



LABORATORIO DI FISICA SPERIMENTALE  
Ingegneria meccanica  
A.A. 2022-2023

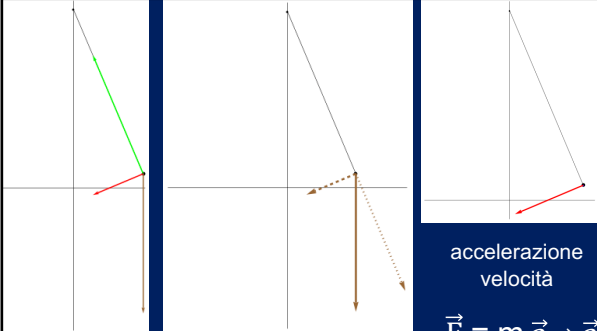


Terza esperienza:  
il pendolo semplice  
ma è veramente semplice?

lasciate il tavolo di laboratorio in ordine e pulito;  
ne siete responsabili (anche della strumentazione)



1



$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

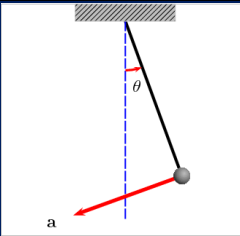
accelerazione peso  
scomposizione forza tensione filo  
accelerazione velocità

$\vec{F} = m \vec{a} \rightarrow \vec{a} // \vec{F}$

$-mg \sin(\vartheta) = ma_{\text{tang}} = m\ell \ddot{\vartheta} \rightarrow \ddot{\vartheta} + \frac{g}{\ell} \sin(\vartheta) = 0$   
 se  $\vartheta$  è "piccolo"  $\rightarrow \ddot{\vartheta} + \frac{g}{\ell} \vartheta = 0 \rightarrow \ddot{\vartheta} + \omega^2 \vartheta = 0$   
 $\arcsin(3,5 \text{ cm}/35 \text{ cm}) = 5,7^\circ = 0,10017 \text{ rad}$       $\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}} = \frac{2\pi}{T}$

2

PROMEMORIA:  
nome, cognome, FIRMA  
dati  $\rightarrow$  foglio  
grafici (con excel)  
valutazione di q e di p  $\rightarrow$  (con LabCalc)  
conclusioni  $\rightarrow$  foglio



In questa esercitazione sul pendolo verrà studiata la dipendenza del **periodo di oscillazione**

- 1) dal tempo
- 2) dalla lunghezza e l'effetto dell'attrito con l'aria su
- 3) ampiezza dell'oscillazione
- 4) velocità massima

$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

3

1) Dipendenza di T dal tempo  
2) Dipendenza di T dalla lunghezza  
3) Effetto dell'attrito sull'ampiezza  
4) Effetto dell'attrito sulla velocità

PENDOLO [1/4]

*il periodo delle piccole oscillazioni è costante: ISOCRONISMO Galilei 1602*

$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

4

**PENDOLO [1/4]**

Verificare l'isocronismo delle **PICCOLE** oscillazioni:  
**L = 35 cm** circa e misurare  $t_3$  (ogni 30 s, per 5 minuti)

$\arcsin(3,5 \text{ cm}/35 \text{ cm}) = 5,7^\circ = 0,10017 \text{ rad}$

$t_3$

$t$

$t_3 = \text{durata di 3 oscillazioni}$

5

**PENDOLO [1/4]**

L = 35,2 cm

t (min)	$t_3$ (s)	A (cm)	$\ln[A/(1\text{cm})]$
0	1,17	...	...
0,5	1,21	...	...
1,0	1,18	...	...
1,5	1,22	...	...
2,0	1,23	...	...
2,5	1,19	...	...
3,0	1,17	...	...
3,5	1,24	...	...
4,0	1,20	...	...
4,5	1,22	...	...
5,0	1,21	...	...

LabCalc  $t_3$  vs t

Se le oscillazioni fossero isocrone allora  $t_3$  vs t avrebbe l'andamento di una retta di pendenza nulla...  $t_3$  è **sostanzialmente costante**?

