

Esperimento di Millikan

CONFERMA DEL VALORE DELLA CARICA ELEMENTARE SULLA BASE DELL'ESPERIMENTO DI MILLIKAN ESEGUITO SU GOCCIOLINE D'OLIO CARICHE ELETTRICAMENTE

- Formazione delle goccioline d'olio cariche elettricamente, selezione di quelle idonee
- Misurazione della velocità di salita all'interno del campo elettrico e della velocità di discesa in assenza di campo elettrico
- Conferma del valore della carica elementare

UE5010400

08/16 UD



Fig. 1: Apparecchio di Millikan

BASI GENERALI

Fra il 1910 e il 1913 *Robert Andrews Millikan* riuscì a determinare la carica elementare con una precisione sconosciuta fino a quel momento e, di conseguenza, a confermare la quantizzazione della carica elettrica. Per questi studi vinse il premio Nobel per la fisica. L'esperimento che porta il suo nome si basa sulla misurazione della quantità

di carica di goccioline d'olio cariche elettricamente che, se sottoposte al campo elettrico di un condensatore a facce piane parallele, salgono in aria, mentre in assenza di campo elettrico scendono. Il valore determinato da Millikan $e = (1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19}$ C si discosta solamente dello 0,6% dal valore stabilito al giorno d'oggi.

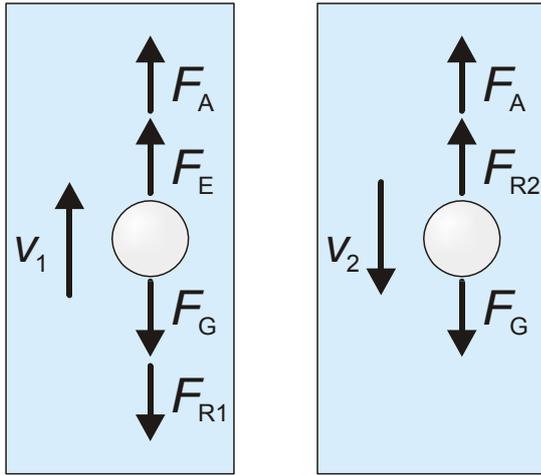


Fig. 2: Rappresentazione schematica dell'equilibrio fra le forze durante la fase di salita di una gocciolina d'olio all'interno di un campo elettrico (sinistra) e durante la discesa in assenza di campo elettrico (destra).

Le forze agenti su una gocciolina d'olio, la cui forma presunta è sferica e che galleggia in aria all'interno di un campo elettrico generato da un condensatore a facce piane parallele, sono la forza peso,

$$(1) F_G = m_2 \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_2 \cdot g,$$

m_2 : massa della gocciolina d'olio, r_0 : raggio della gocciolina d'olio, ρ_2 : densità dell'olio, g : accelerazione di caduta

la spinta di Archimede in aria,

$$(2) F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_1 \cdot g,$$

ρ_1 : densità dell'aria

la forza dovuta al campo elettrico E ,

$$(3) F_E = q_0 \cdot E = \frac{q_0 \cdot U}{d},$$

q_0 : carica della gocciolina d'olio, U : tensione presente fra le piastre del condensatore, d : distanza fra le piastre del condensatore

e la forza di attrito viscoso di Stokes

$$(4) F_{R1,2} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_0 \cdot v_{1,2}.$$

η : viscosità dell'aria, v_1 : velocità di salita, v_2 : velocità di discesa

Quando viene applicato un campo elettrico e la gocciolina d'olio sale, vale l'equilibrio fra le forze (fig. 2)

$$(5) F_G + F_{R1} = F_E + F_A$$

, mentre in assenza di campo elettrico la gocciolina scende e si ha

$$(6) F_G = F_{R2} + F_A.$$

È quindi possibile determinare il raggio e la carica della gocciolina d'olio:

$$(7) r_0 = \sqrt{\frac{9}{2} \cdot \frac{\eta \cdot v_2}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}}$$

e

$$(8) q_0 = \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot (v_1 + v_2)}{U} \cdot r_0.$$

