

Laboratorio e misure

XVI Scuola estiva di Fisica
Dipartimento di Matematica e Fisica Ennio De Giorgi
7 - 11 settembre 2026


Dipartimento di Matematica e Fisica
"Ennio De Giorgi"

**Punta in alto con la
FISICA!**







Contatti
luigi.martina@unisalento.it
aif.salento@aif-fisica.org


**UNIVERSITÀ
DEL SALENTO**
L'Università dei due mari



**scarica il
programma**


AIF
Sezione Salento


**patto
territoriale**
SISTEMA UNIVERSITARIO PUGLIESE

Maria Luisa De Giorgi
Andrea Ventura

marialuisa.degiorgi@unisalento.it
andrea.ventura@unisalento.it

9 settembre 2026

La fisica e la misura: il metodo scientifico

La metodologia utilizzata in Fisica può essere schematizzata nelle seguenti fasi:

- Si individua il fenomeno.
- Il fenomeno è **descritto da alcune sue caratteristiche**, dette grandezze fisiche, **valutate quantitativamente** per mezzo di *operazioni di misura (o misurazioni)*.
- Le misure effettuate forniscono le informazioni attraverso le quali **si determina il modo in cui ogni grandezza è legata alle altre nell'ambito di quel fenomeno**.
- È quindi possibile **formulare le leggi che governano il fenomeno** osservato oppure effettuare un confronto tra eventuali previsioni teoriche e i dati sperimentali.

Misurazione

Alla base del **Metodo Sperimentale** c'è la definizione di grandezza

Si definisce **grandezza fisica** di un sistema fisico una sua caratteristica (ad esempio lunghezza, massa, velocità ...) sulla quale possa essere eseguita **un'operazione di misura** mediante una **ben definita procedura sperimentale**

La **misura** è l'operazione che assegna in modo **oggettivo e riproducibile** un certo valore alla grandezza, mediante l'uso di strumenti e tramite metodi pratici ed analitici.

Il processo di misurazione è alla base di ogni scienza sperimentale.

La misura è **diretta (o relativa)** se eseguita per confronto con un campione (**unità di misura**)

*Il confronto è **simultaneo** quando il sistema fisico di cui si misura la grandezza e il campione unitario sono entrambi presenti all'atto della misura (ad es. la misura di una lunghezza per confronto con un regolo graduato o di una massa per confronto con le masse campioni di una pesiera).*

*Il confronto è **differito** quando avviene per mezzo di uno strumento di misura tarato (ad es. un termometro).*

Una grandezza fisica è misurata **indirettamente (misura assoluta)** se può essere definita e misurata tramite altre grandezze

Esempio: la misura della velocità richiede misure dirette di distanze e tempi

Misura di una grandezza fisica

The diagram shows the equation $G = g \{G\}$ enclosed in a red rectangular box. Three red arrows point from descriptive text to parts of the equation: one from the left to the box, one from the top to the variable g , and one from the bottom right to the set notation $\{G\}$.

misura
della
grandezza
in esame

valore numerico della misura

$G = g \{G\}$

unità di misura

La misura è ***oggettiva***, cioè indipendente da
osservatore, momento e luogo.

Importanza delle incertezze nelle misure fisiche

In fisica non ci accontentiamo di dire quanto vale una grandezza, ma vogliamo anche sapere **quanto ci possiamo fidare del risultato**. Per questo ci affidiamo alla **teoria degli errori**.

La **teoria degli errori** si occupa dello studio delle incertezze nelle misurazioni di laboratorio ed è uno **strumento fondamentale per ogni scienziato**.

Il termine “**errore**” non va inteso come **sbaglio o equivoco**, ma come l’indeterminazione da associare a una misura.

**Nessuna grandezza fisica può essere
misurata con completa certezza**

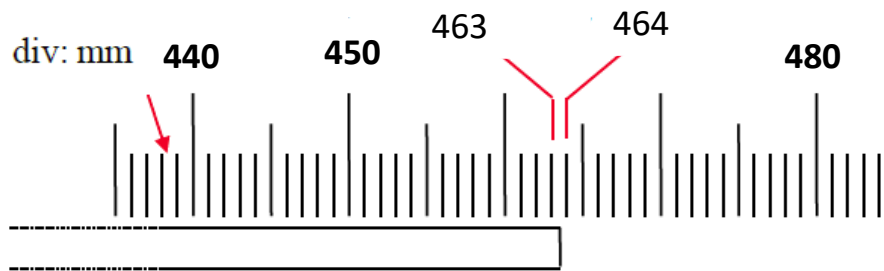
Importanza delle incertezze nelle misure fisiche

Poiché non è possibile eliminare completamente tutte le fonti di incertezza, il concetto di **valore vero** di una grandezza — inteso come risultato di una misura ideale priva di errori — perde significato.

Per questo motivo, affinché una misura abbia senso, è necessario indicare non solo la migliore **stima del valore vero**, **ma anche l'incertezza che presumibilmente la accompagna.**

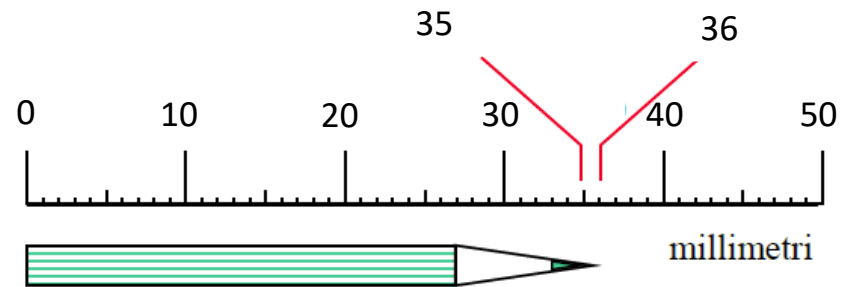
Misure e incertezze

Per alcune semplici misure è facile fare una stima ragionevole dell'incertezza usando poco più del **buon senso**.



$$463 \text{ mm} \leq l \leq 464 \text{ mm}$$

$$l = (463.5 \pm 0.5) \text{ mm}$$



$$35 \text{ mm} \leq l \leq 36 \text{ mm}$$

$$l = (35.5 \pm 0.5) \text{ mm}$$

Analogamente se vogliamo effettuare una misura con il termometro clinico allora dalla lettura sulla scala risulta

