

# Capitolo 1

## Grandezze fisiche e loro misurazione

La grande potenza del *metodo scientifico* per lo studio dei fenomeni naturali si basa sulla possibilità di individuare alcune proprietà misurabili, che chiamiamo *grandezze fisiche*, e sulla capacità di trovare delle relazioni stabili tra i valori misurati di grandezze fisiche diverse. Ad esempio, la legge fondamentale della meccanica,  $\vec{F} = m\vec{a}$ , collega tra di loro tre grandezze fisiche: forza  $\vec{F}$ , massa  $m$  ed accelerazione  $\vec{a}$ .

In questo primo capitolo cercheremo di capire che cosa si intende in generale per *grandezza fisica*. Ad esempio, perché la *lunghezza* o la *massa* sono grandezze fisiche, mentre proprietà direttamente percepibili dai nostri sensi, come il sapore o l'odore, non lo sono ?

Come vedremo, la definizione stessa delle grandezze fisiche, nonché il loro impiego pratico, sono indissolubilmente legati alla individuazione di procedure di *misurazione*. La misurazione consente di stabilire una corrispondenza tra grandezze fisiche e numeri e di applicare quindi il linguaggio ed i formalismi della matematica alla descrizione dei fenomeni naturali.

Apparirà chiaro comunque fin da questo Primo Capitolo un fatto fondamentale: qualsiasi operazione di misura implica un certo grado di *incertezza* del suo risultato. In altri termini, l'incertezza fa parte integrante di qualsiasi misura. Saper valutare correttamente l'incertezza di misura è essenziale sia in campo scientifico, per fissare i limiti di validità delle teorie con cui si descrivono i fenomeni naturali, sia in campo tecnologico, per asserire il grado di affidabilità di prodotti e procedure.

La trattazione dell'incertezza di misura e delle sue conseguenze costituisce il filo conduttore principale di questo libro.

### 1.1 – Metodi di osservazione e misurazione

Per dare un significato concreto al concetto di *grandezza fisica*, incominciamo col prendere in considerazione diversi metodi con cui si possono studiare i fenomeni naturali, classificandoli in ordine di crescente complessità e potenza.

#### A) Metodo morfologico

Il metodo di studio più semplice si limita al rilievo sensoriale delle proprietà di oggetti o fenomeni ed alla loro eventuale registrazione e descrizione, tramite disegno, fotografia, etc.

*Esempio:* Lo studio dell'anatomia del corpo umano viene generalmente fatto mediante rappresentazioni

fotografiche, disegni, filmati.

*Esempio:* Molte sostanze chimiche possono essere individuate, da una persona esperta, in base al colore, alla lucentezza, all'odore, al sapore, etc.

## B) Metodo classificatorio

Un progresso nella descrizione del mondo naturale si ha quando è possibile realizzare una ripartizione di un insieme di oggetti o fenomeni in *classi* (sottoinsiemi privi di intersezioni ed esaurienti) secondo la rispondenza a uno o più requisiti ben definiti. Due oggetti o fenomeni appartengono alla medesima classe se e solo se godono di una o più proprietà in comune.

*Esempio:* Lo studio sistematico della zoologia e della botanica si basa su una complessa ed articolata classificazione del mondo animale e del mondo vegetale. Così, gli animali vertebrati vengono suddivisi in 5 classi: mammiferi, uccelli, rettili, anfibi, pesci. A sua volta ogni classe è divisa, secondo una scala gerarchica discendente, in più ordini, famiglie, specie.

*Esempio:* La relazione di congruenza tra segmenti considerata dalla Geometria è una relazione di equivalenza e consente quindi di suddividere i segmenti dello *bigskip* in classi. Queste classi, interpretate come elementi di un nuovo insieme, sono chiamate *lunghezze*: segmenti congruenti hanno la medesima lunghezza, e viceversa. A questo livello di definizione la lunghezza non è comunque ancora considerata una grandezza fisica.

## C) Metodo comparativo

Un ulteriore progresso nella descrizione del mondo naturale si ha quando è possibile introdurre una *relazione d'ordine*, cioè un criterio che consente di decidere in modo univoco se, dati due oggetti o fenomeni, il primo possiede una data proprietà in grado minore, uguale o maggiore del secondo.

Se la relazione d'ordine gode della proprietà transitiva, si può stabilire una corrispondenza tra i gradi di quella proprietà ed un insieme di numeri, in modo tale che la relazione d'ordine sia preservata.

Una proprietà degli oggetti o dei fenomeni per la quale sia possibile introdurre un metodo comparativo è una *grandezza fisica*.

