



UNIVERSITÀ  
DEL SALENTO



Dipartimento di Matematica e Fisica  
"Ennio De Giorgi"



INFN  
Istituto Nazionale  
di Fisica Nucleare

# Il Laboratorio di Fisica Moderna

L. Martina

*Dipartimento di Matematica e Fisica  
"Ennio De Giorgi" - Università del Salento  
Sezione INFN – Lecce*

La fisica moderna nella scuola secondaria  
Lecce 11/5/'16

# Laboratorio di Fisica Moderna

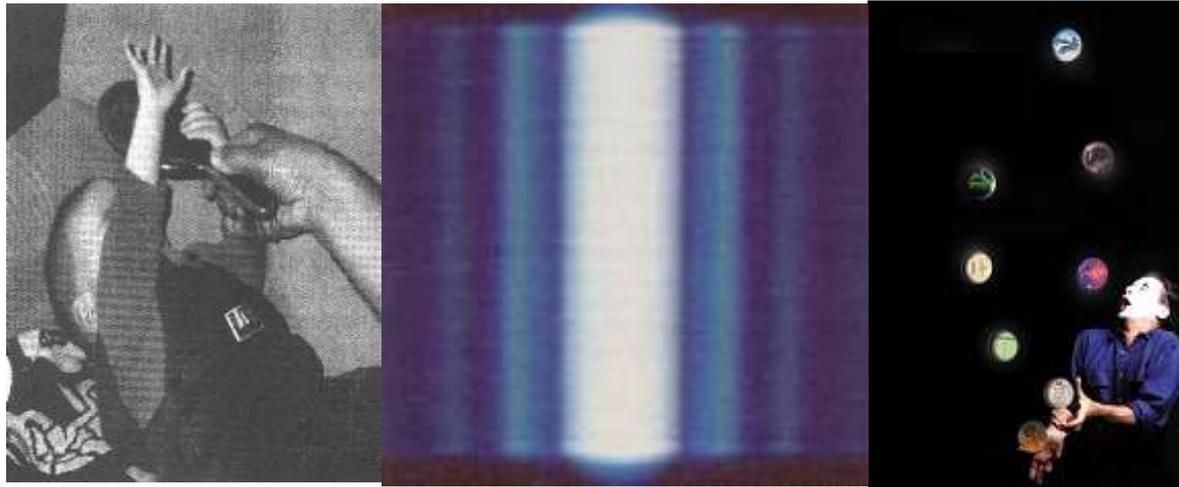
## Idee Guida

- ◆ Cosa distingue lo studio della Fisica dalle altre discipline?
  - La consapevolezza nell'utilizzo dei concetti fondanti della
    - Meccanica Quantistica
    - Relatività
  - Produce misure di parametri che modellano la struttura dell'Universo
- ◆ Qual è la motivazione educativa ?

L'importanza degli **elementi metodologici e concettuali** della Fisica Moderna nella cultura del cittadino contemporaneo.
- ◆ Cosa caratterizza un Laboratorio di Fisica Moderna?
  - Rendere accessibili misure di **grandezze fisiche fondamentali**.
  - Stimolare un accostarsi ai metodi e alle tematiche di MQ-Rel

# Il Nodo Micro-Macro Fisica

I concetti del Mondo Microscopico **non** possono essere costruiti sulla **sola osservazione e interpretazione** dei fenomeni e delle evidenze sperimentali **dirette** (sempre macroscopiche)



- Interazione **Radiazione – Materia** a livello microscopico
- Il mondo a noi **sensorialmente accessibile**  
è **necessariamente** “classico”
- La **coerenza interna** di una “Teoria Fisica” richiede  
una forte **revisione critica** dei concetti della Fisica Classica.

# Il supporto del *Progetto* *Lauree Scientifiche*

- ▶ Home
- ▶ Il Progetto
- ▶ Chi Siamo
- Corso di Laurea in Fisica
- Scuole partecipanti
- ▶ **Contattaci**
  
- ▶ **Promozione della Fisica**
- Seminari e Conferenze
- Settimana della Cultura Scientifica
- ▶ **Valorizzazione di talenti**
- Scuola estiva di Fisica
- Olimpiadi della Fisica
- ▶ **Laboratori PLS**
- Astrofisica
- Elettromagnetismo e circuiti
- Fisica Ambientale
- Fisica Applicata ai Beni Culturali
- Introduzione alla Fisica Moderna
- PLS@home
- GIORNATE CONCLUSIVE
- ▶ **Laboratori di Ricerca**
  
- ▶ **Galleria di Immagini**
- ▶ **Archivio**
- Esempi di ROOT
- Laboratori didattici
- Progetto Radon 2009/10
- Attività on-line
- Schede di laboratorio

## *Progetto PLS 2015/2016 - Introduzione alla Fisica Moderna*

Responsabile del Laboratorio  
**Luigi MARTINA**

Saranno descritti gli esperimenti che hanno causato la crisi della meccanica classica e gli studenti prenderanno confidenza con un nuovo modo di studiare la fisica. Saranno anche progettati e realizzati esperimenti correlati (misura della velocità della luce e della costante di Planck, esperimento di Millikan,...).

Obiettivo:

1. Avviare gli studenti ad un nuovo modo di studiare la fisica.

### **Scuole coinvolte (gruppo A):**

- Istituto Tecnico Deledda - Lecce
- I.T.I.S. Fermi - Lecce
- I.I.S.S. Majorana - Brindisi
- I.I.S.S. Medi - Galatone
- Liceo Scientifico Ribezzo - Francavilla F.
- Liceo Classico Virgilio - Lecce

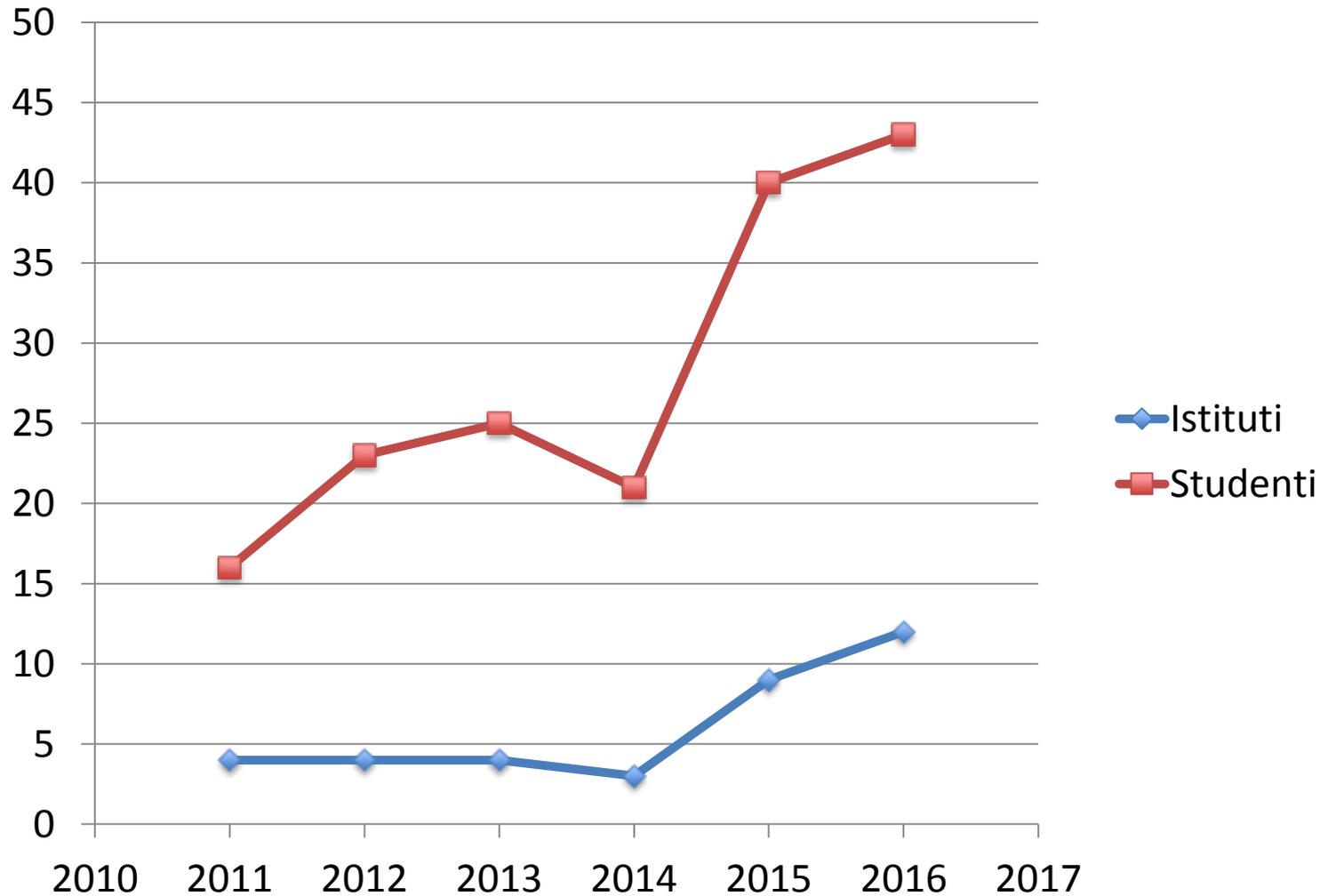
### **Scuole coinvolte (gruppo B):**

- Liceo Scientifico Banzi - Lecce
- Liceo Scientifico Da Vinci - Maglie
- Liceo Scientifico De Giorgi - Lecce
- I.I.S.S. Galilei - Nardò
- Liceo Scientifico Stampacchia - Tricase
- Liceo Scientifico Vallone - Galatina

Calendario degli incontri :

# Laboratorio di Fisica Moderna - PLS

## Partecipazione Storica



# Organizzazione del Lab. F-M PLS

- Interazione e dimostrazione di interesse degli Istituti tramite
  - Reti formali/informali
  - Inserimento nelle programmazioni di Istituto
  - Compatibilità con Progetti di orientamento, PON, altre iniziative
  - Compatibilità con il procedere della programmazione scolastica
- Tempistica tipo : Gennaio – Marzo
- “Classi” di circa 20 elementi
- La selezione degli studenti è affidata ai referenti scolastici **su base motivazionale** dei singoli studenti.
- Partecipazione attiva dei docenti agli incontri
- Incontri di 3 ore ciascuno presso i Laboratori Didattici del Dipartimento
- Almeno **tre/quattro** prove sperimentali (semi)individuali
- Eventuale altra esperienza dimostrativa
- Elaborazione di un lavoro finale (di gruppo) da presentare durante la  
GIORNATA CONCLUSIVA



# Quali Esperienze?

1. Concettualmente semplici (è necessario il minimo delle leggi fisiche)
2. Consentano di misurare **costanti fondamentali della Natura**
3. Non troppo “mediate” da **dispositivi di controllo**, **acquisizione** ed **elaborazione dati**
4. Eseguibili in tempi limitati da piccoli gruppi o collettivamente
5. Misure facilmente ripetibili in tempi brevi
6. “Robuste” rispetto alle condizioni tipo di un’aula scolastica
7. Non troppo costose

Misura del Numero di Avogadro

Misura della Carica dell’Elettrone (Millikan)

Misura della Velocità della Luce

Misura della Costante di Planck (effetto fotoelettrico)

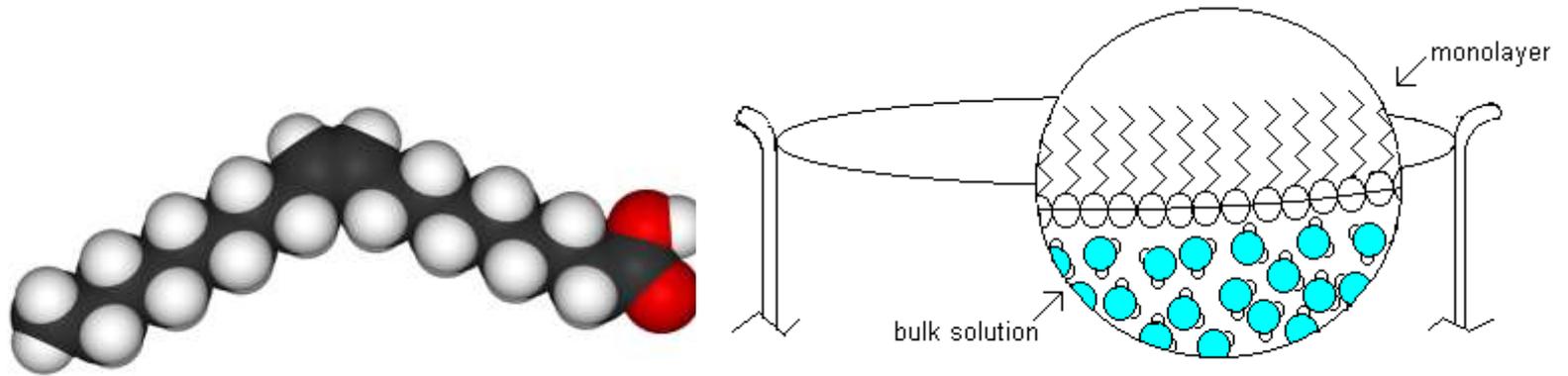
Emissione delle lampada a gas.

