



---

# Corso di Fisica per CTF

AA 2006/07

F.-L. Navarra

[navarria@bo.infn.it](mailto:navarria@bo.infn.it)

<http://www.bo.infn.it/ctf/eser>



- struttura del corso
  - lezioni ~56h + esercizi ~8h (F.-L. Navarra)
  - introduzione alla misura di grandezze fisiche [probabilità, misura, errori, statistica] ~6-8h (Andrea Perrotta [perrotta@bo.infn.it](mailto:perrotta@bo.infn.it) [da definire])
- orario delle lezioni
  - lun 16-18; mar 11-13; gio 11-13 [Aula Via dello Scalo]
- ricevimento & tutorato (V.le C. Berti Pichat 6/2 2p.)
  - lun 13-14 (R); mar 13-14 (R); mer 12-13 (T)
- preparazione agli esercizi/all'esame
  - (Miriam Giorgini [giorginim@bo.infn.it](mailto:giorginim@bo.infn.it) orario/giorni da stabilire)



## Testi consigliati - Fisica

---

- E. Ragozzino, *Principi di Fisica*, EdiSES (ad es.)
- F.R. Cavallo e F.-L. Navarra, *Appunti di Probabilità e Statistica per un corso di Fisica*, Ed. CLUEB
- (J.W. Kane e M.M. Sternheim, *Fisica biomedica*, Ed. E.M.S.I.)
- (D.M. Burns e S.G.G. MacDonald, *Fisica per gli studenti di biologia e medicina*, Ed. Zanichelli)
- (D.C. Giancoli, *Fisica*, Casa Ed. Ambrosiana)



## URL consigliati - Fisica

---

- pagina principale per gli studenti di CTF



<http://www.bo.infn.it/ctf/eser>

- programma del corso (link)



- eserciziario elettronico (link)



- meccanica dei fluidi



<http://ishtar.df.unibo.it/mflu/html/cover.html>

- diffusione nelle soluzioni



<http://ishtar.df.unibo.it/dif/html/diffu/index.html>

- corrente elettrica e circuiti



<http://ishtar.df.unibo.it/em/elet/cover.html>



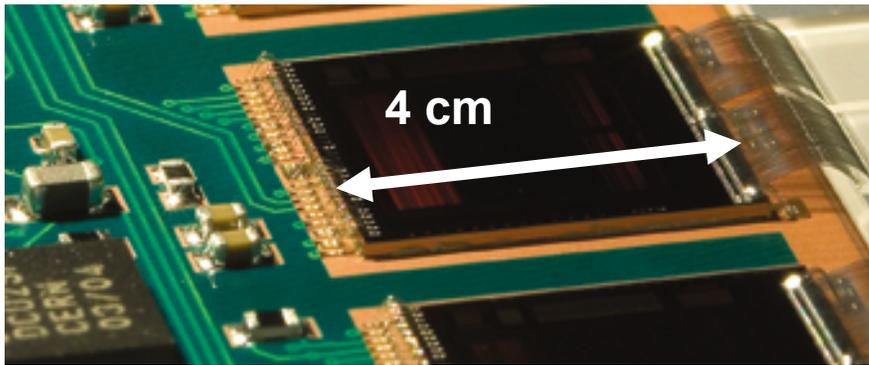
# Programma a blocchi - Fisica

---

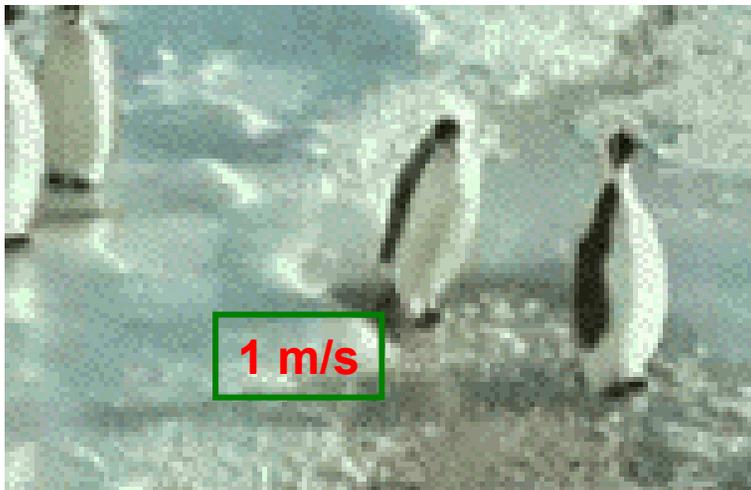
- grandezze fisiche e loro misura (6 h)
- meccanica (punto, corpi, fluidi) (16 h)
- termodinamica (6 h)
- elettromagnetismo (10 h)
- oscillazioni, onde, ottica (12 h)
- microfisica (fisica atomica) (6 h)
- esercizi (8 h)

[margine di errore  $\pm 2$  h]

