

# LABORATORIO DI FISICA MODERNA PLS 2025-'26

M.L. De Giorgi, L. Martina

*Dipartimento di Matematica e Fisica «Ennio De Giorgi»*

*Università del Salento*

*Sezione INFN - Lecce*

*Misura della Carica Elettrica Elementare:  
l'esperienza di Millikan*

*20/2/2026*

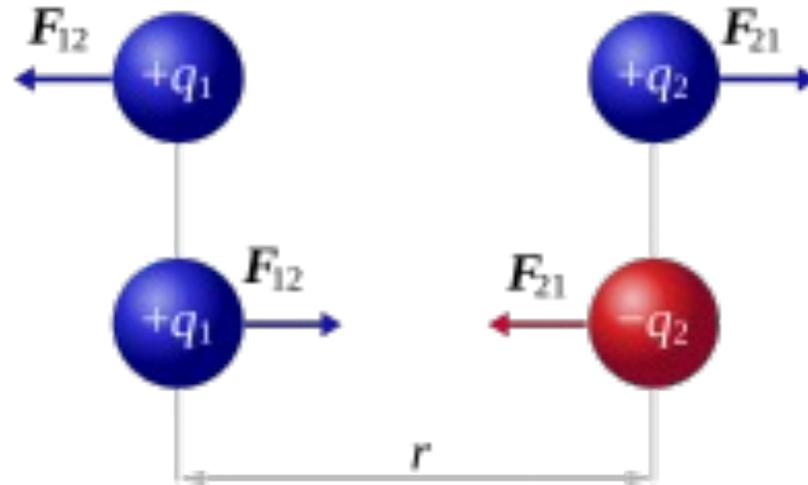
# La Forza di Coulomb e la carica elettrica

La carica elettrica è una proprietà fondamentale della materia, che manifesta attrazione, o repulsione, elettrostatica verso altra materia, anch'essa elettricamente carica.

$$\mathbf{F}_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{\mathbf{r}}_{12}}{|\mathbf{r}_{12}|^2}$$

$$\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$$

$$\mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_1.$$



$$|\mathbf{F}_{12}| = |\mathbf{F}_{21}| = k_e \frac{|q_1 \times q_2|}{r^2}$$

**QUESITO:** La carica elettrica può assumere un valore reale qualunque, oppure è un multiplo di un valore fondamentale?

# Scopo dell'esperienza

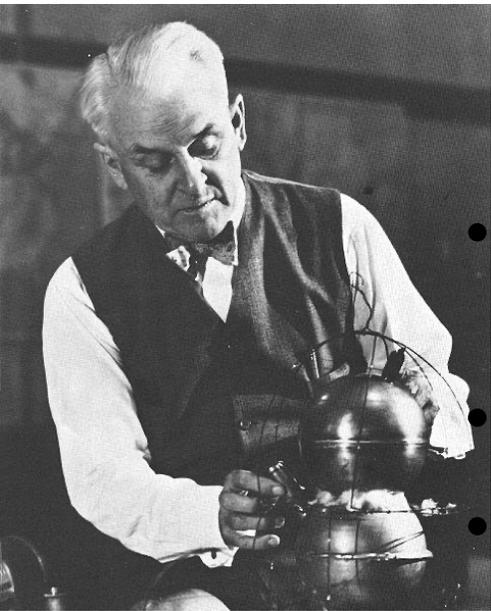
- 1) Verificare l'esistenza di una carica elettrica fondamentale  $e$ , della quale ogni altra carica è un multiplo intero

***Principio di quantizzazione della carica elettrica***

- 2) Misurare il valore di tale carica elettrica fondamentale.

**METODOLOGIA:** usare il Metodo delle *goccioline d'olio elettrizzate* sviluppato da R. Millikan.

D. Pieroni, M.L. De Giorgi, L. Girlanda, L. Martina, A. Ventura:  
*L'esperienza della goccia d'olio di Millikan con l'ausilio di Tracker*  
La Fisica nella Scuola (2021)



# Cenni storici

- Nel periodo 1909-'13 Robert Millikan fu il primo a misurare la carica dell'elettrone, eseguendo l'esperimento della "goccia d'olio".
- Il lavoro gli valse, 10 anni più tardi, il premio Nobel.
- Il valore attualmente noto della carica dell'elettrone è

- $e = 1.602\,176\,565(35) \times 10^{-19} \text{ C}$

The NIST Reference on  
Constants, Units, and Uncertainty

Fundamental Physical Constants

[https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e|search\\_for=electron+charge](https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e|search_for=electron+charge)

