Pa = 1 N/m^2).
Spingendo contro una superficie, si può esercitare una pressione con una mano. Anche i fluidi esercitano una pressione, ossia spingono in direzione perpendicolare le superfici con cui sono a contatto. Per esempio, la **pressione atmosferica**, che è prodotta dall'aria a causa del suo peso, agisce su ogni superficie a contatto con l'atmosfera.
Non ti accorgi della pressione atmosferica perché tutte le superfici del tuo corpo sono a essa soggette, comprese le pareti delle cavità interne: l'aria ti spinge ugualmente da sopra e da sotto, da davanti e da dietro, da dentro e da fuori, esercitando su di te una forza totale nulla.
Il **valore normale della pressione atmosferica** (misurato al livello del mare a 45° di latitudine e alla temperatura di 15 °C) è

$$p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa}$$

ed è usato spesso come unità di pressione, con il nome di **atmosfera** (atm):

$$1\ \mathrm{atm} = 1{,}013 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa}$$

Si chiama **manometro** lo strumento utilizzato per misurare la pressione di un fluido in un recipiente e **barometro** quello per la misurazione della pressione atmosferica.

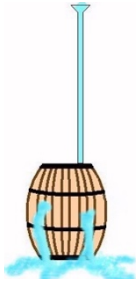
3.2 Semplici considerazioni di statica e dinamica dei fluidi

La pressione p esercitata da un fluido su una superficie è dovuta al peso della parte di fluido che si trova più in alto, oltre che alla pressione a cui è sottoposta la superficie superiore del fluido stesso. Perciò, p è maggiore se la profondità h entro il fluido è maggiore.
Per i liquidi, che sono fluidi incomprimibili, cioè di densità ρ costante e indipendente da h, l'andamento di p in funzione di h è descritto dalla **legge di Stevino**:

$$p = p_0 + \rho\, g\, h$$

La costante p_0, al secondo membro, è la pressione sulla superficie superiore del liquido, che è uguale alla pressione atmosferica quando il liquido è aperto all'aria. La differenza $p - p_0 = \rho g h$ è la pressione dovuta al peso del liquido, chiamata **pressione idrostatica**.
La legge di Stevino dice che la pressione in un liquido dipende dalla profondità h, ma non dal volume del liquido né dalla forma del recipiente.

Esempio. Per quanto stretta, una colonna d'acqua può produrre, grazie alla sua altezza h, una pressione così grande da sfasciare una botte.

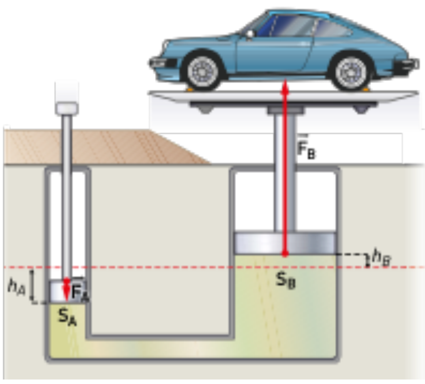


La pressione di un fluido su una superficie non dipende da come è orientata la superficie. Ogni fluido esercita la sua pressione non solo sul fondo del recipiente, ma su tutte le pareti che lo confinano e su tutte le porzioni di superficie dei corpi immersi. I liquidi in equilibrio, in particolare, trasmettono in tutte le direzioni ogni variazione di pressione, in accordo con la **legge di Pascal**:

una variazione di pressione prodotta su qualunque superficie a contatto con un liquido in equilibrio, completamente racchiuso da pareti, si trasmette inalterata a ogni altra superficie a contatto con il liquido.

Con qualche restrizione, la legge di Pascal vale anche per i gas all'equilibrio: è applicabile se la quantità di gas considerata è sufficientemente piccola, in modo che al suo interno le differenze di densità dovute al peso siano trascurabili.

Esempio. Il torchio idraulico è utilizzato nelle autofficine, per sollevare pesi grandi mediante forze piccole; nella sua forma più semplice è costituito da due cilindri, pieni di olio e collegati tra loro, e da due pistoni.



In accordo con la legge di Pascal, la pressione esercitata sul liquido attraverso il pistone più piccolo, che viene spinto verso il basso con una forza $\vec{F}_A$, si trasmette invariata al pistone più grande. Il secondo pistone risente quindi di una forza $\vec{F}_B$, che tende a sollevarlo.

Se i due pistoni, rispettivamente, hanno aree S_A e S_B, la pressione del primo sul liquido è $p_A = \frac{F_A}{S_A}$ e quella del liquido sul secondo è $p_B = \frac{F_B}{S_B}$. Poiché tali pressioni sono uguali, i moduli delle forze che agiscono sui pistoni sono direttamente proporzionali alle aree dei pistoni stessi:

$$\frac{F_A}{S_A} = \frac{F_B}{S_B}$$

Se F_B è uguale al peso di un'automobile, una forza di intensità $F_A = F_B \frac{S_A}{S_B}$ tiene l'automobile in equilibrio e una forza appena un po' più intensa mette l'automobile in movimento verso l'alto. Poiché, tuttavia, l'olio del torchio idraulico conserva il proprio volume, quando il pistone piccolo si sposta in giù di un tratto h_A per effetto della forza applicata, il pistone grande si solleva di un tratto h_B più breve. Quindi il torchio idraulico moltiplica le forze ma riduce gli spostamenti.

Si chiamano **vasi comunicanti** due o più recipienti uniti da un tubo. Un liquido omogeneo (o solo acqua o solo mercurio ecc.) versato in un sistema di vasi comunicanti di qualunque forma raggiunge dappertutto lo stesso livello.

I due rami di un tubo a U sono vasi comunicanti. Nel caso illustrato nella **FIGURA 10** il tubo contiene mercurio e acqua, due liquidi di diversa densità che non si mescolano. Il livello dell'acqua, che ha densità ρ_1 minore, è più alto di quello del mercurio, la cui densità ρ_2 è maggiore.

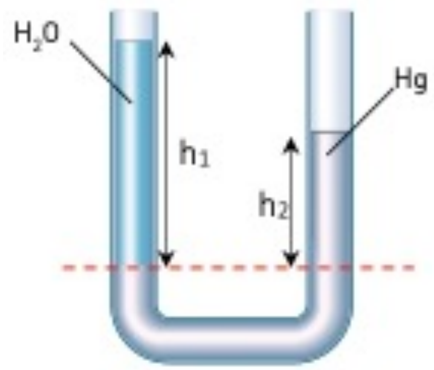


FIGURA 10 *Due vasi comunicanti con liquidi di diversa densità.*

All'equilibrio, infatti, le pressioni idrostatiche esercitate dai due liquidi sulla superficie di contatto devono essere uguali tra loro:

$$\rho_1 \cancel{g}\, h_1 = \rho_2 \cancel{g}\, h_2$$

Da questa equazione si nota che le altezze h_1 e h_2 a cui si portano i due liquidi nel tubo a U, misurate rispetto alla superficie di contatto, sono inversamente proporzionali alle loro densità:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Su un corpo immerso in un fluido, le differenze di pressione tra strati di fluido posti a profondità diverse creano la *spinta di Archimede*.

La **legge di Archimede** dice che un corpo immerso in un fluido subisce una forza verticale verso l'alto, di modulo F_A uguale al peso del fluido spostato. Poiché tale peso è dato dalla densità ρ del fluido moltiplicata per il volume V della quantità di fluido spostata e per l'accelerazione di gravità g, si ha:

$$F_A = \rho\, V\, g$$

Il volume V del fluido spostato è uguale al volume della porzione immersa del corpo; quindi coincide con il volume del corpo se esso è immerso del tutto.

La legge di Archimede vale sia per i liquidi sia per i gas. La spinta esercitata dall'aria (o *spinta aerostatica*) spiega, per esempio, il moto ascendente e la permanenza in aria di una mongolfiera.