Il raggio r_0 è dell'ordine di grandezza del cammino libero medio delle molecole d'aria e pertanto occorre correggere la forza di attrito viscoso di Stokes. Per il raggio corretto r e la carica corretta q si utilizzano le relazioni:

$$(9) r = \sqrt{r_0^2 + \frac{A^2}{4}} - \frac{A}{2} \text{ con } A = \frac{b}{p}$$

$b = 82 \mu\text{m} \cdot \text{hPa} = \text{costante}$, p : pressione atmosferica

$$(10) q = q_0 \cdot \left(1 + \frac{A}{r}\right)^{-1.5}.$$

ELENCO DEGLI STRUMENTI

- 1 Apparecchio di Millikan@230V 1018884 (U207001-230)
- 0
- 1 Apparecchio di Millikan@115V 1018882 (U207001-115)

MESSA IN FUNZIONE

- Collocare l'apparecchio di Millikan su una postazione per esperimenti.
- Ruotare il regolatore verticale in senso orario fino alla battuta (v. Fig. 3).
- Portare il microscopio di misura fino alla battuta sull'asta di supporto dell'apparecchio base e fissarlo sul lato inferiore con una vite a testa zigrinata.
- Portare il microscopio di misura tutto in avanti utilizzando la ghiera di messa a fuoco e, con l'ausilio del regolatore verticale, allinearne in modo approssimativo con la finestra di osservazione della camera sperimentale.
- Aprire il coperchio della camera, appoggiare la livella sulla piastra superiore del condensatore e perfezionare l'allineamento orizzontale agendo sui piedi regolabili

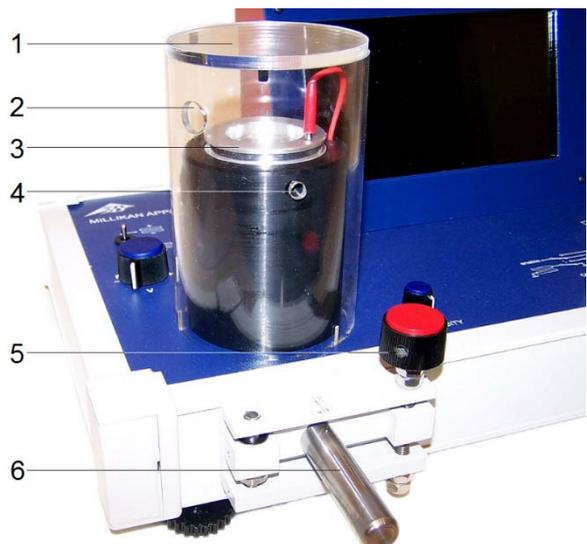


Fig. 3 Camera sperimentale: 1 Coperchio, 2 Alloggiamento per polverizzatore d'olio, 3 Piastra superiore del condensatore, 4 Finestra di osservazione, 5 Regolatore verticale per testata microscopio, 6 Asta di supporto per testata microscopio

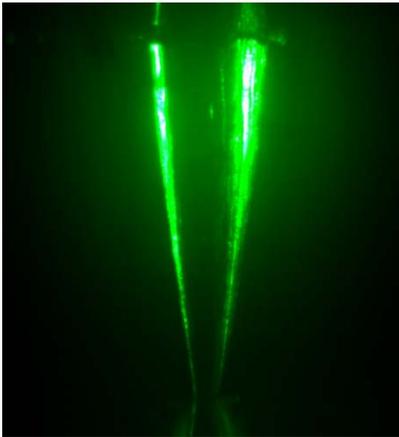


Fig.4 Osservazione attraverso la testata del microscopio sull'ago di regolazione messo a fuoco

- Inserire l'ago di regolazione nella piastra superiore del condensatore e mettere a fuoco il microscopio sull'ago (v. Fig. 4). Selezionare l'intensità luminosa adeguata e impostare l'altezza del microscopio di misura mediante il regolatore verticale.
- Rimuovere l'ago di regolazione e richiudere la camera sperimentale.
- Riempire circa per metà il polverizzatore con olio di Millikan e inserire con cautela nell'apposito alloggiamento previsto nella camera sperimentale.