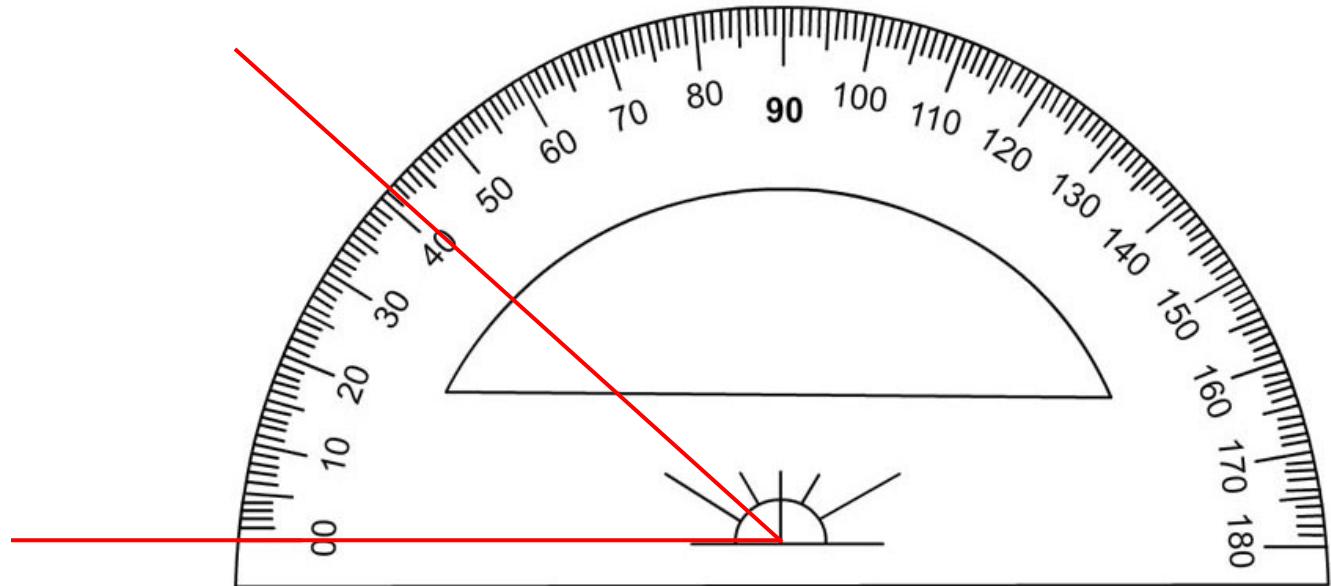
$$36.6^{\circ} C < x < 36.7^{\circ} C$$

Siamo cioè in grado di apprezzare mezzo decimo di grado e il risultato della misura si scrive è

$$T = (36.65 \pm 0.05)^{\circ} C$$



Ancora supponiamo di voler misurare l'ampiezza di un angolo con il goniometro in figura.



Con questo strumento si può apprezzare mezzo grado

$$41^{\circ} < \alpha < 42^{\circ}$$

e il risultato di una tipica misura si scrive

$$\alpha = (41.5 \pm 0.5)^{\circ}$$



$$T = (30.3 \pm 0.1)^{\circ} C$$

$$V = (12.3 \pm 0.1)V$$



$$I = (2.80 \pm 0.01)A$$

Rappresentazione di una misura

Il risultato di una misura ha due componenti essenziali:

- ❑ un **valore numerico** (in un dato sistema di unità) che rappresenta **la migliore stima possibile** del valore vero della grandezza misurata,
- ❑ una **incertezza** associata al valore stimato (espressa con le stesse unità di misura della grandezza fisica a cui è associato).

Il risultato di una misura sarà espresso nella maniera seguente:

Valore misurato = stima $\pm$ incertezza

$$G = M(G) \pm \Delta G$$

Quest'affermazione significa che:

- la migliore stima della quantità misurata è $M(G)$;
- lo sperimentatore è confidente che la grandezza abbia un valore compreso tra

$$M(G) - \Delta G$$

e

$$M(G) + \Delta G$$

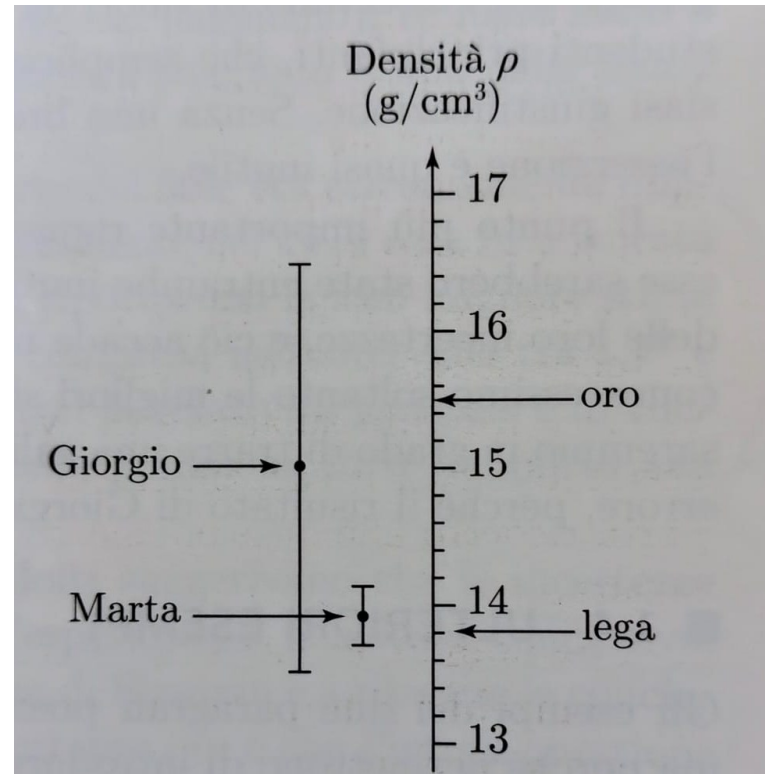
L'importanza di conoscere le incertezze

$$\rho_{oro} = 15.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{lega} = 13.8 \text{ g/cm}^3$$

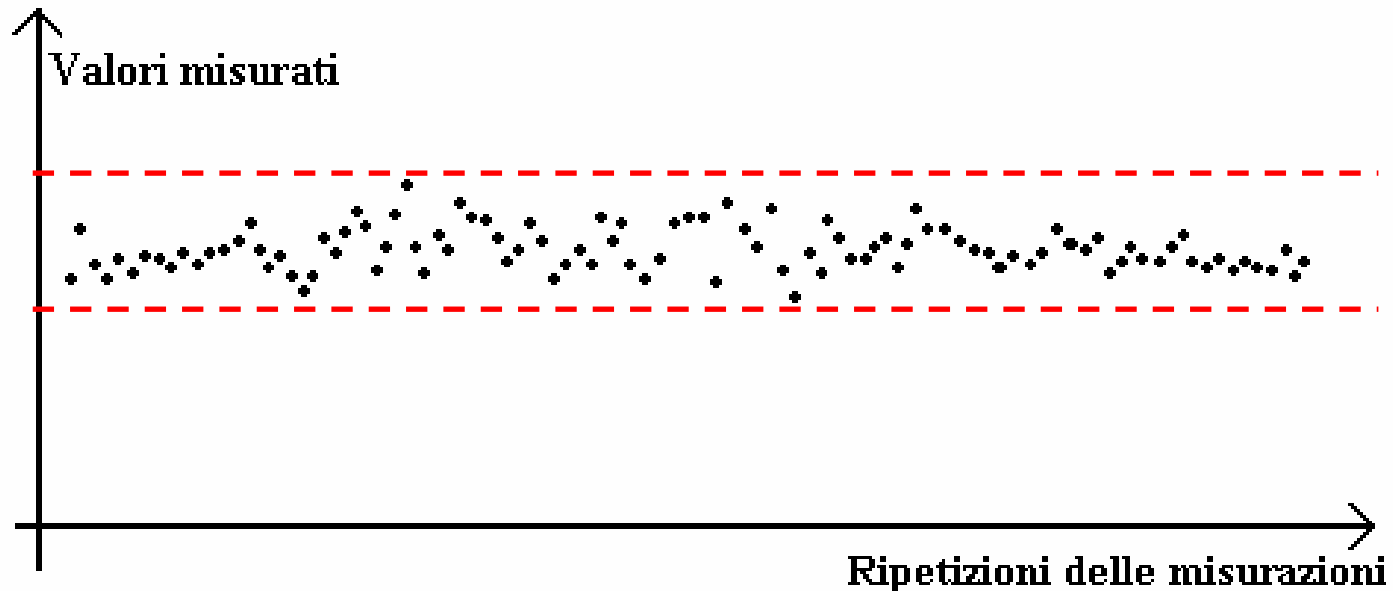
$$\rho_{Giorgio} = (13.5 - 16.5) \text{ g/cm}^3$$

