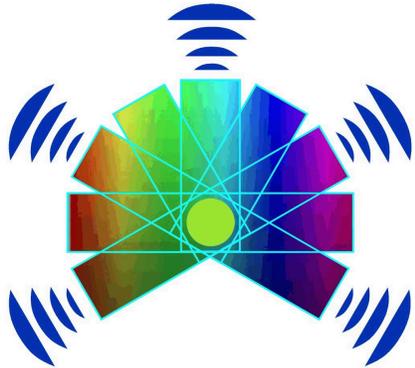


# Laboratorio di Fisica Moderna

## Misura della Velocità della Luce

## Misura del Numero di Avogadro



L. Martina  
18/02/2025

*Dipartimento di Matematica e Fisica «E. De Giorgi»  
Università del Salento  
Sezione INFN - Lecce*

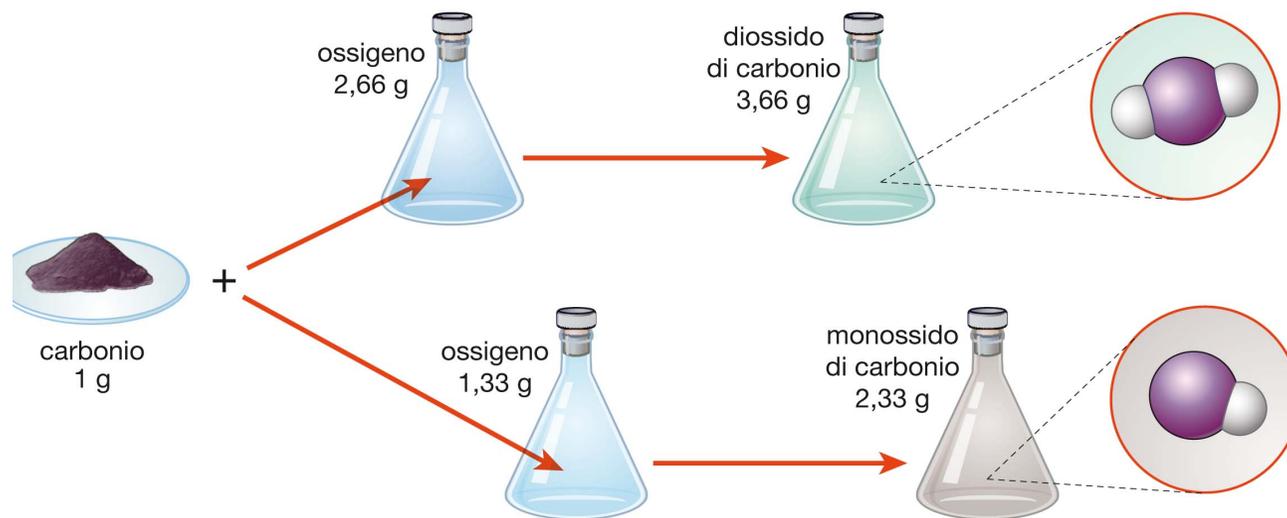


# La teoria atomica di Dalton



*John Dalton*

- *Gli elementi sono costituiti da particelle estremamente piccole chiamate atomi.*
- *Gli atomi di un dato elemento sono identici per dimensioni, massa e altre proprietà; gli atomi di diversi elementi differiscono per dimensioni, massa e altre proprietà.*
- *Gli atomi non possono essere suddivisi, creati o distrutti.*
- *Gli atomi di diversi elementi si combinano in semplici rapporti di numeri interi per formare composti chimici.*
- *Nelle reazioni chimiche, gli atomi vengono combinati, separati o riorganizzati.*



# La legge di Avogadro



A. Avogadro

- *A. Avogadro* : «*Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons*» , *Journal de Physique, de Chimie et d'Histoire naturelle* **73** (1811), 58–76
- Ipotesi di Avogadro: volumi uguali di tutti i gas (ideali), alla stessa temperatura e pressione, hanno lo stesso numero di molecole.
- Per una data massa di un gas ideale, il volume e la quantità (moli) del gas sono direttamente proporzionali se la temperatura e la pressione sono costanti.
- $PV = n R T = M/M_{\text{mol}} R T = N/N_A R T = N R / N_A T = N k_B T$
- Definizione del Numero di Avogadro: esso è il numero di molecole in un grammo-molecola di ossigeno.
- Possiamo ottenere una stima del Numero di Avogadro  $N_A$  ?

# Quanto sono piccole le molecole?

- Quante molecole ci sono in una data quantità di una certa sostanza ?
- Come stimare le dimensioni di una molecola tipo?
- Metodi utilizzati da J. Perrin :

emulsioni analoghe a gas; emulsioni analoghe a liquidi; fluttuazioni di emulsioni concentrate; moto Browniano traslazionale; moto Browniano rotazionale; opalescenza critica; azzurro del cielo; radiazione di corpo nero; goccioline ionizzate secondo Millikan; decadimento radioattivo.

$$\underline{N_A = 6.022\ 141\ 79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}$$

## Il Moto Browniano

<http://www.youtube.com/watch?v=Scykhj1V41s>

<https://www.youtube.com/watch?v=nOkSITJTULI>

<https://www.youtube.com/watch?v=R5t-oA796to>

<https://history.aip.org/exhibits/einstein/>

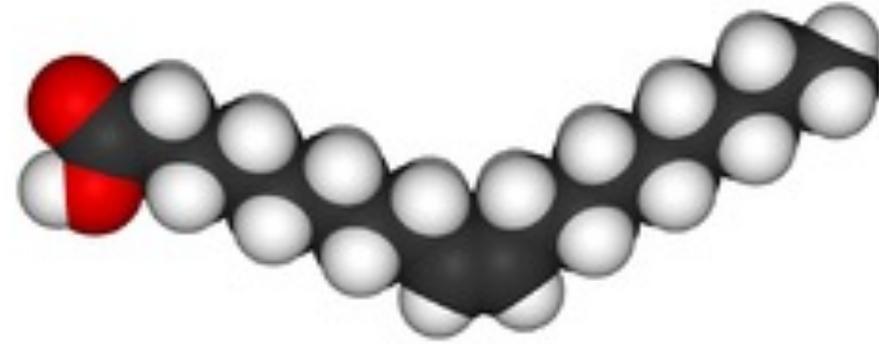
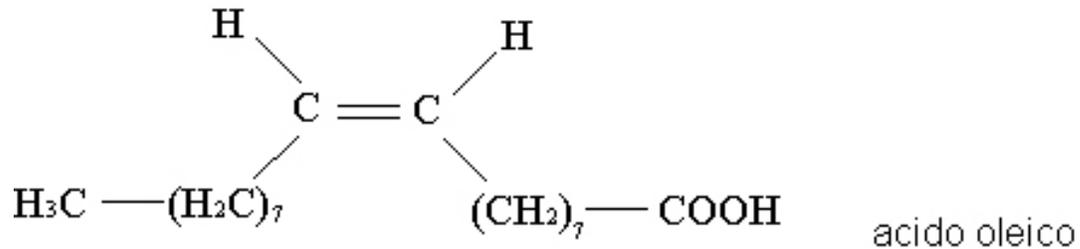