*Esempio:* La scala di Mohs per le durezze dei minerali è basata sul seguente criterio: il minerale  $A$  è più duro del minerale  $B$  se  $A$  scalfisce  $B$ . Il criterio stabilisce una relazione d'ordine che gode della proprietà transitiva: la *durezza* è una grandezza fisica. La scala di Mohs elenca 10 minerali in ordine di durezza crescente, associandoli a 10 numeri, pure in ordine crescente:

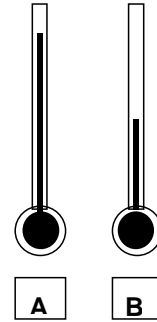
1 - talco	2 - gesso	3 - calcite	4 - fluorite	5 - apatite
6 - ortoclasio	7 - quarzo	8 - topazio	9 - corindone	10 - diamante

Si noti che la scelta dei numeri che individuano la durezza nella scala di Mohs è puramente arbitraria; qualsiasi altra scelta, purché rispettosa della relazione d'ordine, sarebbe stata accettabile.

*Esempio:* Il confronto per sovrapposizione di due segmenti consente di decidere in modo univoco non solo se i due segmenti sono congruenti ma anche se uno è più corto dell'altro o viceversa. Il criterio del confronto tra segmenti consente di introdurre in modo operativo una relazione d'ordine per le lunghezze. La relazione d'ordine tra lunghezze gode della proprietà transitiva. Ad ogni lunghezza si può associare un numero comunque scelto purché la relazione d'ordine sia preservata. A questo punto possiamo dire che *la lunghezza è una grandezza fisica*.

*Esempio:* Gli *stati termici* di due oggetti  $A$  e  $B$  possono essere confrontati mettendo i due oggetti successivamente a contatto con uno stesso termoscopio (Fig. 1.1); il confronto consente di stabilire una relazione d'ordine transitiva: si dice che  $A$  ha *temperatura* più alta di  $B$  se provoca una maggiore dilatazione del mercurio nel termoscopio. Allo stato termico di ogni oggetto si può associare un numero, scelto in modo qualsiasi purché la relazione d'ordine sia preservata. La *temperatura* è una grandezza fisica.

**Fig. 1.1** – Un termoscopio a mercurio è costituito da un bulbo di vetro riempito di mercurio, in comunicazione con un sottile cannello, pure di vetro (si pensi ad un comune termometro, privo però della scala graduata).



## D) Metodo quantitativo o metrico

In alcuni casi è possibile, oltre che riconoscere nell'insieme dei gradi di una proprietà una relazione d'ordine transitiva, definire anche una *legge di composizione* che goda delle stesse proprietà dell'addizione tra numeri. Si può allora stabilire una corrispondenza tra i gradi della proprietà e l'insieme dei numeri reali che riproduce non solo la relazione d'ordine, ma anche la struttura additiva.

*Esempio:* Una legge di composizione per le lunghezze di segmenti può essere introdotta nel modo seguente.

Consideriamo due segmenti  $a$  e  $b$ , di estremi rispettivamente  $AA'$  e  $BB'$ . La composizione si effettua ponendo i due segmenti sulla stessa retta e facendo coincidere l'estremo  $A'$  del segmento  $a$  con l'estremo  $B$  del segmento  $b$ . Il segmento somma  $a + b$  ha come estremi  $A$  e  $B'$ .

Il metodo quantitativo è alla base di gran parte delle operazioni di misura scientifiche e tecniche. Esso consente di applicare alla descrizione dei fenomeni naturali i formalismi sviluppati dalla matematica. Approfondiremo il metodo quantitativo nel §1.3.

Si noti che esistono grandezze fisiche per le quali non è possibile definire una legge di composizione che goda delle stesse proprietà dell'addizione in aritmetica. Esempi significativi sono la durezza e la temperatura.

## E) Metodi statistici

Quando si studiano popolazioni molto numerose di oggetti o eventi è spesso possibile, utilizzando gli strumenti matematici della statistica, descriverne alcune proprietà medie per mezzo di pochi parametri. Ad esempio, in Fisica i metodi statistici vengono utilizzati per interpretare le grandezze termodinamiche macroscopiche (pressione, energia interna, temperatura, etc.) in termini di comportamento medio microscopico di un numero molto elevato di atomi o molecole. Un altro campo di utilizzazione dei metodi statistici riguarda il conteggio di eventi casuali, cui accenneremo nel § 1.4.

Vedremo nel Cap. 4 che i metodi statistici rivestono una notevole importanza nella misurazione delle grandezze fisiche e nella ricerca di relazioni analitiche tra grandezze diverse, in quanto forniscono gli strumenti per valutare le incertezze nei valori di misura.

