

Le misure e la strumentazione

ovvero

i fondamenti del trattamento sperimentale di segnali e dati

1

Perché facciamo misure?

“Io spesso affermo che quando potete misurare ciò di cui state parlando, e potete esprimerlo in numeri, allora conoscete qualcosa di ciò di cui parlate; ma quando non potete esprimerlo in numeri, allora la vostra conoscenza è scarsa ed insoddisfacente; può rappresentare un inizio di conoscenza, ma vi siete addentrati, nei vostri pensieri, assai poco nel campo della scienza, qualunque sia l'argomento che state trattando. Perciò, se scienza significa misurare, senza la metrologia non ci può essere scienza.”

William Thomson (Lord Kelvin)
6 maggio 1886

2

Perché facciamo misure?

- Nella società dell'informazione le misure costituiscono l'origine della conoscenza.
- Tutto oggi si misura.
- Le misure si comprano e si vendono.

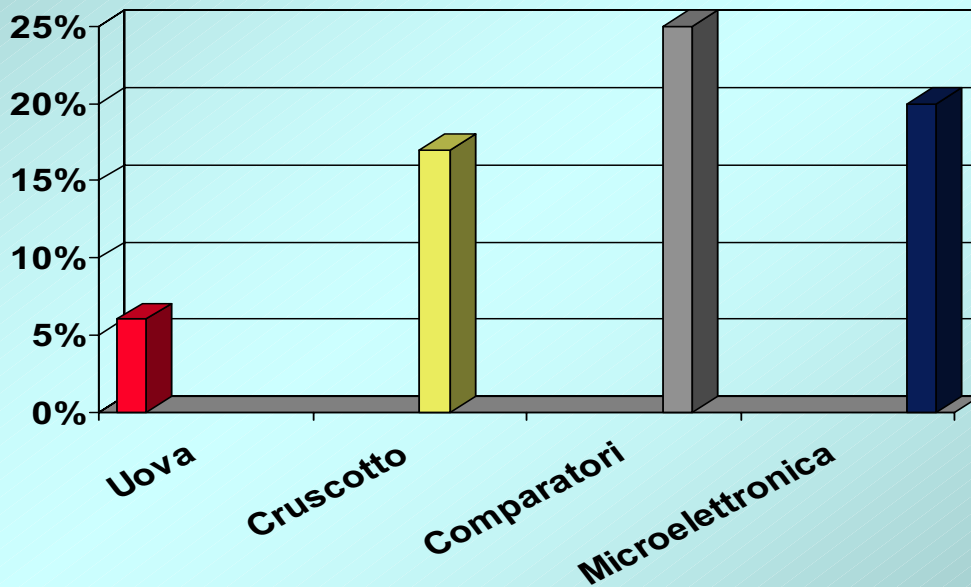
3

Che valore hanno le misure?

- Globale: 6% del PIL
- Delle misure elettriche nell'industria: 4% del fatturato
- Delle analisi biomediche: 5% del costo complessivo dell'assistenza sanitaria

4

Quanto incidono le misure sul costo dei prodotti?



5

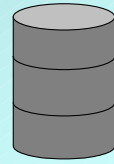
Cosa significa misurare una grandezza?

- La misura di una grandezza è generalmente definita come il confronto quantitativo di questa stessa grandezza con un'altra grandezza, omogenea con quella che si vuole misurare, che viene considerata come l'unità di misura.
- Cinque diversi "agenti" contribuiscono al processo di misura.

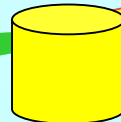
6

I cinque agenti

Il misurando



Il metodo



Il campione

L'unità di misura

Lo strumento



L'operatore

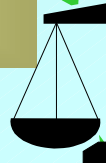
7

Il misurando

Il misurando



Il m

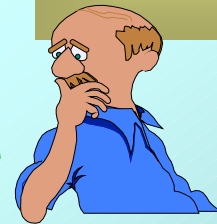


Lo strumento

- Il misurando è l'oggetto fisico su cui vengono eseguite le misure.
 - Un resistore.
 - Un blocco di materiale isolante
 - ...
- L'operazione di misura si prefigge, in genere, la **valutazione quantitativa di una proprietà del misurando**.
 - La resistenza del resistore.
- Generalmente il misurando viene rappresentato attraverso un **modello matematico**.
 - $V = R I$

Il campione

- Il campione realizza fisicamente l'unità di misura con la quale si vuole confrontare il misurando.