# Il mondo che ci circonda (I)



Microelettronica



Pinguini



# Il mondo che ci circonda (II)



**Morpho: un es. di interferenza (le ali non contengono un pigmento blu!)**



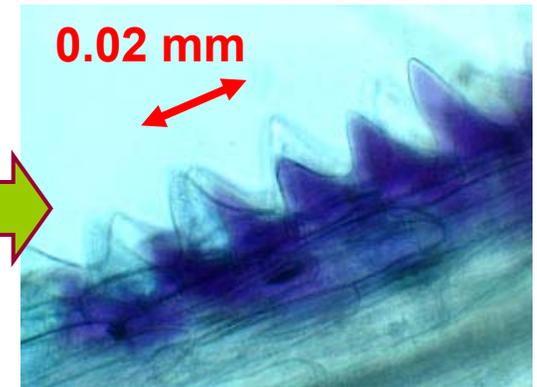
**Un altro es. di interferenza: lamina di acqua saponata**



**1100 kg**



**380 kV**



**0.02 mm**



# Introduzione



- 1) Quanto è alta la torre Eiffel? 2) Qual'è l'età dell'universo? 3) E' più bello un quadro astratto o uno figurativo? 4) E' più veloce la luce nel diamante o il suono nel ferro? 5) Profuma più una violetta o una rosa? 6) E' più caldo in cima al Cervino o accanto alle piramidi di Gizah? 7) E' più musicale un *la* (440.0 Hz) o un *do* (261.6 Hz)? - Sono tutte domande che ci possiamo porre riguardo a quello che ci circonda.
- La fisica può dare risposta ad alcune domande: quelle suscettibili di una risposta **quantitativa** (1, 2, 4, 6) attraverso un procedimento di **misura/confronto** dopo aver stabilito una opportuna **unità di misura** – E' difficile stabilire l'unità di misura di **bellezza**, di **profumo** o di **musicalità** (anche se è possibile stabilire relative scale).
- Parafrasando WS: c'è più fisica nell'ala di una farfalla dalle ali blu di quanto qualcuno possa immaginare (riflessione, cambiamento di fase, interferenza).



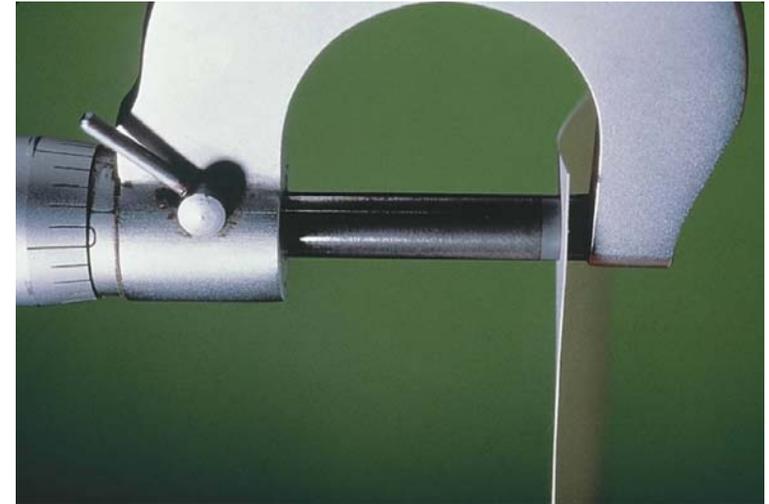
# Quello che la fisica è

---

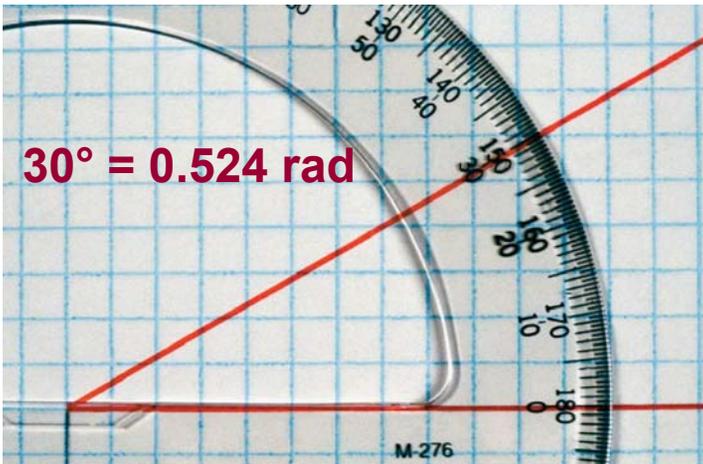
- **Fisica** (dal greco φυσικός (*phusikos*) = *naturale*, φύσις = *natura*), si basa su due assiomi:
  - le leggi della natura sono valide ovunque (in qualsiasi tempo e luogo)
  - l'osservazione porta ad una decisione sulla validità di modelli per una descrizione di eventi naturali
- **Sperimentazione** sulla natura a tutti i livelli, dai complessi ai più elementari, effettuata partendo dalla nozione di misura (quantitativa, riproducibile) e dalla **definizione operativa di grandezza fisica attraverso il processo di misura**
  - ⇒ **misura quantitativa**, quindi suscettibile di correlazione numerica con altre misure (entro gli **errori statistici** di misura)
  - ⇒ **misura riproducibile**, cioè indipendente dal soggetto che sperimenta e dall'apparato utilizzato (tenuto conto degli **errori sistematici** e della **sensibilità dell'apparato**)



