

*6 maggio 2020*

**Incontro “Lab2Go@home”**

“Sensate esperienze”:  
**l'avventura della misura del tempo**

**Usiamo come bussola queste parole: sensate esperienze, misura e tempo.**

**PARTIAMO PARLANDO VELOCEMENTE DEL PIANO INCLINATO:**

nel suo famoso esperimento Galileo usa l'orologio ad acqua, capiamo la natura dell'esperimento per discutere il ruolo che svolgeva l'orologio ad acqua.

**VEDIAMO, POI, COME FUNZIONA UN OROLOGIO AD ACQUA**



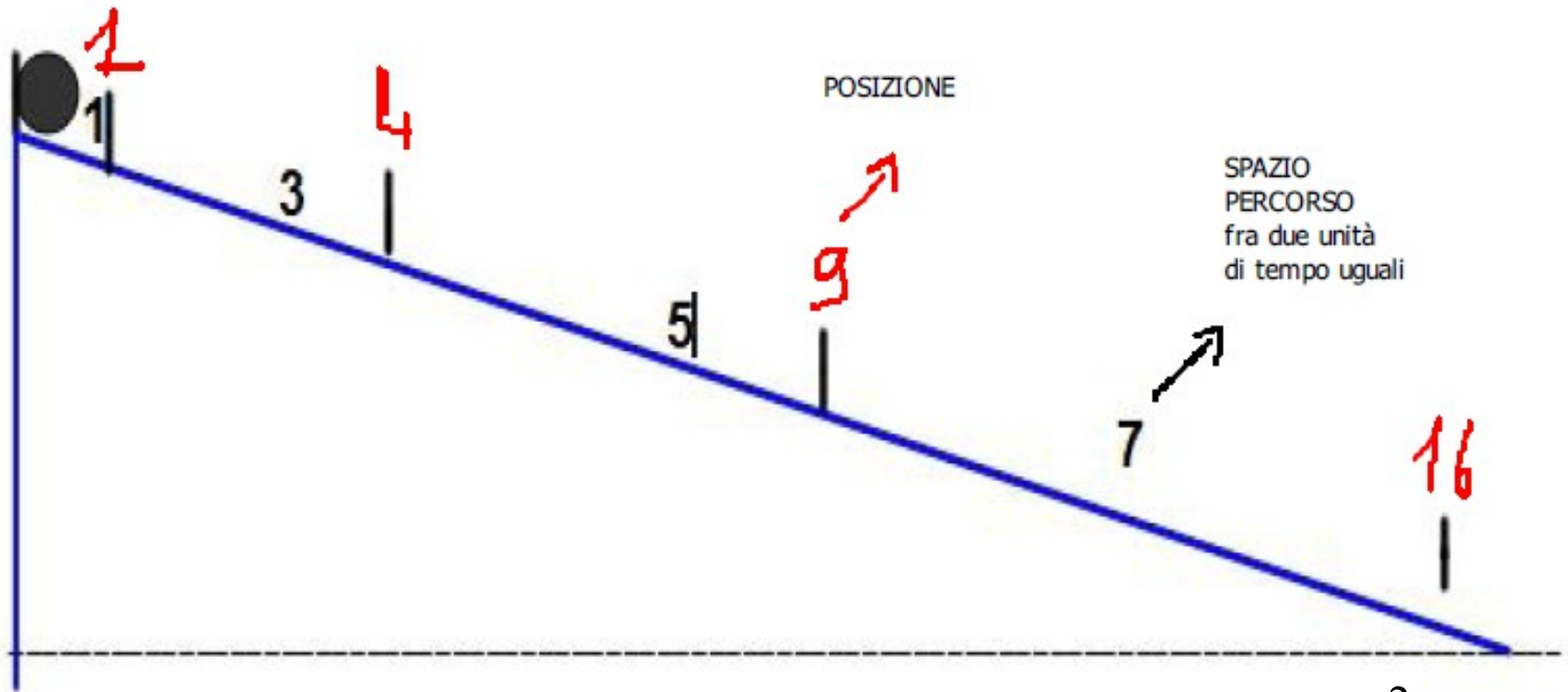
per imparare concetti generali che sono importanti in fisica.

**USIAMO L'OROLOGIO AD ACQUA**



per vedere cosa è in grado di fare e dire la nostra intorno al dibattito storico sullo scetticismo riguardante la effettiva esecuzione di un così preciso esperimento da parte di Galileo

# La legge di caduta libera: la ricerca della giusta proporzione



$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{t_2^2}{t_1^2}$$

“[...] si faceva in esso scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotondata e pulita; costituito che si era il detto regolo pendente, elevando sopra il piano orizzontale una delle sue estremità un braccio o due ad arbitrio, si lasciava (come dico) scendere per il detto canale la palla, notando, nel modo che appresso dirò, il tempo che consumava nello scorrerlo tutto, replicando il medesimo atto molte volte per assicurarsi bene della quantità del tempo, **nel quale non si trovava mai differenza né anco della decima parte d’una battuta di polso**. Fatta e stabilita precisamente tale operazione, facemmo scender la medesima palla solamente per la quarta parte della lunghezza di esso canale, e misurato il tempo della sua discesa, si trovava sempre puntualissimamente esser la metà dell’altro; e facendo poi l’esperienza di altre parti, esaminando ora il tempo di tutta la lunghezza col tempo della metà, o con quello delli due terzi o dei  $3/4$ , o in conclusione con qualunque altra divisione, per esperienze ben cento volte replicate sempre s’incontrava, **gli spazi passati esser tra loro come i quadrati de i tempi, e questo in tutte le inclinazioni del piano**, cioè del canale nel quale si faceva scender la palla; **dove osservammo ancora i tempi delle scese per diverse inclinazioni mantener esquisitamente tra loro quella proporzione che più troveremo essergli assegnata e dimostrata dall’Autore.**”

# Lo scetticismo sull'esperimento di Galileo

Nel 1953, Alexandre Koyrè (1892-1964; storico della scienza e filosofo russo naturalizzato francese),

giudicò il metodo utilizzato da Galileo troppo ingegnoso e perfetto per essere vero...

L'esperimento descritto da Galileo sarebbe dunque solo un racconto basato su ciò che lo scienziato si aspettava, su base deduttiva, che sarebbe dovuto accadere.