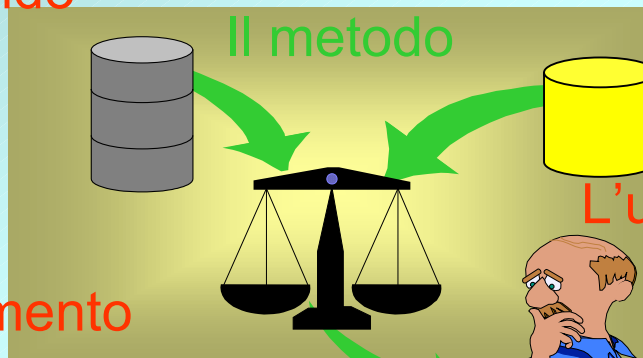


L'operatore

9

Il metodo

Il misurando



L'unità di misura

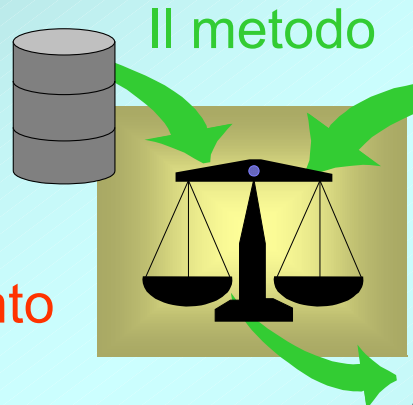
Lo strumento

- Con metodo di misura si intende la **modalità** con cui si esegue il **confronto** fra misurando e campione
- Il metodo di misura sfrutta, generalmente, un **fenomeno fisico**.

10

Lo strumento

Il misurando



Lo strumento

- E' l'oggetto con cui si esegue il confronto fra misurando e campione, secondo le modalità previste dal metodo impiegato.

L'operatore

11

L'operatore

- Coordina e supervisiona la sequenza di operazioni previste dal metodo di misura impiegato.
- Legge le indicazioni degli strumenti.
- Elabora le letture per ottenere il risultato della misura.
- Può non essere "umano"
 - Sistemi automatici di misura.



L'operatore

12

Una prima conclusione

- "*Misure*" e "*Strumentazione*" sono le due facce di una stessa medaglia.
- La scienza delle misure studia le metodologie con cui è possibile eseguire il confronto quantitativo di una grandezza fisica con il relativo campione.
 - Lo stesso principio può essere applicato alla misura di altre quantità
 - Gradimento di servizi
 - Customer satisfaction
- Gli strumenti e gli apparati di misura sono i dispositivi che eseguono il confronto.
- Quindi ha senso affrontare insieme lo studio di misure e strumentazione.

13

I campioni e le unità di misura

- Fino ad un passato non troppo lontano, i campioni erano esclusivamente realizzazioni materiali di una determinata grandezza
 - Il metro
 - Il kilogrammo
- Le unità di misura facevano riferimento a manufatti assai spesso "locali", talvolta "antropomorfi"
 - Il braccio, il piede, il pollice, ...
- Facevano eccezione le unità di tempo, che facevano riferimento a effetti astronomici periodici comuni a tutti
 - Sorgere e tramontare del sole
 - Le fasi lunari

14

Verso l'universalità dei campioni

- L'Illuminismo e la Rivoluzione Francese introdussero il concetto di riferimenti di lunghezza e massa comuni, cercati in natura (proprietà della Terra, di materiali).
- Si teorizzò l'impiego di *proprietà egualmente disponibili per tutti gli uomini, in tutti i tempi e in qualsiasi luogo*.
- Si introdusse il sistema decimale per i multipli e i sottomultipli
- La tecnologia e le conoscenze scientifiche non permisero la realizzazione di campioni diversi da quelli materiali