Un corpo immerso in un liquido affonda, rimane in equilibrio o emerge a seconda che il suo peso sia maggiore, uguale o minore della spinta di Archimede. La **condizione di galleggiamento** può essere espressa anche in termini di densità:

un corpo affonda, rimane in equilibrio o sale a galla quando la sua densità media è rispettivamente maggiore, uguale o minore di quella del liquido in cui è immerso.

Esempio. La spinta di Archimede su un sommergibile è maggiore quando il sommergibile è a galla, quando galleggia sommerso o quando poggia sul fondo? In quale dei tre casi il peso del sommergibile è maggiore? In quale (o quali) il peso è equilibrato dalla spinta di Archimede?

- La spinta è massima quando il volume del liquido spostato è uguale all'intero volume del sommergibile, cioè quando il sommergibile è completamente immerso, sia che galleggi sia che poggi sul fondo.
- Il sommergibile ha il peso maggiore quando poggia sul fondo: in questo caso la forza peso supera in intensità la spinta di Archimede (che, per quanto detto al punto precedente, è la massima possibile).
- La forza peso è equilibrata dalla forza di Archimede nei due casi in cui il sommergibile galleggia: quando l'immersione è parziale, il peso e la spinta, che sono tra loro uguali e opposti, sono minori; quando l'immersione è completa, il peso e la spinta sono maggiori.

Le leggi di Stevino, di Pascal e di Archimede descrivono i fenomeni di **fluidostatica**, che riguardano i fluidi fermi all'equilibrio. La **fluidodinamica**, cioè la descrizione dei moti dei fluidi in relazione alle forze che li determinano, è in generale molto complessa. Tuttavia, alcuni casi particolari possono essere trattati in modo semplice.

L'acqua di un fiume forma una *corrente*, che ha il letto del fiume come condotto. Un altro esempio di corrente è il flusso del metano verso una caldaia. In questo caso il condotto è il tubo del gas.

Si ha una **corrente stazionaria** quando la velocità del fluido è costante in ogni punto, anche se può essere diversa da punto a punto.

In condizioni stazionarie, il volume di fluido che in un dato tempo attraversa la sezione trasversale del condotto in un tratto è uguale a quello che, nello stesso tempo, la attraversa in ogni altro tratto. Perciò (FIGURA 11):

in una corrente è stazionaria la velocità aumenta quando il fluido passa da una parte più larga del condotto a una parte più stretta e, viceversa, diminuisce dove il condotto si allarga.

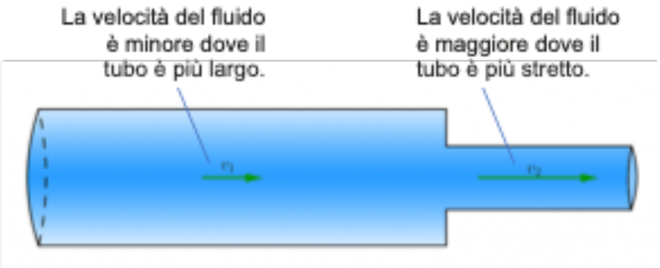


FIGURA 11 *Le velocità in una corrente stazionaria.*

Precisamente, la velocità di un fluido e l'area della sezione trasversale del condotto sono legate da una relazione di proporzionalità inversa. Se S_1 è l'area in un tratto del condotto e v_1 è la velocità del fluido nello stesso tratto, e se S_2 e v_2 sono l'area e la velocità in un altro tratto, vale la seguente relazione, detta **equazione di continuità**:

$$S_1 \, v_1 = S_2 \, v_2$$

In una corrente stazionaria si verifica il cosiddetto **effetto Venturi**, cioè si osserva che:

nei punti in cui la velocità del fluido è maggiore (per esempio in corrispondenza di una strozzatura del condotto, se il fluido scorre in un condotto), la pressione è minore.

Se tieni un foglio di carta davanti alla bocca e soffi in orizzontale al di sopra del foglio, il foglio si alza (FIGURA 12). Ciò avviene perché la pressione dell'aria in movimento lungo la faccia superiore del foglio è minore della pressione dell'aria ferma al di sotto.

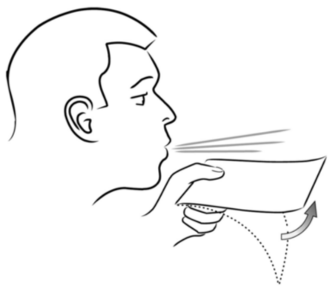


FIGURA 12 *Come sperimentare l'effetto Venturi.*

Una differenza di pressione prodotta dal fluire dell'aria è anche all'origine della **portanza**, cioè della forza che fa salire e sostiene in aria gli aeroplani. Nel sistema di riferimento dell'aereo, l'aereo è fermo e l'aria si muove. Il profilo dell'ala è disegnato in modo che la corrente d'aria sia più lenta sotto e più veloce sopra e, di conseguenza, la pressione sia maggiore sulla superficie inferiore dell'ala che su quella superiore. Il risultato, quando l'aereo e l'aria sono in moto relativo, è una forza rivolta verso l'alto.

3.3 Temperatura

Tutti i fenomeni termici, come il riscaldamento dell'aria da parte di una stufa, il congelamento dell'acqua nel freezer o la cottura del cibo, sono manifestazioni macroscopiche di cambiamenti della materia che avvengono a livello molecolare.

La **temperatura** è un indice dei moti casuali delle molecole, chiamati **moti di agitazione termica**: maggiore è la temperatura di un corpo, maggiore è l'energia cinetica posseduta in media da ogni sua molecola.

Per misurare la temperatura di un oggetto si usa un **termometro**:

- si mette l'oggetto a contatto con il termometro;
- si aspetta che il valore indicato dallo strumento si stabilizzi.

Il termometro a liquido sfrutta la proprietà dei liquidi di dilatarsi se riscaldati e contrarsi se raffreddati. In un termometro di questo tipo:

- la tacca degli 0 °C («zero gradi centigradi») indica il livello a cui si stabilizza il liquido quando il bulbo è immerso nel ghiaccio fondente alla pressione di 1 atm;
- la tacca dei 100 °C («cento gradi centigradi») indica il livello raggiunto quando lo strumento è immerso nel vapore sprigionato dall'acqua bollente alla stessa pressione.

La centesima parte della differenza tra le misure che rileva un termometro quando è a contatto, rispettivamente, con il vapore dell'acqua bollente (100 °C) e con il ghiaccio fondente (0 °C) è chiamata **grado centigrado** o **grado Celsius** (°C).

3.4 Scale Celsius e Kelvin

Nel SI, la temperatura è una grandezza fondamentale e la sua unità di misura è il **kelvin** (K).

Nella **scala Kelvin** o **scala assoluta**, cioè secondo la convenzione adottata per mettere in corrispondenza a ciascuna temperatura un certo numero di kelvin (FIGURA 13):

- alla temperatura del ghiaccio fondente si assegna il valore di 273,15 K (spesso approssimato a 273 K);
- la variazione di 1 K è uguale a quella di 1 °C.

La temperatura di 0 K è detta **zero assoluto**: non è possibile raffreddare un corpo o un sistema fino a questa temperatura, tantomeno al di sotto di essa.

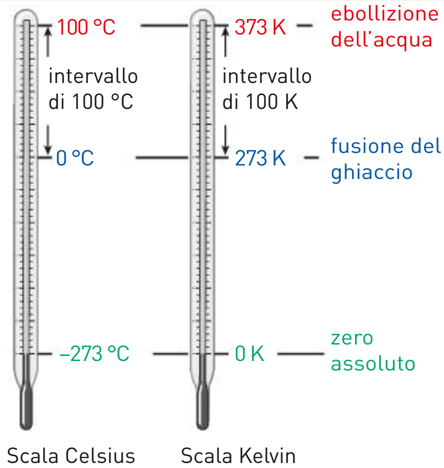


FIGURA 13 *Scala Celsius e scala Kelvin a confronto.*

Le formule di conversione tra la temperatura Celsius *t* e la temperatura assoluta *T* sono le seguenti:

$$T = \left(\frac{t}{°\mathrm{C}} + 273\right)\mathrm{K} \qquad \text{e} \qquad t = \left(\frac{T}{\mathrm{K}} - 273\right)°\mathrm{C}$$

Ogni *variazione* della temperatura è tuttavia espressa dallo stesso numero sia in kelvin che in gradi Celsius.

