

6. Il laboratorio di fisica: perché, che cosa e come

6.1 Perché: motivazioni e finalità

- Ciò che interessa allo studente nell'attività sperimentale:
 - il contatto con il *fenomeno reale*,
 - la possibilità di *intervenire per modificare* e far funzionare le cose,
 - *capire* come le cose funzionano,
 - *acquisire tecniche* sperimentali (usare strumenti e metodi)

- Ciò che interessa l'insegnante, ovvero gli "obiettivi" didattici:
 - ❖ *Obiettivi formativi* nel campo delle *conoscenze* e delle *competenze*
La fisica è una disciplina sperimentale, il laboratorio di fisica è il momento di effettivo avvicinamento ai *fenomeni reali*, alle loro caratteristiche e *complessità*. NON si tratta quindi di eseguire "ricette di cucina" ma di
 - *indagare* e *scoprire* proprietà, leggi, relazioni, ecc.
 - *verificare* ipotesi e leggi,
 - *costruire modelli* o validarli, verificandone i *limiti di applicabilità*È importante che lo studente apprenda l'*arte della sperimentazione*; secondo la chiave di lettura di Pirsig¹, è essenziale, nel buon sperimentatore, la *capacità di selezionare* i "fatti buoni", sui quali impostare l'attività, da quelli non interessanti:
"I fatti che ci occorre veramente vedere non sono solo passivi, sono maledettamente elusivi e starsene impalati a "osservarli" non serve a niente. Quel che ci occorre è imparare a "cercarli" o ne avremo per un bel pezzo!"
Pertanto occorre che vi siano
 - momenti significativi in cui lo studente abbia la possibilità di *agire in autonomia*, fare scelte, sia pure minime, procedere per tentativi ed errori, sviluppare strategie, ecc.; non tutto deve essere "confezionato" e predisposto,
 - il laboratorio stimoli il *conceptual learning*, aiuti cioè lo studente a padroneggiare concetti base della fisica, affrontandoli attraverso la realtà sperimentale,
 - il laboratorio aiuti a capire le *basi della conoscenza in Fisica*, in particolare il ruolo della sperimentazione diretta e il saper distinguere fra ciò che si conosce perché lo si è *osservato e misurato direttamente* e ciò che si *deduce* dalla conoscenza della legge o da una ipotesi teorica forte (es. l'ipotesi della conservazione dell'energia) oppure semplicemente dal fatto che "è ragionevole"
 - ❖ *Obiettivi addestrativi* all'uso degli strumenti e degli apparati di misura e alle procedure di misura e analisi dei dati:
 - capire lo *strumento di misura* e le sue *caratteristiche* (risoluzione, portata, "errore di zero", scale, ecc.)

¹ R.M. Pirsig, *Lo Zen e l'arte della manutenzione della motocicletta*

- imparare a usare correttamente gli strumenti per ridurre gli *errori sistematici* e gli “sbagli” (es. piattello della bilancia non agganciato propriamente, errori di parallasse nella lettura, corretta taratura dell’asse dei tempi in un oscillografo, ecc.)
- imparare a *registrare correttamente i dati* (cifre significative, incertezza, unità di misura)
- imparare a valutare e separare *errori casuali* ed *errori sistematici* e a individuare gli *sbagli* (es. propagazione degli errori, dispersione dei dati in misure ripetute, confronto fra misure della stessa grandezza fatte con metodi diversi, ecc.)
- imparare a raccogliere i dati in *tabelle* e a rappresentarli in *grafici* che aiutino a interpretare i risultati (es. decidere gli intervalli per le classi di una distribuzione, le scale per gli assi di un grafico, l’organizzazione delle colonne di una tabella, ecc.)
- imparare a tenere un *registro di laboratorio*, in cui *tutte* le misure fatte (anche quelle sbagliate!) vengono annotate in buon ordine, con indicazione della data, delle condizioni sperimentali e con tutti i commenti che possono essere utili: non esiste “la bella” e “la brutta” del registro di laboratorio!
- imparare a *lavorare in gruppo*, non solo perché in molti casi non è possibile eseguire misure o predisporre l’apparato sperimentale da soli, ma per l’opportunità di scambiare idee, discutere, confrontarsi (apprendimento cooperativo) e per capire e abituarsi alle dinamiche di gruppo (equipe di lavoro)

