

Laboratorio di Fisica Moderna

Misura della Velocità della Luce

Misura del Numero di Avogadro



L. Martina
10/03/2026

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

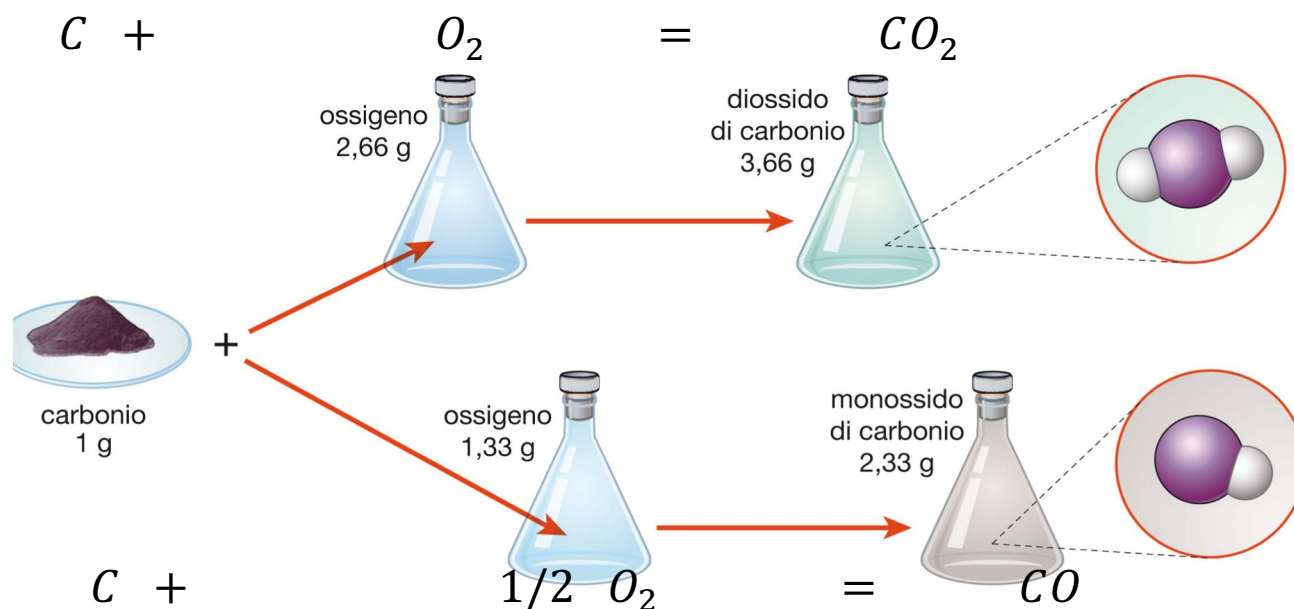


La teoria atomica di Dalton

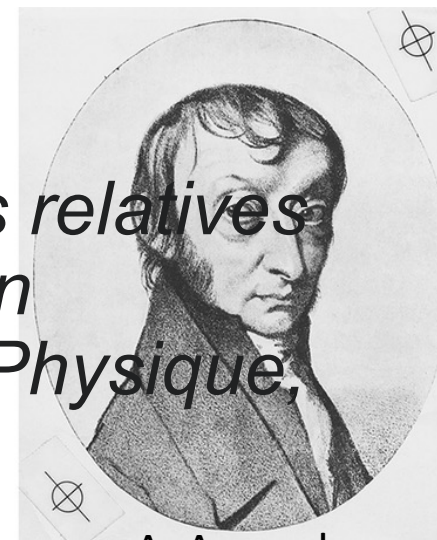


John Dalton

- 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 (**Legge di Stato dei Gas Ideali**)
- $PV = n R T = M/M_{\text{mol}} R T = N/N_A R T = N R / N_A T = N k_B T$.
- Definizione del Numero di Avogadro: esso è il numero di molecole in un grammo-molecola di sostanza.
- Possiamo ottenere una stima del Numero di Avogadro N_A ?



A. Einstein

Quanto vale N_A ?



J. Perrin

- 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/>



Quanto sono piccole le molecole ?

Dalla legge dei Gas Perfetti

- $PV = n R T$. $n=1 \text{ mol}$ $V = \frac{R T}{P}$

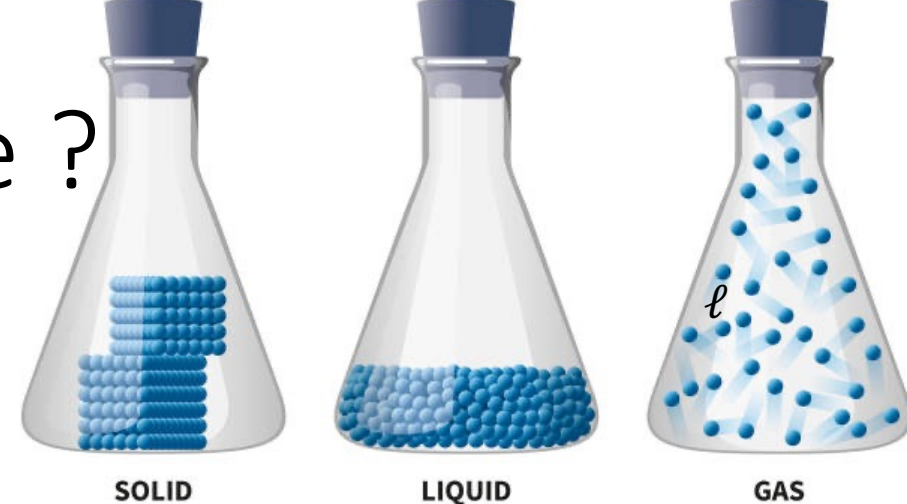
- $R = 8,314 \text{ J / mol x } ^\circ\text{K}$, $T = 0 ^\circ\text{C} + 273.15 ^\circ\text{C} = 273.15 ^\circ\text{K}$

$$P = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$$

$$V = \frac{R T}{P} = 0.02241 \text{ m}^3 = 22.41 \text{ l}$$

$$v_{spec} = \frac{V}{N_A} = \frac{22.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 3,72 \times 10^{-26} \text{ m}^3$$

$$\ell = \cong \sqrt[3]{v_{spec}} = 3.34 \times 10^{-9} \text{ m. Libero cammino medio}$$



