

# La prima misura della carica dell'elettrone: le ricerche di J. J. Thomson e di R. Millikan a confronto

Matteo Leone<sup>1</sup> , Francesca Monti<sup>2</sup>  and Nadia Robotti<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Università di Torino, Dipartimento di Filosofia e Scienze dell'Educazione, Torino & Centro Ricerche Enrico Fermi, Roma, [matteo.leone@unito.it](mailto:matteo.leone@unito.it).

<sup>2</sup>Università di Verona, Dipartimento di Informatica, Verona & Centro Ricerche Enrico Fermi, Roma, [francesca.monti@univr.it](mailto:francesca.monti@univr.it).

<sup>3</sup>Università di Genova, Dipartimento di Fisica, Genova & Centro Ricerche Enrico Fermi, Roma, [nadia.robotti@gmail.com](mailto:nadia.robotti@gmail.com).

*Abstract:* In this study we analyse the status, meaning and implications, also at the educational level, of J. J. Thomson's and R. Millikan's respective research concerning the discovery of the electron and the measurement of its electric charge. In this regard, two experiments are usually addressed in secondary school and university textbooks as well as in many websites and Encyclopaedic entries: the measurement of the  $e/m$  ratio in the case of cathode rays in 1897 by the English physicist Sir J. J. Thomson, labelled as the "discovery of the electron" experiment, and the oil-drop experiment in 1911 by the American physicist R. Millikan, labelled as the "measurement of the electron charge". Filling this 14 years' jump against the background of the historical conceptual difference between the terms "electron" (already coined by G.J. Stoney in 1891) and "corpuscle", we will show that Thomson was in fact the first one to measure the electron (his "corpuscle") charge in 1899, and that Millikan was not even the first one to use an experimental method consisting in catching ions on droplets and measuring their speed inside vertical electrical and gravitational fields. This does not mean, of course, that Millikan's role was not fundamental: his interest was in the *elementary charge* and his great merit was that of demonstrating that all charges are integer multiples of an elementary charge, which is the same as the charge of the electron. Thus, Thomson and Millikan had two completely different research programs and as such they should therefore be disentangled.

*Keywords:* Electron charge, Elementary charge, History of Physics

## 1. Introduzione

In questo studio analizziamo le ricerche di J. J. Thomson e di R. Millikan sulla scoperta dell'elettrone e sulla misura della sua carica elettrica, con l'obiettivo di chiarirne il significato e le implicazioni anche a livello didattico. Infatti, nei libri di scuola, nei manuali universitari, e nella maggioranza dei siti web e delle voci enciclopediche, la storia della scoperta dell'elettrone e della misura della sua carica elettrica viene presentata attribuendo al fisico inglese Sir J. J. Thomson la misura, nel 1897, del rapporto carica/massa ( $e/m$ ) nel caso dei raggi catodici (esperimento al quale ci si riferisce come quello "della scoperta dell'elettrone") e poi, con un salto di quattordici anni, indicando, a completamento dell'esperimento di Thomson, l'esperimento delle gocce d'olio nel 1911 del fisico americano R. Millikan, al quale ci si riferisce come quello "della misura della carica elettrica dell'elettrone" (Leone, Monti & Robotti, 2023).

Obiettivo del nostro studio è colmare questo salto di quattordici anni e dimostrare che:

- Thomson e Millikan avevano programmi di ricerca completamente diversi e come tali le loro scoperte andrebbero presentate e distinte;
- Thomson è stato il primo a misurare la carica dell'elettrone ("corpuscolo") nel 1899;
- Millikan non è stato il primo né a utilizzare il metodo sperimentale della cattura degli ioni in gocce

né a misurarne la velocità di caduta in presenza e in assenza di un campo elettrico;

- è un errore storico e culturale presentare gli esperimenti di Millikan come un completamento dell'esperimento di Thomson del 1897.

