

Fisica Generale I

*Misure di grandezze fisiche
e incertezze di misura*

Lezione 4

Facoltà di Ingegneria

Livio Lanceri



Indice

*Abbiamo imparato sulle misure **dirette** ripetute...*

- Media e deviazione standard
- Deviazione standard della media

*Passiamo ora all'interpretazione dei risultati in termini **probabilistici** (prossima lezione)*

- Probabilità e distribuzione di probabilità
- La distribuzione normale (Gauss)
- Intervalli di confidenza

*... e alle misure **indirette** ripetute*

- "propagazione" degli errori riveduta e corretta



Probabilità

Probabilità "matematica"

Insieme degli "eventi" (possibili risultati di un esperimento): $S = \{E_1, E_2, E_3, \dots\}$

Eventi "mutuamente esclusivi": se non possono verificarsi simultaneamente.

$P(E)$: numero reale che soddisfa gli "assiomi della probabilità", da cui tutte le altre proprietà possono essere derivate:

$$(I) \quad P(E) \geq 0$$

$$(II) \quad P(E_1 \vee E_2) = P(E_1) + P(E_2) \quad \text{se } E_1 \text{ e } E_2 \text{ mutuamente esclusivi}$$

$$(III) \quad \sum P(E_i) = 1 \quad \text{se la somma è estesa a tutti gli eventi mutuamente esclusivi}$$

Probabilità "empirica"

Un esperimento viene ripetuto N volte

Un certo evento A si verifica M volte

$$\frac{M}{N} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} P(A)$$

(ci sono alcune difficoltà logiche connesse con la ripetibilità dell'esperimento, che hanno suggerito approcci alternativi, p.es. "probabilità soggettiva" Bayesiana)



Densita` di probabilita` - 1

Istogramma "a barre"

Lunghezza delle barre: rappresentativa del numero n_k di eventi nel "bin" k

"bin" $k (k = 1, \dots, n_B) \rightarrow x_k, \Delta_k, n_k$

$$(x_{k+1} = x_k + \Delta_k)$$

Istogramma "a rettangoli"

Area dei rettangoli: rappresentativa della frazione $F_k = n_k/N$ di eventi nel bin k

"bin" $k (k = 1, \dots, n_B) \rightarrow x_k, \Delta_k, f_k$

$$(\text{area})_k = f_k \Delta_k \equiv F_k \equiv \frac{n_k}{N}$$

$$(\text{base})_k = \Delta_k \quad (\text{altezza})_k = f_k = \frac{F_k}{\Delta_k} = \frac{n_k}{N \Delta_k}$$

f_k : "densita` di probabilita`"

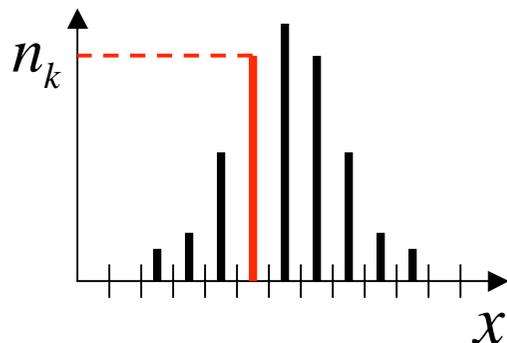
k	x_k	n_k	F_k	f_k
1	171	0	0	0
2	171.1	0	0	0
3	171.2	0	0	0
4	171.3	0	0	0
5	171.4	0	0	0
6	171.5	0	0	0
7	171.6	0	0	0
8	171.7	2	0.0002	0.002
9	171.8	5	0.0005	0.005
10	171.9	26	0.0026	0.026
11	172	62	0.0062	0.062
12	172.1	146	0.0146	0.146
13	172.2	310	0.031	0.31
14	172.3	585	0.0585	0.585
15	172.4	987	0.0987	0.987
16	172.5	1263	0.1263	1.263
17	172.6	1535	0.1535	1.535
18	172.7	1607	0.1607	1.607
19	172.8	1327	0.1327	1.327
20	172.9	986	0.0986	0.986
21	173	614	0.0614	0.614
22	173.1	302	0.0302	0.302
23	173.2	139	0.0139	0.139
24	173.3	72	0.0072	0.072
25	173.4	24	0.0024	0.024
26	173.5	6	0.0006	0.006
27	173.6	2	0.0002	0.002
28	173.7	0	0	0
29	173.8	0	0	0
30	173.9	0	0	0
31	174	0	0	0
nB=31	Deltak=0.1	N=10000	1	10



Densita` di probabilita` - 2

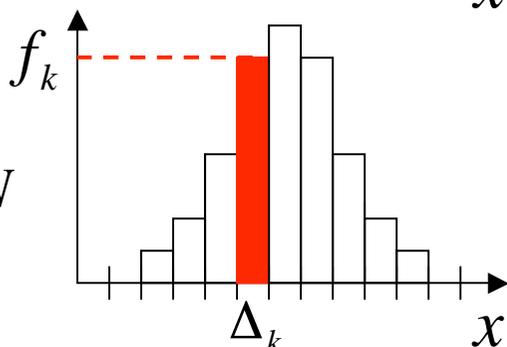
Barre

$$n_k / N$$



Rettangoli

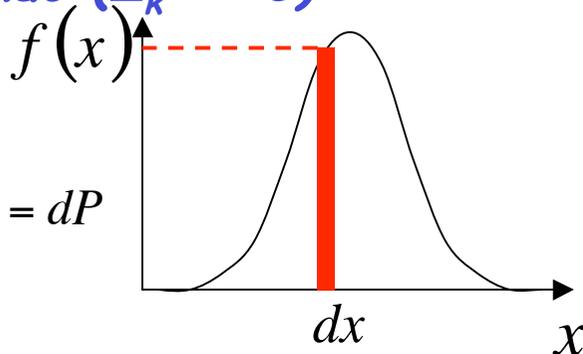
$$f_k \Delta_k = F_k = n_k / N$$



Limite continuo ($\Delta_k \rightarrow 0$)

