

Nadia Robotti

(Dipartimento di Fisica, Università di Genova, I.N.F.N. Sez.Genova, Centro Fermi, Roma)

LA MISURA DELLA CARICA ELETTRICA: il caso dell'elettrone

A.I.F. Scuola di Storia della Fisica: «Le grandezze fisiche e la loro misura»
marzo 2021

Quando si parla della **prima misura della carica dell'elettrone**, viene in genere fatto riferimento, sia nei testi che in rete, al **famoso esperimento di Millikan** delle goccioline d'olio del 1911, che lo portò, assieme agli studi sull'effetto fotoelettrico, al premio Nobel per la Fisica del 1923.

In realtà, come cercherò di mostrare, la misura della carica dell'elettrone, che è una misura molto «intrigante e difficilissima» se si pensa all'ordine di grandezza delle entità in gioco, è una misura (bellissima) che è durata **circa quarant'anni**, e che ha avuto il suo primo sbocco nella misura di **Thomson del 1899, la vera prima misura della carica dell'elettrone**, e che è nata dagli studi sulla scarica elettrica in un gas rarefatto.

A partire dalla seconda metà dell'Ottocento questi studi hanno attirato l'attenzione di numerosi osservatori perché attraverso di essi si pensava di riuscire a **penetrare il segreto dell'elettricità (cioè la sua natura e il suo rapporto con la materia) in quanto**, come osservava J.J.Thomson nel 1893,

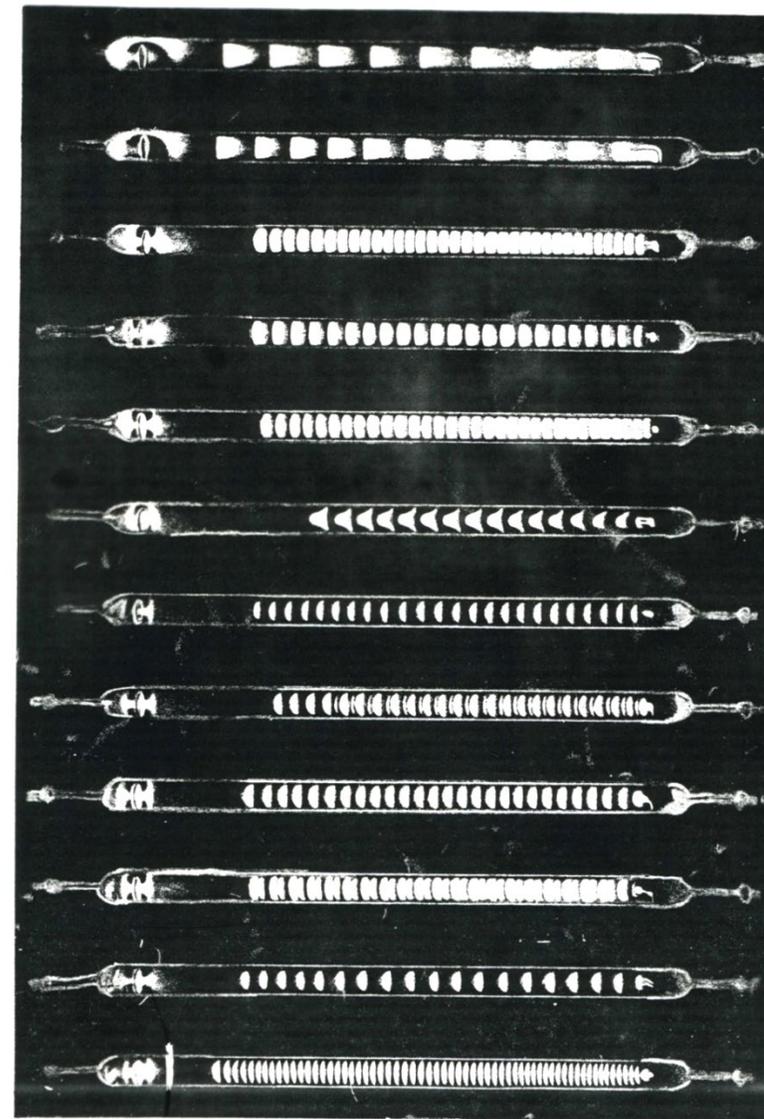
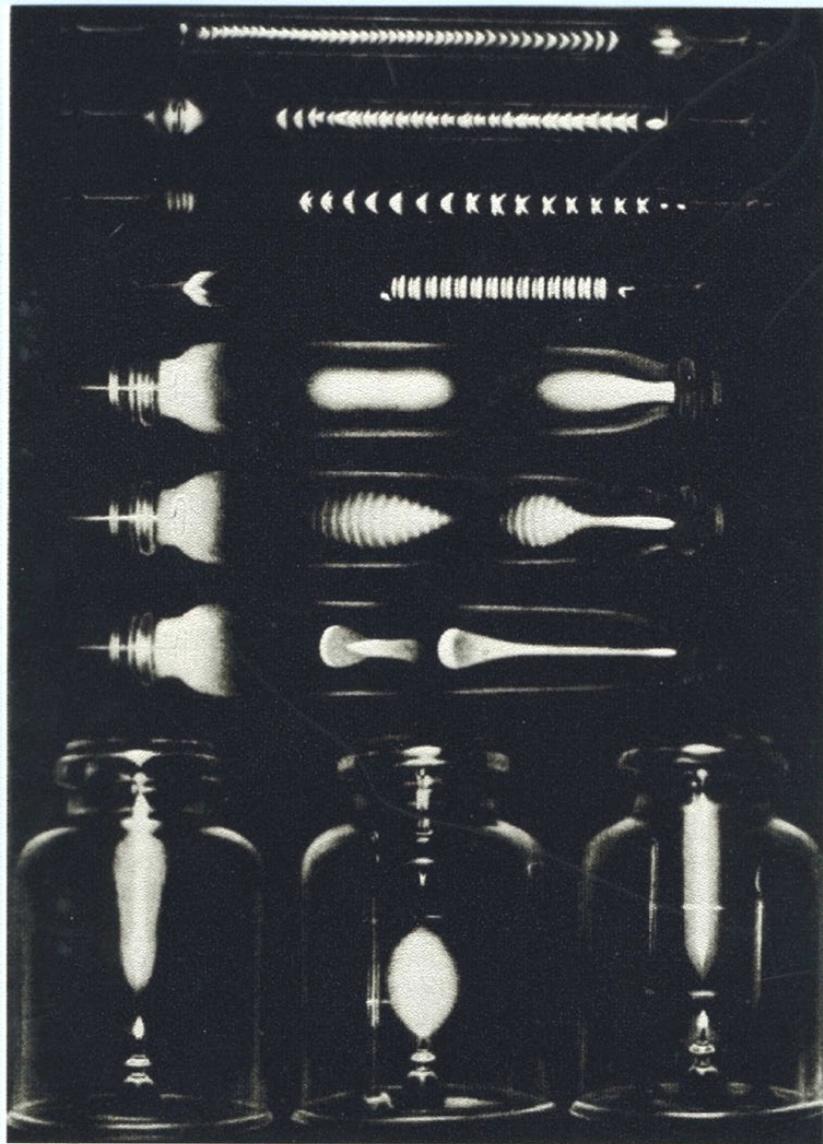
«mentre il passaggio di questo agente attraverso un metallo o un elettrolita è invisibile, quello attraverso un gas è accompagnato da effetti estremamente luminosi» che si potevano studiare a occhio nudo.