# Definizione operativa di una grandezza fisica, processi di misura diretta (confronto) e indiretta

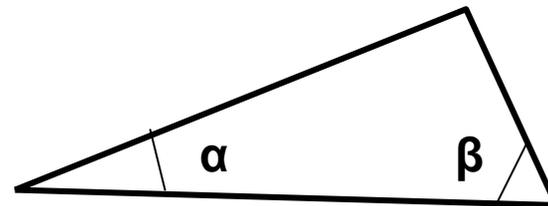


0.07 mm



30° = 0.524 rad

**Misura indiretta: altezza delle montagne mediante triangolazione, misura di temperatura attraverso una misura di resistenza etc.**



$$a = \frac{c \sin \alpha}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)}$$



## Misura/definizione operativa di grandezza (2)

- Il processo di misura è **centrale**, **fondamentale**; per parlare di grandezza fisica occorre dire come si misura:
  - ⇒ scelta dell'unità di misura (arbitraria, comoda)
  - ⇒ procedimento di confronto con l'unità di misura

$$G = g U_g; G' = g' U_g \text{ etc.} \quad \text{ossia} \quad G/U_g = g \text{ etc.}$$

$$l = 8.8 \text{ cm} ; s = 0.07 \text{ mm} ; \gamma = 30^\circ$$

$G$  - grandezza,  $g$  - numero puro che esprime il rapporto con l'unità di misura  $U_g$

- ⇒ misurando  $G$  con unità di misura diverse si ha

$$G = g U_g = g' U_g' \quad \rightarrow \quad g' = g U_g / U_g'$$

quindi **se l'unità di misura è più piccola  $G$  è espresso da un numero più grande**  $l = 8.8 \text{ cm} = 88 \text{ mm}$



# Dimensioni delle grandezze fisiche

- una lunghezza, uno spessore, una distanza, uno spazio percorso  $\Delta x$  sono tutte grandezze fisiche omogenee con una lunghezza, cioè hanno tutti la stessa dimensione che si indica con  $[L]$  – si prescinde dal valore numerico
- allo stesso modo una qualsiasi superficie (cerchio, quadrato etc.) è omogenea con il quadrato di una lunghezza e si indica con  $[L^2]$  – sia  $15 \text{ km}^2$  che  $0.7 \text{ }\mu\text{m}^2$  etc
- il tempo misurato a partire da un istante iniziale ed un intervallo di tempo  $\Delta t$  sono omogenei con un tempo:  $[T]$
- in generale in meccanica:  $[G] = [L^\alpha M^\beta T^\gamma]$  con  $\alpha, \beta, \gamma +vi, -vi, 0$
- tutte le relazioni in fisica devono essere dimensionalmente corrette; qualsiasi sia la combinazione di grandezze che compare nella relazione, le dimensioni a dx dell' = devono essere le stesse di quelle a sx dell' = :  $[v] = [s/t] = [LT^{-1}]$



## Prefissi e notazioni

---

- I risultati delle misure possono essere espressi da numeri molto più grandi o più piccoli di 1 - dipende dall'unità di misura scelta - si usano quindi i prefissi, **comunemente**:  
femto (f)  $10^{-15}$ , pico (p)  $10^{-12}$ ; nano (n)  $10^{-9}$ ; micro( $\mu$ )  $10^{-6}$ ; milli (m)  $10^{-3}$ ; centi (c)  $10^{-2}$ ; deci (d)  $10^{-1}$ ; deca (da o D)  $10^1$ ; etto (h)  $10^2$ ; chilo (k)  $10^3$ ; mega (M)  $10^6$ ; giga (G)  $10^9$ ; tera (T)  $10^{12}$ ; peta (P)  $10^{15}$
- Le grandezze sono espresse mediante lettere (ad es. iniziale in italiano o in inglese) ma l'alfabeto latino esteso non è sufficiente ad evitare confusione di notazioni, così si usano lettere greche, **comunemente**:  
minuscole:  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \eta, \theta, \lambda, \mu, \nu, \pi, \rho, \sigma, \tau, \varphi, \chi, \psi, \omega$   
maiuscole:  $\Delta, \Pi, \Sigma, \Omega$
- Le unità di misura si indicano con la maiuscola se corrispondono ad un nome proprio - **1 A = 1 ampère**



# Leggi, modelli, teorie

---

- misure contemporanee di diverse grandezze permettono di ottenere, entro gli errori di misura, **relazioni fra le grandezze misurate** (ad es. temperatura esterna ed ora del giorno, tempo e distanza di caduta per un corpo in un fluido)
  - ⇒ **leggi esprimibili in linguaggio matematico**  
ad es. funzioni elementari, eq. fra grandezze finite, eq. differenziali etc.  
in generale informazione/correlazione sotto forma di **tabella, grafico, n-tupla, database** ↔ **calcolatrice, PC etc.**
  - ⇒ (diverse) leggi → **modello/teoria da confrontare con ulteriori misure** (verifica o falsificazione sperimentale, **metodo sperimentale galileiano**)