LabCalc:  $|p| < \sigma_p$ ? oppure  $< 2\sigma_p$ ? oppure  $< 3\sigma_p$ ?

**RIPORTARE NEL FOGLIO SE AVETE VERIFICATO SPERIMENTALMENTE CHE LE PICCOLE OSCILLAZIONI SONO ISOCRONE**

6

**PENDOLO [2/4]**

- 1) Dipendenza di T dal tempo
- 2) Dipendenza di T dalla lunghezza
- 3) Effetto dell'attrito sull'ampiezza
- 4) Effetto dell'attrito sulla velocità

7

**PENDOLO [2/4]**

$\arcsin(3,5 \text{ cm}/35 \text{ cm}) = 5,7^\circ = 0,10017 \text{ rad}$

$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

$T^2 = 4\pi^2/g L = p L$

$\rightarrow g = 4\pi^2/p$

**T**

**Studiare la relazione fra  $T^2$  e L**  
**Determinare il valore di g**

$t_{10} = \text{durata di 10 oscillazioni}$

tabella con misure L,  $t_{10}$ ,  $T^2$   
 grafico con excel  $T^2$  vs L  
 se il grafico è lineare p e  $\sigma_p$  con LabCalc

**Variare L fra 20 cm e 40 cm (NOMINALI) a passi di 4 cm**

8

i	L <sub>i</sub> (cm)	t <sub>10</sub> (s)	T <sup>2</sup> (s <sup>2</sup> )
1	44,0	13,47	1,814
2	39,9	12,78	1,633
3	35,9	12,13	1,471
4	31,8	11,41	1,302
5	28,2	10,94	1,197
6	23,8	10,08	1,016
7	20,5	9,37	0,878

**PENDOLO [2/4]**

**RIPORTARE LA TABELLA SU EXCEL**

9

**GRAFICARE T<sup>2</sup> vs L CON EXCEL** **PENDOLO [2/4]**

**CON EXCEL**

**INSERISCI GRAFICO A DISPERSIONE**

10

**GRAFICARE T<sup>2</sup> vs L CON EXCEL** **PENDOLO [2/4]**

**CLICK DESTRO SU UN PUNTO E "AGGIUNGI LINEA DI TENDENZA"**

**"INSERISCI 'GRAFICO' A DISPERSIONE"**

11

**PENDOLO [2/4]**

- Se il grafico è lineare inserire i dati in LabCalc per stabilire se la **misura della pendenza** della relazione T<sup>2</sup> vs L è stata più o meno precisa
  - molto precisa:  $\sigma_p/|p| < 1\%$
  - precisa:  $1\% < \sigma_p/|p| < 5\%$
  - poco precisa:  $5\% < \sigma_p/|p| < 20\%$
  - imprecisa:  $\sigma_p/|p| > 20\%$
- Ricavare dalla pendenza di LabCalc il valore g dell'accelerazione di gravità
- Calcolare lo **scarto relativo**  $s = \frac{g - g_N}{g_N}$  che dà un'indicazione dell'accuratezza della misura:
  - molto accurata:  $|s| < 1\%$
  - accurata:  $1\% < |s| < 5\%$
  - poco accurata:  $5\% < |s| < 20\%$
  - inaccurata:  $|s| > 20\%$

**RISULTATO ATTESO  $g_N = 9,80665 \text{ m/s}^2$**

12

**PENDOLO [3/4]**

- 1) Dipendenza di T dal tempo
- 2) Dipendenza di T dalla lunghezza
- 3) Effetto dell'attrito sull'ampiezza
- 4) Effetto dell'attrito sulla velocità

relazione fra A(t) e t:  
 $A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$

ipotesi:  $\vec{F}_A = -b\vec{v}$

$\rightarrow \ddot{\theta} + \beta \dot{\theta} + \omega^2 \theta = 0$

13

**PENDOLO [3/4]**

relazione fra A(t) e t:  $A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$

allungare L fino a sfiorare il righello (circa 45 cm)