15

Un concetto importante

- Un secolo più tardi (1870), J. C. Maxwell introdusse un concetto fondamentale:
"If we wish to obtain standards of length, time and mass which shall be absolutely permanent, we must seek them not in the dimensions, or the motion, or the mass of our planet, but in the wavelength, the period of vibration, and the absolute mass of these imperishable and unalterable and perfectly similar molecules"
- La strada era aperta, ma ci volle ancora un secolo, la scoperta della relatività e della fisica quantistica e l'opera di G. Giorgi per tradurre in pratica queste parole.

16

Quali grandezze fondamentali

- Nella prima metà del XX secolo Giorgi introdusse il *Sistema Internazionale di Unità di Misura* (SI) adottato dalla 11^a Conférence Générale des Poids et Mesures nel 1960.

metro	m	lunghezza
kilogrammo	kg	massa
secondo	s	tempo
ampere	A	corrente elettrica
kelvin	K	temperatura
mole	mol	quantità di sostanza
candela	cd	intensità luminosa

17

Il metro

- Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto nel vuoto dalla luce in un intervallo di tempo pari a $1/299792458$ s
- E' realizzabile attraverso la misura del tempo di volo di un impulso di radiazione elettromagnetica.
- Si ottengono accuratèzze dell'ordine di 10^{-10} .

18

Il chilogrammo

- E' l'unica unità di misura realizzata ancora oggi con un campione materiale.
- E' la massa del prototipo internazionale del chilogrammo conservato al Pavillon de Breteuil (Sèvres – Francia).
- Poiché la sua realizzazione coincide con la definizione, è teoricamente esente da incertezze.
- Confrontando diversi prototipi, si è riscontrata una possibile instabilità temporale relativa ($\Delta m/m$) dell'ordine di 10^{-9} nell'arco di un anno.

19

Il secondo

- E' l'intervallo di tempo che contiene 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale del Cesio 133.
- La sua accuratezza relativa è dell'ordine di 10^{-14} – 10^{-15} .
- E' attualmente il campione meglio realizzato.

20

L'ampere

- E' l'intensità di corrente elettrica che, mantenuta costante in due conduttori rettilinei, paralleli, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile, e posti alla distanza di 1 m l'uno dell'altro nel vuoto, produce tra i due conduttori una forza di $2 \cdot 10^{-7}$ N per metro di lunghezza.
- E' di difficile realizzazione.
- Ha accuratezza dell'ordine di 10^{-7} .
- Attualmente si preferisce realizzare campioni delle grandezze elettriche tensione (V) e resistenza (Ω) perché ottenibili sfruttando proprietà quantistiche della materia
 - Tensione: effetto Josephson – riproducibilità 10^{-10}
 - Resistenza: effetto Hall quantistico – riproducibilità 10^{-9} ₂₁

Il kelvin

- E' la frazione $1/273.16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua
- E' ottenibile con incertezze dell'ordine del millikelvin.

La mole

- E' la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0.012 kg di carbonio 12.
- Quando si usa la mole, le entità elementari devono essere specificate, e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, altre particelle o gruppi specifici di particelle.
- Dipende dalla realizzazione del kilogrammo
- Il numero di entità elementari è la costante di Avogadro ($N_A = 6.02214199 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) conosciuta con una incertezza relativa di $7.9 \cdot 10^{-8}$.

23

La candela

- E' l'intensità luminosa, in una assegnata direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ e la cui intensità energetica in quella direzione è di $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}$.
- Ha un'incertezza relativa di $3 \cdot 10^{-3}$.
- Non interviene direttamente nella descrizione di fenomeni della fisica.
- E' collegata alle facoltà percettive dell'occhio umano.
- Presuppone la definizione di una curva di risposta che approssima quella dell'occhio umano medio nella visione diurna.