Esempio. Convertito in kelvin, il valore della temperatura corporea, t = 37 °C, è:

$$T = \left(\frac{37\ \cancel{°C}}{\cancel{°C}} + 273 \right) \mathrm{K} = 310\ \mathrm{K}$$

3.5 Dilatazione termica

Tutti i corpi si dilatano o si contraggono a seconda che la temperatura aumenti o diminuisca. Questo fenomeno è chiamato **dilatazione termica**.

Per qualunque barra di lunghezza iniziale l_i, la variazione di lunghezza Δl che si osserva quando la temperatura varia di ΔT segue con buona approssimazione la **legge sperimentale della dilatazione lineare**:

$$\Delta l = l_i \, \lambda \, \Delta T$$

In questa formula la variazione di lunghezza Δl è la differenza tra la lunghezza finale l e la lunghezza iniziale l_i:

$$\Delta l = l - l_i$$

Inoltre, il simbolo λ (lettera greca «lambda») indica il *coefficiente di dilatazione lineare*, che dipende dal materiale ed è misurato in K^{-1}.

All'aumentare della temperatura i solidi si dilatano in tutte le direzioni. Per esempio, una sfera omogenea aumenta di diametro senza deformarsi e un parallelepipedo allunga tutti i suoi spigoli.

Per una variazione ΔT della temperatura, sia i solidi che i liquidi cambiano il proprio volume di una quantità ΔV, da V_i a V. La **legge sperimentale della dilatazione volumica** è analoga alla precedente:

$$\Delta V = V_i \, \alpha \, \Delta T$$

Il coefficiente α, detto *di dilatazione volumica*, è caratteristico del materiale. Per i solidi si ha, all'incirca, $\alpha = 3\,\lambda$.

I liquidi si dilatano più dei solidi: a parità di aumento di temperatura, l'aumento di volume in rapporto al volume iniziale è molto maggiore per un liquido che per un solido.

Esempio. Il coefficiente di dilatazione volumica dell'olio di oliva è quasi 30 volte maggiore di quello del vetro. Ciò spiega perché una damigiana d'olio, se riempita fino all'orlo, nelle giornate calde trabocca.

L'acqua si comporta in modo diverso dagli altri liquidi. Da 0 °C a 4 °C il suo volume, anziché aumentare, diminuisce; al di sopra dei 4 °C, invece, aumenta.

Alla temperatura di 4 °C, poiché il volume occupato da una data massa d'acqua è minimo, la densità dell'acqua è massima.

Come conseguenza, durante l'inverno, le grandi masse d'acqua congelano solo in superficie. L'acqua sul fondo, più densa, resta sempre alla temperatura di 4 °C.

3.6 Calore

Il riscaldamento di un corpo è un trasferimento di energia, che può avvenire:

- tramite il lavoro delle forze di attrito;
- per passaggio di calore.

Compiere lavoro e cedere **calore** e sono due modi equivalenti per fornire energia a un sistema.

Quindi, nel SI, il calore è misurato in joule come il lavoro.

La **caloria** (cal) è un'unità di misura che non appartiene al SI, ma è usata spesso: vale 1 cal la quantità di calore che fa aumentare di 1 °C (da 14,5 °C a 15,5 °C) la temperatura di 1 g di acqua distillata alla pressione di 1 atm.

Verso la metà del XIX secolo, James P. Joule misurò il lavoro necessario per aumentare di 1 °C la temperatura di una certa massa d'acqua. Trovò così la relazione tra la caloria e l'unità di lavoro, che poi sarebbe stata chiamata joule in suo onore:

$$1 \text{ cal} = 4{,}186 \text{ J}$$

Il fatto che il calore Q e il lavoro W siano costituiti entrambi da un'energia in transito è affermato da un principio generale, detto **primo principio della termodinamica**:

la somma del calore assorbito da un sistema e del lavoro totale compiuto su di esso è uguale alla variazione della sua energia interna.

3.7 Capacità termica e calore specifico

La quantità di calore Q che bisogna fornire a un corpo per aumentare di ΔT la sua temperatura è direttamente proporzionale a ΔT. Il rapporto C tra Q e ΔT è chiamato **capacità termica** ed è una cosante caratteristica del corpo:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

La sua unità di misura è il J/K.

La capacità termica C è direttamente proporzionale alla massa m del corpo. La costante c che moltiplicata per m dà C è il **calore specifico**, misurato in J/(kg · K) e caratteristico della sostanza:

$$C = c\, m$$

Esempio. James P. Joule aveva dimostrato per via sperimentale che, per scaldare di ΔT = 1 K una massa m = 1 kg di acqua, occorre fornire la quantità di calore Q = 4186 J. Quindi la capacità termica di un kilogrammo di acqua è

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{4186 \text{ J}}{1 \text{K}} = 4186 \ \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

e il calore specifico dell'acqua è

$$c_{H_2O} = \frac{C}{m} = \frac{4186 \text{ J/K}}{1 \text{kg}} = 4186 \ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Usando la relazione tra caloria e joule, si può anche cambiare unità di misura e scrivere:

$$c_{H_2O} = 1000 \ \frac{\text{cal}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 1 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Dalle definizioni di capacità termica e di calore specifico si ricava la seguente r**elazione tra calore assorbito e variazione di temperatura**:

$$Q = c\, m\, \Delta T$$

Poiché c e m sono grandezze positive, il segno del calore assorbito Q è uguale al segno della variazione di temperatura ΔT:

- se la temperatura del corpo considerato aumenta (ΔT positiva), Q è positivo, cioè il corpo *assorbe* effettivamente calore dall'ambiente;
- se la temperatura diminuisce (ΔT negativa), Q è negativo, cioè il corpo *cede* calore all'ambiente.

Due corpi di masse m_1 e m_2, temperature iniziali T_1 e T_2 e calori specifici c_1 e c_2, messi a contatto l'uno con l'altro e isolati da altri corpi (in modo che possano scambiare calore solo tra loro), raggiungono una **temperatura di equilibrio** T_e, intermedia tra T_1 e T_2 e tale che:

$$c_1\, m_1\, (T_e - T_1) + c_2\, m_2\, (T_e - T_2) = 0$$

Il primo termine al primo membro di questa equazione è il calore assorbito o ceduto (positivo o negativo) dal primo corpo e il secondo è il calore ceduto o assorbito (negativo o positivo) dal secondo corpo. La loro somma è nulla perché le quantità di calore misurano degli scambi di energia e l'energia si conserva.

3.8 Cambiamenti di stato

La materia può cambiare il proprio stato di aggregazione assorbendo o liberando energia (FIGURA 14). I cambiamenti di stato che richiedono energia sono la **fusione**, la **vaporizzazione** e la **sublimazione**; le trasformazioni inverse (**solidificazione**, **condensazione** e **brinamento**) sono accompagnate da un rilascio di energia.

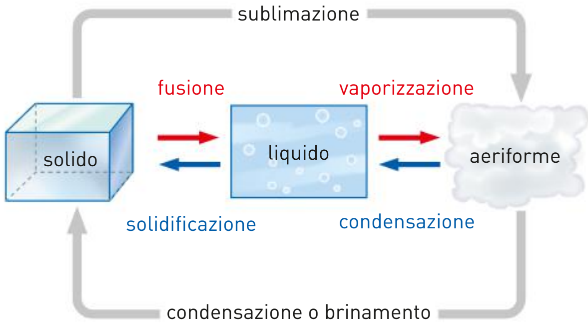


FIGURA 14 *I passaggi tra gli stati solido, liquido e aeriforme.*

La **temperatura di fusione**, a una pressione fissata:

- è la temperatura caratteristica a cui una sostanza allo stato solido fonde (se assorbe calore);
- coincide con la temperatura di solidificazione, a cui la stessa sostanza, da liquida, diventa solida (se cede calore);
- si mantiene costante durante la fusione o la solidificazione.