❖ *Obiettivi nei riguardi dello sviluppo cognitivo*

Secondo Bloom:

- a) *conoscenza* della legge fisica che è alla base della misura o dell’esperimento che si esegue (es. legge di Ohm, legge dei gas perfetti, definizione di densità, ecc.)
 - b) *comprensione* del significato della legge, delle variabili che intervengono e della relazione che le lega, in modo da saperla applicare nel contesto dell’esperimento proposto
 - c) *capacità di applicare* la legge anche al di fuori del contesto dell’esperimento proposto, oppure capacità di introdurre modifiche significative all’esperimento
 - d) *capacità di analizzare* i dati per verificare la validità della legge
 - e) *capacità di sintetizzare* i risultati ottenuti e di metterli in relazione con il significato della legge
 - f) *capacità di valutare e proporre*: esaminare criticamente i risultati ottenuti, proporre eventualmente prove ulteriori, estensioni, modifiche, ecc.;
- soprattutto distinguere *quanto si apprende dalle evidenze sperimentali e quanto si “induce” sulla base delle proprie aspettative.*

Volendo leggere lo sviluppo cognitivo nella chiave di lettura di Guilford, si riconoscono:

- in **a)** e **b)** la fase che Guilford chiama della *conoscenza e memoria*,
- in **c)** la fase del *pensiero divergente*,
- in **d)** ed **e)** la fase del *pensiero convergente*,
- in **f)** la fase del *pensiero critico*

❖ *Sviluppo degli atteggiamenti*

Secondo Bloom:

- *disponibilità all’ascolto*: ad esempio essere disponibile a leggere le schede di laboratorio preparate dal docente, ad accettare le indicazioni, a rispettare le regole di sicurezza, ecc.
- *coinvolgimento*: impegnarsi a eseguire l’esperimento in modo attivo e con contributo personale,
- *accettazione* dell’esistenza di valori,
- *comprensione* non tanto delle leggi fisiche e dell’attività sperimentale quanto dei “valori” legati a tale attività e alle regole del laboratorio,
- *partecipazione*: condividere a fondo il sistema dei valori (Welt Anschau)

❖ *Altre capacità:*

- *organizzare* un lavoro sperimentale,
- *lavorare* in gruppo,
- *lavorare* in gruppo con ruolo di *leader*,
- *comunicare* i risultati del proprio lavoro (“relazione di laboratorio”),
- *capire* gli aspetti critici dell’esperimento,
- *utilizzare* abilità manuali e operative in generale

6.2 Che cosa

- *Scelta dell’esperimento*

- *obiettivi*: non debbono essere puramente addestrativi, ma è importante che vi siano sempre obiettivi di sviluppo cognitivo e di sviluppo delle capacità,
- *contenuti fisici*: accessibili allo studente e chiaramente individuabili nell’esperimento
- *risultati*: misure e modalità di esecuzione ragionevolmente semplici e lineari, risultati non marginali.

- *Tipi di esperimento*

a) Esperimenti per *studiare/verificare una legge fisica*

Sono gli esperimenti che tipicamente si fanno in un laboratorio attrezzato. La legge fisica generalmente è già nota. Possono però essere svolti anche come introduzione o preparazione alla legge.

Hanno valenze didattiche prevalenti per la *misura*, l’*analisi dei dati*, la *formalizzazione* a posteriori e per gli aspetti addestrativi in generale. Potenziano soprattutto il “pensiero convergente” e il “pensiero critico”.

b) Esperimenti *dimostrativi*

Sono usati dal docente per attirare l’attenzione e stimolare la riflessione su una particolare fenomenologia, prima di iniziare la discussione dettagliata sull’argomento. Sono particolarmente utili per la fase di sviluppo di conoscenza e comprensione e di capacità analitiche.

c) Esperimenti di *scoperta*

Sono esperimenti che hanno la caratteristica di stimolare l’interesse e la curiosità e quindi di trascinare a trovare spiegazioni, chiarendo così, generalmente a livello solo qualitativo, i concetti fisici coinvolti. Potenziano soprattutto il “pensiero divergente”

d) Esperimenti con *oggetti o fenomeni della vita di tutti i giorni*. Partono dalla *conoscenza e memoria* di cose famigliari e ben note, o che si crede di conoscere bene, e che si è abituati a descrivere con il linguaggio quotidiano. Aiutano a sviluppare il “pensiero critico” e il passaggio dal linguaggio quotidiano a quello scientifico.

