

Esperienze del Primo Semestre

LABORATORIO¹ ED ELEMENTI DI COMPUTAZIONE

AA 2025/2026

Giulia Casarosa



Esperienze di Laboratorio

➔ andiamo in laboratorio a fare delle misure

- le misure le fate voi: **non esiste un modo giusto per fare una misura**, esistono tanti modi, alcuni più precisi e/o accurati di altri. L'importante è misurare quello che vogliamo misurare, stimare correttamente l'incertezza, e poi interpretare i risultati in modo corretto.

➔ cosa serve per fare una misura:

- prendere le misure con gli strumenti di misura: **la manualità si impara in laboratorio!**
- stima del valore centrale, dell'incertezza statistica (e di quella sistematica) sia nel caso di misure dirette che indirette = quello che si discute a lezione (ma vedrete che sul campo a volte è più complicato)
- estrazione di informazioni dai dati (fit) e interpretare il risultato → si farà a lezione
- riportare i risultati in un documento scientifico → si discute oggi

Fasi dell'Esperienza

sfruttate le 4 ore in laboratorio
per arrivare più lontano possibile

1. si legge con attenzione la traccia fornita e si ascoltano attentamente le indicazioni dell'esercitatore o esercitatrice
2. si capisce cosa si deve fare, e come si fa con gli strumenti a disposizione
3. si fanno misure preliminari per verificare calibrazione degli strumenti, l'apparato, ma anche le ipotesi del modello e/o della misura, ...
4. si prendono le misure, controllando che abbiano un senso Belle II DQM
(no, non potete loggarvi)
5. si fa l'analisi dei dati
6. si scrive la relazione
7. si consegna e poi si discute la correzione con l'esercitatore o esercitatrice

Logbook

- ➔ è importante avere un quaderno (reale o virtuale) in cui si appunta quello che si fa _quando_ lo si fa (anche i tentativi andati a vuoto)
 - anche se pensate di ricordarvi quello che avete fatto, annotatelo
 - uno per gruppo
- ➔ cosa scrivo sul logbook?
 - l'esperienza, la data, chi sono i colleghi con cui fate la misura
 - il valore delle misure (e a quale configurazione/ipotesi/... si riferiscono!)
 - le considerazioni - cose che si sono capite del sistema, dello strumento di misura, ...
- ➔ un logbook ordinato e chiaro è il 50% della relazione
- ➔ il logbook è utilizzato ad ogni livello Belle II e-log
(no, non potete loggarvi)

Regole di Base

- ➔ non farsi male - basta ricordarsi che siamo in un laboratorio e prestare un po' di attenzione
- ➔ avere rispetto per l'attrezzatura fornita - non è un problema se gli oggetti si rompono purché utilizzati in modo corretto
- ➔ finita l'esperienza si lascia il tavolo e la strumentazione nello stesso stato in cui l'abbiamo trovata, in particolare non si sporca (e.g. non si mangia in laboratorio...)
- ➔ mai lasciare le proprie credenziali in un computer comune
 - non salvare la password sul browser o keychains
 - fare log-out da tutto prima di spegnere il computer
- ➔ i dati sono sacri: non si cancellano quando si è consegnata la relazione
 - in particolare, i dati del primo semestre potete riprenderli in mano quando avremo capito cosa è un fit, e come si interpretano i risultati

Esperienze

affronterete problemi “veri”, che i ricercatori affrontano ogni giorno; problemi che sono propri della misura, non di che cosa si misura

- ➔ misure su sistemi meccanici e termodinamici, di cui state studiando (o studierete) la teoria a fisica1 (tutto ciò che dovete sapere della teoria è nella traccia)
 - **densità**: misura di massa e volume di diversi pesetti di materiali diversi, e misura della densità
 - studio della dipendenza del periodo di un **pendolo fisico** dalla distanza tra il centro di massa e il punto di sospensione
 - misura della **conducibilità termica** di due barre metalliche tramite misure di temperatura
 - **catenaria** (da fare a casa, sempre in coppia)
- ➔ quanto sono realistici gli esercizi di fisica1? si può trascurare l'attrito? lo scambio di calore con l'ambiente? qual è la posizione del punto di sospensione in un oggetto effettivamente appeso ad un perno? dov'è il centro di massa?
 - la risposta ad alcune di queste domande dipende da *come* fate la misura!