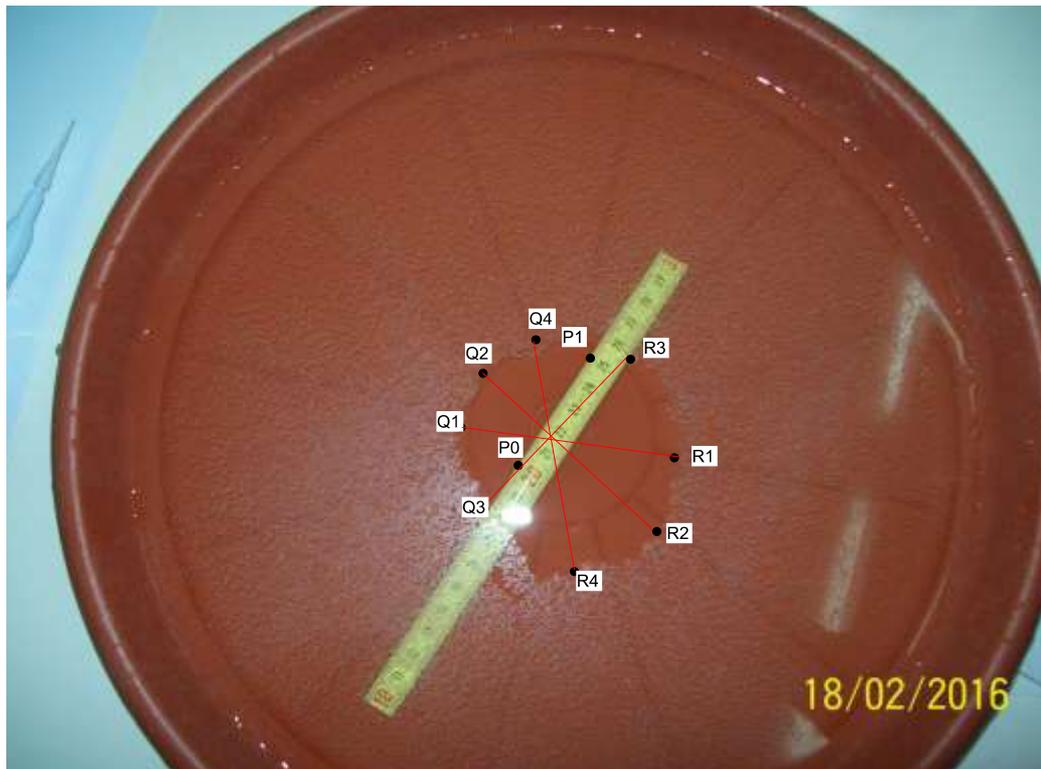
# Gli esperimenti “più belli” della Fisica

- 1** Young's double-slit experiment applied to the interference of single electron
- 2** Galileo's experiment on falling bodies (1600s)
- 3** Millikan's oil-drop experiment (1910s)
- 4** Newton's decomposition of sunlight with a prism (1665-1666)
- 5** Young's light-interference experiment (1801)
- 6** Cavendish's torsion-bar experiment (1798)
- 7** Eratosthenes' measurement of the Earth's circumference (3rd century BC)
- 8** Galileo's experiments with rolling balls down inclined planes (1600s)
- 9** Rutherford's discovery of the nucleus (1911)
- 10** Foucault's pendulum (1851)

# Determinazione del Numero di Avogadro

Metodo dello strato mono-molecolare





## Calculations

1. Find the number of moles of oleic acid.

First find the volume of pure oleic acid (assuming 0.10 mL of the solution was used).

$$\text{vol. of acid} = V_A = \frac{6.8 \times 10^{-5} \text{ mL pure}}{1.0 \text{ mL soln.}} \times 0.10 \text{ mL soln.} = 6.8 \times 10^{-6} \text{ mL pure acid}$$

Then find the mass of oleic acid (density = 0.895 g/mL)

$$\text{mass of acid} = 6.8 \times 10^{-6} \text{ mL} \times \frac{0.895 \text{ g}}{\text{mL}} = 6.1 \times 10^{-6} \text{ g pure acid}$$

From the molar mass (282 g/mol), calculate the moles of pure oleic acid.

$$\text{moles of acid} = \text{mol}_A = 6.1 \times 10^{-6} \text{ g pure acid} \times \frac{\text{mol}}{282 \text{ g}} = 2.2 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

2. Find the number of molecules of oleic acid.

Assuming the comparison area is a square, the area of the oleic acid film can be determined from the following equation:

$$\text{Area}_{\text{film}} = \text{Area}_{\text{square}} \times \frac{\text{mass of film}}{\text{mass of comparison square}}$$

Solve for the thickness of the monolayer.

$$V_A = \text{Area}_{\text{film}} \times \text{thickness}$$

Assuming a molecule of oleic acid is a cube, solve for the volume of the molecule.

$$V_{\text{molecule}} = (\text{thickness})^3$$

Thus, 1 molecule =  $V_{\text{molecule}}$

$$\text{number of molecules} = V_A \times \frac{1 \text{ molecule}}{V_{\text{molecule}}}$$

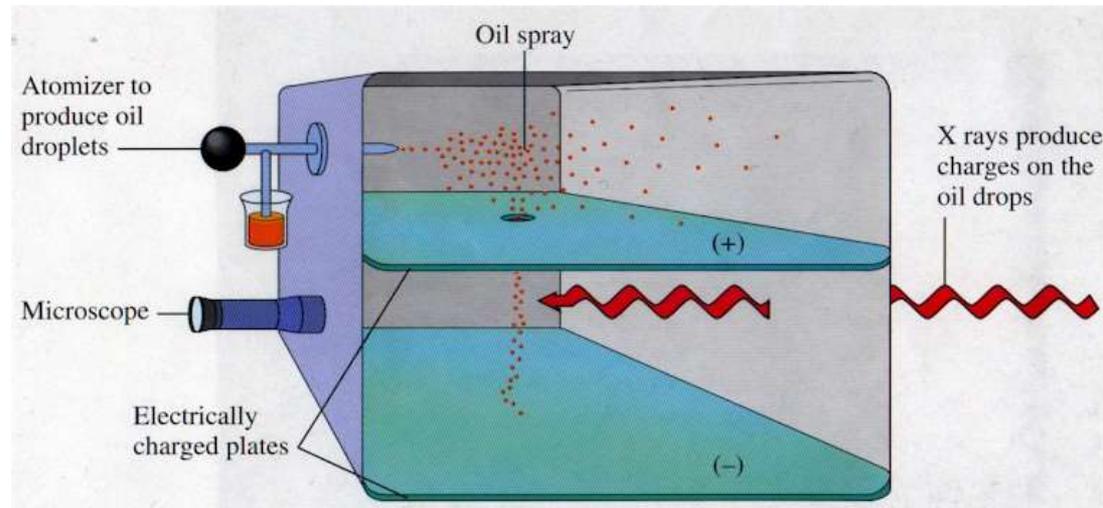
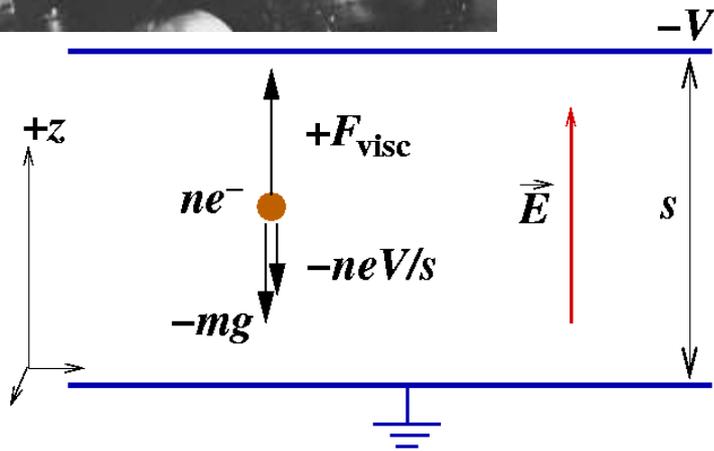
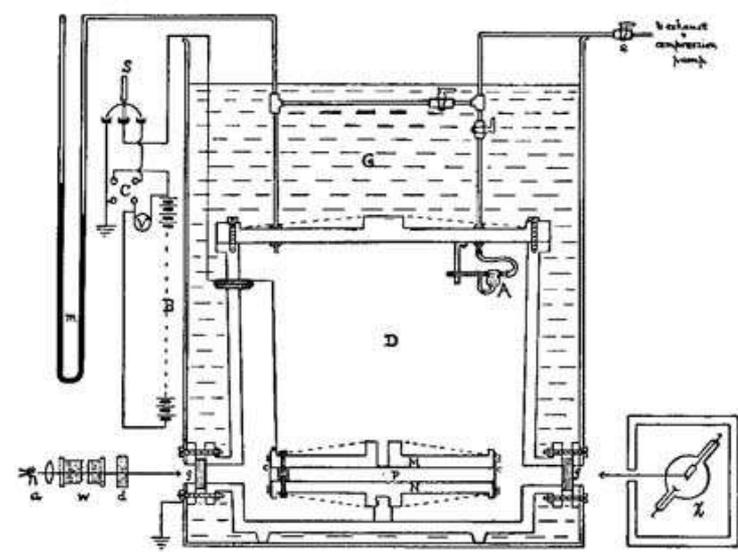
3. Calculate Avogadro's number.

$$\text{Avogadro's number} = \frac{\text{number of molecules}}{\text{mol}_A}$$

4. Calculate the percent error between the accepted value of  $6.02 \times 10^{23}$  molecules/mol and the experimental value obtained. What are the possible sources of error?

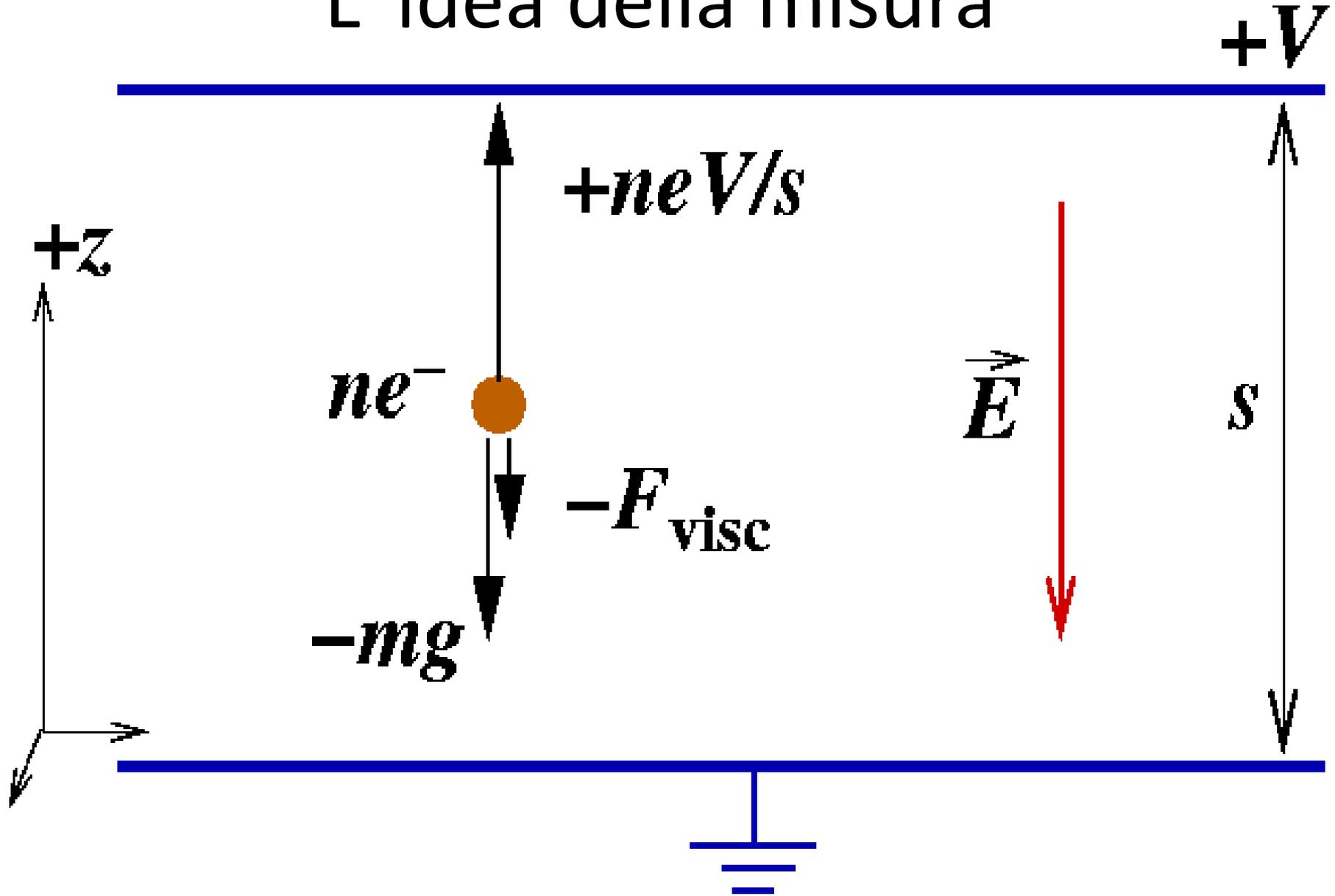


# L'esperienza di Millikan



<http://www.aip.org/history/gap/Millikan/Millikan.html>

# L'idea della misura



# Modellizzazione

Forza di attrito viscoso

$$F_{visc} = 6\pi r\eta v$$

velocità limite  $v$ ,

Equilibrio tra  
forza Peso e  
Attrito Viscoso

$$\frac{4}{3}\rho r^3 g = 6\pi r\eta v$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}$$