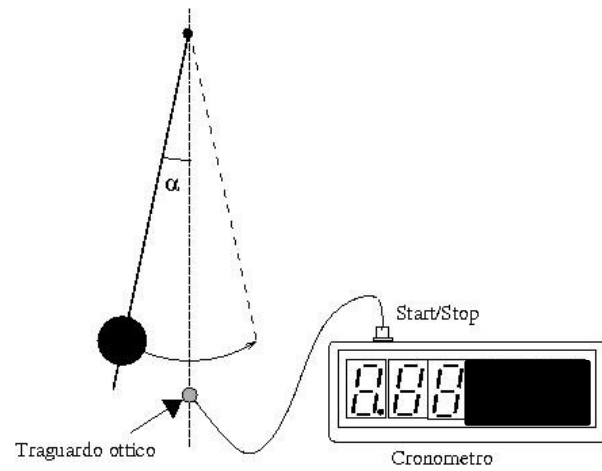
$$\rho_{Marta} = (13.7 - 14.1) \text{ g/cm}^3$$



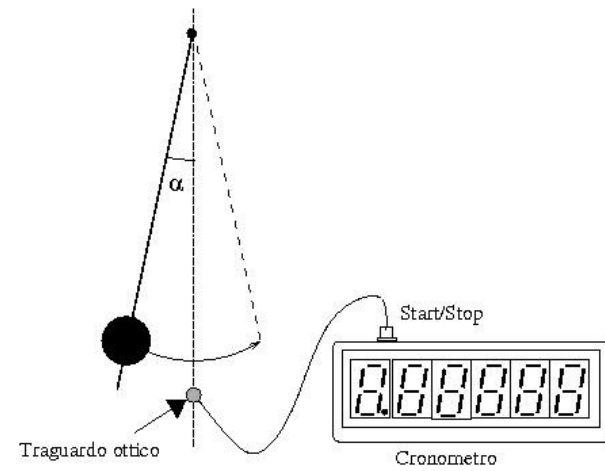
Stima delle incertezze nelle misure ripetute

Molte misure però implicano incertezze che sono molto più difficili da stimare di quelle legate alla lettura su una scala graduata o su un display.





i	Ti (s)
1	1.52
2	1.52
3	1.52
4	1.52
5	1.52
6	1.52
7	1.52
8	1.52
9	1.52
10	1.52

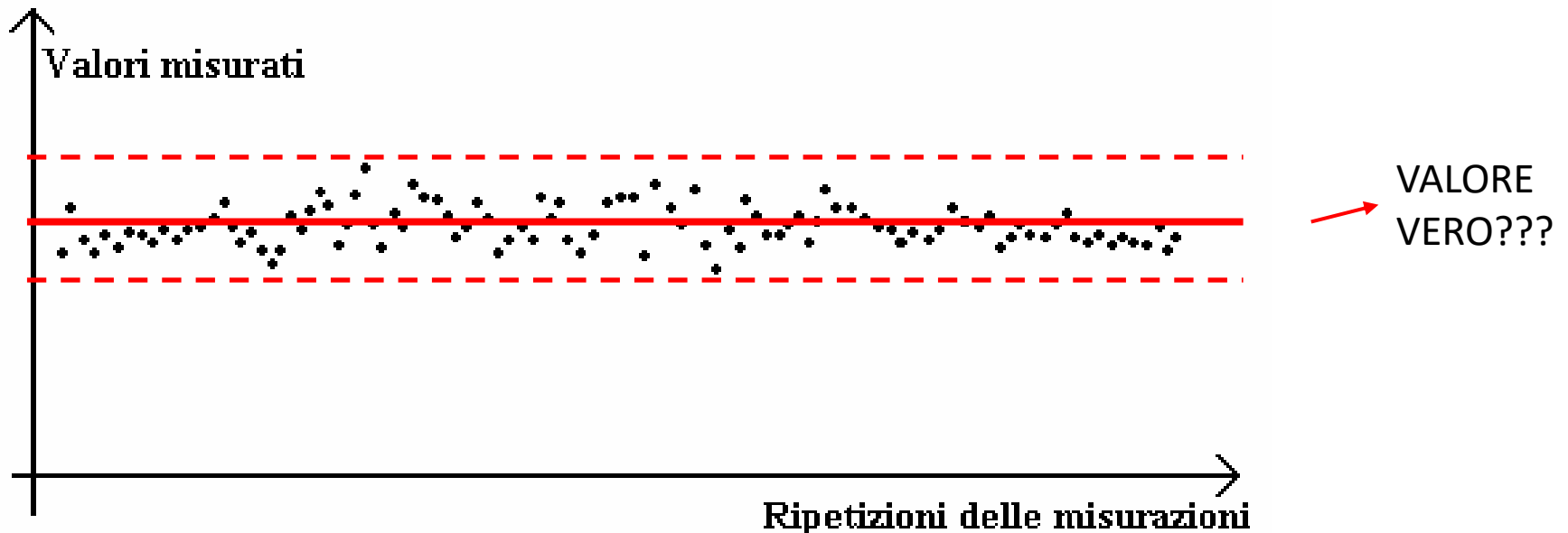


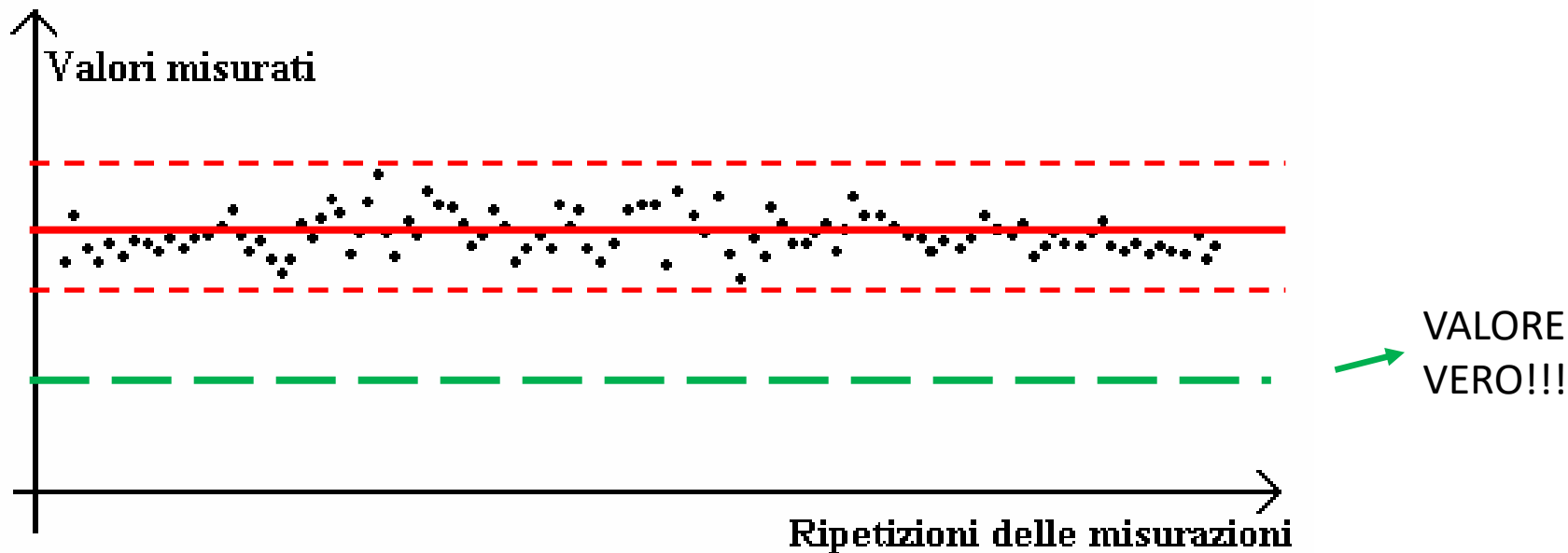
i	Ti (s)
1	1.52631
2	1.52608
3	1.52596
4	1.52595
5	1.52628
6	1.52594
7	1.52592
8	1.52641
9	1.52596
10	1.52611

