

RELAZIONE DI LABORATORIO

ESPERIENZA DI MILLIKAN: MISURA DELLA CARICA
DELL'ELETTRONE

GRUPPO ME 5:

GENOVESI SONIA, MATRICOLA 944180
GEREMIA SILVIO FEDERICO, MATRICOLA 942504
GIORGI ALESSANDRO, MATRICOLA 942180

Data di consegna: 17 gennaio 2021



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Dipartimento di Fisica
Anno Accademico 2020-21

Indice

Formule matematiche adoperate	2
1 Introduzione	3
2 Cenni storici	3
3 Esperienza di Millikan	4
4 Dispositivo di Millikan e descrizione dell'esperienza	6
5 Analisi Dati	8
5.1 Valutazione delle incertezze	9
6 Conclusione	10

Formule matematiche adoperate

Media

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad (1)$$

Deviazione standard e dev. std. della media

$$\sigma \cong s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \cong \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

Propagazione errori

$$\Delta G = \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right| \Delta y + \dots \quad (4)$$

$$\sigma_G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 + 2 \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right) \sigma_{xy} + \dots} \quad (5)$$

Teorema del limite centrale

$$\bar{x} = \sum a_i \bar{x}_i \quad (6)$$

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sum a_i^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (7)$$

Raggio della goccia

$$r = \sqrt{\left(\frac{b}{2p} \right)^2 + \frac{9\eta v_0}{2g(\rho_0 - \rho_a)}} - \frac{b}{2p} \quad (8)$$

Carica della goccia

$$q = -\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a) \frac{g}{E} \left(1 + \frac{|v|}{v_0} \right) \quad (9)$$

1 Introduzione

L'esperienza è volta a misurare la velocità di sedimentazione di goccioline d'olio elettricamente cariche, prima in assenza e poi in presenza di un campo elettrico posto nella stessa direzione della forza peso, prima in un verso e poi nell'altro, per calcolarne il raggio, usato poi per determinare la carica elettrica posseduta da tali goccioline e quindi ricavare la carica dell'elettrone. Per fare ciò in laboratorio si utilizza il dispositivo e il metodo messo a punto in un primo momento da Thomson, e poi perfezionato da Millikan.

2 Cenni storici

Il celebre esperimento di J.J. Thomson fu possibile anche grazie a una serie di osservazioni sperimentali condotte dai suoi predecessori, come lo studio della scarica elettrica nei gas rarefatti, o la scoperta dei raggi catodici e la misura di tali raggi per scoprirne la loro natura. Thomson riuscì infine a misurare il rapporto massa-carica che caratterizzava queste particelle costituenti i raggi catodici, ottenendo un valore dell'ordine di $10^{-11} kg/C$. Dalle misure elettrolitiche si sapeva già che tale rapporto per l'idrogeno era invece dell'ordine di $10^{-8} kg/C$ e Thomson era convinto del fatto che la differenza in questi due rapporti fosse dovuta alla differenza tra la massa dell'idrogeno rispetto alla massa delle particelle catodiche, mentre la carica di tali particelle doveva essere uguale o almeno dello stesso ordine di grandezza della carica dello ione di idrogeno; si propose così di misurare il valore di tale carica. Iniziò determinando la carica degli ioni gassosi che si producevano durante l'elettrolisi e lo fece sulla base degli studi del fisico scozzese Wilson che in quello stesso periodo stava studiando la formazione della nebbia e come gli ioni agiscano come nuclei di condensazione formando una gocciolina d'acqua quando il vapore viene rarefatto. Per prima cosa fece condensare le goccioline d'acqua che si formavano attorno agli ioni e in questo modo misurò sia la loro massa totale, M_t , che la loro carica totale, Q_t , che, indirettamente, il valore della massa media delle goccioline, m_0 , considerando il fatto che il moto di goccioline sferiche in aria, trascurando la spinta archimedeana, si può descrivere come:

$$m_0 a = m_0 g - 6\pi\eta r v \quad (10)$$

dove r è il raggio della gocciolina e η il coefficiente di viscosità dell'aria. Dunque il valor medio della carica q_0 della singola gocciolina si può ricavare come:

$$q_0 = \frac{m_0 Q_t}{M_t} \quad (11)$$

Quando il moto della gocciolina si svolge in condizioni stazionarie, ovvero per $a = 0$ e con la velocità uguale alla velocità limite, $v = v_\infty$, chiamando δ la densità della gocciolina e misurando la sua velocità limite, si può ricavare il raggio della gocciolina e la sua massa con le seguenti espressioni:

$$r = \left(\frac{9\eta v_\infty}{2g\delta} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ e } m_0 = \frac{4\pi\delta}{3} \left(\frac{9\eta v_\infty}{2g\delta} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