e) Uso del *computer* nel laboratorio di fisica. Il computer può essere usato sia per l’analisi dei dati sia per la raccolta on-line di dati di un esperimento, mediante opportuni sensori e interfacce di collegamento al computer. Sono utili in particolare per raccogliere dati che variano molto rapidamente o molto lentamente nel tempo. Hanno potenzialità nei riguardi del “conceptual learning” e della comprensione delle basi della conoscenza in fisica, perché arricchiscono notevolmente l’acquisizione dei dati di partenza e permettono di percepire aspetti che difficilmente sarebbero acquisibili.

6.3 Come

- *Allestimento del laboratorio:*
 - disposizione dei tavoli di lavoro,
 - disponibilità di acqua, distribuzione della corrente elettrica,
 - scelta e controllo della strumentazione.
- *Il laboratorio non strutturato*
 - utilizzare tutte le occasioni per far eseguire misure e brevi esperimenti,
 - stimolare l'acquisizione e l'uso di strumenti di misura personali,
 - individuare esperimenti e misure che si fanno (o possono fare) nella vita quotidiana.
- *Il "kit di sopravvivenza"*

Il docente dovrebbe avere una propria raccolta *personale* di strumenti di misura o attrezzi di intervento utili per risolvere situazioni, fare prove fuori laboratorio, a casa o in classe, soddisfare curiosità personali. Il kit dovrebbe includere: forbici da laboratorio, coltello con cacciavite, scotch, metro a nastro, righello, calibro ventesimale, goniometro, contasecondi, bilancia da cucina, bilancia pesapersone, tester, termometro, lente di ingrandimento, ecc.
- *Modalità di conduzione*
 - strettamente guidata attraverso una scheda di lavoro dettagliata,
 - completamente libera,
 - parzialmente guidata, attraverso una scheda di lavoro di tipo generale.
- *Modalità di esecuzione da parte degli studenti*
 - procedura sperimentale completamente libera,
 - raccolta dati "tecnicamente" strutturata e organizzata
 - un problema spinoso: la *misura* e gli "errori" di misura (vedere scheda)
- *Lavoro a gruppi*
 - sempre, come prassi generale (cooperative learning),
 - solo se richiesto dal tipo di esperimento,
 - solo per la conduzione e la presa dati, ma con elaborazione individuale.
- *Il quaderno di laboratorio*
 - obbligatorio, personale di ogni studente,
 - se il lavoro è stato fatto in gruppo, si può richiedere solo il quaderno di gruppo,
 - raccolta dati e notazioni:
 - ✓ strettamente guidate attraverso una scheda-tipo,
 - ✓ parzialmente guidate attraverso indicazioni di tipo generale,
 - ✓ completamente libere.
- *La relazione di laboratorio*
 - può non essere richiesta, basta il quaderno,
 - se richiesta e se il lavoro è stato fatto in gruppo, si può chiedere:
 - ✓ solo la relazione di gruppo,
 - ✓ una relazione individuale,
 - ✓ la relazione di gruppo su alcune parti, individuale su altre,
 - se richiesta, la relazione può essere:

- ✓ strettamente guidata attraverso una scheda-tipo,
 - ✓ parzialmente guidata attraverso indicazioni di tipo generale,
 - ✓ completamente libera.
- *La valutazione*
 - della relazione:
 - ✓ si valuta solo il procedimento di misura e la correttezza dei dati presi,
 - ✓ si valuta anche la presentazione dei dati, secondo regole *indicate chiaramente* in precedenza (es. i grafici debbono avere scala e unità di misura, se i dati debbono essere riportati con il numero di cifre significative corretto, i dati debbono eventualmente essere raccolti in tabelle, ecc.)
 - del lavoro del singolo in laboratorio (abilità manuali, contributo al lavoro di gruppo, iniziativa, ecc.)

Esempio di scheda di lavoro per gli studenti

Titolo dell'esperimento:

Scopi dell'esperimento:

- indagare
- misurare

Strumentazione e materiale a disposizione:

- metro a nastro
-

Richiami teorici:

- la legge di riferimento è

Valori delle costanti naturali di interesse per l'esperimento:

- $R = 8,3 \text{ JK}^{-1}$ = costante dei gas perfetti
- $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ = carica dell'elettrone
-

Attività, misure, calcoli:

- Misura della
- Calcolo di ...