24

Organismi per la metrologia

- Dove si trovano i campioni?
- Chi si fa garante dello stato dei campioni?
- La metrologia e le misure sono discipline che non hanno attinenza solo con le scienze e la tecnologia, ma coinvolgono molti aspetti economico-legali
 - Attività di produzione
 - Scambio di prodotti
 - ...
- Nel 1875, a Parigi, venne firmata la Convenzione del Metro.
 - Attualmente sono circa 50 i paesi firmatari
- La struttura organizzativa è la *Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)*
 - E' un organismo a livello politico e diplomatico.

25

Gli organismi esecutivi internazionali

- Il *Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)*
 - E' l'organo esecutivo della CGPM, ancora a livello politico-diplomatico
- Il *Comité International des Poids et Mesures (CIPM)*
 - E' un organo tecnico-scientifico, che affronta i problemi a livello tecnico ed ha compiti di supervisione nei riguardi del BIPM.
 - Ha insediato comitati consultivi con compiti di coordinamento internazionale nel loro campo specifico:
 - *Comité Consultatif d'Electricité (CCE)*: si occupa delle unità elettriche
 - *Comité Consultatif de Temps et Fréquence (CCTF)*: si occupa delle unità di tempo e frequenza.

26

La metrologia legale

- E' un settore molto importante per le implicazioni che le misure possono avere in ambito economico, della salute e della sicurezza.
- Sono strumenti di metrologia legale:
 - Bilance
 - Contatori (della benzina, dell'acqua, del gas, dell'elettricità, ...)
 - ...
- L'organismo internazionale che disciplina questa materia è l'*Organisation Internationale pour la Métrologie Légale* (OILM).

27

Gli Istituti Metrologici Nazionali

- Nei Paesi economicamente e tecnologicamente avanzati gli Istituti Metrologici Nazionali sono incaricati di mantenere i campioni nazionali, svolgere i confronti periodici con gli altri campioni di altre Nazioni, svolgere attività di ricerca e sostegno all'industria in ambito metrologico.
- Si occupano della disseminazione dei campioni
 - Costituire una rete di laboratori dotati di propri campioni di riferimento, che vengono periodicamente confrontati con i campioni nazionali.
- Garantiscono la *riferibilità* delle misure, e quindi la loro pratica applicabilità

28

Gli Istituti Metrologici Italiani

- *L'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti (IMGC)*
 - E' un organo del CNR con sede a Torino.
 - Si occupa di unità di massa, lunghezza, temperatura e forze.
- *L'Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris" (IEN)*
 - Ha sede a Torino.
 - Si occupa di unità elettriche, fotometriche, di tempo e frequenza.
- *L'Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA)*
 - Ha sede a Frascati
 - Si occupa di radiazioni ionizzanti

29

II SIT

- Il SIT è il *Sistema Italiano Taratura*.
- Ne fanno parte i tre laboratori metrologici
- Autorizza, controlla e coordina una vasta rete di laboratori pubblici e privati che disseminano le unità di misura sul territorio e svolgono attività di taratura degli strumenti utilizzati per le attività industriali, di analisi, ecc.

30

Quanto “buone” devono essere le nostre misure?

“Non devi essere ingiusto nei tuoi giudizi, nelle misure di lunghezza, di peso o di capacità. Usa bilance, pesi, recipienti e pertiche giuste. Io sono Yaveh, il tuo Dio, che ti ha salvato dalla terra d’Egitto”

Lev, 19, 35-36

31

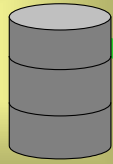
Un grosso problema tecnico e scientifico

- Possiamo “non essere ingiusti nelle ... misure di lunghezza, di peso, di capacità”?
- Possiamo costruire “bilance giuste, pesi giusti, ...”?
- In altre parole, possiamo ottenere il valore vero del misurando come risultato della misura?
- La risposta a questa domanda è, naturalmente, *negativa*.
- Tutti gli agenti che intervengono nel processo di misura contribuiscono a rendere il risultato della misura diverso dal “valore vero” atteso.