Non a caso, i processi di scarica attraverso i gas rarefatti → **tema centrale** dell'attività teorica e sperimentale condotta e promossa da J.J. Thomson presso il **Cavendish Laboratory di Cambridge**, fin dal suo arrivo nel 1884 come Direttore (*in precedenza Maxwell, 1874-1879; Lord Rayleigh 1879-1884*)

e che lo porteranno nel 1897 alla scoperta di un primo costituente atomico: il «corpuscolo», o «elettrone» come verrà chiamato in seguito



Ingresso del Cavendish Laboratory



Fenomeni di scarica nei gas rarefatti
[De La Rue, Muller, 1880]

In cosa consistevano questi esperimenti così affascinanti?

Tubo di vetro (20-50 cm)

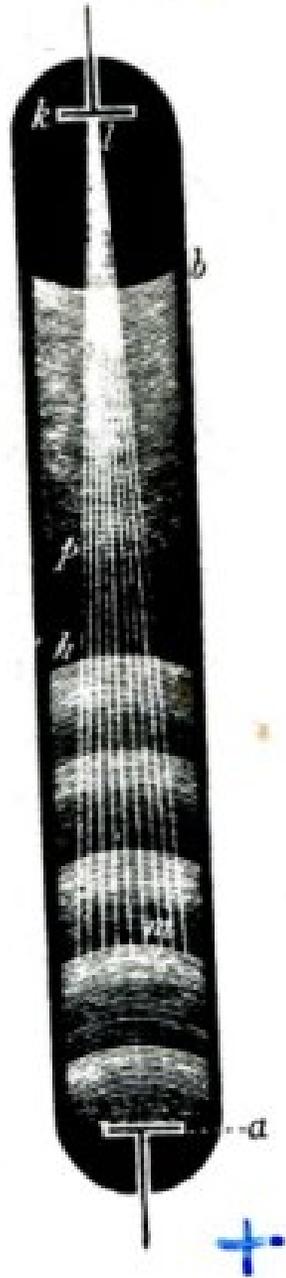
Anodo + (a), Catodo – (k) collegati ai poli di una macchina elettrostatica (10^3 V)

Variando, con una pompa a vuoto, la pressione all'interno del tubo, la scarica all'interno del gas si presentava con **caratteristiche molto complesse e diverse**, a seconda del gas, della forma degli elettrodi e del tubo, dei materiali, etc

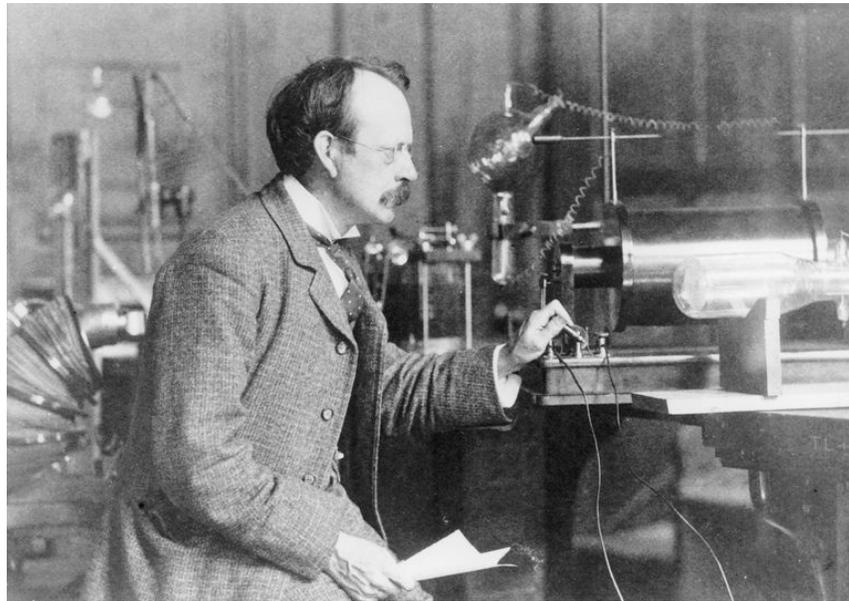
Per $p = 10^{-1}$ mmHg, ci si accorse che compariva davanti al catodo: **«dark space»**, che, per $p \rightarrow 0$, cresceva di dimensioni $\rightarrow p = 10^{-2}$ mmHg: si estendeva per tutto il tubo, raggiungeva la parete dietro l'anodo, dove provocava la fosforescenza del vetro diventando **l'«unico fenomeno visibile»**.