Critica peggiore per Galileo non avrebbe potuto esserci...

## A difesa di Galileo (1):

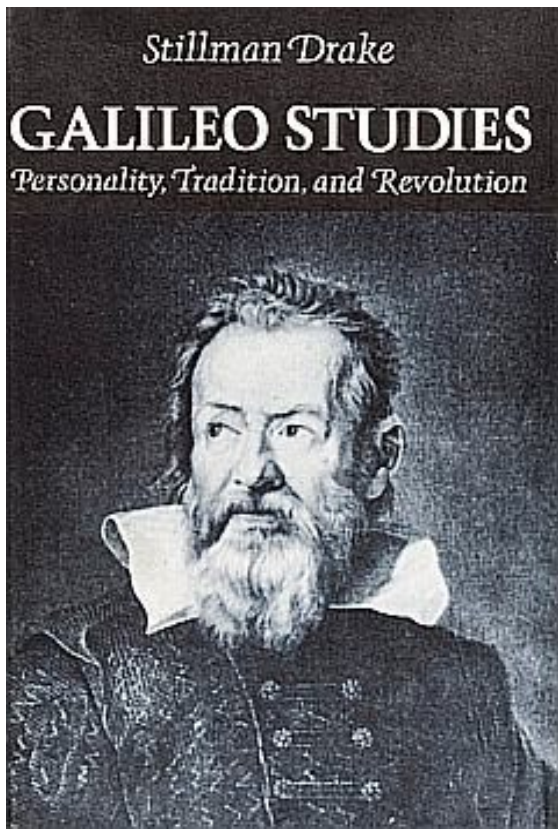
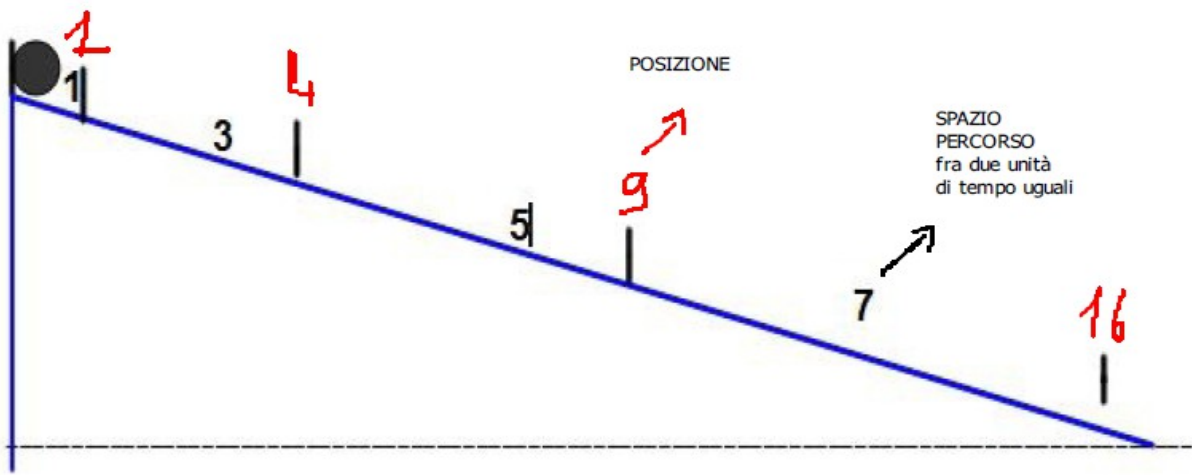
Thomas Settle, nel 1961 era un dottorando di storia della scienza. Ricostruì l'orologio ad acqua utilizzando al posto della vasca un vaso da fiori e fece rotolare palle da biliardo lungo un asse di pino di un metro e ottanta per settanta. Affermò di aver raggiunto la precisione di un decimo di secondo (quella "dichiarata" da Galileo) dopo diversi tentativi e "allenamenti".

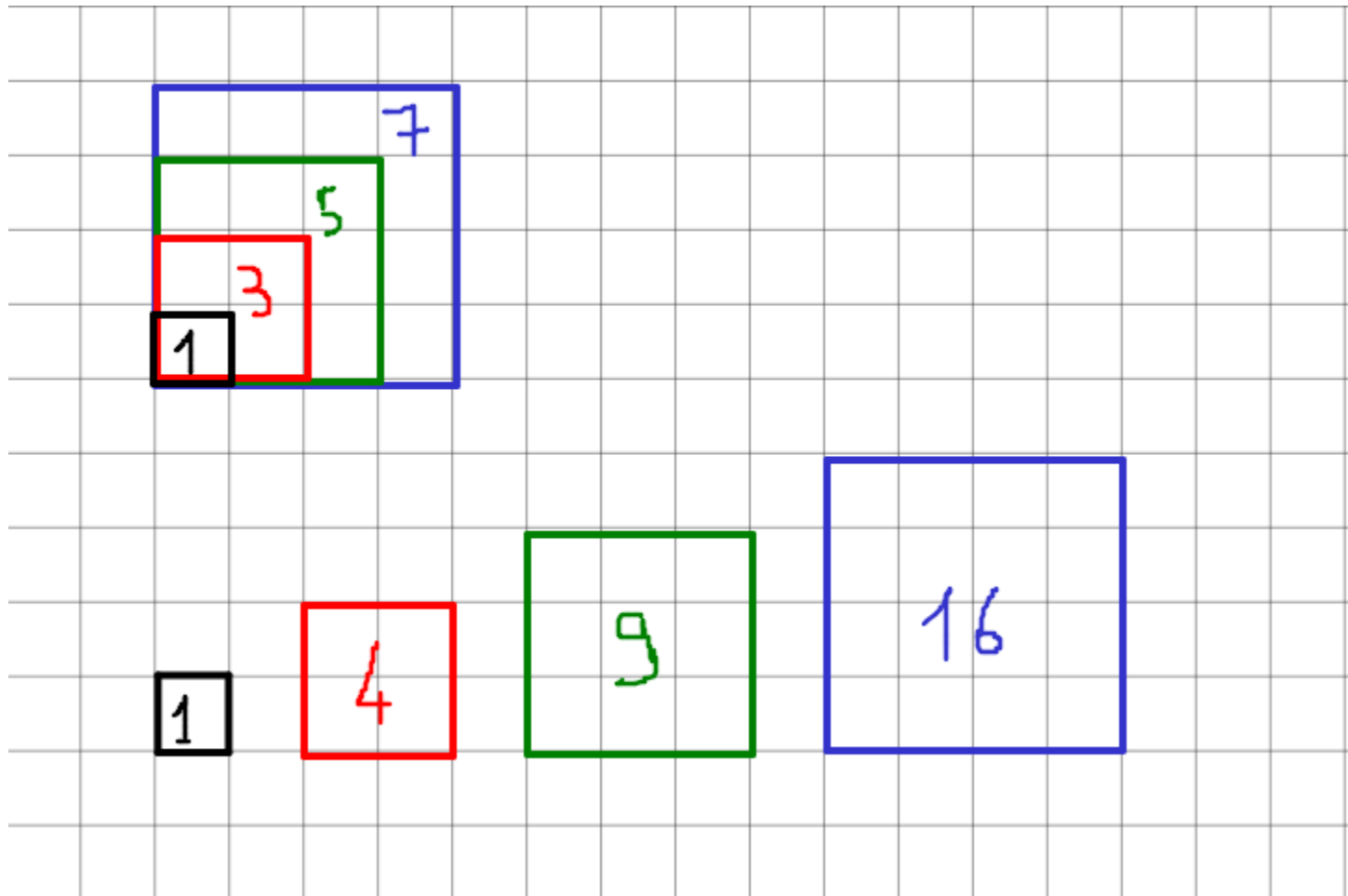
## A difesa di Galileo (2):