Dai Solidi

$$\rho = \frac{m}{v_{mol}} \quad P_{mol} = m N_A$$

$$\frac{P_{mol}}{\rho} = N_A v_{mol} \Rightarrow v_{mol} = \frac{P_{mol}}{\rho N_A}$$

$$a = \text{«Diametro» di una molecola in un solido} \approx \sqrt[3]{v_{mol}} = \sqrt[3]{\frac{P_{mol}}{\rho N_A}}$$

$$\rho_{CO_2} = 1.56 \text{ kg/dm}^3 \quad P_{mol CO_2} = 44.01 \text{ g mol}^{-1}$$

$$a \approx \sqrt[3]{\frac{44.01}{1.56 \times 6.022 \times 10^{23}}} = 3.6 \times 10^{-10} \text{ m} \quad \ell \cong 3.34 \times 10^{-9} \text{ m} \approx 10 a$$

$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$$



Teorema di equipartizione dell'energia $E = N \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} N k_B T$

Velocità quadratica media di una molecola (puntiforme) di un gas perfetto a T :

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3 k_B T}{m}}$$

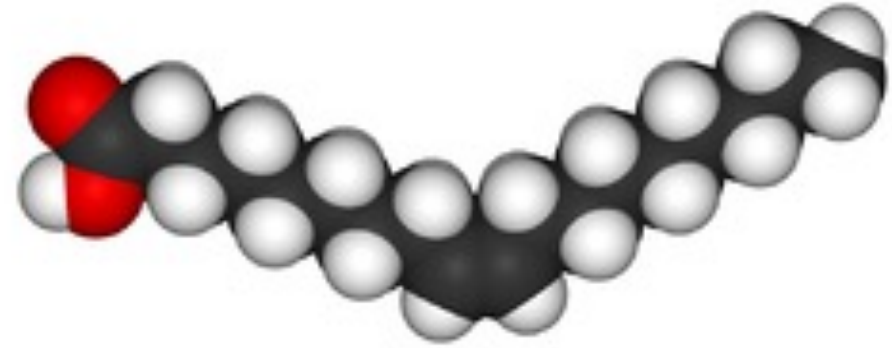
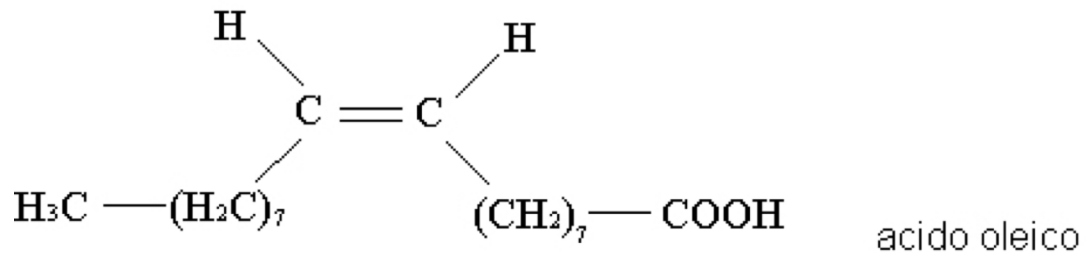


Es.: T = 273 °K, m = 44,01 uma (CO₂). $\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 273}{44.01 \times 1.66 \times 10^{-27}}} = 393 \text{ m/sec}$

Tempo medio tra due collisioni: $\tau = \frac{\ell}{\bar{v}} = \frac{3.34 \times 10^{-9} \text{ m}}{393 \text{ m/sec}} = 8.49 \times 10^{-12} \text{ sec}$

Frequenza degli urti $f = 1/\tau = 1.12 \times 10^{11} \text{ sec}^{-1}$

Il metodo dello strato monomolecolare



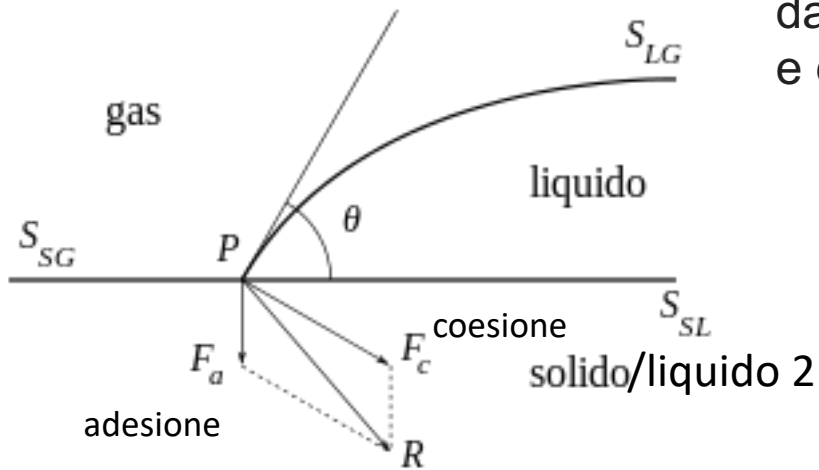
- Acido Oleico $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$
- Peso Molare $P_M = 282.47 \text{ g/mol}$
- Densità di massa a temperatura ambiente $\delta = 0.895 \text{ g/cm}^3$
- Nel corso dell'esperimento si suppone che, una volta depositata sull'acqua, la goccia di acido si espanda fino a formare uno **strato 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 $dE = \gamma dA$