# Errori di misura (1)

- Supponiamo di fare una misura, ad es. del tempo di caduta di sferette uguali in un liquido con cronometro al 100esimo di secondo: non si otterranno in genere valori identici.
- Se le **fluttuazioni (casuali)** sono maggiori della sensibilità dello strumento si avrà
$$x_i = X_{\text{vero}} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2 \dots N$$
e  $\langle \varepsilon_i \rangle \rightarrow 0$  per  $N \rightarrow$  grande (*valor medio* =  $\langle \rangle$  o linea sopra o sottolineatura ; NB gli **scarti** casuali sono +vi e -vi)

t (s)	scarto (s) $t - \langle t \rangle$	scarto <sup>2</sup> (s <sup>2</sup> ) $(t - \langle t \rangle)^2$
10.78	0.16	0.0256
10.58	-0.04	0.0016
10.62	0.00	0.0000
10.50	-0.12	0.0144

- Se le misure sono ugualmente attendibili, la migliore stima di  $X_{\text{vero}}$  sarà la **media aritmetica**
$$\underline{x} = (\sum_{i=1, N} x_i) / N$$
con un errore **r.m.s.** sulla misura
$$\sigma = \sqrt{[\sum_{i=1, N} (x_i - \underline{x})^2] / (N-1)}$$
e  $\Delta x = \sigma / \sqrt{N}$  sulla media



## Errori di misura (2)

- Nell'es.

$$\underline{t} = (\sum_{i=1,N} t_i)/N = (\sum_{i=1,4} t_i)/4 = (t_1+t_2+t_3+t_4)/4 = 10.62 \text{ s}$$

$$\sigma = \sqrt{[\sum_{i=1,N}(t_i-\underline{t})^2]/(N-1)} = \sqrt{[\sum_{i=1,4}(t_i-\underline{t})^2]/3} = 0.12 \text{ s}$$

$$\Delta t = \sigma/\sqrt{N} = \sigma/\sqrt{4} = 0.06 \text{ s}$$

- Sinteticamente, valor medio ed errore q.m. sulla media

$$t_{\text{caduta}} = \underline{t} \pm \Delta t = (10.62 \pm 0.06) \text{ s}$$

(r.m.s. = root mean square  $\approx$  q.m. = quadratico medio)

- N.B. l'errore è dato con una sola *cifra significativa*; l'*errore assoluto*  $\Delta t$  è una *grandezza dimensionata* con unità di misura s, che *fissa il n. di cifre del risultato*; l'*errore relativo*

$$\delta = \Delta t/\underline{t} = 0.006 = 0.6/100 = 0.6\%$$

è invece un *numero puro* (ci indica la precisione della misura: più piccolo = misura più precisa)



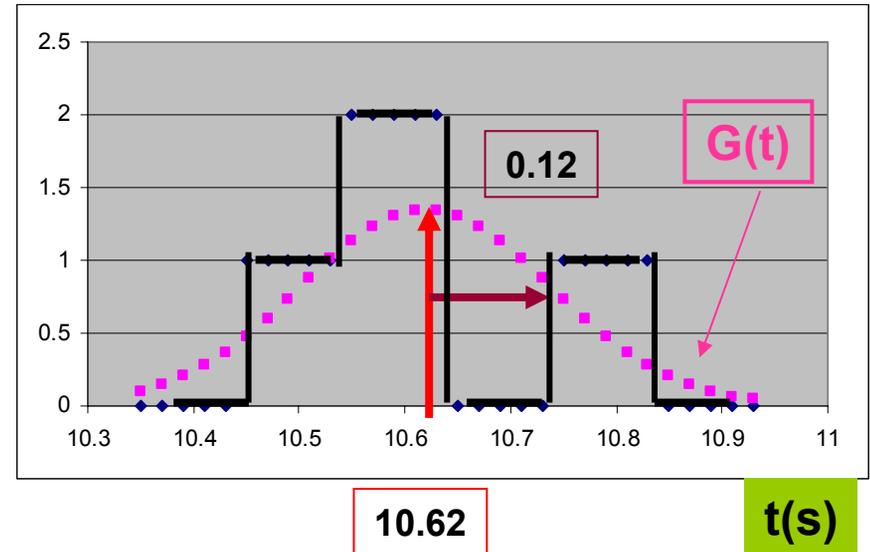
# Errori di misura (3)

- La distribuzione delle misure (per  $N \rightarrow$  grande) può essere approssimata dalla gaussiana

$$G(t) = \frac{h}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \bar{t})^2}{2\sigma^2}\right]$$

Interpretazione probabilistica:  
nell'intervallo  $\underline{t} - (2)\sigma$  e  $\underline{t} + (2)\sigma$  è compreso il 68.3% (95.5%) dell'area della gaussiana  $\rightarrow$  la probabilità di trovare un valore di una successiva misura nell'intervallo è 68.3% (95.5%) etc.

