

Esperienza di Millikan

Misura della carica dell'elettrone

Canclini Tommaso
Piacentini Michele
Rigoni Leonardo Carlo Maria

Dipartimento di fisica
Università degli studi di Milano
21 ottobre 2024

1 Introduzione

L'esperimento di Millikan ha come obiettivo quello di misurare la carica elementare dell'elettrone tramite una metodologia di stampo statistico. Dopo aver nebulizzato delle gocce di olio minerale all'interno di una camera, esse subiscono un procedimento di ionizzazione per strofinio ed un eventuale ionizzazione tramite sorgente radioattiva al Torio (Th). In seguito si analizza il loro comportamento sotto l'effetto di un campo elettrostatico. Nell'ipotesi di poter apprezzare solo cariche quantizzate, si procede a determinare approssimativamente quante di queste cariche effettivamente siano contenute nelle gocce d'olio.

2 Abstract

In seguito ad analisi statistica la carica dell'elettrone misurata è:

$$q_{\text{elettrone}} = (-1.607 \pm 0.012) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

da confrontarsi con la carica elementare universalmente accettata dell'elettrone:

$$q_{\text{elettrone}} \approx -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

3 Procedimento

3.1 Messa a punto dell'apparato e misure preliminari

Prima di procedere con le misure il nostro gruppo si è dedicato alla pulizia dell'apparato sperimentale con alcol etilico, fatta eccezione per l'elettrodo inferiore del condensatore, attaccato alla struttura principale.

Abbiamo successivamente inserito l'ago per la messa a fuoco del cannocchiale dal quale poi avremmo osservato le goccioline d'olio.

Attraverso un *calibro Palmer* abbiamo misurato lo spessore del distanziale (coincidente con la distanza tra le armature del condensatore) in punti diversi e successivamente fatto una media delle misure, ottenendo uno spessore di $(7.61 \pm 0.02) \text{ mm}$.

Come errore abbiamo utilizzato la deviazione standard della media. Abbiamo successivamente verificato che i piedini della struttura fossero regolati in modo tale da svolgere l'esperimento con l'apparecchiatura in bolla.

3.2 Misure distanziometro

d (m)
0.00764 ± 0.00001
0.00763 ± 0.00001
0.00764 ± 0.00001
0.00759 ± 0.00001
0.00756 ± 0.00001

3.3 Collegamento del generatore

Come passo successivo abbiamo acceso il generatore di tensione al quale, durante lo svolgimento dell'esperienza, abbiamo cambiato il voltaggio in uscita in un intervallo di $(300 - 500)$ V.

Abbiamo inoltre utilizzato un *termistore*, collegato al *multimetro*, per il calcolo della resistenza nel nostro sistema. Questo dato ci è stato utile per determinare la temperatura all'interno della camera. La conversione resistenza-temperatura è tabulata e visibile sulla struttura dell'apparato, alla destra del cannocchiale. Ci siamo presi inoltre cura di misurare la temperatura per ogni misura effettuata.

3.4 Misure delle gocce d'olio

Per misurare la velocità delle gocce d'olio nella camera abbiamo misurato il tempo che esse impiegavano per percorrere la distanza di un quadrato grande sulla griglia nel cannocchiale. Questa distanza corrisponde a 0.5 mm. Abbiamo deciso, per ogni misura, di individuare una goccia tra quelle presenti nella camera che avesse un comportamento che rispettasse le ipotesi teoriche.

Per rispettare tale comportamento, una goccia doveva essere abbastanza isolata dalle altre al fine di evitare interazioni non richieste ai fini dell'esperimento. Ricordiamo infatti che i calcoli svolti sulle misure considerano le gocce come sistemi isolati, trascurando le interazioni tra loro. La gocciolina in questione doveva essere, inoltre, sufficientemente luminosa e a fuoco per essere osservata e doveva rispondere reattivamente al campo elettrico indotto nella camera di Millikan.

Nel caso in cui le gocce non si dimostrassero particolarmente reattive, le esponevamo alla sorgente di Th in modo da ionizzarle maggiormente.

