

Laboratorio di Fisica I - A.A. 2022/2023

Esperienze di laboratorio del modulo di **Teoria degli Errori con Laboratorio**

Prof. Aurelio Agliolo Gallitto

2 settembre 2022

L'obiettivo del modulo **TEORIA DEGLI ERRORI CON LABORATORIO** è quello di acquisire le metodologie di base della Fisica Sperimentale, in particolare per l'acquisizione dei dati sperimentali e l'analisi degli errori nelle misure di grandezze fisiche. Attraverso le esperienze di laboratorio, lo studente svilupperà specifiche capacità che gli consentiranno di individuare gli aspetti essenziali dei fenomeni studiati e applicare i metodi fisico-matematici per l'elaborazione dei dati acquisiti e la validazione dei risultati ottenuti. Gli esperimenti proposti riguardano argomenti di meccanica e consentono di acquisire dati sperimentali validi per l'applicazione della teoria degli errori e dell'analisi statistica di base. Gli studenti eseguiranno quattro esperimenti: uno che consente di applicare il metodo dell'analisi grafica in scala lineare; uno che consente di applicare il metodo dell'analisi grafica in scala logaritmica; uno che consente di verificare le proprietà statistiche della deviazione standard per una distribuzione gaussiana; e un esperimento a scelta tra quelli proposti. Gli studenti dovranno svolgere almeno un esperimento con il metodo di acquisizione manuale, uno con l'utilizzo dei sensori *real time* e uno con l'uso dello smartphone.

I Gruppo: analisi grafica in scala lineare

1.1 Misura della densità di solidi omogenei di forma regolare

Avendo a disposizione almeno cinque oggetti di forma regolare, determinate la densità del materiale di cui sono costituiti gli oggetti, nell'ipotesi che tutti gli oggetti siano omogenei e cioè costituiti dallo stesso materiale.

Strumentazione

Calibro ventesimale. Il calibro ventesimale consente di misurare frazioni di millimetro e ha una risoluzione $r = 0.05$ mm; per la tipologia di strumento di misura, si assume un errore strumentale (errore di lettura più errore di precisione) pari a $\delta_x = 0.05$ mm.

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Procedimento

- a) Con il calibro ventesimale, misurate le dimensioni degli oggetti e stimate l'errore associato a ciascuna di esse.
- b) Con la bilancia digitale, misurate la massa, m , dei singoli oggetti e stimate la sua indeterminazione.
- c) Dai dati ottenuti al punto (a), determinate il volume, V , dei singoli oggetti e la corrispondente indeterminazione.
- d) Riportate i valori della massa e del volume, con i relativi errori, in una tabella (rappresentazione tabellare).
- e) Fate un grafico in scala lineare di m in funzione di V (rappresentazione grafica); con il metodo della retta di minima e massima pendenza, stimate il valore migliore della densità e l'errore a essa associato.
- f) Commentate i risultati ottenuti.

1.2 Misura della costante elastica di una molla elicoidale con il metodo statico

Avendo a disposizione un sistema massa-molla, determinate la costante elastica della molla elicoidale, con il metodo statico, assumendo che il sistema segua la legge di Hooke:

$$F_e = -k x$$

dove F_e è la forza elastica esercitata dalla molla, k la costante elastica e x la deformazione della molla.

Strumentazione

Riga graduata. La riga graduata per misure lineari è di classe II e ha due differenti scale con risoluzione: 0.5 mm e 1 mm. L'errore di precisione della riga graduata, espresso in mm, è dato da:

$$\delta_{x \text{ prec.}} = 0.3 + \frac{0.2}{1000} \times \text{V.M.}$$

L'errore nella misura dell'allungamento della molla è dato quindi dalla somma dell'errore di precisione della riga e dell'errore di lettura della scala usata.

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1.$$

Procedimento

Posizionare l'oscillatore armonico verticalmente, con un treppiedi. Per la misura della forza esercitata sulla molla, misurare il valore delle masse con la bilancia digitale e assumere $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ con errore trascurabile.

Per l'analisi dei dati procedete nel seguente modo.