Il fisico Twonsend nel 1897, con questo metodo, trovò un valore della carica media dello ione $q_0 = 1.0 \cdot 10^{-19} C$. Questo valore venne perfezionato da Wilson nel 1903 che nelle sue misure usò un nuovo dispositivo che sfruttava anche l'azione di un campo elettrico diretto come la forza peso, ottenendo come carica media $q_0 = (0.7 - 1.4) \cdot 10^{-19} C$.

Il merito di Millikan fu quello di misurare con precisione la carica presente sulla singola gocciolina invece di limitarsi a ottenere un valor medio dalla misura della carica di un elevato numero di goccioline, come i suoi predecessori.

3 Esperienza di Millikan

Millikan decise di usare, invece delle goccioline d'acqua condensate dagli ioni gassosi durante il processo di elettrolisi, delle goccioline microscopiche d'olio, prodotte da un normale spruzzatore, il quale riusciva a elettrizzare alcune delle goccioline uscenti per strofinio, le quali possono essere ulteriormente caricate in laboratorio usando una sorgente al torio. L'apparato originariamente usato da Millikan può essere schematizzato nel seguente modo.

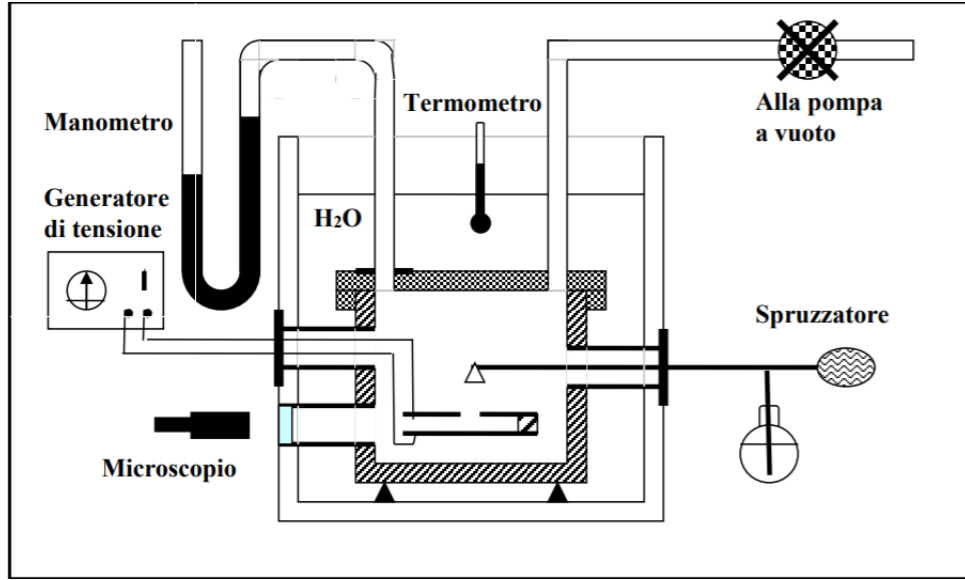


IMMAGINE 1

L'immagine schematizza l'apparato sperimentale originariamente usato da Millikan

Millikan per misurare la carica elettrica sulla gocciolina d'olio per prima cosa misurò la velocità di sedimentazione della gocciolina in assenza di campo elettrico, $\underline{E} = 0$. In condizioni di moto stazionario, se si chiama r il raggio della gocciolina, ρ_0 la densità della gocciolina d'olio, ρ_a la densità dell'aria, ν la viscosità dell'aria e v_0 la velocità limite della gocciolina in assenza di campo elettrico, il moto sarà descritto dalla seguente relazione:

$$\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)g - 6\pi\eta r v_0 = 0 \quad (13)$$

Successivamente misurò la velocità di sedimentazione della gocciolina, che in questo caso si indica con v , in presenza di un campo elettrico $\underline{E} = \pm E_0 \underline{k}$: il moto stazionario della gocciolina in questo caso si può descrivere con

$$\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)g - 6\pi\eta r v + qE = 0 \quad (14)$$