Successivi esperimenti mostrarono che il «dark space» era sede di transito di **«something»**, emesso perpendicolarmente al catodo, che si prestava a essere interpretato, seppure in modo parziale, sia come onde (da qui il nome **«raggi catodici»**), sia come **particelle**.

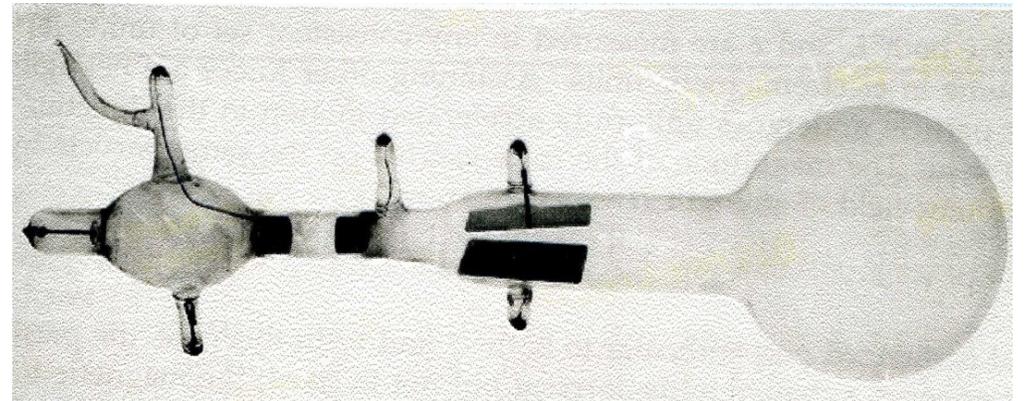
(1867-1897) Dibattito su «Cosa è questo **«something»**, chiamato «raggi catodici»? sono **onde o particelle?**



In questo dibattito si inseriva pesantemente **Thomson nel 1897**. Infatti riusciva a dimostrare che i raggi catodici oltre che essere deflessi da un campo magnetico, (Varley 1870), oltre che trasportare una carica negativa,(Perrin 1895), erano anche **deflessi da un campo elettrico**



J.J.Thomson
(Cheetham, 1856 – Cambridge, 1940)



Tubo usato da J.J.Thomson per dimostrare la deflessione dei raggi in campo elettrico
(Cavendish Laboratory, Università di Cambridge)

J.J.Thomson [1897] :

“Dal momento che i raggi catodici sono deflessi da un campo elettrico, sono deflessi da un campo magnetico, trasportano una carica negativa, non si può sfuggire alla conclusione che sono particelle di materia cariche negativamente.”



Nuovo problema:

“ Che cosa sono queste particelle? Sono atomi, o molecole, oppure materia in uno stato di suddivisione ancora più fine?”

Per rispondere



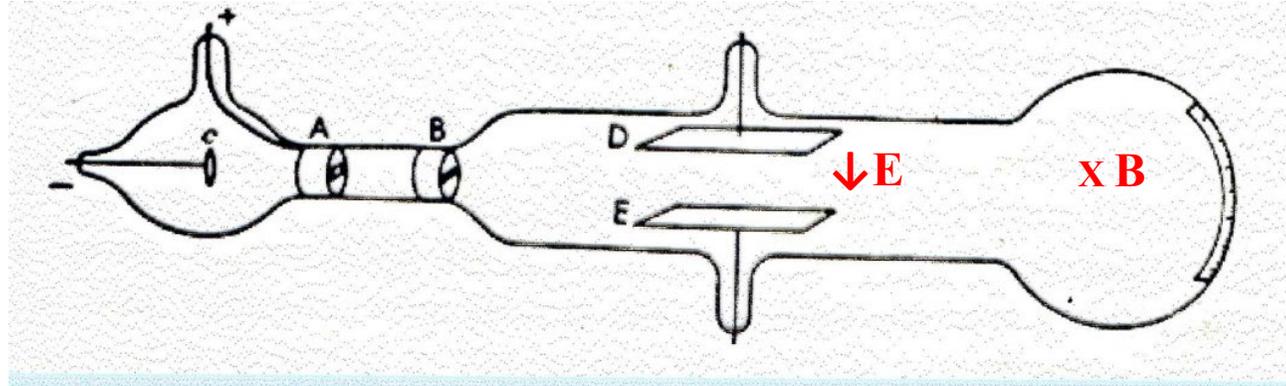
misura del rapporto massa / carica

Due metodi diversi:

- deflessione in campo elettrico e in campo magnetico
- deflessione in campo magnetico
trasformazione energia cinetica in calore

$q/m \rightarrow$ DEFLESSIONE ELETTRICA E MAGNETICA

Stesso apparato per deflessione elettrica (campo $\downarrow \mathbf{E}$) con in più campo magnetico ($\times \mathbf{B}$)



$$F_{el} = Eq \quad F_{ma} = qvB$$

$$E \neq 0 \rightarrow \text{Deflessione} = 0 : F_{el} = F_{ma} \rightarrow Eq = qvB \rightarrow v = E/B$$

$$E=0 \quad F_{ma} = F_{centr} \rightarrow qvB = mv^2/R \rightarrow m/q = BR/v = B^2R/E$$

$$[m/q] = 10^{-7} \text{ gr/u.e.m.}$$

VS

$$[m/q]_{attuale} = 0.6 \cdot 10^{-7} \text{ gr / u.e.m.}$$

Risultati sperimentali di J.J. Thomson
(Phil. Mag. 1897)