1972, Stillman Drake (1910-1993, storico della scienza canadese ritenuto uno dei massimi esperti in scienza galileiana).

- Trova annotazioni tratte dagli appunti personali di Galileo, conservati nella Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze assieme ad altri manoscritti.
- Ricostruisce l'esperimento di Galileo.
- Ipotizza che Galileo, avvalendosi delle sue doti musicali, scelga di ribaltare il metodo: l'obiettivo di Galileo era ora quello di calcolare lo spazio percorso in tempi uguali.
- Galileo segna sul piano posizioni raggiunte dalla palla in tempi uguali (misurati cantando un motivetto).
- Fissa in corrispondenza di ogni tacca segnata un pezzo di corda di budello, ottenendo così una specie di strumento suonato dalla biglia in caduta lungo il piano.
- Raffina la posizione delle corde fino a ottenere un ritmo regolare, cioè i famosi TEMPI UGUALI.
- Misura le distanze fra le corde trovando la proporzionalità cercata fra spazi e tempi.
- Galileo, secondo Drake, usa l'orologio ad acqua solo in un secondo momento, quando dovette mostrare la legge ad altri in maniera più semplice ma meno precisa.

# L'esperimento di Galileo secondo Drake: il sottile suono della regolarità...







1	2	3	4	5	“BATTITI”
33	130	298	526	824	Posizioni
33 - 0	130-33	298-130	526-298	824-526	Distanze fra due “battiti”
33/33	97/33	168/33	228/33	298/33	Rapporti fra distanze
1	2,9	5,1	6,9	9,0	Risultato
1	3	5	7	9	Risultato approssimato

1	2	3	4	5	6	7	8	“BATTITI”
33	130	298	526	824	1192	1620	2104	Posizioni
33/33	130/33	298/33	526/33	824/33	1192/33	1620/33	2104/33	Rapporto tra posizione finale e posizione “1”
1	3,9	9,0	15,9	24,9	36,1	49,0	63,7	Risultato ottenuto
1	4	9	16	25	36	49	64	Risultato approssimato

Classe Terza - Liceo Scientifico – Scuole Malpighi Visitandine, Castel San Pietro Terme (Bologna)

Risultati “corretti” ma non perfetti: bene!

1. 30  
 2. 120  
 3. 200 +  
 4. 500 +  
 5. 824  
 6. 112  
 7. 1620  
 8. 210 +

290  
290

0. 46  
50

400  
40

125

17. 44  
60

780  
44

824

17. 44  
60

1140  
44  
 1184

27. 2  
60  
 1620

35. 23  
60

229

~~Handwritten scribbles~~

Handwritten scribbles

Handwritten scribbles

Handwritten scribbles

Handwritten scribbles

Handwritten scribbles

# A difesa di Galileo (3): NOI !!!

ADDENTRIAMOCI meglio in alcuni fatti per poter "dire la nostra" o, almeno, per poterci capire qualcosa di più... **muoviamo anche noi a difesa di Galileo!!!**



## PRIMA DI PROSEGUIRE DUE PRESENTAZIONI:

**CLESSIDRA** (ant. clepsidra) s. f. [dal lat. *clepsydra*, gr. κλεψύδρα, comp. di κλέπτω «rubare» e ὕδωρ «acqua»] [...] Nell'iconografia, è simbolo dello scorrere del tempo e della caducità della vita terrena.

Treccani

## PENDOLO

Galileo è famoso per gli studi sul pendolo; quello che vi ho nominato prima come suo "accusatore", Alexandre Koyré, ha anche riconosciuto in Galileo (nel libro "Dal mondo del Pressappoco all'universo della precisione") la figura fondamentale che ha permesso la transizione verso il mondo della precisione e della misura, il mondo della mentalità scientifica.