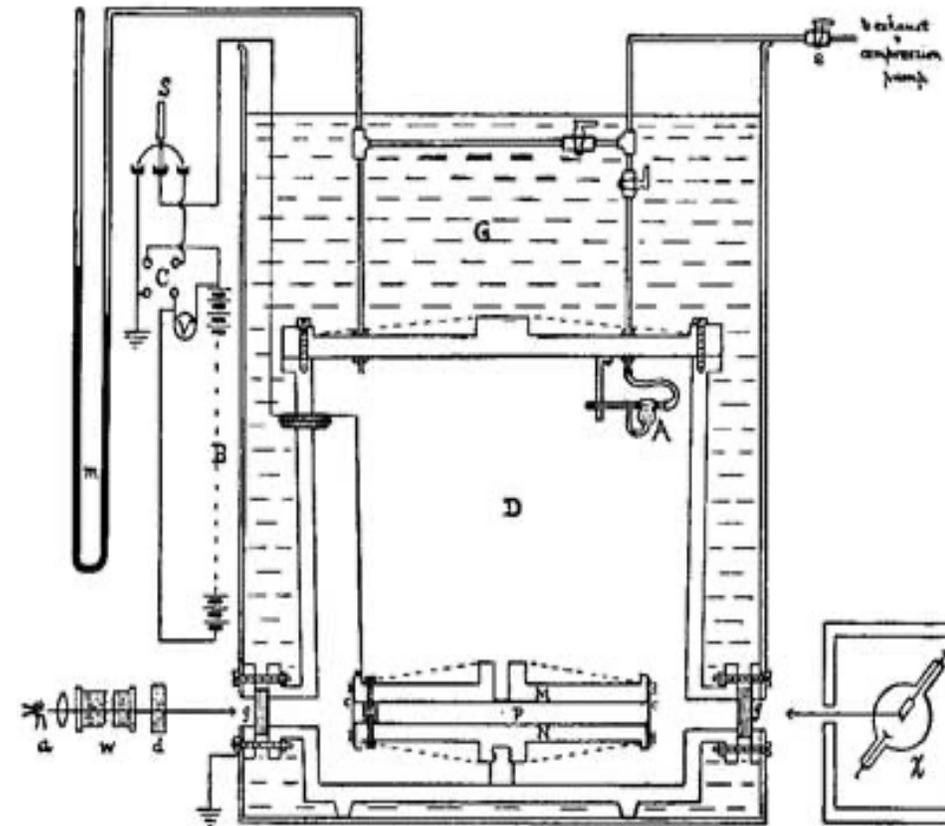
**Tabella Costanti della Fisica**

<http://pdg.lbl.gov/2014/reviews/rpp2014-rev-phys-constants.pdf>

<https://history.aip.org/exhibits/gap/Millikan/Millikan.html>

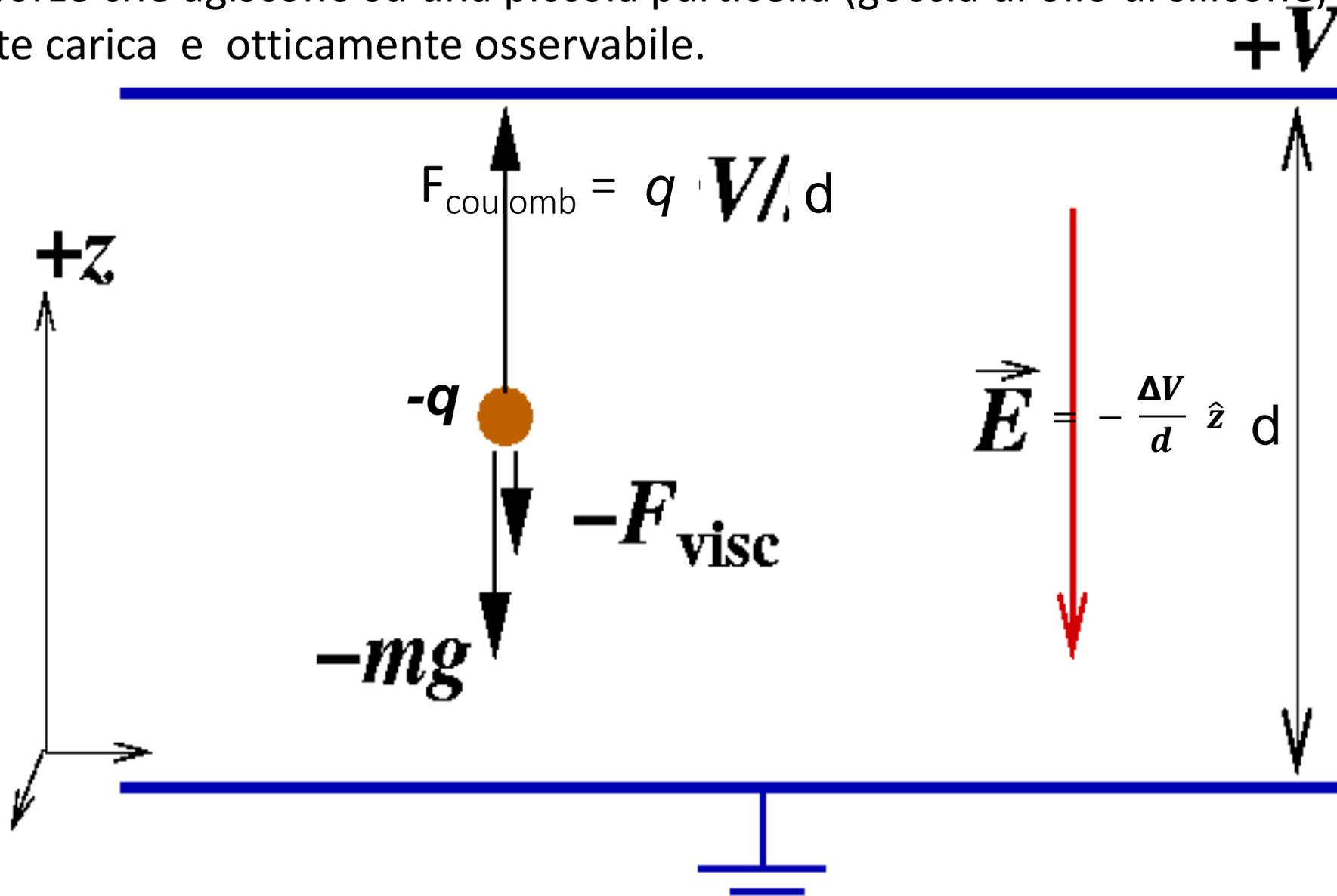
R. Millikan, Physical Review , vol. II ser II (1913) p. 109-143