In queste due relazioni il segno meno davanti al termine, che indica la presenza dell'attrito viscoso dell'aria, è dovuto al fatto che l'attrito ovviamente si oppone sempre al moto e quindi ha segno opposto rispetto alla velocità della gocciolina. Posso ottenere quindi il valore della carica della gocciolina proprio mettendo a sistema la (13) con la (14):

$$q = -\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)\frac{g}{E}\left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad (15)$$

Se si fissa l'asse z come diretto verso il basso, quando sulla gocciolina prevalgono forze dirette verso il basso, ovvero quando

$$qE > 0 \text{ o } qE < 0 \text{ e } |qE| < \frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)g$$

allora in questo caso la velocità della gocciolina è positiva, $v > 0$, e diretta verso il basso e la (15) si può riscrivere esplicitando il segno di v come:

$$q = -\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)\frac{g}{E}\left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad (16)$$

In questo caso quindi il segno di q dipende dal verso del campo elettrico, ma anche dal segno del rapporto $\frac{v}{v_0}$. Quando invece sulla gocciolina prevalgono forze dirette verso l'alto, ovvero quando

$$qE < 0 \text{ e } |qE| > \frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)g$$

allora in questo caso la velocità della gocciolina è negativa, $v < 0$, e diretta verso l'alto, e la (15) si può riscrivere come:

$$q = -\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_0 - \rho_a)\frac{g}{E}\left(1 + \frac{|v|}{v_0}\right) \quad (17)$$

In questo caso invece il segno della carica q dipende unicamente dal verso del campo elettrico.

Poichè le quantità ρ_0, ρ_a, g, E sono facilmente misurabili, per ottenere la carica q presente su una gocciolina d'olio basta misurare: la velocità limite v_0 della gocciolina e, per minimizzare gli errori dovuti ad eventuali effetti dei moti convettivi dell'aria, è opportuno effettuare tale misura sia in assenza di campo elettrico, che in presenza di campo elettrico diretto prima verso l'alto e poi verso il basso, o viceversa; misurare il raggio r della gocciolina, ricavabile tramite la relazione (13), dopo aver determinato il coefficiente η . Infatti la viscosità effettiva dell'aria, oltre a dipendere dalle condizioni di temperatura t , espressa nella seguente relazione in gradi centigradi, e di pressione p dell'aria presente nella cameretta di misura, espressa in pascal, dipende anche dal raggio della gocciolina secondo la seguente relazione:

$$\eta_{eff} = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \text{ dove } b \text{ è una costante dell'aria} \quad (18)$$

Se metto a sistema la (13) con la (18), posso ricavare il raggio della gocciolina d'olio come:

$$r = \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_0}{2g(\rho_0 - \rho_a)}} - \frac{b}{2p} \quad (19)$$

Si riporta qui di seguito una tabella con i valori delle costanti, presenti in tutte le formule appena illustrate, usati nei calcoli.

Accelerazione di gravità a Milano	$g = 9.806 \text{ m/s}^2$
Densità dell'olio	$\rho_o = 860 \text{ kg/m}^3$
Densità dell'aria ($p = 1 \text{ atm}$)	$\rho_a = 1.293 \text{ kg/m}^3$
Pressione atmosferica	$1 \text{ Atm} = 101325 \text{ Pa}$
Costante per la correzione della viscosità	$b = 8.2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa m}$

4 Dispositivo di Millikan e descrizione dell'esperienza

Si riporta qui di seguito uno schema rappresentativo di tutte le componenti del dispositivo usato in laboratorio per condurre l'esperienza.