# 1.2 – Grandezze fisiche

L'analisi dei diversi metodi di osservazione e misurazione fatta al §1.1 ci consente di chiarire cosa si intende per *grandezza fisica*.

Una *grandezza fisica* (in inglese *physical quantity*) è una proprietà di un oggetto o di un fenomeno per la quale è possibile definire una relazione d'ordine che goda della proprietà transitiva.

Per molte grandezze fisiche è possibile definire anche una legge di composizione che gode delle stesse proprietà dell'addizione tra numeri.

Le grandezze fisiche possono pertanto venire raggruppate in due categorie:

a) **Grandezze quantitative (o metrizzabili)**

Sono le grandezze per le quali è possibile definire sia una relazione d'ordine transitiva sia una legge di composizione additiva (metodo quantitativo o metrico del §1.1.D).

*Esempi:* La lunghezza, l'intervallo di tempo, la massa, la velocità, la forza sono esempi di grandezze quantitative.

b) **Grandezze di stato (o non metrizzabili)**

Sono grandezze per le quali è possibile definire una relazione d'ordine transitiva ma non una legge di composizione additiva (metodo comparativo del §1.1.C).

*Esempi:* La temperatura e la durezza sono tipici esempi di grandezze di stato.

La *misurazione* (in inglese *measurement*) è il procedimento che consente di associare ad ogni valore della grandezza fisica un numero, detto *misura* della grandezza (in inglese *measure*).

Metodologie diverse di misurazione dovranno essere utilizzate a seconda che la grandezza sia metrizzabile oppure no. Approfondiremo l'argomento nel prossimo paragrafo, §1.3.


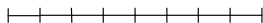

La realizzazione pratica della misurazione avviene per mezzo degli *strumenti di misura*. Le principali caratteristiche degli strumenti di misura verranno analizzate nel Cap. 3.

## 1.3 – Misurazione diretta ed indiretta

Due diverse metodologie di misurazione vengono generalmente distinte: la misurazione diretta e la misurazione indiretta.

### A) Misurazione diretta

Consideriamo una grandezza  $\mathcal{G}$  di tipo metrizzabile, per la quale cioè sia definita una legge di composizione additiva. Per concretezza, pensiamo ad esempio alla lunghezza di un'asta. La misurazione diretta della grandezza  $\mathcal{G}$  si può ricondurre idealmente ad una sequenza logica di azioni:

- |   |   |
|---|---|
| a) costruzione o scelta di un campione $\mathcal{U}$ di unità di misura;          | $\mathbf{u}$         |
| b) composizione di campioni: $\sum \mathcal{U}_i$ ;                               | $\Sigma \mathbf{u}$  |
| c) verifica di identità tra $\mathcal{G}$ e una somma $n\mathcal{U}$ di campioni; | $\mathbf{g}$         |
| d) computo degli $n$ campioni.  |   |

Secondo questo schema logico, la misura  $X(\mathcal{G})$  della grandezza  $\mathcal{G}$  è il rapporto tra la grandezza  $\mathcal{G}$  ed l'unità di misura  $\mathcal{U}$ :

$$X(\mathcal{G}) = \mathcal{G}/\mathcal{U}. \quad (1.3.1)$$

Il risultato di una misurazione si indica pertanto così:  $\mathcal{G} = X \cdot \mathcal{U}$ ;  $X$  è il numero che esprime la misura,  $\mathcal{U}$  è l'unità di misura; ad esempio, per una lunghezza:  $d = 5$  metri; per un intervallo di tempo:  $\Delta t = 7$  secondi, per una massa:  $m = 2$  chilogrammi.

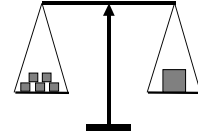
La misurazione diretta è la realizzazione operativa del metodo quantitativo o metrico; essa può quindi essere realizzata solo per grandezze quantitative o metrizzabili (che vengono perciò anche chiamate *grandezze direttamente misurabili*.)

*Esempio:* Misurazione di una lunghezza con un regolo millimetrato. Il campione è la distanza tra due tacche contigue (1 mm); la composizione dei campioni è stata effettuata una volta per tutte al

momento dell'incisione delle tacche; la verifica di identità si fa ponendo in coincidenza gli estremi dell'oggetto da misurare con le tacche della riga; il computo dei campioni è facilitato dai numeri incisi sulla riga in corrispondenza di alcune tacche.

*Esempio:* Misurazione di una massa con una bilancia meccanica a due piatti.

Il campione è un pesetto di massa unitaria; la composizione dei campioni si fa ponendo più pesetti identici su un piatto della bilancia; la verifica di identità consiste nel calibrare il numero di pesetti in modo da bilanciare la massa del corpo posto sull'altro piatto della bilancia.