A. Einstein



J. Perrin

# Il metodo dello strato monomolecolare



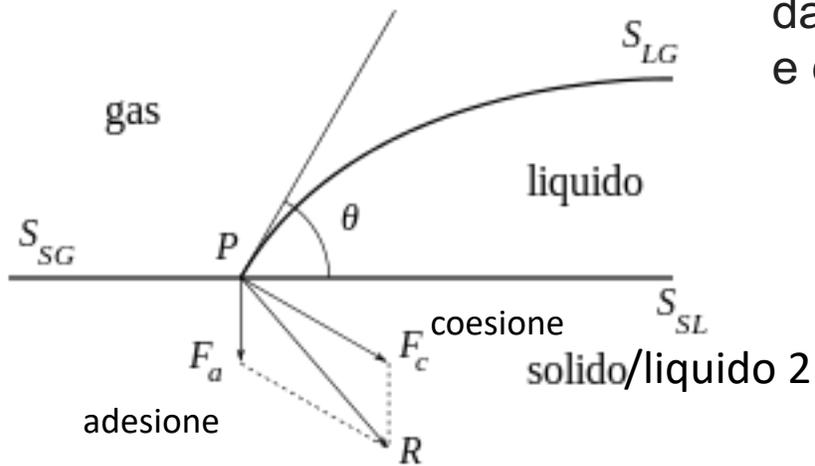
- Acido Oleico  $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$
- Peso Molare  $P_M = 282.47 \text{ g/mol}$
- Densità di massa a temperatura ambiente  $\delta = 0.895 \text{ g/cm}^3$
- Nel corso dell'esperimento si suppone che, una volta depositata sull'acqua, la goccia di acido si espanda fino a formare uno **strato monomolecolare**.
- L'acido, insolubile in acqua, possiede una bassa tensione superficiale, la quale favorisce l'estensione della chiazza.
- I dati dell'esperimento consentono di stimare un limite superiore per la lunghezza e per la massa della molecola

# Tensione superficiale



La **tensione superficiale** di un fluido è quella forza di coesione delle particelle di un corpo alla sua superficie esterna. Pertanto l'aumento di una quantità  $dA$  della superficie libera non può avvenire spontaneamente, ma bisogna compiere un lavoro  $dE = \gamma dA$

$\gamma$  indica la tensione superficiale e dipende dal tipo di liquido, dal gas che si trova al di sopra della superficie libera, dal solido/liquido con cui la sostanza in esame è a contatto e dalla temperatura ( $\gamma_0 \propto 1/T$ )



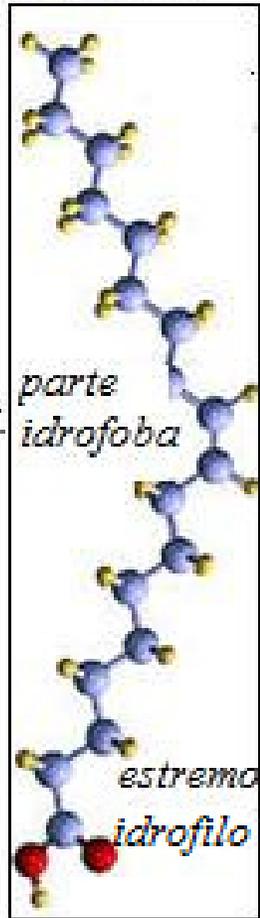
All'interfaccia tra tre fasi distinte ( liquido-gas-(solido/liquido 2), l'equilibrio tra le forze di coesione e di adesione determina l'angolo di contatto  $\theta$

$$\gamma = d E / d A = \gamma_0 / \cos(\theta/2)$$

- Le condizioni limite esprimono rispettivamente:
- $\theta = 0$  bagnabilità completa con la formazione di uno strato di liquido di spessore molecolare;
  - $\theta = \pi$  totale assenza di bagnabilità.

Materiale	Tensione superficiale (N/m)
<a href="#">Mercurio</a>	0,559
<a href="#">Acqua</a>	0,073
<a href="#">Acido Oleico</a>	0,0319
<a href="#">Benzene</a>	0,029

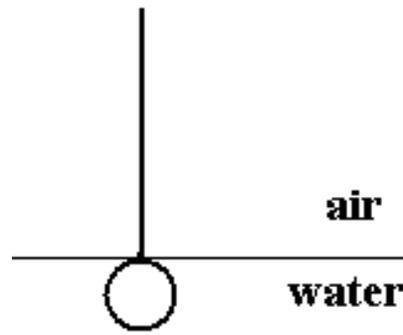
Acido Oleico



$a$

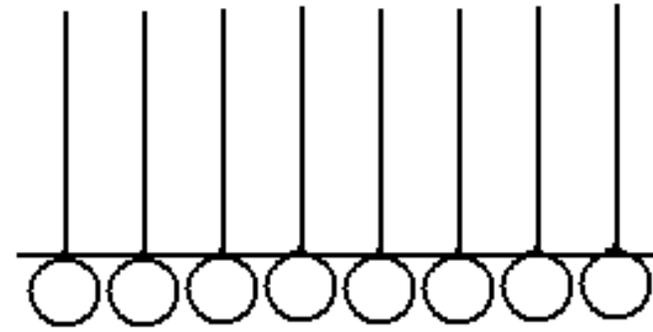
$l = 4a$

tailgroup



headgroup

Schematic diagram



1. Modellizziamo che le molecole abbiano circa la forma di un parallelepipedo retto a basi quadrate.
2. Queste hanno una lunghezza che stimiamo circa  $\frac{1}{4}$  dell'altezza  $l$ .
3. Le molecole si dispongono ortogonalmente alla superficie dell'acqua, con le teste idrofile immerse e le code idrofobe parallele e dirette verso l'alto.
4. A causa della debole interazione attrattiva, le molecole formano delle chiazze compatte sulla superficie dell'acqua.