Esempio di scheda di relazione da parte degli studenti

Titolo dell'esperimento:

Scopi dell'esperimento:

- indagare
- misurare

Strumentazione e materiale a disposizione:

- metro a nastro
-

Attività, misure, calcoli:

- Tabella che raccoglie le misure della
- Grafico relativo a ...

Commenti, osservazioni, proposte:

Esempio di griglia di valutazione di attività di laboratorio

Titolo dell'esperimento:

Data

Studente	G R U P P O	Correttezza dei dati raccolti - insuff. - Media - Ottima	Presentazione dei dati: a) unità di misura esplicite / corrette b) tabelle c) grafici d)	Discussione dei risultati - insuff. - Media - Ottima	Note: - comportamento durante il lavoro, - contributi rilevanti, -	Giudizio comples- sivo

6.4 Esercizio – laboratorio di Fisica

Utilizzando strumenti di misura e attrezzi del “kit di sopravvivenza”, eseguite un esperimento *dimostrativo* o di *scoperta* su uno dei temi sotto elencati assegnati al gruppo.

Potete sostituire l'esperimento assegnato con qualunque altro esperimento purché abbia le seguenti caratteristiche:

- sia realizzato con materiale “povero” o con oggetti di vita quotidiana, facilmente trasportabili,
- riguardi un concetto o una legge fisica chiaramente individuati e rilevanti,
- contemplici misure quantitative e calcoli per la corrispondente analisi dei dati,
- fornisca risultati “sicuri” e ripetibili.

Le misure vanno prese in gruppo, ma l'elaborazione deve essere personale. La relazione deve contenere due parti:

Parte di preparazione “tecnica”:

- a) *descrizione* dell'esperimento scelto
- b) *concetti, leggi, modelli* oggetto di indagine, cioè la *fisica del problema*, con discussione esplicita dei risultati attesi e delle ipotesi di partenza
- c) *materiali* utilizzati
- d) come è stato eseguito l'esperimento (*procedimento sperimentale* e di misura)
- e) *risultati ottenuti*: presentazione adeguata dei dati raccolti possibilmente mediante tabelle e grafici, con discussione esplicita
 - > degli aspetti di criticità delle misure (ripetibilità, affidabilità)
 - > delle incertezze di misura (anche solo a livello di stima)
 - > delle conclusioni che se ne possono trarre direttamente circa la verifica delle ipotesi, concetti, legge, modello, ecc., oggetto di indagine,

Parte di preparazione “didattica”:

- f) *obiettivi formativi e addestrativi* e *valenze* nei riguardi dello sviluppo cognitivo classificandole secondo la tassonomia di Bloom o di Guilford
- g) *scheda di lavoro* per gli allievi
- h) *scheda tipo* per la raccolta e presentazione dei dati da parte degli allievi
- i) *griglia di valutazione* del lavoro degli allievi

Temi di indagine con oggetti di vita quotidiana

- titolo:* la camminata, la corsa, le scale
concetti: velocità, componenti della velocità, energia e potenza,
materiali: metro a nastro e contasecondi,
attività, misure e calcoli:

 - percorrere a passo di camminata e poi di corsa un tratto misurato in precedenza di corridoio, misurando il tempo e contando il numero di passi; calcolare la velocità media e l'accelerazione iniziale e finale, nell'ipotesi che si riesca a passare dalla velocità media a zero in un solo passo; calcolare la forza necessaria per accelerare alla partenza e frenare alla fine, il lavoro fatto e la potenza sviluppata durante la sola accelerazione iniziale e la sola frenata;
 - salire e scendere le scale misurando tempo e spazio e calcolando le componenti della velocità, l'energia e la potenza

Si raccomandano misure ripetute.
- titolo:* oscillazioni quasi-armoniche
concetti: forza, lavoro, energia, trasformazioni di energia, periodo dell'oscillazione
materiali: elastico di caucciù, bottiglia da 1,5 litri, gancio a S, contasecondi e metro a nastro
attività, misure e calcoli: misurare la lunghezza iniziale dell'elastico, appendere all'elastico la bottiglia riempita di una quantità nota di acqua e calcolare la costante elastica k della "molla"; mettere in oscillazione l'elastico con la bottiglia appesa e misurare il periodo T di oscillazione.