A tale fine, presenteremo in successione, seguendone il filo dei ragionamenti, i tre lavori di Thomson pubblicati nel 1897 (misura di  $e/m$  dell'elettrone nel caso dei raggi catodici), nel 1898 (misura di  $e$  per gli ioni prodotti dai raggi X in aria in presenza di vapore d'acqua), e nel 1899 (misura di  $e$  dell'elettrone nel caso dell'effetto fotoelettrico), e la serie dei cinque lavori di Millikan pubblicati tra il 1907 e il 1913 sulla misura del valore della carica elettrica elementare.

## 2. Il percorso di Thomson

Per comprendere appieno la distinzione fra i due programmi di ricerca di Thomson e di Millikan, occorre tenere presente che Thomson chiamò *corpuscolo* – e non *elettrone* – la nuova particella elementare da lui scoperta nel 1897. All'epoca, infatti, il termine “elettrone” esisteva già, ma aveva un significato molto diverso. Coniato da Stoney (1891), la parola “elettrone” indicava il valore specifico della carica elettrica con cui gli atomi tendevano a combinarsi chimicamente, come risultava dallo studio dei processi elettrolitici. Stoney aveva calcolato questo valore pari a  $3 \times 10^{-11}$  ues ( $1.03 \times 10^{-20}$  C, essendo 1 ues =  $3.3 \times 10^{-10}$  C). Si può, quindi, affermare che, alla fine del XIX secolo, i concetti di carica unitaria, “atomo di elettricità” o “elettrone”, e di ione erano già ben consolidati nel linguaggio scientifico.

Al contrario, credere che l'atomo non fosse indivisibile, che potesse essere scisso, e che esistessero particelle subatomiche con una propria identità, era tutt'altra cosa. Fu proprio questa la rivoluzionaria intuizione introdotta da Thomson con la sua scoperta del 1897.

### 2.1. La prima misura della carica elettrica elementare associata agli ioni: Thomson 1898

Nel suo classico articolo del 1897, ben noto e ampiamente descritto, Thomson mirava a misurare il rapporto  $m/e$  dei raggi catodici. A questo riguardo è importante sottolineare che tale rapporto risultò pari a circa  $10^{-7}$  g/ues, ossia molto più piccolo rispetto al valore misurato per lo ione idrogeno nell'elettrolisi, che era di circa  $10^{-4}$  g/ues. Ciò poteva essere dovuto sia a una massa molto più piccola, sia a un valore della carica elettrica molto maggiore, sia a un insieme di queste due cose.

Allo scopo di caratterizzare compiutamente questo nuovo costituente atomico, bisognava, quindi, misurarne separatamente la massa o la carica. Thomson si rese conto che era più semplice misurare la carica e da essa derivare la massa. Per effettuare questa misurazione, in tutti i suoi esperimenti Thomson sfruttò una tecnica, sviluppata al Laboratorio Cavendish da lui diretto, da C.T.R. Wilson (1897) basata sull'espansione adiabatica di aria satura di vapore d'acqua, in seguito alla quale, attorno a particelle cariche eventualmente presenti, si formano, per condensazione, delle goccioline d'acqua visibili e che, quindi, possono essere contate.

Inizialmente, Thomson tentò di misurare direttamente la carica dei corpuscoli nei raggi catodici, ma senza successo. Dovette, quindi, passare a un'altra fenomenologia, e scelse di misurare la carica degli ioni (positivi e negativi insieme) prodotti in un gas (tipicamente l'aria) ionizzato da raggi X.

Per la misura, Thomson aveva a disposizione una tecnica, anch'essa sviluppata al Laboratorio Cavendish, che permetteva di stimare la carica totale  $Q$  associata a tutti gli ioni presenti nell'unità di volume  $n$ , cosicché si poteva determinare la carica di un singolo ione dalla relazione  $Q = ne$  una volta misurato il numero totale di ioni. Per misurare questo numero, Thomson sfruttò, appunto, il fenomeno della condensazione di goccioline d'acqua attorno alle particelle cariche: nell'ipotesi in cui ad ogni gocciolina corrisponda un solo ione, il numero di ioni coincide, infatti, con il numero di goccioline osservate.