**Lunghezza  $l = 1.97$  nm**  
**Massa  $m = 4.69 \times 10^{-22}$  g**

# Procedura sperimentale

- Riempire il sottovaso con acqua per una profondità di un paio di cm e immergervi il righello.
- Attendere che l'acqua sia completamente immobile.
- Cospargere la superficie dell'acqua con uno strato sottile ed omogeneo di talco. La polvere deve essere appena sufficiente per riconoscere i bordi della macchia
- Con la pipetta tarata a disposizione si depone delicatamente al centro del sottovaso una o più gocce della soluzione di acido oleico in etanolo preparata in precedenza.
- La goccia di soluzione si espande, con oscillazioni dovute alla presenza di etanolo che evapora/si mescola in circa un minuto. Si forma così una macchia stabile approssimativamente circolare. Forme stellate e/o irregolari possono facilmente prodursi, per disomogeneità della polvere e per le interazioni dei suoi grani..
- Effettuare una fotografia della macchia in perpendicolare, facendo attenzione che venga ripreso anche il righello.
- Ripetere più volte la stessa procedura per poter ottenere una certa collezione di foto.
- Stampare le foto su carta millimetrata/quadrettata, oppure utilizzare uno strumento di elaborazione delle immagini, per misurare l'area della macchia.

# Materiali a disposizione per le misure

Soluzione di acido oleico in etanolo alla concentrazione  $C = 0,1 \%$

Pipette tarate :  $V_{\text{goccia}} = 0,0105 \text{ ml}$  ( $\Delta V_{\text{goccia}} = 0,0001 \text{ ml}$ )

Vaschette (sottovasi)

Polvere di borotalco

Setaccio sottile

Righello

Pressione di Vapore (20 °C)

Acqua 2.3388 kPa

Etanolo 5.95 kPa

Acido Oleico  $7.3 \times 10^{-8} \text{ kPa}$

Calcolo del volume effettivo di Acido Oleico nella goccia

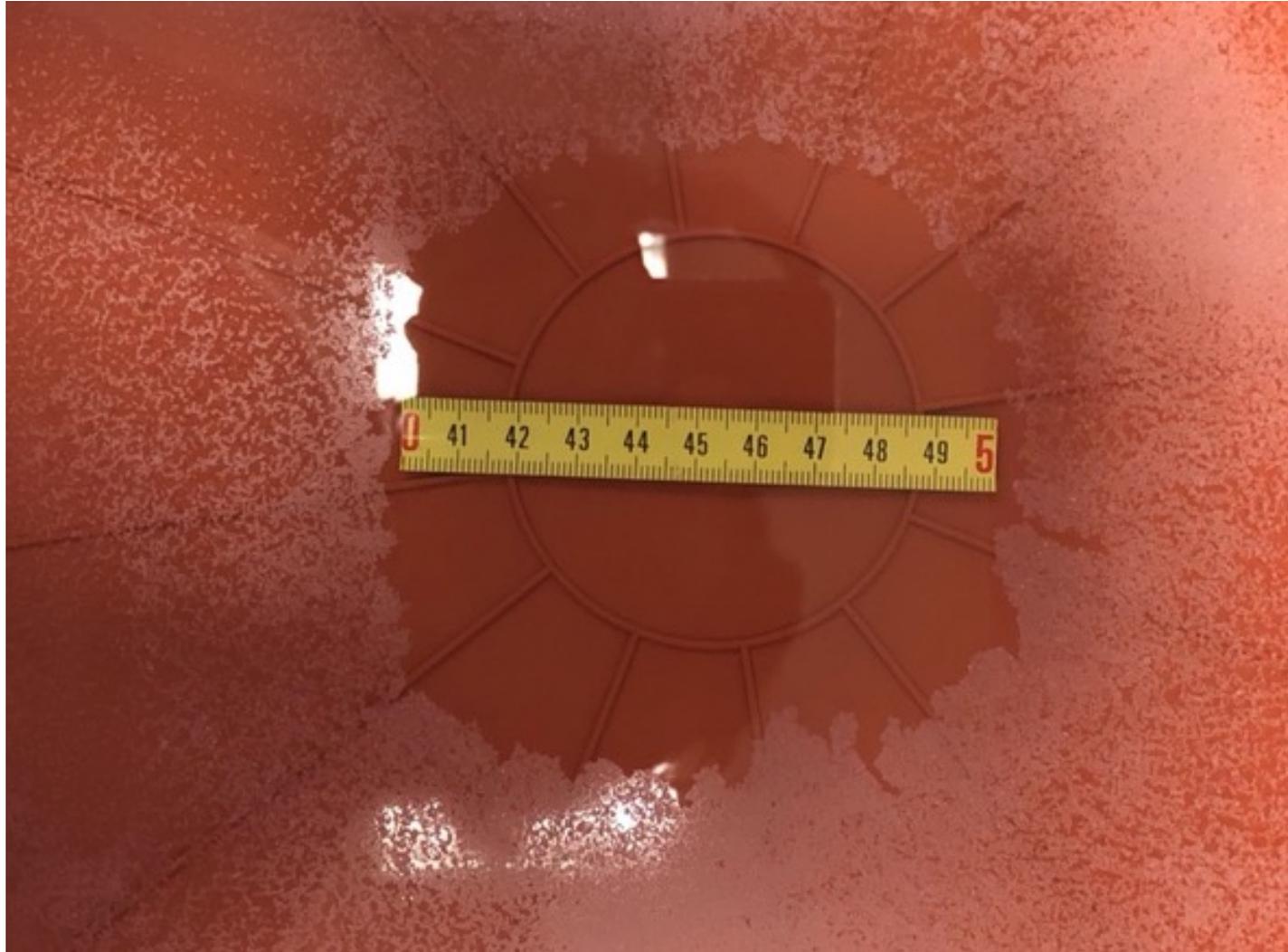
$$V_{\text{A.Ol.}} = C \times V_{\text{goccia}} = (1.0 \pm 0.5) \times 10^{-5} \text{ cm}^3$$