## B) Incertezza nella misurazione diretta

Analizziamo ora più in dettaglio il significato dell'eq.(1.3.1), partendo da considerazioni di carattere puramente matematico, per poi passare a tenere conto dei fattori sperimentali che influenzano la misurazione.

È facile rendersi conto che la grandezza  $\mathcal{G}$  solo in qualche caso corrisponderà ad un multiplo intero  $n\mathcal{U}$  dell'unità di misura. Pertanto, la misura  $X = \mathcal{G}/\mathcal{U}$  non è in genere un numero intero  $n$ .

Ammettendo la divisibilità dell'unità di misura  $\mathcal{U}$  in un numero comunque grande di sottomultipli, si potrebbe pensare che la misura  $X = \mathcal{G}/\mathcal{U}$  possa comunque essere sempre un numero razionale  $m/n$ . È però ben noto che esistono grandezze incommensurabili (ad esempio il lato e la diagonale di un quadrato) il cui rapporto è un numero irrazionale.

Pertanto la misura di una grandezza fisica è, almeno in linea di principio, un *numero reale*  $r$ :

$$X(\mathcal{G}) = \mathcal{G}/\mathcal{U} = r. \quad (1.3.2)$$

L'eq. (1.3.2) stabilisce la corrispondenza tra grandezze fisiche e numeri reali che sta alla base dell'uso dei formalismi della matematica del continuo nella descrizione teorica di gran parte dei fenomeni fisici macroscopici.

Nella pratica sperimentale di misurazione si ha sempre a che fare con strumenti di misura in cui l'unità  $\mathcal{U}$  non può essere resa arbitrariamente piccola, per cui la verifica di identità tra la grandezza  $\mathcal{G}$  e una somma di campioni può essere fatta solo in modo approssimato. Con esattezza potremo solo decidere che

$$n\mathcal{U} < \mathcal{G} < (n+1)\mathcal{U}, \quad (1.3.3)$$

cioè stabilire un intervallo di valori di larghezza  $\mathcal{U}$  entro il quale si colloca la misura della grandezza  $\mathcal{G}$ . In altri termini, il risultato di una misurazione diretta non è un numero, bensì un intervallo finito di possibili valori. La larghezza dell'intervallo rappresenta un'*incertezza* o *indeterminazione* (in inglese *uncertainty*) della misura.

In linea di principio si potrebbe pensare di ricondurre l'incertezza al di sotto di un valore comunque prefissato riducendo opportunamente l'unità di misura  $\mathcal{U}$ . Nella pratica, la riduzione dell'unità  $\mathcal{U}$  è generalmente limitata da difficoltà di natura tecnica. Inoltre, come avremo modo di vedere nel Cap. 3 e soprattutto nel Cap. 4, altre cause, legate sia a fluttuazioni di natura casuale sia ad errori di tipo sistematico nelle procedure di misurazione, possono contribuire in modo determinante all'incertezza di misura.

L'esperienza ha mostrato che l'incertezza nelle procedure di misurazione non è mai completamente eliminabile. L'incertezza è dunque parte integrante della misura e va ogni volta valutata quantitativamente con attenzione. La misura di una qualsiasi grandezza fisica deve sempre riportare l'informazione sull'entità della sua incertezza. La sua espressione sarà tipicamente del tipo

$$\mathcal{G} = (X_0 \pm \delta X)\mathcal{U}, \quad (1.3.4)$$

dove  $X_0$  è il valore centrale della misura e  $\delta X$  rappresenta la semi-larghezza dell'intervallo di incertezza. Buona parte del Cap. 4 sarà dedicata ad imparare come valutare l'incertezza di misura in diverse possibili situazioni e ad esprimerla in modo convenzionale mediante un semi-intervallo  $\delta X$ .

### C) Misurazione indiretta

Si parla di misurazione indiretta quando la misura  $X(\mathcal{G})$  della grandezza  $\mathcal{G}$  in esame viene ottenuta sfruttando relazioni analitiche che la collegano alle misure  $Y(\mathcal{A}), Z(\mathcal{B}), \dots$  di altre grandezze  $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \dots$  direttamente misurabili.

La misurazione indiretta viene talora utilizzata per grandezze che sarebbero in linea di principio misurabili anche direttamente:

- a) per convenienza pratica della misurazione indiretta rispetto alla misurazione diretta;
- b) per impossibilità pratica della misurazione diretta.

*Esempio:* La lunghezza della diagonale  $d$  di un quadrato può essere misurata direttamente oppure indirettamente a partire dalla misura diretta del lato  $a$  attraverso la relazione  $d = a\sqrt{2}$ .

