

Alessandro Magalini

# APPUNTI DI FISICA

IL MINIMO DEI SAPERI MINIMI

# CAPITOLO 1

## Cos'è la Fisica

**Definizione:** la Fisica è una Scienza che studia la natura dal punto di vista quantitativo.

**-Scienza** significa materia di studio ESATTA (ovvero tale per cui ripetendo un esperimento nelle stesse condizioni si ottengono risultati compatibili cioè uguali entro le incertezze) o meglio possiamo dire che una Scienza utilizza il metodo sperimentale.

**-Natura** significa realtà, tutto ciò che esiste, oggetti e fenomeni, anche creati dall'uomo: è quindi escluso il mondo virtuale.

**-Quantitativo** significa che ottiene dei dati numerici, dei valori precisi (con misure o calcoli matematici ottenuti applicando delle formule).

### ESEMPI, CONTROESEMPI E PRECISAZIONI

In Fisica, se vogliamo misurare il tempo di caduta di un sasso da una finestra alta 3 metri, non ci importa del colore del sasso (attributo qualitativo).

La Chimica è una scienza (che a differenza della Fisica si occupa anche di aspetti qualitativi della natura ed in particolare di come reagiscono tra loro le molecole) ed ha alcuni ambiti in comune con la Fisica. Le trasformazioni chimiche modificano il tipo di materia, quelle fisiche no.

Gli oggetti della natura possono esistere di per se, come il pianeta Terra o l'atomo, oppure essere creati dall'uomo. Tuttavia un oggetto virtuale, cioè che esiste solo su un computer o su un simulatore non fa parte della natura e quindi esula dall'ambito fisico.

La Fisica utilizza i risultati ed i procedimenti della Matematica.

## Le branche della Fisica

Siccome la Fisica abbraccia tutto ciò che vediamo, o addirittura del quale abbiamo una precisa conoscenza ma è “invisibile” ai nostri occhi, il suo ambito di studio è vastissimo.

Per avere una visione per gruppi degli argomenti di studio, la Fisica è stata suddivisa in BRANCHE e le principali di queste sono:

**-MECCANICA** che riguarda i corpi, il movimento, le forze, l'equilibrio. Si divide in:

- CINEMATICA (studio del moto considerandone le traiettorie),
- STATICA (studio dell'equilibrio),
- DINAMICA (studio delle forze e dei moti risultanti).

**-TERMODINAMICA** che considera in particolare le grandezze temperatura e calore.

**-OTTICA** che studia la luce e il suo comportamento.

**-ACUSTICA** che riguarda le onde sonore e la loro propagazione.

**-ELETTROMAGNETISMO** che studia i fenomeni elettrici e magnetici.

**-ASTROFISICA** che esegue misure sui corpi celesti.

**-FISICA NUCLEARE E PARTICELLARE** che studia il nucleo atomico e le particelle subatomiche (più piccole dell'atomo).

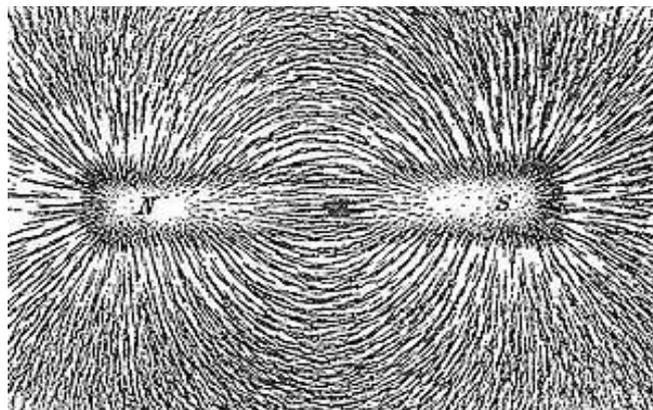


Immagine formata da limatura di ferro vicino ad un magnete.  
Qual è la branca della Fisica che studia questo fenomeno?

# CAPITOLO 2

## Grandezze fisiche e misura

### Il metodo sperimentale

Il metodo sperimentale, o metodo scientifico, è dovuto principalmente a Galileo Galilei (Pisa 1564 - Arcetri 1642) e consiste in una serie di tappe che portano a formulare una legge fisica, generalmente espressa da una formula (che è una scrittura abbreviata).

Più leggi riguardanti lo stesso ambito costituiscono una TEORIA.

Il metodo sperimentale consiste innanzi tutto nell'osservare un fenomeno. Poi si ipotizza quali potrebbero essere le grandezze che lo influenzano (ad esempio la temperatura) e si fanno delle ipotesi. Si esegue poi un esperimento che ripeta il fenomeno osservato per verificare se le ipotesi erano corrette. Se le ipotesi non risultano corrette, si modificano.

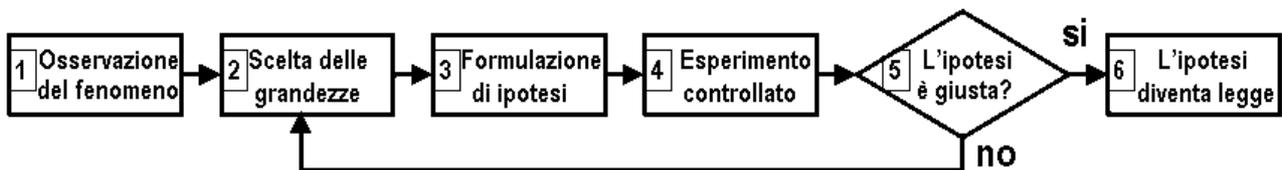


Diagramma di flusso del metodo sperimentale

### ESEMPIO

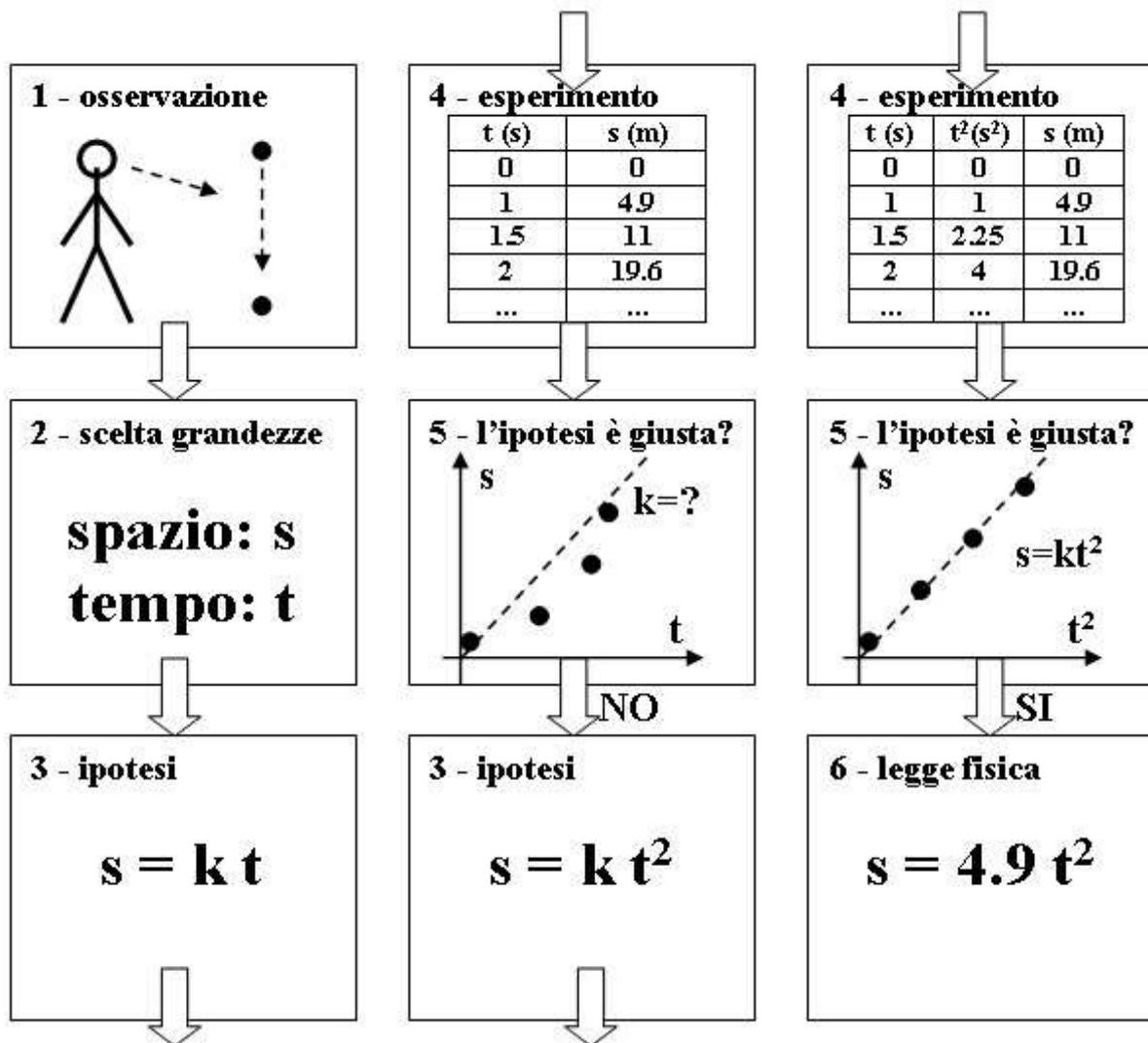
Trovare una legge che descriva la caduta di un oggetto:

Le grandezze in gioco potrebbero essere lo spazio percorso dall'oggetto (l'altezza dalla quale cade) e il tempo impiegato per toccare terra.

Facciamo l'ipotesi che se raddoppia lo spazio raddoppia anche il tempo impiegato. Se eseguiamo l'esperimento lasciando cadere un sasso, verifichiamo dalle misure che è falsa.

Cercando una relazione tra tante misure che possiamo effettuare, possiamo vedere che l'ipotesi corretta è invece che quando raddoppia il tempo, lo spazio diventa il quadruplo e possiamo verificarlo.

Questa è dunque la relazione corretta, e possiamo anche determinare esattamente la formula: lo spazio è uguale a 4,9 volte il tempo al quadrato.



Esempio di applicazione del metodo sperimentale: la legge della caduta dei gravi.

Cos'è una grandezza Fisica.

**DEFINIZIONE:** una grandezza fisica è una proprietà di un fenomeno oppure di uno o più oggetti naturali, percepita direttamente o indirettamente dai nostri sensi (e che può essere misurata, ovvero tradotta in numeri).

**ESEMPI:** la distanza tra due oggetti è una grandezza fisica. Vedremo che la massa di un oggetto è una grandezza fisica, come pure il suo peso a fissate condizioni (si tratta di una forza). Il tempo è un'altra grandezza fisica.

# La misura

**MISURARE il valore di una grandezza = confrontarlo con l'unità di misura.**

Per poter scrivere il risultato di una misura e confrontarlo con misure effettuate da altre persone, dobbiamo fissare delle unità di misura standard per tutti, per questo è stato definito il Sistema Internazionale di misura (chiamato S.I. o M.K.S.A.), che definisce le unità per le grandezze principali, dette fondamentali.

---

<b>Grandezza fondamentale</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Simbolo</b>
lunghezza	metro	m
massa	kilogrammo	kg
tempo	secondo	s
intensità di corrente	ampere	A
temperatura	grado kelvin	°K
quantità di sostanza	mole	mol
Intensità luminosa	candela	cd

---

**Tabella delle grandezze fondamentali S.I.**

## OSSERVAZIONI

1) A prima vista nel S.I. abbiamo due unità di misura per la massa. In realtà, mentre la mole misura la massa di un certo numero di molecole, e quindi riguarda le proprietà molecolari, il kilogrammo definisce la massa degli oggetti dal punto di vista macroscopico, che è quello a cui siamo soliti pensare.

2) Massa e peso sono due concetti diversi, anche se spesso nella vita quotidiana vengono confusi tra loro: la massa di un oggetto dipende dalla quantità di materia della quale è formato, il peso è la forza che la Terra esercita su di esso. Se spostiamo lo stesso oggetto in luoghi diversi, ad esempio in una miniera profonda e su un aereo a 20000m di altitudine, o se lo immergiamo in acqua, il peso varia (anche se solitamente di poco) mentre la massa dell'oggetto rimane costante in ogni caso.

## Multipli e sottomultipli

Per ogni unità di misura sono definiti multipli e sottomultipli, che corrispondono a moltiplicare o dividere per dieci una o più volte quella unità, come in tabella.

Multipli		Sottomultipli	
tera (T)	$10^{12}$	deci (d)	$10^{-1}$
giga (G)	$10^9$	centi (c)	$10^{-2}$
mega (M)	$10^6$	milli (m)	$10^{-3}$
kilo (k)	$10^3$	micro ( $\mu$ )	$10^{-6}$
etto (h)	$10^2$	nano (n)	$10^{-9}$
deca (da)	10	pico (p)	$10^{-12}$

**Tabella dei multipli e sottomultipli:** prefissi e potenze di 10 corrispondenti.

Dalle unità di misura fondamentali, oltre che ai multipli e sottomultipli di uso pratico, derivano le unità di misura di tutte le altre grandezze, dette appunto **derivate**.

Ad esempio l'unità di misura della superficie è  $m \times m = m^2$  (metro per metro = metro quadrato), quella del volume  $m^3$ , quella della densità, definita come massa/volume diventa  $kg/m^3$ , e così via.

## Notazione scientifica

**Un numero si dice espresso in notazione scientifica se viene scritto come una sola cifra, seguita eventualmente dalla virgola e da altre cifre, moltiplicata per una potenza di dieci.**

### ESEMPI

Il numero 1200 in notazione scientifica diventa  $1,2 * 10^3$ , poiché  $1,2 * 10 * 10 * 10 = 1200$ .

Il numero 0,02 in notazione scientifica diventa  $2 * 10^{-2}$ , poiché  $2 : 10 : 10 = 0,02$ .

## Misure dirette ed indirette

La misura di una grandezza si dice **diretta** se viene effettuata leggendo direttamente il valore numerico sullo strumento di misura, si dice **indiretta** se viene ottenuta attraverso il calcolo di una espressione matematica (partendo da altre misure dirette).

Ad esempio la distanza Terra-Luna può essere determinata solo con misure indirette.

## Caratteristiche degli strumenti di misura

Le principali caratteristiche di uno strumento di misura sono le seguenti:

### **-SENSIBILITA'**

E' la minima differenza che lo strumento riesce a misurare. Per esempio per un righello millimetrato coincide con la tacca più piccola: 1mm.

### **-FONDO SCALA o PORTATA**

E' il valore massimo che lo strumento riesce a misurare. Per esempio con una bilancia di portata 1kg non possiamo pesare oggetti da 2 o 3 kg.

### **-PRONTEZZA**

La prontezza è il tempo necessario affinché lo strumento risponda ad una variazione della grandezza in esame oppure è rappresentata dal tempo impiegato da questo per dare il risultato.