Il nuovo Amaldi per i licei scientifici, Cap. 27 n. 5



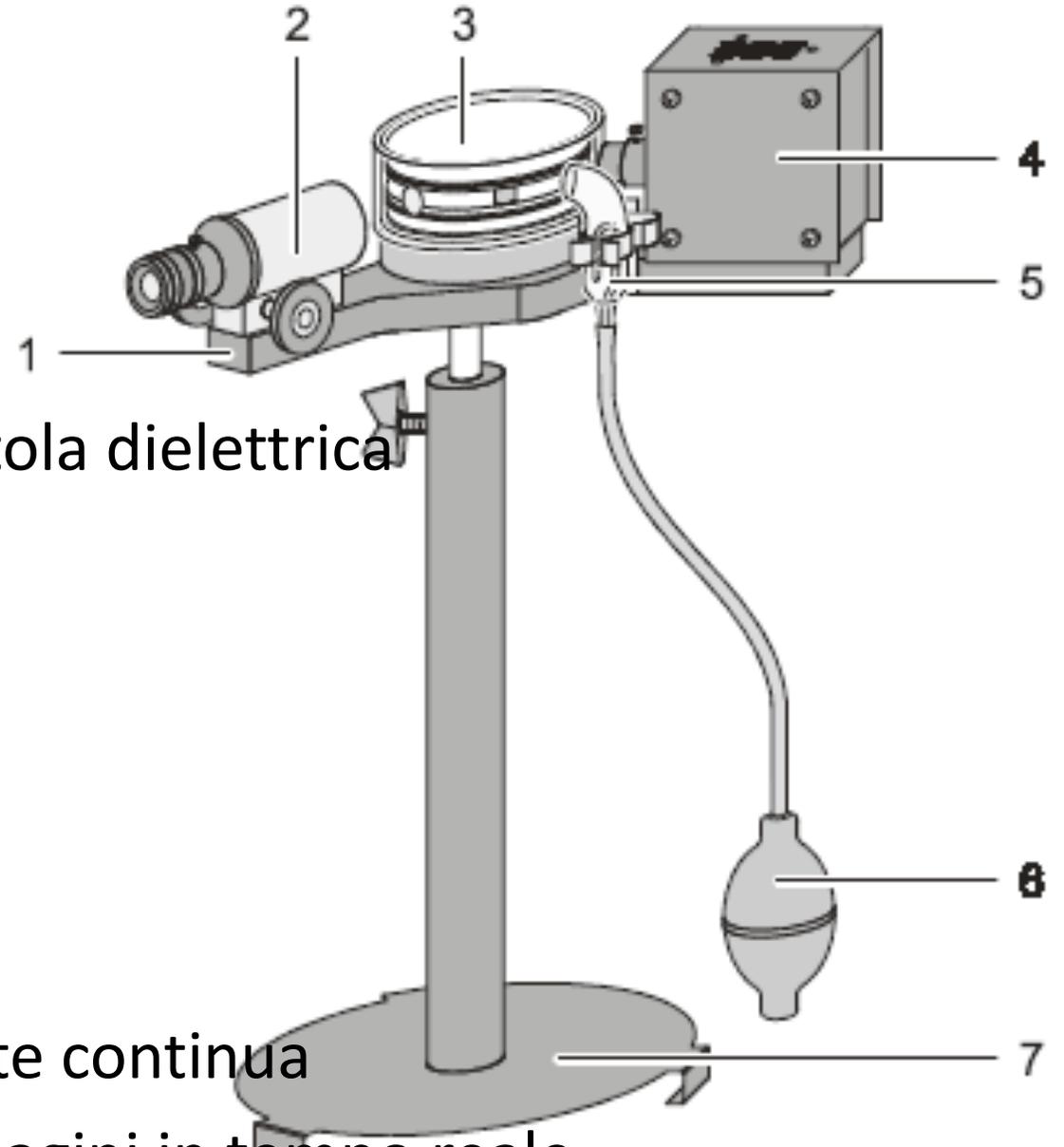
# L'idea della misura

Confrontare forze che agiscono su una piccola particella (goccia di olio di silicone) elettricamente carica e otticamente osservabile.



# L'apparato strumentale

- Piano di base
- Microscopio con oculare e micrometro
- Condensatore piano racchiuso in una scatola dielettrica
- Proiettore per l'illuminazione
- Nebulizzatore
- Pompetta manuale
- Base d'appoggio
- Olio di silicone
- Alimentatore regolabile a tensione corrente continua
- Video-camera per l'acquisizione delle immagini in tempo reale



# Dati tecnici e Parametri ambientali

- Distanza tra le armature del condensatore:  $d = 5.7 \pm 0.1$  mm

- Densità dell'olio di silicone e dell'aria

➤  $\rho = 0.877$  g/cm<sup>3</sup> (a 15°C)

$\rho = 0.871$  g/cm<sup>3</sup> (a 25°C)

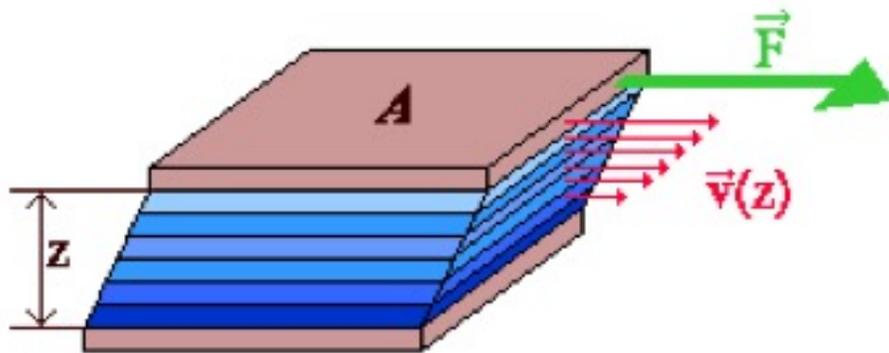
➤  $\rho_{\text{aria}} = 1.225 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup> (a 15°C)

$\rho_{\text{aria}} = 1.185 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup> (a 25°C)

- Viscosità dell'aria

$\eta_{\text{aria}} = 1.813 \cdot 10^{-5}$  Pa s (20 °C)

$\eta_{\text{aria}} = 1.907 \cdot 10^{-5}$  Pa s (40 °C)



Sforzo tangenziale =  $\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta z}$

Coefficiente di viscosità dinamica =  $\eta$  Pa s

$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}$

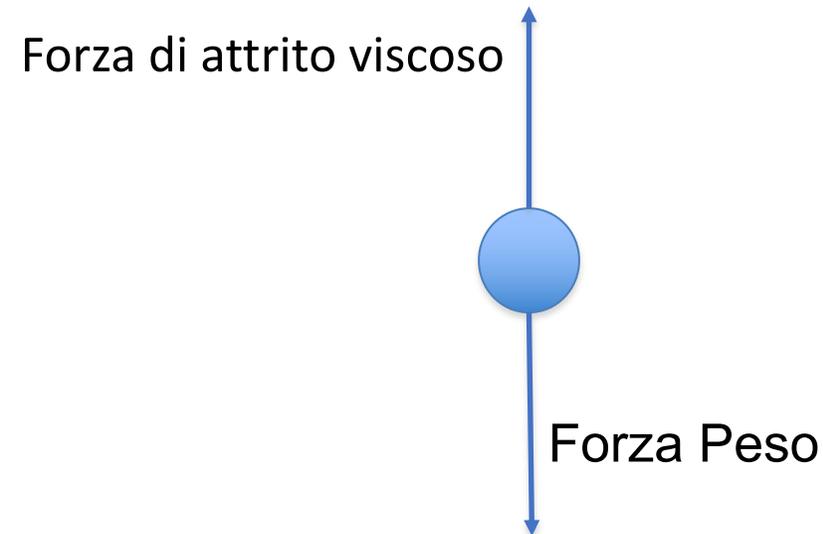
- Ingrandimento dell'oculare: 10
- Ingrandimento dell'obiettivo: 2
- Scala del micrometro: 5.0 mm
- Graduazione della scala: nominale 0.50 mm/divisione grande  
misurata  $l_0 = (0.493 \pm 0.009)$  mm.
- Intervallo di tensione dell'alimentatore: 0-600 V

$\lambda$

# Modellizzazione

• Le forze che agiscono verticalmente sulla goccia sono:

1. la forza peso ( $mg$ ),
2. la spinta di Archimede (trascurabile)
3. L'attrito viscoso ( $F_{visc}$ )
4. la forza coulombiana ( $q E$ )



Forza di attrito viscoso di Stokes  $F_{visc} = -6 \pi R \eta \mathbf{v}$

su un corpo sferico

$$F_{visc} = -6 \pi R \eta \mathbf{v} / (1 + A \lambda/R)$$

Forza di attrito viscoso

+ correzione di scivolamento di Cunningham

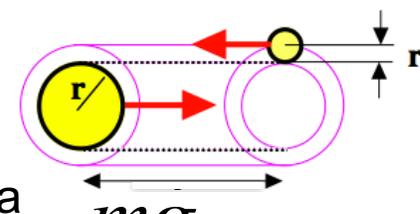
*libero cammino medio tra molecole di aria*  $\lambda = 0.07 \mu m$ ,  $A = 0.817$  (1 atm, 23 °C)

- l) **Equilibrio tra  
Forza Peso e  
Attrito Viscoso**

$$m g = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho g = \frac{6\pi R \eta v_{\downarrow}}{(1 + A \lambda/R)}$$

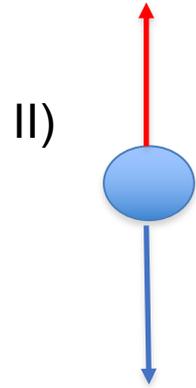
Velocità di deriva

$$v_{\downarrow} = \frac{mg}{6\pi\eta_{aria} R} (1 + A \lambda/R)$$



$$\Rightarrow (1 + A\lambda/R)^{1/2} R = \sqrt{\frac{9\eta}{2\rho g} v_{\downarrow}} \Rightarrow R \approx \sqrt{\frac{9\eta}{2\rho g} v_{\downarrow}} - \frac{A\lambda}{2}$$

# Modellizzazione - 2



Equilibrio tra  
Forza Peso, Forza di attrito  
e Forza di Coulomb

$$\frac{4\pi}{3} R^3 \rho g + \frac{6\pi R \eta v_{\uparrow}}{(1 + A \lambda/R)} = q \frac{\Delta V}{d}$$

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

Campo elettrico  
in un condensatore piano

$$q = \frac{d}{\Delta V} \frac{6\pi\eta R}{1 + A\lambda/R} (v_{\uparrow} + v_{\downarrow}) \approx \frac{6\pi\eta d}{\Delta V} (R - A\lambda)(v_{\uparrow} + v_{\downarrow})$$

Carica della gocciolina

$$q = \frac{6\pi\eta d}{\Delta V} \left( \sqrt{\frac{9\eta}{2\rho g}} v_{\downarrow} - \frac{3}{2} A \lambda \right) (v_{\uparrow} + v_{\downarrow})$$

# Procedura sperimentale - 1

- Agendo sulla pompetta si immettono delle goccioline d'olio tra le armature del condensatore piano, contenuto all'interno di una scatola, attraverso due appositi forellini.
- Alcune goccioline si caricano elettricamente per strofinio con l'aria (con carica  $q$ ).
- Si controllano solo le cariche che si dirigono verso l'alto sotto l'azione del campo elettrico ( $V > 0$ ), quindi contro il campo gravitazionale. La polarità delle armature ci dice che si tratta di cariche negative.

Dobbiamo misurare :

- La d.d.p.  $V$  dal Voltmetro dell'alimentatore
- Le velocità di deriva  $v_{\downarrow}$  e  $v_{\uparrow}$  da misure di
  - intervallo spaziale  $s$  prefissato sul micrometro
  - il tempo  $t$  necessario per percorrerlo con un cronometro

# Procedura sperimentale -2

- I. Si fissi il potenziale al valore di fondo scala
- II. Si individui una goccia che «salga» e, agendo sul potenziometro, la si fermi in una posizione di riferimento.
- III. Si scelga un traguardo a distanza ***s-su*** . Si registri ***s-su***.
- IV. Si porti il potenziale ad un valore più alto e si faccia partire il cronometro: si registri il potenziale ***V***.
- V. Si segua la particella fino al raggiungimento del traguardo e si blocchi il cronometro. Si registri il tempo ***t-su*** misurato dal cronometro (*nel caso di video l'intervallo tra due fotogrammi è  $dt = 1/25 \text{ sec}$* )
- VI. Si abbassi il potenziale fino a fermare la gocciolina
- VII. Si scelga un traguardo a distanza ***s-giù*** . Si registri ***s-giù***.
- VIII. Si ponga  $V=0$  e si faccia partire il cronometro
- IX. Si segua la particella fino al raggiungimento del traguardo e si blocchi il cronometro. Si registri il tempo ***t-giù*** misurato dal cronometro
- X. Riportare di volta in volta gli errori di misura

# Elaborazione dei Dati

- Preparare una tabella con i dati misurati

| Parametri                   | Parametri | D(Parametri) | Dr(Parametri) | V    | DV | DrV   | s-su               | D(s-su)            | Dr(s-su) | t-su  | D(t-su) | Dr(t-su) | s-giù              | D(s-giù)           | Dr(s-giù) | t-giù | D(t-giù) | Dr(t-giù) |
|-----------------------------|-----------|--------------|---------------|------|----|-------|--------------------|--------------------|----------|-------|---------|----------|--------------------|--------------------|-----------|-------|----------|-----------|
| T (K)                       | 296       | 2            | 0,007 Volt    | Volt |    |       | 10 <sup>-3</sup> m | 10 <sup>-3</sup> m |          | sec   | sec     |          | 10 <sup>-3</sup> m | 10 <sup>-3</sup> m |           | sec   | sec      |           |
| rho (kg/m <sup>3</sup> )    | 0,8722    | 0,001        | 0,001         | 600  | 2  | 0,003 | 2                  | 0,25               | 0,125    | 15,41 | 0,1     | 0,01     | 2                  | 0,25               | 0,13      | 13,11 | 0,1      | 0,01      |
| eta (10 <sup>-5</sup> Pa s) | 1,8271    | 0,001        | 0,001         | 600  | 2  | 0,003 | 1                  | 0,25               | 0,25     | 33,25 | 0,1     | 0,00     | 1                  | 0,25               | 0,25      | 7,7   | 0,1      | 0,01      |
| g (m/sec <sup>2</sup> )     | 9,80247   | 0,00001      | 0,000         | 600  | 2  | 0,003 | 1                  | 0,25               | 0,25     | 4,28  | 0,1     | 0,02     | 1                  | 0,25               | 0,25      | 21,42 | 0,1      | 0,00      |
| A                           | 0,817     | 0,001        | 0,001         | 600  | 2  | 0,003 | 1                  | 0,25               | 0,25     | 16,25 | 0,1     | 0,01     | 1                  | 0,25               | 0,25      | 8,51  | 0,1      | 0,01      |