*Esempio:* La velocità è in linea di principio misurabile direttamente (almeno finché si considerano velocità molto inferiori alla velocità della luce, così da poter trascurare gli effetti relativistici). La velocità viene però generalmente misurata in modo indiretto, ad esempio come rapporto tra uno spazio e un intervallo di tempo misurati direttamente.

*Esempio:* Le distanze astronomiche non possono essere misurate direttamente; la loro misurazione indiretta è ricondotta alla misurazione diretta di angoli e di una distanza più piccola.

Alla misurazione indiretta si deve comunque ricorrere per le grandezze di stato o *non metrizzabili* (dette perciò anche *non direttamente misurabili*). La misurazione indiretta consente di stabilire anche per alcune grandezze non metrizzabili una corrispondenza con un insieme di numeri che riproduce la struttura additiva.

*Esempio:* La *temperatura* non è misurabile direttamente, in quanto non è definibile una legge di composizione per le temperature. È tuttavia possibile stabilire delle *scale termometriche* che mettono in relazione in modo convenzionale la temperatura con una grandezza misurabile direttamente (una lunghezza, una pressione, una resistenza elettrica, etc.) Ad esempio, in un termometro a mercurio, preventivamente tarato secondo la scala Celsius, la misurazione di una variazione di temperatura  $\Delta T$  viene ricondotta alla misurazione diretta della variazione  $\Delta \ell$  di lunghezza della colonnina di mercurio.

La misurazione indiretta di una grandezza si basa sulla misurazione diretta di una o più altre grandezze. L'*incertezza*, che come abbiamo visto sopra caratterizza ogni misura ottenuta direttamente, si propaga ovviamente anche ai valori delle grandezze misurate indirettamente. La propagazione dell'incertezza nelle misure indirette sarà affrontata nel §4.6.

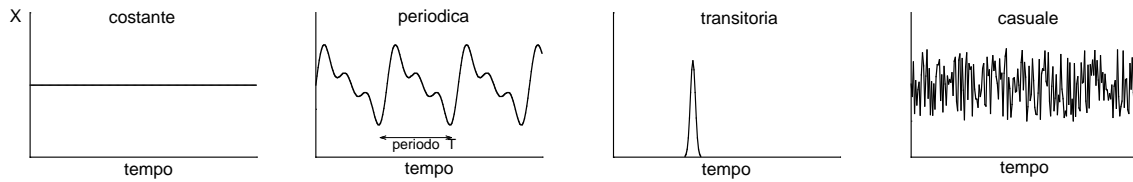
## 1.4 – Dipendenza dal tempo delle grandezze fisiche

Tra le diverse grandezze fisiche, il tempo assume spesso un ruolo privilegiato. Frequentemente infatti si presenta la necessità di seguire le variazioni di una grandezza fisica  $\mathcal{G}$  al trascorrere del tempo  $t$ , cioè di studiare l'andamento della funzione  $X(t)$ , dove  $X$  rappresenta la misura della grandezza  $\mathcal{G}$  e  $t$  il tempo. A seconda del tipo di dipendenza del valore  $X$  dal tempo  $t$ , è utile evidenziare alcuni casi particolari, che sono illustrati schematicamente in Fig. 1.2.

### A) Grandezze costanti

Una grandezza  $X$  si dice **costante** quando il suo valore  $X(\mathcal{G})$  non cambia al trascorrere del tempo.

*Esempio:* La forza di interazione gravitazionale tra due corpi di masse rispettivamente  $m$  e  $M$  e di dimensioni trascurabili, posti a distanza  $r$  l'uno dall'altro, vale  $F = GmM/r^2$ . La costante di proporzionalità  $G$  è detta *costante gravitazionale*; il suo valore non dipende né dall'istante né dal



**Fig. 1.2** – Dipendenza dal tempo delle grandezze fisiche: alcuni casi particolarmente significativi. Da sinistra verso destra: grandezza costante, periodica, transitoria, casuale.

luogo in cui è misurata.  $G$  è una *costante fondamentale della Fisica*. Il suo valore è riportato in Appendice D.2, insieme con il valore di alcune altre costanti fondamentali.

*Esempio:* L'accelerazione di gravità  $g$  dipende dal luogo in cui viene misurata. In un determinato luogo, tuttavia, il suo valore rimane costante nel tempo.

*Esempio:* Il periodo  $\mathcal{T}$  di oscillazione di un pendolo dipende dall'ampiezza dell'oscillazione (si veda la Fig. A.1 in Appendice A.3). Poiché l'ampiezza si riduce nel tempo a causa degli attriti, anche il periodo si riduce progressivamente. Tuttavia, se l'ampiezza delle oscillazioni è sufficientemente piccola, la dipendenza del periodo dall'ampiezza è debole e lo smorzamento dovuto all'attrito è lento. In queste condizioni il periodo di oscillazione viene con buona approssimazione considerato costante (*isocronismo delle piccole oscillazioni*).