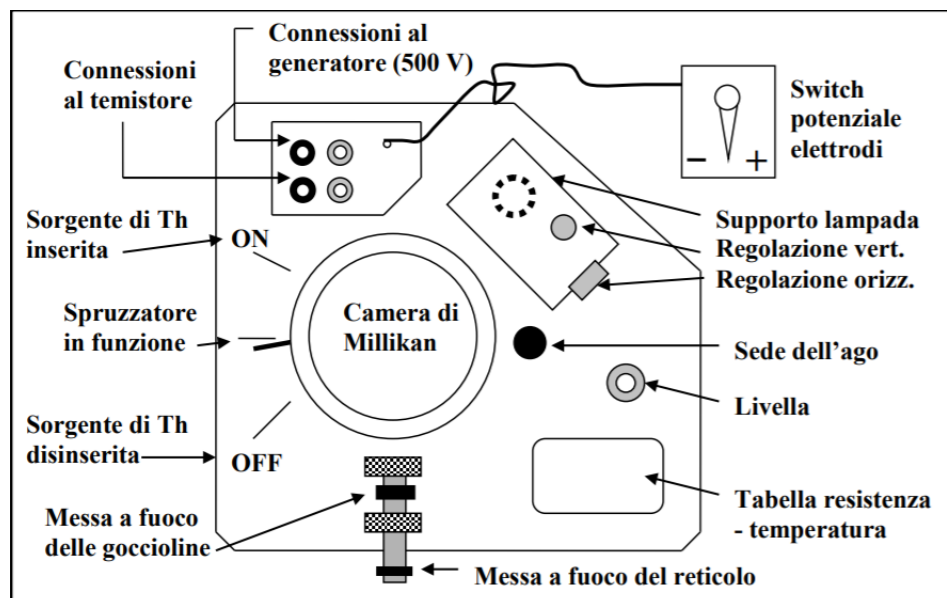


IMMAGINE 2

Schema del dispositivo di Millikan visto dall'alto

Di particolare importanza è la camera di Millikan che è costituita dalla sede della sorgente di Torio 232, alla quale viene sovrapposto un distanziatore isolante e trasparente, sopra di questo, poi, è appoggiato l'elettrodo superiore, al centro del quale viene messo un piccolo cappuccio forato. Sopra l'elettrodo è collocato un cilindro più alto che costituisce la parete laterale della camera, nella parte bassa della quale si trova una lente sferica e sopra cui viene posto un coperchio di chiusura, nel quale è praticato un foro per inserire il beccuccio dello spruzzatore d'olio.

In laboratorio per prima cosa si sono effettuate, tramite l'utilizzo di un micrometro, 5 misure dello spessore interno del distanziatore isolante, posto tra la sede della sorgente di Torio e l'elettrodo superiore, che sono state poi usate per determinare l'intensità del campo elettrico, come:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (20)$$

In seguito si è eseguita la messa in bolla del dispositivo ed è stato necessario effettuare delle piccole correzioni mediante le viti fissate alla base della piattaforma. Successivamente si è ricomposta la camera di Millikan: sopra la sede della sorgente di Torio, già fissata alla piattaforma, si è riposizionato il distanziale, seguito dall'elettrodo superiore e dalla parete laterale, sopra la quale si pone anche un piccolo peso per mantenerla in posizione. Posizionare la parete laterale è fondamentale in quanto è proprio essa ad avere la lente che serve a focalizzare la luce della lampada all'interno della camera.

A questo punto si estrae l'ago dalla sua sede, che si trova, come nell'immagine sopra, a destra della camera di Millikan, e lo si inserisce nel foro che si trova nell'elettrodo superiore, si accende la lampada alogena e con il microscopio si mette a fuoco il reticolo, in particolare la quadrettatura più grossa, di spessore $0,5mm$, che verrà usata nelle misure. È necessario anche mettere a fuoco l'ago, ovvero fare in modo che il suo lato destro presenti la massima brillantezza, regolando la posizione orizzontale, e se necessario anche quella verticale, della lampada e, per completare la procedura di messa a punto del dispositivo, si estrae l'ago e lo si ripone nella sua sede, rimettendo il cappuccio forato sopra l'elettrodo superiore, e infine si richiude la camera di Millikan con l'apposito coperchio.

In seguito i cavi del generatore di tensione sono stati connessi e con un tester abbiamo misurato la resistenza elettrica con $\Delta V = 300V$, in modo da determinare la temperatura dell'ambiente usando la seguente tabella di conversione tra resistenza in $M\Omega$ e $^{\circ}C$:

t (C)	R ($M\Omega$)	t (C)	R ($M\Omega$)	t (C)	R ($M\Omega$)	t (C)	R ($M\Omega$)	t (C)	R ($M\Omega$)	t (C)	R ($M\Omega$)
10	3.239	15	2.700	20	2.300	25	2.000	30	1.774	35	1.603
11	3.118	16	2.610	21	2.233	26	1.950	31	1.736	36	1.574
12	3.004	17	2.526	22	2.169	27	1.902	32	1.700	37	1.574
13	2.897	18	2.446	23	2.110	28	1.857	33	1.666	38	1.521

IMMAGINE 3

temperatura corrispondente alla resistenza elettrica del termistore misurata

Si è quindi verificato il funzionamento dello spruzzatore d'olio su un foglio di carta, si è posta la leva che si trova a sinistra della camera di Millikan nella posizione "Spruzzatore in funzione" e si è eseguito uno spruzzo all'interno della camera. Si è dunque controllato che fossero presenti diverse goccioline nel campo del reticolo e, per aumentare il numero di goccioline elettrizzate, si è attivata per una decina di secondi la sorgente di Torio.