γ 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 θ

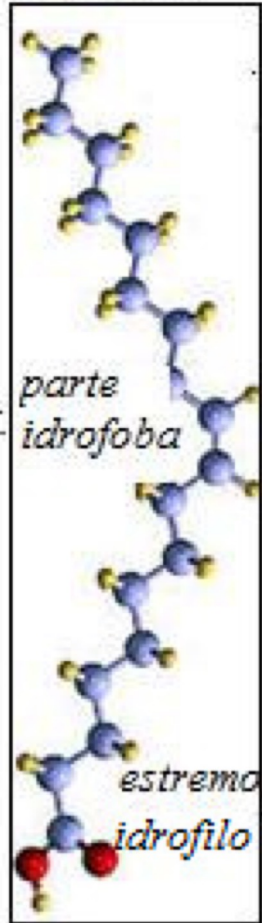
$$\gamma = d E / d A = \gamma_0 / \cos(\theta/2)$$

Materiale	Tensione superficiale (N/m)
Mercurio	0,559
Acqua	0,073
Acido Oleico	0,0319
Benzene	0,029

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.

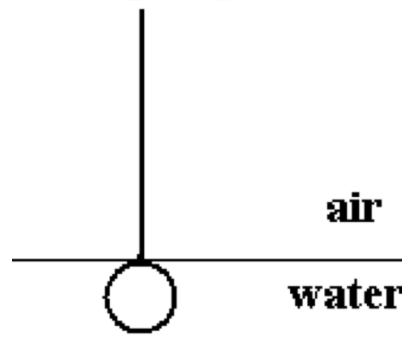
Acido Oleico



a

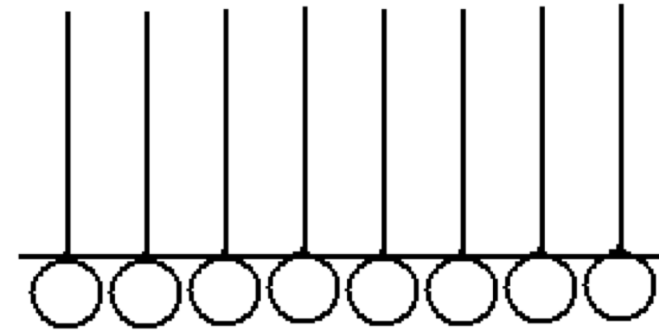
$l = 4a$

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

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

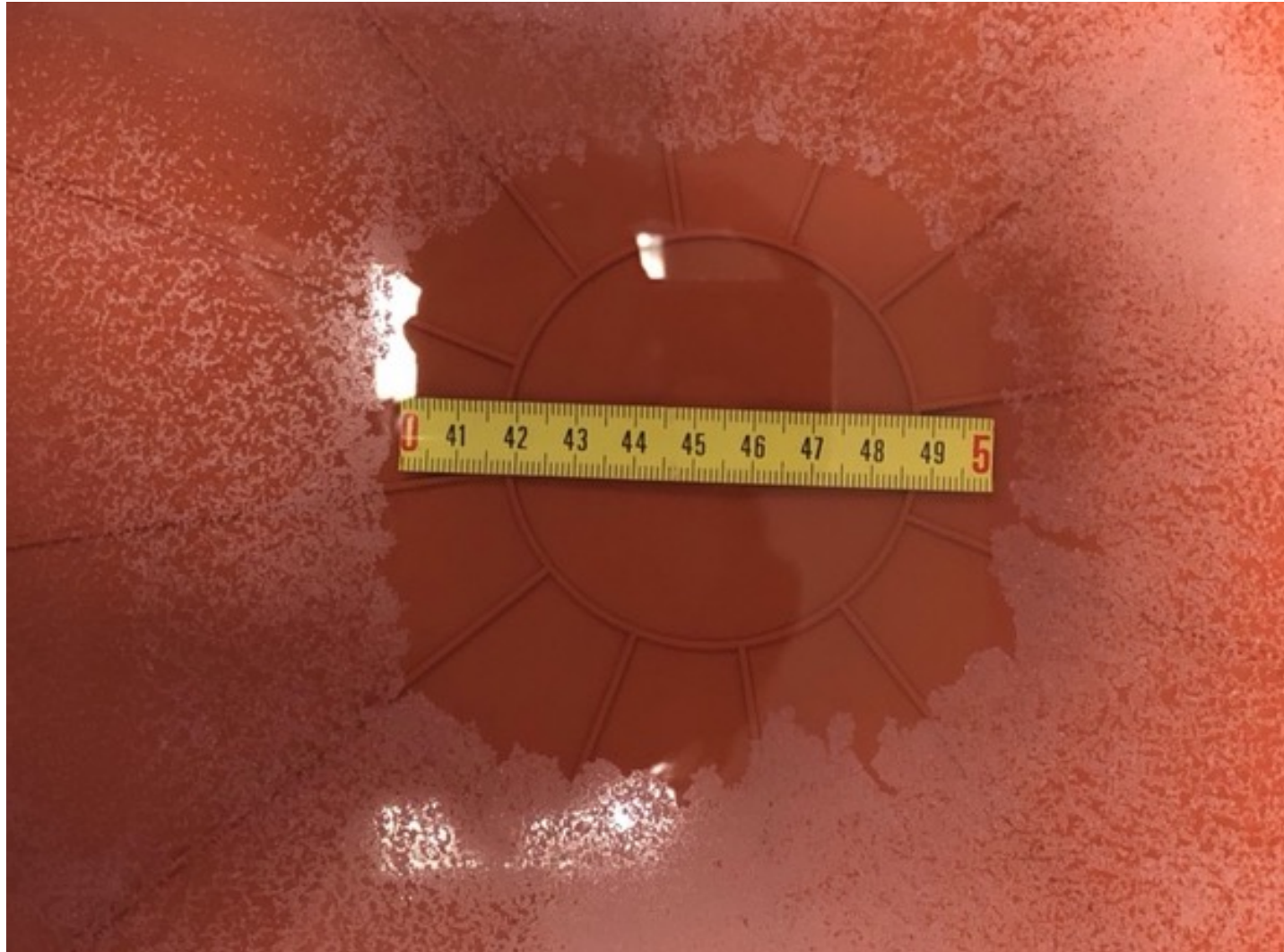
$$V_{\text{A.Ol.}} = C \times V_{\text{goccia}} = (1.0 \pm 0.5) \times 10^{-5} \text{ cm}^3$$