- Calcolare

$$v_{\uparrow} = s_{\uparrow} / t_{\uparrow} \quad e$$

$$v_{\downarrow} = s_{\downarrow} / t_{\downarrow}$$

| v-su                   | Dr(vu-su) | v-giù | Dr(v-giù) |
|------------------------|-----------|-------|-----------|
| 10 <sup>-3</sup> m/sec |           | m/sec |           |
| 0,191                  | 0,11      | 0,195 | 0,17      |

- Calcolare il raggio della goccia R e q

| R nudo             | Cunningham         | R corretto         | Dr( R ) | D(Rcorretto )      | q                   | Dr(q) | D( q )              | q/e |
|--------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|---------------------|-------|---------------------|-----|
| 10 <sup>-6</sup> m | 10 <sup>-6</sup> m | 10 <sup>-6</sup> m |         | 10 <sup>-6</sup> m | 10 <sup>-19</sup> C |       | 10 <sup>-19</sup> C |     |
| 0,383              | 0,057              | 0,440              | 0,058   | 0,026              | 2,75                | 0,21  | 0,58                | 1,7 |
| 0,353              | 0,057              | 0,411              | 0,114   | 0,047              | 1,40                | 0,40  | 0,56                | 0,9 |
| 0,212              | 0,057              | 0,269              | 0,101   | 0,027              | 1,16                | 0,39  | 0,45                | 0,7 |
| 0,336              | 0,057              | 0,393              | 0,113   | 0,044              | 1,47                | 0,39  | 0,58                | 0,9 |

# Studio delle incertezze

- Le principali fonti di incertezza derivano dalle misure di **s e t**

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta t}{t}$$

- Altre fonti di incertezza rilevanti riguardano:
  - Dipendenza dei valori di  $\eta$  e  $\rho$  dalla temperatura
  - Correzione da slittamento

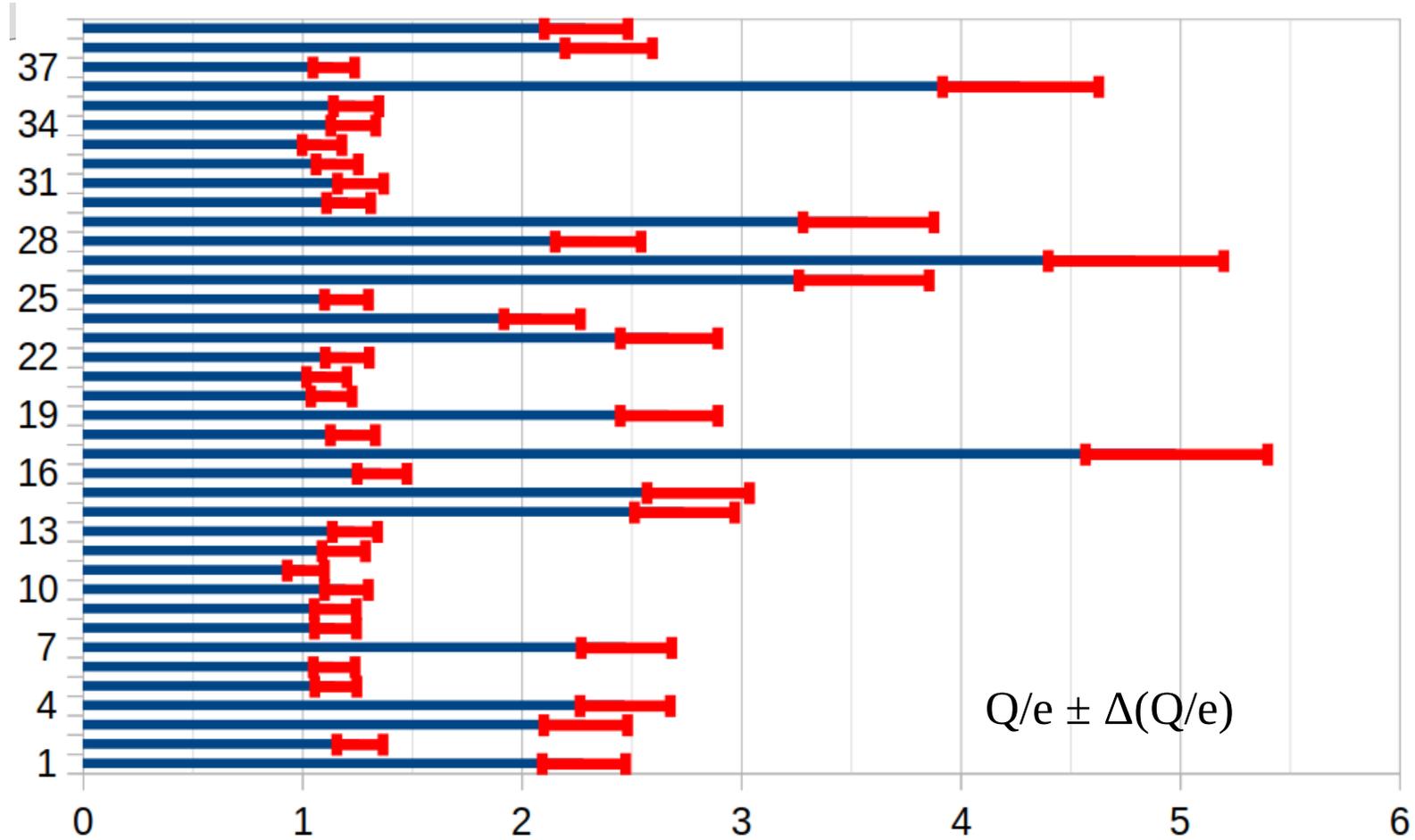
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_{nudo}}{C_{unn.} + R_{nudo}}, \quad \frac{\Delta R_{nudo}}{R_{nudo}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta v_{\downarrow}}{v_{\downarrow}} \right)$$

- $\frac{\Delta q}{q} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta (v_{\downarrow} + v_{\uparrow})}{v_{\downarrow} + v_{\uparrow}}$
- Si stimi l'impatto di tali incertezze sulla misura finale

