

Laboratorio di fisica sperimentale

**Marco Toppi - canale L-Z**

**marco.toppi@uniroma1.it**

meccanica Ingegneria



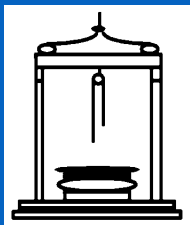
<https://corsidilaurea.uniroma1.it/it/users/marcotoppiuniroma1i>

# LABORATORIO DI FISICA SPERIMENTALE

Ingegneria meccanica

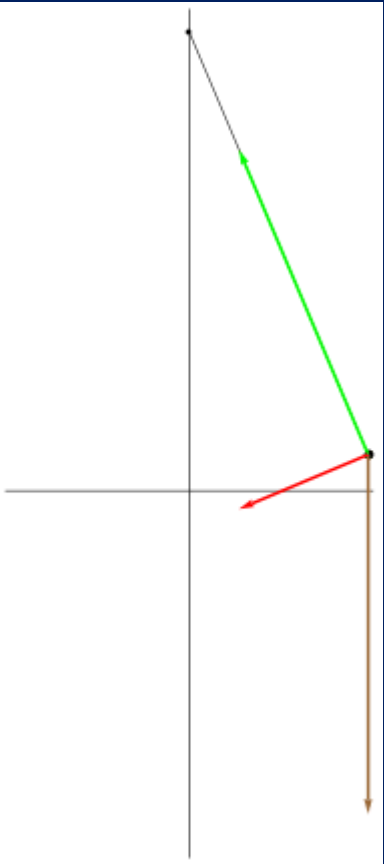


A.A. 2023-2024

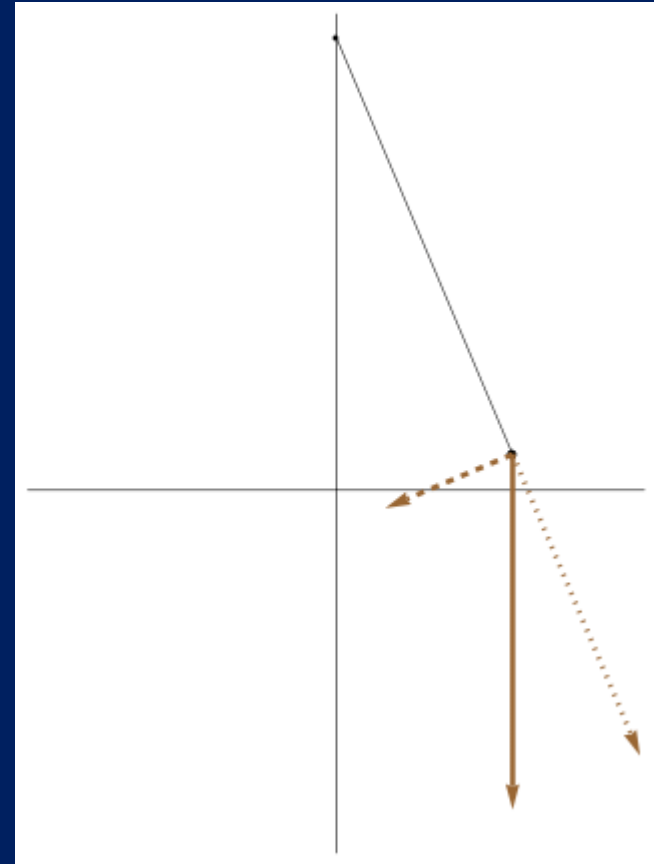


## Terza esperienza: il pendolo semplice

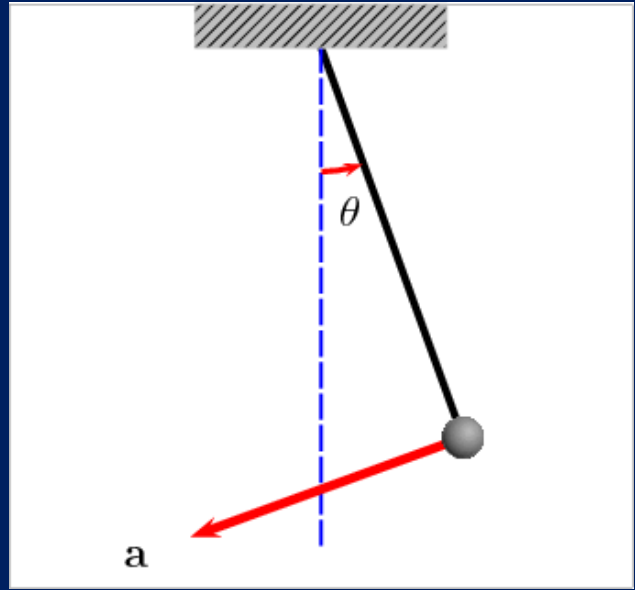
lasciate il tavolo di laboratorio in ordine e pulito;  
ne siete responsabili (anche della strumentazione)



accelerazione  
peso



scomposizione forza  
tensione filo



accelerazione  
centripeta+tangenziale  
velocità

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

$$-mg \sin(\vartheta) = ma_{\text{tang}} = m\ell\ddot{\vartheta} \rightarrow \ddot{\vartheta} + \frac{g}{\ell} \sin(\vartheta) = 0$$

$$\text{se } \vartheta \text{ è "piccolo"} \rightarrow \ddot{\vartheta} + \frac{g}{\ell} \vartheta = 0 \rightarrow \ddot{\vartheta} + \omega^2 \vartheta = 0$$

$$\rightarrow \text{soluzione: } \vartheta(t) = \vartheta_0 * \sin(\omega t + \varphi) \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}} = \frac{2\pi}{T}$$

PROMEMORIA:

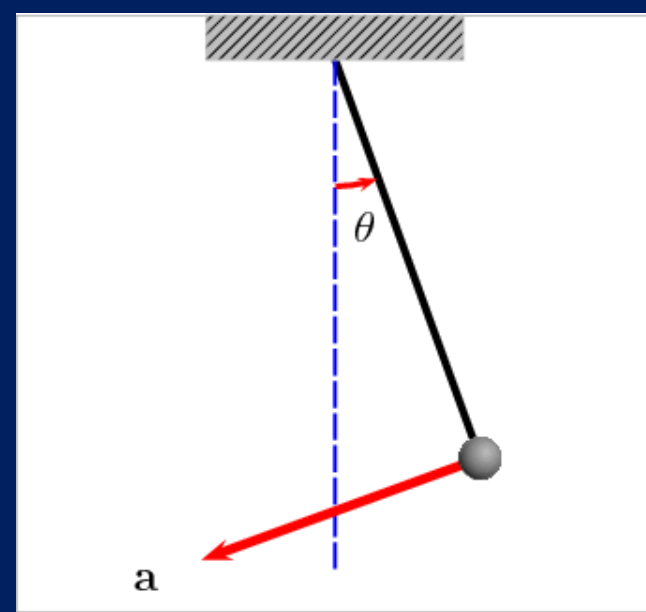
nome, cognome, FIRMA

dati → foglio

grafici (con excel)