Porre un righello sul tavolo per misurare (ogni 30 s per 5 minuti) l'elongazione massima

**ATTRITO viscoso con l'aria**

La relazione  $A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$  non è lineare. Per linearizzarla si inverte l'esponenziale:  
 $\ln[A(t)] = \ln[A_0 e^{-t/\tau}] = \ln(A_0) - t/\tau$

14

**Studiare  $\ln[A(t)/1\text{cm}]$  vs t** **PENDOLO [3/4]**

L = 44,6 cm

t (min)	t <sub>3</sub> (s)	A (cm)	$\ln[A/(1\text{cm})]$
0	1,17	4,2	1,44
0,5	1,21	3,7	1,31
1,0	1,18	3,3	1,19
1,5	1,22	2,7	0,99
2,0	1,23	2,2	0,79
2,5	1,19	2,0	0,69
3,0	1,17	1,7	0,53
3,5	1,24	1,4	0,34
4,0	1,20	1,2	0,18
4,5	1,22	1,1	0,10
5,0	1,21	0,9	-0,11

15

L = 44,6 cm **PENDOLO [3/4]**

t (min)	t <sub>3</sub> (s)	A (cm)	$\ln[A/(1\text{cm})]$
0	1,17	4,2	1,44
0,5	1,21	3,7	1,31
		3,3	1,19
		2,7	0,99
		2,2	0,79
		2,0	0,69
		1,7	0,53
		1,4	0,34
		1,2	0,18
		1,1	0,10
		0,9	-0,11

$\ln[A(t)] = \ln[A_0 e^{-t/\tau}] = \ln(A_0) - t/\tau$

Dalla misura della pendenza (LabCalc) ricavare  $\tau = -1/p$

16

**PENDOLO [4/4]**

- 1) Dipendenza di T dal tempo
- 2) Dipendenza di T dalla lunghezza
- 3) Effetto dell'attrito sull'ampiezza
- 4) Effetto dell'attrito sulla velocità

Risolviendo l'equazione differenziale del moto smorzato si può ricavare l'andamento:

$$V_M(t) = V_0 e^{-t/\tau}$$

con la stessa costante di smorzamento  $\tau$

17

**PENDOLO [4/4]**

**SENSORI PER QUESTA ESPERIENZA**

**FOTOTRAGUARDO**  
Sensibilità: 0,1 ms  
Lunghezza d'onda del LED: 880 nm

**INFRAROSSO**

Trasmissioni TxRx (e telecomandi)  
Barriera infrarossi

LED: Light when beam is blocked  
Plug in RJ12 connector from Photogate timer

Infrared beam  
Detector  
LED: Source of infrared beam

18

**PENDOLO [4/4]**

Misurare il diametro e inserire il valore corretto

SELEZIONARE "Pendulum Timer"

SELEZIONARE "Velocity" e "Period"

"Pendulum Width"

19

**PENDOLO [4/4]**

**Studiare con CAPSTONE la relazione fra  $V_M(t)$  e t**

Sensore: "fototrapiuardo e pendolo"

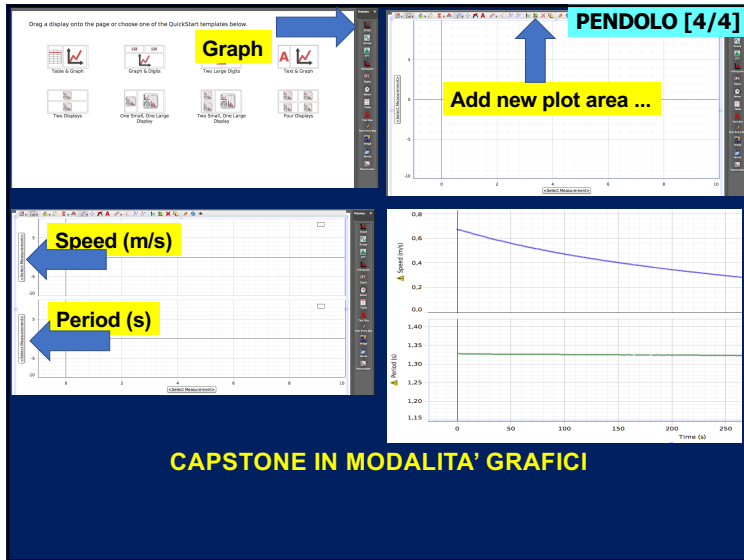
Misura della velocità (massima) in corrispondenza del punto di equilibrio