Alla temperatura di fusione, il calore Q_f necessario per fondere una massa m di una sostanza è il prodotto del **calore latente di fusione** L_f, misurato in J/kg e caratteristico della sostanza, e di m:

$$Q_f = L_f\, m$$

La solidificazione di una massa m della sostanza rilascia tanto calore quanto ne assorbe la fusione di una massa uguale.

La **temperatura di ebollizione**, a una pressione fissata:

- è la temperatura caratteristica a cui una sostanza allo stato liquido bolle;
- si mantiene costante durante l'ebollizione.

Alla temperatura di ebollizione, il calore Q_v necessario per vaporizzare una massa *m* di una sostanza è il prodotto del **calore latente di vaporizzazione** L_v, misurato in J/kg e caratteristico della sostanza, e di *m*:

$$Q_v = L_v\, m$$

Inoltre, alla temperatura di ebollizione, la condensazione di una massa *m* del vapore della sostanza (che avviene per sottrazione di calore) rilascia tanto calore quanto ne assorbe la vaporizzazione di una massa uguale.
Durante la fusione e l'ebollizione, la materia assorbe calore, ma la sua temperatura resta costante: in questi casi il calore assorbito fa aumentare l'energia potenziale delle molecole (che non influenza la temperatura), ma non la loro energia cinetica media (che determina la temperatura).

Esempio. Il calore latente di vaporizzazione dell'acqua, misurato alla temperatura di ebollizione di 100 °C (alla pressione di 1 atm) è quasi sette volte maggiore del suo calore latente di fusione, misurato alla temperatura di fusione di 0 °C (sempre alla pressione di 1 atm): perciò, il calore che serve per vaporizzare completamente una data massa d'acqua a 100 °C è quasi sette volte maggiore di quello che serve per fondere una massa uguale di ghiaccio a 0 °C.

I liquidi passano allo stato aeriforme anche a temperature inferiori a quella di ebollizione. La vaporizzazione che avviene quando un liquido non bolle è chiamata **evaporazione**; essa, per esempio, fa asciugare le pozzanghere e i panni stesi.
L'evaporazione è più lenta dell'ebollizione e avviene solo sulla superficie del liquido, mentre l'ebollizione è un processo tumultuoso che interessa tutto il volume.
Durante l'evaporazione la temperatura non resta costante. Un liquido che evapora perde le sue molecole più veloci: quelle che hanno energia cinetica abbastanza elevata da sfuggire all'attrazione delle altre molecole. Così, l'energia cinetica media delle molecole che restano nel liquido diminuisce e il liquido si raffredda.

3.9 Gas perfetti

Per studiare il comportamento di un gas in condizioni controllate si deve racchiudere il gas in un cilindro munito di pistone a tenuta stagna. Così il gas non esce né entra, cioè la quantità di gas presa in esame non cambia, e lo stato del sistema è descritto da tre grandezze: il *volume*, la *temperatura*, la *pressione*.
Per modificare lo stato del gas si può cambiare il volume alzando o abbassando il pistone, cambiare la pressione rendendo il pistone più o meno pesante (cioè mettendo o togliendo pesi sopra il pistone); si può anche aumentare la temperatura, ponendo il cilindro su un fornello, o diminuirla con un refrigeratore. Ognuno di questi interventi provoca una *trasformazione* del gas, che passa da uno stato iniziale in cui la pressione, la temperatura assoluta e la pressione valgono V_i, T_i e p_i, a uno stato finale in cui le tre grandezze valgono V, T e p.

Si ha una **trasformazione isobara** quando la pressione del gas resta costante ($p = p_i$) e variano solo il suo volume e la sua temperatura.

La **prima legge di Gay-Lussac** afferma che, in una trasformazione isobara, il volume di un gas è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_i}{T_i}$$

Si ha una **trasformazione isocora** quando il volume del gas resta costante ($V = V_i$) e variano solo la sua pressione e la sua temperatura.

La **seconda legge di Gay-Lussac** afferma che, in una trasformazione isocora, la pressione di un gas a volume costante è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta:

$$\frac{p}{T} = \frac{p_i}{T_i}$$

È importante notare che nella prima e nella seconda legge di Gay-Lussac i simboli T e T_i indicano temperature assolute, cioè misurate nella scala Kelvin. Nella scala Celsius, le due leggi assumono una forma più complicata e diventano rispettivamente:

$$V = V_0\,(1 + \alpha\, t) \qquad \text{e} \qquad p = p_0\,(1 + \alpha\, t)$$

con t temperatura in gradi Celsius, V_0 volume a 0 °C, p_0 pressione a 0 °C e $\alpha = \dfrac{1}{273\ °\mathrm{C}}$.

Una trasformazione a temperatura costante ($T = T_i$) è detta **trasformazione isoterma**.

Una trasformazione isoterma è descritta dalla **legge di Boyle**, secondo la quale, a temperatura costante, la pressione e il volume di un gas sono inversamente proporzionali:

$$p\,V = p_i\,V_i$$

Le due leggi di Gay-Lussac e di Boyle valgono quando il gas è poco compresso ed è lontano dal punto di condensazione. Un gas ideale che obbedisce esattamente alla prima e alla seconda legge di Gay-Lussac e alla legge di Boyle è chiamato **gas perfetto**.

Le tre leggi dei gas stabiliscono dei legami tra la pressione p, il volume V e la temperatura assoluta T di una quantità di gas fissata. Se, invece, si vuole includere la quantità di gas tra le variabili, bisogna formulare una legge più generale.

Nel SI la quantità di gas è espressa in moli. Una **mole** (mol) di un gas contiene un numero di molecole uguale a $6{,}022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ (**numero di Avogadro**).

La legge che, per un gas perfetto, mette in relazione le grandezze p, V e T tra loro e con il numero di moli n è chiamata **equazione di stato del gas perfetto**. La sua forma è:

$$p\,V = n\,R\,T$$

La costante di proporzionalità R, detta **costante universale dei gas**, è determinata sperimentalmente:

$$R = 8{,}3145\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol \cdot K}}$$

L'equazione di stato del gas perfetto contiene le leggi di Gay-Lussac e di Boyle come casi particolari. Da essa, infatti, si deduce che:

- se p e n sono costanti, allora V è direttamente proporzionale a T (prima di Gay-Lussac);
- se V e n sono costanti, p è direttamente proporzionale a T (seconda di Gay-Lussac);
- se T e n sono costanti, p e V sono inversamente proporzionali (Boyle).

4 Elementi di elettromagnetismo

Esegui questo esperimento: lega un filo a metà di una bacchetta di plastica, sospendi la bacchetta al filo e strofina una sua estremità con un panno di lana; se strofini con la lana un'altra bacchetta di plastica e avvicini le due parti strofinate, noterai che esse *si respingono*. Se invece strofini una bacchetta di vetro con un pezzo di seta e la porti vicino alla bacchetta di plastica sospesa, vedrai che le estremità strofinate *si attraggono*. Puoi anche verificare che due bacchette di vetro, entrambe strofinate con la seta, *si respingono*.
Si può spiegare l'esperimento descritto facendo l'ipotesi che esistano due tipi di **carica elettrica** e che le cariche interagiscano tra loro con delle forze. Seguendo una convenzione che risale al fisico e politico statunitense Benjamin Franklin, vissuto nel XVIII secolo, si chiama:

- **carica elettrica positiva** quella degli oggetti che si comportano come il vetro strofinato con la seta;
- **carica elettrica negativa** quella degli oggetti che si comportano come la plastica strofinata con la lana.

Se due corpi hanno cariche elettriche dello *stesso segno*, essi si respingono; invece, se hanno cariche elettriche di *segni opposti*, si attraggono.