Per prima cosa si è misurato periodicamente il tempo di caduta di alcune goccioline in assenza di campo elettrico: ogni volta che la gocciolina aveva percorso un tratto di reticolo pari a un quadretto grande, pari a una distanza di $0.5mm$, si è preso nota del tempo impiegato con un cronometro con sensibilità di $0.01s$. Successivamente si genera un campo elettrico e si misura la velocità di sedimentazione della gocciolina in presenza di quest'ultimo sia quando questo è concorde alla forza peso sia quando è inverso, grazie ad un commutatore che permette di cambiare la polarità degli elettroni.

Questa misura periodica del tempo di caduta consente di verificare se durante la sedimentazione la gocciolina ha mantenuto la quantità di carica che aveva inizialmente o se ha cambiato il suo stato di carica, in modo da poter scartare quelle misure relative all'intervallo di tempo nel quale si è prodotta la variazione dello stato di carica della gocciolina. Si sono effettuate più misure possibili (in genere 5) per ogni gocciolina in tutti e tre gli stati e ad ogni set è stato necessario eseguire un nuovo spruzzo d'olio in quanto le gocce

tendevano a sparire. Si è fatta poi variare periodicamente la tensione ed è stata controllata la temperatura, che si è mantenuta stabile a $24^{\circ}C$.

5 Analisi Dati

Si riportano in fondo alla relazione le 5 misure di d ottenute con il micrometro da cui si estrapola il valor medio con (1), pari a $7,08mm$, e si calcola la deviazione standard del campione con (2): quest'ultimo valore pari a $0,004mm$ risulta un decimo della sensibilità dello strumento, uguale a $0.01mm$, e perciò sarà trascurato in seguito.

Da ogni misura del tempo t che le gocce hanno impiegato per percorrere una distanza di $0,5mm$, si ricava prima la velocità della goccia con

$$v_0 = \frac{x}{t} = \frac{0,5mm}{t} \quad (21)$$

da cui poi si ricava il raggio della goccia con (8). Si genera poi il campo elettrico e si ricava con la stessa formula la velocità v_1 con E rivolto verso il basso e v_2 con E dalla parte opposta, con le quali si rilevano due stime di carica Q con la (9). Come riportato in fondo alla relazione, sono stati rilevati 8 set di misurazione, e quindi sono stati effettuati 8 spruzzi d'olio, per un totale di 84 valori di carica Q , da cui poi ne sono stati considerati validi solamente un numero $N = 36$: infatti, come meglio spiegato nelle descrizioni alle tabelle, spesso si sono verificati comportamenti anomali delle cariche dovuti ad errori di misurazione del tempo oppure a variazioni di velocità non causati da una perdita di carica della goccia.

Le misure di Q raccolte sono quindi dei multipli interi della carica elementare e si può quindi costruire una funzione di scarto tra il valore vero di q e il valore da noi ricavato come rapporto tra Q_i e l'intero più vicino al rapporto $k_i = \frac{Q_i}{q_e}$

$$S(q) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i}{k_i} - q_e \right)^2 \quad (22)$$

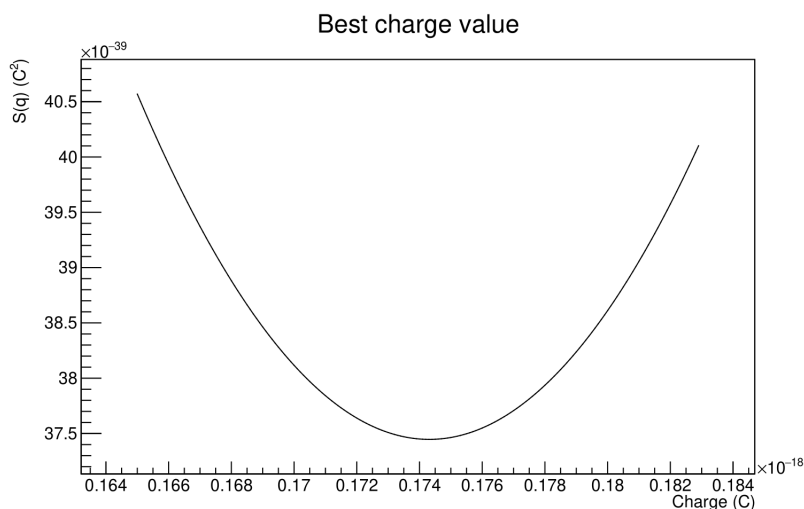


IMMAGINE 4

Rappresentazione della funzione scarto definita in (22)