**Il risultato di una misura è l'intervallo dato dal valore ottenuto, più o meno (+/-) la sensibilità dello strumento.**

**ESEMPIO:** se utilizziamo un cronometro al centesimo di secondo e leggiamo 3,21s scriviamo  $3,21s \pm 0,01s$ , che significa un valore che va da  $(3,21-0,01) = 3,20s$  al valore  $(3,21+0,01) = 3,22s$ .

## Errori di misura

In genere una misura è affetta da una incertezza, chiamata errore. Quando misuriamo la larghezza del quaderno con il righello non ci accorgiamo di questo poiché ripetendo la misura, anche con righelli diversi, otteniamo sempre lo stesso valore. Se misuriamo invece con un calibro di precisione vediamo che possono risultare dei valori di volta in volta leggermente diversi.

Un altro esempio di errore è questo: se confrontiamo più aste millimetriche lunghe almeno 50cm è abbastanza comune trovare uno scarto di mezzo millimetro o più tra una ed un'altra.

## Errori sistematici

Si chiamano errori di misura SISTEMATICI quelli che sono sempre in eccesso o sempre in difetto rispetto al valore vero. Ad esempio se faccio delle misure con il metro ma il mio metro misura 1,001 metri invece di 1,000, tutti i valori che mi risultano saranno leggermente inferiori a quelli veri. Altro esempio: se misuro più volte una lunghezza e non posiziono mai lo strumento perfettamente parallelo all'oggetto da misurare, ottengo tutti valori maggiori di quello effettivo.

Gli errori di misura sistematici possono essere riconosciuti ed eliminati fino alla precisione desiderata effettuando le misure con più strumenti e/o metodi diversi.

## Errori casuali o accidentali

Quando la sensibilità dello strumento è un valore sufficientemente piccolo rispetto al valore da misurare, oppure intervengono variabili esterne (come le variazioni del tempo di reazione mentre si aziona un cronometro oppure un aumento di temperatura che fa dilatare un oggetto), abbiamo delle variazioni “a caso” del risultato della misura: otteniamo valori simili ma leggermente diversi tra loro. Si dice allora che ci sono errori CASUALI o ACCIDENTALI.

Questi tipi di errori vengono trattati alla seguente maniera: si fanno più misure e si prende come valore migliore la media di queste. Come incertezza possiamo considerare la **semidispersione massima**, data dalla formula:  $(\text{valore massimo} - \text{valore minimo})/2$ , che dà una stima grossolana dell'errore.

### ESEMPIO

Facciamo cinque misure del tempo di un evento, col cronometro, e otteniamo i valori:

5,11s $\pm$ 0,01s ; 5,12s $\pm$ 0,01s ; 5,08s $\pm$ 0,01s ; 5,11s $\pm$ 0,01s ; 5,16s $\pm$ 0,01s.

Il risultato delle misure è il valore medio (dato dalla somma dei valori diviso il loro numero), con il suo errore, cioè 5,116  $\pm$  0,04. Infatti la semidispersione massima è  $(5,16-5,08)/2 = 0,04$ . Il risultato bisogna arrotondarlo a 5,12s $\pm$ 0,04s , poiché l'errore è sulla seconda cifra dopo la virgola e quindi non ha senso prenderne una terza.

## L'errore assoluto e l'errore relativo

L'errore, indipendentemente dalla sua natura, può essere rappresentato in vari modi.

Il valore dell'errore con la rispettiva unità di misura, detto **ERRORE ASSOLUTO**, ci dà un'idea se l'errore è più o meno grande in generale, ma non rispetto al valore misurato: ad esempio un errore di un millimetro su un valore di alcuni centimetri, in proporzione, dà una imprecisione più grande di un errore di un millimetro su alcune centinaia di metri!

Per questo motivo è utile introdurre l'**ERRORE RELATIVO** che è il rapporto tra errore assoluto e valore misurato. Ad esempio se abbiamo 2,00m $\pm$ 0,05m, l'errore assoluto è ovviamente 0,05m e quello relativo  $0,05\text{m} / 2,00\text{m} = 0,025$  (notare che l'errore relativo è privo di unità di misura). L'errore relativo ci permette di confrontare due o più misure: la più precisa è quella con errore relativo minore.

L'errore relativo percentuale è dato dal valore dell'errore relativo moltiplicato per 100 e seguito dal simbolo %. Otteniamo così la percentuale di errore sul valore misurato.

### ESERCIZI

1) Trasformare nelle unità di misura S.I.

$$23,12\text{g} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 1,9\text{km} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 9 \text{ ore} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 12,2\text{min} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$3,2 \text{ q.li} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 4,3\text{mm} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 9\text{mg} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 52\text{dam} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$2\text{hg} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 290\text{km} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 0,5 \text{ mA} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 14 \text{ anni} = \underline{\hspace{2cm}}$$

2) Trasformare i seguenti numeri in notazione scientifica

$$120000 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 37400000000 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 10000000 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$1778 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 1490000000000 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 10000 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$0,012 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 0,027 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 0,0000001 = \underline{\hspace{2cm}}$$

3) Trasformare in notazione decimale

$$1,33 \cdot 10^8 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 9 \cdot 10^{12} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 5,6 \cdot 10^5 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$3,30 \cdot 10^6 = \underline{\hspace{2cm}} \quad 8,2 \cdot 10^{-12} = \underline{\hspace{2cm}} \quad 2,2 \cdot 10^{-4} = \underline{\hspace{2cm}}$$

4) Dire quale misura tra le seguenti è più precisa.

$$12,5\text{m} \pm 0,1\text{m} ; 150\text{m} \pm 1\text{m} ; 7 \cdot 10^3\text{m} \pm 10\text{m} .$$

5) Trovare l'errore relativo percentuale della seguente misura:

$$155,0\text{m} \pm 0,5\text{m}$$

# CAPITOLO 3

## I vettori

Alcune grandezze, dette SCALARI, permettono di definire una quantità tramite un solo valore, ovviamente con la sua unità di misura, ad esempio  $1\text{g}$ ,  $5,12\text{s}$ , ... La massa ed il tempo, ad esempio, sono grandezze scalari.

Altre grandezze, come ad esempio gli spostamenti e le forze, non sono definiti da un solo valore: se mi sposto di  $1\text{km}$ , posso spostarmi verso Nord, Sud, Sud-Est, ed in ogni altra direzione. Ad esempio posso partire da Verona ed andare verso Vicenza, od anche verso Legnago. Inoltre partire da un punto A verso un punto B non è la stessa cosa che partire da B ed andare in A. Servono quindi maggiori informazioni: non basta dire quanta strada ho fatto. Altro esempio: se due persone tirano una fune, devo dire se applicano le loro forze da parti opposte o se tutti e due tirano dalla stessa parte (il risultato non è lo stesso).

Per gli spostamenti e le forze bisogna allora trovare un modo di indicare come vengano applicate o posizionate queste quantità. Il modo che è stato scelto è quello di rappresentarle con dei **VETTORI**.

**DEFINIZIONE:** un vettore è una grandezza definita da: **modulo, direzione, verso**.

In Fisica il **modulo**, o **intensità** è la grandezza (valore con l'opportuna unità di misura) del vettore.

La **direzione** è la retta sulla quale mi sposto o lungo la quale applico la forza (**retta di azione**) o una sua parallela.

Il **verso**, una volta fissata la direzione, è uno dei due possibili: se mi sposto da A verso B oppure da B verso A; oppure se applico la forza ad esempio in "avanti" o "indietro", verso l'alto o verso il basso e così via.