Raggio della gocciolina

Equilibrio tra  
Forza Peso e  
Forza di Coulomb

$$qE = mg$$

$$E = \frac{V}{d} \quad \text{Campo elettrico in un condensatore piano}$$

Carica della gocciolina

$$q = \frac{18\rho d}{V} \sqrt{\frac{h^3 v^3}{2rg}}$$



$$q = \frac{2.018 \cdot 10^{-10}}{V} \sqrt{v^3}$$

# Raccolta e analisi dei dati

ddp (V)	De(V) de(V)= 0,01	t (s)	de(t)	s (mm)	de(s)	v (m/s)	de(v)	q ( C )	de(q)
303	3,03	36,91	0,002709293	3	0,066666667	8,12788E-05	0,06937596	4,88028E-19	0,114063939
128	1,28	49,04	0,002039152	2,5	0,08	5,09788E-05	0,082039152	5,73846E-19	0,133058728
458	4,58	10,9	0,009174312	2	0,1	0,000183486	0,109174312	1,09512E-18	0,173761468
217	2,17	31,8	0,003144654	2,5	0,08	7,86164E-05	0,083144654	6,48232E-19	0,134716981
321	3,21	29,14	0,003431709	2,5	0,08	8,57927E-05	0,083431709	4,99565E-19	0,135147563
202	2,02	17,2	0,005813953	1,5	0,133333333	8,72093E-05	0,139147287	8,13606E-19	0,21872093
311	3,11	12,47	0,008019246	2	0,1	0,000160385	0,108019246	1,31797E-18	0,172028869
238	2,38	21,23	0,004710316	1,5	0,133333333	7,06547E-05	0,138043649	5,03566E-19	0,217065473
182	1,82	19,41	0,005151984	2,5	0,08	0,0001288	0,085151984	1,62077E-18	0,137727975
254	2,54	35,99	0,00277855	2	0,1	5,5571E-05	0,10277855	3,29124E-19	0,164167824
169	1,69	31,65	0,003159558	2	0,1	6,31912E-05	0,103159558	5,99817E-19	0,164739336
333	3,33	21,12	0,004734848	2	0,1	9,4697E-05	0,104734848	5,58446E-19	0,167102273
245	2,45	31,7	0,003154574	2	0,1	6,30915E-05	0,103154574	4,12773E-19	0,164731861
153	1,53	49,08	0,00203749	2	0,1	4,07498E-05	0,10203749	3,43098E-19	0,163056235
278	2,78	15,28	0,006544503	2	0,1	0,00013089	0,106544503	1,08702E-18	0,169816754
194	1,94	38,57	0,002592689	5	0,04	0,000129634	0,042592689	1,53532E-18	0,073889033
293	2,93	23,29	0,004293688	2	0,1	8,58738E-05	0,104293688	5,4808E-19	0,166440532
228	2,28	48,68	0,002054232	3,5	0,057142857	7,18981E-05	0,059197089	5,39588E-19	0,098795633
362	3,62	28,53	0,003505082	2,2	0,090909091	7,71118E-05	0,094414173	3,7748E-19	0,15162126
188	1,88	56	0,001785714	3	0,066666667	5,35714E-05	0,068452381	4,20885E-19	0,112678571
290	2,9	31,4	0,003184713	2,3		7,32484E-05	0,003184713	4,36235E-19	0,01477707

# Analisi dei dati

q >	De(q) >	q-De(q)	q - De(q)	<q>	sigma	qi-q1	n1	(qi-q1)/n1	De1	qi-q2	n2	(qi-q2)/n1	De2
3,29	0,54	2,75	3,83	3,77	0,40763724 9	1,05	1,00	1,05	0,72				
3,43	0,56	2,87	3,99										
3,77	0,57	3,20	4,35										
4,13	0,68	3,45	4,81	4,82	0,31114195 7								
4,21	0,47	3,73	4,68										
4,36	0,06	4,30	4,43										
4,88	0,56	4,32	5,44	5,78	0,40444633 5	2,01	1,00	2,01	0,72	0,96	1,00	0,96	0,72
5,00	0,68	4,32	5,67										
5,04	1,09	3,94	6,13										
5,40	0,53	4,86	5,93	9,99	1,60243819 6	6,22	4,00	1,55	0,10	5,17	3,00	1,72	0,64
5,48	0,91	4,57	6,39										
5,58	0,93	4,65	6,52										
5,74	0,76	4,97	6,50	14,91	1,56114310 2	11,15	6,00	1,86	0,53	10,10	5,00	2,02	0,37
6,00	0,99	5,01	6,99										
6,48	0,87	5,61	7,36										
8,14	1,78	6,36	9,92	15,35									
10,87	1,85	9,02	12,72										
10,95	1,90	9,05	12,85										
13,18	2,27	10,91	15,45	16,21									
15,35	1,13	14,22	16,49										
16,21	2,23	13,98	18,44										

e De  
1,60 0,23

“Ribezzo” (2015)

$$q = \frac{2.018 \times 10^{-10}}{V} \sqrt{v^3}$$

V [V]	s [m]	t [s]	v [m/s]	q [C]
149	2,0E-03	27,00	7,4074E-05	8,6344E-19
208	3,0E-03	32,67	9,1827E-05	8,5372E-19
286	3,0E-03	36,05	8,3218E-05	5,3565E-19
194	2,0E-03	36,00	5,5556E-05	4,3074E-19
133	2,0E-03	41,40	4,8309E-05	5,0946E-19
211	2,0E-03	36,07	5,5448E-05	3,9488E-19
212	2,0E-03	30,69	6,5168E-05	5,0077E-19
186	3,0E-03	100,00	3,0000E-05	1,7827E-19
220	2,0E-03	26,16	7,6453E-05	6,1318E-19
207	2,0E-03	23,23	8,6096E-05	7,7879E-19
333	2,0E-03	21,51	9,2980E-05	5,4333E-19
323	2,0E-03	22,28	8,9767E-05	5,3136E-19
396	2,0E-03	19,56	1,0225E-04	5,2689E-19
321	2,0E-03	9,06	2,2075E-04	2,0619E-18
329	2,0E-03	24,55	8,1466E-05	4,5102E-19
391	2,0E-03	19,11	1,0466E-04	5,5258E-19
182	2,0E-03	26,64	7,5075E-05	7,2126E-19
320	1,0E-03	20,36	4,9116E-05	2,1707E-19
352	2,0E-03	20,59	9,7135E-05	5,4883E-19

La seconda parte dell'esperienza di Millikan consiste nel dimostrare la quantizzazione della carica elettrica.

Per dimostrare tale proprietà possiamo dividere i valori di  $q$  trovati in classi e operare sottrazioni e medie aritmetiche per giungere alla carica elementare.

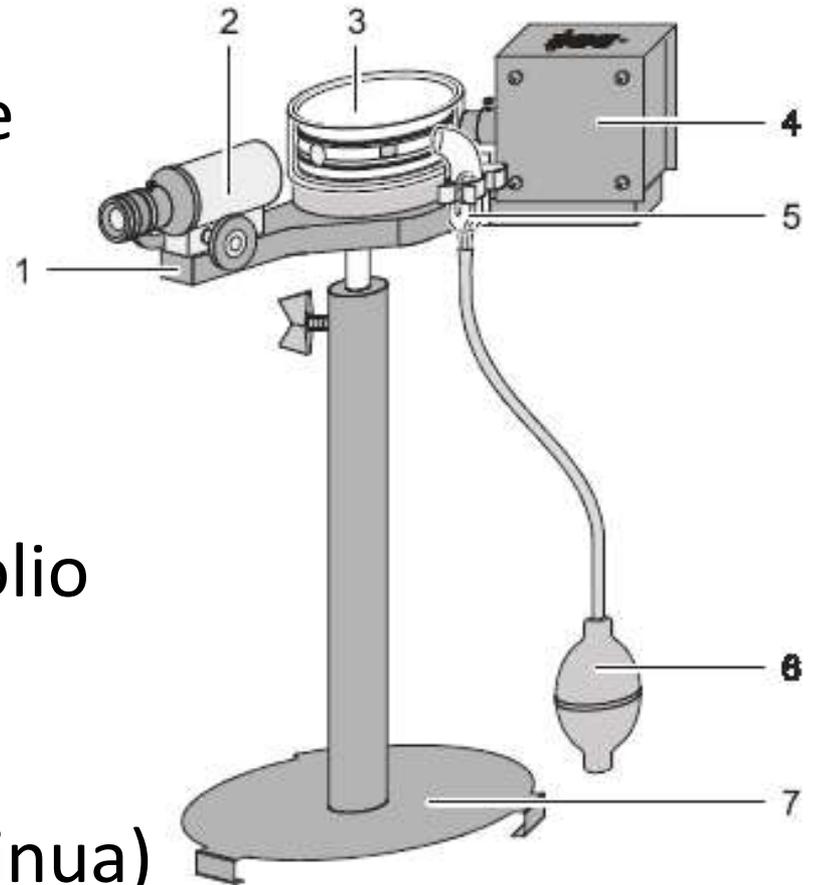
Classe a [C]
5,43327E-19
5,31362E-19
5,26887E-19
5,00766E-19
5,09465E-19
5,35648E-19
5,52584E-19
5,48831E-19
4,51017E-19
4,30736E-19

Classe b [C]
6,1318E-19
7,2126E-19

Classe c [C]
8,6344E-19
8,5372E-19
7,7879E-19

# Apparato strumentale

- 1) Piano di base
- 2) Microscopio con oculare e micrometro
- 3) Condensatore piano
- 4) Dispositivo per illuminare
- 5) Nebulizzatore d'olio
- 6) Pompetta di gomma per olio
- 7) Base d'appoggio
- Olio (di densità nota  $\rho$ )
- Alimentatore (corrente continua)



# STIMA DELLA CARICA ELEMENTARE

VALORE MEDIO PER CLASSE		
Classe a	Classe b	Classe c
5,13062E-19 C	6,6722E-19 C	8,31986E-19 C