Stima delle incertezze nelle misure ripetute

Maggiore è il numero di misurazioni eseguite, **maggiore è il grado di fiducia che si può porre nell'ipotesi che il valore del misurando (ossia la misura) sia contenuto all'interno di questa fascia di valori** e che le misure fluttuino attorno ad un certo valore.

TUTTAVIA.... Non è detto che il valore attorno a cui fluttuano sia quello vero!



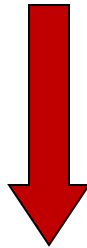


Tradizionalmente si classificano le componenti dell'errore come

- Errori casuali (random errors)
- Errori sistematici (systematic errors)

Gli errori sistematici

Sono errori che alterano la misura sistematicamente in eccesso o in difetto

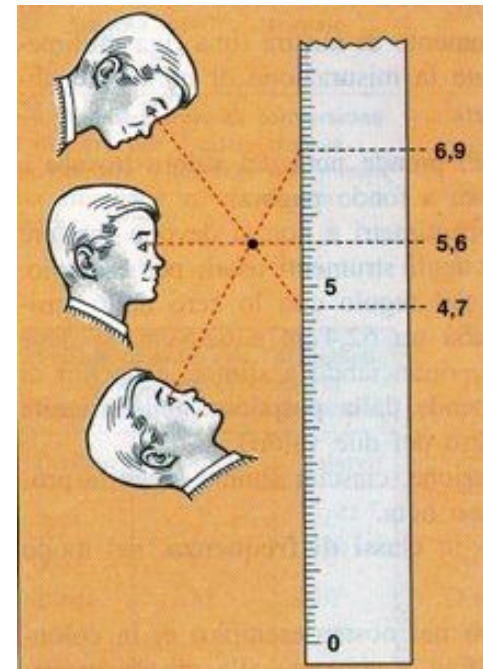
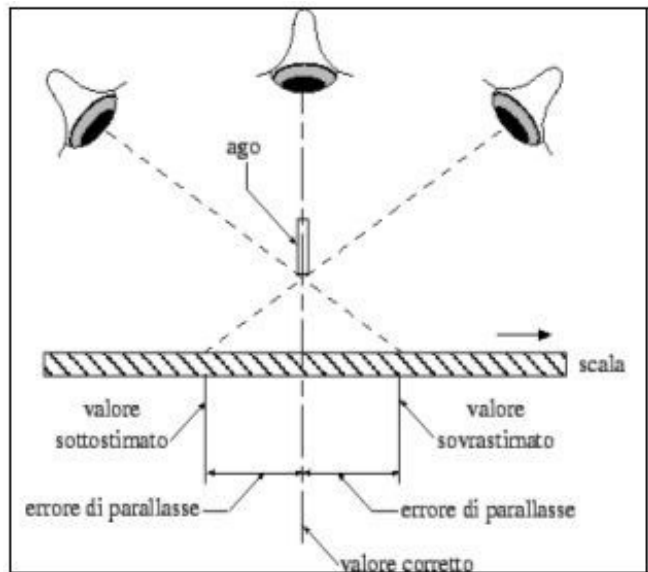


non sono rilevati mediante la ripetizione delle misure, ma confrontando risultati di misure eseguite con strumenti o procedure diverse

Gli errori sistematici

Difetti dello strumento (in uno strumento starato non esiste accordo tra il “valore vero” della grandezza e la risposta dello strumento)

Interazione strumento-sperimentatore (nell'errore di parallasse l'errore è dovuto ad una sbagliata angolazione dello sperimentatore rispetto alla scala dello strumento)



Gli errori casuali

Ripetendo più volte una stessa misura nelle medesime condizioni sperimentali, i risultati possono fluttuare per l'influenza di cause sconosciute allo sperimentatore oppure note ma che producono effetti che sfuggono al suo controllo.

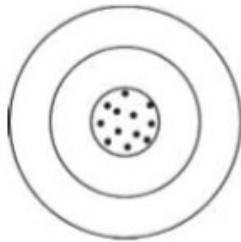
Gli errori casuali possono avvenire con uguale probabilità sia in difetto che in eccesso rispetto al valore vero



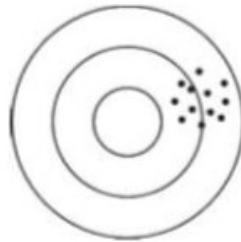
sono rilevati mediante la ripetizione delle misure e sono spiegati con l'impossibilità di riprodurre esattamente le stesse condizioni sperimentali

Osservazione: se si adopera per la misura uno strumento di scarsa sensibilità, i valori delle misure ripetute coincidono

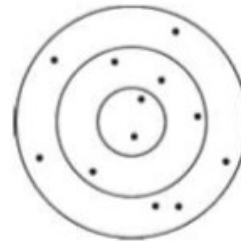
Errori casuali e sistematici - precisione ed accuratezza



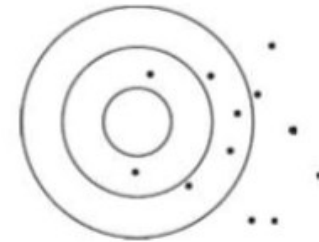
Casuali: piccoli
Sistematici: piccoli



Casuali: piccoli
Sistematici: grandi

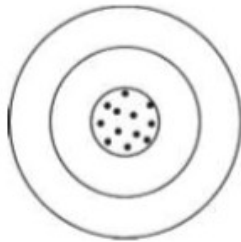


Casuali: grandi
Sistematici: piccoli



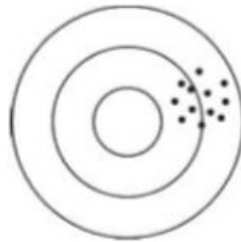
Casuali: grandi
Sistematici: grandi

Errori casuali e sistematici - precisione ed accuratezza



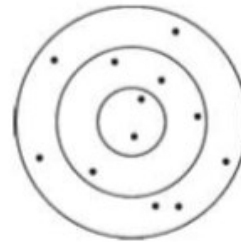
Casuali: piccoli
Sistematici: piccoli

*Misure
precise e
accurate*



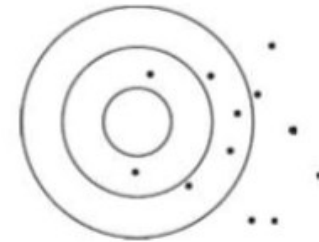
Casuali: piccoli
Sistematici: grandi

*Misure
precise ma
poco accurate*



Casuali: grandi
Sistematici: piccoli

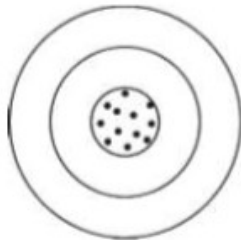
*Misure
poco precise
ma accurate*



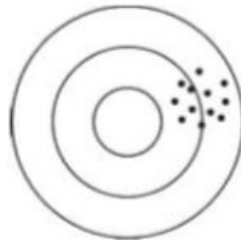
Casuali: grandi
Sistematici: grandi

*Misure
poco precise e
poco accurate*

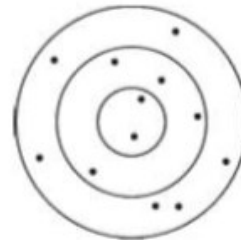
Errori casuali e sistematici - precisione ed accuratezza