valutazione di q e di p → (con LabCalc)

conclusioni → foglio



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

1) dal tempo

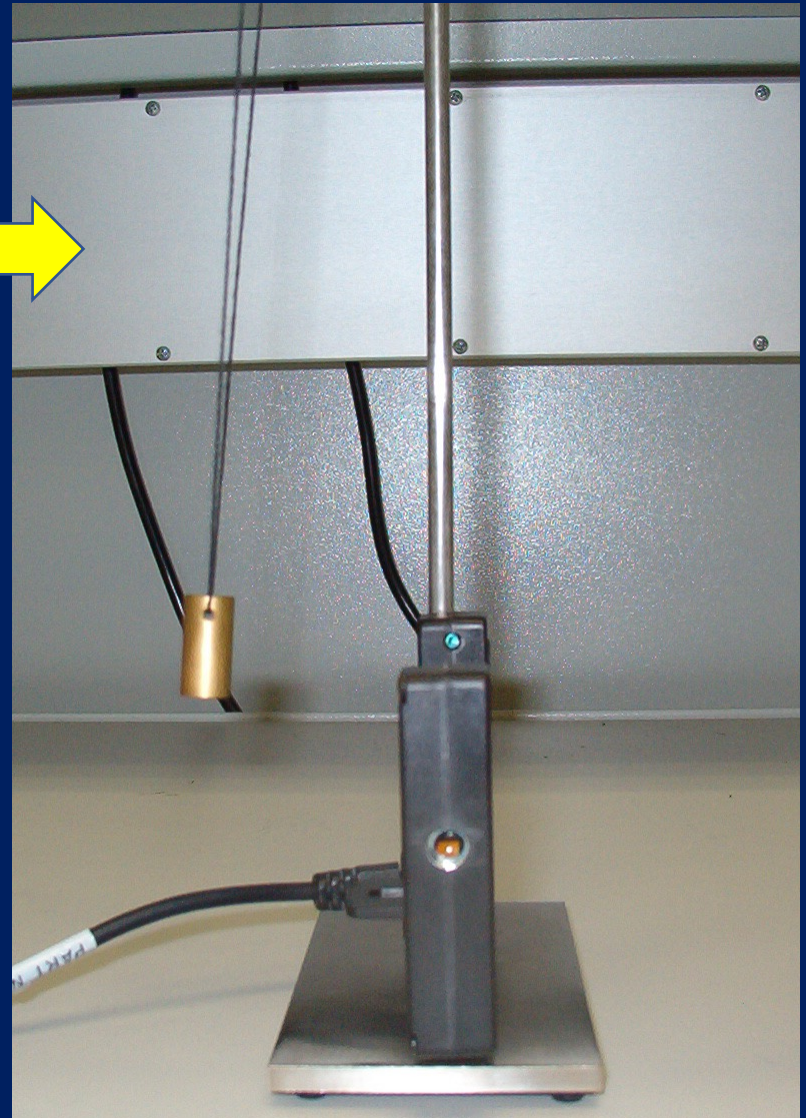
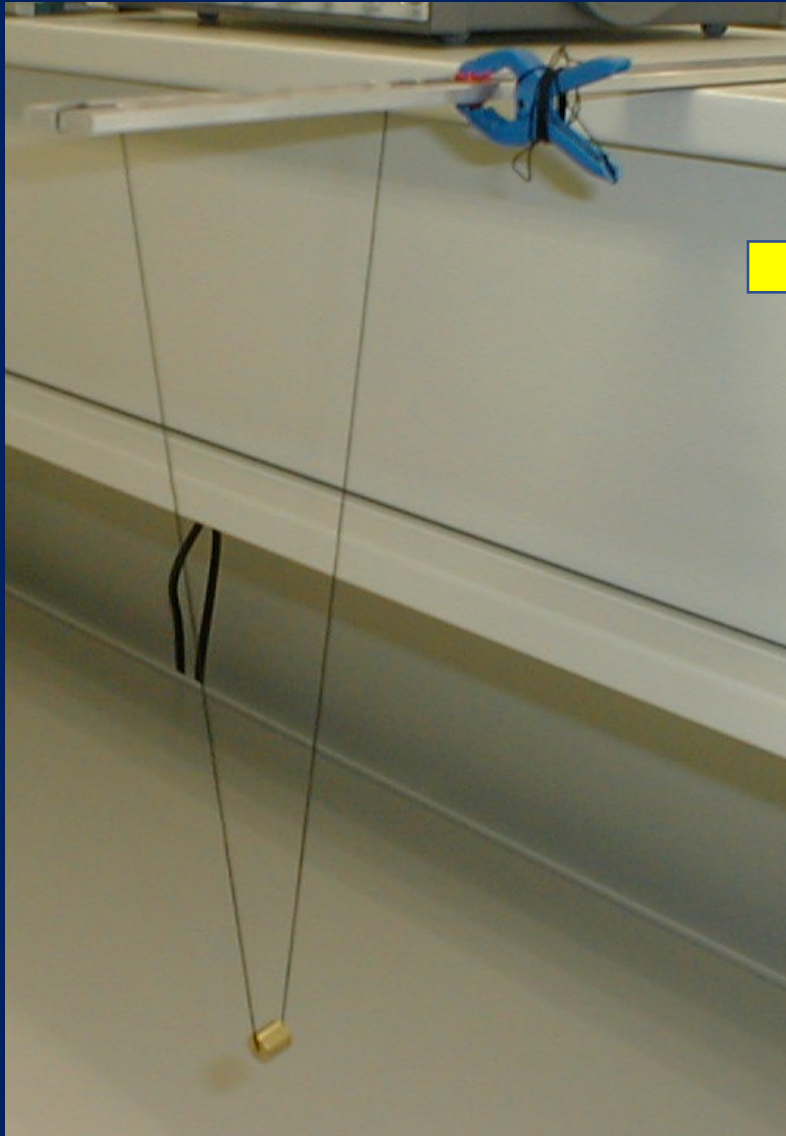
2) dalla lunghezza