# Rapporto carica misurata/Valore di e tabulato

| Velocità v↓ |          | Raggio attrito |             | Raggio attrito corretto |  | Rapporto con e CODATA |  |          |       |
|-------------|----------|----------------|-------------|-------------------------|--|-----------------------|--|----------|-------|
| vg          | vs       | r0             | r1          | q                       |  | n                     |  | eta      | A     |
| 3,34E-05    | 9,28E-05 | 9,42979E-07    | 8,71267E-07 | 3,46043E-19             |  | 2,162767205           |  | 1,82E-05 | 0,817 |
| 5,35E-05    | 4,04E-05 | 6,22285E-07    | 5,53277E-07 | 1,56191E-19             |  | 0,976192147           |  |          |       |
| 3,25E-05    | 9,46E-05 | 9,52335E-07    | 8,80569E-07 | 3,52648E-19             |  | 2,204050894           |  |          |       |
| 1,44E-04    | 7,02E-05 | 8,20464E-07    | 7,49557E-07 | 4,98937E-19             |  | 3,118359222           |  |          |       |
| 6,80E-05    | 9,68E-05 | 9,63442E-07    | 8,91614E-07 | 4,63599E-19             |  | 2,897491867           |  |          |       |
| 1,12E-04    | 7,44E-05 | 8,44698E-07    | 7,73615E-07 | 4,49463E-19             |  | 2,809144224           |  |          |       |
| 5,34E-05    | 3,97E-05 | 6,17025E-07    | 5,48083E-07 | 1,53227E-19             |  | 0,957670674           |  |          |       |
| 8,47E-05    | 1,19E-04 | 1,06979E-06    | 9,9743E-07  | 6,47576E-19             |  | 4,047352208           |  |          |       |
| 2,25E-05    | 1,23E-04 | 1,0858E-06     | 1,01337E-06 | 4,697E-19               |  | 2,935622046           |  |          |       |
| 4,99E-05    | 1,34E-04 | 1,13416E-06    | 1,06152E-06 | 6,24433E-19             |  | 3,902707302           |  |          |       |
| 5,07E-05    | 3,76E-05 | 6,00094E-07    | 5,31367E-07 | 1,40314E-19             |  | 0,876963184           |  |          |       |
| 5,44E-05    | 3,62E-05 | 5,88725E-07    | 5,20151E-07 | 1,40576E-19             |  | 0,878601625           |  |          |       |
| 5,39E-05    | 4,09E-05 | 6,25817E-07    | 5,56766E-07 | 1,58788E-19             |  | 0,992426937           |  |          |       |
| 5,66E-05    | 4,16E-05 | 6,31611E-07    | 5,62489E-07 | 1,66468E-19             |  | 1,04042358            |  |          |       |
| 1,97E-05    | 1,42E-04 | 1,16624E-06    | 1,09347E-06 | 5,65849E-19             |  | 3,536556831           |  |          |       |
| 3,35E-05    | 9,20E-05 | 9,38956E-07    | 8,67267E-07 | 3,4255E-19              |  | 2,140936767           |  |          |       |
| 4,66E-05    | 5,26E-05 | 7,10324E-07    | 6,40354E-07 | 1,94326E-19             |  | 1,214534677           |  |          |       |
| 8,38E-05    | 5,47E-05 | 7,23824E-07    | 6,53726E-07 | 2,77367E-19             |  | 1,733540786           |  |          |       |
| 6,86E-05    | 9,44E-05 | 9,51026E-07    | 8,79267E-07 | 4,51568E-19             |  | 2,822300143           |  |          |       |
| 6,65E-05    | 3,45E-04 | 1,81716E-06    | 1,74272E-06 | 2,35096E-18             |  | 14,69352918           |  |          |       |
| 6,23E-05    | 3,15E-05 | 5,49308E-07    | 4,81302E-07 | 1,33233E-19             |  | 0,832705288           |  |          |       |
| 3,45E-05    | 1,10E-04 | 1,02869E-06    | 9,56516E-07 | 4,39663E-19             |  | 2,747892437           |  |          |       |

# Rappresentazione Grafica dei Dati



# Rappresentazione per Classi

| $q \times 10^{19}$ | $q >$ | $De(q) >$ | $q-De(q)$ | $q - De(q)$ | $\langle q \rangle$ | sigma | $q_i - q_1$ | n1   | $(q_i - q_1)/n1$ | De1  |
|--------------------|-------|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------|-------------|------|------------------|------|
| 4,88               | 3,29  | 0,54      | 2,75      | 3,83        |                     |       |             |      |                  |      |
| 5,74               | 3,43  | 0,56      | 2,87      | 3,99        |                     |       |             |      |                  |      |
| 10,95              | 3,77  | 0,57      | 3,20      | 4,35        | 3,77                | 0,41  |             |      |                  |      |
| 6,48               | 4,13  | 0,68      | 3,45      | 4,81        |                     |       |             |      |                  |      |
| 5,00               | 4,21  | 0,47      | 3,73      | 4,68        |                     |       | 1,05        | 1,00 | 1,05             | 0,72 |
| 8,14               | 4,36  | 0,63      | 3,73      | 5,00        |                     |       |             |      |                  |      |
| 13,18              | 4,88  | 0,56      | 4,32      | 5,44        | 4,82                | 0,31  |             |      |                  |      |
| 5,04               | 5,00  | 0,68      | 4,32      | 5,67        |                     |       |             |      |                  |      |
| 16,21              | 5,04  | 1,09      | 3,94      | 6,13        |                     |       |             |      |                  |      |
| 3,29               | 5,40  | 0,53      | 4,86      | 5,93        |                     |       | 2,01        | 2,00 | 1,01             | 0,36 |
| 6,00               | 5,48  | 0,91      | 4,57      | 6,39        |                     |       |             |      |                  |      |
| 5,58               | 5,58  | 0,93      | 4,65      | 6,52        | 5,78                | 0,40  |             |      |                  |      |
| 4,13               | 5,74  | 0,76      | 4,97      | 6,50        |                     |       |             |      |                  |      |
| 3,43               | 6,00  | 0,99      | 5,01      | 6,99        |                     |       | 6,22        | 4,00 | 1,55             | 0,10 |
| 10,87              | 6,48  | 0,87      | 5,61      | 7,36        |                     |       |             |      |                  |      |
| 15,35              | 8,14  | 1,78      | 6,36      | 9,92        |                     |       |             |      |                  |      |
| 5,48               | 10,87 | 1,85      | 9,02      | 12,72       | 9,99                | 1,60  |             |      |                  |      |
| 5,40               | 10,95 | 1,90      | 9,05      | 12,85       |                     |       | 11,15       | 6,00 | 1,86             | 0,53 |
| 3,77               | 13,18 | 2,27      | 10,91     | 15,45       |                     |       |             |      |                  |      |
| 4,21               | 15,35 | 1,13      | 14,22     | 16,49       | 14,91               | 1,56  |             |      |                  |      |
| 4,36               | 16,21 | 2,23      | 13,98     | 18,44       |                     |       |             |      |                  |      |