3.5 Modalità di misura

Selezionata una gocciolina d'olio nel nostro sistema, abbiamo registrato per essa 9 misure di tempo: 3 per il moto in discesa in assenza di campo elettrico, 3 per il moto in salita con il campo elettrico e 3 per il moto in discesa sotto l'effetto del campo elettrico invertito di polarità.

Per le misure di tempo un componente del gruppo osservava il moto della goccia

tramite in cannocchiale ed ogni volta che la goccia compiva una distanza di 0.5 mm avisava verbalmente un secondo componente del gruppo, incaricato di prendere i tempi attraverso l'applicazione *Cronometro* del cellulare.

Abbiamo deciso di utilizzare la stessa goccia per questi 3 blocchi da 3 misure perché, con buona approssimazione, potevamo essere certi che il raggio della goccia non fosse cambiato.

Abbiamo successivamente deciso di fare una media delle velocità in assenza di campo elettrico per ogni blocco da tre misure di tempo, ottenendo quindi una velocità media e un raggio medio delle gocce d'olio. Queste misure medie sono state successivamente utilizzate per il calcolo della carica attraverso l'analisi del moto in campo elettrostatico.

Abbiamo adottato questa strategia poiché ci ha permesso di ridurre l'errore sulla misura causato da eventuali variazioni di carica da parte della gocciolina.

3.6 Considerazioni aggiuntive

Sperimentalmente abbiamo osservato che molte gocce non avevano un comportamento in accordo col modello teorico, in quanto non rispondevano al campo elettrico oppure mostravano un moto caotico di tipo browniano.

Ci siamo inoltre resi conto che la misura delle velocità delle goccioline era affetta da molto rumore ed in alcuni casi perfino distorta.

Abbiamo deciso conseguentemente di scartare alcune misure che, confrontate con il valore universalmente accettato, traslavano il risultato della nostra misura. Per correggere tale bias è bastato, infatti, ignorare le misure di gocce che non si erano mosse verticalmente oppure ricorrere ad una metodologia di rigetto, spiegata nell'rigetto dei dati.

4 Analisi dei dati

4.1 Scarto quadratico medio

Dopo aver preso le misure sulle velocità delle gocce d'olio siamo riusciti a risalire tramite la (1) ai raggi delle goccioline d'olio.

Ottenuto il raggio, è bastato inserirlo nelle (2), (3) per stimare le cariche sulle goccioline d'olio.

A questo punto dell'analisi, ottenute tutte le cariche delle gocce, abbiamo potuto condurre un'indagine statistica per individuare quale valore q approssimasse al meglio una quantità che, dividendo la carica Q totale della goccia, restituisse un numero intero.

Abbiamo potuto svolgere questa indagine sotto l'ipotesi che la carica elettrica fondamentale, quella dell'elettrone, fosse quantizzata.

Abbiamo considerato $\{q_\alpha\}_{\alpha=1,2,\dots,M}$ cariche che abbiamo chiamato di prova.

La scelta di queste è arbitraria e noi le abbiamo stabilite dividendo l'intervallo $[1.45, 1.9] \cdot 10^{-19} C$ in $M = 400$ sottointervalli, i quali estremi erano proprio le

$\{q_\alpha\}_{\alpha=1,2,\dots,M}$. Abbiamo poi definito la funzione

$$S(q_\alpha) = \sum_{k=1}^{N_{misura}} \left(\frac{Q_i}{k_i(q_\alpha)} - q_\alpha \right) \quad \text{con} \quad k_i(q_\alpha) = \left\lfloor \frac{Q_i}{q_\alpha + 0.5} \right\rfloor$$

detta scarto quadratico medio, utile per determinare quanto la carica n-esima di prova si discostasse dal quantificare la carica quantizzata elementare.

Ovviamente, ottimizzando questa funzione siamo riusciti a determinare tale carica di prova e di conseguenza anche la carica dell'elettrone.