Gas	Value of W/Q	I	m/e	v
Tube 1				
Air	4.6×10^{11}	230	0.57×10^{-7}	4×10^9
Air	1.8×10^{12}	350	0.34×10^{-7}	1×10^{10}
Air	6.1×10^{11}	230	0.43×10^{-7}	5.4×10^9
Air	2.5×10^{12}	400	0.32×10^{-7}	1.2×10^{10}
Air	5.5×10^{11}	230	0.48×10^{-7}	4.8×10^9
Air	1×10^{12}	285	0.4×10^{-7}	7×10^9
Air	1×10^{12}	285	0.4×10^{-7}	7×10^9
Hydrogen	6×10^{12}	205	0.35×10^{-7}	6×10^9
Hydrogen	2.1×10^{12}	460	0.5×10^{-7}	9.2×10^9
Carbonic acid	8.4×10^{11}	260	0.4×10^{-7}	7.5×10^9
Carbonic acid	1.47×10^{12}	340	0.4×10^{-7}	8.5×10^9
Carbonic acid	3×10^{12}	480	0.39×10^{-7}	1.3×10^{10}
Tube 2				
Air	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	3.3×10^9
Air	4.4×10^{11}	195	0.47×10^{-7}	4.1×10^9
Air	3.5×10^{11}	181	0.47×10^{-7}	3.8×10^9
Hydrogen	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	3.3×10^9
Air	2.5×10^{11}	160	0.51×10^{-7}	3.1×10^9
Carbonic acid	2×10^{11}	148	0.54×10^{-7}	2.5×10^9
Air	1.8×10^{11}	151	0.63×10^{-7}	2.3×10^9
Hydrogen	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	3.3×10^9
Hydrogen	4.4×10^{11}	201	0.46×10^{-7}	4.4×10^9
Air	2.5×10^{11}	176	0.61×10^{-7}	2.8×10^9
Air	4.2×10^{11}	200	0.48×10^{-7}	4.1×10^9
Tube 3				
Air	2.5×10^{11}	220	0.9×10^{-7}	2.4×10^9
Air	3.5×10^{11}	225	0.7×10^{-7}	3.2×10^9
Hydrogen	3×10^{11}	250	1.0×10^{-7}	2.5×10^9

cm/s

Risultato:

$$m / q \approx 10^{-7} \text{ gr/ u.e.m.}$$

- *“indipendentemente dal materiale del catodo, dal tipo di gas e dalla pressione utilizzata”*
- *“valore molto piccolo”* vs. 10^{-4} gr / u.e.m.,
≡ valore più piccolo fino ad allora noto per uno ione (H^+)

$(m/q) \ll (m/q)_{H^+}$ poco significativo:

- 1) piccola m ?
- 2) grande q ?
- 3) entrambi ?

J.J.Thomson risponde anche senza misura separata di m oppure di q : **scelta 1)**

\Rightarrow

misure di Lenard su assorbimento
“raggi catodici” in aria [a_m]

$p = 0.5 \text{ Atm}$ “raggi catodici” :

libero cammino medio = 0.5 cm

vs.

$p = 0.5 \text{ Atm}$ “molecole aria” :

libero cammino medio = $2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$

i.e.: “ di un ordine completamente diverso ”



“le particelle che compongono i raggi catodici sono molto più piccole delle molecole ordinarie”

- $(m / q) = \text{costante}$

indipendentemente da materiali usati e pressione



conclusione J.J.Thomson:

- **atomo** \equiv **struttura complessa** { "parti uguali" }

[Hp \in Chimica (Prout, Dumas, Marignac, etc)]

ma anche { "parti cariche" } e **divisibile**

- **"raggi catodici"** \equiv **una di queste "parti"**

(che ha lasciato l'atomo)

Componente atomico di carica negativa

(\rightarrow elettrone) : **"corpuscolo"**

J.J.Thomson (1897):

“Noi troviamo nei raggi catodici un nuovo stato della materia, uno stato in cui tutta la materia- cioè materia derivata da sorgenti diverse, quali idrogeno, ossigeno, etc.- è di un unico tipo, essendo questa materia la sostanza che compone tutti gli elementi chimici. (...) Se nel campo molto intenso presente nei dintorni del catodo, le molecole vengono scisse non nei comuni atomi chimici, ma in questi atomi primordiali, che per brevità chiameremo corpuscoli e se questi corpuscoli sono carichi negativamente così che vengono proiettati dal campo elettrico lontano dal catodo, essi dovrebbero avere un valore del rapporto massa/carica che è indipendente dalla natura e dalla pressione del gas, come di fatto si è dimostrato”.

[I definizione di elettrone]

Ancora un problema:

“*corpuscoli*” = particelle sub-atomiche \ll atomo H

“quanto più piccole dell’atomo di idrogeno?”



J.J.Thomson (1897 ÷ 1899):

impegno su programma di ricerca →

misura di q specifica per il “*corpuscolo*”.

Misura molto complessa

→ competenze Cavendish Laboratory



1899: misura di q → misura q/m → m

«Prova diretta dell’esistenza di masse soltanto 1/1000 di quella dello ione H»

Perché Thomson chiama queste particelle sub-atomiche, che ora chiamiamo «elettroni», «corpuscoli»?

In realtà, nel 1897, la parola «elettrone» esisteva già.

Essa era stata conosciuta da G.Stoney nel 1891 per indicare
«La quantità definita di elettricità tramite la quale, o tramite multipli interi di essa, gli atomi si combinano chimicamente tra di loro».