- a) Per ciascuna massa, calcolate il valore della forza corrispondente e misurate la lunghezza della molla allungata e riportate i dati acquisiti in una tabella (rappresentazione tabellare).
- b) Riportate in un grafico in scala lineare i valori della forza in funzione della lunghezza della molla (rappresentazione grafica).
- c) Con il metodo della retta di minima e massima pendenza, determinate graficamente il valore della costante elastica della molla e la sua indeterminazione.
- d) Commentate i risultati ottenuti.

1.3 Misura dell'accelerazione di un oggetto in moto sopra un piano inclinato, con l'uso dei sensori *real time*

Avendo a disposizione un piano inclinato ad angolo variabile, un sensore di movimento Vernier Go Direct¹ connesso a un notebook su cui è installato il programma gratuito Vernier Graphical Analysis², misurate l'accelerazione di un carrellino in moto sopra il piano inclinato.

Strumentazione

Riga graduata. La riga graduata per misure lineari è di classe II e ha due differenti scale con risoluzione: 0.5 mm e 1 mm. L'errore di precisione della riga graduata, espresso in mm, è dato da:

$$\delta_{x \text{ prec.}} = 0.3 + \frac{0.2}{1000} \times V.M.$$

L'errore nella misura dell'allungamento della molla è dato quindi dalla somma dell'errore di precisione della riga e dell'errore di lettura della scala usata.

Sensore di movimento. Per usare il sensore di movimento Vernier Go Direct bisogna installare sul notebook il programma gratuito Vernier Graphical Analysis. Il sensore consente di acquisire contemporaneamente la posizione $s(t)$, la velocità $v(t)$ e l'accelerazione $a(t)$ di un oggetto in funzione del tempo. Il sensore ha una massima velocità di campionamento di 30 campionamenti al secondo e può rilevare distanze da 15 cm a 2.5 m, con risoluzione di 1 mm ed errore di precisione di 2 mm. Le caratteristiche tecniche del sensore sono consultabili nel sito: www.vernier.com.

Procedimento

Dopo avere montato l'apparato sperimentale e verificato il corretto funzionamento del sensore, regolate l'altezza, h , del piano inclinato in modo tale da potere acquisire facilmente i valori della posizione del carrellino in funzione del tempo.

- a) Riportate in un grafico in scala lineare i valori della posizione in funzione di t^2 (rappresentazione grafica di funzioni linearizzate), propagando gli errori di t in t^2 .
- b) Con il metodo della retta di minima e massima pendenza, determinate graficamente il valore dell'accelerazione e la sua indeterminazione.
- c) Confrontate il valore di a ottenuto con il valore atteso $a_0 = g \sin(\theta) = g(h/\ell)$ in assenza di attrito (h è l'altezza del piano inclinato ed ℓ è la lunghezza).
- d) Confrontate il valore di a ottenuto dall'analisi grafica con quello misurato direttamente dal sensore di movimento.
- e) Commentate i risultati ottenuti.

¹Per informazioni sul sensore, consultare il sito: www.vernier.com/product/go-direct-motion-detector/.

²Per informazioni sul programma, consultare il sito: www.vernier.com/products/graphical-analysis/.

1.4 Misura del momento meccanico di attrito, con l'uso dello smartphone

Utilizzando lo smartphone fissato a un dispositivo rotante, determinate il momento meccanico frenante di attrito del dispositivo rotante nella configurazione sperimentale usata.

Strumentazione

Riga graduata. La riga graduata per misure lineari è di classe II e ha due differenti scale con risoluzione: 0.5 mm e 1 mm. L'errore di precisione della riga graduata, espresso in mm, è dato da:

$$\delta_{x \text{ prec.}} = 0.3 + \frac{0.2}{1000} \times V.M.$$

L'errore nella misura dell'allungamento della molla è dato quindi dalla somma dell'errore di precisione della riga e dell'errore di lettura della scala usata.