Minimizzando la funzione $S(q_\alpha)$, si trova che il suo minimo coincide con la quantità:

$$q_{vero} = \frac{1}{N_{misura}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{misura}} \frac{Q_i}{k_i}$$

Abbiamo infine assegnato alla misura un errore che corrispondesse alla discrepanza standardizzata della media:

$$\sigma_{\bar{q}} = \sqrt{\frac{S(\bar{q})}{N \cdot (N - 1)}} \quad \text{con} \quad N = N_{misura}$$

4.2 Grafico ricerca carica elettrone

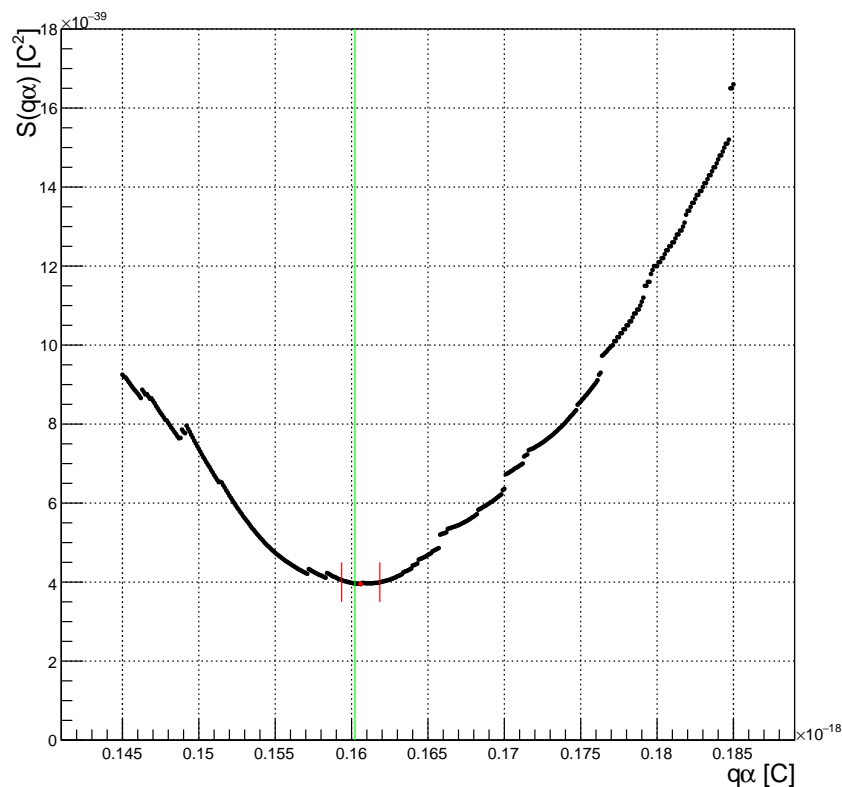


Figure 1: Grafico di $S(q\alpha)$, con ricerca carica minima

4.3 Rigetto dei dati

Un aspetto importante che abbiamo tenuto conto nell'analizzare i dati sperimentali è che la procedura con cui sono stati misurati i tempi era affetta principalmente da 2 fonti di errore:

- tempo di reazione umano a stimolo uditivo e utilizzo del cronometro;
- il moto delle gocce in determinate situazioni non era completamente uniforme, rendendo difficile determinare quando esse attraversavano la linea spessa della griglia.

Abbiamo quindi scelto di calcolare la media delle cariche sperimentali misurate per ogni goccia (con entrambe le configurazioni di campo elettrico) e a quel

punto calcolare in percentuale quanto il dato sperimentale si discostasse dalla media. Poiché idealmente la carica totale della goccia non dovrebbe modificarsi durante il moto (a meno di acquisto/perdita di 1 elettrone) abbiamo scelto di scartare tutte le misure che avevano uno scarto maggiore del 5% rispetto al valore medio.

Nell'analisi statistica la media è considerata quella pesata, in quanto ad ogni carica sperimentale è associata un'incertezza.

5 Conclusioni

Possiamo concludere che, a meno di un errore del 2-3%, la misura della carica di un elettrone sia eseguibile tramite la metodologia da noi utilizzata.

Dobbiamo considerare che la misura universalmente oggi accettata è frutto di molte più misurazioni di quelle prese dal nostro gruppo, con strumenti più raffinati e precisi.

Tramite un'analisi statistica più consistente ed un più accurato rigetto dei dati abbiamo ottenuto che la carica elettrica dell'elettrone ha un valore:

$$q_{e-} = (-1.607 \pm 0.012) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Calcolando la discrepanza standardizzata del dato sperimentale rispetto al valore atteso, si ottiene che la carica dell'elettrone sperimentalmente ha un livello di confidenza pari a 0.43σ e una compatibilità del 92.80% con la misura universalmente accettata.