DIFFERENZA TRA LE CLASSI	
b-a	c-b
1,54158E-19 C	1,64766E-19 C

VALORE MEDIO
1,59462E-19 C

# La misura della velocità della luce

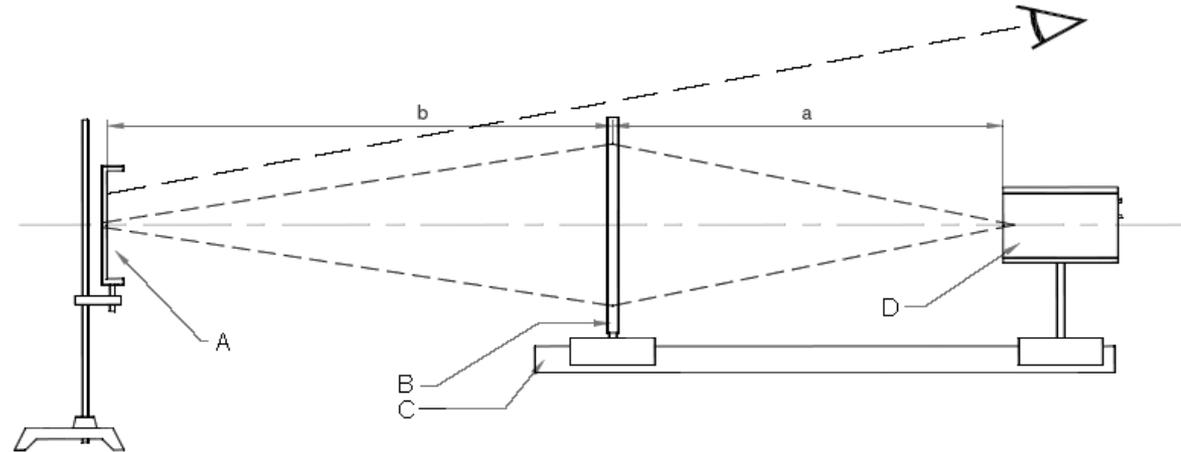
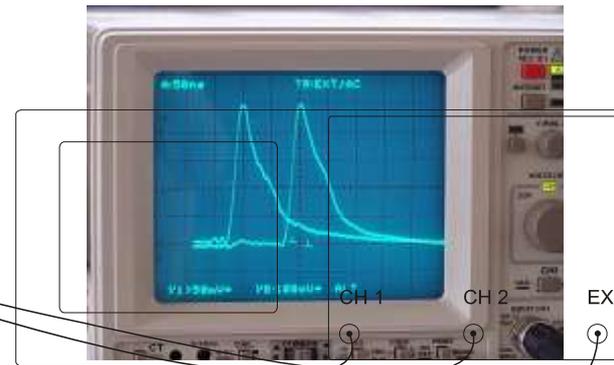
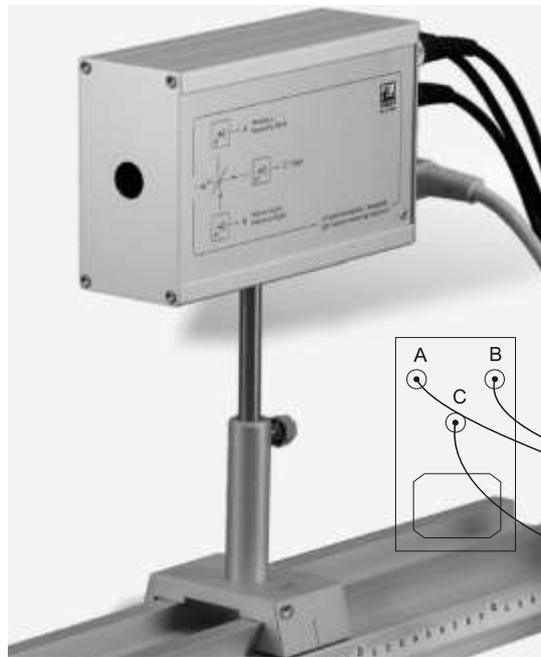


Fig. 1: Experiment set-up: A Microprism mirror, B Fresnel lens, C Optical bench, D Basic unit



### 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.

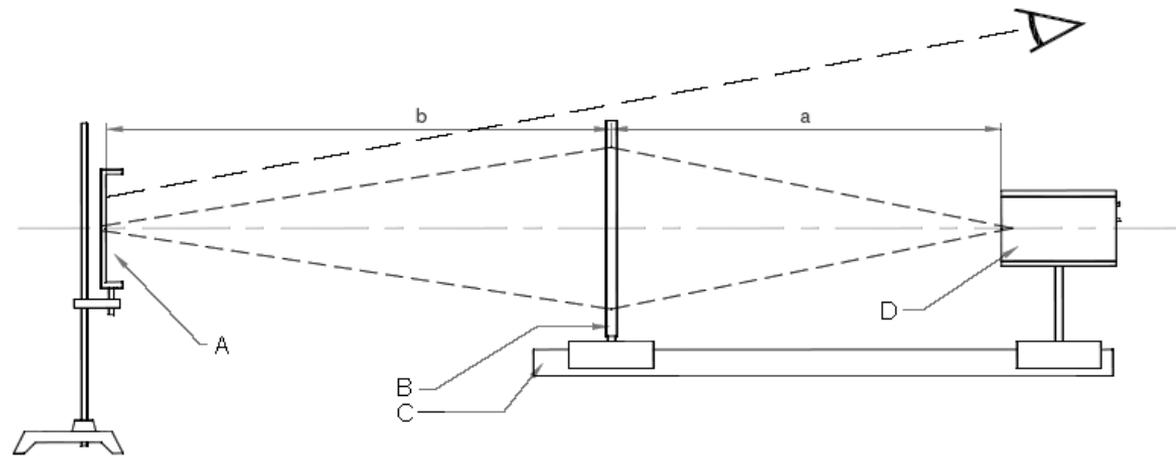
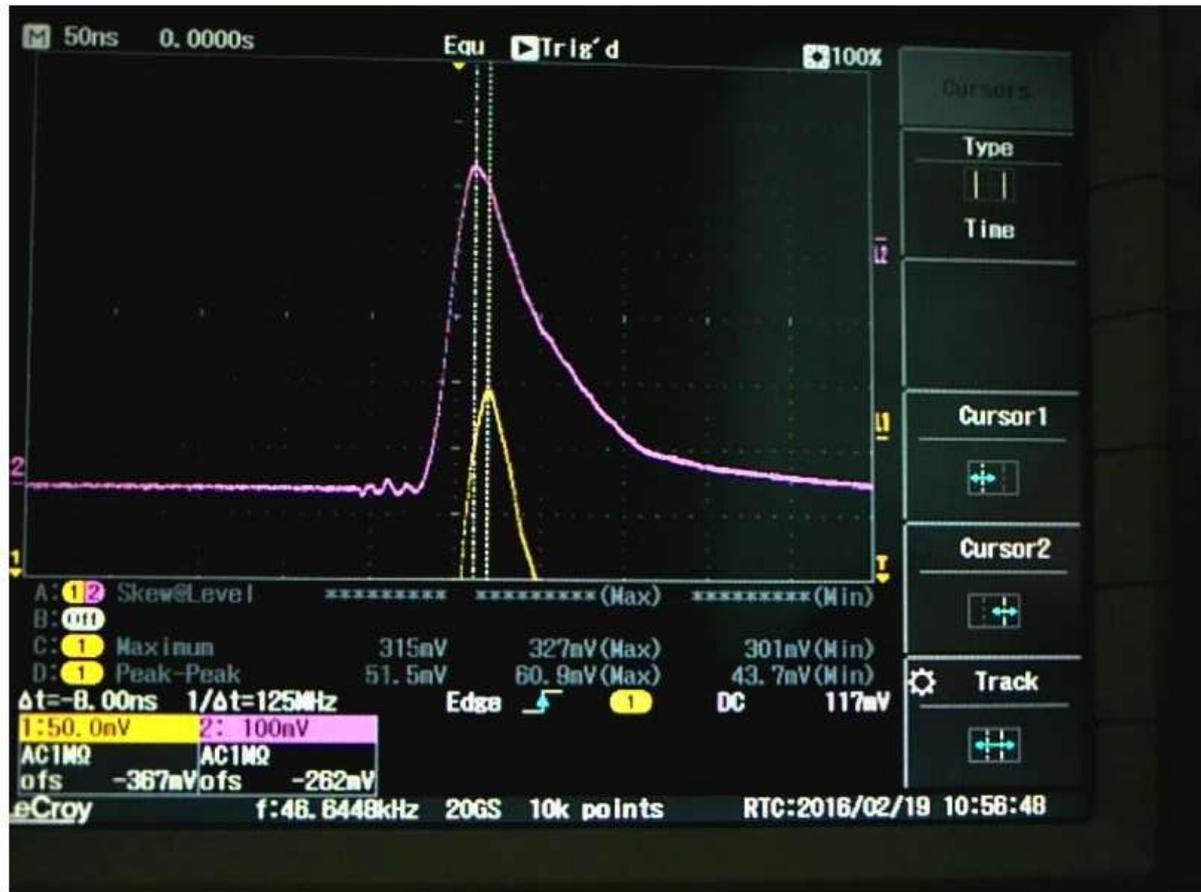
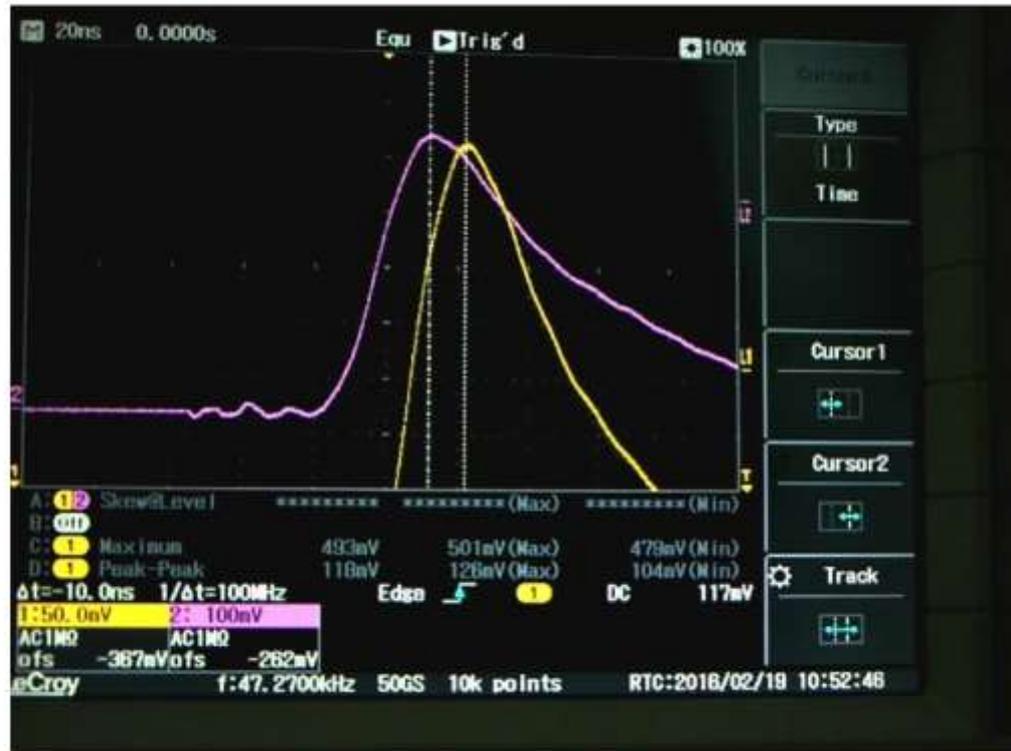


Fig. 1: Experiment set-up: A Microprism mirror, B Fresnel lens, C Optical bench, D Basic unit



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



$$s = 260 \text{ cm}, \Delta t = 10.0 \text{ ns}$$

$$v = 2.6 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

t (ns)	s (cm)	v (m/s) x 10 <sup>8</sup>
9,8	280	2,86
9,4	250	2,66
9,4	212	2,26
8,6	172	2,00
8,2	146	1,78
8,6	168	1,95
11	266	2,42
10,5	224	2,13
9,7	210	2,16
11,1	274	2,47

2,86      0,33

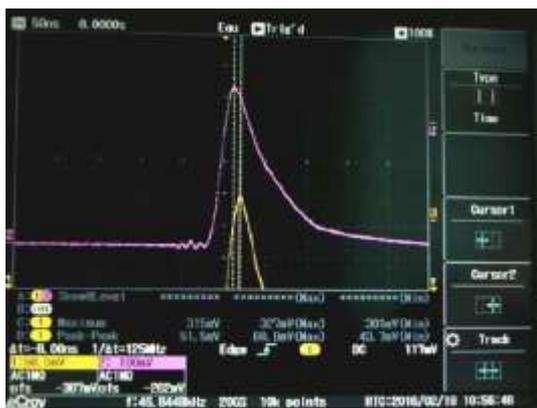
**c**      **± S**

## ● Esperimento, Svolgimento

Lo scopo dell'esperimento è, dunque, calcolare la velocità della luce, scegliendo la distanza dello specchio sul banco ottico e vedere il tempo impiegato dalla luce a percorrere due volte quella distanza sull'oscilloscopio.

## ● Conclusioni

La media dei valori di velocità riportati nella tabella seguente è  $2,35 \cdot 10^8$  m/s con  $\sigma = 0,36$ .



