



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Percorsi Abilitanti Speciali (PAS), Area Didattica di Scienze MFN

A.A. 2013/14

DIDATTICA DELLA FISICA

Docente: Lorenzo Manti, Dipartimento di Fisica, Stanza 1G14

tel. 081 676262; e-mail: manti@na.infn.it

IL METODO SPERIMENTALE E LA MISURA DELLE GRANDEZZE FISICHE

La fisica si basa sul metodo sperimentale. Esso permette la schematizzazione di un dato fenomeno osservato attraverso la formulazione di leggi empiriche, espresse sotto forma di relazioni matematiche, che determinano quantitativamente le grandezze fisiche che lo caratterizzano.

Esempi di correlazioni quantitative fra grandezze fisiche (leggi empiriche) sono:

- ✓ L'accelerazione di un corpo su un piano inclinato è proporzionale all'inclinazione
- ✓ Gli stati fisici di un atomo di idrogeno hanno energie che dipendono in maniera semplice da un numero quantico n

Legge empirica (Ipotesi) $\longrightarrow$ Legge fisica $\longrightarrow$ Teoria

Un insieme di **ipotesi coerenti** va sviluppato, proponendo una **teoria (o modello)**.

Le previsioni teoriche dedotte sono sottoposte a verifica tramite un esperimento per l'**accordo quantitativo**, che è l'aspetto cruciale di ogni teoria. La verifica di tali ipotesi procede attraverso la **misura** delle grandezze fisiche in gioco. L'esperimento costituisce il “criterio di verità” della scienza moderna accettabile a tutti.

Misurare una grandezza significa associare alla grandezza un numero che indica quante volte essa è maggiore o minore di una grandezza ad essa omogenea, presa come campione di riferimento ed a cui si attribuisce, per convenzione, il valore unitario.

- Due grandezze si dicono *omogenee* quando si possono misurare con le stesse operazioni

L'insieme delle operazioni necessarie per effettuare la misura di una grandezza fisica deve essere definito in maniera rigorosa, univoca e riproducibile, e costituisce la **definizione operativa** della grandezza.

Il risultato dell'operazione di misura sarà sempre costituito da due numeri: la migliore **stima** della grandezza e l'**incertezza** associata a tale stima. Questo è vero anche se il risultato appare come un numero solo.

Esempio:

se per la velocità della luce c viene fornito un valore scritto come $c = 298767 \text{ km/s}$, va inteso nel senso che il valore di c è stato valutato con un'incertezza minore di un km; se $c = 298767,1 \text{ km/s}$, ciò sta ad indicare che il valore di c è conosciuto con approssimazione minore rispetto al caso della misura precedente, cioè la sua misura risulta affetta da un'incertezza più piccola del decimo di km.

Nell'esempio appena considerato, la prima misura è espressa da un numero con 6 cifre significative, la seconda da un numero con 7 cifre significative.

Per **cifra significativa** si intende il numero di tutte le cifre scritte, compreso lo zero, a partire da destra (cioè da quelle di rango meno elevato) fino all'ultima diversa da zero a sinistra.

L'ultima cifra a destra con cui si scrive un numero è quella che indica il grado di precisione con cui si ritiene di conoscere la grandezza che esso rappresenta: così, scrivere 4,3 è diverso che dire 4,30 perché. nel primo si intende che $4,2 < 4,3 < 4,4$, mentre nel secondo caso $4,29 < 4,30 < 4,31$.

Ci si potrebbe trovare, ad esempio in un libro di testo, di fronte al caso in cui la stima di una grandezza sia scritta sotto forma di un solo numero, senza esplicito riferimento all'incertezza: in tal caso, l'incertezza sulla stima è implicitamente fornita dalla posizione dell'ultima cifra significativa

- Sarebbe d'altra parte insensato usare un numero arbitrariamente grande di cifre significative in quanto ciò equivarrebbe ad un'incertezza nulla.