frequenza



- Per la media l'intervallo è  $\underline{t} - (2)\Delta t$  e  $\underline{t} + (2)\Delta t$  con lo stesso significato

$$t \pm \Delta t \quad P = 68.3\%$$

$$t \pm 2\Delta t \quad P = 95.5\%$$

$$t \pm 3\Delta t \quad P = 99.7\%$$



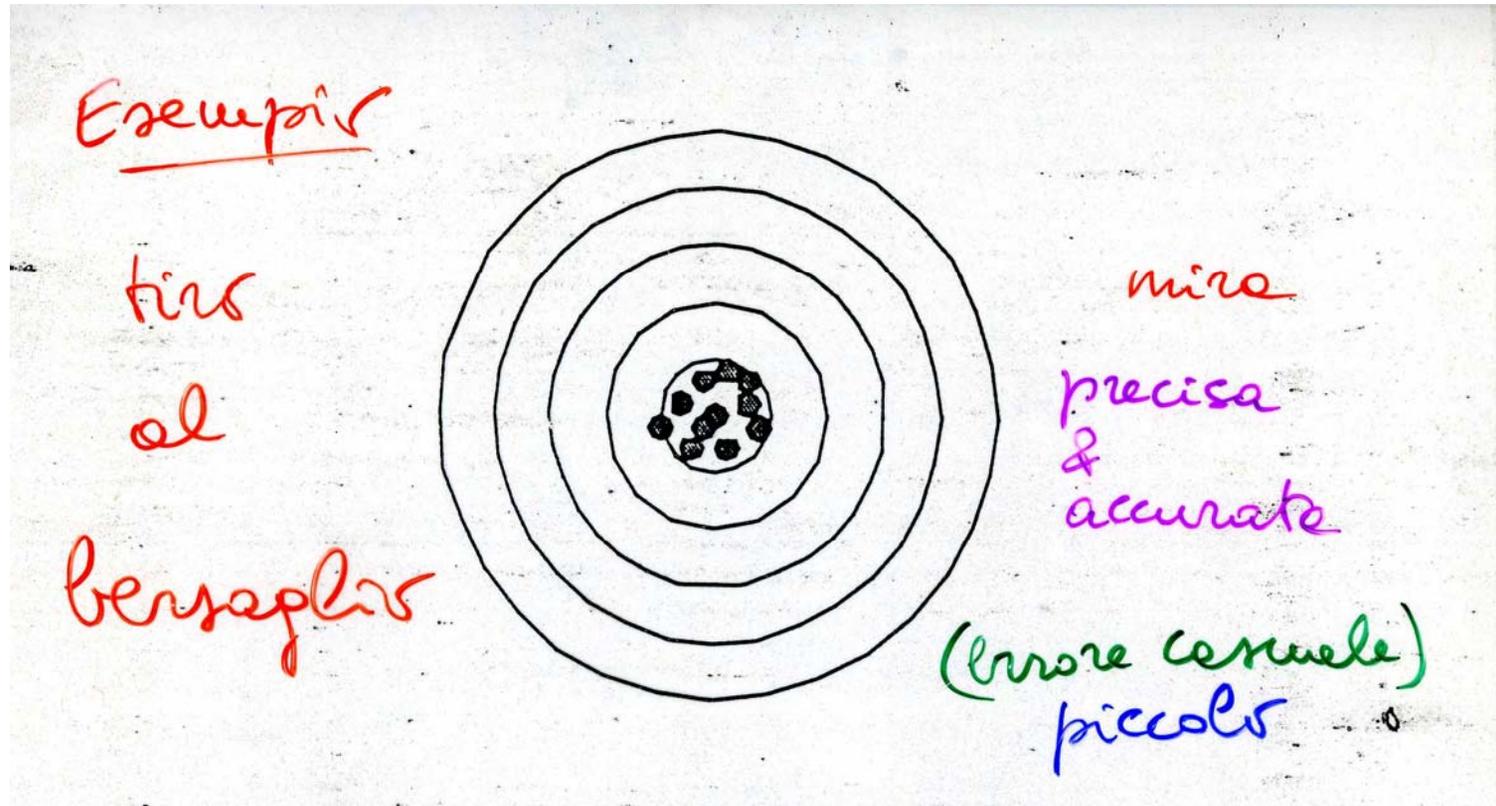
## Errori di misura (4)

---

- Oltre agli **errori casuali o statistici** vi sono gli **errori sistematici**, ad es. errori di calibrazione, errori di parallasse etc. – in questo caso si può parlare di **accuratezza**, si può fare un tiro al bersaglio ben raggruppato ma non al centro del bersaglio: serie precisa ma non accurata etc. **le cose non migliorano aumentando il numero di tentativi**
- Se gli errori casuali sono piccoli rispetto alla **sensibilità** dello strumento di misura, la lettura sarà sempre la stessa, anche in questo caso non serve aumentare il numero di misure, l'errore è dato dalla sensibilità dello strumento (per es. metà della cifra meno significativa leggibile)