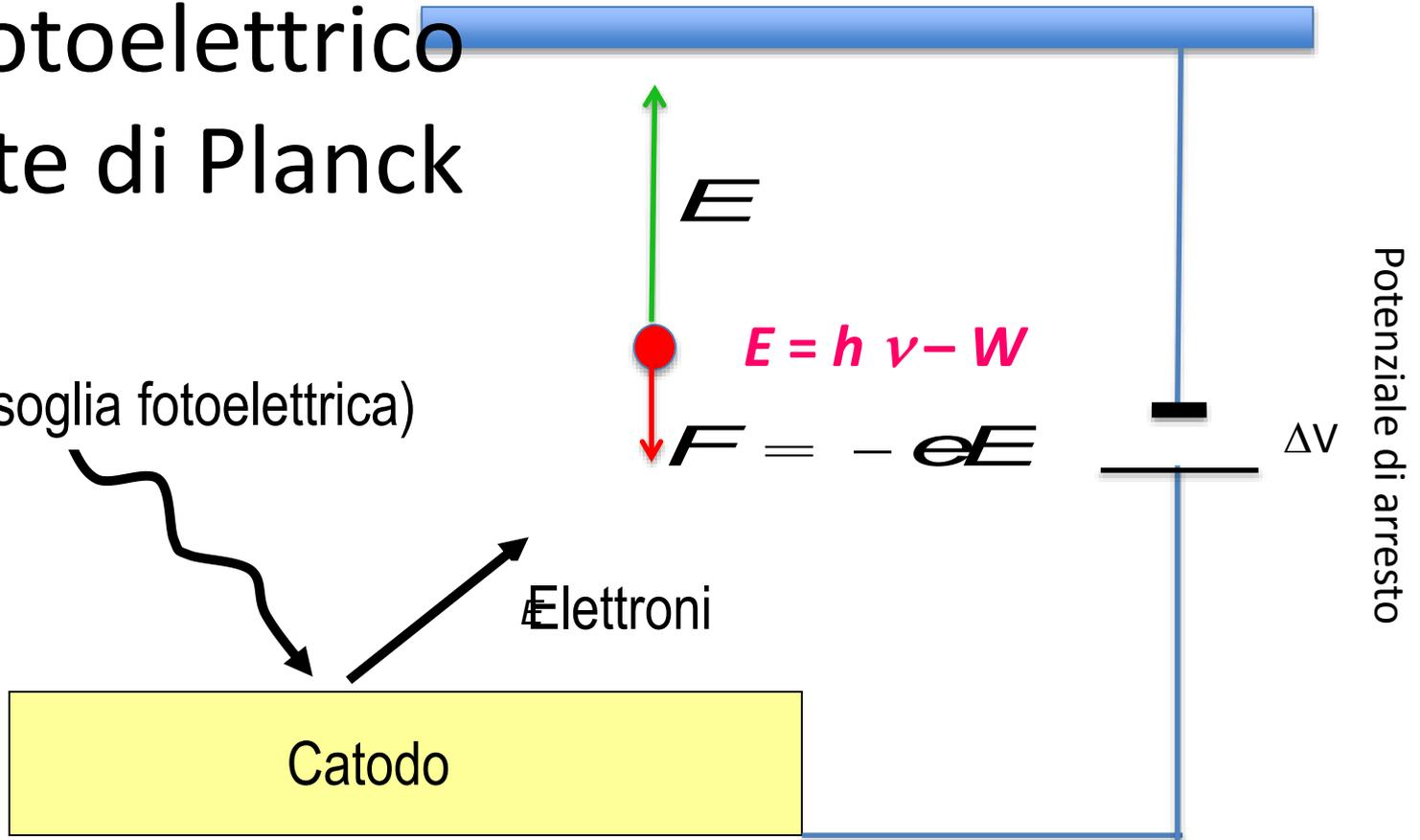
(L'oscilloscopio misura il tempo prendendo come riferimento il primo raggio, quello riflesso all'interno della scatola. Nel grafico, la differenza in ascissa tra i picchi è proprio il tempo trascorso)

t (s)*10 <sup>-9</sup>	s (m)+-10m	v(m/s)*10 <sup>8</sup>
10,0	2,56	2,56
8,0	2,36	2,95
9,8	2,80	2,86
9,4	2,50	2,66
9,4	2,12	2,26
8,6	1,72	2,00
8,2	1,46	1,78
8,6	1,68	1,95
11,0	2,66	2,42
9,7	2,10	2,13
11,1	2,74	2,16
10,5	2,24	2,47

# Effetto Fotoelettrico e Costante di Planck

Luce

(frequenza > soglia fotoelettrica)



Affinché l'elettrone emesso riesca a raggiungere l'anodo a potenziale di arresto pari a  $-\Delta V$ , rispetto al catodo emettitore, deve possedere una energia a  $E = e \Delta V$ .

$$e \Delta V = E = h \nu - W$$



$$\Delta V = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e}$$

# Misura della Costante di Planck

Lo scopo è di calcolare la costante di Planck  $h$ , attraverso misure del potenziale di arresto degli elettroni prodotti per effetto fotoelettrico.

Per potenziale di arresto si intende il potenziale di segno contrario a quello che produce la corrente da stabilire tra l'emettitore e il collettore per arrestare la corrente stessa.

In queste condizioni il prodotto  $e \cdot \Delta V$  è pari all'energia cinetica posseduta dall'elettrone.

Quindi:

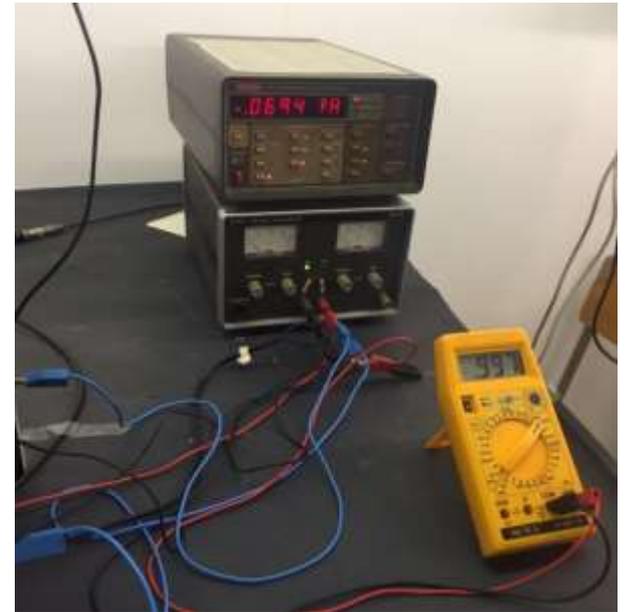
$$e \cdot \Delta V = h \cdot f - W \quad \longrightarrow \quad \Delta V = (h/e) \cdot f - W/e$$

$W$ =lavoro di estrazione

La retta rappresentante l'andamento del potenziale in funzione della frequenza, ha per coefficiente angolare (pendenza) il rapporto  $h/e$  e per coordinata all'origine il rapporto  $W/e$ .

Calcolando tale pendenza, è possibile ottenere una stima di  $h$ .

# APPARATO SPERIMENTALE

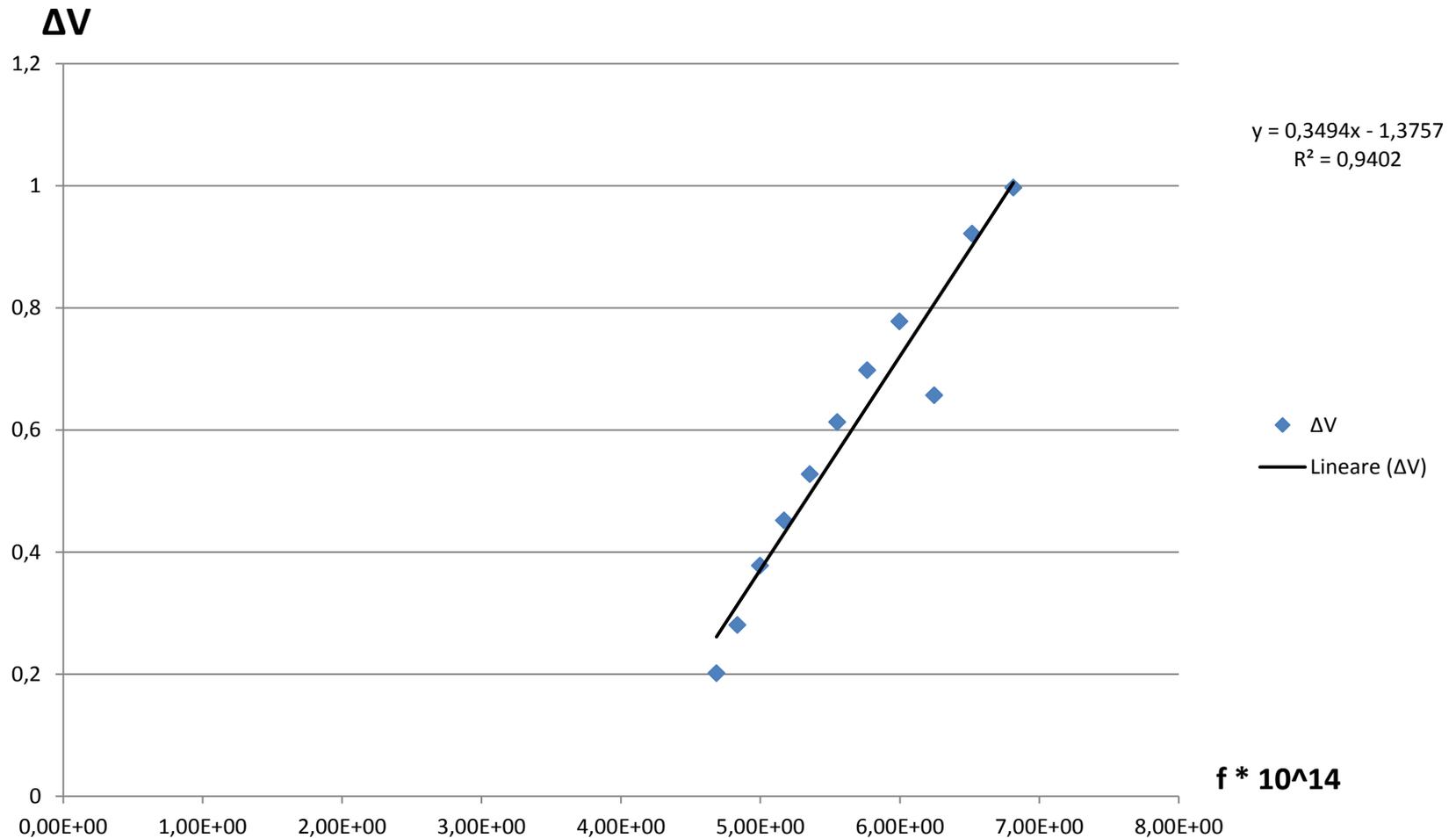


# ELABORAZIONE DEI DATI

TABELLA DATI

$\lambda$ (Ang)	$\lambda$ (m)	Errore relativo su $\lambda$	Frequenza f	$f \cdot 10^{14}$	Errore assoluto su f	$\Delta V$	Errore assoluto su $\Delta V$
6400	6,40E-07	1,563E-03	4,68E+14	4,68E+00	0,01	0,202	0,02
6200	6,20E-07	1,613E-03	4,84E+14	4,84E+00	0,01	0,281	0,02
6000	6,00E-07	1,667E-03	5,00E+14	5,00E+00	0,01	0,378	0,02
5800	5,80E-07	1,724E-03	5,17E+14	5,17E+00	0,01	0,452	0,02
5600	5,60E-07	1,786E-03	5,35E+14	5,35E+00	0,01	0,528	0,02
5400	5,40E-07	1,852E-03	5,55E+14	5,55E+00	0,01	0,613	0,02
5200	5,20E-07	1,923E-03	5,77E+14	5,77E+00	0,01	0,698	0,02
5000	5,00E-07	2,000E-03	6,00E+14	6,00E+00	0,01	0,778	0,02
4800	4,80E-07	2,083E-03	6,25E+14	6,25E+00	0,01	0,657	0,02
4600	4,60E-07	2,174E-03	6,52E+14	6,52E+00	0,01	0,922	0,02
4400	4,40E-07	2,273E-03	6,81E+14	6,81E+00	0,02	0,997	0,02

Da questi dati, abbiamo ottenuto la seguente  
retta di interpolazione:



“Stampacchia” - Tricase (2016)

Dalla retta ottenuta segue che:

$$m = h/e = 0,349 \longrightarrow$$

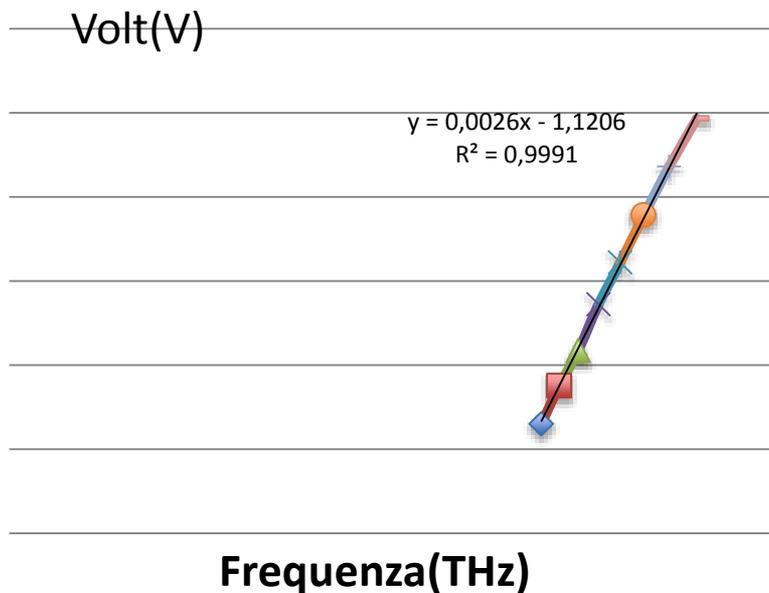
$$h = m * e = 0,349 * e = 3,49 * 10^{-15} * 1,6 * 10^{-19} = 5,6 * 10^{-34}$$

Tenendo conto dell'apparato sperimentale utilizzato e degli errori possibili, il valore trovato risulta abbastanza soddisfacente.