Eseguire una misura comporta:

- La scelta di un opportuno campione di riferimento (**sistema di unità di misura**)
- L'impiego dello **strumento** da usare, valutandone le caratteristiche in rapporto alla misura da effettuare
- L'elaborazione dei risultati ottenuti tenendo conto delle **incertezze** associate alla operazione di misura

Tali incertezze o **errori di misura** sono inevitabili: occorre valutarli e, nei limiti del possibile, ridurli affinché le misure siano utili. I metodi per ottenere ciò dipendono dalla loro natura ed origine:

- Incertezze nella lettura di scale graduate (**errori massimi o di sensibilità**)
- Incertezze nel caso di misure ripetibili (**errori statistici o casuali**)

MISURA DIRETTA ED INDIRETTA

La misura di una grandezza, che per definizione comporta una serie di operazioni di confronto della grandezza incognita con il campione unitario, si dirà **diretta** o **assoluta** se si realizza attraverso il confronto diretto con il campione unitario o mediante uno strumento opportunamente tarato con il campione.

✓ Misura della lunghezza di un tavolo

Nella misura **indiretta** o **relativa** il valore della grandezza è ricavato attraverso la misura di altre grandezze correlate ad essa mediante relazioni matematiche note (legge di definizione oppure legge fisica del fenomeno).

✓ Velocità media $v_m = \Delta s / \Delta t$

Il numero che rappresenta il risultato di una misura deve essere accompagnato dall'indicazione del campione di riferimento (unità di misura).

GRANDEZZE FONDAMENTALI E GRANDEZZE DERIVATE

L'esistenza di leggi di natura fisica (legge rappresentativa del fenomeno) comporta la possibilità di scegliere un limitato numero di grandezze fisiche (*grandezze fondamentali*) per le quali si definisce, in maniera arbitraria ed indipendente, il campione unitario.

I campioni unitari delle rimanenti grandezze (*grandezze derivate*) si ottengono dalle relazioni esistenti con le grandezze fondamentali ed i loro campioni.

- Una grandezza è, quindi, detta *fondamentale* quando per definirla non è necessario definire altre grandezze; quindi la sua misura è effettuata per confronto con un campione di riferimento.

Una grandezza è detta *derivata* se la sua definizione dipende, invece, dalla definizione di altre grandezze (fondamentali o derivate a loro volta).

- Non è conveniente introdurre un campione unitario arbitrario per ciascuna grandezza perché in tutte le leggi fisiche comparirebbero coefficienti di adattamento (conversione): ad esempio, $v' = k \, ds/dt$ con $k = 3,3357 \cdot 10^{-9}$ se si scegliesse c come campione unitario della velocità (il fattore è l'inverso del numero che esprime c in m/s quando ds è misurato in metri e dt in secondi).

Un sistema di unità di misura si compone di:

- ◆ Un insieme di grandezze fondamentali
- ◆ L'insieme corrispondente di campioni (unità arbitrarie)

I criteri di scelta delle grandezze fondamentali sono dettati da criteri di convenienza:

- ◆ Che siano facilmente misurabili
- ◆ Che siano facilmente riproducibili e stabili nel tempo

Sistema Internazionale (S.I.)

Grandezze fondamentali	Unità di misura	Simbolo
lunghezza	metro	<i>m</i>
tempo	secondo	<i>s</i>
massa	kilogrammo	<i>kg</i>
intensità di corrente elettrica	ampère	<i>A</i>
temperatura	grado Kelvin	<i>K</i>
intensità luminosa	candela	<i>cd</i>

Le grandezze fisiche hanno *dimensioni* che derivano dalle relazioni o leggi fisiche tramite cui sono definite le grandezze derivate, cioè dal legame di ogni grandezza con quella scelta come fondamentale; tali dimensioni dipendono quindi dal sistema di misura, cioè dalla scelta delle grandezze fondamentali e delle unità di misura:

$$[G] = [L]^{\lambda} [M]^{\mu} [t]^{\tau} [K]^{\xi} \quad (\text{S. I.})$$

Il metodo dimensionale permette di accertare se una legge in cui compaiono più grandezze è formalmente corretta perché essa può essere stabilita solo tra grandezze omogenee, cioè aventi le stesse dimensioni.