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times V.M. + 0.1$$

Smartphone. Uno smartphone su cui è installata l'app gratuita phyphox (phyphox.org). L'app phyphox consente di registrare la velocità angolare, ω , in funzione del tempo, anche in modalità remota su notebook, abilitando l'accesso allo smartphone attraverso una rete internet sicura¹. L'errore di precisione nelle misure dei tempi introdotto dallo smartphone è riportato nelle caratteristiche tecniche descritte nell'app e in genere è di circa 0.005 s; l'errore nella misura di ω è di circa 5×10^{-4} rad/s. L'errore di lettura dello smartphone è trascurabile.

Procedimento

Dopo avere montato l'apparato sperimentale e verificato con una livella a bolla che la rotazione avvenga nel piano orizzontale, si misuri la velocità angolare, ω , in funzione di t , per un intervallo di circa 10 secondi.

- a) Fate un grafico in scala lineare di ω in funzione del tempo (rappresentazione grafica).
- b) Con il metodo della retta di minima e massima pendenza, stimate il valore migliore dell'accelerazione angolare, $\alpha = \Delta\omega/\Delta t$, del sistema e l'errore a essa associato.
- c) Ripetere le misure tre volte, con differenti velocità angolari iniziali.
- d) Misurate le dimensioni dello smartphone e la sua massa e determinate il momento d'inerzia e l'errore. Nella geometria usata, $I = m(a^2 + b^2)/12$, dove a e b sono le dimensioni dei

¹Per informazioni sull'App consultare: Staacks S. et al (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. Phys. Educ. **53** 045009.

lati dello smartphone ed m è la sua massa. Il momento d'inerzia delle parti rotanti del dispositivo si può considerare trascurabile rispetto al momento d'inerzia dello smartphone.

- e) Determinate quindi il momento meccanico frenante di attrito, $M = I\alpha$, e il relativo errore, nei tre casi registrati.
- f) Confrontate e commentate i risultati ottenuti.

II Gruppo: analisi grafica in scala logaritmica

2.1 Misura della costante elastica di un oscillatore armonico semplice massa-molla

Avendo a disposizione un sistema massa-molla e un cronometro digitale, determinate la costante elastica della molla elicoidale con il metodo dinamico.

Strumenti

Cronometro digitale. Cronometro digitale con risoluzione $r = 0.01$ s ed errore di precisione trascurabile.

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Procedimento

Misurate il periodo di oscillazione dell'oscillatore al variare della massa, con almeno con 5 differenti masse. Per ciascuna massa, misurate il tempo corrispondente a 10 oscillazioni e ripetere l'operazione almeno 3 volte. L'errore nella misura del periodo può essere determinato dalla semidisposizione dei dati e dall'errore di lettura del cronometro. L'errore di precisione nelle misure dei tempi, introdotto dal cronometro, può essere considerato trascurabile.

Per l'analisi dei dati procedete nel seguente modo.

- a) Per ciascuna massa, calcolate il valore medio del periodo (o il valore centrale dell'intervallo di dispersione) e determinate l'errore del periodo.
- b) Riportate i valori misurati di m e di T in una tabella (rappresentazione tabellare).
- c) Riportate in un grafico in scala log-log i valori della frequenza angolare, $\omega = 2\pi/T$, in funzione della massa; con il metodo della massima e minima pendenza, determinate la loro relazione funzionale.
- d) Determinate graficamente, con il metodo della massima e minima intercetta, il valore della costante elastica della molla e la sua indeterminazione.
- e) Commentate i risultati ottenuti.

Suggerimento. *Conviene portare avanti i calcoli considerando il tempo di 10 oscillazioni e alla fine dei calcoli ricavare il periodo.*

2.2 Misura della costante elastica di un oscillatore armonico semplice massa-molla, con l'uso dei sensori *real time*

Avendo a disposizione un sistema massa-molla e un sensore di movimento Vernier Go Direct¹ connesso a un notebook su cui è installato il programma gratuito Vernier Graphical Analysis², determinate la costante elastica della molla elicoidale con il metodo dinamico.