Organizzazione

i links li trovate su e-learning

- ➔ gruppi: <https://elearning.df.unipi.it/mod/resource/view.php?id=9042>
- ➔ tracce: <https://github.com/unipi-physics-labs/lab1-sheets>
- ➔ consegna relazioni: <https://forms.office.com/e/gxRFAr4F0z>

primo semestre				esperienze in presenza		
Gruppo	Slot	Esercitator*	email	10-Nov-25	24-Nov-25	01-Dec-25
A1-1	lunedì mattina	Angela Papa	angela.papa@unipi.it	densità	conducibilità termica	pendolo fisico
A1-2		Claudio Luperini	claudio.luperini@unipi.it	pendolo fisico	densità	conducibilità termica
A1-3		Luca Baldini	luca.baldini@unipi.it	conducibilità termica	pendolo fisico	densità
A2-1	martedì pomeriggio	Giulia Casarosa	giulia.casarosa@unipi.it	densità	conducibilità termica	pendolo fisico
A2-2		Damiano Marian	damiano.marian@unipi.it	pendolo fisico	densità	conducibilità termica
A2-3		Valerio Boschi	valerio.boschi@pi.infn.it	conducibilità termica	pendolo fisico	densità
B1-1	giovedì mattina	Giulia Casarosa	giulia.casarosa@unipi.it	densità	conducibilità termica	pendolo fisico
B1-2		Damiano Marian	damiano.marian@unipi.it	pendolo fisico	densità	conducibilità termica
B1-3		Luca Baldini	luca.baldini@unipi.it	conducibilità termica	pendolo fisico	densità
B2-1	giovedì pomeriggio	Giuliana Rizzo	giuliana.rizzo@unipi.it	densità	conducibilità termica	pendolo fisico
B2-2		Carmelo Sgrò	carmelo.sgro@pi.infn.it	pendolo fisico	densità	conducibilità termica
B2-3		Francesco TENCHINI	francesco.tenchini@df.unipi.it	conducibilità termica	pendolo fisico	densità

orario laboratori
mattina 8:30 - 12:30
pomeriggio 14:30 - 18:30

Densità

- ipotesi del modello
 - solidi regolari..?
- come si usa il calibro?
- come si usa la bilancia di precisione? (l'aria pesa?)
- incertezze delle misure dirette
- incertezze sul volume
- rappresentazione dei dati e fit
- interpretazione dei risultati
- per questa esperienza c'è uno scheletro di relazione (che ovviamente può essere usato anche per le altre)

SOMMARIO

Sappiamo che una quantità fissata di qualunque sostanza o materiale occupa un volume che varia soltanto se variano le condizioni in cui tale sostanza o materiale si trova (ad esempio se dovesse passare dallo stato solido allo stato liquido, o se cambiano la temperatura o la pressione).

La massa per unità di volume è nota come densità:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\text{kg/m}^3 \right]. \tag{1}$$

Si può distinguere, ad esempio, un metallo da un altro misurandone la densità.

MATERIALE A DISPOSIZIONE

- Calibro ventesimale (risoluzione 0.05 mm).
- Calibro Palmer (risoluzione 0.01 mm).
- Bilancia di precisione (risoluzione 1 mg).
- Una serie di solidi in alluminio, acciaio e ottone.

MISURE ED ANALISI

MISURE PRELIMINARI

Si misurino le dimensioni (raggi, altezze, spessori, etc.) dei vari corpi solidi e se ne calcoli il volume e la corrispondente incertezza di misura—attraverso le regole usuali della propagazione dell'errore statistico per grandezze indipendenti (i.e., utilizzando la somma in quadratura).

Si misuri anche la massa dei vari corpi e si costruisca una tabella contenente i valore dei volumi e delle masse.

STIMA DELLE DENSITÀ

Su un grafico cartesiano si riportino i valori delle masse in ascisse e quelli dei volumi in ordinate. Poiché

$$V = \frac{m}{\rho}, \tag{2}$$

i gruppi di punti corrispondenti allo stesso materiale dovrebbero disporsi su linee rette passanti per l'origine, il cui coefficiente angolare coincide con l'inverso della densità del materiale in questione.

Si esegua un *fit* al calcolatore a ciascuno dei gruppi di punti che si dispongono su queste rette e si stimi la densità per i vari materiali, propagando l'incertezza sul reciproco della densità.

LEGGE DI SCALA PER LE SFERE

Si considerino le sole sfere e si costruisca un grafico, in scala bilogarithmica, della massa m in funzione del

raggio r . Poiché la relazione tra massa e raggio è di tipo legge di potenza:

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho = kr^3, \tag{3}$$

i punti in scala bilogarithmica dovrebbero disporsi su una retta. Si trovi, con l'utilizzo di un *tool* grafico, la retta che meglio descrive i punti e si confronti il coefficiente angolare della retta con il valore atteso 3 e l'intercetta (con l'asse $r = 1$) con il valore

$$k = \frac{4}{3}\pi \rho, \tag{4}$$

data la densità misurata precedentemente.