ESECUZIONE

Avvio dell'unità di visualizzazione e comando

- Collegare l'apparecchio di Millikan alla rete per mezzo dell'alimentatore a spina.

Una volta effettuato il collegamento alla rete, l'unità di visualizzazione e comando è subito pronta all'uso.

- Fare clic sul pulsante "Selezione" per accedere al menu di selezione della lingua.
- Selezionare la lingua desiderata e confermare con il pulsante "Invio". Il sistema ritorna automaticamente al menu principale.
- Nel menu principale fare clic sul pulsante "Avanti" per entrare nel menu di misurazione.

Ottimizzazione dell'intensità luminosa

- Guardare nella cella di misura (lo spazio compreso tra le piastre del condensatore) attraverso il microscopio e impostare un'adeguata intensità luminosa. Se necessario, aggiustare l'intensità luminosa durante la misurazione.

Generazione, selezione e osservazione di goccioline d'olio elettricamente cariche

- Premendo una volta, rapidamente e con forza, la pompetta di gomma si generano goccioline d'olio elettricamente cariche. Spruzzarle nella cella di misura.

Nota:

Successivamente la carica, generatasi casualmente, delle goccioline d'olio così formatesi non subisce più alcun influente esterno. L'apparecchio di Millikan non utilizza una sorgente di radiazioni radioattive. Come nell'apparecchio di Millikan, le goccioline d'olio vengono inserite nella camera sperimentale dall'alto e in particolare nella cella di misura.

- Attendere fino a quando, all'interno della cella di misura, non compaiono goccioline d'olio adatte. L'attesa può durare alcuni secondi.
- Tra le goccioline d'olio visibili, sceglierne una che cada lentamente (all'incirca 0,025 – 0,1 mm/s).
- Aggiustare all'occorrenza la messa a fuoco del microscopio.

Indicazioni generali:

Lo scopo consiste nel generare un piccolo numero di goccioline singole e non una nuvola grande e chiara dove selezionarne una. Se la pompetta in gomma viene premuta più volte, arrivano troppe goccioline nella cella di misura, in particolare nella zona davanti al fuoco del microscopio, impedendo l'osservazione delle goccioline d'olio che vi si trovano.

Una gocciolina d'olio adatta appare come punto luminoso chiaro nel fuoco del microscopio di misura.

Se nella cella di misura viene ad accumularsi troppo olio, occorre pulirla. Se, anche dopo aver ripetutamente premuto la pompetta di gomma, non vi sono goccioline d'olio nella cella di misura, l'apertura nella piastra superiore del condensatore potrebbe essere occlusa e necessitare pertanto una pulizia.

Misurazione in base al metodo di salita

- Selezionare la polarità della tensione U , ad es. piastra superiore "+", piastra inferiore "-".
- Azzerare i tempi t_1 e t_2 eventualmente memorizzati premendo "Reset".
- Generare, osservare e selezionare una gocciolina d'olio idonea, come descritto sopra.
- Portare l'interruttore U su ON. Impostare una tensione U , in modo tale che la gocciolina d'olio fuoriesca lentamente verso l'alto, superando una prima posizione preselezionata sulla scala nella parte superiore della cella di misura.
- Posizionare l'interruttore U su OFF, per far riscendere la gocciolina d'olio.
- Posizionare l'interruttore t su ON, non appena la gocciolina d'olio ha raggiunto di nuovo la prima posizione. In questo modo si avvia la misurazione del tempo t_2 .
- Posizionare l'interruttore U su ON, non appena la gocciolina d'olio ha raggiunto una seconda posizione preselezionata sulla scala nella parte inferiore della cella di misura. In questo modo si fa risalire la gocciolina d'olio. La misurazione del tempo t_2 si arresta e parte automaticamente la misurazione del tempo t_1 .
- Posizionare l'interruttore t su OFF, non appena la gocciolina d'olio ha raggiunto di nuovo la prima posizione. In questo modo si arresta la misurazione del tempo t_1 .
- Posizionare l'interruttore U su OFF.
- Leggere sul display i tempi t_1 e t_2 e la tensione U ("Previous Voltage") e annotare i valori rilevati insieme alla distanza della posizione della scala.
- Ripetere con la maggior frequenza possibile la misurazione per diverse goccioline