4.1 Carica elettrica

Le forze elettriche hanno origine dagli elettroni e dai protoni presenti negli atomi.
Gli **elettroni** hanno carica negativa (e massa dell'ordine di 10^{-30} kg); i **protoni** hanno carica positiva (e massa dell'ordine di 10^{-27} kg).
Ogni atomo ha uno stesso numero di protoni e di elettroni e la carica di un protone controbilancia esattamente la carica di un elettrone; quindi l'atomo è *neutro*, cioè ha carica elettrica uguale a zero.
Insieme ai **neutroni**, che sono particelle prive di carica elettrica, i protoni formano il *nucleo* dell'atomo. In questo corpuscolo i protoni sono legati strettamente tra loro e ai neutroni; perciò non sono liberi di muoversi e non abbandonano mai l'atomo a cui appartengono. Gli elettroni, invece, che sono trattenuti attorno al nucleo da forze più deboli, in certi casi si allontanano e passano da un atomo all'altro.
Un atomo che perde uno o più elettroni si ritrova con un eccesso di protoni e quindi diventa carico positivamente; viceversa, un atomo che acquista uno o più elettroni diventa carico negativamente.
Di solito i corpi sono neutri, perché sono formati da atomi neutri. Se un corpo è carico, vuol dire che si è creato uno squilibrio tra protoni ed elettroni.
Un corpo è carico negativamente quando ha più elettroni che protoni; è carico positivamente quando ha meno elettroni che protoni.
Quando il vetro viene strofinato con la seta, alcuni elettroni, strappati al vetro, passano alla seta. Il pezzo di seta, che prima era neutro, acquista elettroni e si carica negativamente. La bacchetta di vetro, che invece perde un po' dei suoi elettroni, diventa positiva. In definitiva, la quantità di cariche elettriche microscopiche dei due segni (elettroni e protoni) che c'era all'inizio c'è anche alla fine. In altre parole:
la carica elettrica si conserva.

Nel SI l'unità di misura della carica elettrica è chiamata **coulomb** (C). Tutti gli elettroni hanno la stessa carica (negativa) $-e$, il cui valore è $-e = -1{,}602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}$ C.
Finora non è mai stata osservata una carica isolata più piccola (in valore assoluto) di quella dell'elettrone. Perciò:

la carica elettrica si presenta sempre come un multiplo, positivo o negativo, della **carica elettrica elementare** $e = 1{,}602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}$ C.

4.2 Forza di Coulomb e campo elettrico

Considera due corpi puntiformi, cioè molto piccoli rispetto alla distanza reciproca. Il fatto che, in base ai segni delle loro cariche, essi si respingano o si attraggano significa che la forza elettrica dell'uno sull'altro è sempre diretta lungo la retta che li congiunge, ma non ha sempre lo stesso verso (**FIGURA 15**):

- se le due cariche sono entrambe positive o entrambe negative, i due vettori forza $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ (uguali e opposti per il terzo principio della dinamica) puntano verso l'esterno;
- se una delle due cariche è positiva e l'altra è negativa, i due vettori forza puntano verso l'interno.

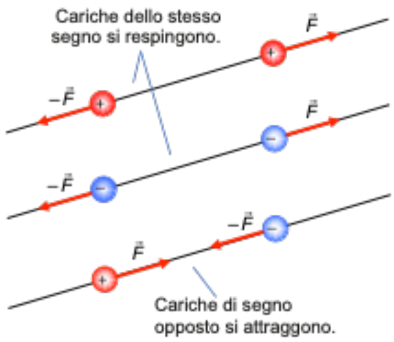


FIGURA 15 *La forza elettrica tra due cariche puntiformi.*

Se Q_1 e Q_2 sono le cariche elettriche (in coulomb) dei due corpi puntiformi interagenti e r è la loro distanza reciproca, il modulo F della forza che essi esercitano l'uno sull'altro è descritto come segue dalla **legge di Coulomb**:

$$F = k_0 \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

In questa formula compaiono i valori assoluti di Q_1 e Q_2 perché ciascuna carica può anche essere negativa, ma il modulo della forza è per definizione positivo.
La costante di proporzionalità k_0 è determinata per via sperimentale. Se le cariche sono nel vuoto o nell'aria, si ha:

$$k_0 = 8{,}99 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}$$

Le forze elettriche, così come le forze gravitazionali, agiscono anche tra oggetti che non siano a contatto tra loro. Perciò, sia l'elettricità sia la gravità possono essere descritte in relazione a un *campo*: un campo elettrico in un caso e gravitazionale nell'altro, che influenzano a distanza, rispettivamente, le cariche e le masse.
Ogni carica modifica le proprietà dello spazio circostante in modo che una seconda carica, introdotta in quello spazio, risenta di una forza. La perturbazione dello spazio generata da

una carica costituisce il campo elettrico di tale carica. Si può affermare che ogni altra carica interagisca con il campo elettrico e non direttamente con la carica che lo produce.
Messa in un punto P all'interno di un campo elettrico, una carica puntiforme q subisce una forza $\vec{F}$ che in generale cambia da punto a punto. Il **campo elettrico** $\vec{E}$ in P è definito come il rapporto tra $\vec{F}$ e q:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Da questa definizione si deduce che il campo elettrico è una grandezza vettoriale e ha come unità di misura il **newton fratto coulomb** (N/C).

Se la sorgente del campo elettrico è una singola carica puntiforme Q, la forza $\vec{F}$ che agisce su un'altra carica puntiforme q è descritta dalla legge di Coulomb. Ammesso che q sia positiva e che la distanza reciproca delle due cariche sia r, il modulo di $\vec{F}$ è:

$$F = k_0 \frac{|Q|\, q}{r^2}$$

Allora, per definizione, il modulo del campo elettrico a distanza r dalla sua sorgente Q è:

$$E = \frac{F}{q} = k_0 \frac{|Q|}{r^2}$$

Come puoi notare, il campo elettrico dipende dalla carica Q che lo genera, ma non dipende dalla carica q che viene usata per rilevarlo, detta *carica di prova*.
La sorgente di un campo elettrico può essere una singola carica puntiforme, come nel caso descritto, o anche un insieme di più cariche:
il campo totale prodotto in un punto da più cariche fisse è la somma (calcolata con le regole per i vettori) dei campi che le singole cariche produrrebbero da sole in quel punto.

Se è noto il campo elettrico $\vec{E}$ in un punto, si può calcolare la forza $\vec{F}$ che agisce su *qualsiasi* carica elettrica q, positiva o negativa:

$$\vec{F} = q\, \vec{E}$$

I vettori $\vec{F}$ ed $\vec{E}$ hanno sempre la stessa direzione: se la carica q è positiva, $\vec{F}$ ed $\vec{E}$ hanno anche lo stesso verso; se invece q è negativa, hanno versi opposti.
Per rappresentare graficamente un campo elettrico si usano le **linee di campo**, cioè linee tangenti in ogni punto al vettore $\vec{E}$ e orientate nel verso di $\vec{E}$. La FIGURA 16 mostra le linee del campo di una carica puntiforme, positiva in un caso e negativa nell'altro: osserva che la carica positiva crea un campo elettrico uscente, mentre la carica negativa ne crea uno entrante.

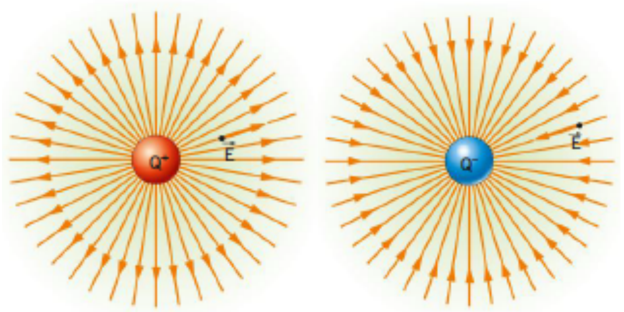


FIGURA 16 *Il campo elettrico di una carica puntiforme positiva e quello di una carica puntiforme negativa.*

4.3 Caratteristiche basilari di un'onda elettromagnetica: periodo, frequenza, lunghezza d'onda

Tramite un campo vettoriale possono essere descritte anche le interazioni magnetiche, come quella tra una calamita e un chiodo di ferro, quella tra la Terra e l'ago di una bussola o quella messa in evidenza dall'esperimento di Oersted (FIGURA 17), nel quale l'ago di una bussola viene fatto ruotare da una corrente elettrica.