NB L'etanolo è miscibile in acqua

# Elaborazione dei Dati

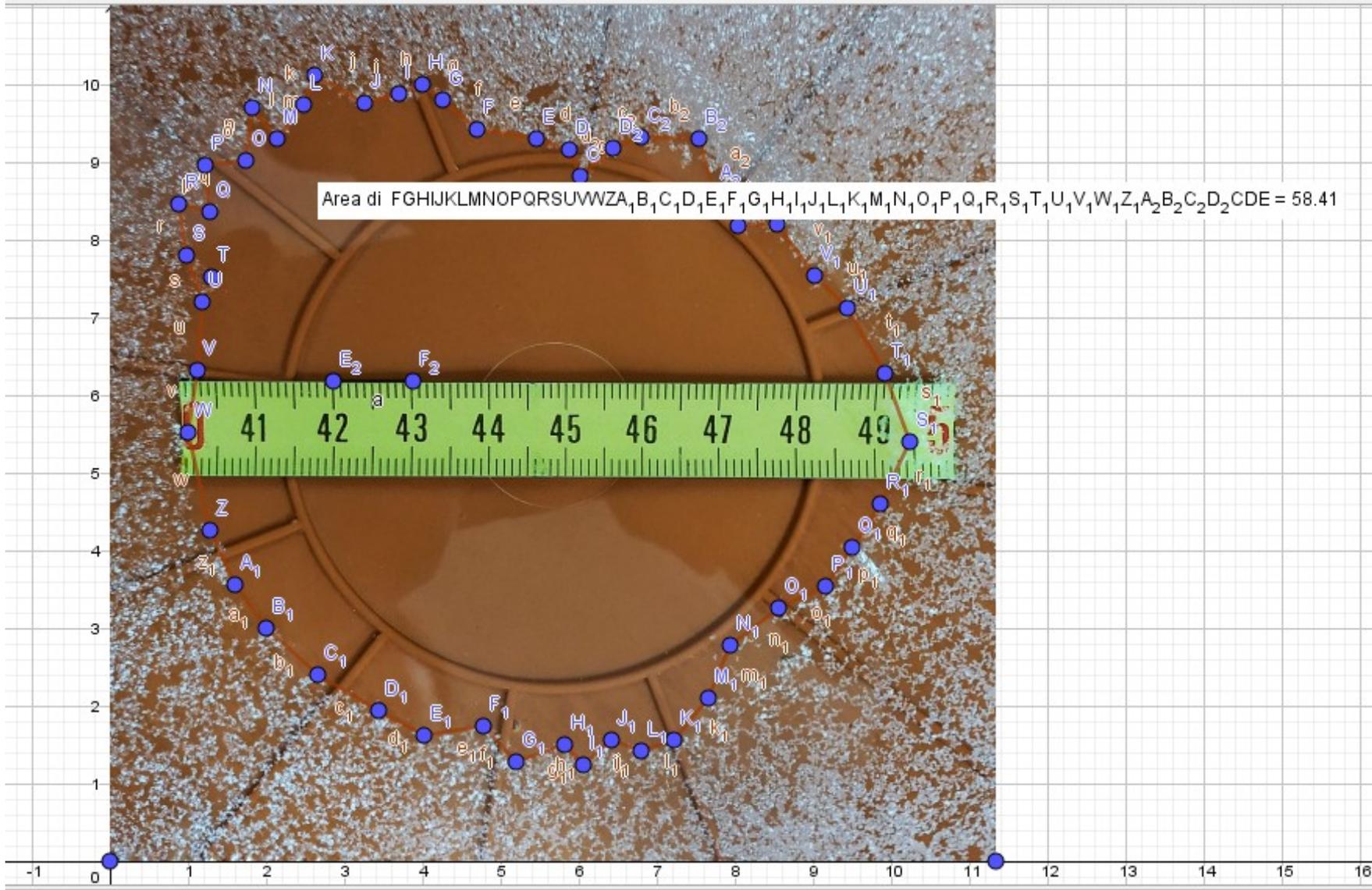
- 1) Calcolare la sua area  $A$  a partire dalla fotografia eseguita.  
Per esempio contando i quadratini della carta millimetrata usata, che cadono all'interno del perimetro tracciato dalla polvere. Rapportare la lunghezza del lato di un quadratino alla corrispondente misura data dalla scala del righello fotografato.
- 2) Calcolare l'altezza della molecola  $l = V_{A.OI}/A$   
(può essere utile comparare questo dato con quello riportato in tabella )
- 3) Calcolare il volume della singola molecola, usando  $V_{mol} = l^3/16$
- 4) Calcolare il numero di Avogadro, cioè il numero di molecole contenute nel volume molare, usando la relazione  $N_A = (P_M / \delta) / V_{mol}$
- 5) Fare una tabella dei risultati ottenuti e calcolare la media di  $l$  e di  $N_A$
- 6) Stimare errori relativi ed assoluti, valutare la fonte degli errori