Il percorso di Stoney è lineare:

Stoney, 1874: in un intervento a un Convegno «**Le unità fisiche della Natura**» collegandosi al processo di revisione delle unità di misura elettriche della British Association (≈ 1860), proponeva di costruire un nuovo sistema di «**unità di misura**», a **partire da ««unità fondamentali», suggerite** «dalla stessa Natura, presa nella sua globalità».

Due grandezze già c'erano: c e G.

E la «terza unità»?

Nella ricerca di questa terza grandezza, spaziando tra i vari fenomeni, giungeva a una particolare lettura delle **leggi di Faraday sull'elettrolisi (1833)** fatta alla luce della teoria della valenza di Kekulé (1860), che lo portava ad individuare l'esistenza di

«una singola definita quantità di elettricità, sempre presente e invariante rispetto al tipo di reazione elettrolitica», che proprio per essere «invariante», si presentava come **«l'unità naturale di carica»** → (1891) **«elettrone»**

Questa carica (E) era associata a ogni ione, (+) e (-), monovalente, liberato nell'elettrolisi

APPROFONDIMENTO: Dalla seconda legge: Stessa quantità di elettricità Q che passa nei vari elettroliti dissocia quantità di sostanze M proporzionali ai loro equivalenti elettrochimici («proporzioni rispetto all' H , secondo cui le sostanze vengono sempre liberate durante l'azione elettrolitica= Equivalenti chimici (proporzioni rispetto all' H , secondo cui le sostanze sembravano combinarsi chimicamente)

Con teoria valenza e con concetto di legame chimico: quantità di sostanze proporzionali ai loro equivalenti chimici contengono lo stesso numero di legami chimici. Quindi: **la stessa quantità di elettricità Q dissocia lo stesso numero di legami chimici.**

Dalla prima legge: Quantità sostanza liberata di una data sostanza è proporzionale alla quantità di elettricità che passa, quindi:

corrente elettrolitica = convezione di elettricità da parte delle molecole

CONCLUSIONE:

Ad ogni legame chimico rotto all'interno di un elettrolita corrisponde sempre una STESSA CARICA (E) associata a ione (+) e ione (-) monovalente

Stoney così «riassumeva l'insieme dei fatti quantitativi dell'elettrolisi»:

«Per ogni legame chimico che viene rotto all'interno di un elettrolita, una certa quantità di elettricità, sempre uguale in tutti i casi, attraversa l'elettrolita.

Chiamerò questa definita quantità di elettricità E . Se la considerassimo come la nostra quantità unitaria di elettricità, probabilmente faremmo un passo molto importante nello studio dei fenomeni naturali».

Avendo così individuato una **«quantità definita di elettricità»** tramite la quale, o tramite multipli di essa gli atomi sembravano combinarsi chimicamente tra di loro, Stoney affrontava il problema di determinarne **il valore (E)**.

Per prima cosa riprendeva un risultato ottenuto da Lodsmith nel 1863, e da lui ricavato per via indipendente nel 1868, relativo al **numero di N di molecole contenute in un litro di gas a T=0 e p=760 mm Hg**. Sulla base della teoria cinetica dei gas e in particolare dalla relazione tra distanza media delle molecole (d) e il loro cammino libero medio (l) [$d = 1/60 l$], ricavava che la distanza media tra due molecole in un mm^3 di gas era 10^{-7} mm e che quindi il numero N di molecole contenute in un litro di gas era **$N = 10^{18}$**

A questo punto, noto N, nota la massa M di un litro H (10^{-1} gr) \rightarrow massa molecola H = 10^{-25} gr,
 \rightarrow **massa atomo H = $0.5 \cdot 10^{-25}$ gr**

Nel caso dell'elettrolisi dell'acqua (Tabelle Congresso British Association 1863): Il passaggio di **1 Ampère di elettricità** (dove Ampère = unità di carica della serie u. e.m. della B.A.) **scomponeva $92 \cdot 10^{-6}$ gr d'acqua** e quindi **liberava circa 10^{-5} gr di H**, ossia **10^{20} atomi di H**.

Dal momento che per ogni atomo di H reso libero corrispondeva un legame rotto, **il numero di legami rotti risultava anch'esso 10^{20}** . Poiché ad ogni legame rotto corrispondeva una carica unitaria E, identificando il moto elettrico con il moto chimico: si otteneva

$$1 \text{ A} = 10^{20} \text{ E} \quad \rightarrow \quad \text{E} = 10^{-20} \text{ A} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ u.e.s.}$$

Questo intervento di Stoney del 1874 non venne pubblicato negli Atti del Convegno. Esso venne riproposto nel **1881** a un Convegno a Dublino e pubblicato sui Proceedings e sul Phil. Mag.

Nello **stesso anno 1881 Helmholtz** richiamandosi alla teoria della valenza, giungeva alla seguente conseguenza delle leggi dell'elettrolisi (**analoga a quella avanzata da Stoney**)

« La legge di Faraday ci indica che attraverso ogni sezione di un conduttore elettrolitico abbiamo sempre moto elettrico e moto chimico equivalenti. **La stessa quantità definita di elettricità positiva o negativa si muove sempre con ogni ione monovalente, o con ogni unità di affinità di uno ione multivalente**, e lo accompagna durante tutti i suoi moti all'interno del fluido elettrolitico. Possiamo chiamare questa quantità **la carica elettrica dell'atomo...**Ora il più stupefacente risultato della legge di Faraday è forse questo: se accettiamo l'ipotesi secondo cui le sostanze elementari sono composte di atomi, **non possiamo non concludere che anche l'elettricità, sia positiva che negativa, è divisa in definite porzioni elementari che si comportano come atomi di elettricità**»

A partire dal 1890, a seguito di successive stime, la «**carica unitaria**», o «elettrone» + «**ione**» (atomo di materia con una o più cariche unitarie) fanno parte del linguaggio comune

Domanda:

Quando J.J.Thomson (1897): «corpuscolo» + «m/e»: perché non assume $e =$ «carica unitaria», e ricava così «m» senza una misura separata di «e»?