Strumentazione

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Sensore di movimento. Per usare il sensore di movimento Vernier Go Direct bisogna installare sul notebook il programma gratuito Vernier Graphical Analysis. Il sensore consente di acquisire contemporaneamente la posizione $s(t)$, la velocità $v(t)$ e l'accelerazione $a(t)$ di un oggetto in funzione del tempo. Il sensore ha una massima velocità di campionamento di 30 campionamenti al secondo e può rilevare distanze da 15 cm a 2.5 m, con risoluzione di 1 mm ed errore di precisione di 2 mm. Le caratteristiche tecniche del sensore sono consultabili nel sito: www.vernier.com.

Procedimento

Costruite un oscillatore armonico massa-molla. Dopo avere verificato il corretto funzionamento dell'apparato, misurate il periodo di oscillazione dell'oscillatore al variare della massa, con almeno con 5 differenti masse. Dal grafico di $y(t)$, misurate il tempo di 10 oscillazioni, scegliendo almeno tre differenti coppie di punti. L'errore nella misura del periodo può essere determinato dalla semidispersione dei dati. L'errore di lettura introdotto dallo sensore è trascurabile.

Per l'analisi dei dati procedete nel seguente modo.

- a) Per ciascuna massa, calcolate il valore medio del periodo (o il valore centrale dell'intervallo di dispersione) e determinate l'errore del periodo.
- b) Riportate i valori misurati di m e di T in una tabella (rappresentazione tabellare).
- c) Riportate in un grafico in scala log-log i valori della frequenza angolare, $\omega = 2\pi/T$, in funzione della massa; con il metodo della massima e minima pendenza, determinate la loro relazione funzionale.
- d) Determinate graficamente, con il metodo della massima e minima intercetta, il valore della costante elastica della molla e la sua indeterminazione.
- e) Commentate i risultati ottenuti.

¹Per informazioni sul sensore, consultare il sito: www.vernier.com/product/go-direct-motion-detector/.

²Per informazioni sul programma, consultare il sito: www.vernier.com/products/graphical-analysis/.

Suggerimento. *Conviene portare avanti i calcoli considerando il tempo di 10 oscillazioni e alla fine dei calcoli ricavare il periodo.*

2.3 Misura della costante elastica di un oscillatore armonico semplice massa-molla, con l'uso dello smartphone

Avendo a disposizione un sistema massa-molla e uno smartphone, determinate la costante elastica della molla elicoidale con il metodo dinamico.

Strumentazione

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Smartphone. Uno smartphone su cui è installata l'app gratuita phyphox (phyphox.org). L'app phyphox consente di registrare l'accelerazione, $a(t)$, in funzione del tempo, anche in modalità remota su notebook, abilitando l'accesso allo smartphone attraverso una rete internet sicura¹. L'errore di precisione nelle misure dei tempi introdotto dallo smartphone è riportato nelle caratteristiche tecniche descritte nell'app e in genere è di circa 0.005 s; l'errore di precisione nelle misure dell'accelerazione è di circa 0.01 m/s². L'errore di lettura dello smartphone è trascurabile.

Procedimento

Costruite un oscillatore utilizzando lo smartphone come massa, a cui aggiungerete ulteriori masse. Usando lo smartphone e l'app phyphox, misurate il periodo di oscillazione dell'oscillatore al variare della massa, con almeno con 5 differenti masse. Dal grafico di $a(t)$, misurate il tempo di 10 oscillazioni, scegliendo almeno tre differenti coppie di punti. L'errore nella misura del periodo può essere determinato dalla semidisersione dei dati.

Per l'analisi dei dati procedete nel seguente modo.

- a) Per ciascuna massa, calcolate il valore medio del periodo (o il valore centrale dell'intervallo di dispersione) e determinate l'errore del periodo.
- b) Riportate i valori misurati di m e di T in una tabella (rappresentazione tabellare).
- c) Riportate in un grafico in scala log-log i valori della frequenza angolare, $\omega = 2\pi/T$, in funzione della massa; con il metodo della massima e minima pendenza, determinate la loro relazione funzionale.
- d) Determinate graficamente, con il metodo della massima e minima intercetta, il valore della costante elastica della molla e la sua indeterminazione.
- e) Commentate i risultati ottenuti.