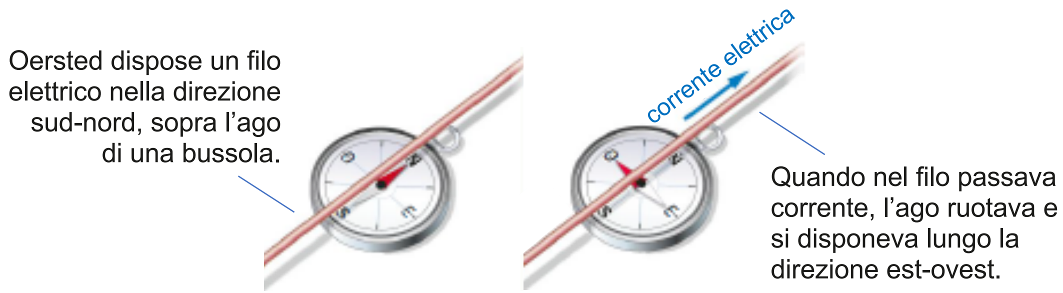


FIGURA 17 *L'esperimento di Oersted.*

Il campo che serve per descrivere queste interazioni è chiamato **campo magnetico** e indicato con $\vec{B}$. Le sue sorgenti sono i magneti, naturali come la magnetite (un minerale del ferro) o artificiali come le comuni calamite, e anche le cariche elettriche in movimento, cioè le correnti elettriche. La sua unità di misura è il **tesla** (T):

$$1\ \mathrm{T} = 1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}$$

La Terra si comporta come un magnete. Il campo magnetico da essa generato ha, sulla sua superficie, un'intensità media di 50 μT.
Per esplorare le proprietà di un campo magnetico, cioè la sua orientazione nello spazio e la sua intensità, si possono usare un *magnete di prova* e una *corrente di prova*. Si osserva, infatti, che un campo magnetico, sia esso prodotto da magneti o da correnti, agisce sui magneti (facendoli ruotare, se già non sono orientato nel modo giusto) e sulle correnti.
Si osserva anche che, se per qualche motivo un campo magnetico varia nel tempo in una certa regione dello spazio, nella stessa regione esso dà origine a un campo elettrico, che a sua volta varia nel tempo. Questo fenomeno è chiamato **induzione elettromagnetica**.
Simmetricamente, un campo elettrico variabile dà origine a un campo magnetico variabile. Quando, per esempio, una carica elettrica oscilla avanti e indietro con un periodo T, essa crea un campo elettrico variabile, che crea un campo magnetico variabile, che crea un campo elettrico variabile e così via: questi campi, mentre oscillano con lo stesso periodo T, si allontanano dalla carica da cui hanno avuto origine e si propagano nello spazio sotto forma di **onda elettromagnetica**.
Puoi pensare al campo elettrico e al campo magnetico come a uno specchio d'acqua e a un'onda elettromagnetica come a un'onda sulla superficie dell'acqua, cioè una serie di creste e di gole che si spostano allontanandosi dalla sorgente. Osservando un punto sull'acqua, puoi vedere che esso oscilla su e giù: si alza quando passa una cresta e si abbassa quando passa una gola.

- La distanza tra due creste consecutive (o due gole) è la **lunghezza d'onda**. Questa distanza va misurata lungo la **direzione di propagazione**, cioè su un asse lungo cui è diretto il moto delle creste (e delle gole).

- L'intervallo di tempo che, in un punto fissato della superficie dell'acqua, separa il passaggio di una cresta (o di una gola) da quello della cresta (o gola) successiva è il **periodo dell'onda** e il reciproco del periodo è la **frequenza**.
- Tutte le creste e le gole viaggiano attraverso la superficie dell'acqua con la stessa velocità, chiamata **velocità di propagazione** dell'onda.
- Al passaggio dell'onda, zone sempre più lontane della superficie dell'acqua si mettono in movimento, oscillando su e giù: ciò dimostra che l'onda trasporta energia.

Per ogni tipo di onda (onde sull'acqua, onde sismiche, onde sonore ecc.) la velocità di propagazione v è il rapporto tra la lunghezza d'onda λ e il periodo T, ossia il prodotto tra λ e la frequenza $f = \frac{1}{T}$:

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

Onde radio, **radiazione infrarossa**, **luce visibile**, **radiazione ultravioletta**, **raggi X** e **raggi gamma** sono onde elettromagnetiche, elencate in ordine di lunghezza d'onda decrescente: oltre che per la lunghezza d'onda, esse si distinguono per il modo in cui sono prodotte e assorbite dalla materia.

Tutte le onde elettromagnetiche, indipendentemente dalla loro lunghezza d'onda, viaggiano nel vuoto alla **velocità della luce** c:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

Le onde elettromagnetiche, e in generale le onde di qualsiasi natura, trasportano energia. Così, per esempio, un corpo che assorbe radiazione infrarossa e luce provenienti dal Sole si scalda e una pietanza si cuoce in un forno a microonde.

Nelle onde sull'acqua, la grandezza che varia con andamento oscillante in funzione del tempo e della distanza percorsa è lo spostamento dei volumetti d'acqua dalla loro posizione di equilibrio. Nelle onde elettromagnetiche le grandezze oscillanti sono due: il campo elettrico $\vec{E}$ e il campo magnetico $\vec{B}$.

In ogni punto, istante per istante, i vettori $\vec{E}$ e $\vec{B}$ di un'onda elettromagnetica sono perpendicolari tra loro e hanno i moduli proporzionali. I vettori $\vec{E}$ e $\vec{B}$ sono anche perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda. Quest'ultima proprietà si esprime dicendo che:

le onde elettromagnetiche sono onde trasversali.

Immagina di scattare una fotografia istantanea di un'onda elettromagnetica che si propaga lungo un asse z e, dopo un intervallo di tempo Δt, di scattarne un'altra (FIGURA 18).

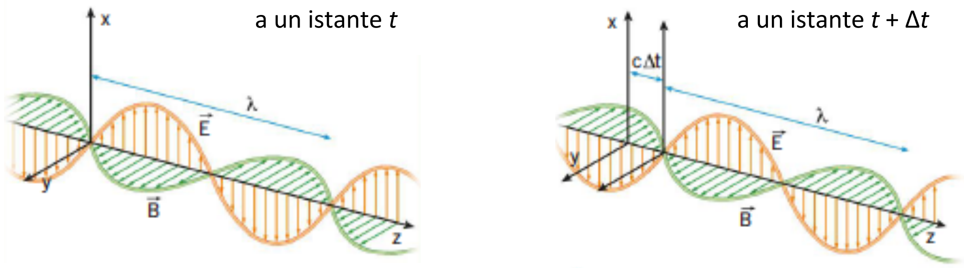


FIGURA 18 *Il profilo di un'onda elettromagnetica a un istante t fissato e la sua evoluzione in un intervallo di tempo Δt.*

- La prima fotografia mostrerebbe che i due campi variano con la coordinata z: la lunghezza d'onda λ è la minima distanza dopo la quale il profilo dell'onda si ripete.
- Dalla seconda fotografia noteresti che il profilo dell'onda avanza lungo l'asse z, restando sempre uguale a sé stesso e percorrendo, in Δt, la distanza $c\,\Delta t$.

La **FIGURA 19** mostra come varia la stessa onda al trascorrere del tempo, in un determinato punto dello spazio. Il periodo T dell'onda è l'intervallo di tempo in cui i campi $\vec{E}$ e $\vec{B}$ compiono le loro oscillazioni (dopo il quale, cioè, tornano a ripetere il moto con identico andamento temporale).