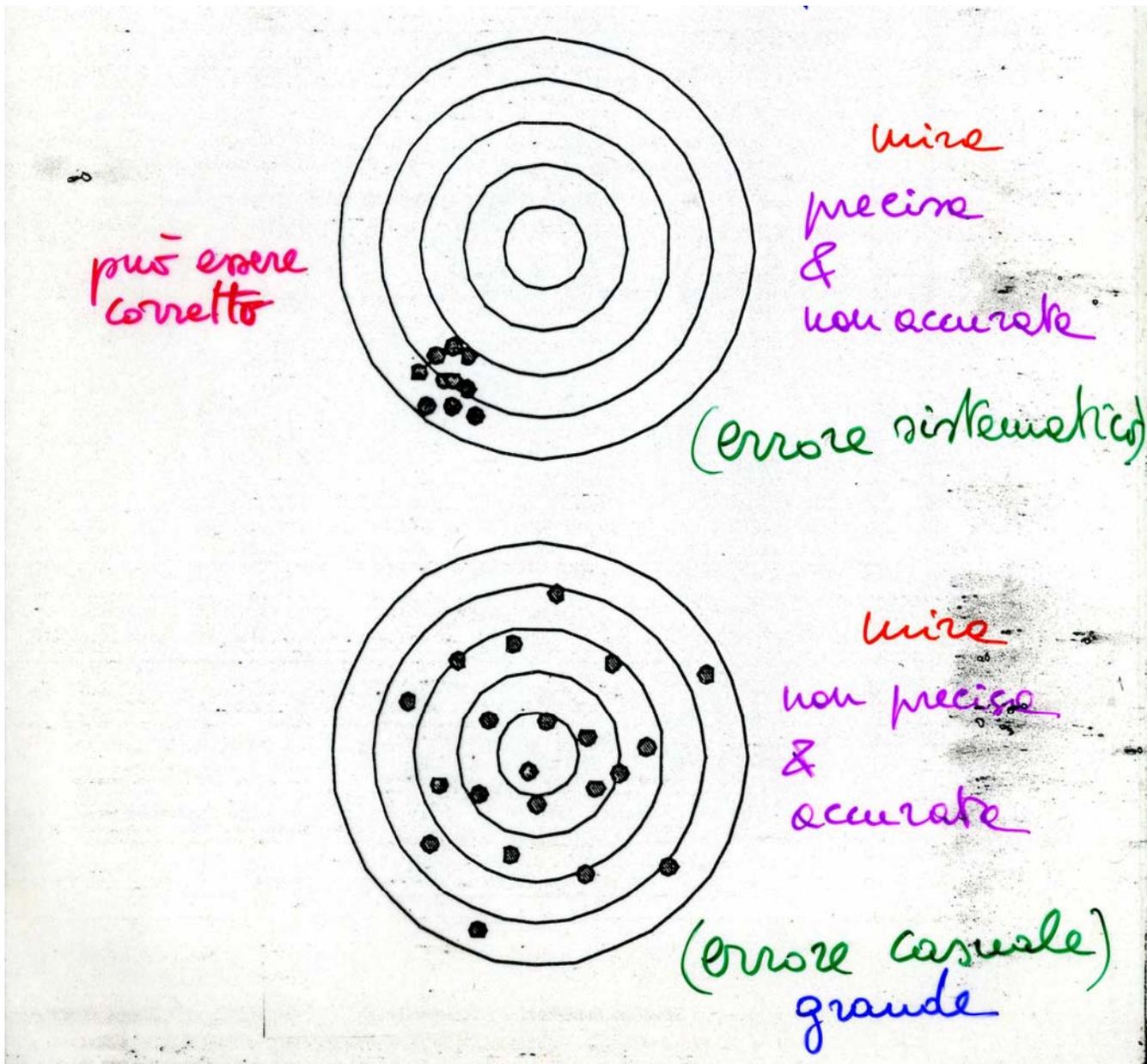


# Precisione e accuratezza





## Precisione e accuratezza (2)





# Notazione scientifica e cifre significative

- In seguito alla scelta dell'unità di misura potremo avere grandezze con valori molto più grandi (piccoli) di 1 ad es. sono scomode da scrivere

$$\lambda_D = 0.000000589 \text{ m} \quad (\text{riga del Na, giallo})$$

$$d_{TS} = 149600000000 \text{ m} \quad (<d> \text{ terra-sole})$$

- Si usa la notazione scientifica separando le **cifre significative** dalla **potenza di 10 (ordine di grandezza)**, si scrive la cifra più significativa (quella che corrisponde alla potenza di 10 più elevata) prima del . e le altre cifre significative dopo

$$\lambda_D = 5.89 \times 10^{-7} \text{ m} \quad (3 \text{ cifre significative})$$

$$d_{TS} = 1.4960 \times 10^{11} \text{ m} \quad (5 \text{ cifre significative})$$