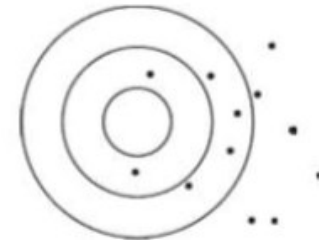
Casuali: piccoli
Sistematici: piccoli



Casuali: piccoli
Sistematici: grandi



Casuali: grandi
Sistematici: piccoli



Casuali: grandi
Sistematici: grandi



Casuali: piccoli
Sistematici: ?



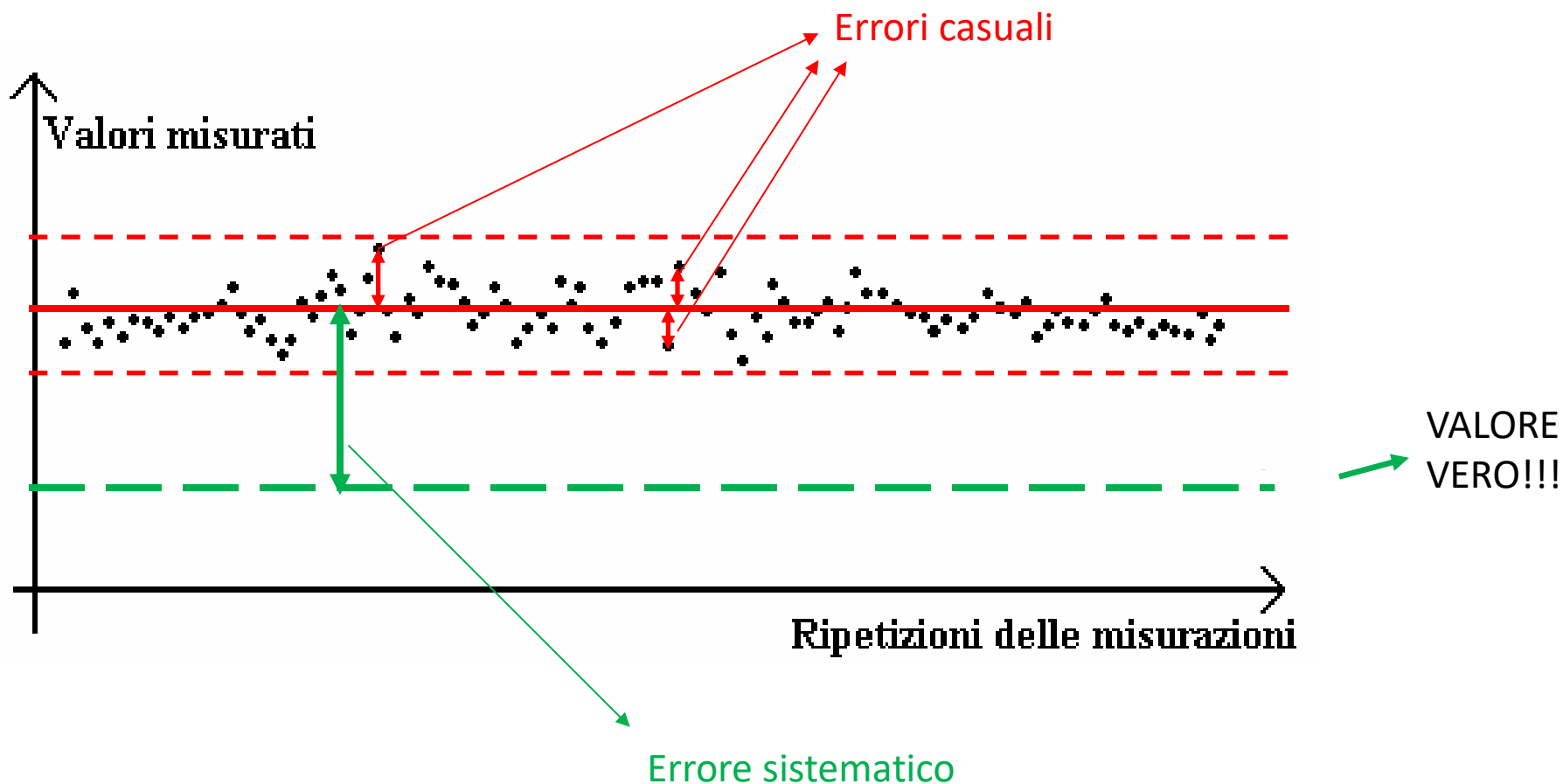
Casuali: piccoli
Sistematici: ?



Casuali: grandi
Sistematici: ?



Casuali: grandi
Sistematici: ?



In una buona misura ci si aspetta
errore sistematico << errore casuale

Come si affronta allora un errore sistematico?

La strategia è **individuare la causa e correggerla**, oppure stimarne l'effetto.

E per gli errore casuali?

non possiamo prevedere il singolo scostamento, ma possiamo **caratterizzarne statisticamente l'effetto**.

A differenza degli errori sistematici, gli errori casuali sono inevitabili e non eliminabili, ma trattabili in quanto il loro contributo può essere quantificato mediante l'analisi statistica dei risultati.

L'analisi statistica e l'introduzione delle distribuzioni di probabilità **non devono essere considerate come un nuovo pezzo di matematica**, ma come la risposta naturale alla domanda:

“Se ripeto una misura molte volte, perché non ottengo sempre lo stesso risultato?”

Dal risultato alla distribuzione di probabilità

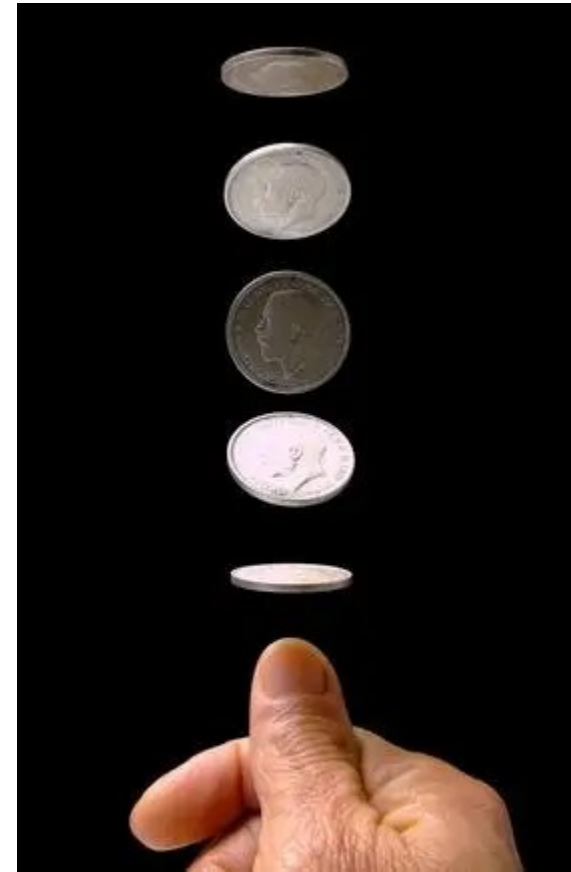
Lancio una moneta 100 volte:
quante volte uscirà testa?