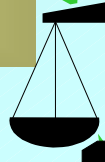
32

Le ragioni – il misurando

Il misurando



Il m



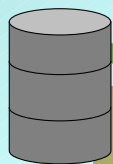
Lo strumento

- La conoscenza del misurando è molto spesso incompleta.
- Il modello matematico del misurando è molto spesso incompleto.
- Lo stato del misurando non è completamente noto
- Il processo di misura modifica lo stato del misurando

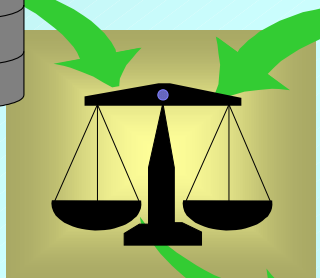
33

Le ragioni – lo strumento

Il misurando



Il metodo



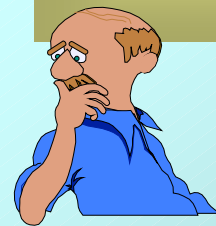
Lo strumento

- Il principio operativo impiegato differisce da quello ideale a causa di:
 - Componenti non ideali
 - Rumore generato internamente allo strumento stesso
 - Sensibilità alle condizioni ambientali
 - Taratura inadeguata
 - Età
 - ...

34

Le ragioni – il campione

- Il campione è solo una buona approssimazione dell'unità di misura, ma non è mai "ideale".
- Non fornisce il valore esatto dell'unità di misura, ma solo una sua approssimazione.

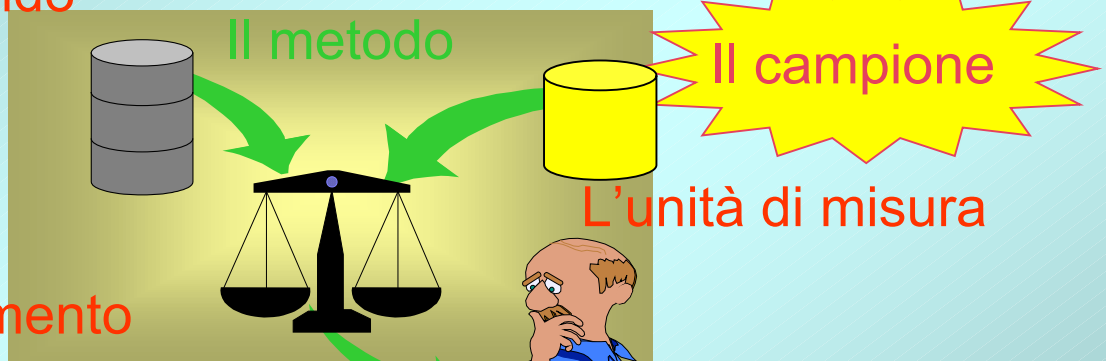


L'operatore

35

Le ragioni – il metodo

Il misurando



Lo strumento

- Il metodo di misura sfrutta, generalmente, un fenomeno fisico.
- Generalmente non considera altri fenomeni che possono interferire con il fenomeno utilizzato.

36

Le ragioni – l'operatore

- Le capacità e l'esperienza dell'operatore hanno un ruolo fondamentale nel processo di misura.
 - Esecuzione della misura al “momento giusto”
 - Valutazione della posizione di un indice su una scala graduata
 - Corretta interpretazione dei risultati di una misura
 - Elaborazioni corrette delle letture degli strumenti
 - ...



37

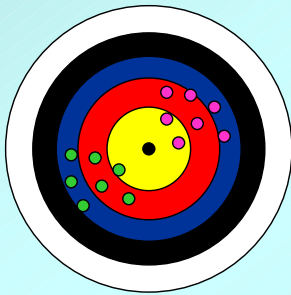
Le ragioni – il resto del mondo



38

Gli effetti

- Se il processo di misura è ripetuto un certo numero di volte, i risultati ottenuti sono sempre differenti, anche se le condizioni di misura non sono cambiate.