1897: Non esistono ragioni «a priori» per IDENTIFICARE la carica del «corpuscolo» con l'«elettrone»

CORPUSCOLO: significato diverso, carattere innovativo in concezione atomica.

Un conto era pensare che atomi e molecole contenessero una o più «cariche unitarie» (elettroni): questa era una proprietà atomica, che stava alla base dei legami chimici e dei fenomeni elettrolitici: l'Atomo = struttura complessa MA indivisibile

Un altro conto era considerare l'atomo costituito da particelle materiali cariche (i «corpuscoli»), che si può rompere e scindere in «corpuscoli».

«Elettrone» e «corpuscolo»

= **ENTITA' NON NECESSARIAMENTE LEGATE TRA DI LORO** e così
dovevano essere trattate

Quindi J.J. Thomson: DOPO che ha ricavato per il corpuscolo: $m/e = 10^{-7}$ gr / u.e.m.,
di fronte al problema problema: $m?$, $e?$ →

SI IMPEGNA SU PROGRAMMA DI RICERCA →

**REALIZZAZIONE MISURA DI CARICA SPECIFICA PER IL
CORPUSCOLO»,** libera da Hp su atomi o molecole

(prima misura senza N° Avogadro)

REALIZZAZIONE NON IMMEDIATA:

J.J. non riesce con raggi catodici (e/m)



si sposta su un'altra fenomenologia:

1898: **IONIZZAZIONE DI UN GAS DA PARTE DI RAGGI X**



Attività del Cavendish Laboratory (1896-1898): indagini di J.J. Thomson, E. Rutherford)

Differenze di comportamento ioni (+) e ioni (-):
ioni (-) più veloci

Interpretazione ionizzazione come: «dissociazione e frantumazione delle molecole»

MA 1898:

per J.J. non esistono elementi sufficienti per identificare ioni (-) con
«corpuscoli»

(1899: nel caso di gas inerti e monoatomici)



OBIETTIVO: «mettere a punto un metodo per **misura della carica** trasportata dagli ioni che sono prodotti quando i Raggi Roentgen passano attraverso un gas»

Misura di carica: POSSIBILE → Competenze acquisite al Cavendish Laboratory a partire dal 1890 su «scariche nei gas rarefatti»

1) Tecniche di misura della mobilità di ioni gassosi (J.J.Thomson, a. Zeleny)



DETERMINAZIONE CARICA «Q» ASSOCIATA A UN GAS IONIZZATO

2) Ricerche sui processi di condensazione in aria satura di vapor d'acqua o altri gas saturi e legame con la presenza di cariche (ioni prodotti da raggi X, C.T.R. Wilson)



IONI = NUCLEI DI CONDENSAZIONE



IONI ISOLABILI IN GOCCIOLINE D'ACQUA
TRAMITE ESPANSIONE ADIABATICA DI GAS SATURI

APPARATO J.J.THOMSON 1898

Misura di «e» per ione prodotto da raggi X:

Campione di aria e vapore d'acqua, o altro gas, ionizzati da Raggi X

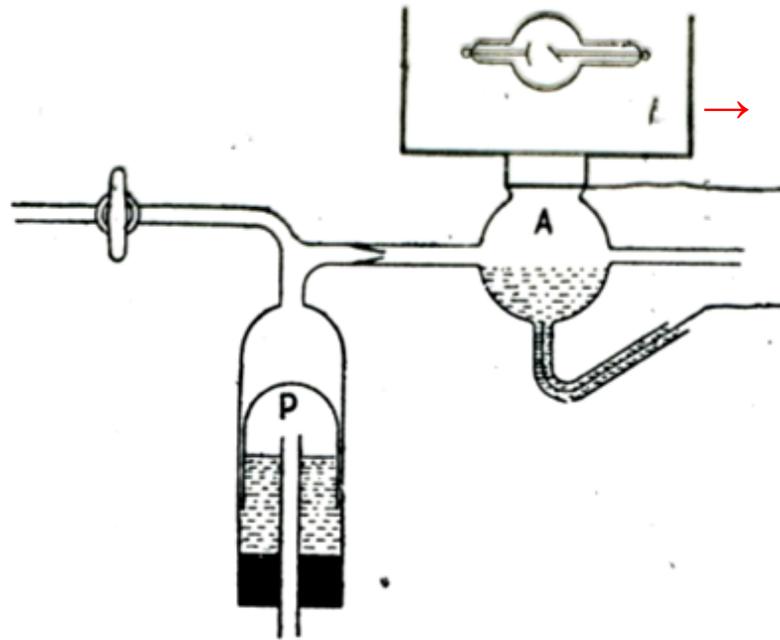


FIG. 1.