Foto di G.E. Miccoli. (Ribezzo) 24/2/'23

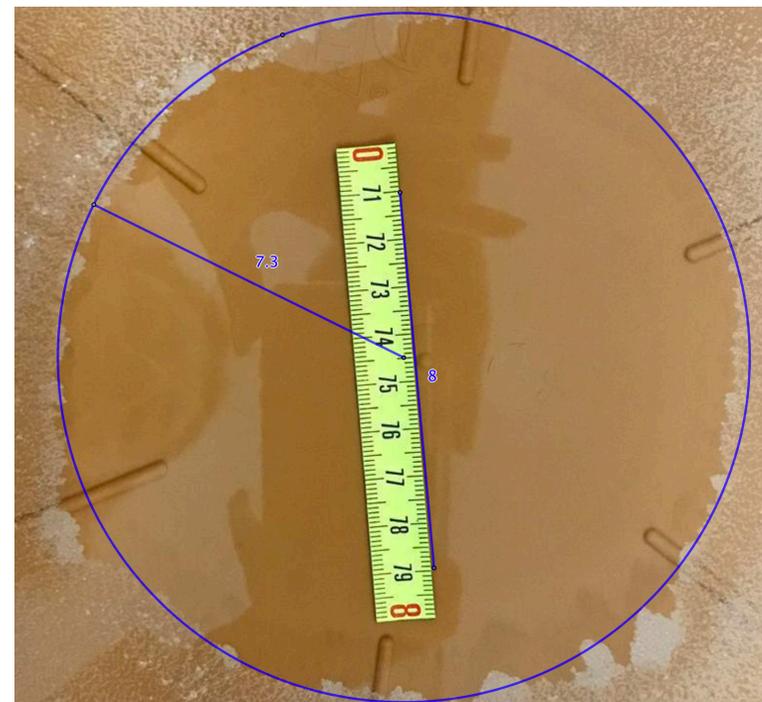
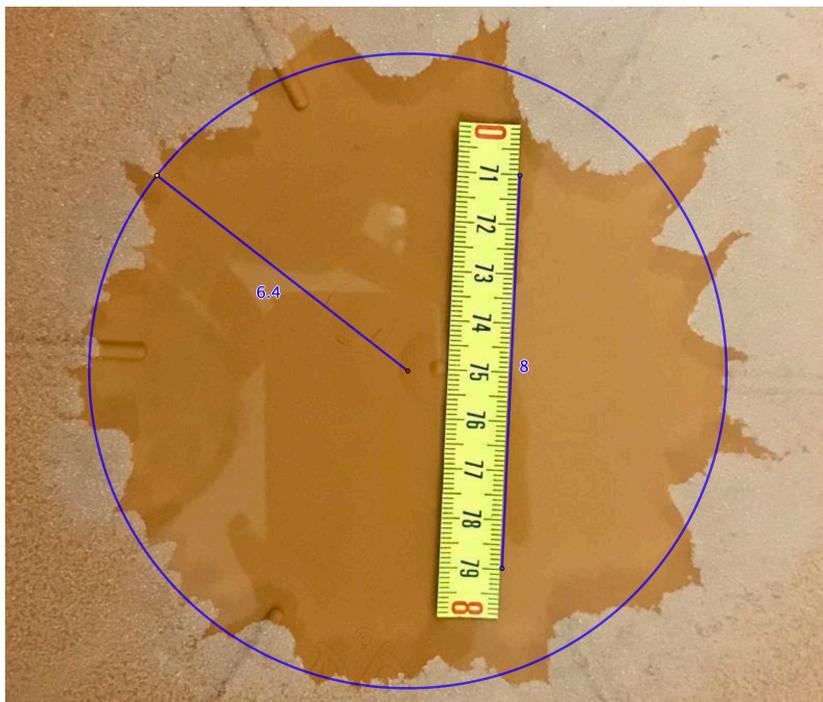


Altre foto





Uso di Geogebra



## Stima di un Raggio Medio

Cafagna Giovanna (Liceo Classico “Palmieri” - Lecce)

Lazzari Gabriele (Liceo Scientifico “Leonardo da Vinci” - Maglie)

Schifano Antonella (Liceo Scientifico “Leonardo da Vinci” - Maglie)

Specchia Maria Pia (Liceo Scientifico “Salvatore Trinchese” - Martano)

# Qualche esempio

<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>ΔA (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>Δh (cm)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ΔV (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>N<sub>A</sub> (mol<sup>-1</sup>)</b>	<b>ΔN<sub>A</sub> (mol<sup>-1</sup>)</b>
64.0	0.2	$1.9 * 10^{-7}$	$0.8 * 10^{-7}$	$4 * 10^{-22}$	$5 * 10^{-22}$	$8 * 10^{23}$	$9 * 10^{23}$
58.41	0.01	$2.1 * 10^{-7}$	$0.9 * 10^{-7}$	$6 * 10^{-22}$	$7 * 10^{-22}$	$5 * 10^{23}$	$6 * 10^{23}$

$$\Delta h_1 = h_1 * [(\Delta V_{\text{acido oleico}} / V_{\text{acido oleico}}) + (\Delta A_1 / A_1)]$$

$$\Delta V_1 = 3V_1 * \Delta h_1 / h_1$$

$$\Delta N_{A1} = N_{A1} * \Delta V_1 / V_1$$

# La velocità della LUCE

Misura della velocità della luce



1670, Ole Roemer



214000 km/sec

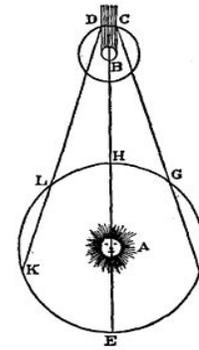


FIG. 70.

- La **costanza** della velocità della luce per ogni osservatore è a fondamento della

Teoria della Relatività di Einstein

$$c = 299.792.458 \text{ m s}^{-1}$$

Torre Zytglogge, Berna, Svizzera.

Avrà ispirato A. Einstein nel formulare la sua Teoria della Relatività?

Date	Author	Method	Result (km/s)	Error
1676	Olaus Roemer	Jupiter's satellites	214,000	
1726	James Bradley	Stellar Aberration	301,000	
1849	Armand Fizeau	Toothed Wheel	315,000	
1862	Leon Foucault	Rotating Mirror	298,000	+-
500				
1879	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,910	+50
1907	Rosa, Dorsay	Electromagnetic constants	299,788	+30
1926	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,796	+4
1947	Essen, Gorden-Smith	Cavity Resonator	299,792	+3
1958	K. D. Froome	Radio Interferometer	299,792.5	+0.1
1973	Evanson et al	Lasers	299,792.4574	+-
0.001				
1983		Adopted Value	299,792.458	