## B) Grandezze periodiche

Una grandezza  $X$  ha andamento **periodico** con periodo  $T$  quando, per ogni valore di  $t$ , si ha:

$$X(t + T) = X(t) \quad (1.4.1)$$

*Esempio:* L'angolo  $\theta$  di apertura di un pendolo oscillante varia con il tempo in modo periodico. Nell'approssimazione delle piccole oscillazioni, la dipendenza dell'angolo  $\theta$  dal tempo è descritta da una legge oraria sinusoidale:  $\theta = \theta_0 \sin(2\pi t/\mathcal{T} + \phi_0)$ , dove  $\theta_0$  è l'ampiezza dell'oscillazione,  $\mathcal{T}$  il periodo e  $\phi_0$  la fase iniziale a  $t = 0$ .

*Esempio:* In un motore a combustione interna, ad esempio il motore di un'automobile, la pressione dei gas all'interno della camera di scoppio varia nel tempo. Se il motore gira a regime costante, la pressione assume con buona approssimazione la stessa sequenza di valori ad ogni ciclo; la pressione dipende cioè dal tempo in modo periodico, secondo l'Eq. (1.4.1).

*Nota:* È l'attribuzione di un carattere periodico ad alcuni fenomeni naturali (come l'oscillazione di un pendolo o la vibrazione di un cristallo di quarzo) che consente di stabilire le procedure per la misurazione diretta della durata degli intervalli di tempo, e quindi la definizione stessa di *intervallo di tempo*.

## C) Grandezze impulsive

Una grandezza ha andamento **impulsivo** o **transitorio** quando il suo valore è diverso da zero solo per un intervallo finito di tempo.

*Esempio:* Quando due corpi solidi (ad esempio due palle da biliardo) si urtano, si sviluppa una forza di mutua interazione che varia molto velocemente nel tempo, la cui durata è comunque limitata al brevissimo intervallo di tempo durante cui i due corpi sono a contatto. Nel caso dell'urto tra corpi solidi pertanto la forza ha carattere impulsivo.

## D) Grandezze casuali

Una grandezza ha andamento **casuale** quando il suo valore varia continuamente nel tempo in modo non

periodico.

*Esempio:* In un gas le molecole si muovono incessantemente, urtandosi reciprocamente. Ad ogni urto la velocità di una molecola cambia di direzione e modulo in modo imprevedibile. Il modulo della velocità di una molecola ha quindi un valore casuale.

*Esempio:* Anche il valore di grandezze fisiche macroscopiche può subire delle fluttuazioni casuali ad opera di molteplici cause. Queste fluttuazioni casuali sono generalmente di piccola entità rispetto al valore della misura ma contribuiscono alla sua incertezza. Questo argomento sarà ripreso e approfondito al Cap. 4.

Come vedremo in seguito, la dipendenza di una grandezza fisica dal tempo condiziona notevolmente la metodologia della sua misurazione e la scelta dello strumento di misura più adatto.

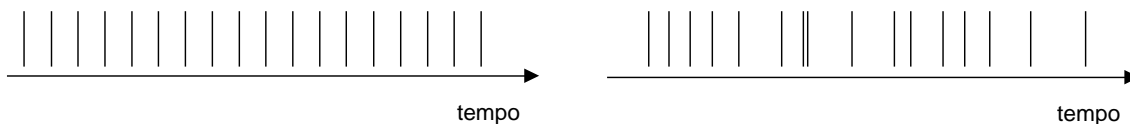
Ad esempio, per misurare una grandezza costante nel tempo si ha a disposizione un tempo virtualmente illimitato; si possono ottenere misure affidabili anche con strumenti relativamente semplici sfruttando la possibilità di ripetere più volte la misurazione e modificare se necessario la metodologia. Le principali proprietà che caratterizzano uno strumento per misurazioni di grandezze costanti nel tempo verranno descritte nel Cap. 3.

Nel caso di una grandezza dipendente dal tempo, la misurazione richiede l'uso di uno strumento di misura veloce, in grado di seguire il più possibile fedelmente le variazioni della grandezza stessa. Al § 3.5 verrà fatto un breve cenno introduttivo al problema della risposta dinamica degli strumenti di misura.