Dobbiamo anche ammettere di aver ottenuto una così grande compatibilità a causa della qualità delle nostre misurazioni, che ci hanno portato a ottenere un errore del 7.4% sulla misura finale.

Consideriamo tale errore accettabile al fine di un'esperienza di laboratorio didattica, ma non si tratta sicuramente di una misurazione estremamente accurata dal punto di vista sperimentale.

5.1 Grafico comparativo, carica effettiva/carica misurata

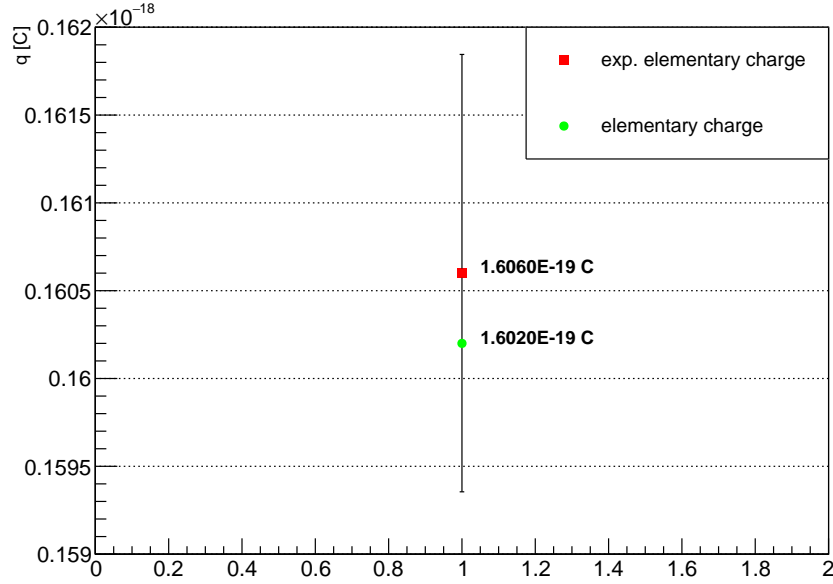


Figure 2: Grafico carica misurata rispetto a carica effettiva

6 Appendice

6.1 Equazioni utili

$$r_0 = \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_r}{2g(\rho_{olio} - \rho_{aria})}} - \frac{b}{2p} \quad (1)$$

$$q = -\frac{4}{3}\pi r_0^3(\rho_{olio} - \rho_{aria})\frac{g}{E}\left(1 - \frac{v_e}{v_r}\right) \quad (2)$$

$$q = -\frac{4}{3}\pi r_0^3(\rho_{olio} - \rho_{aria})\frac{g}{E}\left(1 + \frac{|v_e|}{v_r}\right) \quad (3)$$

6.2 Parametri utilizzati

Alleghiamo qui la tabella con i parametri da noi utilizzati nei calcoli:

Pressione	101325 Pa
b	$8.2 \cdot 10^{-3}$
Forza di gravità	9.8067 m/s^2
ρ_{aria}	1.2930 kg/m^3
ρ_{olio}	860 kg/m^3

6.3 Tabelle delle misure non rigettate

A seguito vengono riportate tutte le tabelle contenenti le misure non rigettate.

6.4 Tabella velocità e raggi

A seguito è riportata la tabella contenente le misure, non rigettate, delle velocità e dei raggi delle goccioline d'olio, in assenza di campo elettrico.