NB L'etanolo è miscibile in acqua

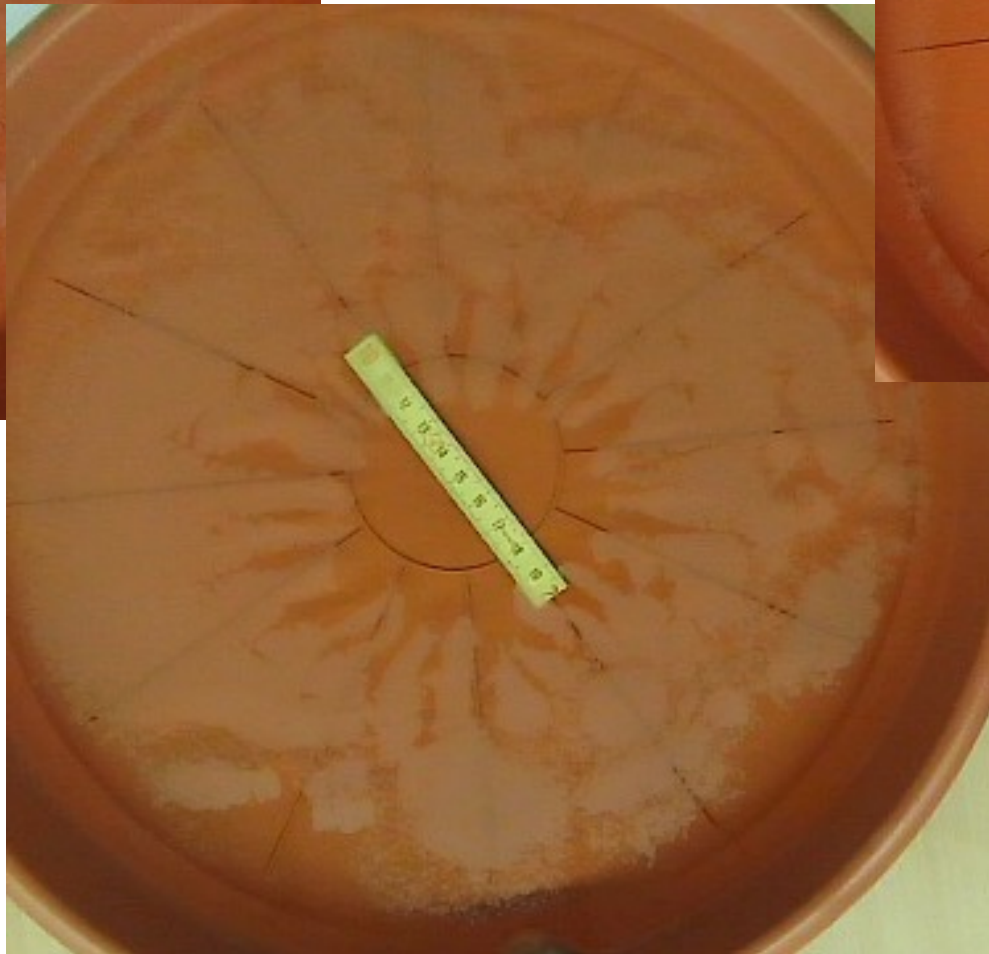
Elaborazione dei Dati

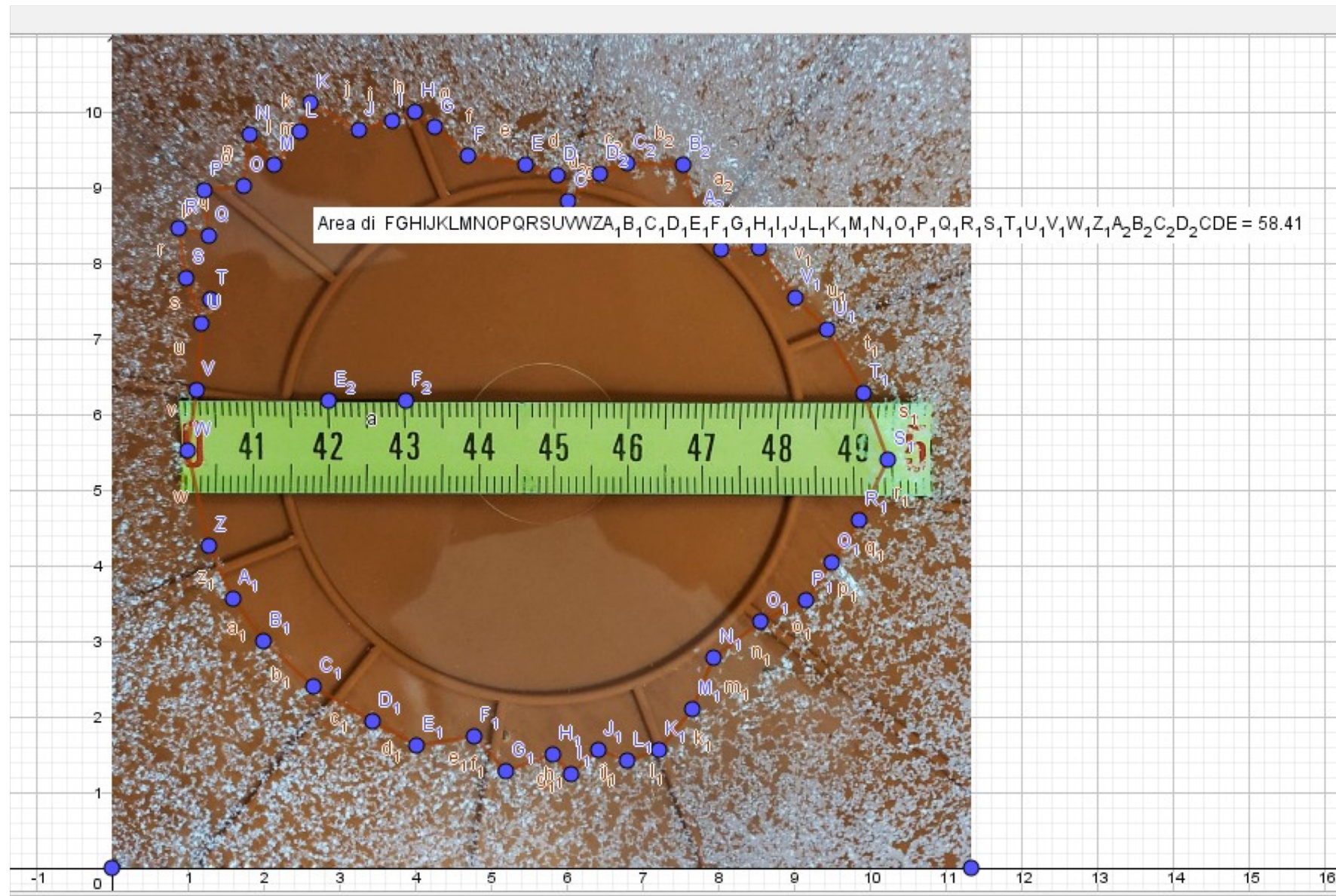
- 1) Calcolare la sua area A a partire dalla fotografia eseguita.
Per esempio contando i quadratini della carta millimetrata usata, che cadono all'interno