e l'**effetto dell'attrito** con l'aria su

3) ampiezza dell'oscillazione

4) velocità massima

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

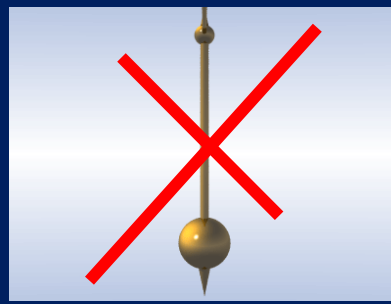
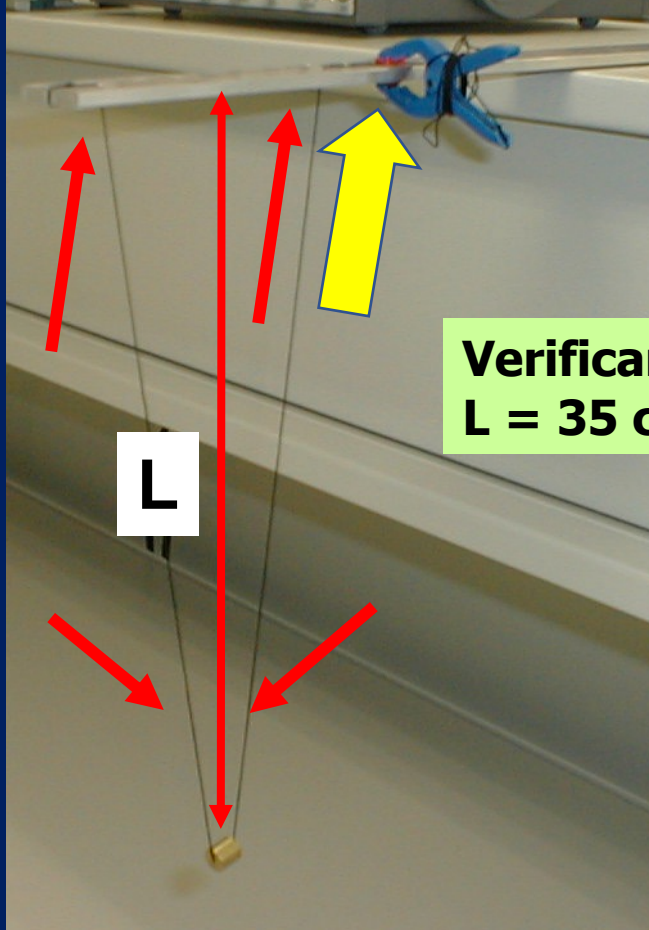


- 1) Dipendenza di T dal tempo
- 2) Dipendenza di T dalla lunghezza
- 3) Effetto dell'attrito sull'ampiezza
- 4) Effetto dell'attrito sulla velocità

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

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

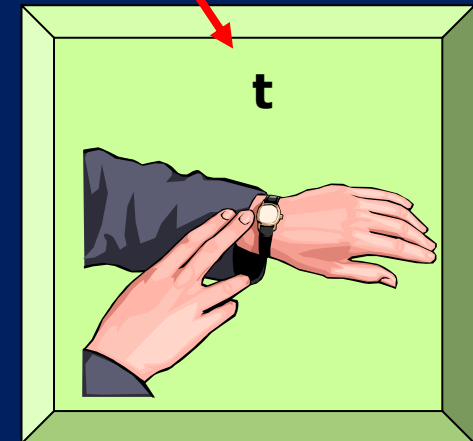
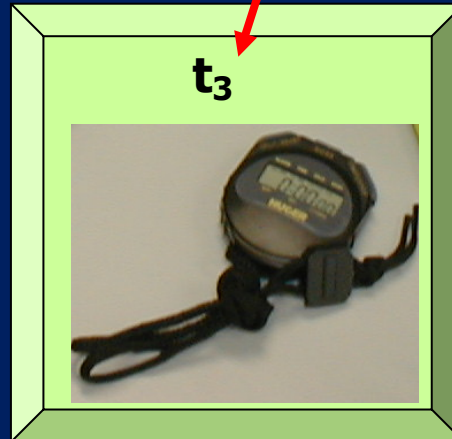
Galilei 1602



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

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

→ In regime di piccole oscillazioni



$t_3 =$  durata di 3 oscillazioni

$L = 35,2 \text{ cm}$

$t \text{ (min)}$	$t_3 \text{ (s)}$	$A \text{ (cm)}$	$\ln[A/(1\text{cm})]$
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		

**PENDOLO [1/4]**

**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  $< 3\sigma_p$ ?

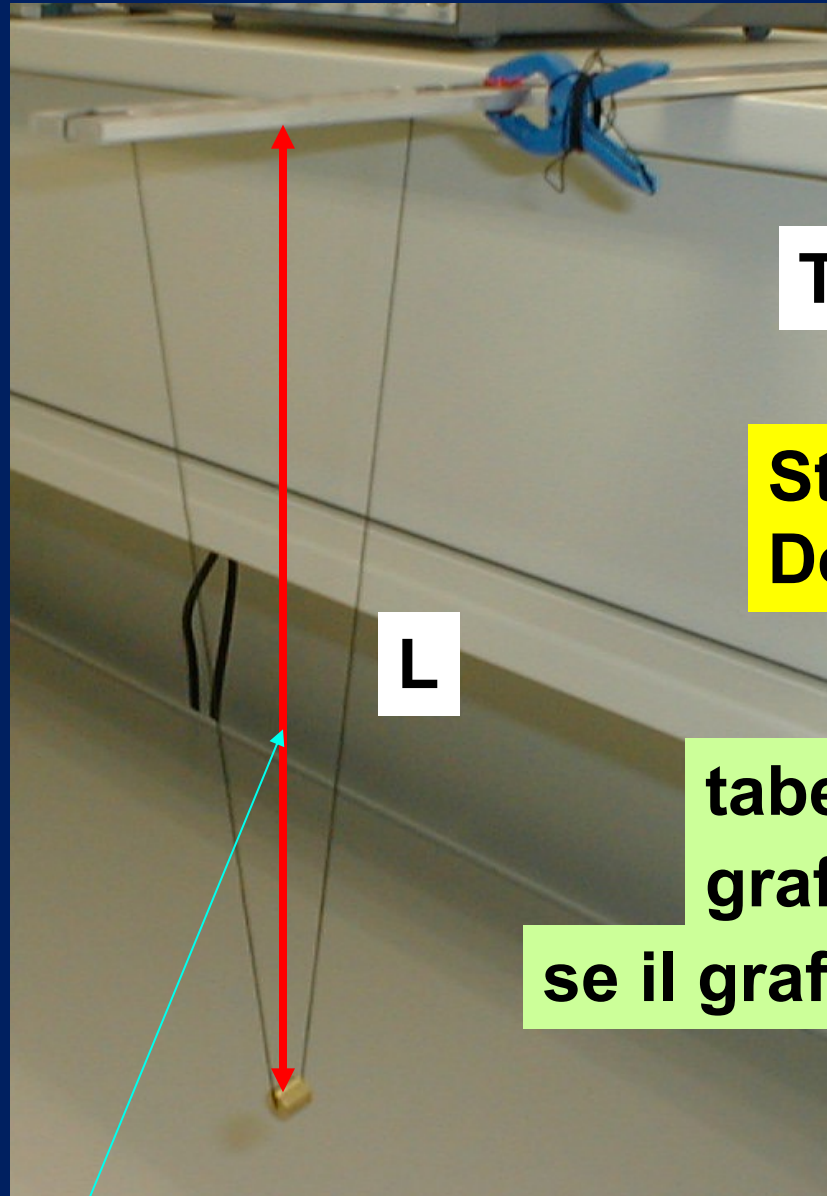
**RIPORTARE NEL FOGLIO SE AVETE VERIFICATO  
SPERIMENTALMENTE CHE LE PICCOLE  
OSCILLAZIONI SONO **ISOCRONE****