t (s)	v_r (m/s)	r_0 (m)
27.4 ± 0.4	$(1.83 \pm 0.37) \times 10^{-5}$	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
27.0 ± 0.4	$(1.85 \pm 0.37) \times 10^{-5}$	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
30.0 ± 0.4	$(1.66 \pm 0.33) \times 10^{-5}$	$(3.7 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
80.8 ± 0.4	$(6.2 \pm 1.2) \times 10^{-6}$	$(2.10 \pm 0.24) \times 10^{-7}$
58.9 ± 0.4	$(8.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$(2.52 \pm 0.29) \times 10^{-7}$
48.9 ± 0.4	$(1.02 \pm 0.20) \times 10^{-5}$	$(2.8 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
18.8 ± 0.4	$(2.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
19.1 ± 0.4	$(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
32.7 ± 0.4	$(1.53 \pm 0.31) \times 10^{-5}$	$(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
35.8 ± 0.4	$(1.40 \pm 0.28) \times 10^{-5}$	$(3.3 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
41.2 ± 0.4	$(1.21 \pm 0.24) \times 10^{-5}$	$(3.1 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
90.6 ± 0.4	$(5.5 \pm 1.1) \times 10^{-6}$	$(1.96 \pm 0.23) \times 10^{-7}$
79.0 ± 0.4	$(6.3 \pm 1.3) \times 10^{-6}$	$(2.13 \pm 0.25) \times 10^{-7}$
70.6 ± 0.4	$(7.1 \pm 1.4) \times 10^{-6}$	$(2.27 \pm 0.26) \times 10^{-7}$
42.9 ± 0.4	$(1.17 \pm 0.23) \times 10^{-5}$	$(3.0 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
40.6 ± 0.4	$(1.23 \pm 0.25) \times 10^{-5}$	$(3.1 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
13.9 ± 0.4	$(3.6 \pm 0.7) \times 10^{-5}$	$(5.6 \pm 0.6) \times 10^{-7}$
12.4 ± 0.4	$(4.0 \pm 0.8) \times 10^{-5}$	$(5.9 \pm 0.6) \times 10^{-7}$
60.1 ± 0.4	$(8.3 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$(2.49 \pm 0.28) \times 10^{-7}$
51.9 ± 0.4	$(9.6 \pm 1.9) \times 10^{-6}$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
11.7 ± 0.4	$(4.3 \pm 0.9) \times 10^{-5}$	$(6.1 \pm 0.7) \times 10^{-7}$
12.3 ± 0.4	$(4.1 \pm 0.8) \times 10^{-5}$	$(6.0 \pm 0.6) \times 10^{-7}$

20.2 ± 0.4	$(2.5 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.6 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
21.1 ± 0.4	$(2.4 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.5 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
19.0 ± 0.4	$(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
5.4 ± 0.4	$(9.2 \pm 2.0) \times 10^{-5}$	$(9.2 \pm 1.0) \times 10^{-7}$
5.3 ± 0.4	$(9.5 \pm 2.0) \times 10^{-5}$	$(9.3 \pm 1.0) \times 10^{-7}$
5.3 ± 0.4	$(9.4 \pm 2.0) \times 10^{-5}$	$(9.2 \pm 1.0) \times 10^{-7}$
24.2 ± 0.4	$(2.1 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	$(4.1 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
21.6 ± 0.4	$(2.3 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.4 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
18.7 ± 0.4	$(2.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
19.0 ± 0.4	$(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
18.5 ± 0.4	$(2.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	$(4.8 \pm 0.5) \times 10^{-7}$
45.8 ± 0.4	$(1.09 \pm 0.22) \times 10^{-5}$	$(2.9 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
41.6 ± 0.4	$(1.20 \pm 0.24) \times 10^{-5}$	$(3.1 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
33.1 ± 0.4	$(1.51 \pm 0.30) \times 10^{-5}$	$(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-7}$
51.7 ± 0.4	$(9.7 \pm 1.9) \times 10^{-6}$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
5.5 ± 0.4	$(9.1 \pm 1.9) \times 10^{-5}$	$(9.1 \pm 1.0) \times 10^{-7}$
4.6 ± 0.4	$(1.1 \pm 2.4) \times 10^{-4}$	$(1.0 \pm 1.1) \times 10^{-6}$
6.3 ± 0.4	$(7.9 \pm 1.7) \times 10^{-5}$	$(8.5 \pm 0.9) \times 10^{-7}$

Table 1: Misure di velocità e raggio senza campo

6.5 Tebella velocità positive

A seguito è riportata la tebella delle misure di carica in presenza di campo elettrico, per goccioline con velocità positiva.