1 APPENDICE: DENSITÀ TABULATE

Si riportano di seguito i valori tabulati per i materiali rilevanti per l'esperienza.

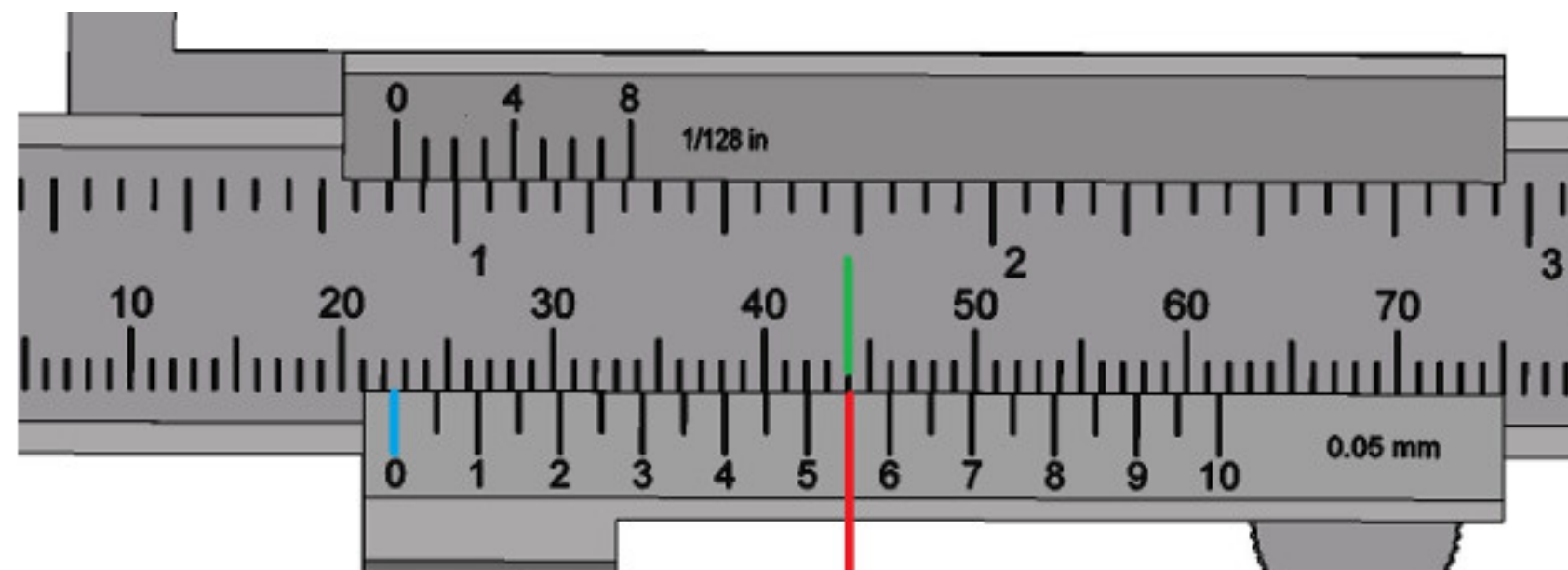
Materiale	$\rho \text{ kg/m}^3$
Alluminio	2710
Acciaio inossidabile	7480–8000
Ottone (lega Cu-Zn)	8400–8700

Il Calibro Ventesimoale

- ➔ ha una risoluzione di 0.05 mm
- ➔ è composto da una scala principale e dal nonio (mobile)
- ➔ come si legge la misura?

- la posizione dello zero del nonio sulla scala principale indica la parte intera in mm
- la tacca del nonio che meglio si allinea con una qualsiasi delle tacche della scala principale, indica la parte decimale della misura (in mm)