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



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



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



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

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

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

$t_{10}$  = 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

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

# RIPORTARE LA TABELLA SU EXCEL

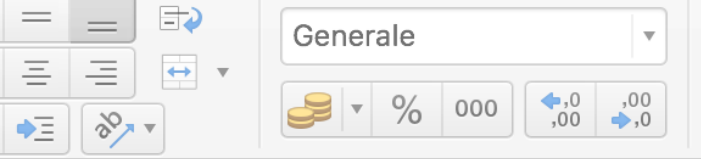
	D	E	F
1			
2		13,47	44
3		12,78	39,9
4		12,13	35,9
5		11,41	31,8
6		10,94	28,2
7		10,08	23,8
8		9,37	20,5
9			
10			

**copia: Cntl C**  
**incolla: Cntrl v**  
**undo: Cntrl z**

	I	J	K	L
1				
2	13,47	44,0	=I2*J2/100	
3	12,78	39,9	1,633	
4	12,13	35,9	1,471	
5	11,41	31,8	1,302	
6	10,94	28,2	1,197	
7	10,08	23,8	1,016	
8	9,37	20,5	0,878	
9				
10				

# GRAFICARE T<sup>2</sup> vs L CON EXCEL

PENDOLO [2/4]



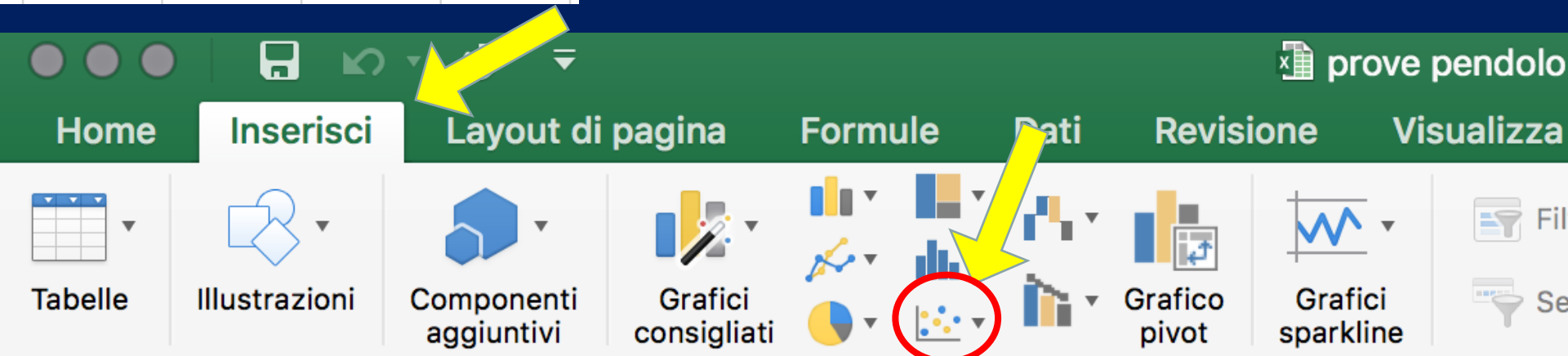
and improvements, choose Check for Updates.

I	J	K	L
13,47	44,0	=I2*I2/100	
12,78	39,9	1,633	
12,13	35,9	1,471	
11,41	31,8	1,302	
10,94	28,2	1,197	
10,08	23,8	1,016	
9,37	20,5	0,878	

'=I2\*I2/100

I	J	K
13,47	44,0	1,814
12,78	39,9	1,633
12,13	35,9	1,471
11,41	31,8	1,302
10,94	28,2	1,197
10,08	23,8	1,016
9,37	20,5	0,878

**INSERISCI  
GRAFICO A DISPERSIONE**



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



## Formato linea di tendenza



Lineare



Logaritmica



Polinomiale

Grado



Potenza



Media mobile

Per...

## Nome linea di tendenza



Automatica

Lineare (Serie1)



Personalizza

## Previsione

Futura

periodi

Retrospettiva

periodi

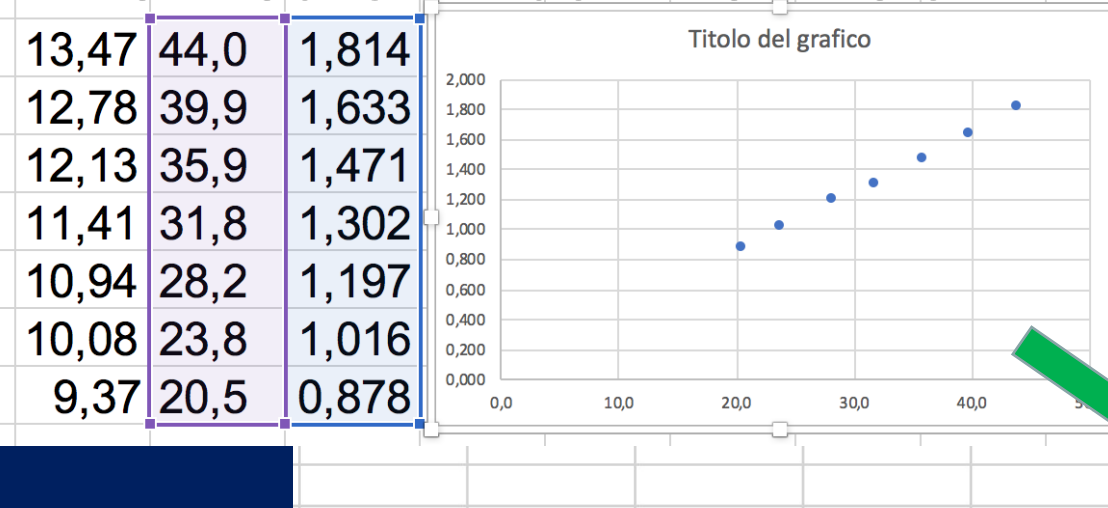


Imposta intercetta



Visualizza l'equazione sul grafico

**"INSERISCI GRAFICO A DISPERSIONE"**



1) Se il grafico è lineare inserire i dati in LabCalc per stabilire se la **misura della pendenza** della relazione  $T^2$  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:  $\sigma_p/|p| > 20\%$

2) Ricavare dalla pendenza di LabCalc il valore  $g$  dell'accelerazione di gravità

3) Calcolare lo **scarto relativo**  $S = \frac{g - g_N}{g_N}$  che dà un'indicazione dell'accuratezza della misura:

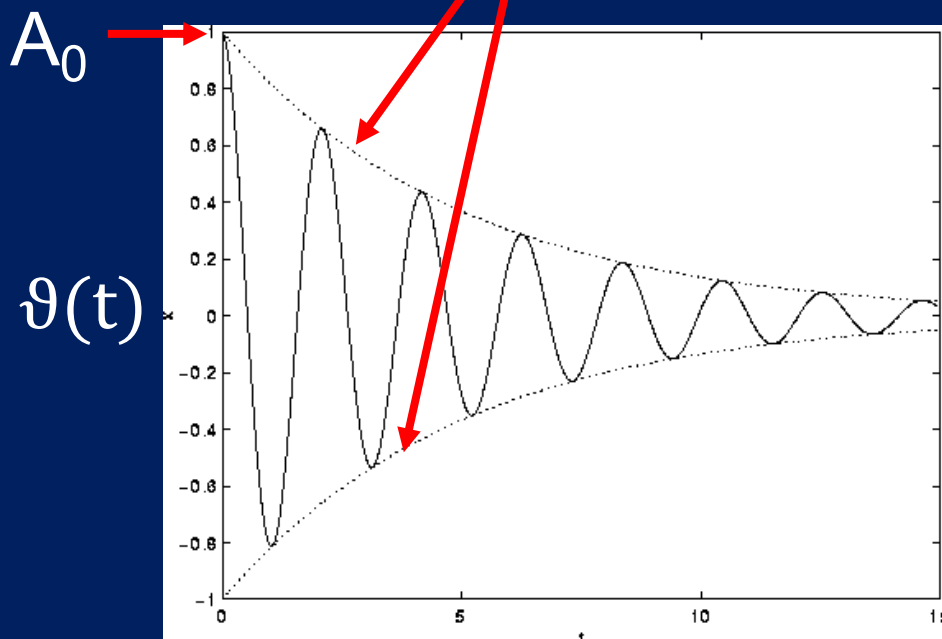
- molto accurata:  $|s| < 1\%$
- accurata:  $1\% < |s| < 5\%$
- poco accurata:  $5\% < |s| < 20\%$
- inaccurata:  $|s| > 20\%$

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

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

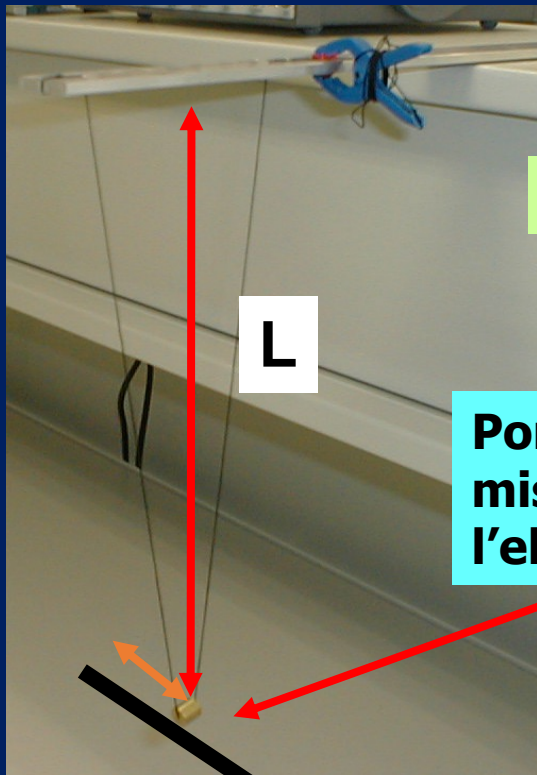


relazione fra  $A(t)$  e  $t$ :  
 $A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$



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

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

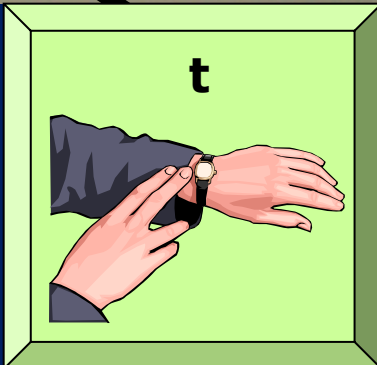
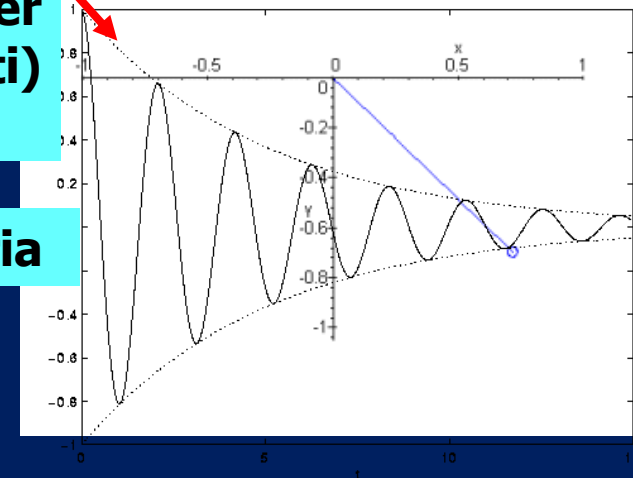


relazione fra  $A(t)$  e  $t$ :  $A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$

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

**A T T R I T O** viscoso con l'aria



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



# Studiare $\ln[A(t)/1\text{cm}]$ vs $t$

# PENDOLO [3/4]

$L = 44,6 \text{ cm}$

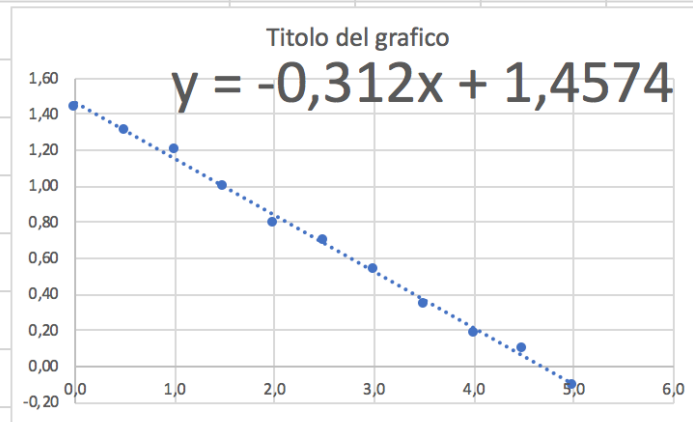
	H	I	J
13			
14	A (cm)	t (min)	$\ln[A/1 \text{ cm}]$
15	4,2	0,0	=LN(H15)
16	3,7	0,5	1,31
17	3,3	1,0	1,19
18	2,7	1,5	0,99
19	2,2	2,0	0,79
20	2,0	2,5	0,69
21	1,7	3,0	0,53
22	1,4	3,5	0,34
23	1,2	4,0	0,18
24	1,1	4,5	0,10
25	0,9	5,0	-0,11
26			

t (min)	$t_3$ (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

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

t (min)	t <sub>3</sub> (s)	A (cm)	ln[A/(1cm)]
0	1,17	4,2	1,44
0,5	1,21	3,7	1,31

A (cm)	t (min)	ln[A/1 cm]
4,2	0,0	1,44
3,7	0,5	1,31
3,3	1,0	1,19
2,7	1,5	0,99
2,2	2,0	0,79
2,0	2,5	0,69
1,7	3,0	0,53
1,4	3,5	0,34
1,2	4,0	0,18
1,1	4,5	0,10
0,9	5,0	-0,11