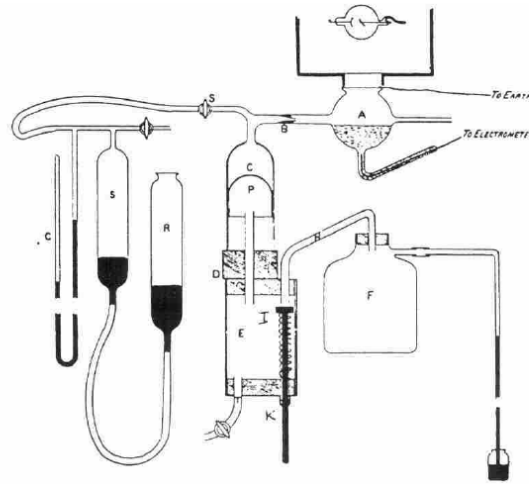


Fig. 1: Apparato di Thomson per la misura della carica sugli ioni prodotti da raggi X

### 2.1.1. Misura del numero degli ioni, $n$ , in un gas ionizzato da raggi X

Il numero di goccioline per unità di volume di gas,  $n$ , può essere determinato a partire dalla massa di acqua condensata per unità di volume di gas,  $M$ , che è misurabile. Infatti, nell'ipotesi in cui le goccioline siano tutte uguali, posta uguale a 1 la densità dell'acqua:

$$M = nm = n\left(\frac{4}{3}\pi a^3\right) \quad (2.1)$$

dove  $a$  è il raggio delle goccioline.

Per trovare  $a$ , ipotizzando che la legge di Stokes sia valida anche per gocce così piccole, se ne misura la velocità di sedimentazione  $v$  in un fluido viscoso:

$$v = \frac{2}{9} \frac{a^2 g}{\mu} \quad (2.2)$$

dove  $\mu$  è il coefficiente, noto, di viscosità cinematica del fluido.

La velocità  $v$  veniva a sua volta determinata osservando il tempo impiegato dallo strato superiore della nebbia (illuminato da una luce ad arco) a scendere di una determinata distanza. Conoscendo  $M$  era così possibile ricavare  $n$  da (2.1).

L'apparato utilizzato da Thomson è illustrato in Fig. 1. In pratica, abbassando bruscamente il pistone P, il volume complessivo aumenta e la temperatura si abbassa. In A si forma una nebbiolina visibile, e misurandone la velocità di sedimentazione  $v$ , è possibile determinare il raggio  $a$  e la massa di una singola gocciolina  $m = 3.1 \times 10^{-9} v^{\frac{3}{2}}$ . Si misura quindi la massa totale dell'acqua  $M = nm$ , da cui si può risalire al numero di goccioline corrispondente al numero di ioni  $n$ .

### 2.1.2. Misura della carica elettrica totale $Q$

Sempre con riferimento alla Fig. 1, per determinare la carica degli ioni per unità di volume  $Q$  si misura la densità di corrente  $I$  che, sotto un debole campo elettrico  $E$ , fluisce in A tra la superficie dell'acqua e la parete superiore del recipiente (una placca di alluminio), e dalla relazione  $I = (ne)uE$ , dove  $E$  è noto,  $n$  è il numero di ioni (positivi e negativi) per unità di volume e  $u$  è la velocità media degli ioni (positivi e negativi) - già misurata da Zeleny al Laboratorio Cavendish nel 1897 (Zeleny, 1898) - è possibile determinare il prodotto  $ne = Q$ . Noto il numero di ioni si può così ricavare la carica di un singolo ione  $e = \frac{Q}{n}$ . Thomson trovò così il valore  $e = 6.3 \times 10^{-10}$  ues ( $2.1 \times 10^{-19}$  C).