# LE CURVE DI TARATURA

**Se vogliamo fare delle misure e non limitarci a “giocare”, lo strumento va tarato.**

**L'orologio ad acqua che vedete è stato tarato sia per la trasduzione volume/tempo sia per quella massa/tempo.**



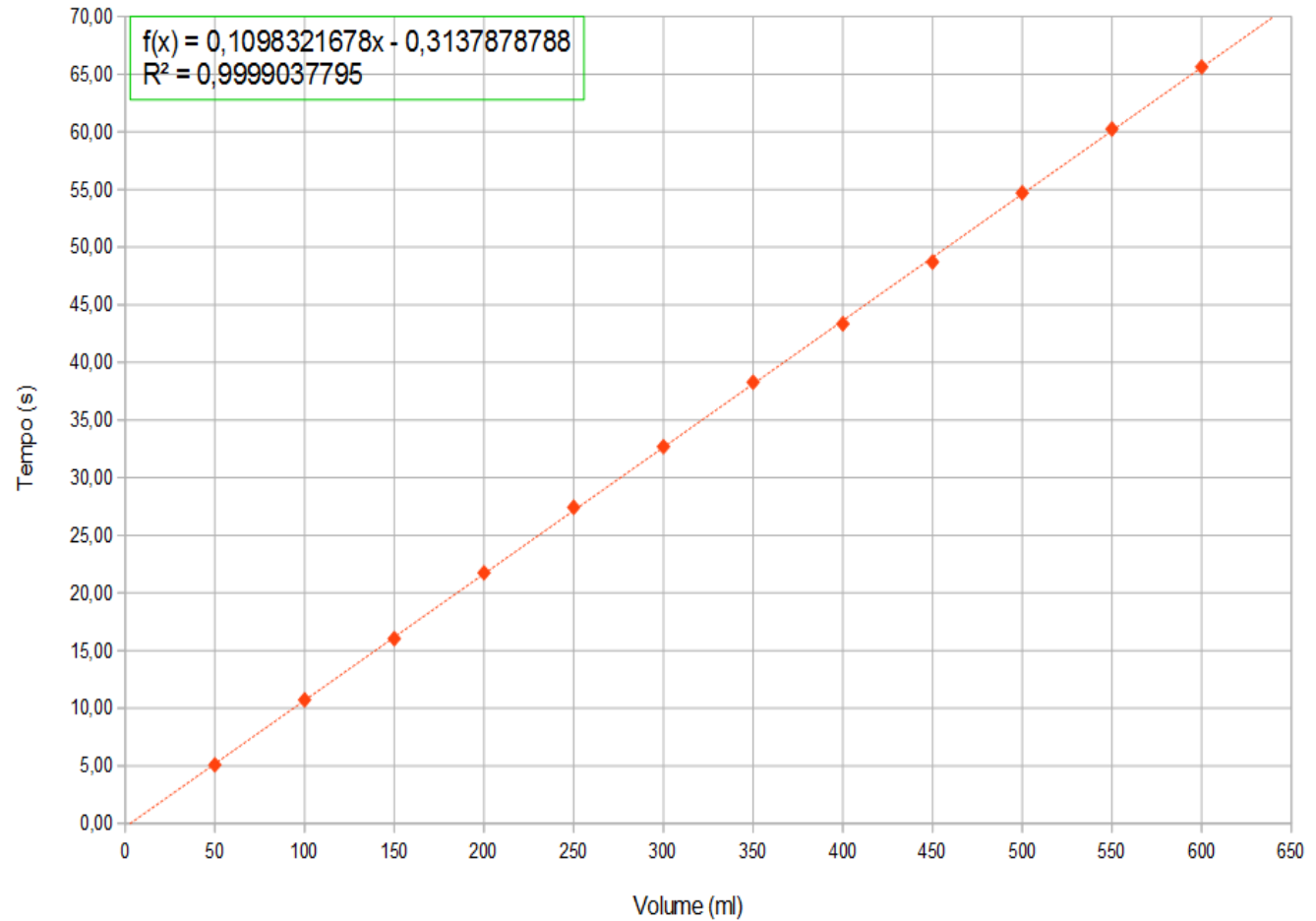
Volume (ml)	Tempo (s)
50	5,08
100	10,72
150	16,03
200	21,75
250	27,43
300	32,68
350	38,28
400	43,35
450	48,71
500	54,71
550	60,25
600	65,63



**CALCOLATORE:**

Volume (ml)	Tempo (s)	
50	5,49	"sensibilità"
	0,00	
	0,00	
	0,00	
	0,00	
	0,00	
	0,00	
	0,00	
	0,00	

CURVA DI TARATURA: volume / tempo



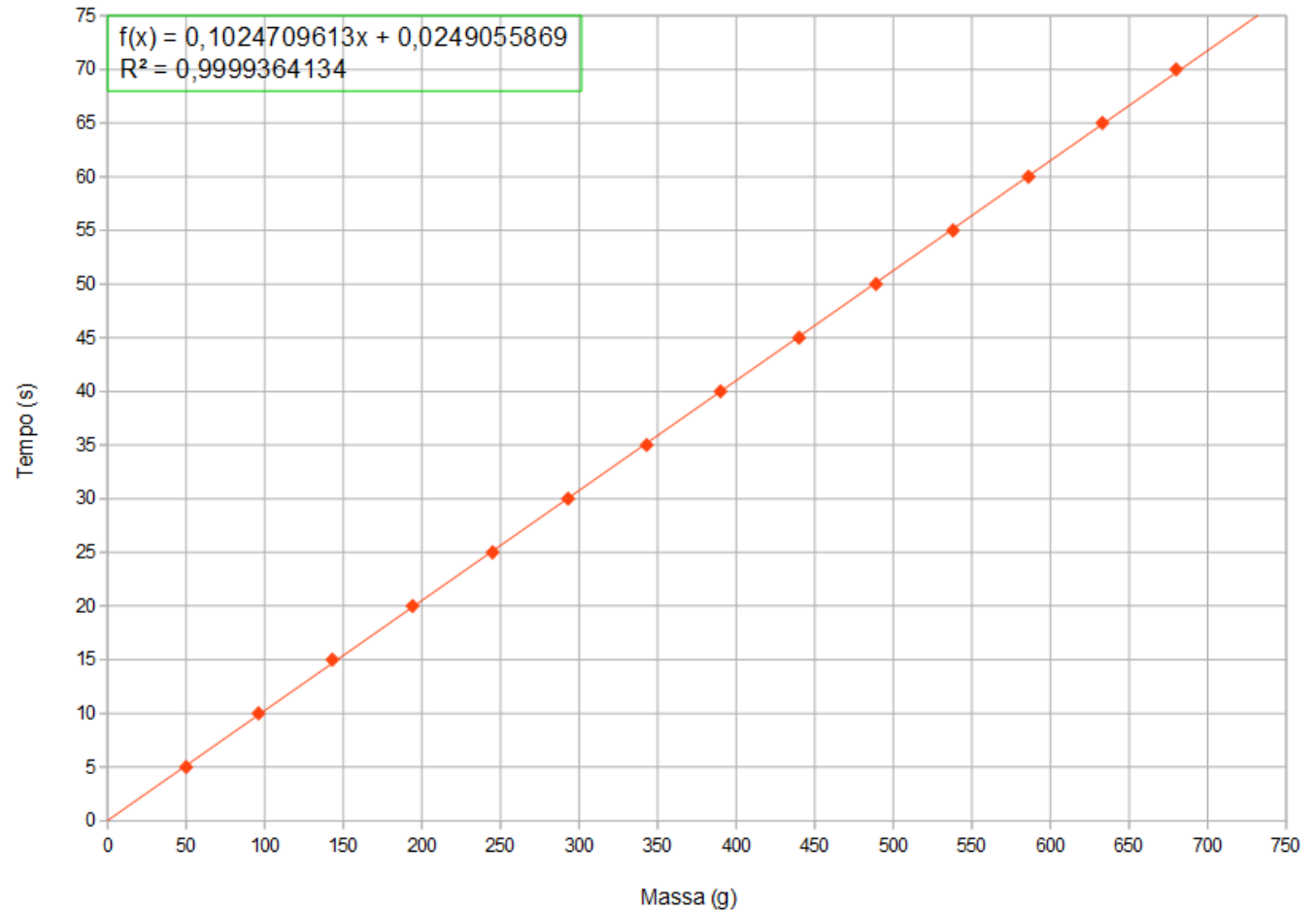
Coefficiente angolare: è il fattore di conversione Volume/Tempo:

$$\text{TEMPO (s)} = \text{VOLUME MISURATO (ml)} * 0,109832 \text{ (s/ml)}$$

**Tempo (s) Massa (g)**

5	50
10	96
15	143
20	194
25	245
30	293
35	343
40	390
45	440
50	489
55	538
60	586
65	633
70	680

CURVA DI TARATURA: massa / tempo



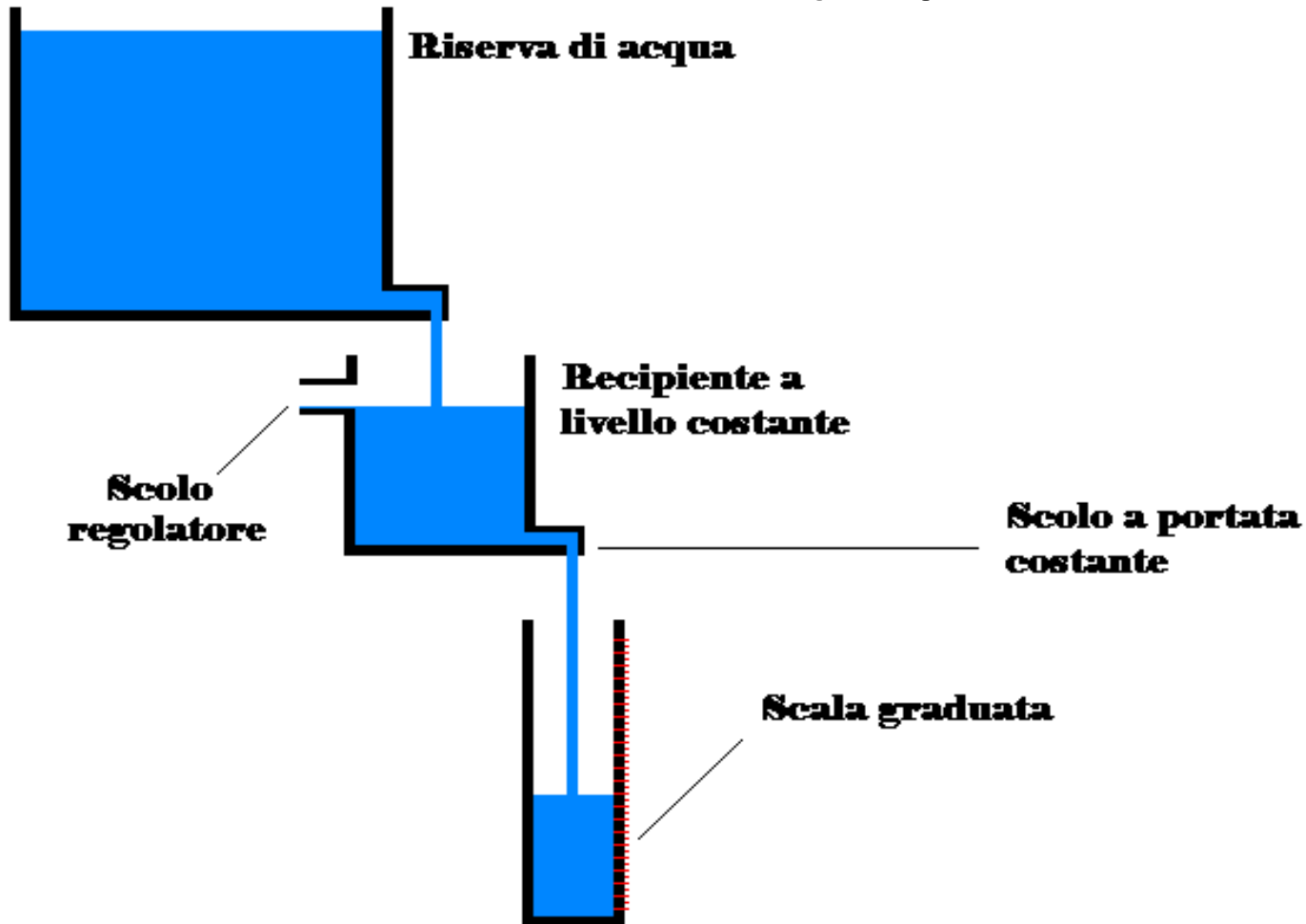
**CALCOLATORE:**

Massa (g)	Tempo (s)	
1	0,10	sensibilità
	0,00	
	0,00	
	0,00	
	0,00	

Coefficiente angolare: è il fattore di conversione Massa/Tempo:

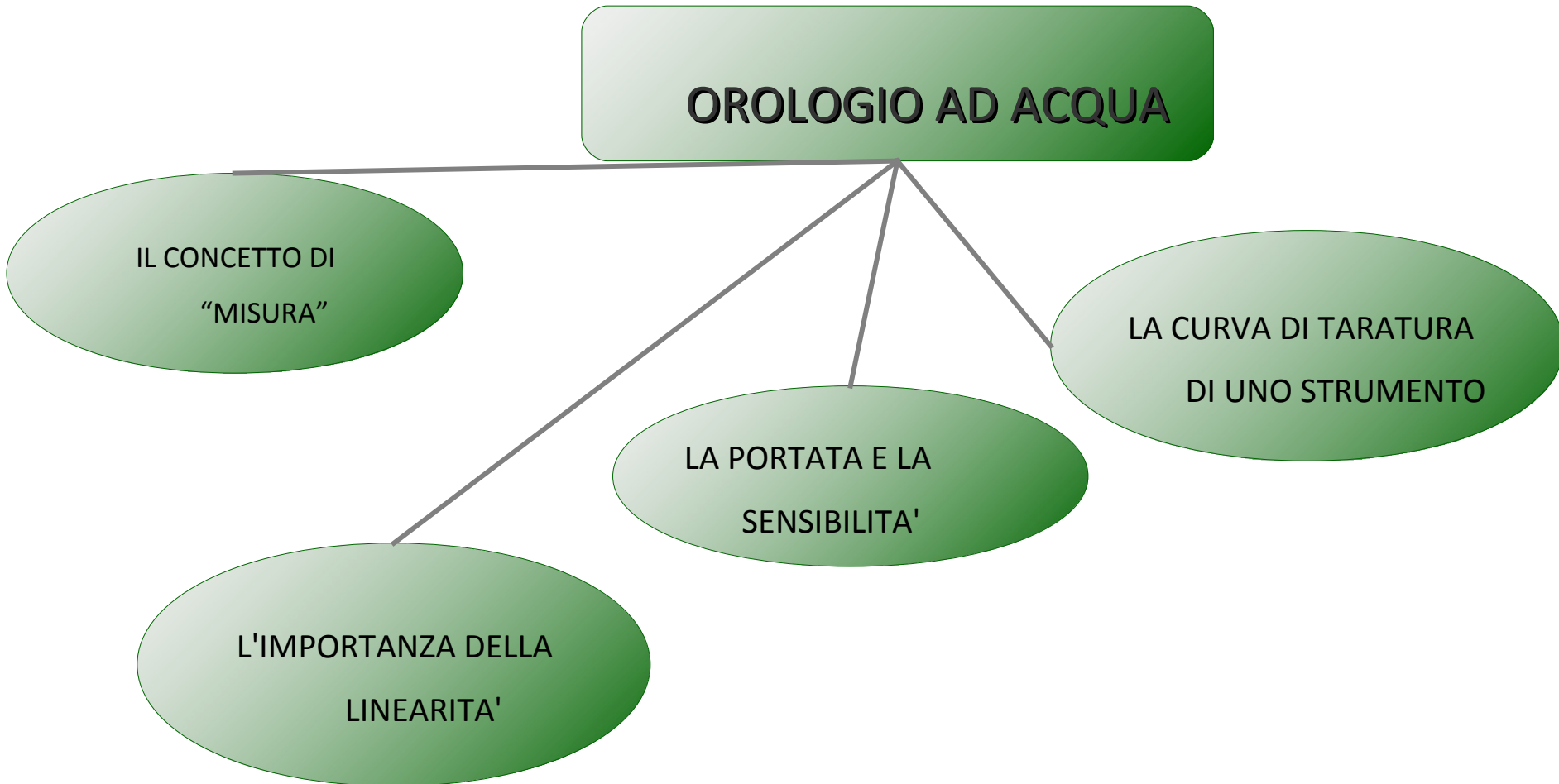
$$\text{TEMPO (s)} = \text{MASSA MISURATA (g)} * 0,10247 \text{ (s/g)}$$

# FACCIAMO SINTESI (e, speriamo, chiarezza)



Legge dei fluidi di Torricelli (legata alla legge di Stevino): se la sezione del tubo è molto minore della sezione del contenitore allora la velocità di efflusso è pari a  $v = \sqrt{2gh}$

# ***Gli insegnamenti dell'orologio ad acqua***





# Struttura generale degli strumenti di misura

SENSORE – INTERFACCIA – INDICATORE

“Traduzione”