In questo modo possiamo rappresentare un vettore come una freccia la cui lunghezza è proporzionale al modulo, la cui inclinazione (ad esempio rispetto all'orizzontale) rappresenta la direzione e la cui punta rappresenta il verso. I vettori si indicano con un nome, di solito una lettera, ed il simbolo di freccia (o semplicemente una barra) posto sopra.

In base a dove viene disegnata la freccia che rappresenta un vettore, possiamo individuare anche un **punto di applicazione**, ovvero il punto dove si applica tale vettore. Possiamo spostare qualsiasi vettore, cioè cambiare il suo punto di applicazione.

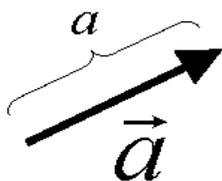


Figura 4: rappresentazione di un vettore lungo “a”.

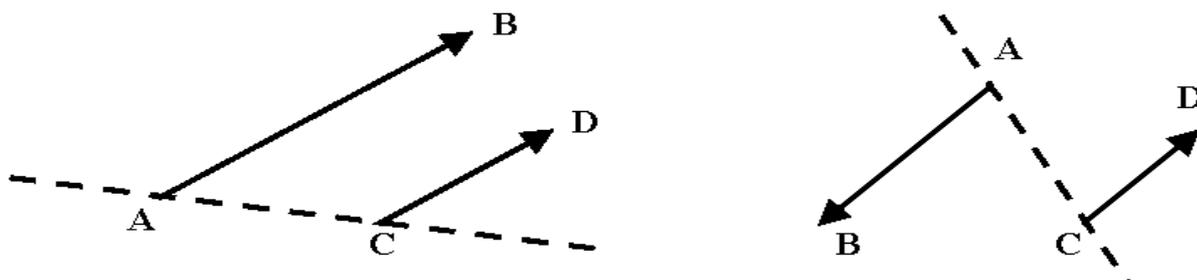


Figura 5: due coppie di vettori, rispettivamente con stessa direzione e stesso verso e con stessa direzione ma verso opposto.

## Somma di vettori

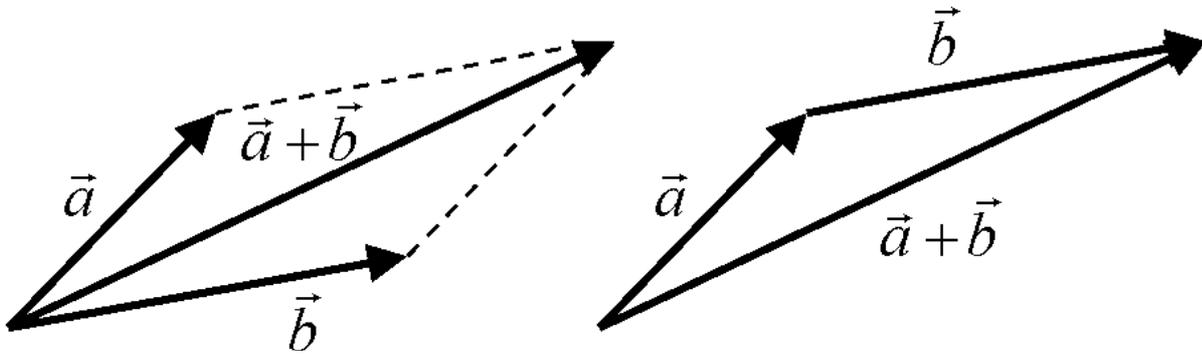
Pensiamo di sommare due forze della stessa intensità, applicate nello stesso punto: se hanno la stessa direzione e verso opposto il punto non si sposta e possiamo pensare che il risultato sia zero. Se hanno stessa direzione e stesso verso possiamo pensare che si sommino i valori: il risultato è una forza doppia. Se le due forze formano un angolo di  $90^\circ$  cosa succede? E se l'angolo fosse per esempio  $24^\circ$  e mezzo? Per rispondere a queste domande bisogna trovare un metodo generale che permetta di sommare i vettori. Tra i vari metodi (c'è anche anche il metodo di SCOMPOSIZIONE IN COMPONENTI) ci sono il metodo **PUNTA-CODA** e il metodo del **PARALLELOGRAMMA**.

Il metodo punta-coda è facilmente dimostrabile pensando agli spostamenti: si prende la punta del primo vettore e si fa coincidere con la coda del secondo (spostando parallelamente a se stesso un vettore cambia solo il punto di applicazione ma il vettore non cambia), il che equivale a fare uno spostamento, poi un altro e vedere il punto di arrivo.

Il metodo del Parallelogramma invece dice che la somma di due vettori applicati nello stesso punto è il vettore che ha origine in quel punto ed è la diagonale del parallelogramma formato dai due vettori di partenza, cioè arriva all'intersezione della parallela al primo vettore passante per la punta del secondo con la parallela al secondo passante per la punta del primo.

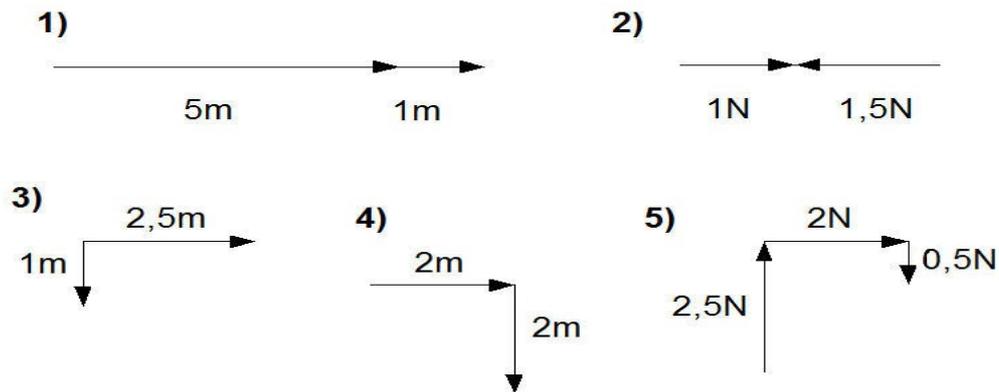
Utilizzando a scelta uno di questi metodi siamo quindi in grado di disegnare il vettore somma di due vettori qualsiasi.

Nel caso di angoli di  $90^\circ$  possiamo anche trovare l'esatta intensità del vettore somma in maniera semplice, usando il **teorema di Pitagora**, altrimenti dobbiamo ricorrere alla trigonometria.



**Figura 6:** somma di due vettori con il metodo del parallelogramma e col metodo punta-coda.

**ESERCIZI:** sommare graficamente i vettori delle figure e fare il calcolo dell'intensità risultante.



# Le forze

## Cos'è una forza

**DEFINIZIONE:** una forza è una qualsiasi causa in grado di far variare la velocità di un oggetto oppure in grado di provocarne la deformazione.

Ad esempio se diamo un calcio ad un pallone inizialmente fermo applichiamo una forza, poiché la sua velocità, inizialmente zero, poi non è più nulla e quindi è variata; se ci sediamo sul divano applichiamo una forza, visto che il cuscino si schiaccia (si deforma).

Esistono anche forze elettriche, magnetiche, gravitazionali. In particolare la forza di gravità della Terra è quella forza che attrae tutti gli oggetti per il fatto che hanno una certa massa.

## Unità di misura della forza

Nel Sistema Internazionale (S.I. o M.K.S.A.) l'unità di misura della forza, che deriva da quelle fondamentali di lunghezza, massa e tempo, è il Newton, simbolo N, definito come la forza in grado di produrre un'accelerazione di  $1\text{m/s}^2$  ad un corpo di massa 1 kg.