Per una buona molla in regime armonico vale la relazione $\frac{2p}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ dove m è la massa appesa alla molla. *Si raccomandano misure ripetute.*
- titolo:* la pressione in un palloncino
concetti: pressione nei fluidi, leggi dei fluidi
materiali: palloncino di gomma gonfiabile, lastra di plexiglas trasparente, bilancia da bagno,
attività, misure e calcoli: gonfiare il palloncino, appoggiarlo sulla bilancia da bagno, premere con la lastra di plexiglas fino a quando si forma una apprezzabile superficie piana di contatto. Misurare la forza applicata usando la bilancia, misurare la superficie di contatto e calcolare la pressione esercitata e quella interna al palloncino. Ripetere con diverse forze applicate e riportare i dati in un grafico forza verso superficie. *Si raccomandano misure ripetute.*
- titolo:* la siringa
concetti: volume e pressione nei fluidi,
materiali: siringa, elastici di caucciù tarati, gancio a S, pongo, bilancia pesapersone
attività, misure e calcoli: con lo stantuffo completamente inserito nella siringa, tappare il foro di uscita con il pongo; attaccare l'elastico di caucciù tarato all'estremo libero dello stantuffo e provare ad estrarlo. Se non si riesce, aggiungere –in parallelo– altri elastici fino a quando si riesce ad estrarlo. Misurare la forza applicata, la superficie dello stantuffo e calcolare la pressione.

Fare entrare aria nella siringa e bloccare l'uscita con il pongo. Premere verticalmente sullo stantuffo, appoggiandosi su una bilancia pesapersone, in modo da poter misurare la forza applicata in funzione del volume e verificare la legge di Boyle. *Si raccomandano misure ripetute*
- titolo:* Joule e il ditale
concetti: temperatura, quantità di calore, lavoro, equivalente meccanico della caloria
materiali: una tavoletta di legno con inserito un ditale, un pezzo di spago, un po' di sabbia e un termometro digitale per ambienti "interno-esterno", un morsetto, bilancia da cucina

attività, misure e calcoli riempire il ditale di sabbia e inserire il puntale del termometro nella sabbia, rilevare la temperatura iniziale (che si legge sul display della temperatura “esterna”), prendere poi le due estremità dello spago, passare lo spago intorno al ditale e, tirando lo spago alternativamente in un senso e nel senso opposto, fare in modo che esso sfregi contro la superficie esterna del ditale facendo salire la temperatura; rilevare la temperatura segnata dal termometro nella sabbia a intervalli regolari di tempo e contare il numero di volte che si è tirato lo spago; calcolare la quantità di calore ceduta (calore specifico della sabbia circa 0,2 cal/g, peso equivalente sabbia + ditale circa 5 g) e il lavoro fatto (stimare lo spostamento del cordino e la forza impiegata); calcolare l’equivalente meccanico ottenuto, stimando l’incertezza di misura.
Si raccomandano misure ripetute.

6. *titolo:* la sbarretta bianca e la sbarretta nera

concetti: temperatura, quantità di calore, energia radiante

materiali: sbarretta di metallo bianca e sbarretta nera, lampada da 60 W, termometri a immersione, cronometro

attività, misure e calcoli: fissare i termometri all’interno delle due barrette, esporle alla lampada, avendo cura che i raggi colpiscano in modo simile le due superfici e misurare la temperatura a intervalli regolari di tempo fino a quando si raggiunge una “temperatura di equilibrio dinamico” (non superare i 50°C). Spegner e lasciare raffreddare misurando la temperatura a intervalli regolari di tempo. Riportare i dati su un grafico. Discutere il significato di “temperatura di equilibrio dinamico” e modellizzare sia il riscaldamento che il raffreddamento.

7. *titolo:* la lampadina

concetti: corrente, tensione, resistenza e sua dipendenza dalla temperatura, potenza,

materiali: lampadina da torcia elettrica, portalampada, pila da 4,5 V, lampadina da 60 W, tester

attività, misure e calcoli: misurare col tester la resistenza elettrica della lampadina da torcia elettrica quando è spenta; collegarla alla pila, misurare la corrente con il tester e calcolare la resistenza elettrica e la potenza. Confrontare e discutere il perché della differenza di resistenza elettrica nei due casi. Per la lampadina da 60 W, misurare con il tester la resistenza elettrica quando non è collegata e usare il valore della potenza elettrica nominale per calcolare la resistenza elettrica quando la lampadina è accesa.