- Se il processo di misura è ripetuto da un altro operatore, riproducendo le stesse condizioni da qualche altra parte, con strumenti differenti, i risultati della misura sono differenti.

39

Le cause

- Cause di tipo *sistematico*
 - Se si ripete la misura agiscono sempre nello stesso modo e con lo stesso segno.
 - Una bilancia a bracci con i bracci di lunghezza diversa.
 - Se se ne suppone l'esistenza possono essere compensati
 - Metodo della doppia pesata nella bilancia a bracci.
- Cause di tipo *accidentale*
 - Se si ripete la misura agiscono in modo diverso e, in generale, casuale.
 - Vibrazioni trasmesse dal tavolo di appoggio alla bilancia.
 - Ripetendo più volte la misura e facendo la media dei risultati ottenuti tendono a compensarsi.

40

Un primo problema

- La prima conseguenza di quanto detto è che esprimere il risultato di una misura con un solo valore (e un'unità di misura) è privo di significato.
- Lo stesso numero sarebbe assai difficilmente ottenuto come risultato di un'altra.
- Il risultato della misura non potrebbe essere confrontato con i risultati di misure effettuate nelle stesse condizioni.
 - Otterrei sempre risultati diversi
- E' accettabile?

41

Gli scopi di un processo di misura

- Fini commerciali e legali
 - Quantificazione delle merci
 - Valutazione di costi
 - Valutazioni di qualità
- Fini tecnici
 - Test di ingresso sui componenti
 - Collaudi finali
 - Confronti
- Fini scientifici
 - Validazione sperimentale delle teorie
- Tutte queste applicazioni hanno bisogno di confrontare i risultati di misure.

42

Un vecchio concetto in disuso

- In un recente passato la "bontà" di una misura veniva "quantificata" attraverso il concetto di *errore*.
- Supponendo di dover misurare una grandezza x , si chiami x_m il valore misurato della grandezza, e x_v il "valore vero" che la grandezza x assume al momento della misura.
- Si definisce errore assoluto di misura di x la differenza:

$$E_x = x_m - x_v$$

e si definisce errore relativo il rapporto:

$$\epsilon_x = \frac{E_x}{x_v} = \frac{x_m - x_v}{x_v}$$

43

Perché in disuso?

- L'approccio in termini di errore si presta ad una critica concettuale insormontabile:

Come è possibile utilizzare nelle formule il valore vero, se questo è ignoto e non conoscibile attraverso un processo sperimentale di misura?

- Resta tuttavia un punto fermo:

Per quanto buono possa essere un processo di misura, resta sempre un'incertezza su quanto il risultato della misura sia in grado di approssimare il valore assunto dal misurando

44

Il concetto di incertezza

- Il concetto di **incertezza** è stato introdotto alla fine degli anni 80 come un **attributo quantificabile** del risultato della misura, capace di stabilire la **qualità** del processo di misura e del risultato.
- Questo concetto nasce dalla consapevolezza che “allorquando tutte le componenti di errore note o ipotizzate siano state valutate e le relative correzioni apportate, rimanga tuttavia un’incertezza sulla correttezza del risultato, vale a dire un dubbio su quanto bene questo rappresenti il valore della quantità misurata”

45

Requisiti generali - 1

- Il metodo per valutare ed esprimere l’incertezza del risultato di una misura deve essere **universale**
 - Il metodo deve essere applicabile ad ogni tipo di misura ed ad ogni tipo di dato in ingresso impiegato nelle misure.