# Procedura sperimentale per la misura della costante di Planck

Dopo aver selezionato la lunghezza d'onda della luce che si vuole analizzare, con il voltmetro applichiamo una ddp ritardante, cioè negativa in modo da ottenere sul display dell'amperometro un'intensità di corrente nulla (entro gli errori sperimentali). Applichiamo ripetutamente lo stesso procedimento per altre lunghezze d'onda per poi tracciare un grafico avente sull'ascissa la frequenza e sull'ordinata la ddp.

Dove il termine noto dell'equazione della retta rappresenta la frequenza di soglia della lastra metallica dalla quale si estraggono gli elettroni, mentre il coefficiente angolare  $m^*$  rappresenta il rapporto  $h/e$ , quindi  $h = m^* e$ .



$$V = (h/e) \nu - (W/e)$$

Questa è l'equazione rappresentata da una retta:

- $h/e$  è il coefficiente angolare

- $W/e$  è lo zero della funzione

# Esempio di Misura

C=	299.792.458	m/s						
$\lambda$ (A)	$\lambda$ (m)	err relat su $\lambda$	frequenza f	f * 10 <sup>14</sup>	err. Ass su f	$\Delta V$	err ass su $\Delta V$	
6200	6,20E-07	1,61E-03	4,835E+14	4,8354	0,01	0,24	0,02	
6000	6,00E-07	1,67E-03	4,997E+14	4,9965	0,01	0,27	0,02	
5800	5,80E-07	1,72E-03	5,169E+14	5,1688	0,01	0,28	0,02	
5600	5,60E-07	1,79E-03	5,353E+14	5,3534	0,01	0,33	0,02	
5400	5,40E-07	1,85E-03	5,552E+14	5,5517	0,01	0,38	0,02	
5200	5,20E-07	1,92E-03	5,765E+14	5,7652	0,01	0,43	0,02	
5000	5,00E-07	2,00E-03	5,996E+14	5,9958	0,01	0,49	0,02	
4800	4,80E-07	2,08E-03	6,246E+14	6,2457	0,01	0,60	0,02	
4600	4,60E-07	2,17E-03	6,517E+14	6,5172	0,01	0,67	0,02	
4400	4,40E-07	2,27E-03	6,813E+14	6,8135	0,02	0,69	0,02	
						media		

Err ass. su  $\lambda$  =10 A

Err ass. su  $\lambda$  1,00E-09 metri

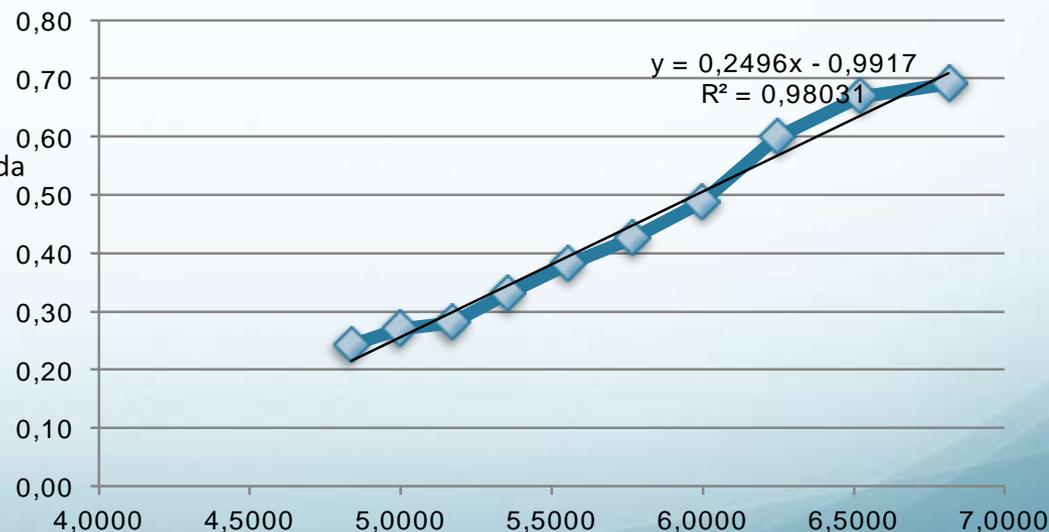
errore relativo sulla frequenza uguale all'errore relativo su lamda

$\Delta V$  =0,02 volt

**$h/e = 2,496E-15$**

**$e = 1,602E-19$**

**$h = 3,99859E-34 = 4,00 E-34$**



# Avvicinarsi alla teoria della meccanica quantistica

[Ghirardi Gian Carlo](#)

Un'occhiata alle carte di Dio

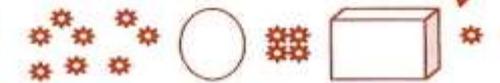
attraverso

## Il principio di sovrapposizione

La polarizzazione come proprietà quantistica della luce

SEMPLICI  
ESPERIMENTI  
IDEALI

Il riconoscimento di uno **stato** associato ad una proprietà fisica



Fotoni, polaroid, cristalli birifrangenti

La legge di Malus per preparare lo **stato**

Spazi vettoriali (dimensione 2)

Come si riconoscono ed individuano proprietà incompatibili

Diffrazione di particelle

Teoria quantistica della misura

La descrizione dei macrogetti

Non località

proiettore

autovalori

operatore

[www.fisica.uniud.it/URDF/](http://www.fisica.uniud.it/URDF/)

UNIVERSITÀ DI UDINE  
UNITÀ DI RICERCA IN DIDATTICA DELLA FISICA

Introdurre la teoria mediante la trattazione di concetti cardine:

- Stato Quantico
- Principio di Sovrapposizione
- Osservabili Incompatibili

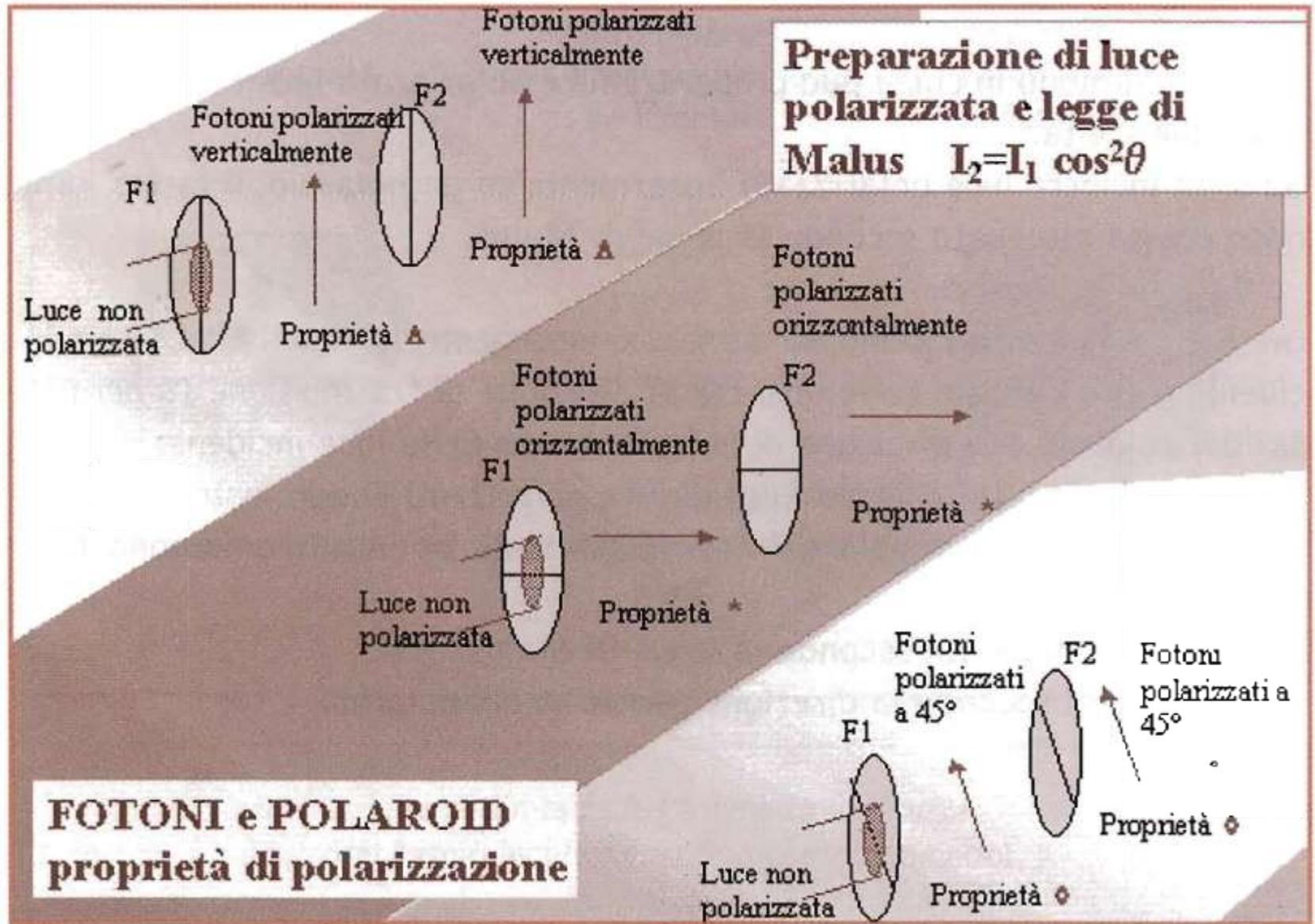
Fare riferimento ad una fenomenologia che evidenzia le proprietà caratteristiche di uno stato quantico:

## Polarizzazione della Luce

Prerequisiti: Polarizzazione della luce (anche solo fenomenologica)  
Fotone  
Algebra vettoriale

# Il Percorso

Semplici Esperimenti sulla Polarizzazione della luce con Polaroid e Cristalli birifrangenti



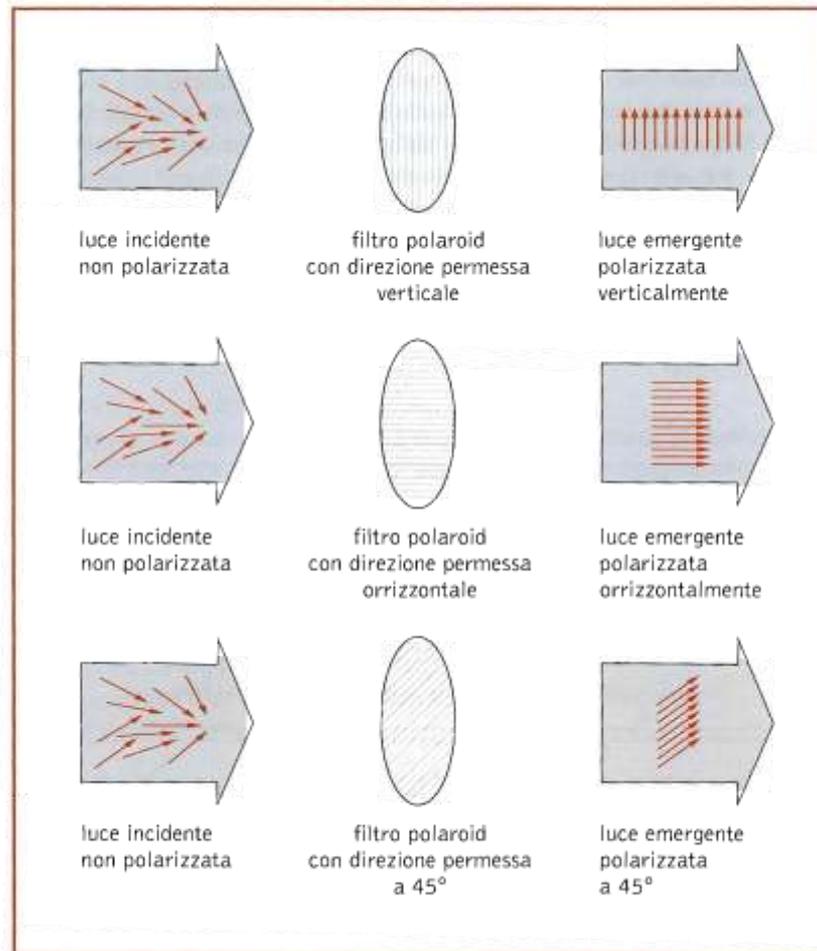
Assumiamo che un fascio di luce “classico” si possa descrivere in termini di un gran numero di fotoni

In alternativa

Un fascio di luce si può indebolire fino ad avere 1 fotone/(sec m<sup>2</sup>)