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  $\tau = -1/p$

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



Risolvendo 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  $\tau$

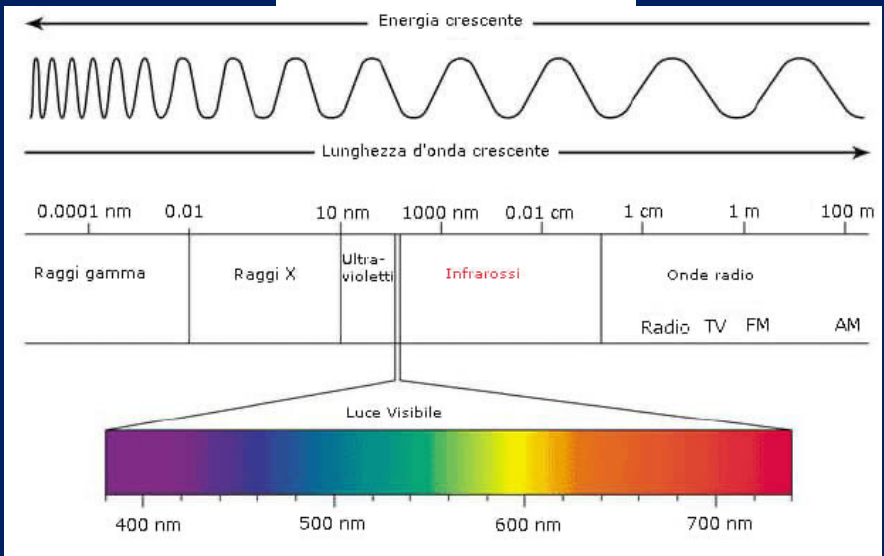
# I SENSORI PER QUESTA ESPERIENZA

## FOTOTRAGUARDO

Sensibilità: 0,1 ms

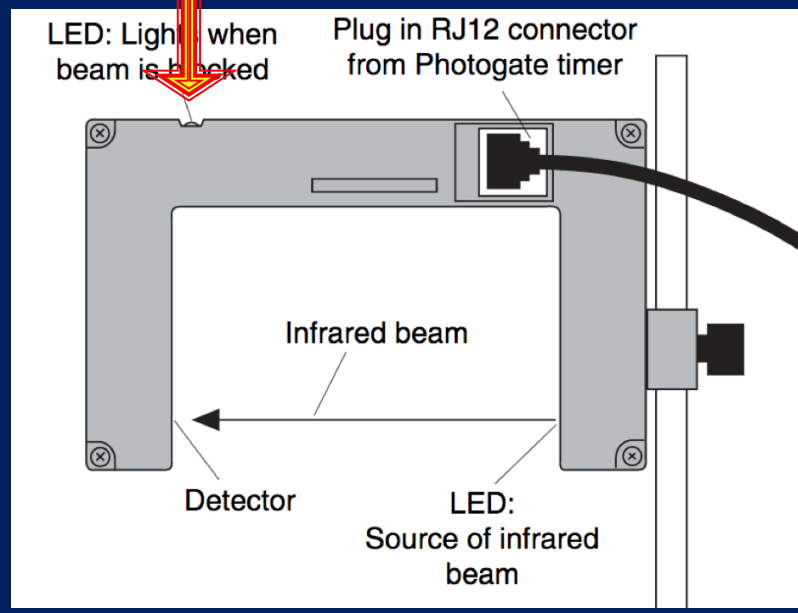
Lunghezza d'onda del LED: 880 nm

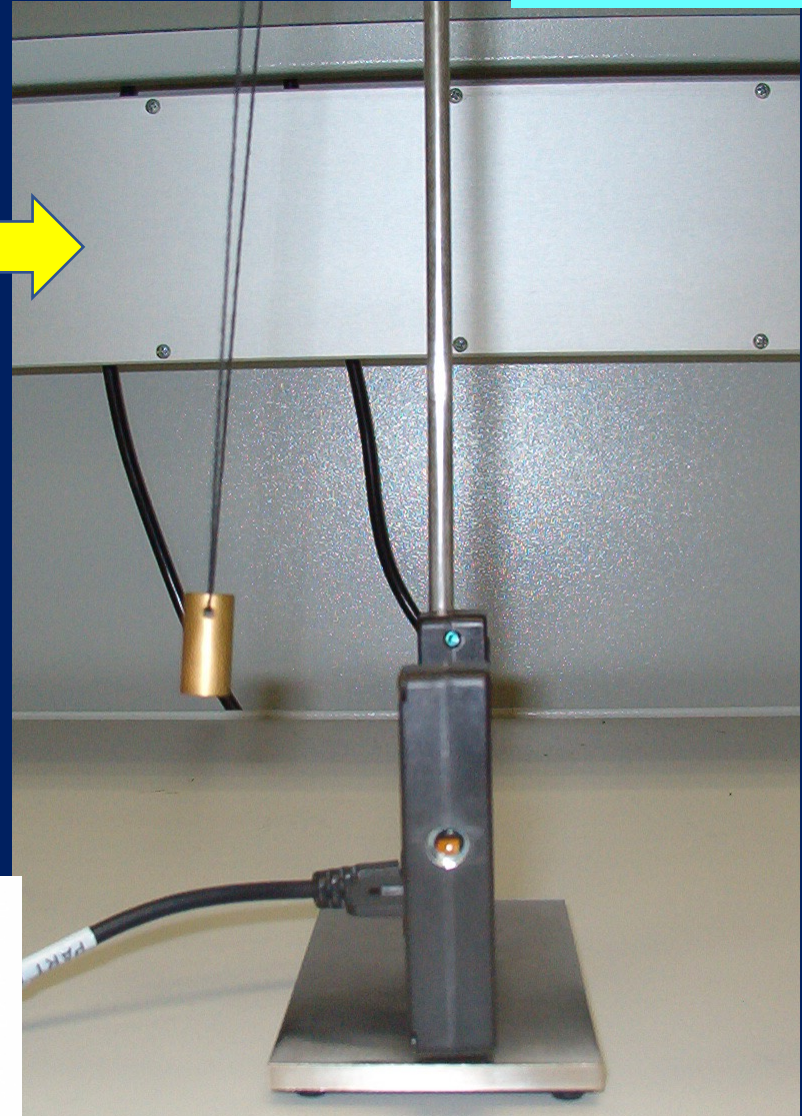
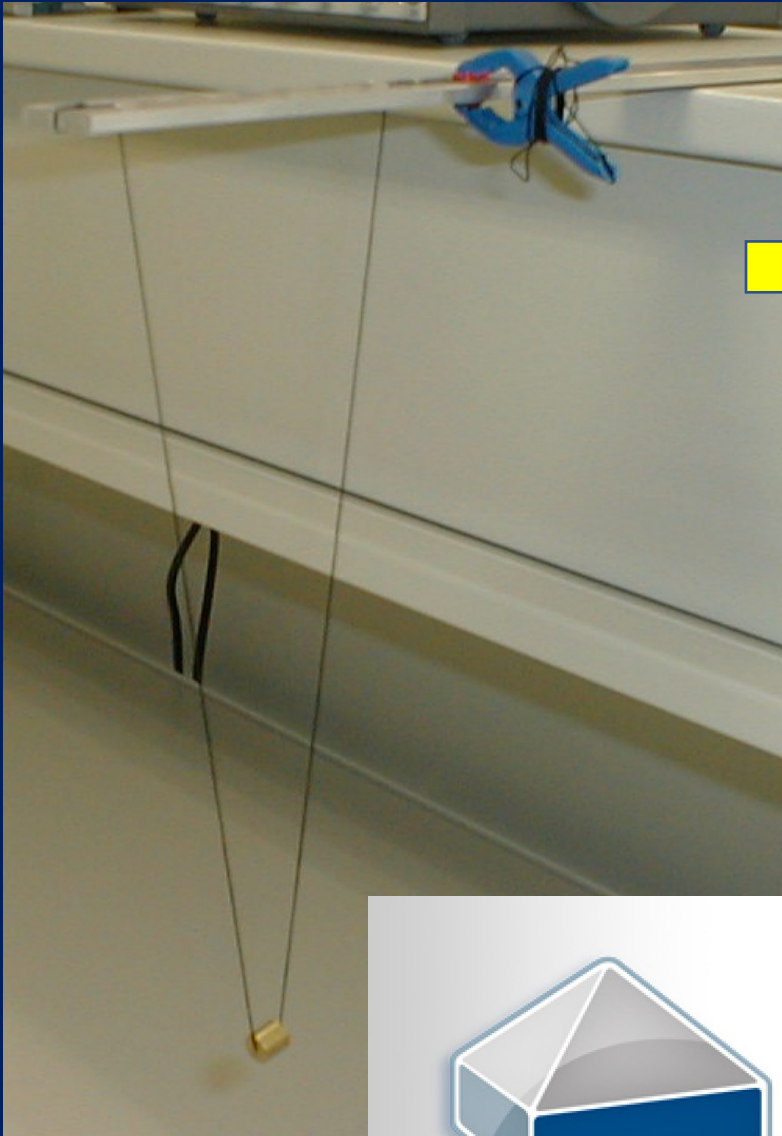
## INFRAROSSO