ESEMPIO: **termometro a mercurio**

-Il **bulbo** pieno di mercurio è il **sensore**

-Il **capillare** è l'**interfaccia**

-La **scala** graduata su cui scorre il menisco è l'**indicatore**

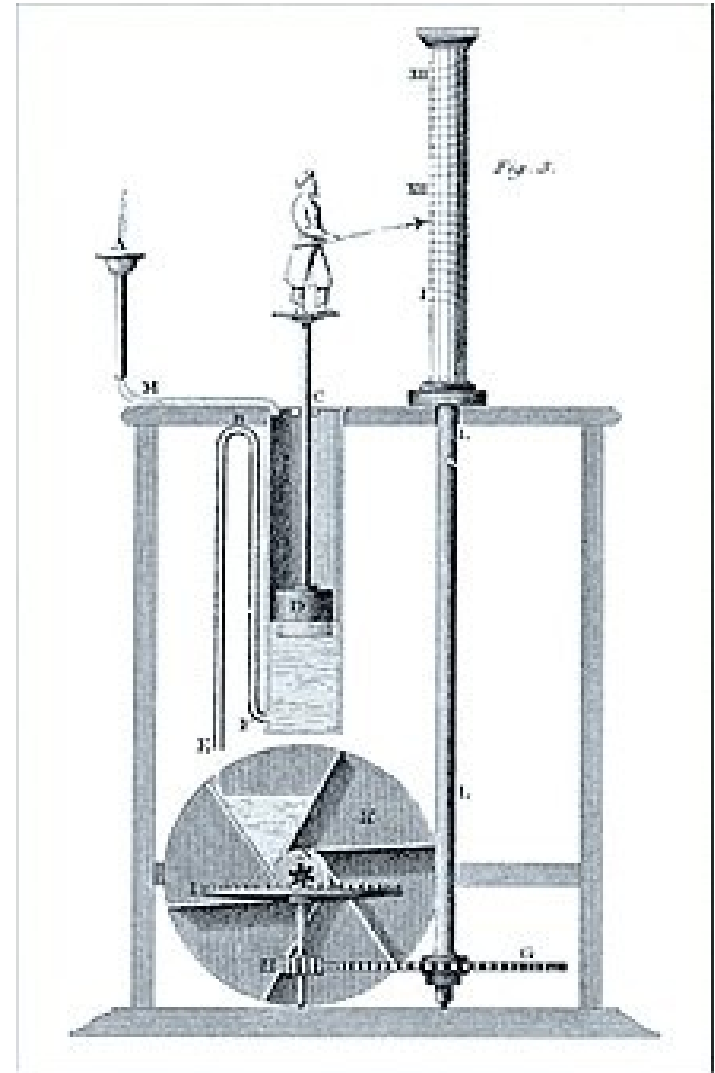


# Alcuni antichi rimedi alla non linearità della “Clessidra”

*Lo scienziato ellenistico Ctesibio (III secolo a.C.) progettò un orologio ad acqua che risolveva il problema del flusso non costante con un'alimentazione a sfioramento, ma teneva conto anche della durata variabile delle ore in diversi momenti dell'anno.*

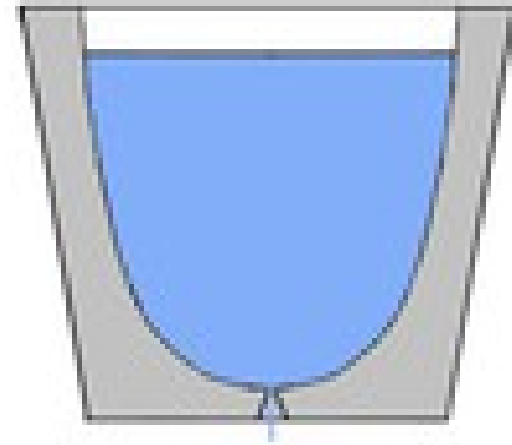
*La descrizione dell'orologio di Ctesibio e dei relativi meccanismi è tramandata da Vitruvio. - Wikipedia*

Tale orologio è un concentrato di espedienti tecnici ingegnosi, che qui non possiamo indagare

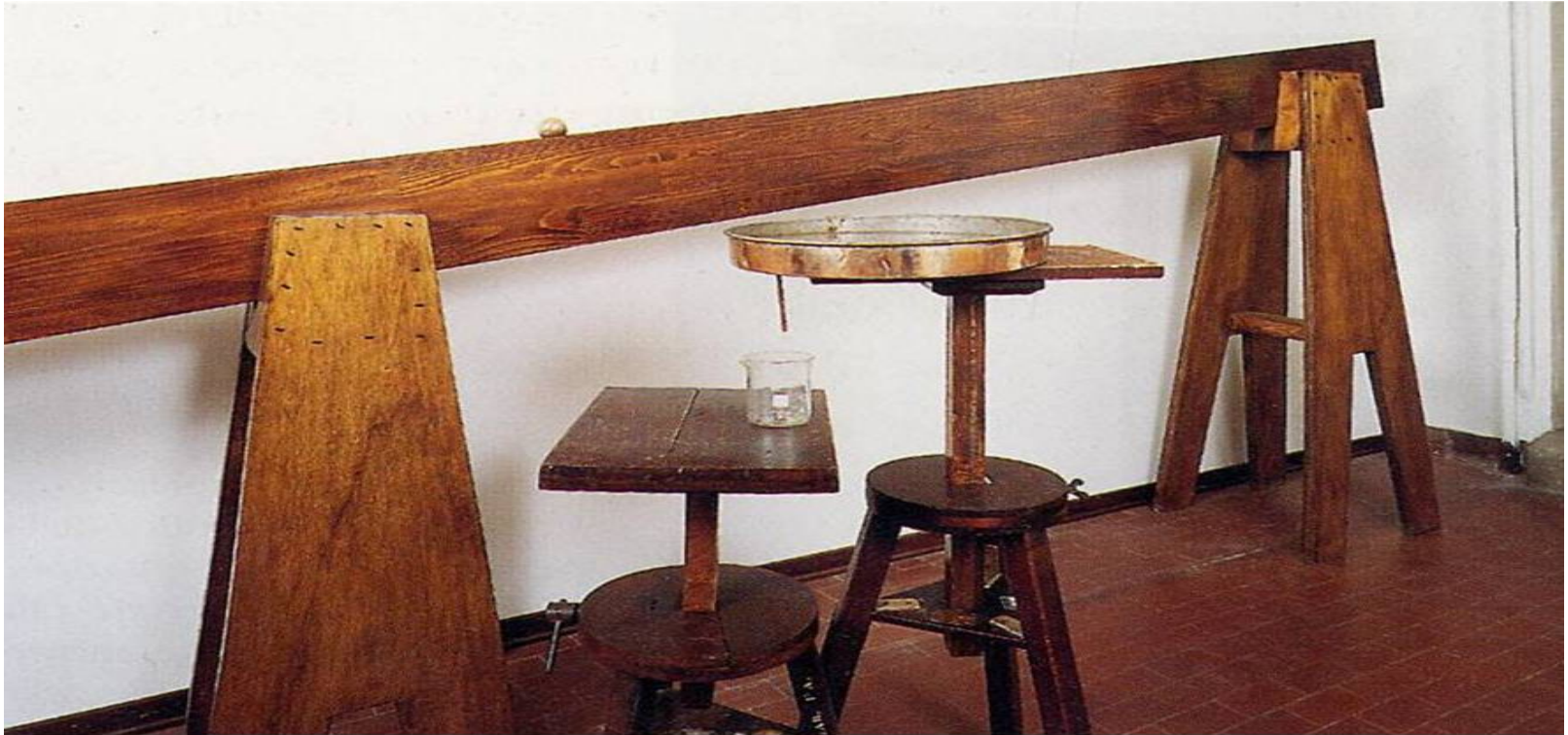


# Alcuni antichi rimedi alla non linearità della “Clessidra”

*Nel tempio di Akh-Menu a Karnak era custodita una clessidra che serviva a scandire le ore, in quanto i riti della religione egiziana dovevano essere praticati in momenti ben precisi; per limitare la variabilità del flusso di svuotamento, questa clessidra aveva forma tronco-conica, limitando in questo modo le differenze nel flusso di svuotamento all'inizio e alla fine del funzionamento della clessidra - Wikipedia*



# E Galileo?



## **Incredibilmente “rozzo” (cioè semplice)!**

Manca una qualsiasi delle tecniche già note in antichità per ovviare alla non regolarità del flusso d'uscita, per ottenere, cioè, la famosa “linearità” dello strumento

# Tuttavia...

La raffinata e ingegnosa tecnica di Ctesebio VS la semplicità e l'apparente arretratezza di Galileo

Se stimiamo l'errore vediamo che a Galileo il suo strumento “andava bene”



## Le due idee innovative di Galileo:

1) Strumento di misura, non oggetto utile; cioè cronometro, non orologio.