del perimetro tracciato dalla polvere. Rapportare la lunghezza del lato di un quadratino alla corrispondente misura data dalla scala del righello 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

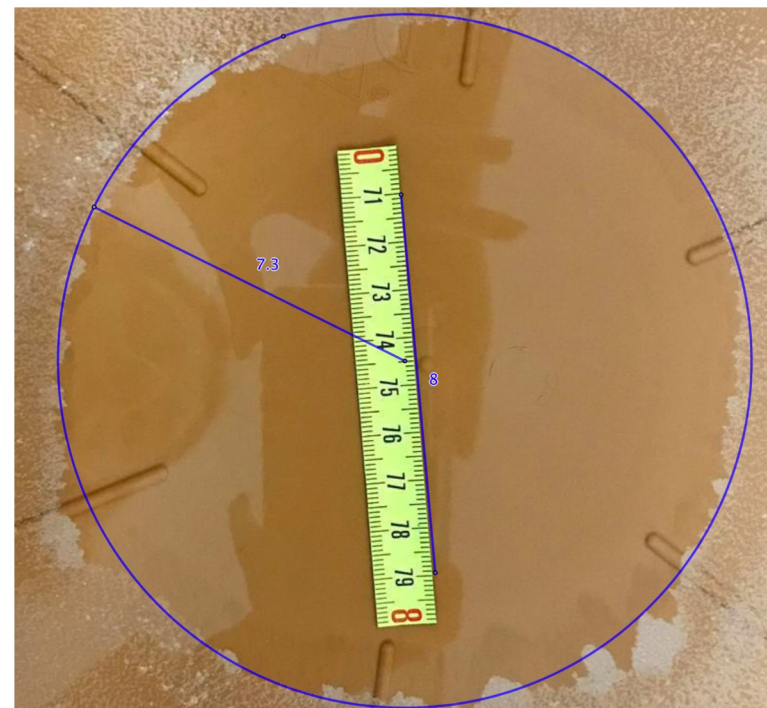
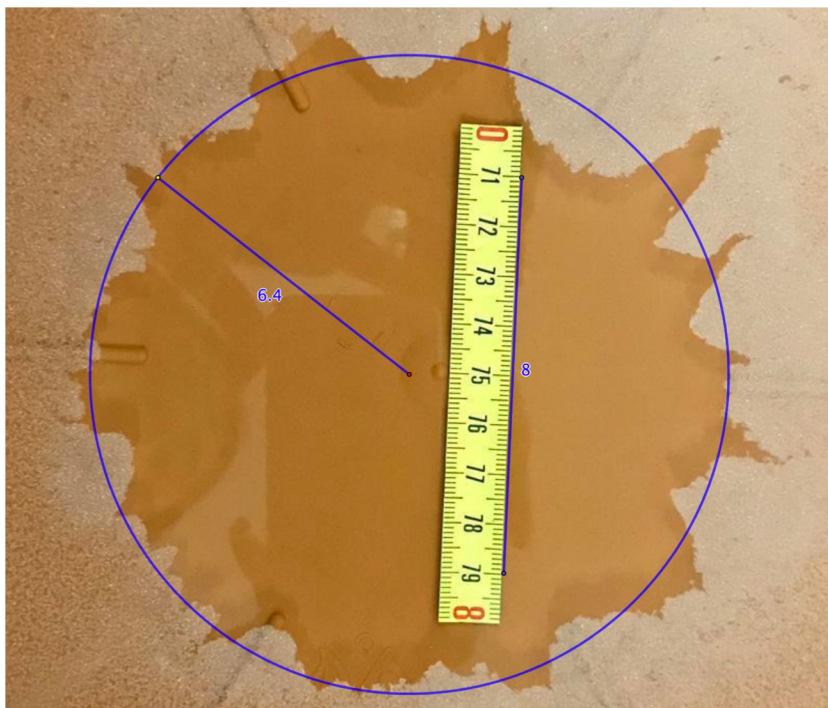