t (s)	ΔV (V)	v^+ (m/s)	q^+ (C)
0.5 ± 0.4	349 ± 1	$(1.1 \pm 0.9) \times 10^{-3}$	$(2.6 \pm 2.5) \times 10^{-18}$
0.4 ± 0.4	349 ± 1	$(1.2 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	$(2.7 \pm 2.7) \times 10^{-18}$
0.5 ± 0.4	349 ± 1	$(1.1 \pm 0.9) \times 10^{-3}$	$(2.6 \pm 2.4) \times 10^{-18}$
1.7 ± 0.4	302 ± 1	$(2.9 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	$(9 \pm 5) \times 10^{-19}$
1.7 ± 0.4	302 ± 1	$(3.0 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	$(10 \pm 5) \times 10^{-19}$
3.4 ± 0.4	302 ± 1	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	$(3.1 \pm 1.5) \times 10^{-19}$
3.4 ± 0.4	302 ± 1	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	$(3.1 \pm 1.3) \times 10^{-19}$
0.9 ± 0.4	302 ± 1	$(5.4 \pm 2.4) \times 10^{-4}$	$(7 \pm 4) \times 10^{-19}$

4.8 ± 0.4	302 ± 1	$(1.04 \pm 0.22) \times 10^{-4}$	$(1.9 \pm 0.9) \times 10^{-19}$
4.4 ± 0.4	300 ± 1	$(1.15 \pm 0.25) \times 10^{-4}$	$(3.4 \pm 1.8) \times 10^{-19}$
4.5 ± 0.4	300 ± 1	$(1.12 \pm 0.24) \times 10^{-4}$	$(3.3 \pm 1.9) \times 10^{-19}$
1.48 ± 0.4	300 ± 1	$(3.4 \pm 1.1) \times 10^{-4}$	$(6.0 \pm 2.8) \times 10^{-19}$
1.8 ± 0.4	331 ± 1	$(2.8 \pm 0.8) \times 10^{-4}$	$(8 \pm 4) \times 10^{-19}$
2.3 ± 0.4	410 ± 1	$(2.2 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(4.7 \pm 2.2) \times 10^{-19}$
2.3 ± 0.4	410 ± 1	$(2.2 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(4.6 \pm 2.3) \times 10^{-19}$
2.2 ± 0.4	411 ± 1	$(2.3 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(5.2 \pm 2.6) \times 10^{-19}$
0.9 ± 0.4	411 ± 1	$(5.9 \pm 2.8) \times 10^{-4}$	$(9 \pm 5) \times 10^{-19}$
0.9 ± 0.4	411 ± 1	$(5.8 \pm 2.8) \times 10^{-4}$	$(9 \pm 6) \times 10^{-19}$
0.8 ± 0.4	411 ± 1	$(6 \pm 3) \times 10^{-4}$	$(10 \pm 7) \times 10^{-19}$
0.6 ± 0.4	349 ± 1	$(7.937 \pm 4.913) \times 10^{-4}$	$(1.2 \pm 0.9) \times 10^{-18}$
1.1 ± 0.4	349 ± 1	$(4.8 \pm 1.9) \times 10^{-4}$	$(2.4 \pm 1.6) \times 10^{-18}$
1.1 ± 0.4	349 ± 1	$(4.5 \pm 1.7) \times 10^{-4}$	$(2.3 \pm 1.6) \times 10^{-18}$

Table 2: Misure di carica con velocità positive

6.6 Tabella velocità negative

A seguito è riportata la tabella delle misure di carica in presenza di campo elettrico, per goccioline con velocità negativa.