Il valore più probabile di carica elementare misurato in laboratorio sarà quindi il minimo della funzione (22), che, mediante lo studio della derivata, si ricava con

$$q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{k_i} \quad (23)$$

e con i dati a disposizione si ottiene un valore di $q = 1,74 \cdot 10^{-19}$.

5.1 Valutazione delle incertezze

Il valore di q ricavato con questo procedimento è affetto da un errore casuale, dovuto a fluttuazioni statistiche e alla sensibilità del cronometro, e da un errore sistematico dovuto invece alla precisione degli strumenti utilizzati. Il primo tipo di incertezza si può valutare dalla deviazione standard della media sugli scarti tra q e i valori delle cariche Q_i e si ottiene quindi

$$\sigma_{cas} = \sqrt{\frac{S(q)}{N(N-1)}} \quad (24)$$

Le incertezze sistematiche sono date invece dalle precisioni degli strumenti utilizzati per la misura della distanza d tra gli elettrodi ($\sigma_d = 10^{-5}mm$) e per la misura del potenziale ($\sigma_V = 1V$), mentre si considerano esatte le costanti utilizzate e riassunte in una tabella superiore. Si procede quindi applicando la propagazione degli errori (5) alla sola formula (9) derivando rispetto a d e a V , così da ottenere:

$$\sigma_V^{sist} = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_{olio} - \rho_{aria})\frac{gd}{V^2} \left| 1 - \frac{v_E}{v_0} \right| \sigma_V \quad (25)$$

$$\sigma_d^{sist} = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_{olio} - \rho_{aria})\frac{g}{V} \left| 1 - \frac{v_E}{v_0} \right| \sigma_d \quad (26)$$

$$\sigma_{sist} = \sqrt{(\sigma_d^{sist})^2 + (\sigma_V^{sist})^2} \quad (27)$$

Si è deciso di scegliere come valore di r la media aritmetica (1) dei raggi, che sono soggetti solo ad errore casuale, per i valori delle velocità si è calcolato prima il valore del rapporto $\frac{v_E}{v_0}$ per ogni misura presa e poi si esegue la media (1) con queste. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

	[C]
σ_V^{sist}	$1,05 \cdot 10^{-21}$
σ_d^{sist}	$4,02 \cdot 10^{-22}$
σ_{sist}	$1,12 \cdot 10^{-21}$
σ_{cas}	$6,14 \cdot 10^{-21}$

L'errore totale si può quindi calcolare con

$$\sigma_q = \sqrt{\sigma_{sist}^2 + \sigma_{cas}^2} \quad (28)$$

e si ottiene così

	[C]
q	$1,74 \cdot 10^{-19}$
σ_q	$6,24 \cdot 10^{-21}$

Con il risultato ottenuto si può effettuare un test di compatibilità con il valore universalmente accettato $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ con una distribuzione gaussiana, in quanto si dispone di un buon numero di misure, con la z

$$z = \frac{q - q_e}{\sigma_q} = 2,25 \quad (29)$$

che restituisce quindi una compatibilità di circa 2%.

6 Conclusione

La misura della carica elementare ricavata non risulta essere compatibile con quella universalmente riconosciuta: il risultato del confronto tra una distribuzione gaussiana e i risultati ottenuti restituisce un valore inferiore al 5%, soglia di compatibilità usata comunemente. Il risultato, infatti, risulta essere superiore a q_e di circa il 10% e non si pensa che la causa possa essere una sottostima dell'errore, in quanto questo è circa il 4% della misura della carica e introdurre altri fattori di errori, per esempio sulle costanti, risulta essere eccessivo. Si crede perciò che il problema sia un numero non sufficiente di dati, che rende il valore di sintesi ricavato discosto da quello reale, come testimoniato da un errore casuale molto elevato, 6 volte maggiore rispetto a quello sistematico, e dalla scelta di scartare più della metà delle misure effettuate a causa di anomalie nei valori di carica da essa ricavata. Sarebbe quindi necessario ripetere la stessa esperienza con più misurazioni per ottenere il valore della carica dell'elettrone.