Vedremo in seguito perché il Newton è definito come  $1\text{N} = 1\text{kg} * 1\text{m/s}^2$ .

## L'attrito

Un particolare tipo di forze sono quelle di attrito, poiché invece di favorire il moto vi si oppongono (sono forze dissipative) e sono difficilmente eliminabili. Gli attriti si dividono in forze di **contatto o strisciamento, rotolamento, viscosi**. Queste ultime sono dovute per esempio alla presenza dell'aria o di un liquido.

---

## ESERCIZI

- 1) Che differenza c'è tra forze a contatto e forze a distanza?
- 2) Cerca informazioni su Internet sulle cause dell'attrito e sui vari tipi di attrito.

# CAPITOLO 4

## Il moto

### La traiettoria e il vettore spostamento

La CINEMATICA è quella parte della Dinamica che studia le traiettorie. Una traiettoria è una linea che segue punto per punto la posizione di un oggetto. Possiamo ad esempio immaginare di disegnare su una cartina geografica il percorso di un viaggio: questo è la traiettoria.

Per misurare una certa traiettoria su una cartina di solito la si segue con un filo, che poi si distende vicino ad un righello. Conoscendo la scala si risale alla distanza percorsa.

Il vettore spostamento, come abbiamo già visto, è quel vettore che ha origine nel punto di partenza e termina nel punto di arrivo (e quindi il percorso in questo caso viene misurato in linea d'aria).

Un caso particolare di traiettoria è quella rettilinea, dove il vettore spostamento, essendo proprio sulla retta che costituisce la traiettoria, permette di misurare le distanze percorse.

### La velocità

Si definisce **VELOCITA' MEDIA** di un tratto di percorso il rapporto tra lo spazio (cioè la distanza) ed il tempo impiegato:  $v_m = s / t$ , dove  $t$  è l'**intervallo** di tempo misurato.

Nel S.I. Lo spazio si misura in metri ed il tempo in secondi, quindi la velocità si misura in m/s (metri al secondo). Una unità di misura di uso pratico è invece il km/h (kilometro all'ora).

Trasformando i chilometri in metri e le ore in secondi e facendo il rapporto si ottiene che 1 m/s corrisponde a 3,6 km/h. **LA VELOCITA' E' UNA GRANDEZZA VETTORIALE.**

La velocità media si misura sempre su una certa distanza percorsa e in un certo intervallo di tempo, ma se volessi conoscere la velocità in un certo istante? Dovrei prendere un intervallo di tempo piccolissimo, ad esempio un millesimo di secondo (o meno) e calcolare la velocità media in questo intervallo: posso pensare che, siccome ho due tempi vicinissimi, la misura sia stata effettuata

quando il mio cronometro segnava un certo valore, e non più un intervallo tra due valori diversi. Otteniamo allora quella che si chiama **VELOCITA' ISTANTANEA**, che è detta semplicemente **VELOCITA'** ed è quella indicata sul tachimetro delle automobili.

## Il moto rettilineo uniforme

Si definisce moto rettilineo uniforme un moto con traiettoria rettilinea e velocità costante.

La formula che fornisce lo spazio percorso è:  $s = vt$ , che è la formula inversa di quella che permette di trovare la velocità ( $v = s/t$ ).

## Il moto rettilineo uniformemente accelerato

Si osserva sperimentalmente che un oggetto sufficientemente massiccio (cioè denso) cadendo aumenta costantemente la sua velocità. L'aumento di velocità è detto **ACCELERAZIONE**, o meglio, l'accelerazione è uguale alla variazione di velocità diviso l'intervallo di tempo nel quale viene eseguita la misura:  $a = (v_{\text{fin.}} - v_{\text{in.}}) / t$ .

L'unità di misura dell'accelerazione, essendo una velocità diviso un tempo, è m/s diviso s, cioè  $\text{m/s}^2$ .

**IL MOTO UNIFORMEMENTE ACCELERATO è un moto con accelerazione costante**, come avviene per la caduta degli oggetti massicci (per i quali è trascurabile l'attrito dell'aria).

Si verifica infatti che sul nostro pianeta ogni corpo (in assenza di aria) cade approssimativamente con la stessa accelerazione, uguale a circa  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

L'equazione del moto di un corpo con partenza da fermo che dà lo spazio percorso dopo un tempo  $t$  è:

$$s = \frac{1}{2} a t^2.$$

Il tempo è elevato al quadrato e quindi in un tempo doppio non si percorre uno spazio doppio come avviene invece per il moto uniforme. La formula che dà il tempo risulta:  $t = \sqrt{2s/a}$ . La velocità raggiunta dopo il tempo  $t$  è data dalla formula  $v = a t$ .

Se la velocità invece che aumentare costantemente diminuisce in modo costante, si parla di **MOTO UNIFORMEMENTE DECELERATO** e l'accelerazione assume un valore negativo.

## ESERCIZI

- 1) Un treno viaggia su un tratto di binario rettilineo alla velocità costante di 100 km/h. Qual è la sua velocità in m/s?
- 2) Dire qual è la velocità media di Mario se percorre 4 km in 20 minuti (in unità S.I. e in km/h). E' più veloce Mario o Pietro, che percorre 200m in 40s ?
- 3) Una moto fa da 0 a 100 km/h in 6,5 s. Calcola la sua accelerazione.



- 4) Un proiettile viaggia alla velocità costante di 200 m/s. Quanto spazio percorre in 5s ?
- 5) Disegna il grafico spazio-tempo di un moto rettilineo uniforme.
- 6) Un vaso di fiori cade dal davanzale di una finestra alta 6m. Quanto tempo impiega a toccare il suolo e qual è la velocità raggiunta?
- 7) Un bombardiere vola a 1000m di quota. Quanto tempo impiega una bomba per toccare il suolo?
- 8) Un oggetto cade per 1,5s. Da che altezza è caduto? E se il tempo impiegato è il doppio (3s)?
- 9) Se lasciamo cadere una biglia di ferro ed una di piombo con uguale diametro da un'altezza di 1m, quale cadrà per prima? Perché? Qual è il tempo impiegato?
- 10) Un sasso lanciato verticalmente verso l'alto decelera ( $a = -9,8\text{m/s}^2$ ) fino a fermarsi. Se la velocità iniziale è 25 m/s, quanto impiega per raggiungere il punto più alto della traiettoria e che altezza raggiunge?
- 11) Se sparo un proiettile orizzontalmente a 1m dal suolo e uno lo lascio cadere dalla stessa altezza, hanno tempi di caduta uguali?

# I principi della dinamica

## **Primo principio della dinamica (Principio d'inerzia).**

Esiste in natura almeno un sistema di riferimento, detto **inerziale** (ad es. quello solidale con le stelle fisse), nel quale **un corpo non soggetto a forze oppure soggetto ad un sistema di forze la cui somma è zero, persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.**

Si dimostra che ogni sistema di riferimento che trasli con moto rettilineo uniforme rispetto ad un sistema di riferimento inerziale, è anch'esso inerziale.

Un sistema di riferimento solidale con la Terra può essere considerato con buona approssimazione inerziale, poiché la terra “ruota lentamente”.

Un sistema di riferimento che si muove con accelerazione diversa da zero rispetto ad un sistema inerziale, non è inerziale: auto in accelerazione o frenata, ascensore in fase di partenza o in fase di arresto, seggiolino di una giostra che gira, ecc..

## **Secondo principio della dinamica (Principio di proporzionalità).**

**In un riferimento inerziale, una forza applicata ad un punto materiale produce una accelerazione concorde e proporzionale alla forza stessa.**

In formula:  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  (F ed a sono vettori) dove m è la costante di proporzionalità ed è la massa del punto materiale.