## 1.5 – Conteggio di eventi casuali

Come abbiamo visto al § 1.3.A, la misurazione diretta di una grandezza fisica si riconduce sempre ad un'operazione di *conteggio*, cioè al computo del numero  $n$  di campioni  $\mathcal{U}$  che consentono di ottenere, a meno dell'incertezza di misura, la coincidenza tra la grandezza  $\mathcal{G}$  e la somma  $n\mathcal{U}$ .

A titolo di esempio, consideriamo la misurazione di un intervallo di tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$  con un orologio in grado di scandire i secondi. L'operazione di misura consiste nel contare i secondi a partire dall'istante iniziale  $t_1$  per finire all'istante finale  $t_2$ . I segnali prodotti ad ogni secondo dall'orologio possono essere considerati come *eventi regolarmente equispaziati* nel tempo (Fig. 1.3, a sinistra).



**Fig. 1.3** – Eventi che si susseguono con regolarità nel tempo (a sinistra) ed eventi casuali (a destra).

Nella pratica di laboratorio può accadere di dover affrontare una situazione piuttosto differente, cioè il conteggio di eventi che si presentano in modo disordinato ed imprevedibile nel tempo o nello spazio (Fig. 1.3, a destra). Si tratta del conteggio di *eventi casuali*.

Un esempio tipico è rappresentato dal fenomeno dei raggi cosmici, cioè delle particelle di alta energia che continuamente arrivano dallo spazio sulla superficie terrestre. Le particelle possono essere rivelate, e quindi contate, per mezzo di opportuni strumenti, ad esempio i contatori Geiger. L'arrivo di una particella sulla finestra di ingresso di un contatore Geiger è un evento casuale nel tempo, e l'istante di arrivo è del tutto imprevedibile. La sequenza costituita dagli arrivi di più particelle è disordinata e casuale, come in Fig. 1.3, a destra).

Molti altri fenomeni legati alla fisica del mondo microscopico danno origine ad eventi casuali; si pensi ad



esempio al decadimento di isotopi radioattivi, all'emissione di fotoni (quanti di luce) da sorgenti di bassa intensità, alle collisioni tra particelle elementari.

La casualità dei fenomeni sembrerebbe a prima vista precludere la possibilità di un loro studio quantitativo. Tuttavia, se si effettuano conteggi di un numero sufficientemente elevato di eventi, è possibile comunque estrarre dalla loro sequenza irregolare delle *proprietà medie* regolari e significative. Queste proprietà medie rappresentano delle *grandezze fisiche*.

*Esempio:* Consideriamo un campione di isotopi radioattivi. Un *decadimento radioattivo* è un evento casuale, del tutto imprevedibile. Così pure casuale è la sequenza di decadimenti nel tempo, che può essere rivelata mediante opportuni strumenti contatori. Tuttavia, se si esegue un numero sufficientemente grande di osservazioni, è possibile mettere in luce una forma di regolarità nel comportamento *medio* degli eventi casuali. Se all'istante  $t = 0$  sono presenti  $N_0$  isotopi, il loro numero si riduce nel tempo, *in media*, secondo la legge esponenziale:  $N(t) = N_0 \exp(-\alpha t)$ , dove  $\alpha$  è una costante detta *costante di disintegrazione*. La costante di disintegrazione è una grandezza fisica, il cui valore caratterizza il comportamento di quel determinato isotopo.

Il conteggio di eventi casuali richiede strumentazione apposita nonché opportune tecniche statistiche di analisi dei dati, di cui ci occuperemo nei prossimi capitoli. I conteggi di eventi casuali sono intrinsecamente affetti da *incertezza*. Questa incertezza si riflette evidentemente anche sulle grandezze fisiche definite in base alle loro proprietà medie.

## 1.6 – Definizione operativa delle grandezze fisiche

Come abbiamo visto al § 1.2, una grandezza fisica è una proprietà degli oggetti o dei fenomeni per la quale è possibile definire una relazione d'ordine transitiva (metodo comparativo) ed eventualmente anche una legge di composizione additiva (metodo quantitativo).

Al §1.3 abbiamo anche visto che la misurazione delle grandezze fisiche si basa proprio sull'esistenza della relazione d'ordine o della legge di composizione. Ad esempio, la misurazione diretta presuppone che si conosca la ricetta pratica per aggiungere i campioni  $\mathcal{U}$ . Il concetto di grandezza fisica è quindi intrinsecamente connesso con le procedure di misurazione.

Questo modo di vedere le cose è un tipico esempio del *carattere operativo* che viene attribuito ai concetti della Fisica. Le grandezze fisiche (lunghezza, massa, tempo, forza, etc.) non vengono definite in termini di proprietà astratte, bensì in modo concreto, *operativo*: la definizione di ogni singola grandezza fisica consiste nell'enunciazione dettagliata delle operazioni che è necessario fare per misurarla.