➔ esempio



$$22 \text{ mm} + 0.55 \text{ mm} = 22.55 \text{ mm}$$

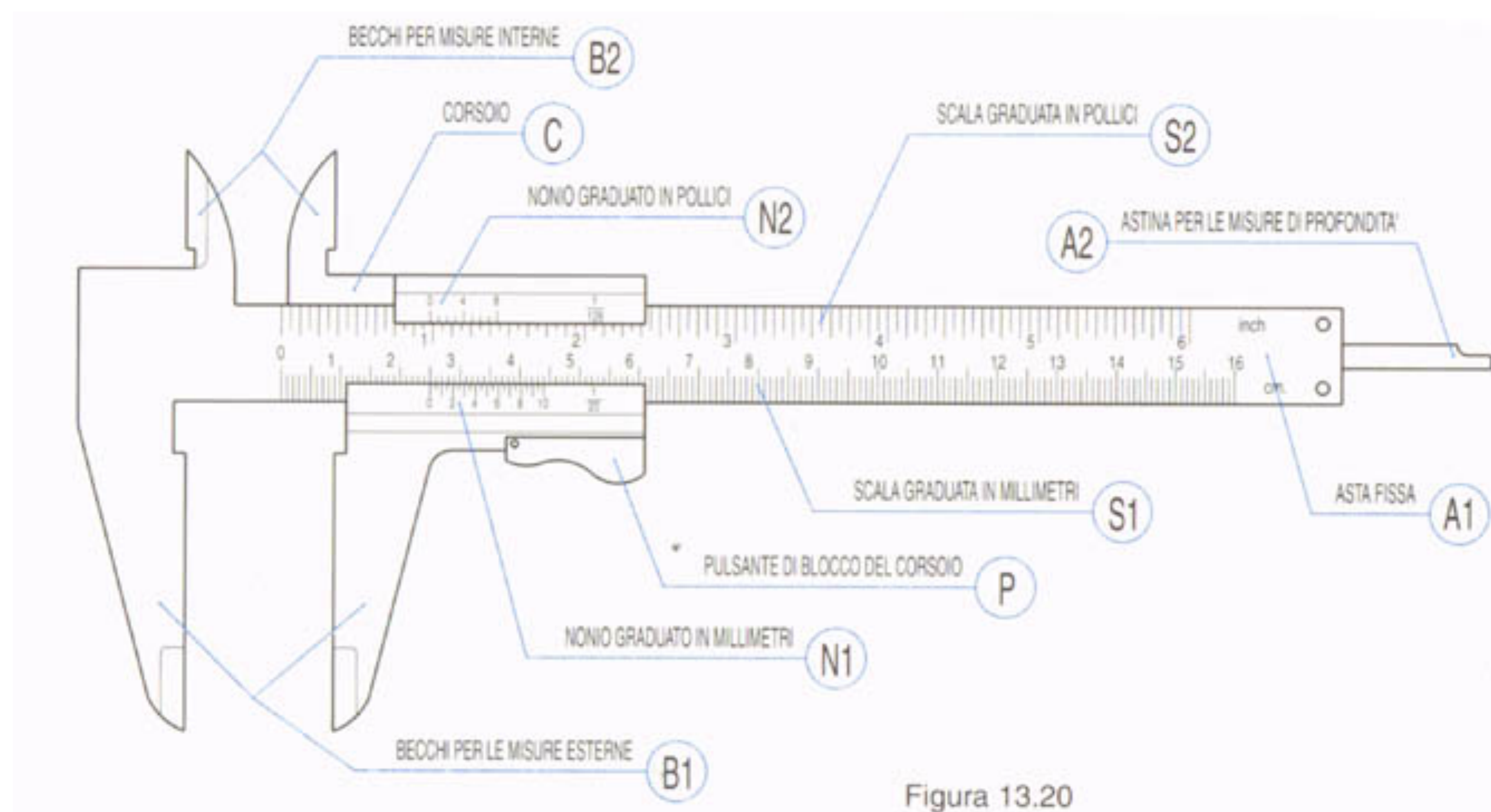


Figura 13.20

Il Calibro: come funziona?

due scale con divisioni *quasi* uguali:
l'allineamento delle tacche delle due scale
rivela spostamenti più piccoli delle divisioni
delle due scale (stesso principio dei
battimenti che vedremo il secondo semestre!)

- ➔ la scala principale ha tacche da 1 mm
- ➔ la scala del nonio ha 20 divisioni che coprono 19 mm, quindi ogni divisione vale $19 \text{ mm} / 20 = 0.95 \text{ mm}$
- ➔ mano a mano che il nonio si sposta, le tacche del nonio si disallineano di $1 - 0.95 \text{ mm} = 0.05 \text{ mm}$ rispetto alla scala principale ad ogni tacca:
 - dopo 1 divisione della scala principale la differenza è 0.05 mm
 - dopo 2 divisioni, 0.1 mm
- ➔ **controllare sempre la calibrazione** (= misura 0.00 mm se chiuso) prima di utilizzarlo!
- ➔ esiste anche il calibro cinquantessimale (risoluzione = 0.02 mm) e Palmer (risoluzione = 0.01 mm) che vedrete in laboratorio

Relazione: perchè?