La risposta spontanea è: **50**.
Ma usciranno davvero esattamente 50 teste?

No. Potrebbero essere 47, 52, 56...

Non posso prevedere il singolo risultato, ma posso descrivere la distribuzione dei risultati.

👉 **Distribuzione di probabilità:** strumento per descrivere la probabilità dei diversi risultati che possiamo ottenere ripetendo un esperimento.



Se misuro più volte la stessa grandezza, ottengo sempre lo stesso risultato?

Immaginiamo per esempio che un osservatore **A** abbia misurato il periodo di oscillazione di un pendolo con un cronometro sensibile ad apprezzare 0.01 s e che abbia ripetuto la stessa misura 10 volte.

I risultati (in s) ottenuti sono riportati di seguito

$$x_i = 1.51, 1.50, 1.51, 1.53, 1.51, 1.50, 1.50, 1.51, 1.52, 1.52$$

In generale

N misure della stessa grandezza fisica $\rightarrow$ N risultati diversi

$$x_1, x_2, x_3, \dots x_N$$

La ripetizione della misura evidenzia una **variabilità dei risultati**.

E' necessario trovare dei criteri per:

- Esprimere il valore più rappresentativo della grandezza (la migliore stima)
- Valutare l'indeterminazione associata
- Dare una rappresentazione grafica espressiva della serie di misure (campione di dati)

Frequenze assolute

Riprendiamo i dati:

1.51, 1.50, 1.51, 1.53, 1.51, 1.50, 1.50, 1.51, 1.52, 1.52

Si può osservare che alcuni valori si presentano più di una volta. Pertanto il campione delle 10 misure può essere organizzato in modo più conveniente in una tabella in cui si riporta il numero di volte che lo stesso valore si presenta in una serie di misure. Questa quantità è detta frequenza assoluta (F_i).

Dati x_i (s)	Frequenza assoluta, F_i
1.50	3
1.51	4
1.52	2
1.53	1

Dati x_i (s)	Frequenza assoluta, F_i
1.50	3
1.51	4
1.52	2
1.53	1

Rappresentiamo graficamente i dati in un diagramma riportando in ascissa i valori dei dati ed in ordinate le corrispondenti frequenze assolute.

Nel diagramma le barre verticali hanno lunghezza proporzionale alla frequenza assoluta.

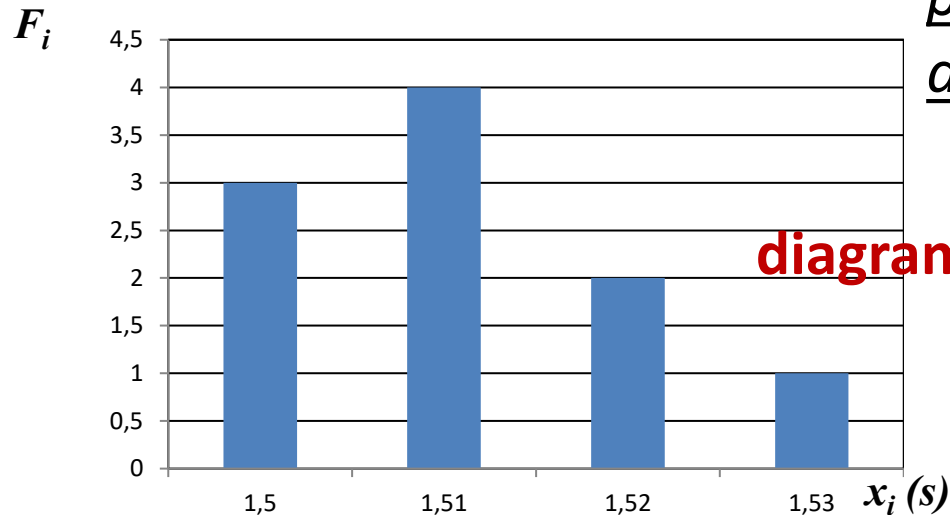


diagramma a barre

Si assume che il valore più rappresentativo della grandezza X sia la **media aritmetica** delle misure, definita come

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Ovvero il valore attorno al quale i risultati delle misure si distribuiscono simmetricamente a causa degli errori casuali (fluttuazioni)

Incertezze

Per valutare l'incertezza associata si determina il campo di variazione (intervallo in cui varia il valore della grandezza) delle misure, detto anche intervallo di dispersione, e che è rappresentato tra la differenza fra il valore massimo, x_{max} , ed il valore minimo, x_{min} .

L'incertezza, Δx , è data da

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

detta semidispersione massima.

In questo caso si presume che, ripetendo ulteriormente la misura, il risultato cada nell'intervallo di estremi $(\bar{x} - \Delta x)$ e $(\bar{x} + \Delta x)$.

Quando si dispone di numerose misure di una grandezza, la semidispersione massima sarebbe una valutazione troppo pessimistica dell'errore

Nell'esempio considerato
con $N=10$:

Dati x_i (s)	F. assoluta, F_i
1.50	3
1.51	4
1.52	2
1.53	1

$$x_{\min}=1.50 \text{ s}$$

$$x_{\max}=1.53 \text{ s}$$

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} = \frac{1.53 - 1.50}{2} = \frac{0.03}{2} = 0.015$$

essendo

$$\bar{x} = 1.511 \text{ s}$$



$$x = (1.511 \pm 0.015) \text{ s}$$

La valutazione dell'errore tramite la semidispersione massima si usa solitamente per un campione con N piccolo, ($N=10$, o anche per N minori).

Istogrammi

Supponiamo di considerare un campione di $N=30$ misure di tempo in un esperimento con il solito cronometro con errore di sensibilità pari a 0.01 s .

I valori (in s) ordinati per comodità in ordine crescente sono:

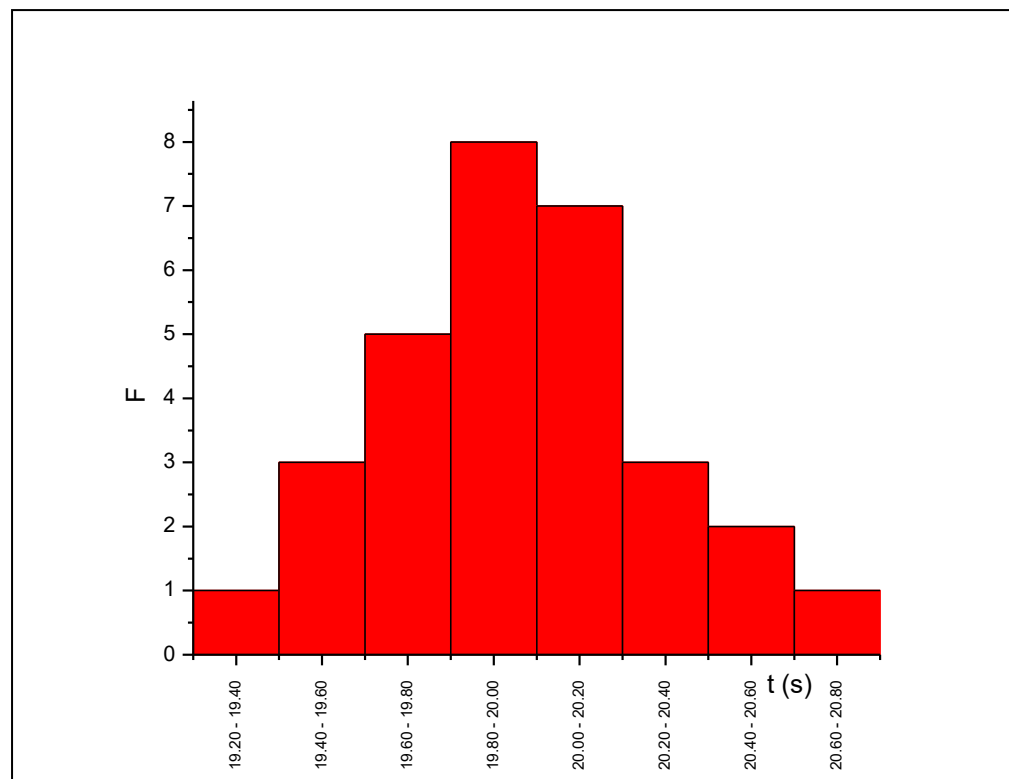
$$x_i = 19.35, 19.40, 19.48, 19.49, 19.60, 19.67, 19.70, 19.70, 19.75, 19.80, \\ 19.83, 19.85, 19.87, 19.88, 19.89, 19.94, 19.95, 20.00, 20.04, 20.05, \\ 20.07, 20.08, 20.13, 20.18, 20.20, 20.25, 20.28, 20.40, 20.52, 20.64$$

Si può osservare che non esistono valori che si ripetono più volte; pertanto non ha senso costruire un diagramma a barre.

Si divide l'intervallo di dispersione in intervalli (**classi o bin**) e si determina il numero di misure che cadono nella classe j -esima, ovvero la frequenza assoluta, F_j e si riportano con le frequenze corrispondenti in una tabella.

I dati in tabella si possono rappresentare graficamente riportando sull'asse delle ascisse le classi individuate e costruendo dei rettangoli aventi le basi di ampiezza pari all'intervallo della classe e di altezza proporzionale alla frequenza assoluta. Tale diagramma è detto **istogramma**.

Classe, j	Intervalli (s)	F. assoluta, F_j
1	19.20 - 19.40	1
2	19.40 - 19.60	3
3	19.60 - 19.80	5
4	19.80 - 20.00	8
5	20.00 - 20.20	7
6	20.20 - 20.40	3
7	20.40 - 20.60	2
8	20.60 - 20.80	1



L'istogramma ci racconta quanto è probabile ottenere ciascun valore.

Che cos'è una distribuzione di probabilità?

La distribuzione di probabilità non è un concetto astratto:

è un modo matematico per descrivere come **si distribuiscono i possibili risultati di un esperimento, quanto è probabile ottenere ciascun risultato** e risponde alle domande:

Quali valori possiamo ottenere? E con quale frequenza?

Può essere descritta matematicamente attraverso una **funzione**.

Non tutti gli esperimenti producono lo stesso tipo di distribuzione

Per esempio:

- lancio un dado $\rightarrow$ posso avere solo 1, 2, 3, 4, 5, 6;
- conto quante automobili passano davanti alla scuola in un minuto $\rightarrow$ posso avere 0, 1, 2, 3, ...;
- conto quanti decadimenti radioattivi registro in 10 secondi $\rightarrow$ posso avere 0, 1, 2, 3, ...
- misuro una lunghezza $\rightarrow$ posso avere valori continui

Distribuzioni discrete e continue

Due situazioni molto diverse:

Dado / conteggio di eventi

0,1,2,3, ...

→ variabile **discreta**

Lunghezza / temperatura / tempo

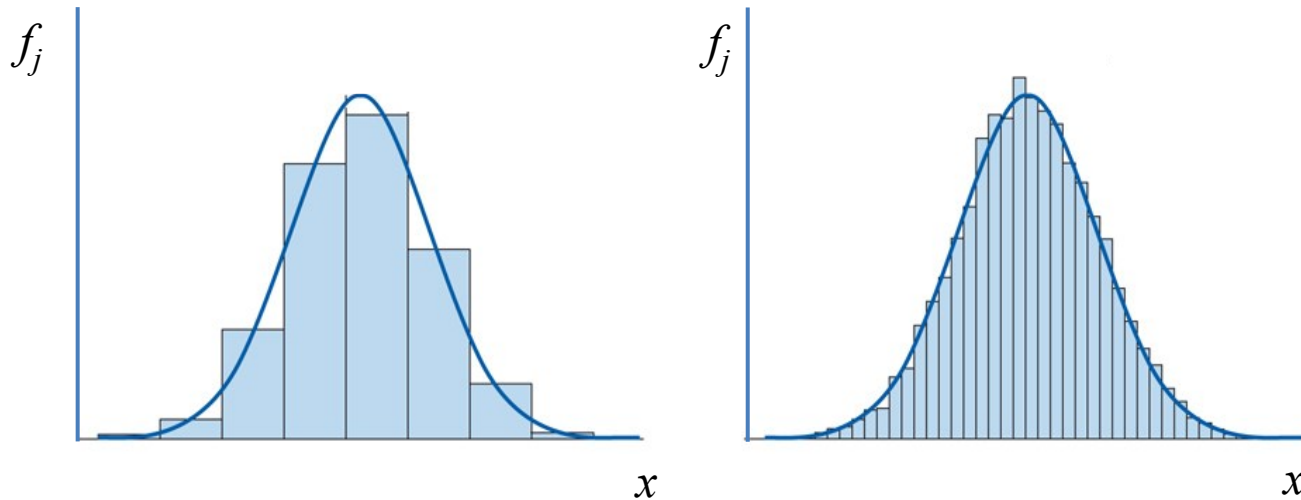
10,01; 10,02; 10,03; ...

→ variabile **continua**

fenomeni diversi possono avere distribuzioni diverse

Misure di grandezze fisiche

Al crescere del numero di misure l'istogramma assume una forma semplice bene definita, sempre più regolare a campana e simmetrica



Distribuzione normale o di Gauss

La distribuzione che descrive il risultato di misure sperimentali nel caso di N grande, in cui le N misure sono indipendenti (*il risultato di una misura non è influenzato dalla precedente*) e soggette a molte piccole sorgenti di errori casuali (tutte dello stesso ordine di grandezza, stessa entità) e supponendo che gli errori sistematici siano trascurabili è la distribuzione normale o di Gauss

La migliore stima è la media aritmetica (valore che rappresenta il centro della distribuzione)

Ma la media non ci dice quanto sono disperse le misure.

Scarto

Una valutazione meno grossolana, rispetto alla determinazione della semidispersione massima, potrebbe essere fatta elaborando gli scarti.

- Si definisce *scarto della i-esima misura* la quantità

$$\xi_i = x_i - \bar{x}$$

Esso dà un'indicazione dello scostamento, dovuto alle fluttuazioni casuali, della singola misura dal valor medio.

Deviazione standard

La valutazione più opportuna dell'errore casuale è data dallo scarto quadratico medio o deviazione standard, σ (che ha un importante significato probabilistico).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Ovvero è la radice quadrata della media dei quadrati degli scarti.