Trasmissioni TxRx (e telecomandi)  
Barriera infrarossi

## PENDOLO [4/4]





**+ CAPSTONE**



PASCO Capstone

Page #1

Tools x

Hardware Setup

Data Summary

Calibration

Calculator

Hardware Setup

Searching for wireless devices...

USB Link

1 2

Table & Graph

Graph & Digits

Two Large Digits

Text & Graph

Two Displays

One Small, One Large Display

Two Small, One Large Display

Four Displays

Record

Continuous Mode

00:00,00

Ready

Common Rate 20,00 Hz

Recording Conditions

Delete Last Run

Controls x

Histogram

Digits

Meter

Table

Text Box

Text Entry Box

Image

Movie

Drag a display onto

# HARDWARE SETUP

Page #1

Tools x

Hardware Setup

Searching for wireless devices...

USB Link

1 2

- Photogate
- Time Of Flight Accessory
- Photogate with Pulley
- Free Fall Adapter
- Laser Switch
- Geiger Counter
- General Counter
- Drop Counter
- Flow Rate Sensor
- Rotational Dynamics App
- 4 to 1 Adapter

Choose Interface

Page #1

Tools x

Hardware Setup

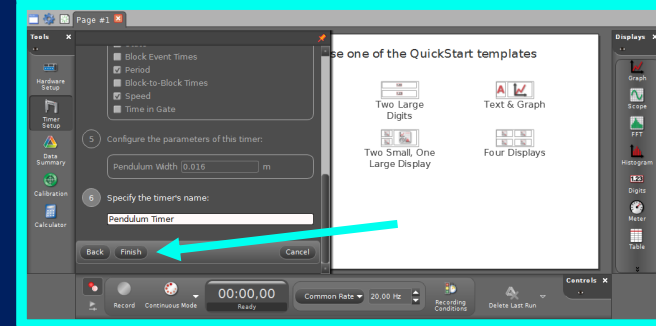
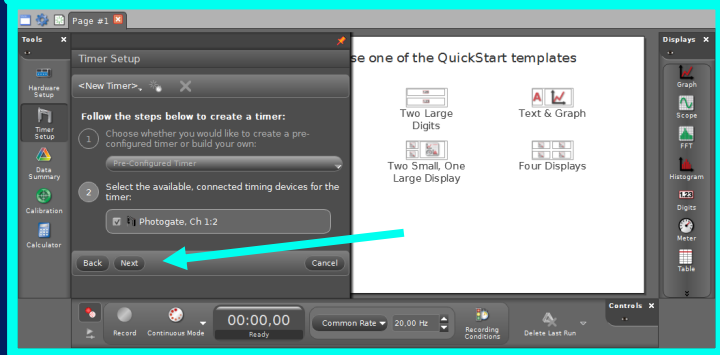
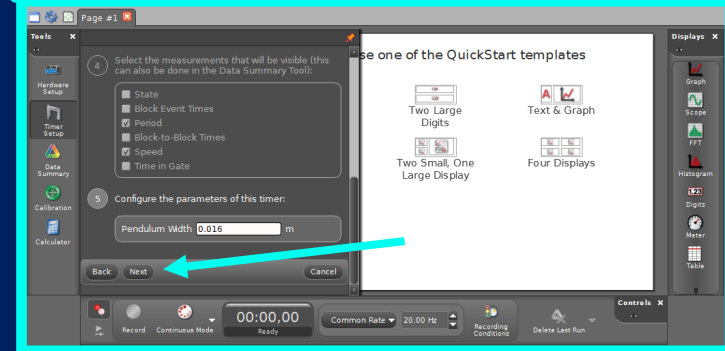
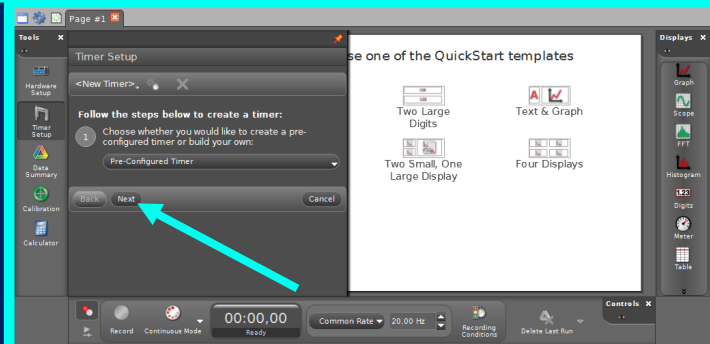
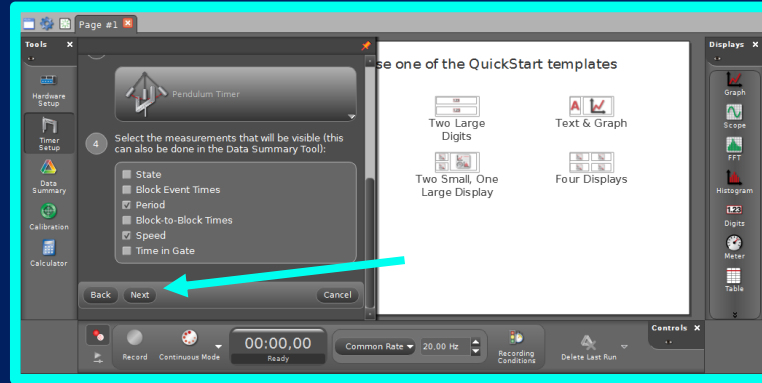
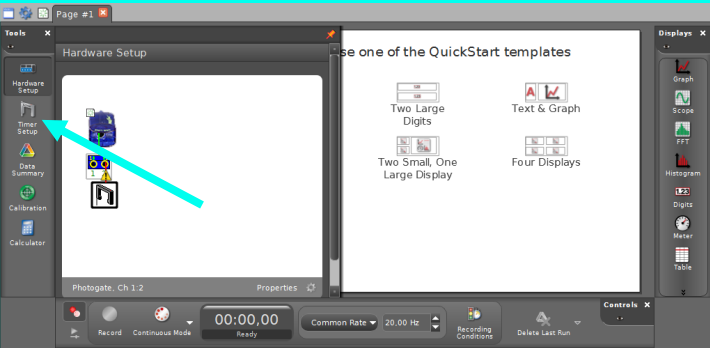
Searching for wireless devices...