**Ctesebio** realizza una ingegnosa e sorprendente MACCHINA che, anche etimologicamente, “imbrogli” la natura, suscita stupore e, in ultimo, ha una utilità pratica.

**Galileo** realizza un imperfetto strumento di misura che stima adeguato a svolgere la “missione” per cui è stato realizzato: investigare la Natura, “interrogarla” alla ricerca di una regolarità, di una proporzione fra spazi e tempi, alla ricerca, insomma, di una legge.

2) La trasduzione massa/tempo. VANTAGGI: migliore sensibilità nella misura delle masse che dei volumi (ai tempi di Galileo c'era il “Saggiatore” ...); risolve l'incompatibilità fra sensibilità e portata



# **DUE MISURE CON L'OROLOGIO AD ACQUA:**

**Scandire lo scorrere del tempo, con la giusta  
sensibilità...**



## **ESPERIMENTO 1:**

***durata della clessidra misurata con orologio ad acqua.***

## **ESPERIMENTO 2:**

***periodo del pendolo misurato con orologio ad acqua.***



# Per salutarci...

*“Nessuno si rendeva conto che, risparmiando tempo, in realtà risparmiava tutt'altro. Nessuno voleva ammettere che la sua vita diventava sempre più povera, sempre più monotona e sempre più fredda. Se ne rendevano conto i bambini, invece, perché nessuno aveva più tempo per loro. Ma il tempo è vita. E la vita risiede nel cuore. E quanto più ne risparmiavano, tanto meno ne avevano.”*

Michael Ende - “Momo”



# BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

A. KOYRÉ *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, trad. e intr. di P.Zambelli, Torino, Einaudi 1967

S. DRAKE *Galileo Studies: Personality, Tradition, and Revolution*, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1970

G. TORZO *La clessidra ad acqua di Galileo, ovvero un precursore dei moderni trasduttori* IRRSAE VENETO Corso di Aggiornamento “Le rivoluzioni scientifiche (1600-1750) nuovi saperi e nuovi linguaggi”

<https://www.ilsussidiario.net/news/emmeciquadro/2013/3/4/scienz-scuola-lo-studio-galileiano-del-moto-uniformemente-accelerato-approfondimento/368323/>

<https://www.ilsussidiario.net/news/scienzscuola-tic-tac-tic-tac-allinseguimento-della-pallina-sfuggente/1899462/>





# APPROFONDIMENTO

## La sensibilità del "Saggiatore"

*"Nato in risposta alla Libra astronomica ac philosophica (1619) del gesuita Orazio Grassi, celato sotto lo pseudonimo di Lotario Sarsi, Il saggiatore è l'opera più significativa all'interno della lunga controversia sulle comete, corsa fra Galileo e la Compagnia dopo l'osservazione di tre di esse, apparse fra il 1618 e il 1619. [...]"*

*Tutto avvenne nel più totale riserbo, per timore che i Gesuiti potessero intervenire a impedire la pubblicazione. Nel febbraio giunse l'imprimatur. Lo aveva concesso il domenicano genovese Niccolò Riccardi, che tanta parte avrà in seguito nella vicenda del Dialogo sopra i due massimi sistemi. Il suo apprezzamento era incondizionato: la «sottile e soda speculazione dell'autore» permetteva di pesare «l'oro della verità», «non più con la stadera e alla grossa, ma con saggiuoli così delicati». L'autorità ecclesiastica assecondava così il gioco di Galileo che, scegliendo come titolo Il saggiatore, cioè la precisissima bilancetta degli orefici, intendeva rimarcare le approssimazioni della libra, che altro non era in latino se non la stadera da mercato."*

<https://www.museogalileo.it/it/museo/esplora/incontra-galileo/31-opere/459-il-saggiatore-1623.html>

INOLTRE:

Galileo racoconta di misurare la massa di un litro d'aria che ha l'ordine di grandezza del grammo.



# APPROFONDIMENTO

## L'errore nella clessidra di Galileo

*“Per ottenere uno strumento **lineare** bisogna mantenere all'incirca costante l'altezza della colonna d'acqua sopra il foro. Ciò si può fare o limitando la misura a brevi intervalli di tempo (**piccola portata**), o usando un vaso largo e un foro piccolo (**piccola sensibilità**).*

**Esiste un modo diverso per misurare accuratamente il volume dell'acqua spillata senza dover ricorrere a grandi variazioni di livello ?**

*Galileo si accorse che il problema poteva essere risolto (utilizzando un vaso largo o un foro piccolo) **misurando il volume, anziché attraverso la variazione di livello, attraverso il peso della massa di acqua uscita**. Egli raccolse cioè l'acqua uscita dal secchio in un secondo recipiente per poi pesarla. (**clessidra gravimetrica**)*

*Già ai tempi di Galileo si potevano fare pesate di grande precisione con mezzi semplici. Con precisioni del mezzo grammo, pesando 100 cc. di acqua si raggiunge una incertezza dello 0.5%.*

*Se ad esempio si usa un cilindro di 30 cm di diametro riempito all'altezza  $h_0=35$  cm si ottiene che spillando 100 grammi di acqua la variazione di livello è solo  $Dh=V/\pi r^2=1.4$  mm e  $DS/S \gg Dh/2h_0 \gg 0.2\%$*

**L'errore di linearità risulta allora minore dell'incertezza della misura.”**

Giacomo Torzo - IRRSAE VENETO - Corso di Aggiornamento 1999