CARATTERISTICHE DI UNO STRUMENTO DI MISURA

Uno *strumento* di misurazione è un apparecchio che permette di determinare il valore di una grandezza fisica in rapporto al valore di una grandezza campione assunto convenzionalmente come unitario. Il suo funzionamento può dipendere da molti meccanismi.

La maggior parte degli strumenti ha una scala graduata e un indice mobile che fornisce il risultato (*strumenti analogici*); talvolta la scala graduata e l'indice sono sostituiti da uno schermo a cifre (*strumenti digitali*) che fornisce direttamente il risultato in forma numerica.

Se si schematizza lo strumento come una scatola da cui esce una *risposta* in base ad una *sollecitazione* in ingresso, se ne possono identificare almeno tre caratteristiche principali:

- **Sensibilità**
- **Precisione**
- **Giustezza**

Sensibilità:

Prima definizione: sensibilità come funzione del carico

La sensibilità S é il rapporto fra lo spostamento Δx dell'indice sulla scala [risposta $R(G)$] e la variazione Δy della grandezza da misurare. In generale:

$$S = dR(G)/dM(G)$$

Seconda (e più comune) definizione: sensibilità come minima risposta rilevabile

S è un parametro legato alla variazione minima apprezzabile Δy della grandezza in esame. Solitamente corrisponde al minimo spostamento Δx dell'indice sulla scala graduata; per sensibilità di uno strumento si intende allora la minima sollecitazione che si deve applicare allo strumento, perché esso fornisca una risposta “apprezzabile” (**criterio della risposta minima rilevabile**).

Formalizzando la definizione secondo cui S è un parametro legato alla variazione minima apprezzabile Δy della grandezza in esame, ed essendo considerato uno strumento tanto più sensibile quanto più piccola è la quantità $|\Delta y|$, S può essere espressa come:

$$S = 1/|\Delta y|$$

Si può dimostrare matematicamente che le due definizioni forniscono lo stesso valore per la sensibilità se si assume che lo spostamento minimo apprezzabile sulla scala dello strumento corrisponda ad una divisione.

Negli strumenti analogici si è soliti assumere come risposta “apprezzabile” lo spostamento dell’indice corrispondente a mezza divisione della scala graduata (ossia il minimo spostamento dell’indice sulla scala graduata): negli strumenti digitali, la risposta è considerata “apprezzabile” quando varia di un’unità l’ultima cifra mostrata dallo schermo (display).

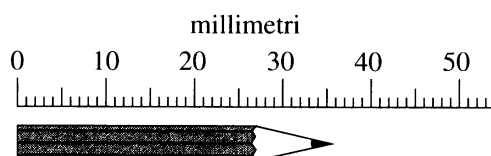


Figura 1.2. La misura di una lunghezza con un righello.

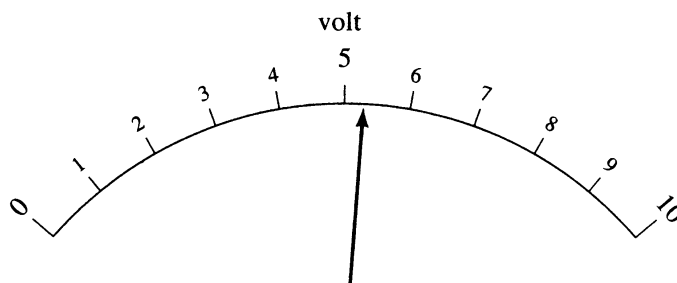


Figura 1.3. Una lettura su un voltmetro.