NB: Esempio basato su una serie di misure diversa dalla precedente

q in ordine crescente

Intervalli di valori per le q  
Individuazione delle classi

Valori medi nelle classi

Differenze con la classe 1

e De  
1,41 0,23  
Valori medi Errore  
delle stime sulla media

In questo esempio, l'errore stimato della misura è del 23%

# Test del $\chi^2$

E' un metodo statistico che consente di verificare se due grandezze, diciamo  $x$  e  $y$ , siano legate da una certa ipotetica relazione  $y = f(x)$ , supponendo di aver misurato  $N$  coppie  $(x_i, y_i)$ , con  $N$  molto grande, e supponendo che le cause di errore nelle misure siano molto grandi e distribuite secondo la legge di Gauss (distribuzione Normale).

Se il valore atteso di  $y_i$  sia  $f(x_i)$ , si potrebbe *verificare* la bontà di questa ipotesi CALCOLANDO che la quantità

$$\chi^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 / \sigma_i^2 \leq 1$$

dove  $\sigma_i$  sono le deviazioni standard della misura  $x_i$ .

Nel caso della misura della carica fondamentale la quantità misurata è  $x_i = q_i/e$ , dove  $e$  è il supposto valore vero della carica fondamentale. In tal caso  $f(x_i)$  deve essere un numero intero, corrispondente a  $y_i$ . Pertanto, bisogna

verificare che

$$\chi^2(e) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N ([q_i/e] - q_i/e)^2 / (\Delta q_i/e)^2 \leq 1$$

per un opportuno valore  $e$ , che ora è inteso variabile.

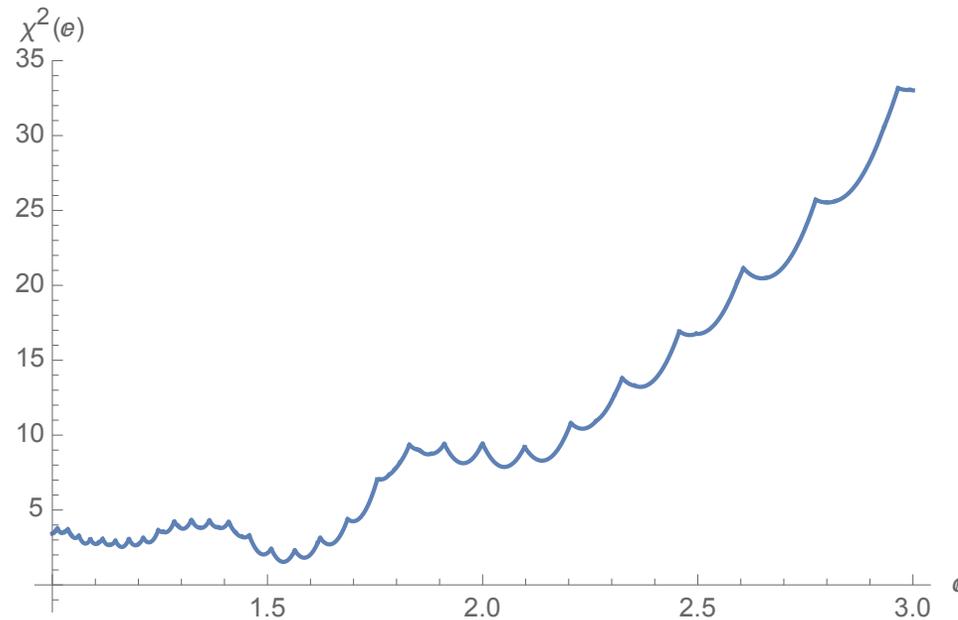
# Applicazione del test del $\chi^2$

Esempio :

Cariche misurate

{6.48, 6.24, 5.66, 4.99, 4.7, 4.64, 4.52, 4.49, 4.4, 3.53, 3.46, 3, 43, 2.77, 1.94, 1.66, 1.59, 1.56, 1.53, 1.41, 1.4, 1.33} x 10<sup>-19</sup> C

Deviazione standard 0.20 x 10<sup>-19</sup> C (uniforme per tutti i valori)