**NB** lo 0 indicato  
a dx è significativo



## Cifre significative (2)

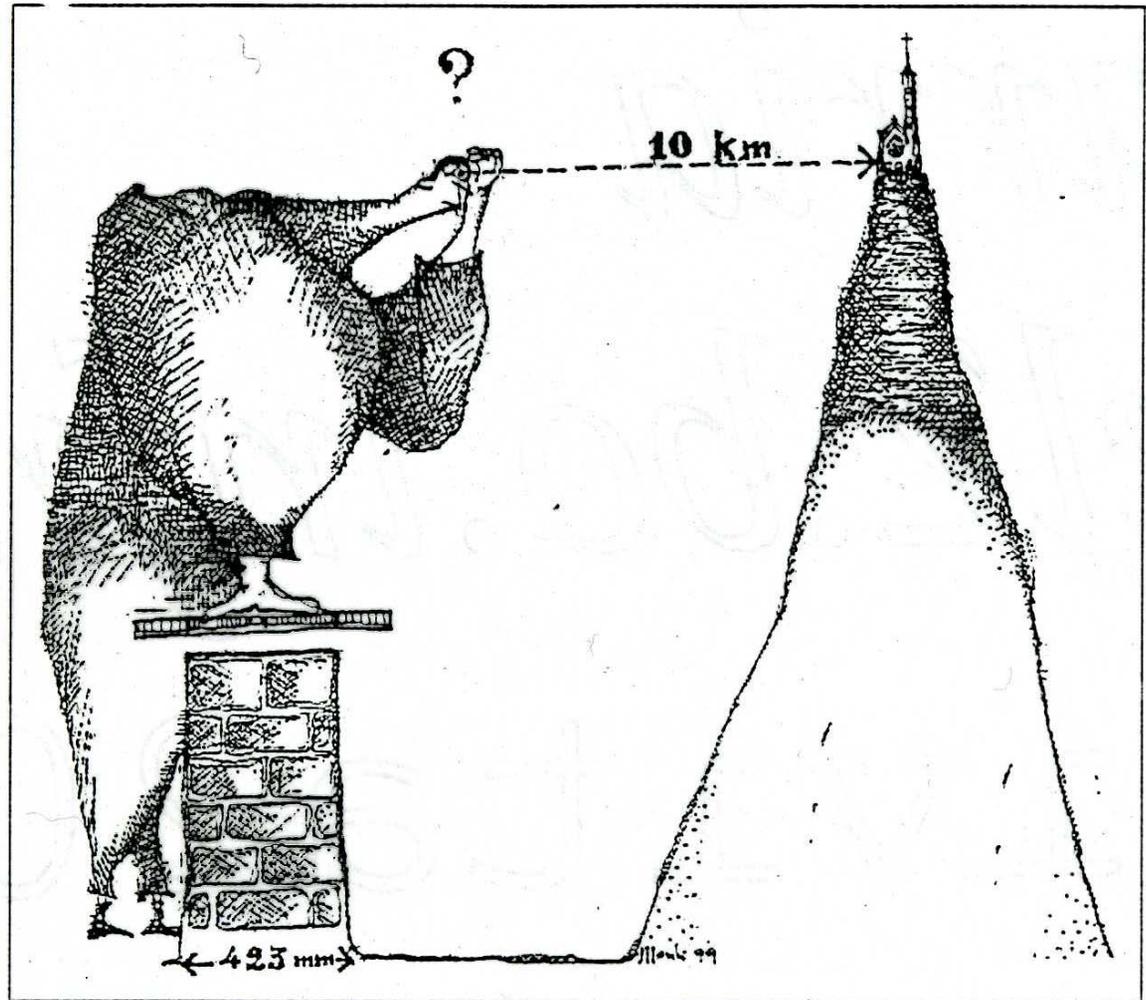
---

- Ad es. il valore del numero di Avogadro è misurato con grande precisione  
 $N_A = (6.0221415 \pm 0.00000010) \times 10^{23} \text{ moli}^{-1}$   
cioè è noto/misurato con 7 cifre significative (un errore relativo di 0.17 parti per milione o ppm) quindi scriverlo con 10 o più cifre non ha senso fisico – **posso però arrotondarlo** per es. a 4 cifre, scelgo le prime 4 a sx:  $6.022 \times 10^{23}$  etc.
- Negli esercizi di fisica **normalmente i dati sono forniti con 3 o 4 cifre significative**, quindi non è sensato dedurre risultati con un numero di cifre maggiore – NB inoltre, in generale, combinando vari numeri noti con una certa precisione il risultato ha una precisione peggiore
- **=> nella soluzione degli esercizi si chiedono i risultati (se numeri reali) con 3 cifre significative**

## Cifre significative (3)

NB se si sommano grandezze di precisione diversa, la meno precisa domina l'errore (e tutte le cifre della grandezza più precisa risultano illusorie/inutili)

$$(10 \pm 1) \text{ km} + (423 \pm 1) \text{ mm} = (10 \pm 1) \text{ km}$$



$$\dots (10 \pm 1) \text{ km} + (423 \pm 1) \text{ mm} = (10.000423 \pm 1) \text{ km}:$$

... le cifre successive a quella su cui cade l'errore non hanno alcun significato!