"ampiezza del pendolo"

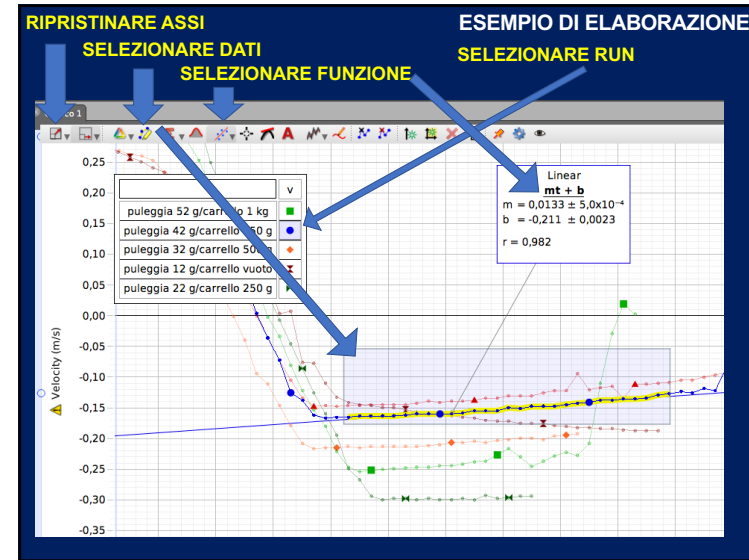
Dalla misura della pendenza ricavare  $\tau'$

$\tau = \tau' ?$

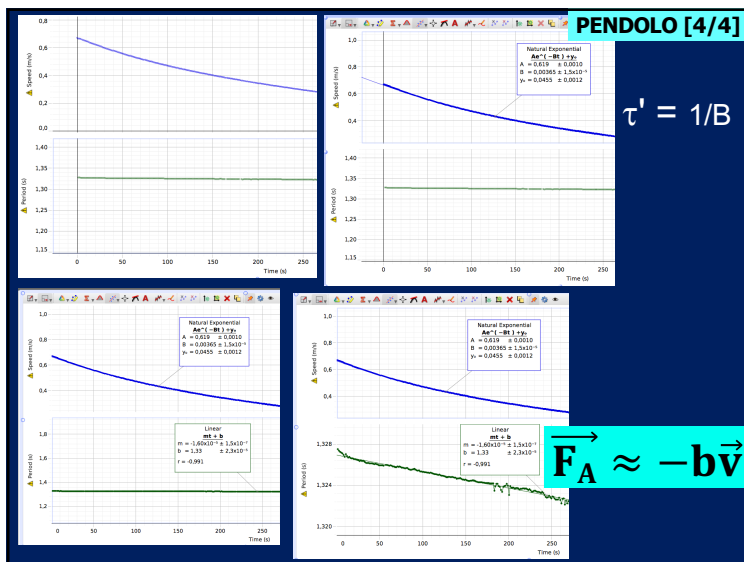
20



21



22



23

1) Dipendenza di T dal tempo

2) Dipendenza di T dalla lunghezza

3) Effetto dell'attrito sull'ampiezza

4) Effetto dell'attrito sulla velocità

Confronto smorzamenti A(t) e v(t)

**PENDOLO [5/4]**

$A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$

$V_M(t) = V_0 e^{-t/\tau}$

$\tau = \tau' ?$

**CONCLUSIONI:** qual è l'effetto dell'attrito sull'ampiezza, sulla velocità, sul periodo?

24