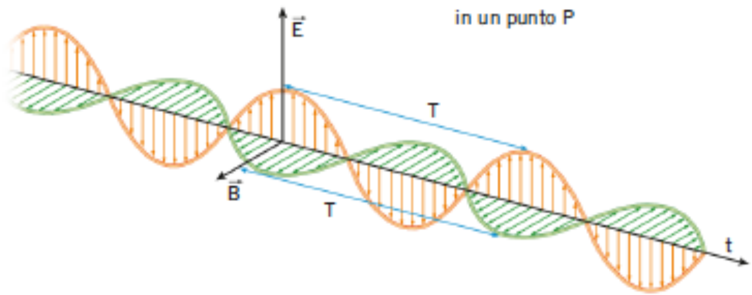


FIGURA 19 *L'onda elettromagnetica in funzione del tempo, in un punto fissato.*

Come per tutte le onde, anche per un'onda elettromagnetica la frequenza f è determinata dalla sorgente. La velocità di propagazione e la lunghezza d'onda λ, invece, dipendono dal mezzo. Nel vuoto, dove la velocità è c, si ha:

$$c = \lambda f$$

4.4 Tensione e corrente elettrica

Quando un corpo cade, la forza peso che agisce su di esso compie un lavoro positivo e l'energia potenziale gravitazionale diminuisce. Studiando l'energia meccanica hai imparato che a ogni forza conservativa può essere associata un'energia potenziale U; inoltre, hai visto che la variazione ΔU dell'energia potenziale, cambiata di segno, è uguale al lavoro W che compie la forza durante lo spostamento del corpo a cui essa è applicata.

La forza elettrica è un altro esempio di forza conservativa, per la quale può essere quindi definita un'energia potenziale. Tuttavia, quando si studiano i fenomeni elettrici, invece di considerare il lavoro W compiuto su una carica durante un suo spostamento, conviene fare riferimento al lavoro per unità di carica.

La **tensione elettrica** $\Delta V = V_B - V_A$ di un punto B rispetto a un punto A è definita come l'opposto del rapporto $\frac{W}{q}$, dove W è il lavoro che compie la forza elettrica quando una carica q va da A a B:

$$\Delta V = -\frac{W}{q}$$

La tensione elettrica è chiamata anche **differenza di potenziale**. La sua unità di misura nel SI è il **volt** (V):

$$1\ \text{V} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Considera una carica q positiva, ferma in un punto A in una zona dello spazio in cui sia presente un campo elettrico $\vec{E}$. Per effetto della forza elettrica $\vec{F} = q\,\vec{E}$, la carica si mette in movimento nella stessa direzione e nello stesso verso di $\vec{E}$. Quando la carica ha raggiunto un punto B, il lavoro W compiuto da $\vec{F}$ è positivo. Allora la differenza di potenziale elettrico $\Delta V = V_B - V_A$ è negativa, essendo uguale a $-\frac{W}{q}$: in termini equivalenti, si può dire che la carica positiva, muovendosi lungo il campo $\vec{E}$, si è spostata da un punto a potenziale elettrico V_A maggiore a uno a potenziale elettrico V_B minore.

Sotto l'azione della sola forza elettrica e partendo da ferma, una carica positiva va sempre «in discesa», cioè da un punto a potenziale maggiore a uno a potenziale minore. Al contrario, una carica negativa va «in salita» (da potenziale minore a potenziale maggiore).

Il comportamento delle cariche negative si spiega con il fatto che su di esse il verso della forza elettrica è opposto al verso del campo $\vec{E}$.

Le proprietà discusse caratterizzano il moto delle cariche elettriche sia nel vuoto sia nei conduttori.

Un **conduttore** è un materiale che contiene cariche elettriche microscopiche dotate di libertà di movimento.

I metalli, per esempio, sono dei conduttori. In un pezzo di metallo una parte degli elettroni può scorrere da una parte all'altra attraverso tutto il volume, ma non è libera di fuoriuscire dalla superficie.

Supponi che un filo di metallo abbia in un certo istante un'estremità carica positivamente (con più protoni che elettroni) e un'estremità carica negativamente (con più elettroni che neutroni). Poiché una carica positiva crea un campo elettrico uscente e una carica negativa ne crea uno entrante, il campo elettrico totale presente nel filo è orientato dall'estremità positiva all'estremità negativa. Ciò equivale a dire che l'estremità positiva ha potenziale elettrico maggiore e l'estremità negativa ha potenziale elettrico minore.

Gli elettroni mobili del metallo, allora, scorrono dall'estremità negativa, a potenziale più basso, a quella positiva, a potenziale più alto. Questo flusso di elettroni costituisce una **corrente elettrica**.

Poiché, tuttavia, lo scorrere di un certo numero di cariche negative $-e$ in un verso equivale allo scorrere di altrettante cariche positive e nel verso opposto, per convenzione si prende come verso della corrente quello opposto al moto degli elettroni (**FIGURA 20**):

la corrente elettrica in un filo conduttore scorre dall'estremità a potenziale elettrico maggiore verso quella a potenziale elettrico minore.

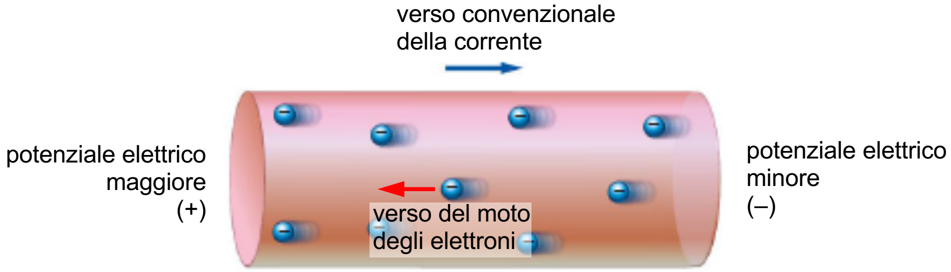


FIGURA 20 *Il verso della corrente elettrica in un filo conduttore è opposto al verso del moto degli elettroni.*

Per evitare la complicazione di tenere conto del segno, si può dunque immaginare che in un conduttore percorso da corrente la carica in movimento sia positiva.

Si definisce l'**intensità di corrente** *i* come la quantità di carica *Q* (positiva) che attraversa una sezione trasversale di un filo conduttore in un intervallo di tempo Δt, divisa per Δt:

$$i = \frac{Q}{\Delta t}$$

Nel SI l'intensità di corrente elettrica è una grandezza fondamentale e la sua unità di misura è l'**ampere** (A).

A mano a mano che la carica positiva scorre verso l'estremità negativa del filo, e lì si accumula, la differenza di carica e di potenziale elettrico tra le due estremità tende ad azzerarsi. Di conseguenza, la corrente si attenua e svanisce.

Un caso analogo si ha con l'acqua contenuta in due vasi comunicanti: attraverso il tubo di connessione, l'acqua scorre dal recipiente in cui il livello è più alto a quello in cui è più basso, ma la corrente si arresta quando il dislivello si annulla.

Per mantenere la corrente d'acqua è necessario inserire tra i due recipienti una pompa, che ripristini via via il dislivello. Analogamente, per mantenere una corrente elettrica in un filo conduttore, è necessario collegare le due estremità del filo a un generatore di tensione, per esempio una pila.

Un **generatore di tensione** è un dispositivo che produce tra i propri terminali, o *poli*, una differenza di potenziale costante.

Il generatore di tensione ha la stessa funzione della pompa: preleva la carica positiva dal polo «–», dove il potenziale è più basso, e al proprio interno la spinge in salita, per portarla al polo «+», dove il potenziale è più alto. Allo stesso tempo, lungo il filo conduttore collegato ai poli «+» e «–» del generatore, la carica positiva ridiscende il dislivello elettrico, cioè fluisce dal «+» al «–».