USB Link

1 2

Pendulum Timer





Drag a display onto the page or choose one of the QuickStart templates below.

Table & Graph    Graph & Digits    Two Large Digits    Text & Graph

Two Displays    One Small, One Large Display    Two Small, One Large Display    Four Displays

**GRAPH**

- Graph
- Scope
- FFT
- Histogram
- Digits
- Meter
- Table
- Text Box
- Text Entry Box
- Image
- Movie
- Graph

Selezionare la misura da graficare

**SPEED**

Speed (m/s)

Time (s)

**PERIOD**

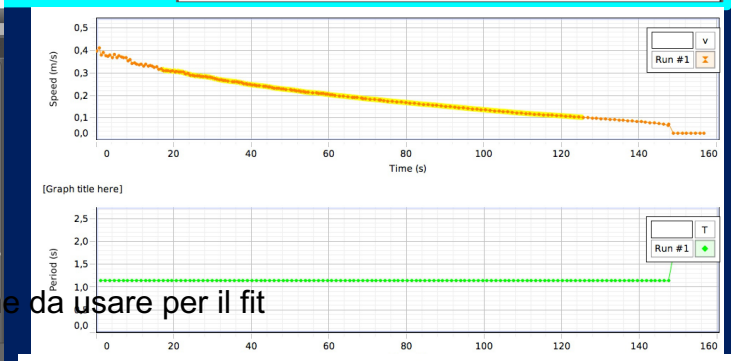
Period (s)

Time (s)

Selezione dell'intervallo di misura

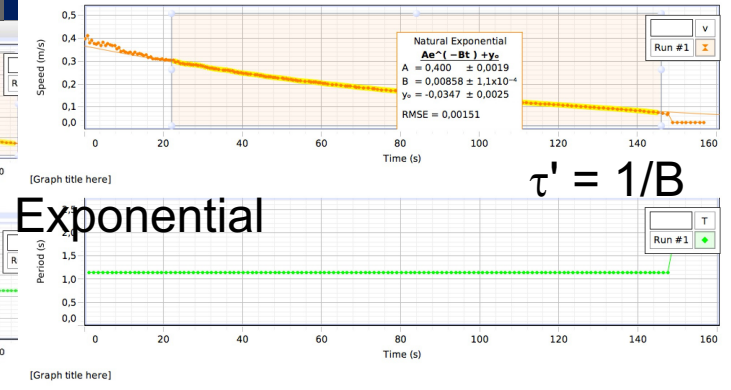
Record: per iniziare la misura

Selezione della funzione da usare per il fit



Natural Exponential

- Proportional:  $Ax$
- Linear:  $mt + b$
- Quadratic:  $Ax^2 + Bx + C$
- Cubic:  $A + Bx + Cx^2 + Dx^3$
- Polynomial:  $A + Bx + Cx^2 + \dots + Cx^n$
- Power:  $Ax^{-1}$  to  $Ax^n$
- Inverse (no offset):  $Ax + B$
- Inverse:  $A/(x-B) + C$
- Inverse Square (no offset):  $Ax^2 + B$
- Inverse Square:  $A/(x-B)^2 + C$
- Inverse Power:  $A/(x-B)^n + C$
- Natural Logarithm:  $A \ln|(x-B)| + C$
- Natural Exponential:  $Ae^{-(x-B)} + C$
- Base-10 Logarithm:  $A \log_{10}|(x-B)| + C$
- Base-10 Exponential:  $A 10^{-(x-B)} + C$
- Inverse Exponent:  $A(1 - e^{-(x-B)}) + C$
- Sine:  $A \sin(x + \phi) + C$
- Sine Series:  $A_1 \sin(x + \phi_1) + A_2 \sin(x + \phi_2) + \dots + A_n \sin(x + \phi_n) + C$
- Damped Sine:  $Ae^{-(x-B)} (\sin(x + \phi)) + C$
- Cosine Squared:  $A \cos^2(x + \phi) + C$
- Gaussian:  $A e^{-((x-B)/D)^2} + C$
- Normalized Gaussian:  $(1/\sqrt{2\pi}) e^{-((x-B)/D)^2} + C$
- User Defined:  $f(x)$





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

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

$$V_M(t) = V_0 e^{-t/\tau'}$$

Confronto smorzamenti  $A(t)$  e  $v(t)$



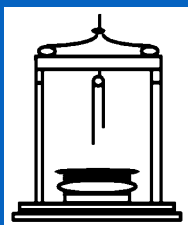
$$\tau = \tau' ?$$

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

# LABORATORIO DI FISICA SPERIMENTALE

Ingegneria meccanica

A.A. 2023-2024



a giovedì 9 MAGGIO

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