Altre foto





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

A (cm²)	ΔA (cm²)	h (cm)	Δh (cm)	V (cm³)	ΔV (cm³)	N_A (mol⁻¹)	ΔN_A (mol⁻¹)
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	$2.1 * 10^{-7}$	$0.9 * 10^{-7}$	$6 * 10^{-22}$	$7 * 10^{-22}$	$5 * 10^{23}$	$6 * 10^{23}$

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

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

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

La velocità della LUCE



Torre Zytglogge, Berna, Svizzera.

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

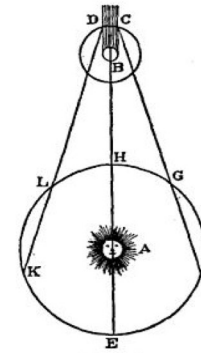
Misura della velocità della luce



1670, Ole Roemer



214000 km/sec



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

Teoria della Relatività di Einstein

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

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⁻¹**

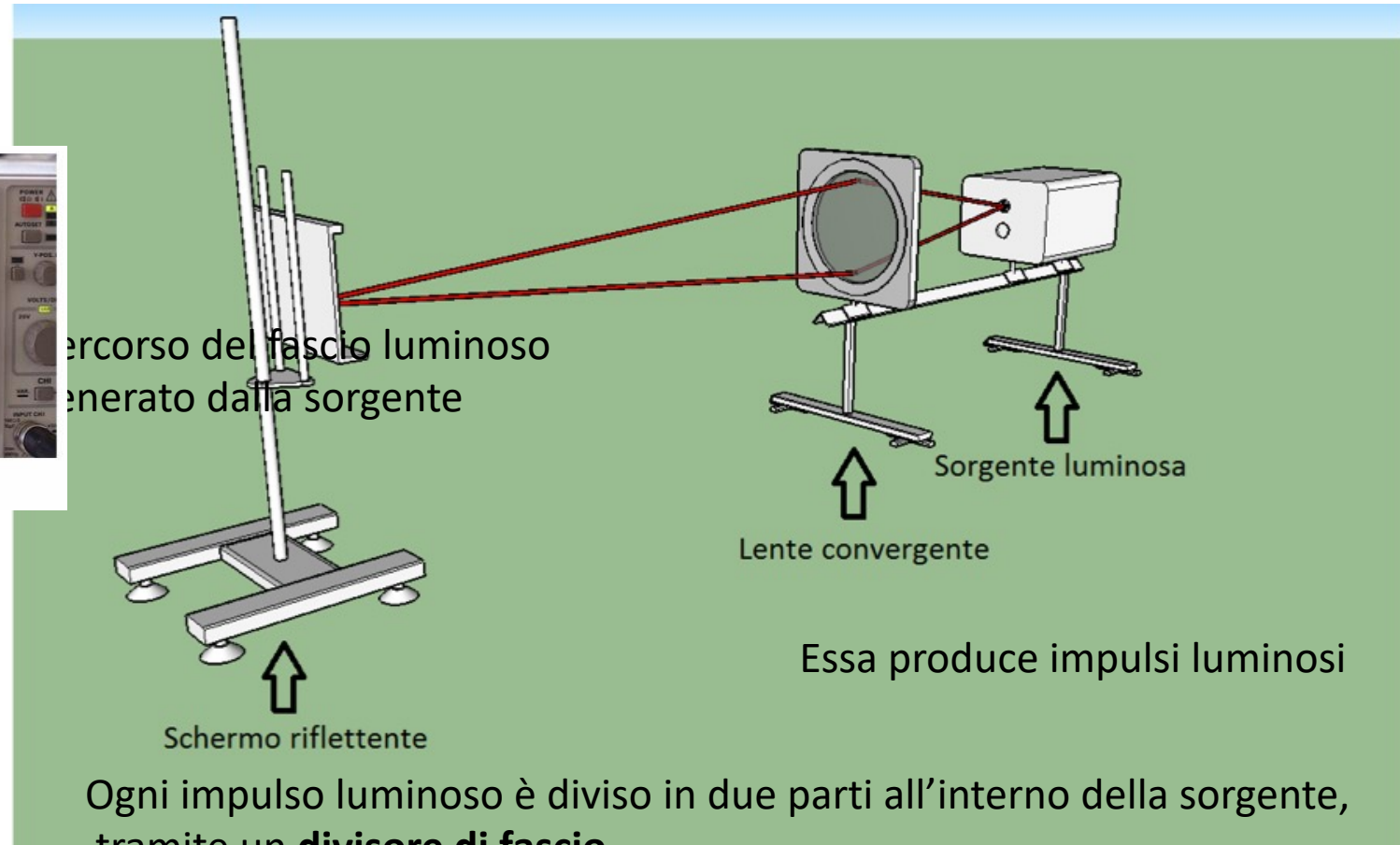
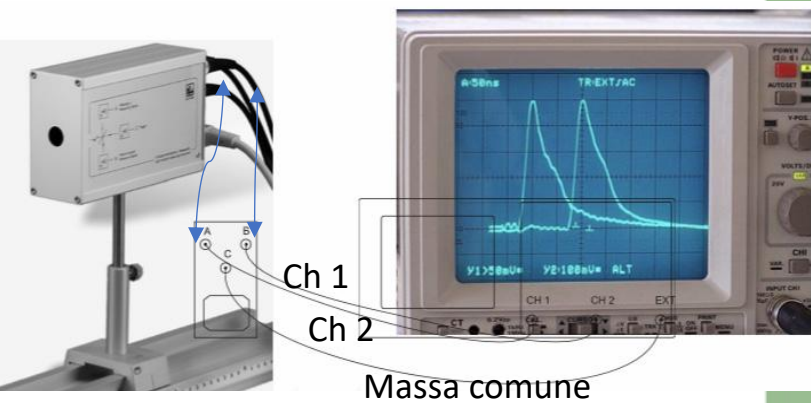
Standard uncertainty (**exact**)