Come decidere la lettura della risposta R se l'estremo della grandezza o dell'indice cade fra due successive divisioni (incisioni)?

Si può dire solo a quale dei due valori è più vicina:

- ✓ Es.: $36,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ nel caso di un righello con una divisione al mm
- ✓ Es.: $5,3 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$ se le divisioni sono spaziate al punto da interpolare fra 5.2 e 5.3

Esiste sempre un ΔR minimo apprezzabile

Ci si riferisce spesso alla **precisione** P di uno strumento come la capacità dello strumento di fornire la stessa risposta a parità di sollecitazione. In realtà questa definizione è solo parzialmente appropriata perché allora anche uno strumento non tarato correttamente potrebbe fornire sempre lo stesso valore a parità di sollecitazione, il che non ci porterebbe comunque ad attribuire precisione alla misura.

Più rigorosamente, in uno strumento, P può essere definita come la somma dei valori assoluti degli errori percentuali di lettura di uno strumento derivanti da difetti di costruzione, di taratura e di funzionamento.

Tutti gli strumenti in pratica danno una risposta discreta:



Essa è pertanto una caratteristica costruttiva dello strumento nel senso che dipende dal modo in cui è stato realizzato il meccanismo che trasforma la sollecitazione in risposta, come può essere il braccio oscillante di una bilancia: in questo caso, una bilancia si dice che è molto precisa se è capace di fornire sempre lo stesso valore per la massa di uno stesso corpo pesato in momenti successivi.

Siano

$$M_1, M_2, \dots, M_{i-1}, M_i, M_{i+1} \dots M_n \quad (1 \leq i \leq n).$$

gli m possibili esiti della misura i -esima: se capita, ripetendo la misura n volte, che l'esito a volte differisca così da si ottenere m valori diversi, si ottiene una **dispersione** o **distribuzione** di valori della misura.

La *larghezza* di tale distribuzione può essere considerata come un'indicazione della precisione con cui la misura è stata effettuata:

$$P \sim 1/\text{larghezza}$$

Esempio:

Si misuri il periodo di un pendolo con un cronometro ripetendo la misura 4 volte ottenendo una serie di valori (in secondi):

2,3; 2,4; 2,5; 2,4

E' ragionevole assumere che il valore "vero" del periodo giaccia tra il valore minimo e quello massimo:

probabile intervallo: 2,3 s $\Leftrightarrow$ 2,5 s

- Come si vedrà in seguito, la miglior stima del "valore vero" della grandezza periodo é proprio la media aritmetica, in questo caso 2.4 s

Ogniqualevolta é possibile ripetere la stessa misura molte volte ottenendo una distribuzione di valori, la **dispersione** dei valori intorno al valore medio ("più probabile") dà un'indicazione **dell'incertezza della misura**.

Piccole variazioni nella risposta di uno strumento, a parità di sollecitazione, possono essere dovute a cause non facilmente controllabili, come variazioni della temperatura dell'ambiente dove la misura è effettuata, vibrazioni del piano di appoggio dello strumento, etc. Queste variazioni, d'altra parte, possono essere messe in evidenza solo se lo strumento è molto sensibile.

Quindi, **sensibilità** e **precisione** sono due caratteristiche in contrapposizione: quanto più uno strumento è sensibile, tanto meno sarà preciso, e viceversa. Di questo deve tener conto il costruttore dello strumento cui spetta realizzare la scala graduata che commisuri la sensibilità alla precisione.

Giustezza

La *giustezza* è definita come la corrispondenza tra il valore fornito dallo strumento per la misura di una grandezza ed il valore vero (peraltro incognito) della grandezza stessa. Essa dipende dalla bontà della taratura ed è importante tener presente che uno strumento può essere molto preciso ma fornire allo stesso tempo un risultato “non giusto”, cioè sbagliato, perché la taratura non è stata eseguita correttamente.