- ➔ saper comunicare i risultati del proprio lavoro è fondamentale per un ricercatore
 - fa parte delle competenze specifiche
- ➔ la pubblicazione di articoli scientifici è il modo in cui la scienza progredisce
 - l'articolo contiene risultati scientifici con **dettagli sufficienti per riprodurre il risultato** (anche le relazioni!)
 - l'articolo deve essere **chiaro**, **completo** e **conciso** (anche le relazioni!)
- ➔ riviste scientifiche:
 - simili a riviste generiche (periodicità) ma non si leggono casualmente
 - sono migliaia, molto specializzate - poche sono generiche (e.g. Nature, Science)
 - peer review = revisione tra pari, esperti anonimi e indipendenti contattati dalla rivista

Relazione: cosa è, e cosa non è

- ➔ **è completa**: il destinatario deve poter ripetere l'esperienza come l'avete fatta voi
- ➔ **è chiara**: pensate che il destinatario non ha fatto l'esperienza con voi e non la conosce
- ➔ **è concisa**: usate il minor numero di parole possibili - ma non meno di quelle necessarie!
- ➔ **non è** un trattato di fisica: ricordatevi che il punto è descrivere la misura
- ➔ **non è** né un diario né una ricetta
 - serve un diario? logbook

Relazione: sezioni (1)

1.scopo dell'esperienza

- cosa volete misurare e/o verificare?

2.cenni teorici:

- deve essere breve
- qual è il modello fisico che assumete per le vostre misure? quali ipotesi ci sono dietro?
- non derivate tutte le equazioni, scrivete quelle utili alla misura

3.materiali e strumenti di misura (apparato):

- strumenti e loro risoluzione
- breve descrizione dell'apparato (conducibilità, pendolo fisico); va bene mettere una figura schematizzata o una foto (no virtuosismi, deve essere chiaro)

Relazione: sezioni (2)

4. misure dirette:

- come avete fatto le misure, cosa avete misurato esattamente
- onestà: riportate quello che è successo (non quello che sarebbe dovuto succedere)
- utilizzate tabelle e grafici di dispersione dove appropriato (titoli degli assi e delle colonne, didascalia, referenza nel testo)
- ricordatevi incertezze e unità di misura!
- occhio alle cifre significative...

Relazione: sezioni (3)

5. **analisi dati**: manipolazione dei dati dalle misure dirette, comprende calcoli (e.g. volume) e fit

- riportare la propagazione dell'errore (ipotesi e formule)
- può contenere tabelle e grafici con risultato del fit
- quando fate un fit ci devono sempre essere:
 1. quali dati sono stati utilizzati;
 2. quale funzione è stata utilizzata, quali parametri sono fissati e perchè;
 3. il valore di best fit dei parametri;
 4. il valore del χ^2 e dei gradi di libertà - l'eventuale p-value;
 5. il riferimento alla figura dove mostrano il grafico, la funzione e il plot dei residui.

Relazione: sezioni (4)

5. conclusioni:

- riportare cosa avete misurato, e la bontà del fit
- è in accordo con la teoria? perchè no?
- possibili extra:
 - ▶ difficoltà incontrate
 - ▶ commento sugli errori sistematici

Relazione: consigli

- ➔ usate parole semplici e i termini corretti
- ➔ siate quantitativi
- ➔ confronto tra misure o con la predizione teorica: è compatibile o no?
 - “l’accordo è abbastanza buono” non significa niente
 - “la retta intercetta con ottima approssimazione i punti” non significa niente
 -
- ➔ figure: serve? è visibile? è riferita nel testo?
- ➔ grafici: etichette degli assi (con unità di misura!), il testo è leggibile? l’intervallo degli assi è giusto (lo spazio vuoto non dice niente)? le incertezze si vedono?

Pendolo Fisico

- ipotesi del modello
 - dove sta il centro di massa?
 - piccole oscillazioni
 - l'attrito è trascurabile?
- serve il calibro?
- incertezze delle misure dirette di periodo (sapete già tutto)
- incertezze sulle distanze
- rappresentazione dei dati e fit
- interpretazione dei dati

SOMMARIO

Lo scopo dell'esperienza è quello di misurare il periodo di un pendolo fisico in funzione della distanza del centro di massa dal punto di sospensione.

MATERIALE A DISPOSIZIONE

- Un'asta metallica forata.
- Un supporto di sospensione.
- Cronometro (risoluzione 0.01 s).
- Metro a nastro (risoluzione 1 mm).
- Calibro ventesimale (risoluzione 0.05 mm).