Relative standard uncertainty (**exact**)

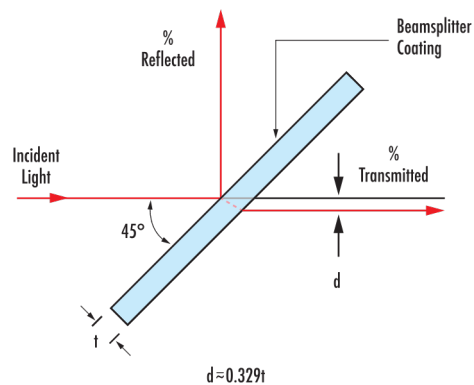
Concise form **299 792 458 m s⁻¹**

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 mm³
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 mm³
Stem: 54 mm x 10 mm diam.

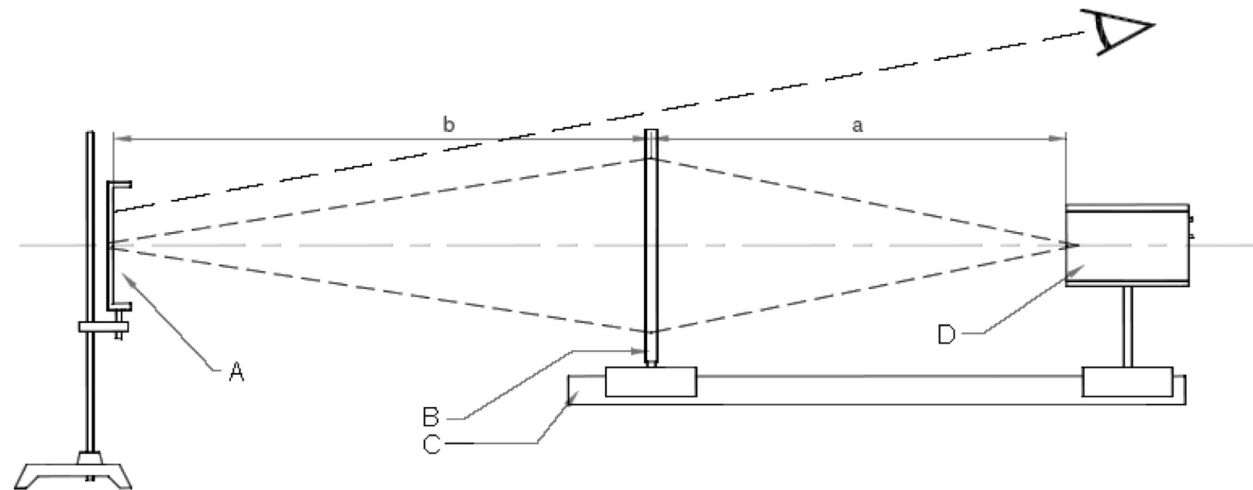


Fig. 1: Experiment set-up: A Microprism mirror, B Fresnel lens, C Optical bench, D Basic unit