Tab. 1: Cariche q_i determinate a partire dai valori misurati di dieci diverse goccioline d'olio e valori ϵ_i ricavati per la carica elementare.

i	t_{1i} s	t_{2i} s	U_i V	Polarität	r_i μm	q_i 10^{-19} C	Δq_i 10^{-19} C	n_i	ϵ_i 10^{-19} C	$\Delta \epsilon_i$ 10^{-19} C
1	12,426	13,780	107,0		0,81	-11,1	0,9	-7	1,59	0,13
2	14,414	17,433	109,4		0,71	-7,9	0,6	-5	1,58	0,12
3	13,604	9,053	292,6		1,00	-6,2	0,4	-4	1,55	0,10
4	13,641	23,631	190,9		0,61	3,5	0,2	2	1,75	0,10
5	10,502	14,858	246,1		0,78	4,9	0,3	3	1,63	0,10
6	14,203	21,674	110,9		0,64	6,3	0,5	4	1,58	0,13
7	9,814	10,228	279,4		0,94	6,6	0,4	4	1,65	0,10
8	13,813	16,824	120,4		0,73	7,6	0,6	5	1,52	0,12
9	9,936	16,380	112,1		0,74	10,2	0,8	6	1,70	0,13
10	13,184	12,214	124,5		0,86	10,6	0,8	7	1,51	0,11

ESEMPIO DI MISURAZIONE E ANALISI

Parametri rilevanti ai fini dell'analisi

Distanza d delle piastre del condensatore:	3 mm
Spazio s (tra il contrassegno superiore 6 e il contrassegno inferiore 4 sulla scala oculare):	1 mm
Viscosità dell'aria η	$1,876 \cdot 10^{-5}$ kg/(m·s)
Densità dell'aria ρ_1 (25°C, 1013 hPa)	1,184 kg/m ³
Densità dell'olio ρ_2 (25°C)	871 kg/m ³
Accelerazione di caduta g	9,81 m/s ²
Pressione atmosferica p	1014 hPa
Parametro correttivo b	82 $\mu\text{m} \cdot \text{hPa}$
Parametro correttivo A	$8,1 \cdot 10^{-8}$ m

Nota:

La viscosità e la pressione atmosferica sono rimaste costanti per tutta la durata della misurazione. Qualora tale condizione non fosse garantita, ad es. nel caso di misurazioni eseguite in giorni diversi, occorre tenere conto dei valori per ogni singola misurazione.

Precisione di misura

Distanza delle piastre del condensatore, Δd :	0,1 mm
Spazio, Δs	50 μm
Tempo (al quarzo), Δt	1 μs
Tensione, ΔU (0,5% del valore massimo 1000 V \pm 5 digit)	5,5 V

La precisione dei parametri materiali, ambientali e correttivi non è significativa e può pertanto essere tralasciata.

L'importanza maggiore è da attribuire alla precisione relativa alla distanza delle piastre del condensatore, Δd , e allo spazio tra i contrassegni scelti sulla scala oculare, Δs .

Determinazione delle velocità e della carica

- Partendo dai tempi di salita e discesa t_1 e t_2 misurati si determina la velocità di salita e discesa

$$(11) v_{1,2} = \frac{s}{V \cdot t_{1,2}},$$

s : spazio tra due contrassegni selezionati sulla scala oculare, $V = 2$: ingrandimento dell'obiettivo

e dall'equazione (10) la carica q della gocciolina d'olio (Tab. 1).