MISURE ED ANALISI

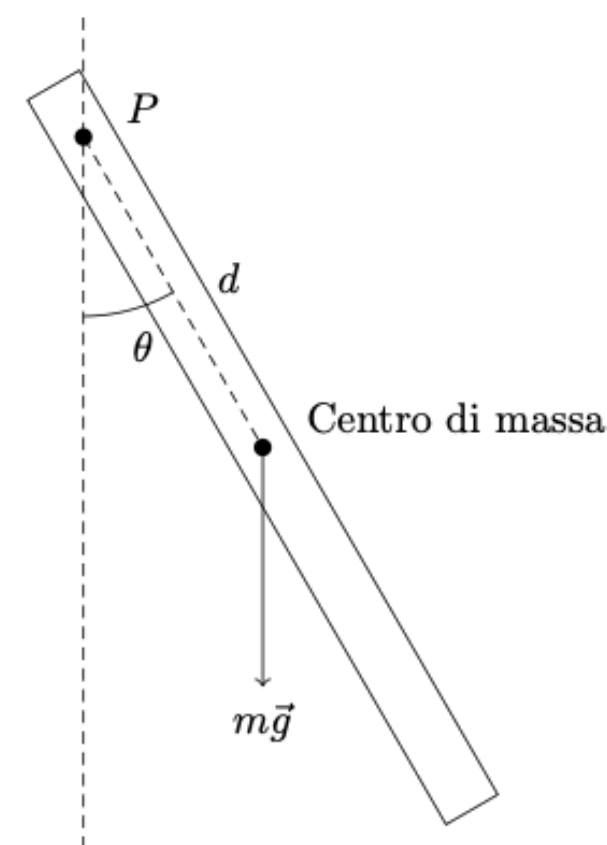


FIGURA 1: Schematizzazione dell'apparato sperimentale e definizioni di base.

Un qualunque oggetto fissato ad un punto di sospensione P (che disti d dal centro di massa) e soggetto alla gravità costituisce un pendolo fisico. Se il pendolo viene spostato di un angolo θ dalla posizione di equilibrio, il momento della forza di gravità (rispetto al polo P) vale allora

$$\tau = -mgd \sin \theta,$$

che ad angoli *piccoli* (cosa significa?) diventa

$$\tau = -mgd\theta. \quad (1)$$

D'altra parte, per la seconda equazione cardinale, si ha

$$\tau = \frac{dL}{dt},$$

ed usando le relazioni $L = I\omega$ e $\omega = d\theta/dt$ abbiamo

$$\tau = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

La (1) e la (2) permettono di scrivere

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgd}{I}\theta = 0. \quad (3)$$

Si tratta dell'equazione differenziale di un moto armonico di pulsazione angolare e periodo date rispettivamente da

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgd}{I}} \quad T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}}.$$

Sapendo che il momento di inerzia dell'asta (di massa m e lunghezza l) rispetto ad un punto P che dista d dal centro di massa, vale

$$I = I_{\text{cm}} + md^2 = \frac{ml^2}{12} + md^2,$$

si ha infine

$$T(d) = 2\pi\sqrt{\frac{(l^2/12 + d^2)}{gd}}. \quad (4)$$

DIPENDENZA DEL PERIODO DA d

Si misuri il periodo di oscillazione T al variare della distanza d del punto di sospensione dal centro di massa (per i valori d_i corrispondenti ai fori nella sbarra) e si riporti su di un grafico di dispersione i valori misurati T_i in funzione delle distanze d_i .

Si esegua un fit dei dati con il modello (4), usando l come parametro libero, e si confronti il valore di *best-fit* \hat{l} con la lunghezza misurata dell'asta.

Si faccia un grafico dei residui

$$r_i = T_i - 2\pi\sqrt{\frac{(\hat{l}^2/12 + d_i^2)}{gd_i}}.$$

in funzione di d_i per studiare qualitativamente l'accordo del modello con i dati raccolti.

CONSIDERAZIONI PRATICHE

MISURA DEL PERIODO

Anche se la risoluzione del cronometro usato vale 0.01 s, è illusorio pensare che questo sia l'errore di misura da attribuire a misurazioni di tempo manuali. Per ridurre l'impatto del tempo di reazione, si consiglia di misurare il tempo τ che il sistema impiega a compiere 10 oscillazioni complete. Per stimare l'errore associato a τ si ripeta la misure n volte (con $n \geq 5$) e si prenda il valor medio e la deviazione standard della media delle misure come miglior stima del misurando ed incertezza associata, rispettivamente. (Va da sé che si passa da τ a T dividendo per 10 sia la misura che l'errore.)