46

Requisiti generali - 2

- La grandezza usata per esprimere l'incertezza deve essere:
 - **Internamente coerente**: deve cioè essere sia derivabile direttamente dalle componenti che vi contribuiscono, sia indipendentemente dal modo in cui queste componenti vengono raggruppate e dalla scomposizione delle componenti in sottocomponenti.
 - **Trasferibile**: l'incertezza valutata per un risultato deve essere direttamente utilizzabile come componente nella valutazione dell'incertezza del risultato di un'altra misura nella quale intervenga il primo risultato.

47

Requisiti generali - 3

- Il metodo per valutare ed esprimere l'incertezza del risultato di una misura deve essere in grado di fornire un **intervallo di confidenza**
 - E' un intervallo attorno al risultato della misura entro il quale ci si possa aspettare che cada una gran parte dei valori ragionevolmente ascrivibili alla grandezza oggetto della misurazione, con un dato **livello di confidenza**

48

La Guida ISO

- Nel 1992, la International Organization for Standardization (ISO) ha dato una meditata risposta a queste esigenze emanando la **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**
 - Tale Guida è stata recentemente adottata dalle Norme emesse da diversi Istituti Nazionali di Normativa : UNI-CEI, DIN, AFNOR
- Per la prima volta il concetto di **incertezza**, proposto dall'ISO/IEC/OIML/BIPM *International vocabulary of basic and general terms in metrology* (VIM) nel 1984 è stato incluso in un documento ufficiale.

49

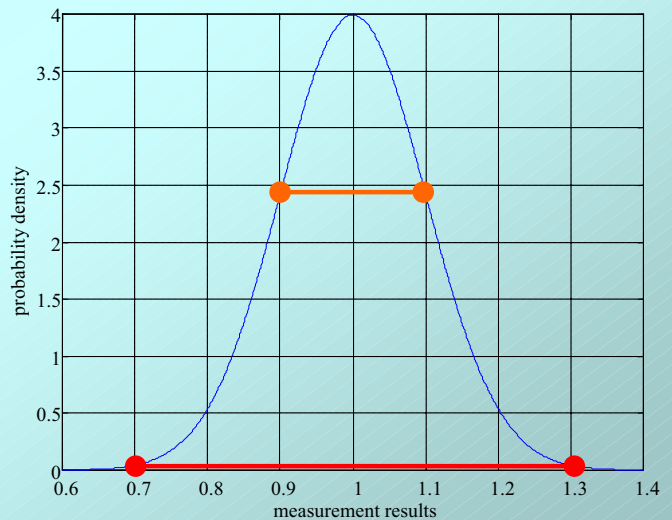
Incerteza: quale significato?

- E' un parametro, associato al risultato della misura, che caratterizza la dispersione dei valori che possono essere **ragionevolmente** attribuiti al misurando.
- L'avverbio *ragionevolmente* è la chiave di volta di questa definizione
 - Attribuisce all'operatore un grande *potere discrezionale*
 - Ma non lo esenta dal seguire alcune regole fondamentali che possono essere trovate nello *stato dell'arte* della scienza delle misure

50

Come determinarla? - 1

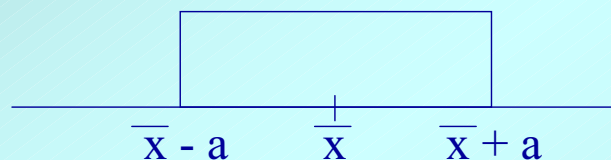
- Può essere uno scarto tipo, o un suo dato multiplo.
- Si supponga che i risultati di una misura si distribuiscano secondo una distribuzione normale
- L'incertezza può essere espressa da σ
 - C'è solo il 68.3% di probabilità che il risultato di una misura cada nell'intervallo $\bar{x}-\sigma, \bar{x}+\sigma$
- L'incertezza può essere espressa da 3σ
 - La probabilità sale al 99.7%!



51

Come determinarla? - 2

- Può essere l'ampiezza di un intervallo di confidenza



- E' spesso impiegata per specificare l'incertezza di uno strumento
 - L'ampiezza a dell'intervallo di confidenza è data da:
 $a = x\%$ della lettura + $y\%$ del fondo scala

52