4.5 Resistenza elettrica e legge di Ohm

L'intensità della corrente in un conduttore dipende non solo dalla tensione applicata, ma anche dalla **resistenza elettrica** del conduttore. Il flusso di carica che costituisce una corrente elettrica è infatti sospinto dalla tensione e contrastato dalla resistenza.

Se tra le estremità di un filo conduttore c'è una certa tensione ΔV e il filo è percorso da una corrente di intensità *i*, la resistenza elettrica *R* del filo è così definita:

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

Nel SI l'unità di misura della resistenza elettrica è l'**ohm** (Ω):

$$1\ \Omega = 1\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$$

Applicando tensioni diverse e misurando le corrispondenti intensità di corrente, Georg S. Ohm stabilì che nei conduttori metallici (e in altri tipi di conduttori, ma non in tutti) la resistenza *R* è costante. Un enunciato della **legge di Ohm**, che a rigore vale quando la temperatura del conduttore è fissata, poiché *R* è sensibile alla temperatura, è quindi il seguente:

la tensione ΔV tra le estremità di un conduttore metallico è direttamente proporzionale all'intensità *i* della corrente che lo percorre.

Per i conduttori metallici si ha dunque, invertendo la definizione di R:

$$\Delta V = R\, i$$

dove R è costante al variare di i.

I conduttori che soddisfano la legge di Ohm sono detti **conduttori ohmici** e i conduttori ohmici che hanno una resistenza elettrica R non trascurabile sono detti **resistori**.

Nella **FIGURA 21** è mostrato lo schema di un circuito composto da un generatore di tensione e un resistore. Le linee che uniscono i due elementi rappresentano i fili elettrici di collegamento, la cui resistenza è considerata nulla.

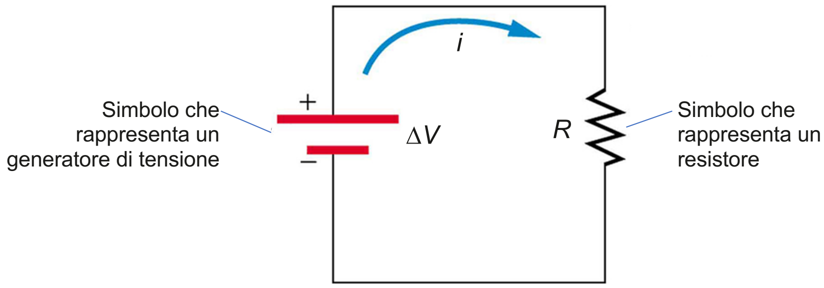


FIGURA 21 *Un semplice circuito elettrico.*

Un circuito elettrico può contenere più resistori collegati tra loro (**FIGURA 22**):

- due resistori sono collegati *in serie* se sono posti a contatto uno di seguito all'altro;
- due resistori sono collegati *in parallelo* se un'estremità del primo è connessa a un'estremità del secondo e l'altra estremità del primo all'altra estremità del secondo.

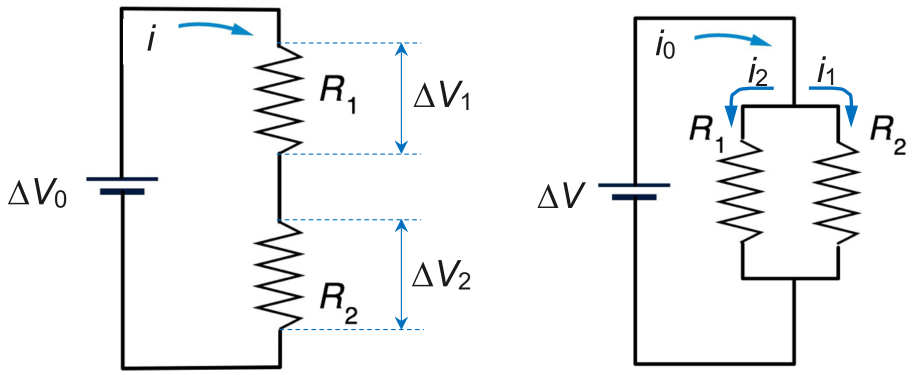


FIGURA 22 *Due resistori in serie (a sinistra) e due resistori in parallelo (a destra).*

Si può dimostrare che due resistori di resistenze R_1 e R_2 collegati in serie sono equivalenti a un singolo resistore di resistenza R_{eq}, uguale alla somma di R_1 e R_2:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

In questo tipo di collegamento i due resistori sono attraversati dalla stessa corrente elettrica, di intensità i, e hanno tra le loro estremità, rispettivamente, le tensioni $\Delta V_1 = R_1\, i$ e $\Delta V_2 = R_2\, i$, la cui somma è uguale alla tensione ΔV_0 applicata all'insieme dei due:

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 = \Delta V_0$$

Il singolo resistore di resistenza R_{eq} è equivalente ai due collegati in serie nel senso che è attraversato da una corrente della medesima intensità i quando è sottoposto alla tensione ΔV_0.

Se i resistori in serie sono più di due, la resistenza equivalente è la somma di tutte le singole resistenze: un resistore in più, infatti, è un nuovo ostacolo al fluire della carica elettrica.

Anche per due resistori in parallelo si può definire una resistenza equivalente R_{eq}. Se R_1 e R_2 sono le resistenze dei due resistori, si ha:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \qquad \Rightarrow \qquad R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

I due resistori in parallelo hanno la stessa tensione ΔV tra le proprie estremità e sono attraversati, rispettivamente, da correnti di intensità $i_1 = \dfrac{\Delta V}{R_1}$ e $i_2 = \dfrac{\Delta V}{R_2}$. La somma di i_1 e i_2 è uguale all'intensità i_0 della corrente totale che entra e esce dall'insieme dei due resistori:

$$i_1 + i_2 = i_0$$

Il resistore di resistenza R_{eq}, da solo, è attraversato da una corrente di intensità i_0 quando è sottoposto alla tensione ΔV.
Se i resistori in parallelo sono più di due, vale la stessa regola: il reciproco della resistenza equivalente R_{eq} è uguale alla somma dei reciproci di tutte le resistenze.
È facile verificare che, per due o più resistori in parallelo, R_{eq} è minore di ciascuna delle singole resistenze. I resistori in parallelo somigliano alle casse del supermercato: se viene aperta una cassa in più, il flusso dei clienti in attesa scorre meglio; allo stesso modo, ogni resistore aggiunto in parallelo offre un canale in più al passaggio della corrente elettrica e riduce la resistenza equivalente del circuito.

Esempio. Un circuito contiene un generatore che produce la tensione ΔV = 12 V e due resistori collegati in parallelo, di resistenze R_1 = 150 Ω e R_2 = 300 Ω. Qual è l'intensità i_0 della corrente totale che scorre nel circuito? Quali sono le intensità i_1 e i_2 delle correnti che attraversano i due resistori?
La resistenza equivalente è:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(150\ \Omega)(300\ \Omega)}{150\ \Omega + 300\ \Omega} = 100\ \Omega$$

Sfruttando l'equazione che lega tra loro l'intensità di corrente, la tensione e la resistenza, si ottengono i seguenti valori per le tre intensità richieste:

$$i_0 = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{12\ \text{V}}{100\ \Omega} = 120\ \text{mA}$$

$$i_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{12\ \text{V}}{150\ \Omega} = 80\ \text{mA} \qquad i_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{12\ \text{V}}{300\ \Omega} = 40\ \text{mA}$$

Come si vede, vale l'uguaglianza $i_1 + i_2 = i_0$.

Gli strumenti che misurano l'intensità di corrente in un resistore e la tensione tra le sue estremità sono, rispettivamente, l'**amperometro** e il **voltmetro**.
La risposta di un amperometro è direttamente proporzionale all'intensità della corrente che lo attraversa: perciò, affinché la corrente misurata sia la stessa che percorre il resistore, lo strumento e il resistore devono essere collegati in serie. Un voltmetro, invece, rileva la tensione tra i propri terminali, che è uguale alla tensione applicata al resistore solo se lo strumento e il resistore sono collegati in parallelo.