Conducibilità Termica

- ipotesi del modello
 - stazionarietà e isolamento termico
- come si misura la temperatura? che incertezza ha?
 - strumento digitale...è a dispersione nulla? quindi?
- rappresentazione dei dati e fit
- interpretazione dei dati

Materiale	λ [W m ⁻¹ °C ⁻¹]
Alluminio	~ 200
Rame	~ 400
Ottone	~ 110

SOMMARIO

Abbiamo a disposizione due barre cilindriche (riscaldare da una resistenza elettrica da una parte e raffreddate da un sistema di acqua corrente dall'altra) e possiamo misurare la temperatura all'interno delle barre stesse in funzione della distanza da un estremo. Lo scopo dell'esperienza è quello di ricavare dalla misure effettuate la conducibilità termica del materiale.

MATERIALE A DISPOSIZIONE

- Due barre cilindriche.
- Due termistori per la misura di temperatura.
- Calcolatore con programma di acquisizione.
- Un alimentatore chiuso su due resistenze in parallelo.
- Un circuito di acqua corrente.

MISURE ED ANALISI

La quantità di calore che si trasmette per conduzione nell'unità di tempo

$$W = \frac{dQ}{dt} \tag{1}$$

è detta *flusso di calore* e nel sistema MKS si misura in Watt. All'equilibrio termico il flusso di calore attraverso la barra risulta costante (se non ci sono perdite tutta l'energia erogata dalla resistenza non può che essere assorbita dall'acqua all'altra estremità). Se S è la sezione della barra, T la temperatura ed x la posizione lungo la barra, la teoria prevede che

$$W = -\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x}, \tag{2}$$

dove la costante di proporzionalità λ è detta conducibilità termica del materiale (dato che il calore si propaga verso zone a temperatura più bassa, orientato l'asse x nel verso in cui si propaga il calore, $\Delta T/\Delta x$ risulta negativo ed è necessario il segno meno).

MISURE DI TEMPERATURA

Si misurino le temperature T_i di una serie di punti interni della barra, rispettivamente a distanza x_i dall'estremo riscaldato. Applicando la (2) e ponendo $\Delta x = x_i - x_0$ (e anzi $\Delta x = x_i$, se si fissa l'origine delle ascisse in x_0) e $\Delta T = T_i - T_0$ si avrà

$$W = -\lambda S \frac{(T_i - T_0)}{x_i}, \tag{3}$$

ovvero

$$T_i = T_0 - \frac{W}{\lambda S} x_i \tag{4}$$

(cioè ci aspettiamo che la temperatura decresca linearmente dall'estremità più calda a quella più fredda).

STIMA DELLA CONDUCIBILITÀ

Sulla base delle misure effettuate si costruisca il grafico della temperatura in funzione della posizione lungo ciascuna delle due barre. Il coefficiente angolare della retta di *best fit* rappresenta la nostra stima della grandezza $-W/\lambda S$.

Per stimare λ è necessario utilizzare il fatto che, in assenza di perdite verso l'ambiente esterno, W è il calore ceduto per effetto Joule dalla resistenza. In termini della tensione V e della corrente I che si leggono (rispettivamente in Volt e Ampere) sul display dell'alimentatore si ha

$$W = \frac{VI}{2} \tag{5}$$

(visto che si alimentano due resistenze in parallelo).

NOTE SUL PROGRAMMA DI ACQUISIZIONE

Una volta acceso il calcolatore, selezionare dalla barra delle applicazioni (in basso) l'icona con un termometro stilizzato. Questo dovrebbe aprire automaticamente una shell e mostrare la finestra principale del programma di acquisizione.

Al termine di ogni sessione di presa dati – dopo aver premuto il tasto *stop* – i dati vengono salvati automaticamente in una cartella visibile dalla finestra *Event handler*. Ricordatevi di scrivere sul *log-book* il numero del *Test stand*, quello del *Run ID* e le condizioni della presa dati!

BONUS: STIMA DELLA COSTANTE DI DECADIMENTO DEL RAFFREDDAMENTO

La costante di decadimento può essere stimata con una acquisizione lunga: dopo aver scaldato il termistore in un foro vicino alla resistenza potete spostarlo in un foro a temperatura più bassa e iniziare la presa dati finché non vedete che la temperatura è stabile. Ci si aspetta che l'andamento della temperatura col tempo sia un esponenziale decrescente opportunamente normalizzato (N) e traslato alla temperatura finale (T_f):

$$T(t; \lambda, T_f, N) = N e^{-\lambda t} + T_f \tag{6}$$

Tramite un fit dei minimi quadrati potete stimare il valore della costante di decadimento. Cosa succede se invece del raffreddamento studiamo il riscaldamento?