Per inciso, nel 1903 Thomson ripeté la misura di  $e$  fatta nel 1898 tenendo conto di quanto scoperto poco prima da C.T.R. Wilson e cioè che, nel caso dell'espansione utilizzata da Thomson ( $\frac{V_f}{V_i} = 1.3$ ), le gocce si formavano in realtà solo sugli ioni negativi. Questa nuova misura diede come risultato per lo ione negativo un valore medio pari a  $3.4 \times 10^{-10}$  ues ( $1.1 \times 10^{-19}$  C) che è circa la metà del valore trovato negli esperimenti precedenti (Thomson, 1903).

## 2.2. La prima misura in assoluto della carica elettrica del "corpuscolo": Thomson 1899

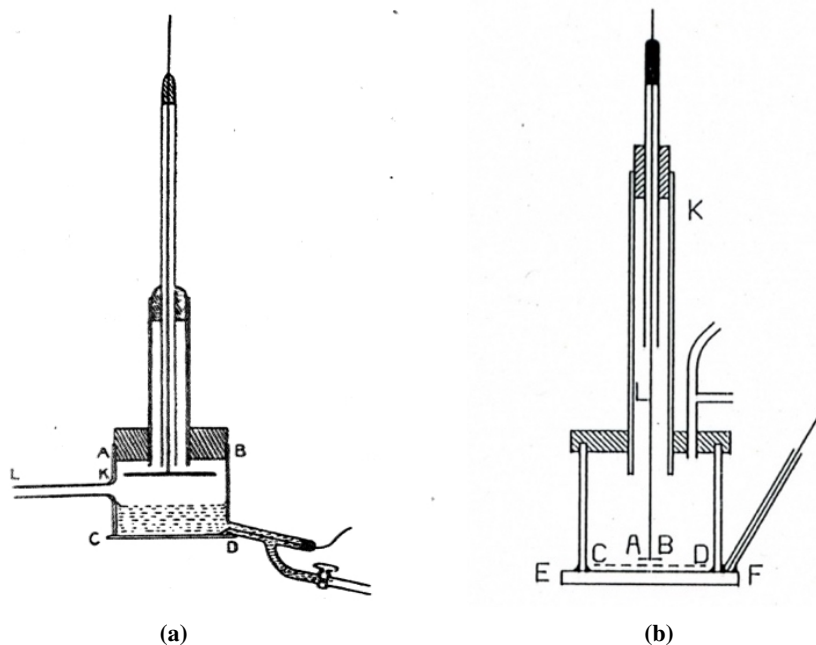
Le misure di Thomson del 1898 indicavano che le cariche sugli ioni hanno lo stesso valore indipendentemente dal tipo di gas e che sono dello stesso ordine di grandezza della carica dello ione idrogeno già osservata nell'elettrolisi. Tuttavia, non era possibile trarre alcuna conclusione riguardo a un possibile legame tra questa carica, associata agli ioni, e quella dell'elettrone o "corpuscolo", sia perché la carica misurata rappresentava il valore medio delle cariche degli ioni positivi e negativi, sia perché non era comunque possibile, in quel momento, identificare lo ione negativo con il "corpuscolo".

Di conseguenza, era necessario cercare una nuova fenomenologia che potesse essere interpretata in termini di "corpuscoli", e che consentisse al tempo stesso la misura sia della carica sia del rapporto carica/massa. La prima fenomenologia individuata da Thomson per queste misure fu l'emissione fotoelettrica.

### 2.2.1. La prima misura di "e": Thomson 1899

Per misurare la carica, Thomson seguì lo stesso procedimento del 1898. Il nuovo apparato è illustrato in (Fig. 2a): K è una lastra di Zn del diametro di 3.2 cm, posta a 1.2 cm dalla superficie dell'acqua; CD è una lastra di quarzo che consente il passaggio della luce ultravioletta; LK è il tubo che porta all'apparato per l'espansione adiabatica. Le goccioline che si formano per condensazione in seguito all'espansione adiabatica questa volta corrispondono ai corpuscoli emessi da K per effetto fotoelettrico.

Le misure effettuate da Thomson diedero un valore per la carica  $e$  in aria pari a  $7.3 \times 10^{-10}$  ues ( $2.4 \times 10^{-19}$  C), in idrogeno pari a  $6.7 \times 10^{-10}$  ues ( $2.1 \times 10^{-19}$  C).