¹Per informazioni sull'App consultare: Staacks S. et al (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. Phys. Educ. **53** 045009.

Suggerimento. *Conviene portare avanti i calcoli considerando il tempo di 10 oscillazioni e alla fine dei calcoli ricavare il periodo.*

2.4 Misura del coefficiente di smorzamento di un oscillatore viscoelastico, con l'uso dello smartphone

Avendo a disposizione un oscillatore viscoelastico, costituito da una massa agganciata a un elastico, determinate il coefficiente di smorzamento dell'oscillatore.

Strumentazione

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Smartphone. Uno smartphone su cui è installata l'app gratuita phyphox (phyphox.org). L'app phyphox consente di registrare l'accelerazione, $a(t)$, in funzione del tempo, anche in modalità remota su notebook, abilitando l'accesso allo smartphone attraverso una rete internet sicura¹. L'errore di precisione nelle misure dei tempi introdotto dallo smartphone è riportato nelle caratteristiche tecniche descritte nell'app e in genere è di circa 0.005 s; l'errore di precisione nelle misure dell'accelerazione è di circa 0.01 m/s².

Procedimento

Costruite un oscillatore viscoelastico utilizzando un elastico e lo smartphone come massa, a cui aggiungerete ulteriori masse. Usando lo smartphone e l'app phyphox, registrate l'accelerazione della massa in funzione del tempo.

Per l'analisi dei dati procedete nel seguente modo.

- a) Riportate in un grafico in scala lineare i valori dell'accelerazione in funzione del tempo; misurate i valori dei massimi e i relativi tempi, da cui determinate il periodo T e la frequenza angolare $\omega = 2\pi/T$.
- b) Riportate in una tabella i dati acquisiti (rappresentazione tabellare).
- c) Riportate in un grafico in scala semi-log i valori dei massimi di $a(t)$ in funzione del tempo (rappresentazione grafica).
- d) Assumendo che $a(t)$ sia descritta dalla legge $a(t) = a_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega t + \phi)$, dove a_0 è l'accelerazione al tempo $t = 0$, γ il valore del coefficiente di smorzamento e ϕ la costante di fase, determinate graficamente con il metodo della minima e massima pendenza il valore del coefficiente di smorzamento γ e la sua indeterminazione.
- e) Tracciate nel grafico di cui al punto (c) la curva teorica con i parametri ottenuti dall'analisi grafica e commentate i risultati ottenuti.

¹Per informazioni sull'App consultare: Staacks S. et al (2018). *Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox*. Phys. Educ. **53** 045009.

III Gruppo: analisi statistica

3.1 Distribuzione statistica delle lunghezze di un campione di chiodi

Misurare con un calibro ventesimale la lunghezza di un campione di chiodi prodotti dalla stessa fabbrica.

Strumentazione

Calibro ventesimale. Il calibro ventesimale consente di misurare frazioni di millimetro e ha una risoluzione $r = 0.05$ mm; per la tipologia di strumento di misura, si assume un errore strumentale (errore di lettura più errore di precisione) pari a $\delta_x = 0.05$ mm.

Procedimento

Ogni componente del gruppo misuri la lunghezza, ℓ , di 20 chiodi. (Decidete quante misure fare, in modo che ogni componente del gruppo faccia lo stesso numero di misure e ottenere complessivamente 100 misure).

- a) Utilizzando i risultati ottenuti dal singolo componente del gruppo, costruite un istogramma normalizzato (rappresentazione grafica).
- b) Dall'istogramma, ricavate il valore medio della lunghezza e la semi larghezza a mezza altezza dell'istogramma.
- c) Calcolate analiticamente il valore medio e la deviazione standard direttamente dai dati.
- d) Raccogliendo i dati ottenuti dai vari componenti del gruppo, fate un istogramma utilizzando l'intero set di dati.
- e) Confrontate i risultati ottenuti con i due metodi nell'istogramma complessivo e nei singoli istogrammi, riportando in valori ottenuti in una tabella (rappresentazione tabellare).
- f) Dall'analisi complessiva dei dati, ricavate la lunghezza dei chiodi e la corrispondente indeterminazione.
- g) Con i valori di $\bar{\ell}$ e di σ_ℓ ottenuti, tracciate una curva di Gauss sovrapposta all'istogramma complessivo ottenuto al punto (d).
- h) Commentate i risultati ottenuti.