A: Gas ionizzato da sorgente Raggi X

Espansione
adiabatica realizzata
con pistone P

A) J.J. ha a disposizione tecnica di misura t.c. consente di stimare Q_{tot} associata a tutti gli ioni presenti (in un'unità di volume) →

$$Q_{\text{ione}} = Q_{\text{tot}} / n_{\text{ioni}} \quad (*)$$

B) n_{ioni} ?? → sfrutta la proprietà (C.T.R. Wilson, 1896)
Aria + vapor d'acqua sottoposta a espansione adiabatica:

Ioni presenti = Nuclei di condensazione

Se: OGNI IONE CORRISPONDE A OGNI GOCCIA →

$$n_{\text{ioni}} \rightarrow n_{\text{gocce}}$$

$n_{\text{gocce}} \rightarrow M_{\text{acqua}}$ depositata per unità di volume di gas

$$M_{\text{acqua}} = \frac{4}{3} \pi a^3 n_{\text{gocce}} \quad (**) \quad (\text{dove } a = \text{raggio gocce})$$

M_{acqua} = Misurabile

$a?$: legge di Stokes: velocità di sedimentazione: $v' = \frac{2ga^2}{9\mu}$

μ = viscosità cinematica [$\text{l}^2 \text{t}^{-1}$]



si misura $v' \rightarrow a$

(La velocità veniva determinata osservando il tempo impiegato dallo strato superiore della nebbia, che era illuminato da una luce ad arco, a scendere di una data distanza).

Quindi da (**), noti M_{acqua} e il raggio a ,



$n_{\text{gocce}} \rightarrow n_{\text{ioni}}$

APPARATO J.J.THOMSON 1898

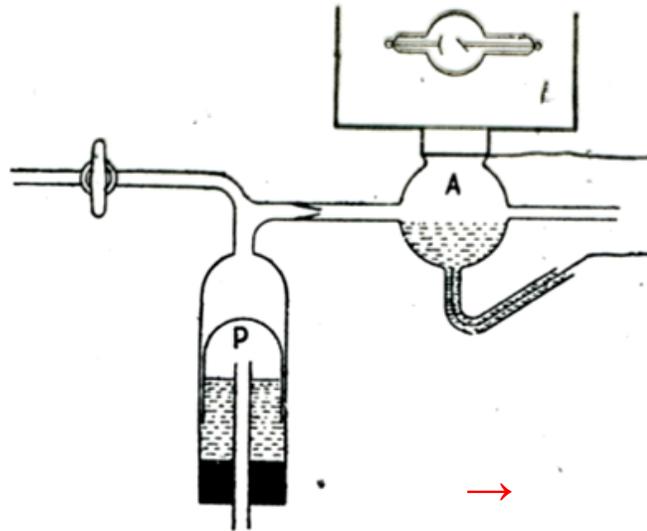


FIG. 1.

A: Gas ionizzato da sorgente Raggi X

Espansione adiabatica realizzata con pistone P

IN PRATICA: n_{ioni} ?

Abbassa bruscamente il pistone P \rightarrow aumenta il volume complessivo \rightarrow Si abbassa T in A \rightarrow Si forma la nebbiolina \rightarrow si misura v (quindi a), $M(\text{acqua}) \rightarrow M_{\text{acqua}} = \frac{4}{3} \pi a^3 n_{\text{gocce}}$ (**)

(**) $\rightarrow n_{\text{gocce}} \rightarrow n_{\text{ioni}}$

A questo punto, conoscendo $Q_{\text{tot}} \rightarrow Q_{\text{ione}} = Q_{\text{tot}} / n_{\text{ioni}}$ (*)

$Q_{\text{totale}}?$

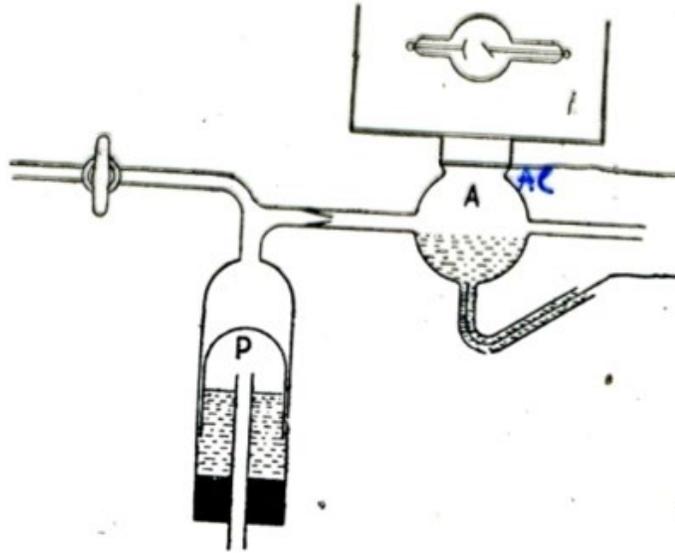


FIG. 1.

Misura la corrente I che, sotto una debole f.e.m. (E) passa in A tra la superficie dell'acqua e la placca (A) che forma la parete superiore del recipiente.

$n = n^\circ$ ioni (+,-) $\times \text{cm}^3$ u = mobilità media (+,-) con f.e.m. = 1 Volt:

$$I = ne u E$$

I, u, E note $\rightarrow ne = Q =$ carica ioni per unità di volume = Q_{totale}



$$Q_{\text{ione}} = Q_{\text{totale}} / n_{\text{ioni}}$$

J.J.(1898) → «cariche sugli ioni sono indipendenti dal tipo di gas e sono dello **stesso ordine di grandezza** della carica dell'atomo di H nell'elettrolisi, ossia $\approx 6.3 \cdot 10^{-10}$ u.e.s



STESSA CARICA alla base di più fenomenologie **MA** che conclusione su legame tra questa carica e la carica del «corpuscolo»?

NESSUNA:

- 1) carica misurata = valor medio carica ioni (+) e ioni (-)
- 2) impossibilità al momento di identificare ione (-) con il «corpuscolo»

Per J.J. → Cercare nuova fenomenologia
interpretabile in termini di «corpuscoli» t.c

- misura di «e» (con il nuovo metodo messo a punto)
- misura «e/m» (analogamente ai raggi catodici)

Prima fenomenologia individuata:

«EMISSIONE FOTOELETTRICA».