**Fig. 2:** Apparati di Thomson per la misura (a) della carica dei corpuscoli prodotti per effetto fotoelettrico e (b) del rapporto massa/carica dei corpuscoli prodotti per effetto fotoelettrico.

Questi valori sono dello stesso ordine di grandezza della carica trasportata dagli ioni prodotti dai raggi X (misurata nel 1898) e della carica trasportata dallo ione di idrogeno misurata nell'elettrolisi.

### 2.2.2. Misura di $m/e$

Per determinare il rapporto  $m/e$  dei corpuscoli emessi per effetto fotoelettrico (Fig. 2b), riferendosi a un fenomeno descritto nel 1890 da Elster e Geitel, riguardante l'attenuazione, in certe condizioni, del flusso di carica da parte di un campo magnetico, Thomson pose, nello spazio tra AB (la lastra di Zn, illuminata attraverso la lastra di quarzo EF) e CD (una reticella metallica), un campo elettrico  $X$  perpendicolare ad AB e un campo magnetico  $H$  parallelo ad AB. La distanza massima tra AB e CD era di 4 mm, e la pressione interna era molto bassa (1/100 mmHg). Come illustrato in Fig. 3, i corpuscoli di carica negativa emessi da AB verso CD descrivono una cicloide di raggio  $d = 2X(m/e)H^2$ . Detta  $x$  la distanza variabile tra la lastra AB (mobile) e CD, quando, all'aumentare di  $x$  il flusso di carica in CD si annulla significa che  $x$  è uguale a  $d$ . Conoscendo  $d$ ,  $X$  e  $H$  è dunque possibile ricavare il rapporto  $m/e$ , che risultò pari a  $m/e = 1.3 \times 10^{-7}$  g/ues.

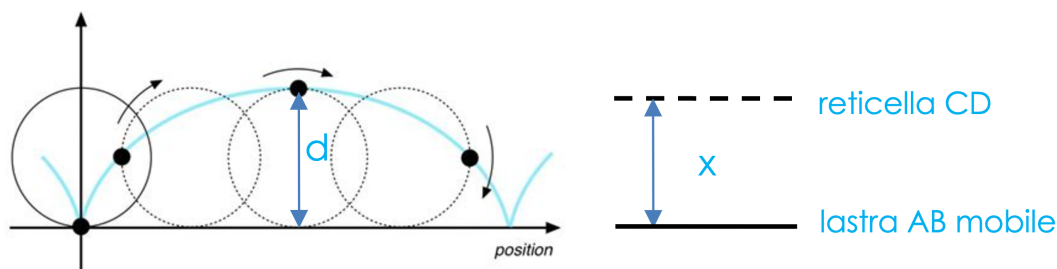


Fig. 3: Cicloide di raggio "d" descritta dai corpuscoli emessi da AB verso CD

Questo valore è dello stesso ordine di grandezza di quello misurato per i raggi catodici nel 1897, dimostrando così sia che l'effetto fotoelettrico è l'emissione degli stessi "corpuscoli" dalla lastra metallica illuminata sia che la carica elettrica misurata,  $e$ , è proprio la carica elettrica dei "corpuscoli".

Nello stesso articolo del 1899 Thomson ricavò il rapporto  $m/e$  anche nel caso di un altro fenomeno che pure interpretò come emissione di corpuscoli, ossia l'emissione di carica negativa da un filamento di carbone incandescente in atmosfera di idrogeno a bassa pressione (effetto termoionico). L'apparato sperimentale era simile a quello utilizzato per studiare l'effetto fotoelettrico, anche se con alcune modifiche, e la misura diede come risultato  $m/e = 1.2 \times 10^{-7}$  g/ues. Questo risultato era in accordo con i valori trovati per l'effetto fotoelettrico e per i raggi catodici, dimostrando che anche l'effetto termoionico è dovuto alla emissione degli stessi corpuscoli.