$$\Delta_k \rightarrow dx$$

$$f_k \Delta_k \rightarrow f(x) dx = dP$$



Probabilita` come frequenza limite

$$\frac{n_k}{N} = F_k \xrightarrow{N \rightarrow \infty} P_k = P(x_k \leq x < x_k + \Delta_k)$$

$$\sum_k F_k = 1$$

Densita` di probabilita`

$$f_k = \frac{F_k}{\Delta_k} \xrightarrow{\Delta_k \rightarrow 0} f(x) = \frac{dP}{dx}$$

$$\sum_k F_k = \sum_k f_k \Delta_k = 1 \xrightarrow{\Delta_k \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

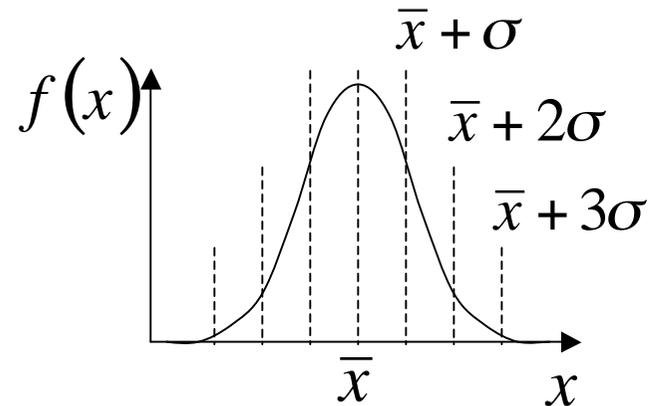
$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx$$



Distribuzione gaussiana

Una delle densità di probabilità più importanti (...Teorema del Limite Centrale!)

$$f(x) = G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}}$$



Estendendo le definizioni alla distribuzione limite:

$$\bar{x} = \sum_k x_k f_k \Delta_k \rightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx = \dots$$
$$\sigma_x^2 = \sum_k (x_k - \bar{x})^2 f_k \Delta_k \rightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx = \dots$$

Si verifica che:

1. media: $\bar{x} = X$
2. dev. standard: $\sigma_x = \sigma$
3. probabilità: $P(\bar{x} - \sigma \leq x \leq \bar{x} + \sigma) = 68\%$
 $P(\bar{x} - 2\sigma \leq x \leq \bar{x} + 2\sigma) = 95.4\%$
 $P(\bar{x} - 3\sigma \leq x \leq \bar{x} + 3\sigma) = 99.7\%$



Misure ripetute - interpretazione probabilistica - 1

Molto spesso (non sempre):

i risultati di misure ripetute hanno distribuzione di probabilità gaussiana

Per il Teorema del Limite Centrale

La media di misure ripetute ha distribuzione di probabilità gaussiana

Migliori stime per Media e Deviazione Standard:

"massima verosimiglianza" \Rightarrow "minimi quadrati" \Rightarrow ...(si dimostra, vedi p.es Taylor)...

$$\text{(migliore stima per } X) = \frac{\sum_i x_i}{N}$$

$$\text{(migliore stima per } \sigma) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{(migliore stima per } \sigma_{\bar{x}}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

...e: si dimostra anche che le deviazioni standard vanno combinate in quadratura!!!



Misure ripetute - interpretazione probabilistica - 2

Date N misure ripetute di una grandezza x (assumendo distrib. Gauss.), e calcolate come specificato:

(migliore stima per X) = \hat{X}

(migliore stima per σ) = $\hat{\sigma}$

(migliore stima per $\sigma_{\bar{x}}$) = $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$

Interpretazione "frequentista" dell'intervallo $\hat{X} - n\hat{\sigma} \leq x \leq \hat{X} + n\hat{\sigma}$

Livello di confidenza del 68% (95.3%, 99.7%) che una ulteriore **singola** misura cada nell'intervallo dato, con $n = 1$ ($n = 2$, $n = 3$)

(cioè : 68% delle ulteriori singole misure dovrebbero cadere nell'intervallo, etc.)

Interpretazione "frequentista" dell'intervallo $\hat{X} - n\hat{\sigma}_{\bar{x}} \leq x \leq \hat{X} + n\hat{\sigma}_{\bar{x}}$

Livello di confidenza del 68% (95.3%, 99.7%) che un ulteriore **esperimento equivalente** dia risultato nell'intervallo dato, con $n = 1$ ($n = 2$, $n = 3$)

(cioè : 68% degli esperimenti equivalenti darebbe valore medio nell'intervallo, etc.)

(o anche: 68% (...) probabilita` che il "valore vero" sia incluso nell'intervallo)



Misure indirette ripetute

...propagazione degli errori riveduta e corretta: usare la "somma in quadratura" !

$$\bar{q} = q(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad \sigma_{\bar{q}} = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \sigma_{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \sigma_{\bar{y}}\right)^2 + \dots}$$



Altri argomenti (cenni)

Reiezione di misure sulla base della discrepanza?

NO! Capire l'origine, se possibile trovare criteri indipendenti

"Criterio di Chauvenet": vedi Taylor, Cap.6

Come combinare misure della stessa grandezza, con errori diversi?

$$x_1 \pm \sigma_1, \dots, x_N \pm \sigma_N$$

$$x_{best} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

$$\frac{1}{\sigma^2} = \sum \frac{1}{\sigma_i^2}$$

Regressione lineare, test d'ipotesi: qualche cenno in seguito...