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



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



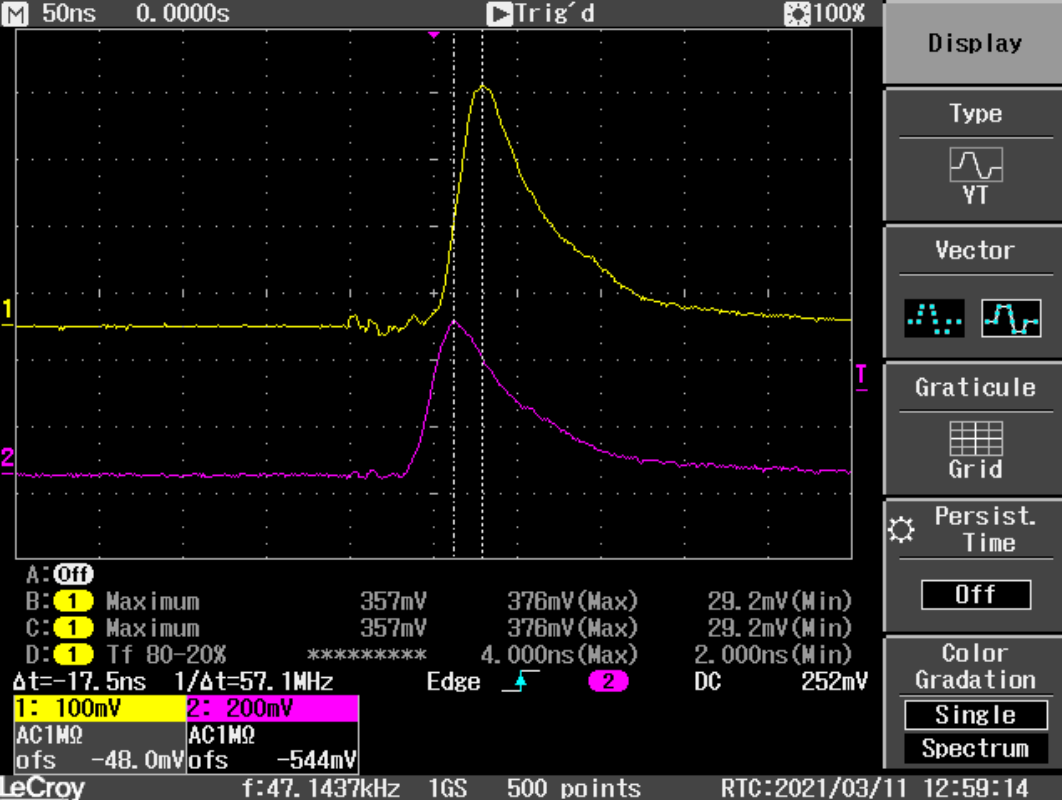
$$s = 208 \text{ cm}, \Delta t = 8.0. \text{ ns} \quad v = 2.6 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

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 percorso

- 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**

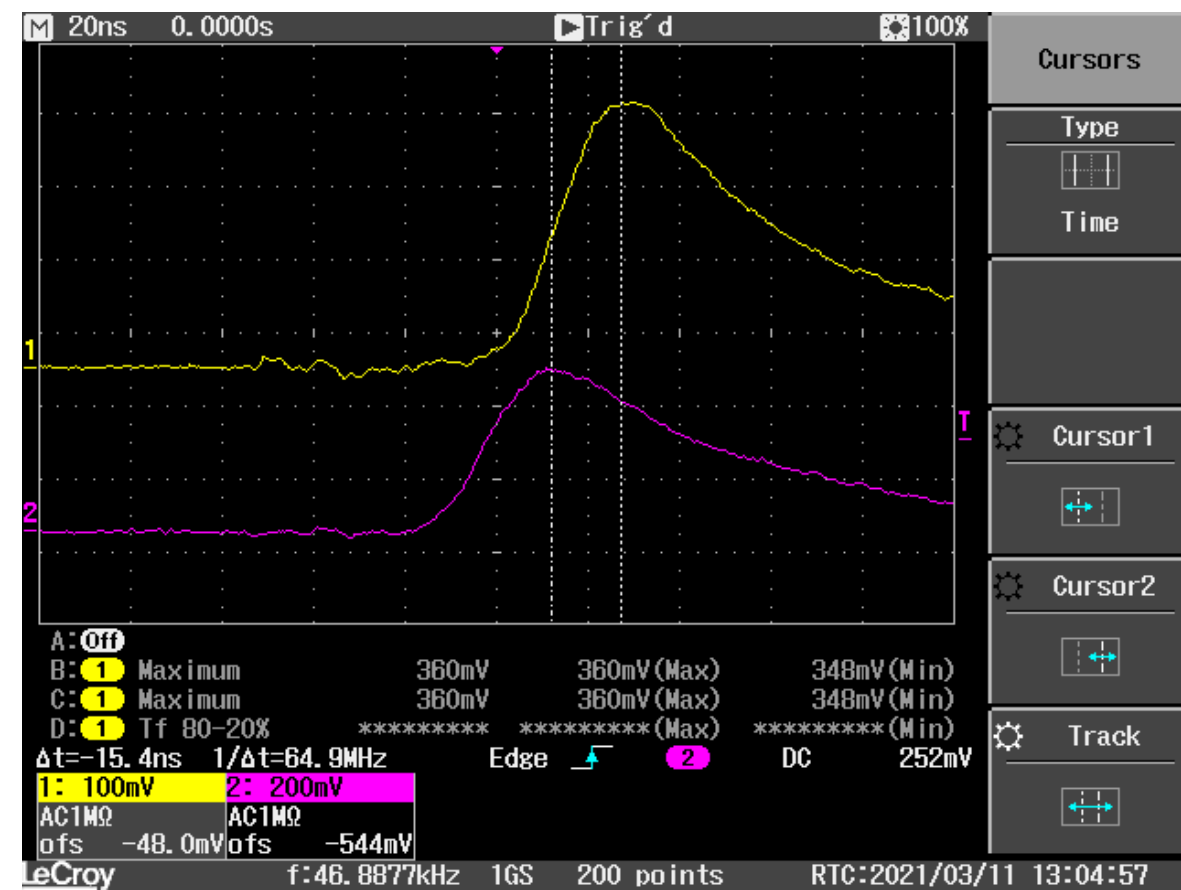


1- s= 240 cm

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.



ΔS (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)	Δt (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