A conclusione di questo importante articolo, Thomson stimava la massa del corpuscolo dell'ordine di  $3 \times 10^{-26}$  g, ossia circa un millesimo della massa dello ione H, e affermava:

Nel trasporto di elettricità negativa a basse pressioni abbiamo qualcosa di ancora più piccolo dell'atomo, qualcosa che comporta la scissione dell'atomo, dal momento che abbiamo prelevato una parte, sebbene molto piccola, della sua massa. (Thomson, 1899, p. 563) (traduzione degli autori).

È importante sottolineare come l'esperimento di Thomson del 1899 suggerisca anche di guardare all'effetto fotoelettrico sotto una prospettiva nuova e diversa rispetto a quella solitamente adottata. L'effetto fotoelettrico riveste una importanza fondamentale nella storia della fisica, ancora prima dell'interpretazione di Einstein con riguardo alla nascita del concetto di fotone: porta all'identificazione di un costituente atomico distinto dall'atomo stesso e alla violazione del principio dell'indivisibilità dell'atomo. È sulla base di questo esperimento che le proprietà della materia potranno essere ricondotte al numero e alla distribuzione dei corpuscoli (come per primo fece Thomson stesso con l'efficace modello atomico da lui

successivamente proposto) e che si pongono le fondamenta della fisica moderna.

### 3. Il percorso di Millikan

Diversamente da Thomson, l'obiettivo di Millikan, da lui stesso dichiarato, era determinare con grande precisione il valore della carica elementare senza fare esplicito riferimento all'elettrone come particella:

Tra tutte le costanti fisiche ce ne sono due che ... sono di importanza fondamentale, la velocità della luce ... e la carica elettrica elementare (Millikan, 1910, p. 226)(traduzione degli autori).

Il fatto che Millikan fosse interessato alla carica elementare e alla sua accurata determinazione emerge anche dal suo libro (Millikan, 1917) "L'elettrone", nel quale egli neppure menziona gli esperimenti di Thomson del 1899 sul corpuscolo ma cita solo la prima misura del valore della carica elementare da parte di Thomson (1898) (si veda il precedente par. 2.1) e quella di H.A. Wilson (1903) (si veda il successivo par. 3.1). È chiaro come, rispetto alle precedenti misure, l'obiettivo di Millikan fosse quello di arrivare alla determinazione più accurata possibile del valore della carica elementare analizzando e correggendo le imprecisioni dei precedenti esperimenti

#### 3.1. Misura della carica elementare associata agli ioni: H. A. Wilson 1903

La serie di misure portate avanti da Millikan inizia nel 1907, quando Millikan recupera e modifica un esperimento nel frattempo fatto da H.A. Wilson (1903) al Cavendish sulla scia dell'esperimento di Thomson del 1898, basato sulla misura di due velocità di sedimentazione in assenza e in presenza di un campo elettrico per misurare la carica elettrica

Infatti, se si applica un campo elettrico  $X$ , la forza che agisce sulla goccia diventa  $Xe + mg$  e la conseguente velocità di caduta  $v_2$  in un fluido viscoso rispetto a quella in assenza di campo elettrico  $v_1$  diventa:

$$\frac{mg}{mg + Xe} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.1)$$

Utilizzando il precedente risultato di Thomson del 1898 (par. 2.1.1) per la massa di una gocciolina in funzione della velocità di caduta in assenza di campo elettrico,  $m = 3.1 \times 10^{-9}(v_1)^{3/2}$ , era possibile ricavare  $e$  dalla equazione:

$$e = 3.1 \times 10^{-9}(g/X)(v_2 - v_1)v_1^{1/2} \quad (3.2)$$

senza bisogno di passare attraverso la misura della carica totale  $Q$  (par. 2.1.2). Con questo procedimento H.A. Wilson misurò  $e = 3.1 \times 10^{-10}$  ues ( $1.0 \times 10^{-19}$  C).