# Appendice sull'uso della calcolatrice

---

Supponiamo di fare una divisione con la calcolatrice tascabile:

$$\frac{1.03}{1.01} = 1.019801980\dots?$$

(con la calcolatrice del PC ottenete ancora più cifre).

**Sarebbe sensato partendo da numeri conosciuti con 3 cifre fabbricarne uno di 10 (o più) cifre?** In realtà dei due numeri non conosciamo la 4a cifra, possiamo solo dare un intervallo

$$\frac{1.025 \div 1.035}{1.005 \div 1.015} = 1.0098\dots \div 1.0298\dots = 1.01 \div 1.03$$

quindi **il risultato deve essere arrotondato al massimo a 3 cifre,**

**1.02** coerentemente con la precisione iniziale,  $1/1.03 \sim 10^{-2}$

– **la calcolatrice non può essere una fabbrica di cifre: una operazione aritmetica non aumenta in genere la precisione**



# Grandezze fondamentali e derivate

---

- Una volta definite operativamente alcune grandezze relative ai fenomeni di interesse, le altre grandezze possono essere definite in funzione delle prime – ad es.  $v = s/t$
- Si distingue quindi fra **grandezze fondamentali** (nel minor numero possibile/conveniente) e **grandezze derivate**
- Le definizioni fanno sì che **la scelta di quali siano le grandezze fondamentali è arbitraria**
- In meccanica bastano 3 grandezze fondamentali (ad es. lunghezza, tempo, massa)



# Sistemi di unità di misura

---

- Scelte le grandezze fondamentali si devono scegliere le loro unità di misura: quelle delle grandezze derivate sono determinate in conseguenza → sistemi di unità di misura
- In meccanica si usa MKS (m, kg, s), ma si usa anche CGS (cm, g, s) e sistema degli ingegneri
- Nella CE dal 1978 è in vigore il **Sistema Internazionale (SI)** ossia 7 grandezze e relative unità (m, kg, s, A, K, cd, mole)
- a queste unità vanno aggiunti i radianti (rad) per gli angoli piani e gli steradiani (sr) per quelli solidi
- esistono poi numerose grandezze usate comunemente che non fanno parte di alcun sistema precedente (senza poi andare negli US)



## Sistemi di unità di misura (2)

- Riassumendo:

Grandezze fondamentali => Scelta delle unità di misura fondamentali => Sistemi di unità di misura

- Ad es. per la meccanica

MKS	spazio:	m	=	$10^2$ cm
	tempo:	s		
CGS	massa:	kg	=	$10^3$ g
	spazio	cm	=	$10^{-2}$ m
	tempo	s		
	massa	g	=	$10^{-3}$ kg

$$l = 5.1 \text{ m} = 510 \text{ cm}$$

$$s^{-1} = 2 \text{ m}^{-1} = 0.02 \text{ cm}^{-1}$$

etc.

conversione di unità :  
si moltiplica per  
 $1 = 100 \text{ cm}/1 \text{ m}$   
(numeratore)  
per convertire  $\text{m} \rightarrow \text{cm}$   
 $1 = 1 \text{ m}/100 \text{ cm}$   
per  $\text{m}^{-1} \rightarrow \text{cm}^{-1}$   
(denominatore,  $1/\text{m}$ )



# Unità di misura delle grandezze fondamentali

---

- **metro**, unità di misura delle distanze – a partire dal 1983, 1 m = distanza percorsa dalla luce nel vuoto in  $1/299792458$  s
- **secondo**, unità di misura dei tempi – 1 s = tempo necessario per  $9.192631770 \times 10^9$  vibrazioni di una particolare riga dell'atomo del  $^{133}\text{Cs}$  [ 1 giorno solare medio = 86400 s]
- **chilogrammo**, unità di misura della massa – 1 kg =  $5.0188 \times 10^{25}$  atomi di  $^{12}\text{C}$  [ 1 mole = 12 g  $^{12}\text{C}$ , contiene  $N_{\text{Av}}$  atomi]



# Quello che la fisica non è

---

- non tenta di dare risposte a domande di tipo ontologico:
  - cos'è il tempo, lo spazio, la massa, la carica elettrica ...?
  - => le questioni di tipo filosofico esulano dal campo della fisica
- non è un catalogo di casi:
  - tutte le mele che cascano, tutte le stelle di una certa magnitudo, tutte le molecole in un volume di gas ...
  - => (poche) leggi generali che inglobano moltissimi/tutti i casi conosciuti
- non è una descrizione storica delle scoperte in fisica
  - => le scoperte sono stimulate dalla tecnologia/scoperte precedenti
- non è affatto un puro esercizio matematico
  - => usa il linguaggio matematico per esprimere sinteticamente misure, relazioni, leggi

# Fine dell'introduzione

ἀγεωμέρητος  
μηδείς  
εἰσίτω

Non entri chi è  
digiuno di geometria