### speed of light in vacuum

Value **299 792 458 m s<sup>-1</sup>**

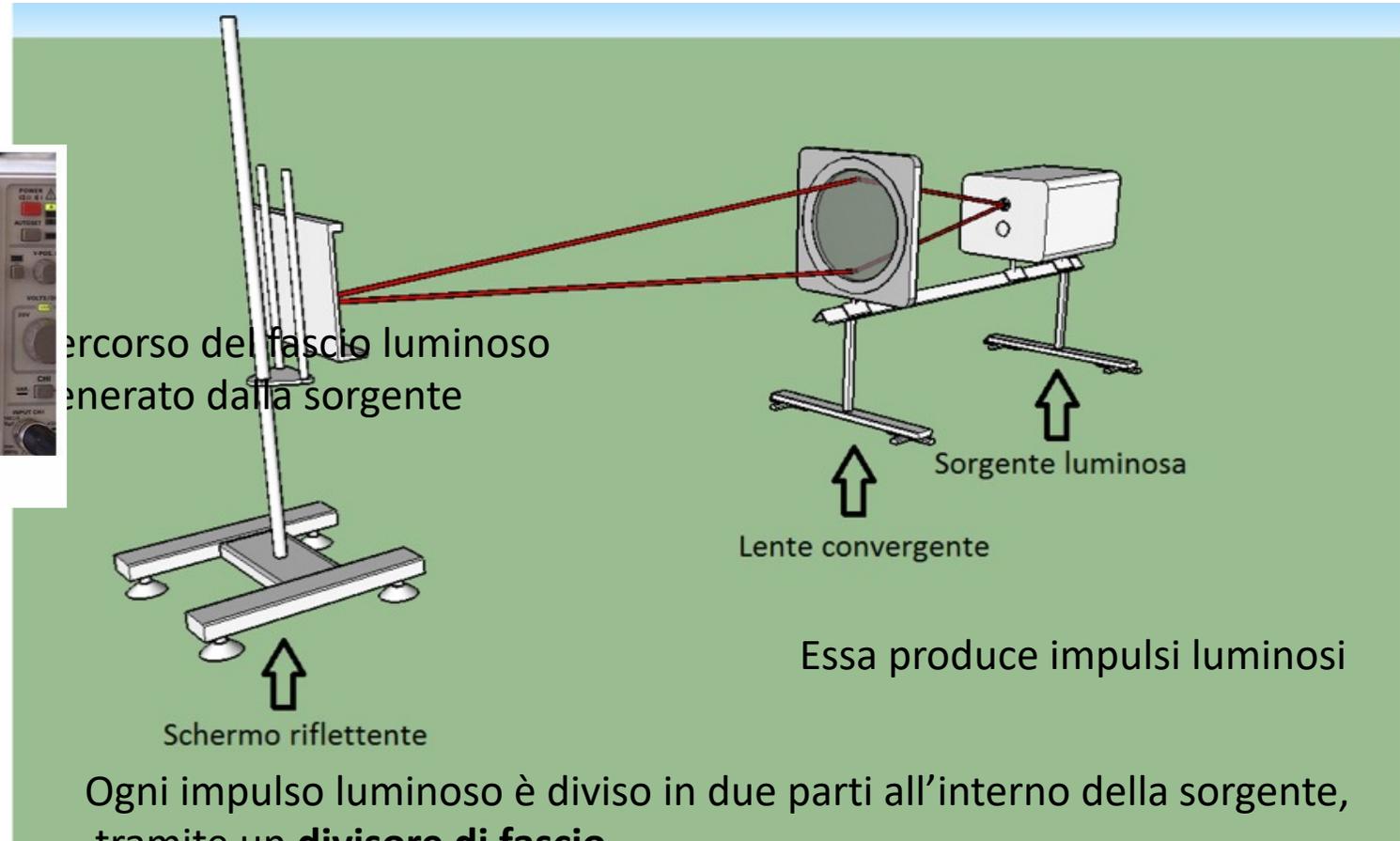
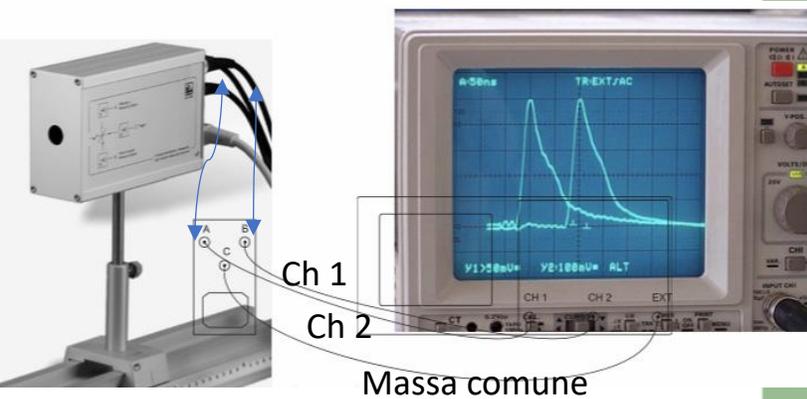
Standard uncertainty (**exact**)

Relative standard uncertainty (**exact**)

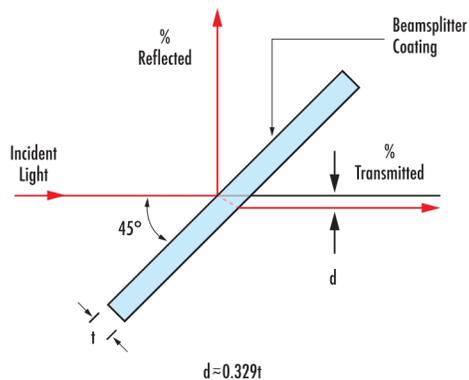
Concise form **299 792 458 m s<sup>-1</sup>**

Il metro è la lunghezza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299792458 di secondo.

# Il nostro apparato di misura



## Divisore di fascio



Ogni impulso luminoso è diviso in due parti all'interno della sorgente, tramite un **divisore di fascio**.

Una parte dell'impulso, viene utilizzato come riferimento temporale, l'altra parte percorre nei due sensi il cammino tra sorgente e catadiottro.

Il ritardo rispetto alla prima parte è il tempo di percorrenza del cammino.

La misura del ritardo è effettuata utilizzando un OSCILLOSCOPIO ELETTRONICO digitale

# Dettagli tecnici dell'apparato sperimentale

## 3. Technical data

### Basic unit

Light emitter:	LED
Pulse rate:	30 kHz approx.
Power input:	3 W approx.
Voltage:	115/230 V, 50/60 Hz
Dimensions:	103 x 56 x 175 mm <sup>3</sup>
Stem:	150 mm x 10 mm diam.
Weight:	1 kg approx.

### Lens

Fresnel lens:	$f = 375$ mm
Lens surface:	245 mm x 245 mm
Dimensions:	285 mm x 285 mm
Stem:	54 mm x 10 mm diam.
Weight:	200 g approx.

### Mirror

Design:	Micro-prism mirror
Mirror diameter:	100 mm approx.
Dimensions:	170 x 170 x 40 mm <sup>3</sup>
Stem:	54 mm x 10 mm diam.