#### 3.2. Prime misure della carica elementare da parte di Millikan: 1907 e 1910

La prima misura della carica elementare fatta da Millikan nel 1907 insieme a un suo studente, L. Begeman, fu uno studio presentato nel 1908 al congresso della Società Fisica a Chicago, del quale esiste solo un riassunto molto sintetico (Millikan & Begeman, 1908). Lo studio, come detto, si basava sul precedente lavoro del 1903 di H.A. Wilson. Millikan e Begeman usarono una sorgente di radio invece dei raggi X per ionizzare il gas (la cui natura non è precisata nell'abstract) e commissero alcuni errori (anch'essi non precisati) commessi da Wilson, ottenendo  $e = 4.03 \times 10^{-10}$  ues ( $1.35 \times 10^{-19}$  C).

Il 23 ottobre 1909, al successivo congresso della Società Fisica a Princeton, Millikan, questa volta da solo, presentò uno studio che fu poi pubblicato nel 1910 (Millikan, 1910). Il cambiamento più significativo fu quello di osservare singole gocce sospese invece di uno strato di nebbia, per un tempo che variava dai 30 ai 60 secondi. Millikan utilizzò l'equazione di Wilson (3.2), con distanze e tempi inferiori e valori più accurati delle viscosità. Misurò diversi valori delle cariche elettriche portate dalle



gocce e trovò il loro massimo comun divisore, che identificò con il valore della carica elementare:  $e = 4.65 \times 10^{-10}$  ues ( $1.53 \times 10^{-19}$ C).

### 3.3. Misura della carica elementare da parte di Millikan: 1911/1913/1917

Il salto di qualità avvenne poco più di un anno dopo, quando Millikan (1911) pubblicò i risultati del suo famoso esperimento con le goccioline d'olio, successivamente perfezionato (Millikan, 1913, 1917). Millikan non utilizzò più le goccioline create da un'espansione adiabatica, ma goccioline d'olio, una sostanza non volatile prodotta direttamente da un vaporizzatore, eliminando così gli errori dovuti soprattutto all'evaporazione dell'acqua.

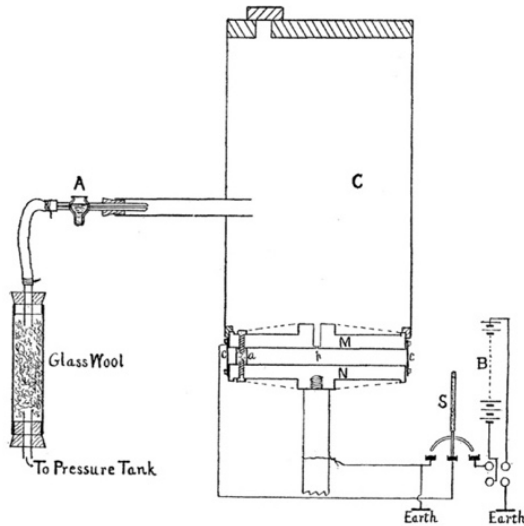


Fig. 4: Apparato di Millikan per la misura della carica elementare

Una singola goccia una o più cariche, fino a un massimo di 150; di dimostrare la quantizzazione della carica elettrica in quanto tutte le cariche elettriche, qualunque fosse il loro metodo di produzione, risultavano essere multipli esatti di una carica elementare ben definita; di determinare così grande accuratezza il valore della carica elementare. Millikan trovò  $e = (4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10}$  ues ( $1.575 \times 10^{-19}$  C), con una precisione da lui stesso stimata come almeno 15 volte superiore a quella ottenuta con qualsiasi metodo precedente.

## Conclusioni

La ricostruzione presentata in questo studio permette di avere un quadro complessivo e completo dello sviluppo storico della misura della carica elettrica dell'elettrone e del valore della carica elettrica elementare.

Fu Thomson, nel 1898, il primo a realizzare la prima misura diretta della “carica elementare” associata agli ioni. Lungo questo filone si mossero H.A. Wilson (1903), Millikan con Begeman (1907) e Millikan da solo (1910). Millikan, poi, nel 1911, 1913 e 1917 si spinse verso misurazioni sempre più precise della “carica elementare” riconoscendo la quantizzazione della carica elettrica. Millikan stesso evitò deliberatamente di riferirsi alla “carica dell'elettrone”, usando invece proprio il termine “carica elettrica elementare”.