Tabelle dati

$$\frac{d[mm]}{7,08}$$

$$7,09$$

$$7,08$$

$$7,08$$

$$7,08$$

Misure effettuate della distanza d con il micrometro

$V[V]$	0		$ V [V]$	300			$ E [V/m]$	42373
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
12,61	$3,97E-5$	$5,84E-7$	3,44	$1,45E-4$	$4,41E-19$	4,42	$1,13E-4$	$6,37E-19$
27,16	$34,4E-6$	$540,7E-9$	6,99	$1,41E-4$	$4,08E-19$	9,81	$9,28E-5$	$4,87E-19$
39,32	$41,1E-6$	$595,0E-9$	11,16	$1,20E-4$	$3,36E-19$	14,58	$1,05E-4$	$6,22E-19$
52,35	$38,4E-6$	$573,5E-9$	15,31	$1,20E-4$	$3,36E-19$	19,96	$9,29E-5$	$5,37E-19$
65,62	$37,7E-6$	$567,9E-9$	19,54	$1,18E-4$	$3,26E-19$	26,2	$8,01E-5$	$4,77E-19$

Primo set di dati misurato e scartato in quanto la carica, soprattutto con campo discorde, avrebbe un comportamento anomalo, prima decrescendo e poi aumentando

$V[V]$	0		$ V [V]$	300			$ E [V/m]$	42373
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
22,34	$2,24E-5$	$4,29E-7$	2,84	$1,76E-4$	$4,52E-19$	2,51	$1,99E-4$	$6,51E-19$
47,93	$1,95E-5$	$3,99E-7$	5,34	$2,00E-4$	$4,87E-19$	6,14	$1,38E-4$	$4,24E-19$
75,84	$1,79E-5$	$3,80E-7$	7,92	$1,94E-4$	$4,49E-19$	9,62	$1,44E-4$	$4,12E-19$
98,52	$2,20E-5$	$4,26E-7$	10,88	$1,69E-4$	$4,28E-19$	13,08	$1,45E-4$	$4,85E-19$
123,59	$1,99E-5$	$4,03E-7$	13,58	$1,85E-4$	$4,51E-19$	17,07	$1,25E-4$	$3,97E-19$

Secondo set di dati misurato

$V[V]$	0		$ V [V]$	250			$ E [V/m]$	35311
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
31,06	$1,61E-5$	$3,58E-7$	3,26	$1,53E-4$	$3,27E-19$	3,52	$1,42E-4$	$3,76E-19$
63,16	$1,56E-5$	$3,52E-7$	6,95	$1,36E-4$	$2,79E-19$	7,06	$1,41E-4$	$3,65E-19$
95,02	$1,57E-5$	$3,53E-7$	10,11	$1,58E-4$	$3,34E-19$	10,74	$1,36E-4$	$3,55E-19$
131,34	$1,38E-5$	$3,29E-7$	13,02	$1,72E-4$	$3,39E-19$	14,5	$1,33E-4$	$3,15E-19$
165,57	$1,46E-5$	$3,40E-7$	16,38	$1,49E-4$	$3,00E-19$	18,38	$1,29E-4$	$3,20E-19$

Terzo set di dati misurato

$V[V]$	0		$ V [V]$	270			$ E [V/m]$	38136
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
59,3	$8,43E-6$	$2,50E-7$	6,32	$7,91E-5$	$1,08E-19$	6,4	$7,81E-5$	$1,33E-19$
110,89	$9,69E-6$	$2,70E-7$	11,59	$9,49E-5$	$1,44E-19$	13,13	$7,43E-5$	$1,42E-19$
167,42	$8,84E-6$	$2,56E-7$	17,58	$8,35E-5$	$1,18E-19$	22,03	$5,62E-5$	$1,03E-19$
223,82	$8,87E-6$	$2,57E-7$	22,8	$9,58E-5$	$1,38E-19$	28,72	$7,47E-5$	$1,33E-19$
278,3	$9,18E-6$	$2,62E-7$	28,71	$8,46E-5$	$1,23E-19$	35,5	$7,37E-5$	$1,35E-19$

Quarto set di dati misurato, ma scartato in quanto Q è inferiore alla carica elementare