8. *titolo:* il flipper magnetico

concetti: l’energia di attrazione magnetica

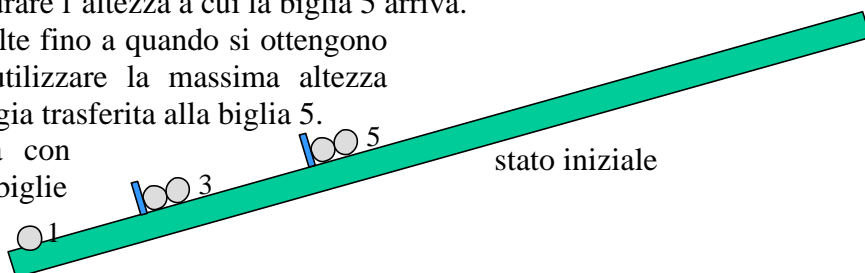
materiali: una canalina con fissati due magneti a circa 10 cm di distanza, sferette di acciaio

attività, misure e calcoli: misurare preliminarmente con un dinamometro la forza che occorre applicare per staccare una biglia dal magnetino quando si trova a immediato contatto. Calcolare l’energia di legame, assumendo che la forza vari in funzione della distanza d dalla superficie del magnete secondo la legge $F \propto d^{-4}$. Ripetete la misura e il calcolo quando è interposta un’altra biglia, come avviene per la biglia 3 della figura.

Inclinare la canalina di un angolo di almeno 30°. Disporre le biglie come in figura. Avvicinare la biglia 1 al primo magnete fino a che viene attirata e fa partire la biglia 3 e poi la 5. Misurare l’altezza a cui la biglia 5 arriva.

Ripetere la misura per alcune volte fino a quando si ottengono valori abbastanza ripetibili e utilizzare la massima altezza raggiunta per il calcolo dell’energia trasferita alla biglia 5.

Confrontare l’energia trasferita con l’energia magnetica persa dalle biglie 1 e 3.



Grandezze fisiche e loro misura²

L'operazione di misura:

- il confronto con grandezze omogenee e l'ordinamento
- il confronto con il campione di misura e la scelta dell'*unità di misura*
- la determinazione del *numero* come rapporto fra la grandezza e l'unità di misura
- la determinazione dell'intervallo di validità (*incertezza*)

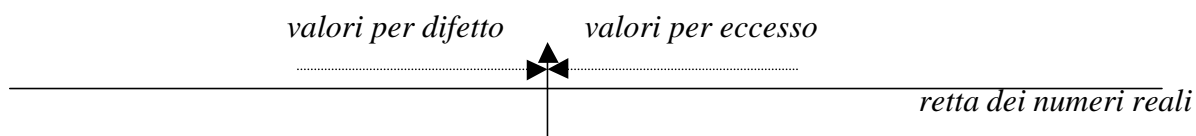
La misura è quindi: $(\text{numero} \pm \text{incertezza}) \text{ unità di misura}$:

$$l = (155 \pm 1) \text{ mm}$$

← numero
← incertezza
← unità di misura

La misura in matematica

- è un *numero reale* che esprime il *rapporto* fra la grandezza e l'unità di misura (es. $l = \frac{155 \text{ mm}}{1 \text{ mm}}$: questo spiega anche perché, spesso, nelle misure dei matematici manca l'indicazione dell'unità di misura!),
- rappresenta l'elemento di separazione fra la classe dei numeri che lo approssimano per eccesso e quella dei numeri che lo approssimano per difetto,
- in linea di principio, può essere espresso con infinita precisione (valore *vero*), perché l'operazione di individuare l'elemento di separazione può essere affinata all'infinito (passaggio al limite)

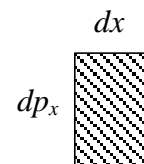


La misura in fisica

- l'operazione di misura richiede, come parte essenziale, l'individuazione di un *campione fisico* e il *confronto* con esso,
- il confronto conduce a individuare un numero che è valido all'interno di un certo *intervallo di validità finito*, caratteristico del campione (*risoluzione*),