1. Lo “stato” di polarizzazione è definito operativamente da una PROPRIETA’
2. Polarizzazione V , Polarizzazione H, Polarizzazione 45° , ...
3. Esiste una PROPRIETA’ fisica il cui valore è attribuibile con certezza
4. Proprietà fisiche mutuamente esclusive definiscono stati “fisicamente ortogonali”
5. I possibili stati di un sistema **DOPO** la misura sono fisicamente ortogonali

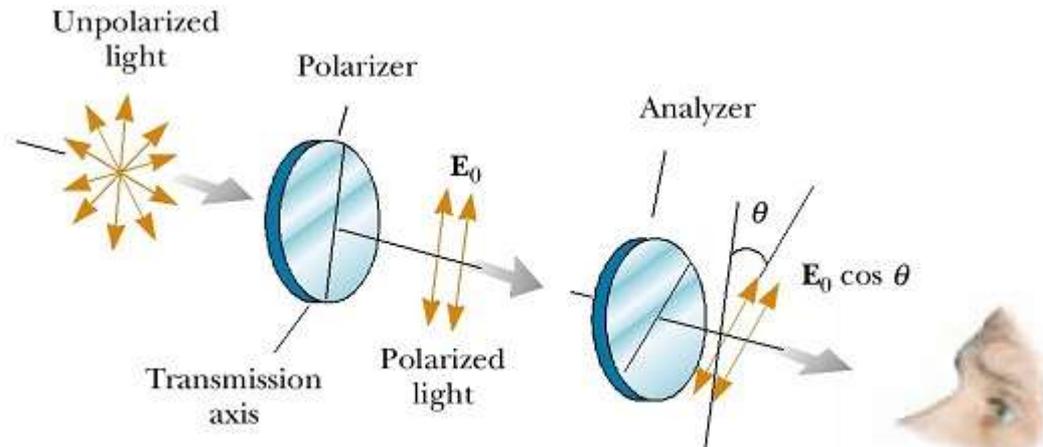
# Preparazione dello stato polarizzato



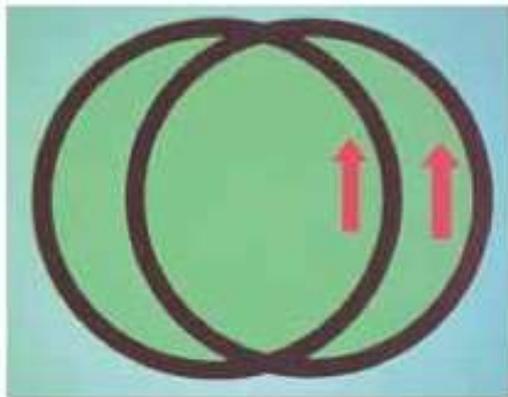
- la proprietà  $\Delta$  ai fotoni polarizzati linearmente in direzione verticale e quindi nello stato V,
- la proprietà  $*$  ai fotoni polarizzati linearmente in direzione orizzontale e quindi nello stato H,
- nello stato V:
  - passano sempre con certezza un polaroid con direzione permessa verticale
  - sono tutti assorbiti da polaroid con direzione permessa orizzontale
- nello stato H:
  - passano sempre con certezza un polaroid con direzione permessa orizzontale
  - sono tutti assorbiti da polaroid con direzione permessa verticale

Ne segue che le proprietà  $\Delta$  e  $*$  sono mutuamente esclusive.

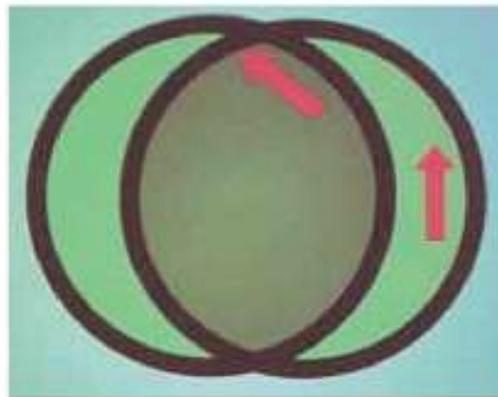
# Legge di Malus



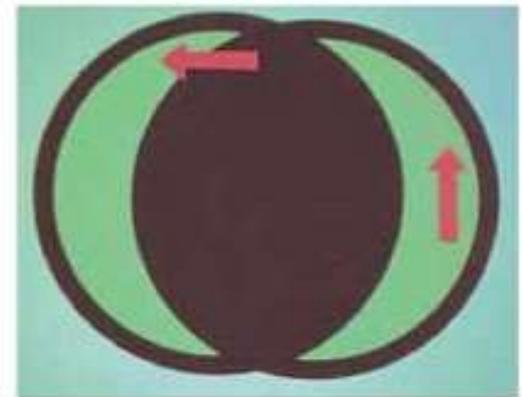
$$I = I_{\max} \cos^2 \theta$$



(a)



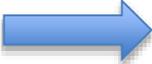
(b)

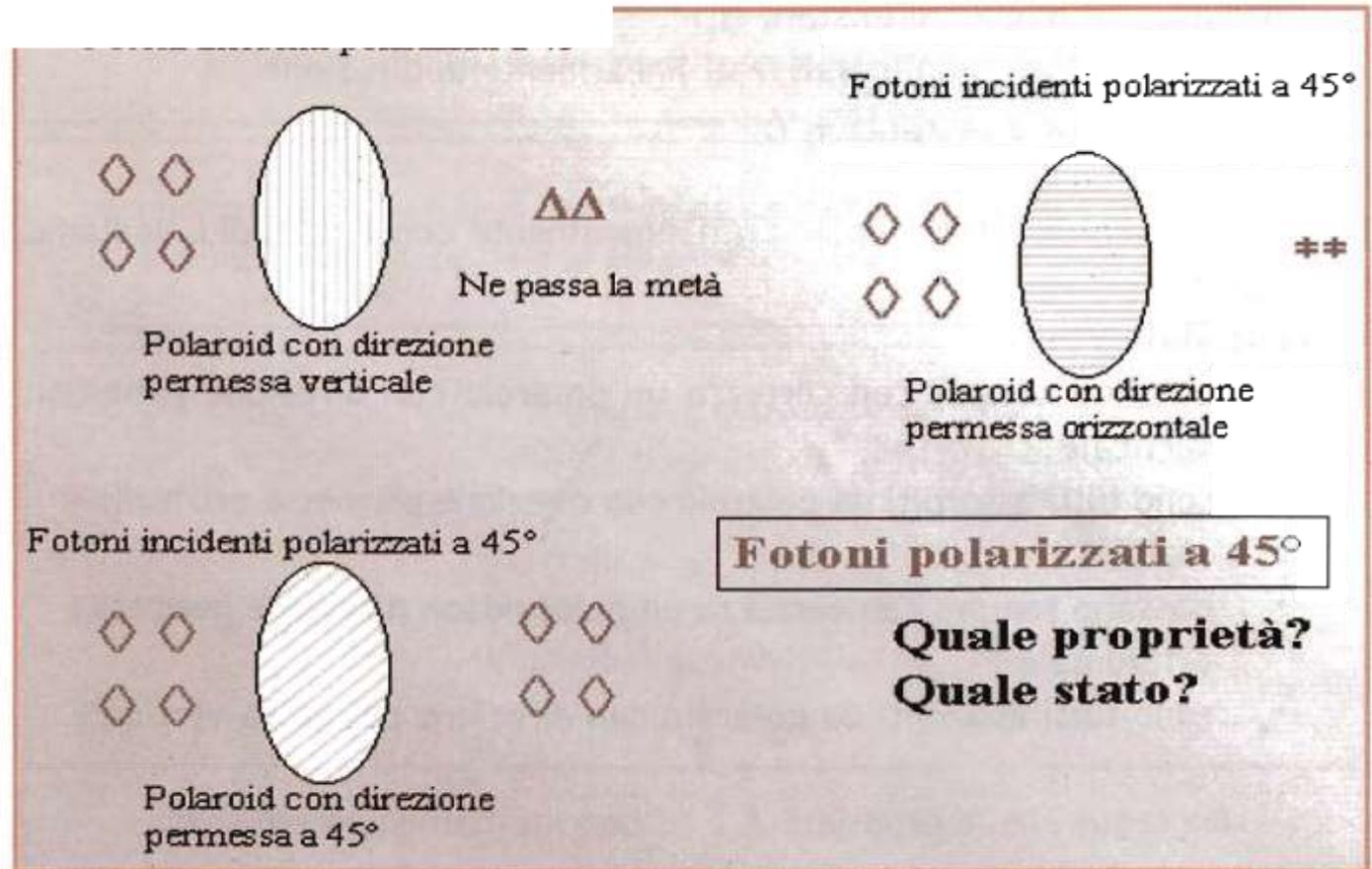


(c)

Intensità attenuata secondo la Legge di Malus  
Polarizzata secondo la direzione del P. analizzatore

la proprietà  $\diamond$  ai fotoni polarizzati linearmente in direzione  $45^\circ$

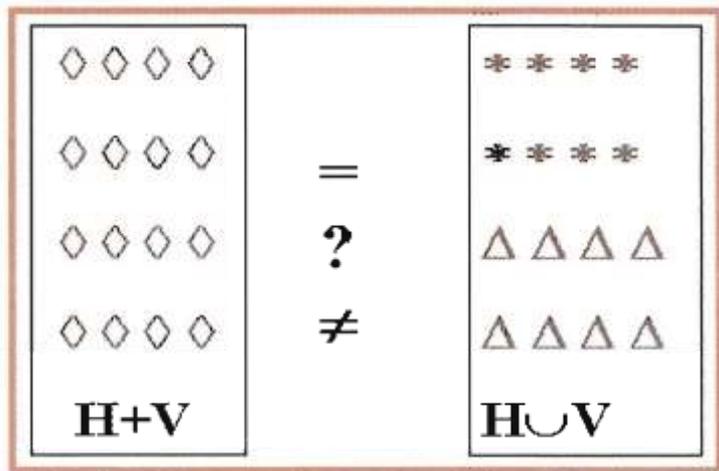
Malus 



Lo stato a  $45^\circ$  è una "combinazione" di V e H

# Ipotesi interpretative

## 1) Miscela statistica classica



## 2) Simultaneamente sono a H e 45° oppure V e 45°

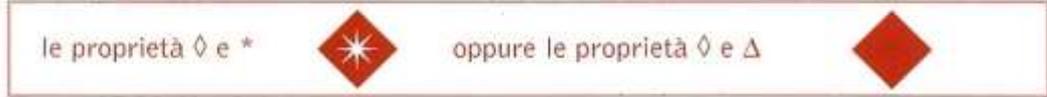
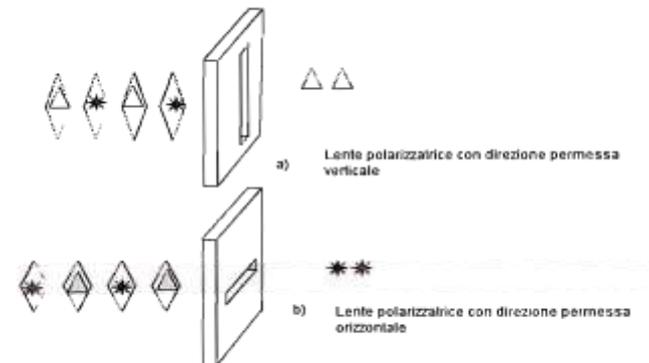


Fig. 7A



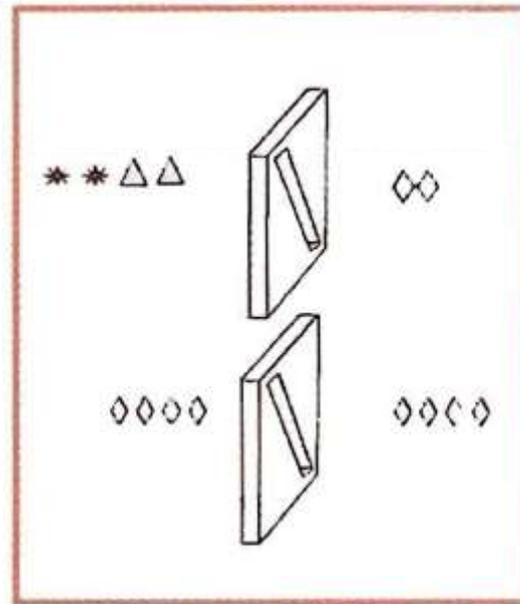
Fig. 7B



MA .....

1) Miscela statistica classica e

2) Simultaneamente sono a H e  $45^\circ$   
oppure V e  $45^\circ$



Un fotone con proprietà  $\diamond$  non può aver anche proprietà del tipo  $*$  o  $\Delta$ .

Per questo le proprietà  $\diamond$  e  $*$  oppure  $\diamond$  e  $\Delta$  vengono chiamate incompatibili.