Con il secondo principio possiamo calcolare la forza di gravità, che è data dal prodotto della massa e dell'accelerazione di gravità, che come abbiamo visto è costante per tutti gli oggetti e vale circa  $9,8 \text{ m/s}^2$ . In particolare vediamo che l'unità di misura della forza è il prodotto di quella della massa per quella dell'accelerazione e quindi **1 Newton = 1 kg \* 1 m/s<sup>2</sup>**.

## **Terzo principio della dinamica (Principio di azione e reazione).**

**Ad ogni forza (azione) corrisponde un'altra forza (reazione) uguale in intensità e direzione ma di verso opposto.**

Ad esempio se spingiamo il muro, questo ci spinge con forza uguale e opposta a quella da noi applicata.

## Il piano inclinato (formule senza funzioni trigonometriche)

Vogliamo studiare come agisce la forza di gravità su un oggetto appoggiato senza attrito sopra un piano inclinato (vincolo) e ricavare l'equazione del moto.

Se non ci fosse il piano inclinato l'oggetto sarebbe sottoposto alla sua forza peso, data dal prodotto della massa per l'accelerazione di gravità:  $F_p = mg$ . Il suo moto sarebbe dunque uniformemente accelerato con accelerazione  $g = 9,8\text{m/s}^2$ , come si misura sperimentalmente.

Il piano inclinato, però, sopporta parte del peso dell'oggetto: possiamo pensare che la forza peso sia scomposta in due vettori (componenti), una delle quali bilanciata dal vincolo. In figura sono rappresentati i vettori forza  $F_{px}$  e  $F_{py}$ , che sommati danno  $F_p$ .

La forza  $F_{py}$  è bilanciata dalla reazione del piano  $F_v$ , mentre è  $F_{px}$  che fa scendere l'oggetto.

Chiamiamo  $h$  l'altezza del piano e  $L$  la sua lunghezza. Per calcolare  $F_{px}$  usiamo i triangoli simili colorati in figura e scriviamo la proporzione tra i lati

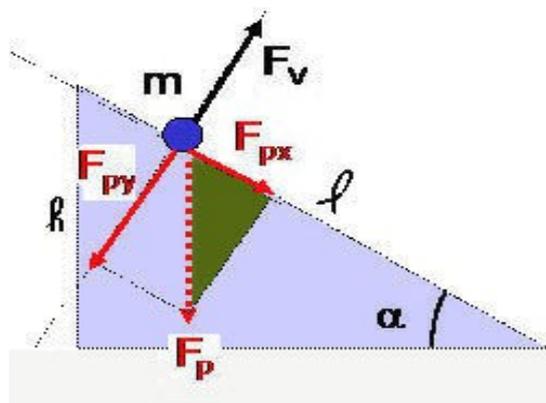
$$L : F_p = h : F_{px} ,$$

dalla quale ricaviamo  $F_{px} = F_p * h / L$ .

Abbiamo cioè che la forza attiva che fa scendere l'oggetto è uguale alla forza peso moltiplicata per il rapporto  $h / L$  (che è sempre minore di uno).

Siccome  $F = ma$ ,  $a$  ed  $F$  sono tra loro proporzionali e il moto sarà allora uniformemente accelerato con accelerazione  $a = g * h / L$ , cioè sarà un moto rallentato rispetto a quello di caduta libera.

Meno il piano è inclinato e più piccolo è il rapporto  $h / L$  e quindi più piccola sarà l'accelerazione.



**Fig. 10:** oggetto su un piano inclinato e scomposizione della forza peso  $F_p$ .

---

**ESERCIZIO:** calcola l'accelerazione su un piano inclinato lungo 1m e alto 0,5m.

# CAPITOLO 5

## L'energia meccanica

### Lavoro ed energia

Il LAVORO di una forza esercitata su un corpo, se questo è libero di spostarsi lungo la direzione della forza, è dato dall'intensità della forza moltiplicata per lo spostamento:  $L=F*s$ .

Siccome la forza si misura in Newton e lo spostamento in metri, l'unità di misura del lavoro è  $N*m$ . Nel S.I. il Newton per metro prende il nome di Joule, simbolo **J**.

Osserviamo che per il momento di una forza, che ha la stessa unità di misura, come abbiamo visto si usa lasciare scritto Nm, per non confondere momento e lavoro.

L'ENERGIA è la capacità di compiere lavoro e la sua unità di misura è la stessa del lavoro: il Joule.

### Potenza

Una certa quantità di lavoro può venire compiuta in un tempo più o meno breve. La POTENZA è quella grandezza che tiene conto di questo ed è definita come rapporto tra il lavoro compiuto ed il tempo impiegato per compierlo:

$$P = L / t.$$

L'unità di misura della potenza è quindi J/s, che prende il nome di Watt, simbolo W. Un Watt è quindi il lavoro di 1J compiuto in un secondo.

### Energia potenziale

Un oggetto che si trova ad una certa altezza, se cade, compie un lavoro (è soggetto alla forza di gravità e si sposta: lavoro = forza per spostamento). Quindi per il fatto che può compiere un lavoro, un oggetto posto ad una certa altezza ha una quantità di energia proporzionale alla forza di gravità che su di esso agisce ( $= mg$ ) e all'altezza stessa.

Questa energia si chiama ENERGIA POTENZIALE e si calcola con la formula  $E_p = mgh$ , dove  $h$  è l'altezza (misurata in metri).

Se cambia il livello del suolo cambia anche l'energia potenziale, che dipende quindi da dove misuro le altezze, cioè da dove pongo l'altezza zero.

## L'energia cinetica

Un oggetto che si muove può compiere un lavoro (ad esempio spingere un altro oggetto); per questo è dotato di energia, che prende il nome di ENERGIA CINETICA.

L'energia cinetica si calcola con la formula  $E_c = \frac{1}{2} mv^2$ , dove  $m$  è la massa (in kilogrammi) e  $v$  è la velocità (in  $m/s^2$ ), che va elevata al quadrato.

Quando un oggetto cade la sua energia potenziale diminuisce e si trasforma in energia cinetica man mano che la velocità aumenta.

**PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA MECCANICA: l'energia meccanica di un sistema meccanicamente isolato è la somma di energia cinetica e potenziale e se non ci sono forze dissipative (ad esempio attriti) rimane costante.**

**ESEMPIO:** Le montagne russe.

Il convoglio delle montagne russe generalmente non ha motore poiché una volta portato nel punto più alto da una cremagliera, scende liberamente. Ogni volta che i vagoni si abbassano la loro energia potenziale diminuisce e aumenta quella cinetica, quando si sale su una collinetta invece l'energia potenziale aumenta e diminuisce quella cinetica. A meno di attriti l'energia meccanica rimane costante.



## Principio di conservazione dell'energia

Oltre all'energia meccanica esistono tante altre forme di energia: calore, luce, energia chimica, energia elettrica, ...

In un sistema ISOLATO, cioè che non scambia energia e materia con l'esterno, l'energia TOTALE (data dalla somma di tutti i tipi di energia) rimane costante.

L'energia cioè si può trasformare da un tipo ad un altro ma il valore totale non diminuisce e non aumenta. Riprenderemo questo argomento nello studio della Termodinamica.

---

## Urto elastico ed anelastico

Quando in un urto si conserva l'energia meccanica, si chiama URTO COMPLETAMENTE ELASTICO.

Quando in un urto la forza dissipativa è massima si chiama URTO COMPLETAMENTE ANELASTICO.