- c'è infine una *intrinseca granularità* di base delle grandezze fisiche dovuta a due cause:
 - la *struttura microscopica* della materia
→ carica elettrica elementare e masse atomiche;
 - il limite naturale della meccanica quantistica
→ il *quanto di azione* h implica una granularità dello *spazio delle fasi*, es. x p_x : c'è un limite inferiore al *prodotto* $dx \times dp_x$ che non può essere inferiore al quanto di azione h , anche se non c'è un limite inferiore separato per ciascuna delle due grandezze dx e dp_x ; l'operazione di misura "disturba" in qualche modo la grandezza da misurare, perché implica una interazione con



²Testi per approfondimenti:

- Il primo capitolo di un testo universitario di Fisica (es. Resnick, Halliday e Krane, *Fisica*)
- *Introduzione all'analisi degli errori*, J.R. Taylor, ed. Zanichelli
- *Il sistema internazionale di misura (SI)*, A. Calcatelli, I.M.G.C.

lo strumento di misura e quindi una variazione di *azione*, che non può essere infinitesima dato che l'azione è quantizzata.

In fisica non ha senso parlare di “valore vero”, basta una buona approssimazione del valore vero: l'incertezza indica il livello di approssimazione.

Misure dirette

- L'operazione di misura avviene per confronto diretto con il campione → *unità di misura*.
- L'intervallo di validità è il minimo intervallo fra due letture del campione (*risoluzione*).
- In generale l'*incertezza* è determinata dalla risoluzione dello strumento (a meno che ci siano altri contributi importanti...).
- L'incertezza determina anche le *cifre significative* che vanno usate per esprimere il *numero* che rappresenta la misura.

Esempio: misura di lunghezza con un righello di risoluzione 1 mm

$$l = (45 \pm 1) \text{ mm}$$

Se invece stimo che la risoluzione del righello sia di 0,5 mm:

$$l = (45,0 \pm 0,5) \text{ mm}$$

←←← *cifre significative*

- L'incertezza si esprime con una (max. 2) cifre significative
 - L'ultima cifra significativa del numero deve corrispondere all'incertezza
- Altro esempio: la stessa lunghezza viene misurata con un calibro ventesimale (risoluzione 1/20 di mm = 0,05 mm = 50 μm)

$$l = (45,05 \pm 0,05) \text{ mm}$$

←←← *cifre significative*

Non è corretto invece scrivere: $l = (45050 \pm 50) \mu\text{m}$, perché con questa scrittura l'ultima cifra viene data per “significativa” mentre lo strumento non è sicuramente in grado di risolverla.

Domanda: come esprimereste il raggio della Terra? 6400 km, $6.4 \cdot 10^3$ km, $6.40 \cdot 10^3$ km?

Parole da non confondere:

- *risoluzione*: è una caratteristica dello strumento, corrisponde al minimo intervallo fra valori consecutivi risolti dallo strumento
- *sensibilità*: è una caratteristica dello strumento, corrisponde al minimo valore rilevabile con lo strumento (spesso coincide con la risoluzione)
- *precisione*: è una caratteristica dell'operazione di misura, corrisponde all'incertezza, cioè all'intervallo di validità della misura
- *accuratezza*: è una caratteristica dell'operazione di misura, indica quanto prossimo è il valore misurato al valore “accettato”

In fisica non esiste il valore “vero”, ma esiste solo un valore che viene “accettato” come la migliore approssimazione, disponibile al momento, del valore vero: anche i valori “accettati” hanno un loro intervallo di *attendibilità* e ci si aspetta che possano variare all'interno di tale intervallo, espresso, anche per i valori accettati, dall'incertezza.

Una misura può essere molto precisa ma poco accurata → *errori sistematici*

Un esempio famoso: la prima misura di Millikan della carica dell'elettrone (valore accettato di q_e : $1,60217733(5) \cdot 10^{-19}$ C)

Millikan, nella sua misura del 1911, riteneva di aver fatto una determinazione *precisa* al permille (10^{-3}), mentre si vide molti anni dopo, quando q_e fu determinato anche con metodi diversi, che l'*accuratezza* della misura era solo del percento, cioè il valore determinato da Millikan si discostava dal valore negli altri esperimenti (valore “accettato”) per alcune parti percentuali (la descrizione dell'esperimento è riportata in appendice).