3.2 Misura del periodo di oscillazione di un oscillatore armonico semplice

Avendo a disposizione un sistema massa-molla e un cronometro digitale (avente risoluzione $r = 0.01$ s), misurate il periodo di oscillazione dell'oscillatore.

Strumenti

Cronometro digitale. Cronometro digitale con risoluzione $r = 0.01$ s ed errore di precisione trascurabile.

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Procedimento

Ogni componente del gruppo misuri il tempo corrispondente a 10 oscillazioni e ripeta l'operazione almeno 20 volte. (Decidete quante misure fare, in modo che ogni componente del gruppo faccia lo stesso numero di misure e ottenere complessivamente 100 misure).

- a) Utilizzando i risultati ottenuti dal singolo componente del gruppo, costruite un istogramma normalizzato (rappresentazione grafica).
- b) Dall'istogramma, ricavate il valore medio della lunghezza e la semi larghezza a mezza altezza dell'istogramma.
- c) Calcolate analiticamente il valore medio e la deviazione standard direttamente dai dati.
- d) Raccogliendo i dati ottenuti dai vari componenti del gruppo, fate un istogramma utilizzando l'intero set di dati.
- e) Confrontate i risultati ottenuti con i due metodi nell'istogramma complessivo e nei singoli istogrammi, riportando in valori ottenuti in una tabella (rappresentazione tabellare).
- f) Dall'analisi complessiva dei dati, ricavate la lunghezza dei chiodi e la corrispondente indeterminazione.
- g) Con i valori di \bar{T} e di σ_T ottenuti, tracciate una curva di Gauss sovrapposta all'istogramma complessivo ottenuto al punto (d).
- h) Commentate i risultati ottenuti.

Suggerimento. *Conviene portare avanti i calcoli considerando il tempo di 10 oscillazioni e alla fine ricavare il periodo.*

3.3 Misura del periodo di oscillazione di un oscillatore armonico semplice, con l'uso dei sensori *real time*

Avendo a disposizione un sistema massa-molla e un sensore di movimento Vernier Go Direct¹ connesso a un notebook su cui è installato il programma gratuito Vernier Graphical Analysis², misurate il periodo di oscillazione dell'oscillatore.

Strumenti

sensore di movimento. Per usare il sensore di movimento Vernier Go Direct bisogna installare sul notebook il programma gratuito Vernier Graphical Analysis. Il sensore consente di acquisire contemporaneamente la posizione $s(t)$, la velocità $v(t)$ e l'accelerazione $a(t)$ di un oggetto in funzione del tempo. Il sensore ha una massima velocità di campionamento di 30 campionamenti al secondo e può rilevare distanze da 15 cm a 2.5 m, con risoluzione di 1 mm ed errore di precisione di 2 mm. Le caratteristiche tecniche del sensore sono consultabili nel sito: www.vernier.com.

Procedimento

Dopo avere montato l'apparato sperimentale e avere verificato il corretto funzionamento, ogni componente del gruppo esegua un'acquisizione delle oscillazioni del sistema per un tempo sufficientemente lungo. Dal grafico di $y(t)$, misuri il tempo corrispondente a 10 oscillazioni e ripeta l'operazione almeno 20 volte in punti differenti dell'oscillogramma. (Decidete quante misure fare, in modo che ogni componente del gruppo faccia lo stesso numero di misure e ottenere complessivamente 100 misure).