1 APPENDICE: VALORI TABULATI

Si riportano di seguito i valori indicativi di conducibilità termica a temperatura ambiente per alcuni

Catenaria

- ipotesi del modello
 - quali sono?
- come si misura la posizione?
 - in pixel, serve una calibrazione per trasformare in cm
- rappresentazione dei dati e fit
- interpretazione dei dati

INTRODUZIONE

Una corda inestensibile ed omogenea, vincolata ai due estremi e lasciata pendere sotto la sola azione del suo peso, si dispone nel piano verticale secondo una curva nota come *catenaria*. L'equazione di una catenaria si scrive, in generale, come

$$y = \mathcal{C}(x; a, x_0, y_0) = y_0 + a \cosh\left(\frac{x - x_0}{a}\right). \quad (1)$$

Potete verificare che, in questo modello, la coordinata del punto più basso è $(x_0, y_0 + a)$.

Lo scopo di questa esperienza è cercare di capire se e quanto questa semplice schematizzazione descriva bene la realtà in un *setup* sperimentale concreto.

MATERIALE NECESSARIO

- Una corda (oppure un filo o una catena).
- Righello o metro a nastro.
- Smartphone o macchina fotografica digitale.

MISURE ED ANALISI

Campioneremo la posizione della nostra corda in un certo numero di punti attraverso l'analisi di una fotografia digitale del nostro *setup* sperimentale. Una volta trovata la catenaria di *best-fit*, studieremo le deviazioni dei dati sperimentali dal nostro modello attraverso un grafico dei residui.



ANALISI DELL'IMMAGINE

Per misurare le coordinate dei punti di interesse potete aprire l'immagine in matplotlib (come illustrato nell'esempio alla pagina seguente), posizionando il mouse sui punti stessi e leggendo le coordinate sulla barra inferiore della finestra. Se preferite, esiste un certo numero di alternative viabili, tra cui l'utilizzo di un qualsiasi programma di manipolazione di

immagini (e.g., <https://www.gimp.org/>) oppure di una utility apposita come <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>.

Notate che, in questo modo, tutte le vostre coordinate saranno espresse in *pixel*. Per convertire (e misurare il parametro a) in unità fisiche avrete bisogno di ricavare il fattore di scala corrispondente a partire da un elemento di lunghezza nota nella vostra immagine.

Fate attenzione alla stima delle incertezze di misura. Se siete sicuri di riuscire ad identificare con sicurezza il pixel corrispondente al punto di interesse, potete assumere che la misura sia *digitale*, con una risoluzione di 1 pixel. Ma quali sono i fattori che potrebbero invalidare questa assunzione?

FIT E GRAFICO DEI RESIDUI

Una volta eseguito il fit, potete valutare l'accordo tra modello e dati attraverso l'esame del grafico dei residui:

$$r_i = y_i - \mathcal{C}(x; \hat{a}, \hat{x}_0, \hat{y}_0) \quad \text{e} \quad \sigma_{r_i} = \sigma_{y_i}. \quad (2)$$

Se il modello, valutato in corrispondenza dei parametri di *best fit*, fornisce una buona descrizione dei dati, allora i residui debbono oscillare intorno allo zero con fluttuazioni paragonabili all'ampiezza delle barre d'errore. Qualsiasi deviazione indica un potenziale problema con il modello o con la stima delle incertezze (o entrambe).

Cosa concludete dall'analisi del grafico dei residui?

CONSIDERAZIONI PRATICHE

Si consiglia di scegliere una corda (o una catena) con una densità lineare non troppo piccola, ma allo stesso tempo quanto più possibile flessibile (e, ovviamente, omogenea). Sperimentate diverse soluzioni per trovare quella che fa al caso vostro.

La parte più difficoltosa dell'esperienza sarà probabilmente il riuscire a scattare una foto con un'angolazione tale da evitare deformazioni significative nel piano della corda. A questo scopo potete aiutarvi con due o più fili a piombo—o addirittura con una griglia disegnata su un foglio di carta ed appesa opportunamente sullo sfondo (che vi aiuterebbe anche nella conversione tra pixel ed unità fisiche).

Nella stesura della relazione siete caldamente incoraggiati ad essere prodighi di dettagli sul *setup* sperimentale che avete usato (e.g., foto) e a mettere in evidenza le difficoltà che avete incontrato nella misura (e gli accorgimenti che avete utilizzato per superarle).

Suggerimenti Finali

- ➔ utilizzate il ricevimento anche con gli esercitatori/esercitatrici
- ➔ se non avete capito qualcosa, chiedete
- ➔ potete (dovete!) usare gli strumenti a disposizione per fare quello che ritenete giusto (senza rischi), la misura la fate voi
- ➔ sul lavoro in coppia: non dividetevi le cose da fare: io faccio questo, te fai quello - perchè poi non vi ricapitano più, incluso il programma python e la relazione.
 - l'esame si fa da soli