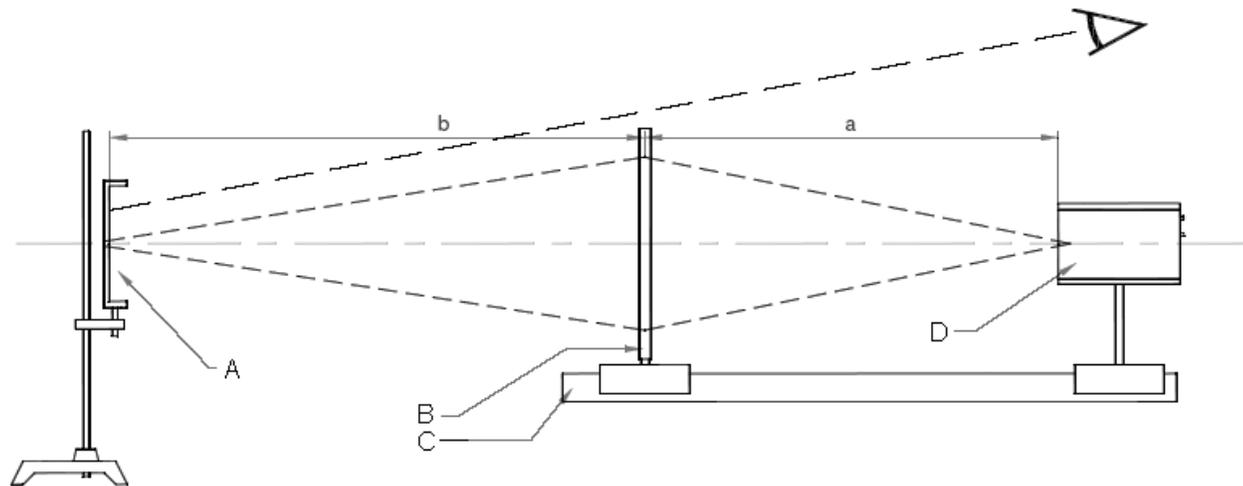
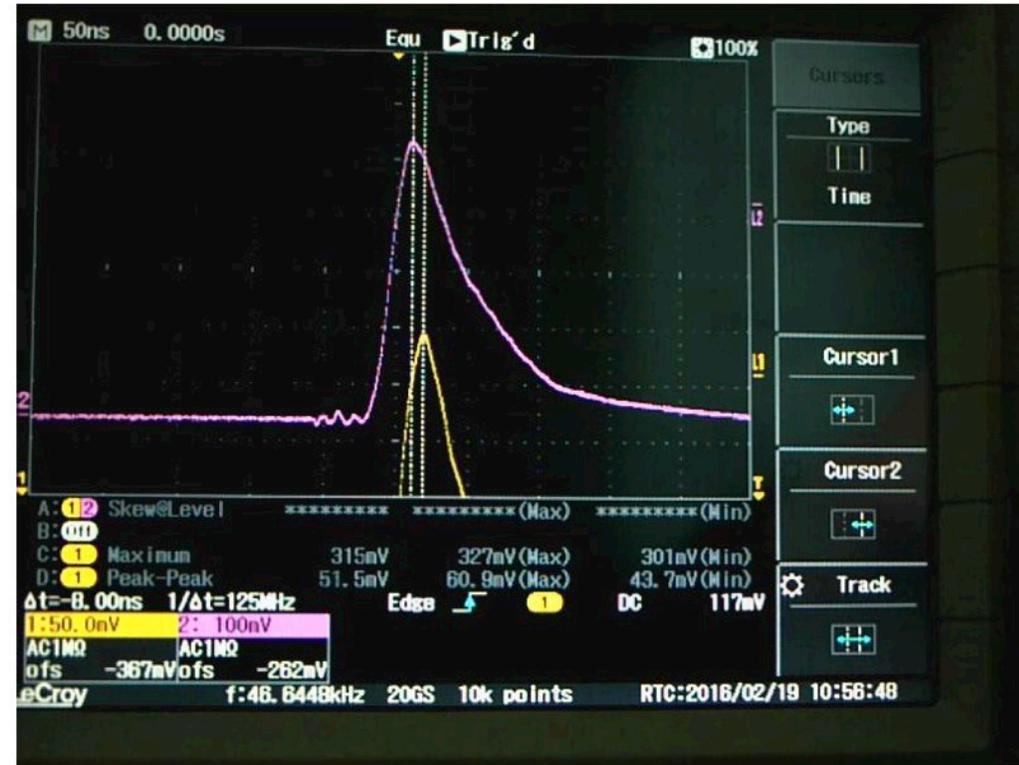


Fig. 1: Experiment set-up: A Microprism mirror, B Fresnel lens, C Optical bench, D Basic unit

# Misure all'Oscilloscopio

La luce è convertita da un appropriato sensore fotoelettrico in una tensione elettrica, che viene misurata dall'oscilloscopio. L'ampiezza della tensione è proporzionale all'intensità luminosa



Sullo schermo dell'oscilloscopio è riportata la tensione misurata in funzione del tempo

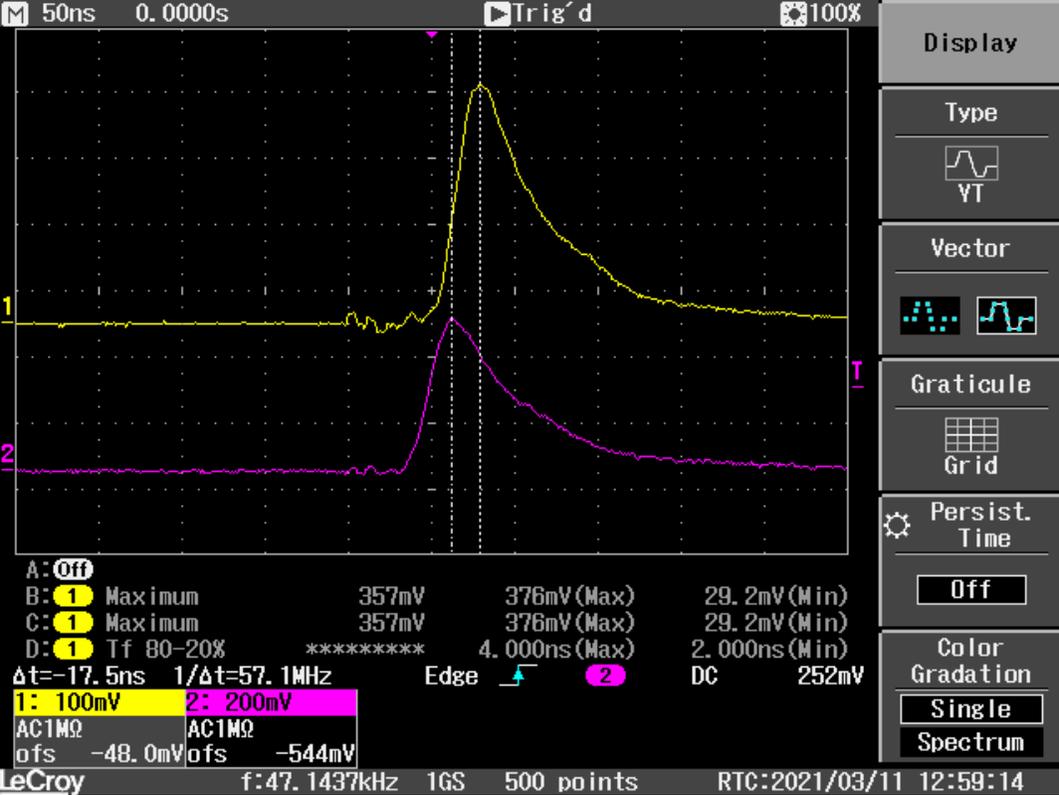
I due impulsi hanno la stessa forma, perché provengono dallo stesso impulso originario, diviso in due parti da un separatore di fascio.