Tab. 2: Determinazione del numero intero più piccolo risultante come prodotto del rapporto di carica $q_j/q_k = 1,4$ e del numero intero prestabilito n_k .

n_k	$1,4 \cdot n_k$
1	1,4
2	2,8
3	4,2
4	5,6
5	7,0
6	8,4
7	9,8
8	11,2
9	12,6
10	14,0

Determinazione di n

Se esiste una carica elementare e , per le cariche misurate q_j e q_k ($j, k = 1, 2, 3, \dots, 10$) di due goccioline d'olio deve valere:

$$(12) \quad q_j = n_j \cdot e \quad \text{e} \quad q_k = n_k \cdot e \quad \text{con} \quad n_j, n_k \in \mathbb{Z}$$

Di conseguenza:

$$(13) \quad \frac{q_j}{q_k} = \frac{n_j}{n_k} \Leftrightarrow n_j = \frac{q_j}{q_k} \cdot n_k$$

I numeri interi n_j e n_k possono essere determinati come segue, fatta salva la generalità $|q_j| > |q_k|$:

- Partendo dalle cariche misurate (Tab. 1) formare a due a due i rapporti q_j/q_k con $|q_j| > |q_k|$.
- Selezionare un set di coppie di carica diverse con i medesimi (nei limiti della precisione di misurazione) rapporti di carica.

Le coppie di carica (q_1, q_2) , (q_4, q_5) e (q_8, q_{10}) , il cui rapporto di carica risulta rispettivamente $\approx 1,4$, formano ad es. un tale set, che sarà considerato qui di seguito.

- Assegnare numeri interi $n_k = 1, 2, 3, \dots$ e successivamente calcolare $1,4 \cdot n_k$ (Tab. 2). Dai valori calcolati, identificare il valore che corrisponde al numero intero *più piccolo* o che più si avvicina al numero intero *più piccolo*. A tale valore si assegna n_j .

Dalla Tab. 2 risulta come numero intero più piccolo $n_j = 7$, se $n_k = 5$. Poiché l'ammontare delle cariche q_1 e q_{10} nonché q_2 e q_8 nei limiti degli errori di misurazione coincidono, e l'ammontare delle cariche q_4 e q_5 sono inferiori di un fattore $\approx 2,3$, alla coppia di carica (q_1, q_2) viene assegnata la coppia di valori $(n_1, n_2) = (-7, -5)$ e alla coppia di carica (q_8, q_{10}) la coppia di valori $(n_8, n_{10}) = (5, 7)$.

Alla coppia di carica (q_4, q_5) , poiché $7 / 2,3 = 3,0$ e $5 / 2,3 = 2,2$ viene assegnata la coppia di valori $(n_4, n_5) = (2, 3)$.

- Determinare i valori di n_i per le restanti cariche in base all'equazione (13) partendo dai rapporti relativi a una carica con n_i rilevato. Registrare tutti i valori per n_i in Tab. 1.

Esempio per la determinazione di n_6 da n_1 : $q_1 / q_6 = -1,8$ e $n_1 / -1,8 = 3,9$ di modo che a n_6 viene assegnato il valore 4.

In alternativa, le cariche q_i (Tab. 1) determinate dalle misurazioni vengono divise per numeri interi n_i in modo tale che i valori risultanti abbiano l'indice di dispersione minore possibile rispetto al valore medio (non ponderato). Come grandezza per l'indice di dispersione vale la deviazione standard.

Determinazione di e

- Dividere le cariche q_i e i relativi errori di misurazione Δq_i rispettivamente per n_i e determinare così i valori e_i e Δe_i per la carica elementare e i relativi errori di misurazione per le singole misurazioni (Tab. 1)
- Determinare il migliore valore stimato e per la carica elementare e l'errore standard Δe partendo dai valori e_i delle singole misurazioni e dai rispettivi errori di misurazione Δe_i mediante il calcolo della media ponderata:

$$(14) \quad e \pm \Delta e = \frac{\sum w_i \cdot e_i}{\sum w_i} \pm \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \quad \text{con} \quad w_i = \left(\frac{1}{\Delta e_i} \right)^2$$

Con i valori dalla Tab. 1 si ricava:

$$(15) \quad e \pm \Delta e = \left(\frac{1286}{799} \pm \frac{1}{28} \right) \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ = (1,61 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Il risultato è tanto più attendibile quanti più valori vengono misurati. Migliori risultati si ottengono per piccoli valori del numero di cariche n per ogni gocciolina d'olio. A causa delle imprecisioni in particolare in relazione alla distanza delle piastre del condensatore e della lettura sulla scala del microscopio n dovrebbe essere ≤ 7 .