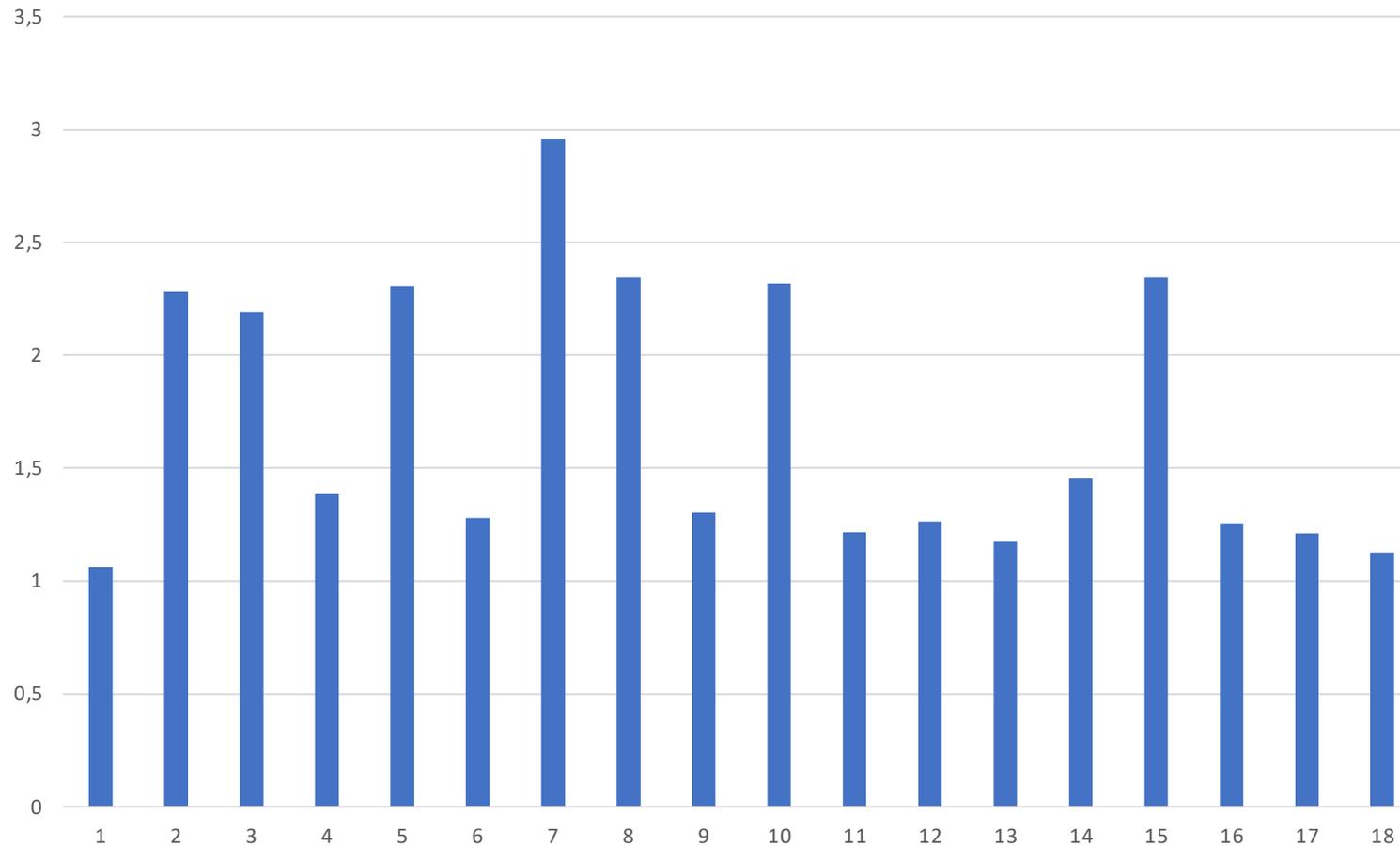


Come si vede dal grafico, il valore che minimizza  $\chi^2$  è  $e = 1.51 \times 10^{-19} \text{ C} \pm 0.20 \times 10^{-19} \text{ C}$

# I dati del 20/2/2026

| #  | S_up     | t_up  | v_up     | S_down   | t_down | v_down   | V   | d     | rho | g   | eta      | R        | Q        | Q/e   | D( Q/e) |
|----|----------|-------|----------|----------|--------|----------|-----|-------|-----|-----|----------|----------|----------|-------|---------|
| 1  | 0,000750 | 34,12 | 2,2E-05  | 0,000750 | 15,85  | 4,73E-05 | 535 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 6,71E-07 | 1,7E-19  | 1,062 | 0,06    |
| 2  | 0,000750 | 13,81 | 5,43E-05 | 0,001250 | 16,93  | 7,38E-05 | 575 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 8,39E-07 | 3,66E-19 | 2,282 | 0,28    |
| 3  | 0,000750 | 14,6  | 5,14E-05 | 0,001250 | 17,23  | 7,25E-05 | 574 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 8,31E-07 | 3,51E-19 | 2,191 | 0,19    |
| 4  | 0,000750 | 8,83  | 8,49E-05 | 0,000500 | 15,41  | 3,24E-05 | 575 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,56E-07 | 2,22E-19 | 1,386 | 0,39    |
| 5  | 0,001250 | 11,4  | 0,00011  | 0,000750 | 15,25  | 4,92E-05 | 575 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 6,85E-07 | 3,7E-19  | 2,308 | 0,31    |
| 6  | 0,001250 | 19,5  | 6,41E-05 | 0,000750 | 20,3   | 3,69E-05 | 572 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,93E-07 | 2,05E-19 | 1,279 | 0,28    |
| 7  | 0,001000 | 10,6  | 9,43E-05 | 0,000750 | 10,3   | 7,28E-05 | 575 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 8,33E-07 | 4,74E-19 | 2,956 | -0,04   |
| 8  | 0,000500 | 22    | 2,27E-05 | 0,000750 | 8      | 9,38E-05 | 573 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 9,45E-07 | 3,76E-19 | 2,345 | 0,35    |
| 9  | 0,000750 | 10,35 | 7,25E-05 | 0,000500 | 14,45  | 3,46E-05 | 576 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,74E-07 | 2,09E-19 | 1,303 | 0,3     |
| 10 | 0,001000 | 9,8   | 0,000102 | 0,000500 | 9,52   | 5,25E-05 | 576 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 7,07E-07 | 3,71E-19 | 2,317 | 0,32    |
| 11 | 0,000750 | 10,3  | 7,28E-05 | 0,000250 | 7,9    | 3,16E-05 | 576 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,49E-07 | 1,95E-19 | 1,216 | 0,22    |
| 12 | 0,000750 | 9,75  | 7,69E-05 | 0,000500 | 15,8   | 3,16E-05 | 576 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,49E-07 | 2,02E-19 | 1,263 | 0,26    |
| 13 | 0,000750 | 10,2  | 7,35E-05 | 0,000250 | 8,35   | 2,99E-05 | 575 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,34E-07 | 1,88E-19 | 1,173 | 0,17    |
| 14 | 0,000750 | 10,7  | 7,01E-05 | 0,000500 | 12,4   | 4,03E-05 | 575 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 6,2E-07  | 2,33E-19 | 1,453 | 0,45    |
| 15 | 0,001250 | 9,4   | 0,000133 | 0,001000 | 23,5   | 4,26E-05 | 582 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 6,37E-07 | 3,76E-19 | 2,344 | 0,34    |
| 16 | 0,000750 | 12,1  | 6,2E-05  | 0,000500 | 13,2   | 3,79E-05 | 584 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 6,01E-07 | 2,01E-19 | 1,254 | 0,25    |
| 17 | 0,000500 | 12,1  | 4,13E-05 | 0,000500 | 10,9   | 4,59E-05 | 582 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 6,61E-07 | 1,94E-19 | 1,209 | 0,21    |
| 18 | 0,000750 | 11,1  | 6,76E-05 | 0,000500 | 16,1   | 3,11E-05 | 582 | 0,006 | 877 | 9,8 | 1,82E-05 | 5,44E-07 | 1,8E-19  | 1,125 | 0,13    |

# Grafico di $q_{\text{mis}}/e$



Si osserva una deviazione quasi sistematica in positivo del valore di  $q_{\text{mis}}$  rispetto a quello atteso e dell'ordine del 10%. Bisogna presumere che tale errore sia dovuto a cause varie quali, errore nella calibrazione del reticolo, variazione dei valore della densità e della viscosità con la temperatura, correzione di Cunningham. Tutte queste possibilità andrebbero studiate accuratamete dagli student.

*BUON STUDIO!*

*GRAZIE  
PER L'ATTENZIONE!*