Essi sono solo traslati in tempo, a causa del diverso cammino percor

$$s = 260 \text{ cm}, \Delta t = 10.0 \text{ ns}$$
$$v = 2.6 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$s = 208 \text{ cm}, \Delta t = 8.0. \text{ ns} \quad v = 2.6 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

- Il segnale elettrico corrispondente all'impulso di riferimento viene visualizzato sullo schermo con una **curva gialla**
- Il segnale elettrico corrispondente all'impulso che ha percorso il cammino esterno viene visualizzato con una **curva rosa**

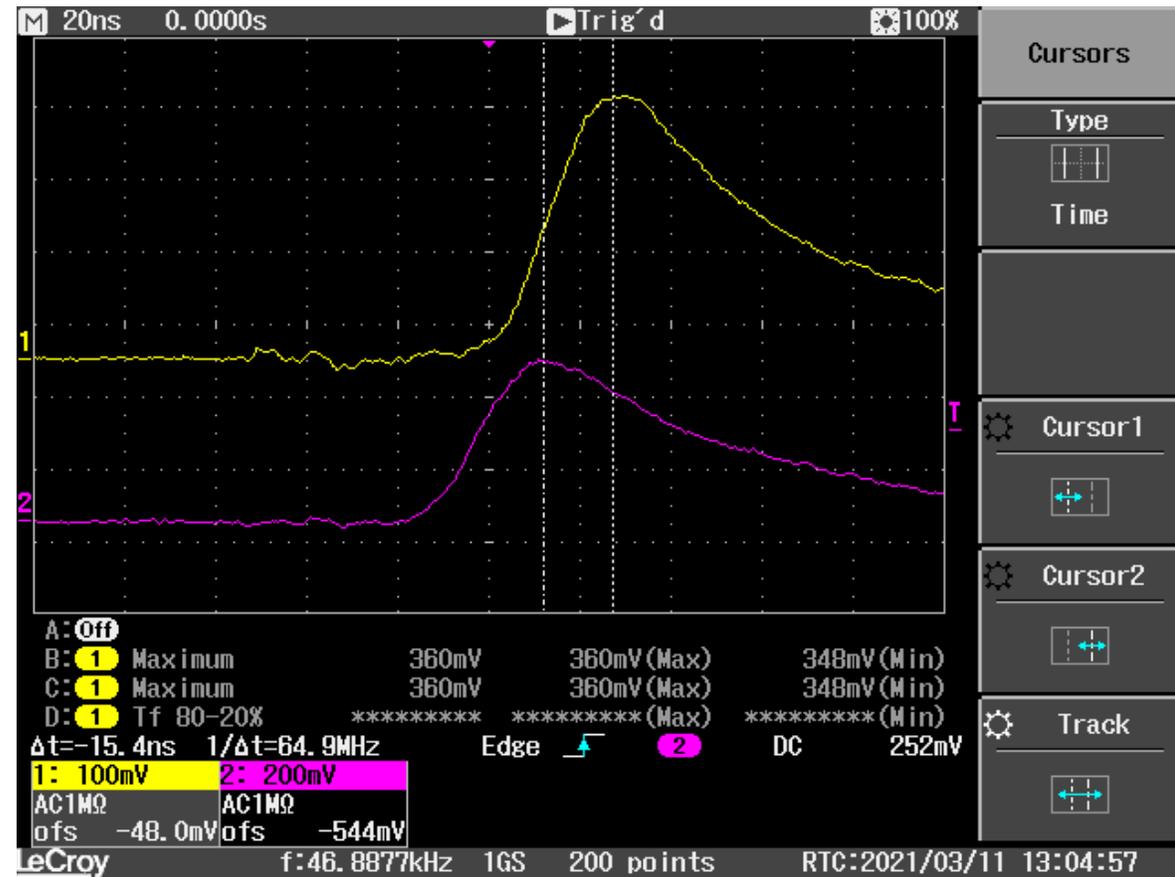


1-  $s = 240\text{ cm}$

Agendo sul cursore relativo a ciascun canale (giallo/rosa) si individuano due punti corrispondenti alla stessa fase dell'impulso luminoso, in particolare i rispettivi massimi.

Dalla differenza di posizione (temporale) dei due massimi, si ottiene il ritardo tra i due impulsi.

Fissando simultaneamente i due cursori, tale ritardo si legge direttamente sullo schermo.



$\Delta S$ (Spazio totale: in cm)	I[s] (Incertezza spazio: in cm)	$\Delta S-I[s]$ (Spazio totale minimo: in cm)	$\Delta S+I[s]$ (Spazio totale massimo: in cm)	$\Delta t$ (Tempo impiegato: in ns)	I[t] (Incertezza tempo: in ns)	$\Delta t-I[t]$ (Tempo impiegato minimo: in ns)	$\Delta t+I[t]$ (Tempo impiegato massimo: in ns)	$V=\Delta S \cdot 10^4 / \Delta t$ (Velocità: in km/s)
280	1	279	281	9,5	0,2	9,3	9,7	294736,8
258	1	257	259	8,5	0,2	8,3	8,7	303529,4
238	1	237	239	8,6	0,2	8,4	8,8	276744,2
218	1	217	219	7,4	0,2	7,2	7,6	294594,6
198	1	197	199	6,6	0,2	6,4	6,8	300000
264	1	263	265	9,4	0,2	9,2	9,6	280851,1
288	1	287	289	10,6	0,2	10,4	10,8	271698,1
218	1	217	219	8,2	0,2	8	8,4	265853,7
228	1	227	229	6,5	0,2	6,3	6,7	350769,2
198	1	197	199	6,5	0,2	6,3	6,7	304615,4