I tre tipi di errore

- errori (incertezze) *casuali*: possono avvenire casualmente sia in una direzione che nella direzione opposta, perché non c'è nessun motivo a priori di pensare che la misura sia una sovrastima anziché una sottostima del valore accettato (es. la misura della velocità della singola gocciolina nell'esperimento di Millikan)
- errori *sistematici*: avvengono sistematicamente in una sola direzione perché c'è qualche motivo particolare che tende ad alterare il risultato della misura sempre nello stesso verso (es. un righello mal tarato o un errore di parallasse)
- gli *sbagli*

Le misure ripetute riducono gli errori casuali e aiutano a individuare gli sbagli.

Misure ripetute

Esempi di misure ripetute:

- ripetere N volte la misura della *stessa* grandezza x (es. il periodo di oscillazione di un pendolo)
- misurare N oggetti *diversi* nei quali tuttavia una certa grandezza x dovrebbe avere lo *stesso* valore (ad esempio la carica elettrica delle goccioline di olio dell'esperimento di Millikan).

Le quantità importanti per l'analisi statistica sono:

- Il *valor medio*: è il miglior *estimatore* del valore della grandezza x (teorema del limite centrale, vedi anche Taylor 4.2):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i$$

- Lo *scarto* della singola misura dal valor medio:

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

- La *varianza*: è la media dei quadrati degli scarti:

$$s_x^2 = \frac{1}{N} \sum_i d_i^2$$

- La *deviazione standard*: è la radice quadrata della varianza (nella definizione rigorosa si divide per $N-1$ anziché per N)

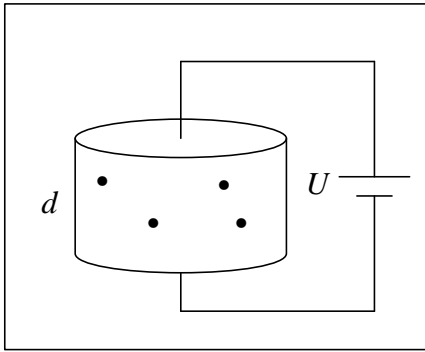
$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i d_i^2} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i d_i^2}$$

- L'*incertezza sulla media*: si ottiene dalla definizione di media propagando gli errori

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_i d_i^2} \approx \frac{1}{N} \sqrt{\sum_i d_i^2}$$

In misure ripetute, per stimare l'incertezza della *singola* misura, il miglior estimatore è la deviazione standard, perché ha un preciso significato statistico (vedi Taylor cap. 5). Spesso tuttavia, a livello di Scuola Secondaria, si usa come incertezza il modulo dello *scarto massimo*: è una stima pessimista dell'incertezza sulla singola misura, ma ha il vantaggio di essere di più facile uso.

L'esperimento di Millikan del 1911



Delle goccioline di olio vengono spruzzate in un recipiente di altezza d , ai cui estremi superiore e inferiore si può applicare una differenza di potenziale U variabile. Spruzzandole, le goccioline si caricano di una carica elettrica Q , che si suppone pari a un multiplo intero di cariche elettriche elementari q_e . In assenza di campo elettrico applicato, la gocciolina cade nel campo della gravità raggiunge una velocità limite v , data dall'equilibrio fra la forza di gravità mg e la forza di attrito viscoso che, per un corpo sferico in regime non turbolento (legge di Stokes), vale $6\pi r h v$, dove r è il raggio della goccia ed h il coefficiente di viscosità.

Esprimendo la massa in funzione del raggio, si ha così:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = 6\pi r h v \quad (1)$$

Misurando v , Millikan determinava da questa relazione il raggio della goccia:

$$r = \sqrt{\frac{9h v}{2\rho g}} \quad (2)$$

Successivamente applicava un campo elettrico E tale da arrestare la goccia. In queste condizioni, $QE = mg$, da cui si ottiene, utilizzando la (2) e ponendo $E=U/d$:

$$Q = \frac{18\pi d}{U} \sqrt{\frac{h^3 v^3}{2\rho g}} \quad (3)$$

Ripetendo la misura N volte su N goccioline diverse, trovava N valori della carica Q_i (con $i=1,N$) che cercava di scrivere come multipli interi di q_e : $Q_i = n_i q_e$.