- a) Utilizzando i risultati ottenuti dal singolo componente del gruppo, costruite un istogramma normalizzato (rappresentazione grafica).
- b) Dall'istogramma, ricavate il valore medio della lunghezza e la semi larghezza a mezza altezza dell'istogramma.
- c) Calcolate analiticamente il valore medio e la deviazione standard direttamente dai dati.
- d) Raccogliendo i dati ottenuti dai vari componenti del gruppo, fate un istogramma utilizzando l'intero set di dati.
- e) Confrontate i risultati ottenuti con i due metodi nell'istogramma complessivo e nei singoli istogrammi, riportando in valori ottenuti in una tabella (rappresentazione tabellare).
- f) Dall'analisi complessiva dei dati, ricavate la lunghezza dei chiodi e la corrispondente indeterminazione.
- g) Con i valori di \bar{T} e di σ_T ottenuti, tracciate una curva di Gauss sovrapposta all'istogramma complessivo ottenuto al punto (d).

¹Per informazioni sul sensore, consultare il sito: www.vernier.com/product/go-direct-motion-detector/.

²Per informazioni sul programma, consultare il sito: www.vernier.com/products/graphical-analysis/.

h) Commentate i risultati ottenuti.

***Suggerimento.** Conviene portare avanti i calcoli considerando il tempo di 10 oscillazioni e alla fine ricavare il periodo.*

3.4 Misura del periodo di oscillazione di un oscillatore armonico semplice, con l'uso dello smartphone

Costruite un oscillatore usando lo smartphone come massa, a cui si possono eventualmente aggiungere ulteriori masse.

Strumentazione

Bilancia digitale. La bilancia digitale ha un errore di lettura di una unità sull'ultima cifra significativa (LSD), a cui corrisponde un errore $\delta_m = 0.1$ g; l'errore di precisione della bilancia è 0.2% del valore misurato. Pertanto, l'errore complessivo, espresso in grammi, è

$$\delta_m = \frac{0.2}{100} \times \text{V.M.} + 0.1$$

Smartphone. Uno smartphone su cui è installata l'app gratuita phyphox (phyphox.org). L'app phyphox consente di registrare la velocità angolare, ω , in funzione del tempo, anche in modalità remota su notebook, abilitando l'accesso allo smartphone attraverso una rete internet sicura¹. L'errore di precisione nelle misure dei tempi introdotto dallo smartphone è riportato nelle caratteristiche tecniche descritte nell'app e in genere è di circa 0.005 s; l'errore di precisione nelle misure dell'accelerazione è di circa 0.01 m/s². L'errore di lettura dello smartphone è trascurabile.

Dopo avere montato l'apparato e averne verificato il corretto funzionamento, ogni componente del gruppo esegua un'acquisizione dell'accelerazione del sistema per un intervallo di tempo di circa 10 secondi. Dal grafico di $a(t)$, misurate il tempo di 10 oscillazioni, e ripeta l'operazione almeno 20 volte in punti differenti dell'oscillogramma.

- a) Utilizzando i risultati ottenuti dal singolo componente del gruppo, costruite un istogramma normalizzato (rappresentazione grafica).
- b) Dall'istogramma, ricavate il valore medio della lunghezza e la semi larghezza a mezza altezza dell'istogramma.
- c) Calcolate analiticamente il valore medio e la deviazione standard direttamente dai dati.
- d) Raccogliendo i dati ottenuti dai vari componenti del gruppo, fate un istogramma utilizzando l'intero set di dati.
- e) Confrontate i risultati ottenuti con i due metodi nell'istogramma complessivo e nei singoli istogrammi, riportando in valori ottenuti in una tabella (rappresentazione tabellare).
- f) Dall'analisi complessiva dei dati, ricavate la lunghezza dei chiodi e la corrispondente indeterminazione.
- g) Con i valori di \bar{T} e di σ_T ottenuti, tracciate una curva di Gauss sovrapposta all'istogramma complessivo ottenuto al punto (d).

¹Per informazioni sull'App consultare: Staacks S. et al (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. Phys. Educ. **53** 045009.

h) Commentate i risultati ottenuti.

***Suggerimento.** Conviene portare avanti i calcoli considerando il tempo di 10 oscillazioni e alla fine ricavare il periodo.*