t (s)	ΔV (V)	v^- (m/s)	q^- (C)
0.5 ± 0.4	-349 ± 1	$(-1.0 \pm 0.8) \times 10^{-3}$	$(2.5 \pm 2.3) \times 10^{-18}$
5.6 ± 0.4	-301 ± 1	$(-8.9 \pm 1.9) \times 10^{-5}$	$(1.6 \pm 0.6) \times 10^{-19}$
5.9 ± 0.4	-301 ± 1	$(-8.6 \pm 1.8) \times 10^{-5}$	$(1.5 \pm 0.7) \times 10^{-19}$
5.8 ± 0.4	-301 ± 1	$(-8.7 \pm 1.8) \times 10^{-5}$	$(1.5 \pm 0.8) \times 10^{-19}$
2.0 ± 0.4	-302 ± 1	$(-2.5 \pm 0.7) \times 10^{-4}$	$(10 \pm 4) \times 10^{-19}$
4.1 ± 0.4	-302 ± 1	$(-1.23 \pm 0.27) \times 10^{-4}$	$(3.2 \pm 1.5) \times 10^{-19}$
4.2 ± 0.4	-302 ± 1	$(-1.20 \pm 0.26) \times 10^{-4}$	$(3.1 \pm 1.3) \times 10^{-19}$
4.1 ± 0.4	-302 ± 1	$(-1.23 \pm 0.27) \times 10^{-4}$	$(3.2 \pm 1.3) \times 10^{-19}$
1.0 ± 0.4	-302 ± 1	$(-5.2 \pm 2.3) \times 10^{-4}$	$(7 \pm 4) \times 10^{-19}$
1.0 ± 0.4	-302 ± 1	$(-5.7 \pm 2.6) \times 10^{-4}$	$(8 \pm 5) \times 10^{-19}$
6.2 ± 0.4	-302 ± 1	$(-8.1 \pm 1.7) \times 10^{-5}$	$(1.8 \pm 0.8) \times 10^{-19}$
6.6 ± 0.4	-302 ± 1	$(-7.6 \pm 1.6) \times 10^{-5}$	$(1.7 \pm 0.8) \times 10^{-19}$

15.5 ± 0.4	-300 ± 1	$(-3.2 \pm 0.7) \times 10^{-5}$	$(3.1 \pm 1.0) \times 10^{-19}$
13.5 ± 0.4	-300 ± 1	$(-3.7 \pm 0.7) \times 10^{-5}$	$(3.4 \pm 1.3) \times 10^{-19}$
1.5 ± 0.4	-300 ± 1	$(-3.3 \pm 1.1) \times 10^{-4}$	$(6.2 \pm 2.8) \times 10^{-19}$
1.6 ± 0.4	-300 ± 1	$(-3.1 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	$(5.8 \pm 2.9) \times 10^{-19}$
1.4 ± 0.4	-330 ± 1	$(-3.7 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	$(1.7 \pm 0.8) \times 10^{-18}$
1.3 ± 0.4	-330 ± 1	$(-3.8 \pm 1.3) \times 10^{-4}$	$(1.8 \pm 0.9) \times 10^{-18}$
2.1 ± 0.4	-331 ± 1	$(-2.4 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(8 \pm 4) \times 10^{-19}$
2.1 ± 0.4	-331 ± 1	$(-2.4 \pm 0.7) \times 10^{-4}$	$(8 \pm 4) \times 10^{-19}$
2.1 ± 0.4	-331 ± 1	$(-2.4 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(8 \pm 4) \times 10^{-19}$
6.0 ± 0.4	-331 ± 1	$(-8.3 \pm 1.7) \times 10^{-5}$	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-18}$
5.8 ± 0.4	-331 ± 1	$(-8.6 \pm 1.8) \times 10^{-5}$	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-18}$
5.7 ± 0.4	-331 ± 1	$(-8.8 \pm 1.9) \times 10^{-5}$	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-18}$
2.8 ± 0.4	-410 ± 1	$(-1.8 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	$(4.7 \pm 1.9) \times 10^{-19}$
2.9 ± 0.4	-411 ± 1	$(-1.7 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	$(5.2 \pm 2.2) \times 10^{-19}$
3.1 ± 0.4	-411 ± 1	$(-1.6 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	$(4.9 \pm 2.0) \times 10^{-19}$
3.0 ± 0.4	-411 ± 1	$(-1.7 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	$(5.1 \pm 2.2) \times 10^{-19}$
0.9 ± 0.4	-411 ± 1	$(-5.5 \pm 2.5) \times 10^{-4}$	$(9 \pm 5) \times 10^{-19}$
0.9 ± 0.4	-411 ± 1	$(-5.7 \pm 2.6) \times 10^{-4}$	$(9 \pm 6) \times 10^{-19}$
1.7 ± 0.4	-349 ± 1	$(-2.9 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	$(2.5 \pm 1.0) \times 10^{-18}$
2.0 ± 0.4	-349 ± 1	$(-2.5 \pm 0.7) \times 10^{-4}$	$(2.2 \pm 0.8) \times 10^{-18}$

Table 3: Misure di carica con velocità negative