Distribuzione normale o di Gauss

$$f_{\bar{x},\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$



dipende da due parametri

$\bar{x}$



valor medio

σ



deviazione standard



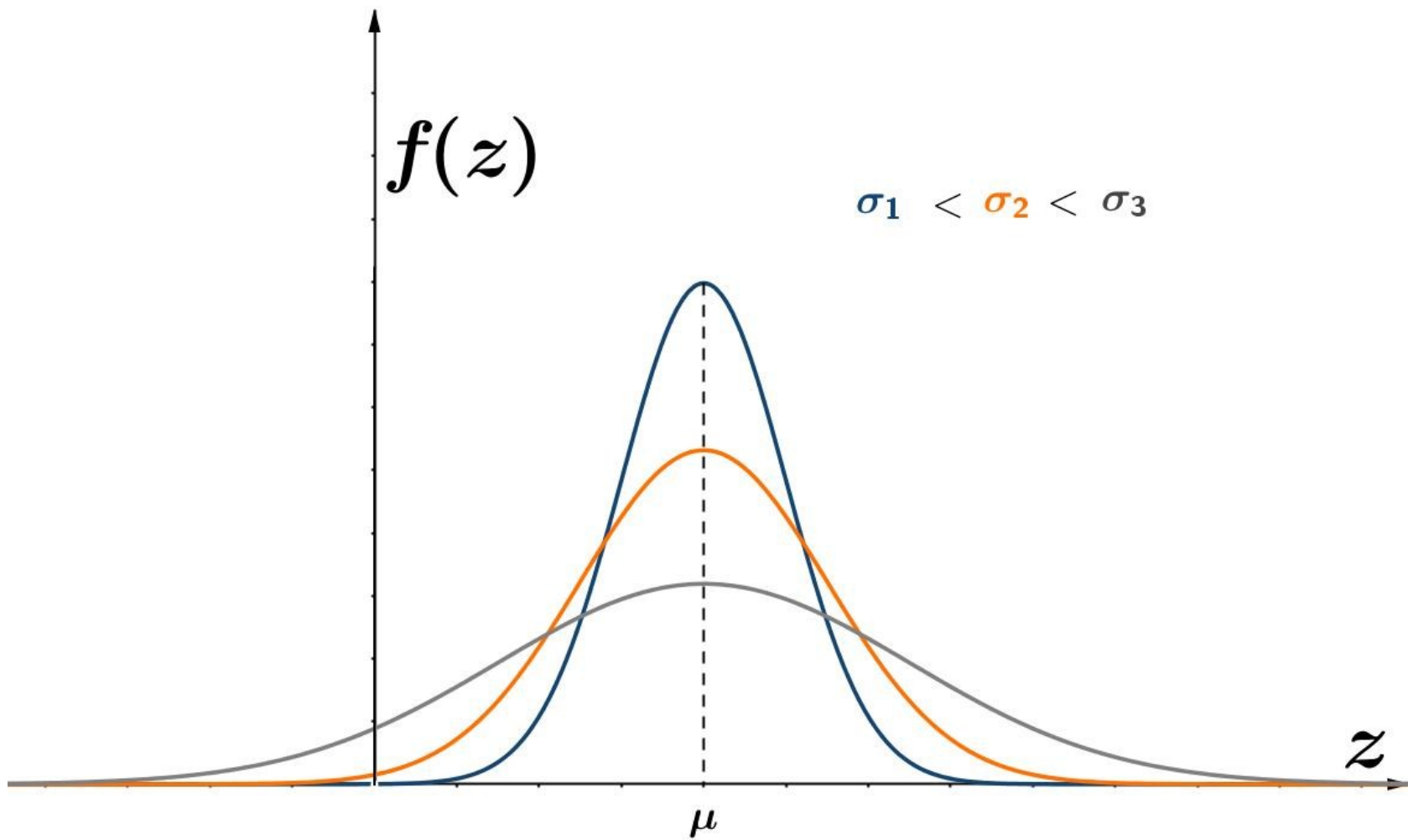
ha il massimo per $x = \bar{x}$

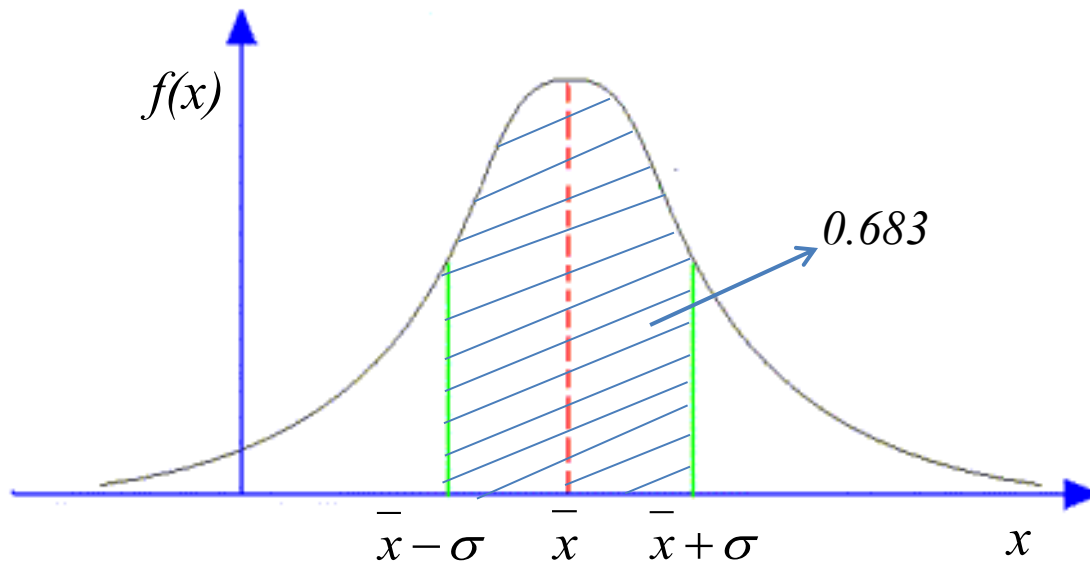


ha due flessi per $x = \bar{x} \pm \sigma$



tende a zero per $x \rightarrow \pm \infty$





$$\int_{\bar{x}-\sigma}^{\bar{x}+\sigma} f_{\bar{x},\sigma}(x) dx = 0.683$$

Si può dimostrare che per una distribuzione gaussiana circa il **68.3 %** delle misure cadono nell'area tratteggiata, ovvero disteranno in valore assoluto meno di σ dal valor medio VERO (migliore stima del valor vero).

ovvero che effettuando una misura, esiste una probabilità di circa il **68.3 %** che abbia un valore compreso nell'intervallo

$$(\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma)$$

Analogamente si trova che il **95.4%** di misure cadono nell'intervallo $(\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma)$

e il **99.7%** nell'intervallo $(\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma)$

ovvero che effettuando una misura, esiste una probabilità di circa

95.4% che abbia un valore compreso nell'intervallo $(\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma)$

99.7% che abbia un valore compreso nell'intervallo $(\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma)$

Dalla misura all'incertezza

- **RIPETERE UNA MISURA** → produce, in generale, **risultati differenti**
- **DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ** → descrive quantitativamente la variabilità dei risultati
- **MEDIA** → caratterizza il **valore centrale**
- **DEVIAZIONE STANDARD** → quantifica la **dispersione dei risultati**

**Incerteza di misura quantifica variabilità dei risultati
che possono essere ottenuti.**