E fu sempre Thomson nel 1899 a realizzare, a partire dall'effetto fotoelettrico, la prima vera misura diretta della carica dell'elettrone (all'epoca chiamato “corpuscolo”), concepito come particella subatomica con una sua propria massa e una sua propria carica elettrica. Questa misura era indispensabile per

Un “nebulizzatore commerciale” (Fig. 4) generava una nube di minuscole gocce d'olio nella camera C, caricandole per attrito durante l'uscita dal nebulizzatore. Una o più di queste goccioline venivano fatte cadere attraverso un piccolo foro p nello spazio tra le piastre M e N di un condensatore piano, distanti 16 mm; successivamente il foro veniva richiuso. Illuminando le gocce su uno sfondo nero, esse apparivano, per utilizzare l'espressione dello stesso Millikan, come “stelle luminose” (traduzione degli autori). Un campo elettrico di intensità variabile fra 3000 e 5000 V poteva essere attivato o disattivato tra le piastre M e N. Questo metodo sperimentale, secondo quanto evidenziato dallo stesso Millikan, gli permise di catturare su

confermare la scoperta del corpuscolo. Determinando la carica  $e$  e il rapporto  $e/m$ , Thomson riuscì a ricavarne la massa dimostrando l'esistenza di particelle con massa circa un millesimo di quella dello ione H e la divisibilità dell'atomo.

Questo studio fornisce anche un esempio particolarmente significativo degli errori che vengono tipicamente commessi nelle presentazioni standardizzate della Fisica e del suo sviluppo "quasi-storico" nonché del valore didattico, formativo e culturale della storia della fisica sia nel merito della comprensione e dell'applicazione delle leggi della Fisica e degli aspetti più strettamente tecnici e sperimentali, sia con riferimento alla *natura della scienza*, sia al fine di stimolare il senso critico e le capacità argomentative.

## Bibliografia

- Leone, M., Monti, F. & Robotti, N. (2023). "History of physics research and physics education", *Il Nuovo Cimento C*, 46, pp. 208-224.
- Millikan, R.A. & Begeman, L. (1908). "On the charge carried by the negative ion of an ionized gas", *Physical Review*, 26(2), pp. 197-198.
- Millikan, R.A. (1910). "A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 19, pp. 209-228.
- Millikan, R.A. (1911). "The isolation of an ion, a precision measurement of its charge, and the correction of Stokes's law", *Physical Review*, 32, pp. 349-397.
- Millikan, R.A. (1913). "On the elementary electrical charge and the Avogadro constant", *Physical Review*, 2, pp. 109-143.
- Millikan, R.A. (1917). "A new determination of  $e$ ,  $N$ , and related constants", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 34, pp. 1-30.
- Robotti, N. (1995). "J.J. Thomson at the Cavendish Laboratory: the history of an electric charge measurement", *Annals of Science*, 52, pp. 265-284.
- Thomson, J. J. (1897). "Cathode rays", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44, pp. 293-316
- Thomson, J. J. (1898). "On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 46, pp. 528-545.
- Thomson, J. J. (1899). "On the masses of the ions in gases at low pressure", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 48, pp. 547-567.
- Thomson, J. J. (1903). "On the charge of electricity carried by a gaseous ion", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5, pp. 346-355.
- Wilson, C.T.R. (1896). "The effect of Röntgen rays on cloudy condensation", *Proceedings of the Royal Society of London*, 59, pp. 338-339.
- Wilson, C.T.R. (1897). "Condensation of water vapour in the presence of dust-free air and other gases", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 189, pp. 265-307.
- Wilson, H.A. (1903). "A Determination of the Charge on the Ions Produced in air by Röntgen Rays", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5, pp. 429-441.
- Zeleny, J. (1898). "On the ratio of the velocities of the two ions produced in gases by Röntgen radiation; and on some related phenomena", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 46, pp. 120-154.