$V[V]$	0		$ V [V]$	290			$ E [V/m]$	40960
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
45,15	$1,11E-5$	$2,91E-7$	3,23	$1,55E-4$	$2,67E-19$	4,46	$1,12E-4$	$2,28E-19$
84,45	$1,27E-5$	$3,15E-7$	6,63	$1,47E-4$	$2,74E-19$	8,13	$1,36E-4$	$3,03E-19$
118,29	$1,48E-5$	$3,42E-7$	9,79	$1,58E-4$	$3,23E-19$	12,23	$1,22E-4$	$3,08E-19$
165,42	$1,06E-5$	$2,84E-7$	13,39	$1,39E-4$	$2,31E-19$	16,23	$1,25E-4$	$2,44E-19$
206,37	$1,22E-5$	$3,07E-7$	16,27	$1,74E-4$	$3,20E-19$	20,13	$1,28E-4$	$2,78E-19$

Quinto set di dati misurato, ma scartato in quanto la misura del raggio e di conseguenza le cariche tendono a fluttuare molto

$V[V]$	0		$ V [V]$	300			$ E [V/m]$	42373
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
60,32	$8,29E-6$	$2,47E-7$	1,8	$2,78E-4$	$4,08E-19$	1,69	$2,96E-4$	$4,61E-19$
126,92	$7,51E-6$	$2,34E-7$	3,83	$2,46E-4$	$3,37E-19$	3,6	$2,62E-4$	$3,80E-19$
190,86	$7,82E-6$	$2,39E-7$	5,65	$2,75E-4$	$3,88E-19$	5,78	$2,29E-4$	$3,45E-19$
241,59	$9,86E-6$	$2,73E-7$	7,32	$2,99E-4$	$4,96E-19$	7,81	$2,46E-4$	$4,38E-19$
294,32	$9,48E-6$	$2,67E-7$	9,27	$2,56E-4$	$4,11E-19$	10,11	$2,17E-4$	$3,78E-19$

Sesto set di dati misurato e scartato perchè la carica aumenta in modo anomalo

$V[V]$	0		$ V [V]$	250			$ E [V/m]$	35311
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
24, 21	$2,07E-5$	$4,11E-7$	2,96	$1,69E-4$	$4,14E-19$	7,65	$6,54E-5$	$2,40E-19$
50, 34	$1,91E-5$	$3,94E-7$	6,24	$1,52E-4$	$3,55E-19$	15,74	$6,18E-5$	$2,15E-19$
77, 74	$1,82E-5$	$3,84E-7$	9,5	$1,53E-4$	$3,49E-19$	22,78	$7,10E-5$	$2,30E-19$
102, 74	$2,00E-5$	$4,04E-7$	12,87	$1,48E-4$	$3,51E-19$	31,66	$5,63E-5$	$2,09E-19$
124, 18	$2,33E-5$	$4,39E-7$	16,52	$1,37E-4$	$3,43E-19$	39,86	$6,10E-5$	$2,54E-19$
146, 73	$2,22E-5$	$4,27E-7$	20,22	$1,35E-4$	$3,30E-19$	48,27	$5,95E-5$	$2,39E-19$

Settimo set di dati misurato, ma di cui viene scartata la prima riga in quanto è stata misurata in condizioni di poca visibilità poichè si è tentato di fare sei misure per set

$V[V]$	0		$ V [V]$	260			$ E [V/m]$	36723
$t[s]$	$v_0[m/s]$	$r[m]$	$t[s]$	$v_1[m/s]$	$Q[C]$	$t[s]$	$v_2[m/s]$	$Q[C]$
41,96	$1,19E-5$	$3,03E-7$	1,96	$2,55E-4$	$4,74E-19$	4,76	$1,05E-4$	$2,28E-19$
81,32	$1,27E-5$	$3,14E-7$	4,11	$2,33E-4$	$4,47E-19$	9,52	$1,05E-4$	$2,40E-19$
127,91	$1,07E-5$	$2,86E-7$	5,95	$2,72E-4$	$4,74E-19$	13,7	$1,20E-4$	$2,37E-19$
176,07	$1,04E-5$	$2,81E-7$	7,95	$2,50E-4$	$4,25E-19$	18,34	$1,08E-4$	$2,10E-19$
217,13	$1,22E-5$	$3,07E-7$	9,48	$3,27E-4$	$6,22E-19$	22,54	$1,19E-4$	$2,60E-19$
255,14	$1,32E-5$	$3,20E-7$	11	$3,29E-4$	$6,58E-19$	26,86	$1,16E-4$	$2,68E-19$

Ottavo set di dati misurato, di cui vengono scartate le misure con E verso il basso poichè la carica aumenta di 2e