Lo sviluppo scientifico e tecnologico ha portato ad una progressiva estensione dell'utilizzazione delle grandezze fisiche al di fuori del campo della comune esperienza quotidiana. I valori delle grandezze fisiche possono coprire molti ordini di grandezza. A titolo di esempio, consideriamo due lunghezze tipiche della fisica atomica e dell'astronomia: il raggio della prima orbita elettronica nel modello di Bohr dell'atomo di idrogeno è circa  $5.3 \times 10^{-11}$  m, mentre il raggio medio dell'orbita del pianeta Plutone è  $5.9 \times 10^{+12}$  m.

È ovvio che né le lunghezze su scala atomica né le lunghezze di interesse astronomico possono essere misurate per confronto diretto con un campione di unità di misura. Generalizzando, una stessa grandezza fisica può richiedere tecniche di misura diverse per differenti ordini di grandezza dei suoi valori. Tecniche di misura diverse corrispondono a definizioni operative diverse. Affinché si possa comunque parlare di una medesima grandezza fisica pur in presenza di diverse definizioni operative, è necessario che le diverse definizioni operative siano tra di loro coerenti: se in un dato intervallo di valori due o più tecniche di misurazione sono possibili, esse devono fornire lo stesso risultato.

Una grandezza fisica è pertanto definita dalla classe di tutte le sue possibili definizioni operative.

## 1.7 – Il metodo sperimentale

La Fisica non si limita alla semplice osservazione dei fenomeni naturali e alla misurazione di grandezze fisiche, in conformità ai *metodi descrittivi* presentati al §1.1. Come abbiamo osservato all’inizio di questo capitolo, la grande potenza del metodo scientifico sta nella capacità di trovare delle correlazioni tra grandezze fisiche diverse, in modo da poter stabilire delle leggi e costruire delle teorie di validità generale.

La ricerca di correlazioni tra grandezze fisiche non è tuttavia un compito semplice. I fenomeni naturali si presentano generalmente in forme complesse, caratterizzate dalla compresenza e mutua influenza di molti fattori: si pensi solo all’effetto degli attriti, che per molti secoli ha impedito di individuare la relazione di proporzionalità tra forza e accelerazione che sta alla base della meccanica classica. Molti fenomeni importanti addirittura sfuggono alla percezione sensoriale diretta e possono venire rivelati solo mediante strumentazione opportuna (si pensi ai fenomeni elettromagnetici).

La ricerca di correlazioni tra grandezze fisiche si basa sul *metodo sperimentale*, introdotto da Galileo Galilei (1564–1642). Il ricercatore non si limita all’osservazione passiva dei fenomeni naturali, bensì li riproduce in forma controllata in laboratorio, modificando sistematicamente i diversi fattori che ne influenzano lo svolgimento. È così possibile ridurre o addirittura eliminare fattori che si ritengono secondari ed isolare gli aspetti fondamentali di un fenomeno. Si arriva in tal modo all’enunciazione di semplici relazioni empiriche tra grandezze fisiche. Ad esempio, la progressiva riduzione dell’effetto dell’attrito su un corpo in moto lungo un piano inclinato ha portato Galileo Galilei ad intuire e quindi ipotizzare la relazione di proporzionalità tra forza ed accelerazione.

Le relazioni tra grandezze fisiche stabilite sperimentalmente sono la base per lo sviluppo delle teorie scientifiche. Le teorie scientifiche consentono di fare previsioni sull’evoluzione di fenomeni più complessi. La validità di ogni teoria scientifica è corroborata dalla verifica sperimentale delle sue previsioni.

Il metodo sperimentale si basa ovviamente su una scelta oculata delle grandezze fisiche utilizzate per descrivere i fenomeni naturali ed una loro rigorosa definizione operativa. Richiede però anche il senso critico, l’abilità tecnica, la fantasia necessarie per ricercare correlazioni semplici e riproducibili tra grandezze fisiche.

È fondamentale, per il ricercatore, essere capace di valutare correttamente l’affidabilità dei suoi risultati. Come abbiamo già accennato nei paragrafi precedenti e come vedremo approfonditamente nei prossimi capitoli, la misura di qualsiasi grandezza fisica è comunque affetta da incertezza, attribuibile alle prestazioni degli strumenti di misura e alle metodologie del loro impiego. Questa incertezza si riflette sulle leggi che esprimono le correlazioni tra grandezze fisiche, e quindi sulle teorie scientifiche che ne derivano. Dalla affidabilità delle misure dipendono in ultima analisi i limiti di validità delle teorie scientifiche nonché delle loro conseguenze di rilevanza tecnologica.