Oltre alla conservazione dell'energia, per un sistema isolato vale anche il

### **PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA QUANTITÀ DI MOTO:**

**La quantità di moto di un sistema, definita come prodotto tra il vettore velocità e la rispettiva massa di tutte le componenti del sistema, per un sistema isolato rimane costante.**

La dimostrazione si ottiene partendo dal secondo principio della dinamica.

## ESERCIZI

- 1) Trovare l'energia potenziale di un sasso con massa 0,2 kg che si trova ad un'altezza di 1m.
- 2) Trovare l'energia potenziale che perde una persona di 70 kg scendendo una rampa alta 3m di scale.
- 3) Un vagone ha massa 150 quintali. Qual è la sua energia cinetica se viaggia a 25 m/s? E se la velocità è il doppio?
- 4) Il trenino delle montagne russe ha massa totale 70 quintali e scende di 20m. Qual è la sua variazione di energia e che velocità raggiunge?
- 5) Un oggetto scende un dislivello di 3,5m. Che velocità raggiunge?
- 6) Qual è l'energia meccanica acquistata da un proiettile di massa 12g che sale di 5m mentre la velocità è 60 m/s?
- 7) Un urto elastico su un piano orizzontale è un'interazione nella quale l'energia cinetica si conserva. Nel gioco del biliardo gli urti sono quasi perfettamente elastici. Se un giocatore spinge una biglia di massa 50g e velocità 10 m/s contro un'altra e dopo l'urto la prima si muove a 2 m/s e l'altra a 15 m/s, qual è la massa della seconda biglia?

# CAPITOLO 6

## Temperatura e Calore

### La temperatura

La TEMPERATURA è una grandezza proporzionale all'agitazione delle molecole. Infatti gli atomi e le molecole non sono immobili ma in continua vibrazione. Una prova di ciò sono i cosiddetti moti browniani nei liquidi: se prendiamo un granello di polline e lo osserviamo galleggiare in una goccia d'acqua al microscopio, vediamo che viene spostato dalle molecole dell'acqua.

Nella vita di tutti i giorni siamo abituati a misurare la temperatura in GRADI CENTIGRADI: la scala centigrada fissa a  $0^{\circ}$  la temperatura alla quale l'acqua distillata ghiaccia ed a  $100^{\circ}$  la temperatura di ebollizione della stessa alla pressione atmosferica media. Questo intervallo viene diviso in cento parti, ognuna delle quali corrisponde ad un grado.

In Fisica si usa l'unità del Sistema Internazionale, che è il GRADO KELVIN (simbolo  $^{\circ}\text{K}$ ).

La scala Kelvin prende come zero la più bassa temperatura raggiungibile, che si dimostra essere (tramite le leggi dei gas) circa  $-273^{\circ}\text{C}$ . Si fissa poi come temperatura di ebollizione dell'acqua distillata a pressione atmosferica media il valore di  $373^{\circ}\text{K}$ . Quindi una differenza di temperatura di  $1^{\circ}\text{C}$  corrisponde ad una differenza di  $1^{\circ}\text{K}$ . Per trasformare da gradi Centigradi a Kelvin si deve sommare il valore 273, per passare da Kelvin a Centigradi invece si sottrae 273.

### La dilatazione dei solidi e dei liquidi

I solidi ed i liquidi, con l'eccezione dell'acqua nell'intervallo tra  $0$  e  $4^{\circ}\text{C}$ , con l'aumentare della temperatura si dilatano. Possiamo misurare la DILATAZIONE LINEARE di un solido, ovvero la variazione di lunghezza, oppure la variazione di volume di un solido o un liquido, che si chiama DILATAZIONE VOLUMICA.

## I termometri

Gli strumenti che misurano la temperatura si chiamano termometri e sfruttano variazioni di grandezze fisiche che dipendono dalla temperatura. I termometri a liquido sfruttano le variazioni di volume solitamente di mercurio o alcool (in base alla temperatura alla quale devono operare), quelli a lamina bimetallica utilizzano la dilatazione lineare dei metalli, quelli elettronici la variazione di corrente elettrica. Solitamente sono tarati in gradi centigradi.

**OSSERVAZIONE:** per misurare una temperatura bisogna attendere un certo tempo affinché il termometro raggiunga la temperatura dell'ambiente o del corpo in questione (equilibrio termico).



Termometro a liquido, digitale, a lamina bimetallica.

## Il calore

Il CALORE è una forma di energia (energia termica). Siccome l'energia si trasforma, possiamo avere che dell'energia meccanica si trasformi in calore o, come avviene nei motori a combustione, il passaggio contrario. Nel S.I. L'unità di misura del calore è quindi quella dell'energia meccanica, ovvero il Joule.

In Chimica si utilizza di solito la **Caloria** (grande caloria o kilocaloria, simbolo Cal), definita come **la quantità di calore necessaria per innalzare di 1°C un kilogrammo di acqua distillata.**

L'esperimento di Joule permette di trovare l'equivalente in calore dell'energia meccanica di un corpo che cade.

## L'equilibrio termico e la conduzione del calore

Due oggetti posti a contatto, dopo un certo tempo, raggiungono la stessa temperatura, cioè si arriva all'equilibrio termico. Questo è il principio con il quale misuriamo la temperatura: il termometro raggiunge la temperatura del corpo con il quale è a contatto.

Oltre che per contatto tra corpi o tra le molecole di un corpo, cioè per CONDUZIONE, il calore si può propagare anche per CONVEZIONE e per IRRAGGIAMENTO.

La convezione è il trasporto del calore tramite il moto dei fluidi, dovuto al fatto che il fluido più caldo è meno denso e sale in superficie, dove si raffredda e quindi scende creando il rimescolamento di tutto il fluido stesso.

L'irraggiamento è la trasformazione del calore in radiazione elettromagnetica (ad esempio luce), che si può propagare anche nel vuoto (poiché dal Sole arriva sulla Terra) e poi, dal momento in cui investe un oggetto, si ritrasforma in calore.

## La legge fondamentale della termologia

Quando non si verificano passaggi di stato, calore e temperatura di un oggetto sono grandezze tra loro legate da una relazione di proporzionalità diretta: se viene fornito calore la temperatura aumenta.

Chiamando  $Q$  il calore e  $\Delta t$  la variazione di temperatura, abbiamo che  $Q = C \Delta t$ , dove  $C$  è la costante di proporzionalità, che dipende dall'oggetto, e prende il nome di **CAPACITA' TERMICA** (nel S.I. si misura in  $J/^\circ K$ ).

La capacità termica dipende dalla massa dell'oggetto e dal materiale di cui è fatto, possiamo allora scriverla come prodotto di una costante "c" per la massa:  $C = c m$ .

Sostituendo abbiamo quindi

$$Q = c m \Delta t$$

che è detta **legge fondamentale della termologia**.

La quantità  $c$  prende il nome di **CALORE SPECIFICO** ed è tipica di ogni sostanza. **E' la quantità di calore necessario per innalzare di un grado un kg di quel materiale** e viene espressa nel S.I. in  $J/kg^\circ K$  (in Chimica si utilizzano le unità di misura  $Cal/kg^\circ K$  oppure l'equivalente  $Cal/kg^\circ C$ ).