**Principio di Indeterminazione**

# Sovrapposizione Lineare

$$|45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |V\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |O\rangle \quad |\theta\rangle = \cos \theta |V\rangle + \sin \theta |O\rangle$$

$$\text{Prob}(*, |O\rangle) = |\langle O, O \rangle|^2 = 1$$

$$\text{Prob}(*, |V\rangle) = |\langle O, V \rangle|^2 = 0$$

$$\text{Prob}(\Delta, |O\rangle) = |\langle V, O \rangle|^2 = 0$$

$$\text{Prob}(\Delta, |V\rangle) = |\langle O, V \rangle|^2 = 1$$

$$\text{Prob}(\nabla, |O\rangle) = |\langle 45, O \rangle|^2 = 1/2$$

$$\text{Prob}(\nabla, |V\rangle) = |\langle 45, V \rangle|^2 = 1/2$$

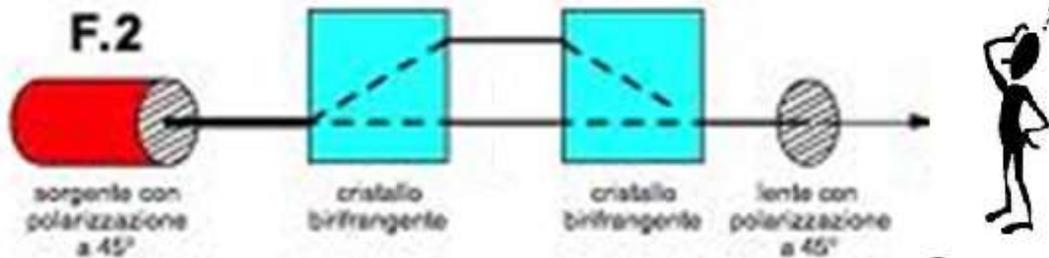
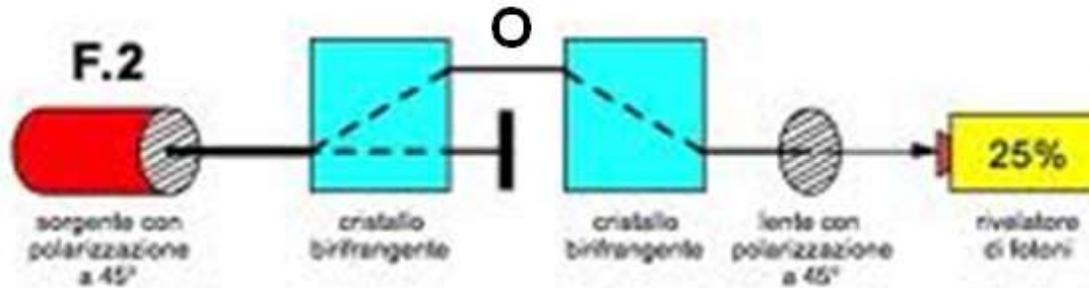
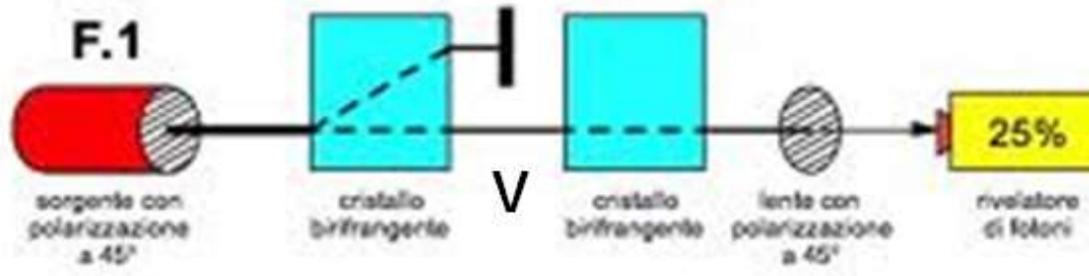
$$\text{Prob}(\ominus, |O\rangle) = \text{Prob}(*, |\theta\rangle) = |\langle O, \theta \rangle|^2 = (\cos \theta)^2$$

$$\text{Prob}(\ominus, |V\rangle) = \text{Prob}(\Delta, |\theta\rangle) = |\langle V, \theta \rangle|^2 = (\sin \theta)^2$$

Reinterpretazione **STATISTICA** della legge di Malus

Struttura lineare dello spazio degli stati ( sui N. Complessi)

# Quali cammini seguono i fotoni?

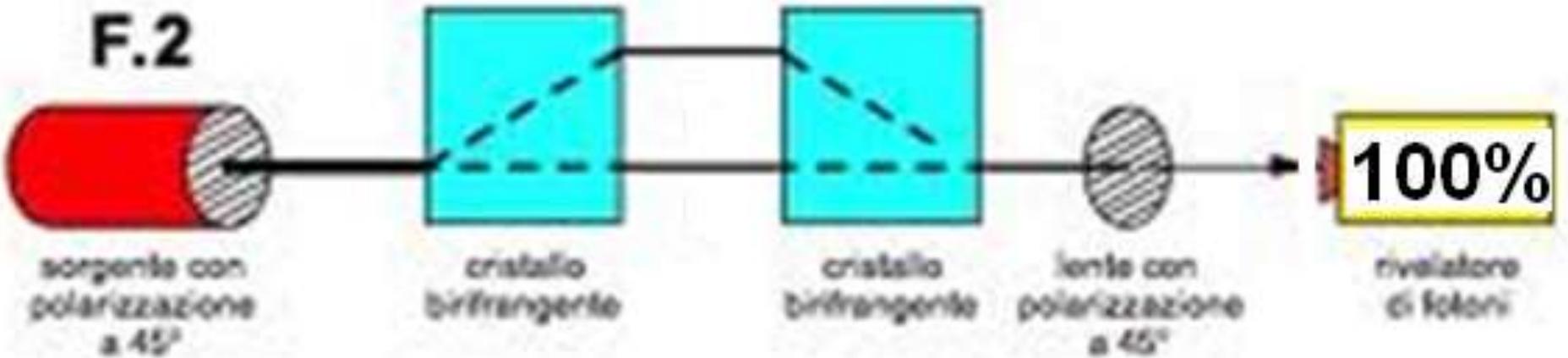


Quanti?

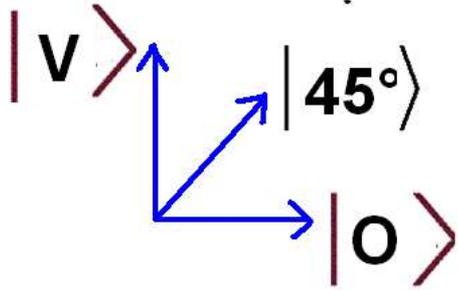
25 da r. straordinario +  
25 da r ordinario

= 50 fotoni a  $45^\circ$  !!!

# Sbagliato !



# Il fotone segue simultaneamente due cammini ?



$$|45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |V\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |O\rangle$$

$$|V\rangle = \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right\rangle$$

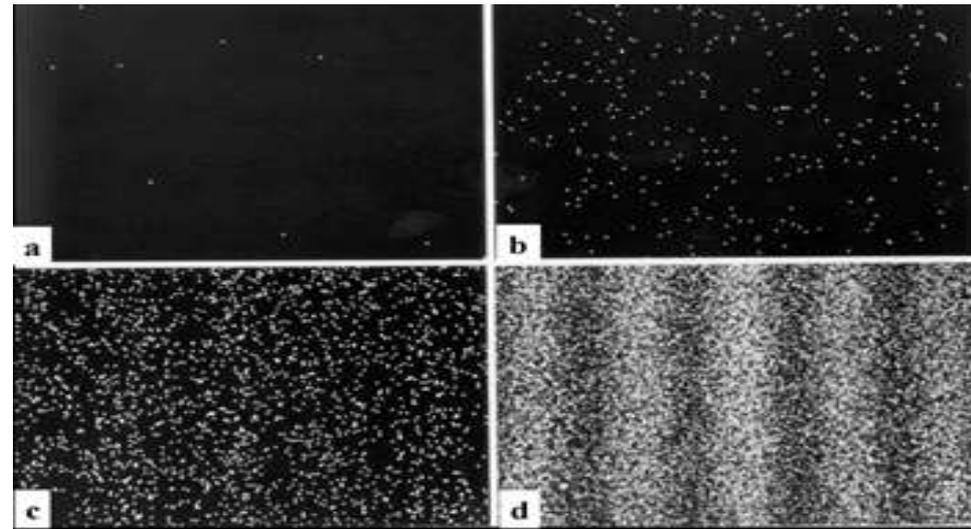
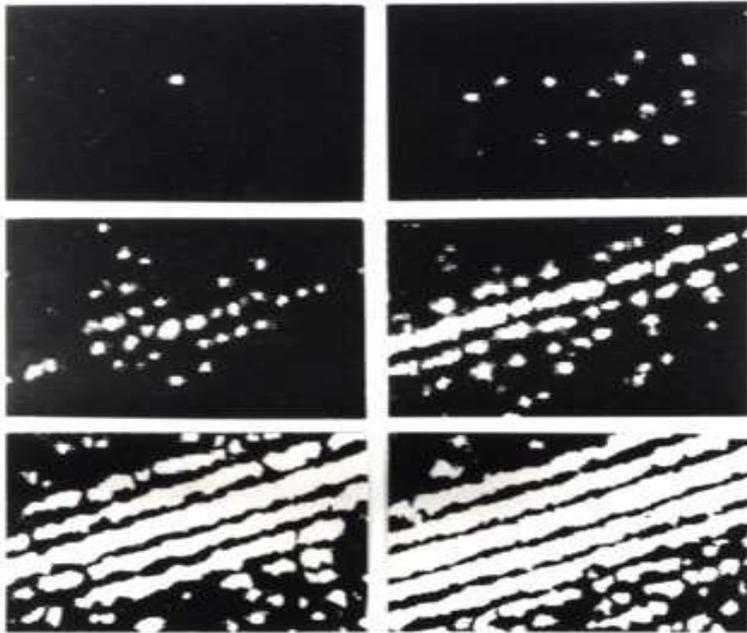
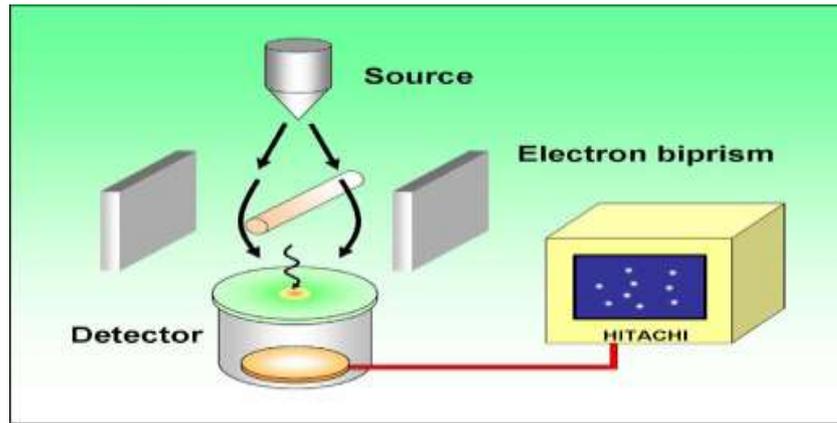
$$|O\rangle = \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right\rangle$$

$$|\Psi\rangle = \frac{\left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right\rangle}{\sqrt{2}}$$

Interpretazione ortodossa (Scuola di Copenhagen )

**Non ha senso attribuire una realtà di posizione (o altra osservabile) prima della misura**

# Elettrone su doppia fenditura



P.G. Merli, G.F. Missiroli, G. Pozzi,  
*Am. J. Phys.* 44 (1976 ) 306-7.

# Bibliografia

- Allori V., Zanghì N. (2005) *Un viaggio nel mondo quantistico*, in AAVV “La natura delle cose”, Carrocci, Roma.
- Ghirardi G.C. (1997) *Un’occhiata alle carte di Dio*, Milano: Il Saggiatore.  
Ghirardi G.C., Grassi R., Michelini M. (1997) *Introduzione delle idee della fisica quantistica e il ruolo del principio di sovrapposizione lineare*, La Fisica nella Scuola, XXX, 3 Sup., Q7, pp. 46-57.
- Michelini M., Ragazzon R., Santi L. Stefanel A. (2004) *Implementing a formative module on quantum physics for pre-service teacher training*, in *Quality Development in the Teacher Education and Training*, Girep book of selected papers, PTG8, Forum, Udine, pp. 429-435 [ISBN: 88-8420-225-6].  
Michelini M., Stefanel A. eds. (2004) *Avvicinarsi alla teoria della FISICA QUANTISTICA - una proposta per la didattica*, Università di Udine, Litho Stampa, Udine.
- Stefanel A., Michelini M., Ragazzon R., Santi L. (2003) *Mecaniche cuantistiche te scuele secondarie - Quantum physics in secondary school*, Friulan journal of sci (ISBN 88-8420-1 19-5) – researches, 3, pp. 9-19.
- Stefanel A. (2007) *Dispense del corso “Impostazione alla Dirac-La proposta di Udine”*.