---

### CALORE SPECIFICO di alcune sostanze

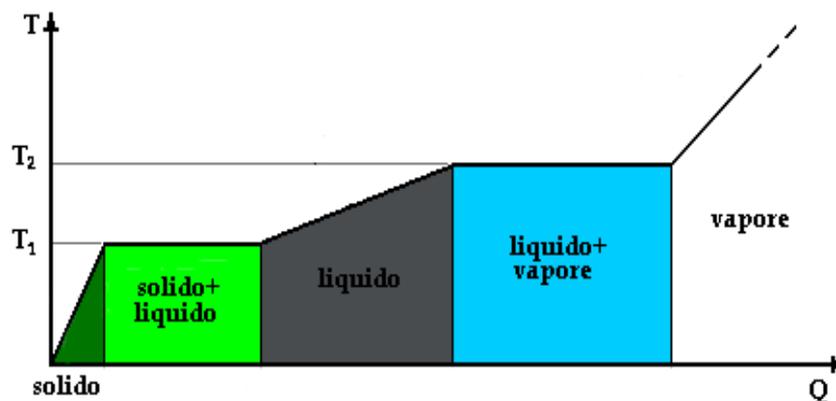
Acqua	4180 J/kg°K
Alcool etilico	2430 J/kg°K
Olio d'oliva	1650 J/kg°K
Petrolio	2140 J/kg°K
Ferro	480 J/kg°K
Alluminio	880 J/kg°K
Rame	390 J/kg°K

---

### I passaggi di stato

I passaggi di stato della materia sono le trasformazioni tra gli stati solido, liquido, aeriforme. Durante i passaggi di stato, anche se si fornisce o sottrae calore, la temperatura rimane costante. Infatti l'energia fornita o ceduta serve per sciogliere o ricostruire i legami molecolari e non influisce sull'agitazione termica, cioè sulla temperatura.

In figura 12 è rappresentato l'andamento della temperatura di una sostanza in funzione del calore anche durante i passaggi di stato.



**Fig. 12:** variazione della temperatura durante i passaggi di stato, all'aumentare del calore Q.

I principali passaggi di stato sono:

da <b>solido</b> a <b>liquido</b>	→	<b>liquefazione o fusione</b>
da <b>liquido</b> a <b>solido</b>	→	<b>solidificazione</b>
da <b>liquido</b> a <b>gas</b>	→	<b>evaporazione</b>
da <b>gas</b> a <b>liquido</b>	→	<b>condensazione.</b>

Tutti questi passaggi di stato, tranne il caso di evaporazione in assenza di ebollizione (che avviene ad esempio quando si stendono i panni ad asciugare), avvengono ad una prefissata temperatura.

Per avere i passaggi di stato serve fornire o sottrarre una determinata quantità di calore per ogni kilogrammo e tipo di sostanza: questo calore prende il nome di CALORE LATENTE, che significa nascosto, in quanto fornendo calore la temperatura non aumenta e sottraendone non diminuisce.

Il calore latente di fusione e quello di solidificazione di una sostanza hanno lo stesso valore (possiamo pensare però che uno sia positivo perché fornito e l'altro negativo poiché sottratto), come pure calore latente di evaporazione e condensazione.

Indichiamo col simbolo  $c_f$  il calore latente di fusione e solidificazione di una sostanza, con  $c_v$  quello di evaporazione o condensazione.

---

### TEMPERATURE DI FUSIONE e CALORI LATENTI DI FUSIONE

<b>SOSTANZA</b>	<b><math>t_f</math></b>	<b><math>c_f</math></b>
Alcool etilico	-114°C	105000 J/kg
Mercurio	-39°C	12000 J/kg
Ghiaccio	0°C	334000 J/kg
Piombo	327°C	25000 J/kg
Argento	961°C	105000 J/kg
Ferro	1536°C	56000 J/kg

---

## TEMPERATURE DI EBOLLIZIONE e CALORI LATENTI DI EVAPORAZIONE

SOSTANZA	$t_v$	$c_v$
Alcool etilico	78°C	854000 J/kg
Mercurio	357°C	272000 J/kg
Acqua	100°C	2250000 J/kg
Piombo	1750°C	871000 J/kg
Argento	2193°C	2336000 J/kg

---

Nel caso dei passaggi di stato non vale più la legge fondamentale della termologia e per trovare il calore si usano le formule:

$$Q = c_f m \quad \text{per la fusione e la solidificazione}$$

$$Q = c_v m \quad \text{per evaporazione con ebollizione e condensazione.}$$

Queste formule valgono quando la sostanza è alla temperatura del passaggio di stato, se si trova in una condizione diversa bisogna sommare o sottrarre il calore necessario per raggiungere tale temperatura (calcolato tramite la legge fondamentale della termologia).

## ESERCIZI

- 1) In estate i binari del treno hanno tra loro spazi più stretti che in inverno. Perché?
- 2) Ricerca su Internet cos'è una lamina bimetallica.
- 3) Indicare la risposta corretta.

Il calore specifico è definito come la quantità di calore necessaria per innalzare:

- (a) di  $1^{\circ}\text{C}$  1dl di sostanza    (b) di  $1^{\circ}\text{C}$  1kg di sostanza    (c) di  $10^{\circ}\text{C}$  l'oggetto  
(d) di  $100^{\circ}\text{K}$  l'oggetto    (e) di  $10^{\circ}\text{C}$  1kg di sostanza    (f) di  $10^{\circ}\text{K}$  1g di sostanza.
- 4) Un oggetto di ferro ( $c = 450 \text{ J/kg } ^{\circ}\text{C}$ ) di massa 5,5 kg viene scaldato da  $10$  a  $100^{\circ}\text{C}$ .  
Trovare il calore fornito.
  - 5) Un oggetto viene portato da  $0$  a  $100^{\circ}\text{C}$  fornendo 150 Cal. Trovare la sua capacità termica.
  - 6) Qual è il calore necessario per far sciogliere un blocco di 10 kg di ghiaccio che si trova a  $0^{\circ}\text{C}$ ?
  - 7) Qual è il calore necessario per far evaporare un litro di acqua (= 1 kg) che si trova inizialmente a  $20^{\circ}\text{C}$ ?

# CAPITOLO 7

## Primo principio della Termodinamica

La TERMODINAMICA estende il principio di conservazione dell'energia meccanica agli scambi tra energia meccanica (lavoro) ed energia termica (calore). Si chiama SISTEMA TERMODINAMICO qualsiasi corpo o insieme di corpi che viene studiato considerandone calore e lavoro.

Le leggi dei gas, che sono trasformazioni di sistemi nelle quali interviene anche la pressione, cioè la forza esercitata dalle e sulle pareti del recipiente, fanno quindi parte della termodinamica.

Calore e lavoro possono trasformarsi l'uno nell'altro, il PRIMO PRINCIPIO della Termodinamica dice che l'energia totale di un sistema è data dal contributo di entrambi. Più precisamente si ha che

**la variazione di energia di un sistema è uguale al calore assorbito meno il lavoro fatto dal sistema stesso:  $\Delta U = Q - L$ .**

Infatti quando il sistema acquista calore aumenta la sua energia, quando fa lavoro perde energia.

Se il calore viene ceduto dal sistema si prende Q negativo, se il lavoro viene fatto sul sistema L diventa negativo.

**ESEMPI:** il motore a scoppio fornisce lavoro, quindi perde parte del calore fornito dal carburante, che si trasforma in energia meccanica. La dinamo subisce lavoro e quindi la sua energia aumenta, si trasforma poi in parte in energia elettrica.

**ESERCIZIO:** un sistema fornisce 1000J di lavoro e assorbe 3500J di calore. Di quanto è variata la sua energia interna?

**SOLUZIONE:**  $\Delta U = Q - L = 3500J - 1000J = 2500J$ .

**ESERCIZIO:** un sistema subisce 500J di lavoro e cede 1500J di calore. Di quanto è variata la sua energia interna?

**SOLUZIONE:**  $\Delta U = Q - L = -1500J - (-500)J = -1000J$ .