Effetto fotoelettrico: **Primo risultato importante (1888)**: esperimenti di Hallwachs, Elster e Geitel, Righi, Stoletow:

“Una lastra di Zn o Al, isolata e illuminata da luce ultravioletta, se è caricata (-) perde la sua carica.; se e è neutra, diventa leggermente positiva; non esiste nessun effetto se, invece, è caricata (+)”

→ **“la luce u.v. non solo provoca l’emissione di carica (-) da una lastra (-), ma causa anche l’espulsione di carica (-) da una lastra neutra”**

Altro risultato: (Heistel-Geitel, 1890) “nel vuoto, l’emissione di elettricità negativa dalla superficie illuminata è considerevolmente frenata da un forte campo elettrico».

Con la scoperta del «corpuscolo» interpretazione nuova dell’effetto fotoelettrico:

J.J.Thomson:

«La fuoriuscita elettricità negativa dalla lastra illuminata è fuoriuscita di «corpuscoli»

Quindi effetto fotoelettrico: possibile campo in cui cercare di misurare sia «q», che «q/m» del «corpuscolo»

1898: Attività al Cavendish Laboratory: Studio emissione Fotoelettrica

- A «basse pressioni la maggior parte dell'elettricità è trasportata da ioni gassosi negativi (corpuscoli) prodotti alla superficie della lastra di Zn illuminata
- Questi portatori di carica negativa» (corpuscoli) messi in un gas saturo con vapor d'acqua e soggetto a un processo di espansione adiabatica, analogamente agli ioni prodotti dai Raggi X, si comportano come nuclei di condensazione e ciascuno di essi può essere isolato in goccioline d'acqua



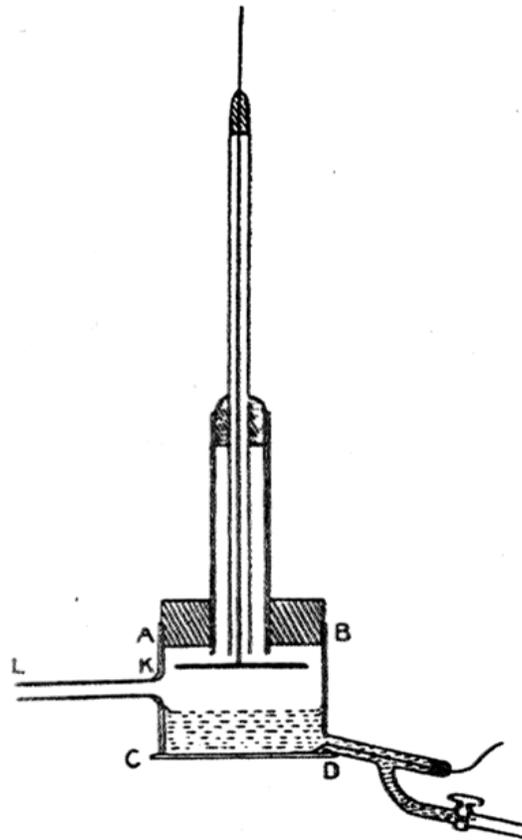
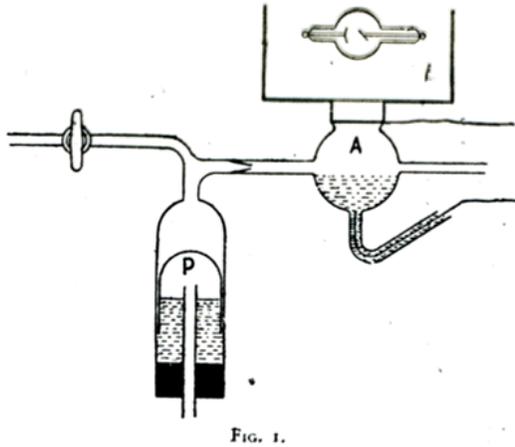
Fattibilità della misura di carica è garantita.

Da un lato conta il numero totale di gocce osservate, che corrispondono al numero di corpuscoli presenti, e dall'altro lato misura la carica totale presente.

Da questi due risultati calcola la carica di un singolo corpuscolo:

Misura di «e»

Apparato 1898



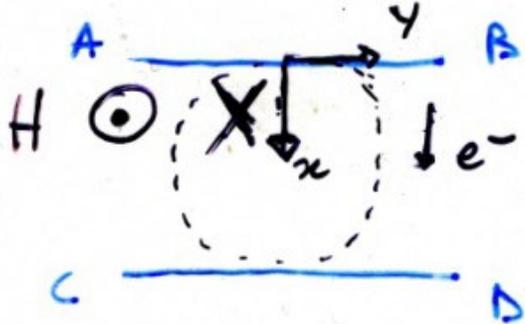
K= lastra Zn, diametro 3.2 cm, posta a 1.2 cm dalla superficie dell'acqua
CD= lastra quarzo, $d=0.5$ cm
Tubo LK: connessione all'apparato

Thomson's apparatus for measuring the charge of the *corpuscles* produced by ultraviolet light.

In aria: $e = 7.3 \cdot 10^{-10}$ u.e.s.; in H: $e = 6.7 \cdot 10^{-10}$ u.e.s.

«è dello stesso ordine di grandezza della carica trasportata dagli ioni prodotti dai Raggi X e di quella trasportata dallo ione H nell'elettrolisi»

m/e: proprietà campo magnetico parallelo alla lastra attenua l'emissione



H= campo magnetico,
X= campo elettrico
 $V_{CD} > V_{AB}$

Flusso di carica (-) da AB deviato:
cicloide: **$d=2Xm/eH^2$ (*)**

Distanza x tra AB-CD variabile da zero a 4mm.

Si misura il flusso di carica tra AB e CD, al variare della distanza x.

Quando il flusso va a zero, vuol dire che x è uguale al diametro d.

Misurando x, noti X, H, dalla (*)



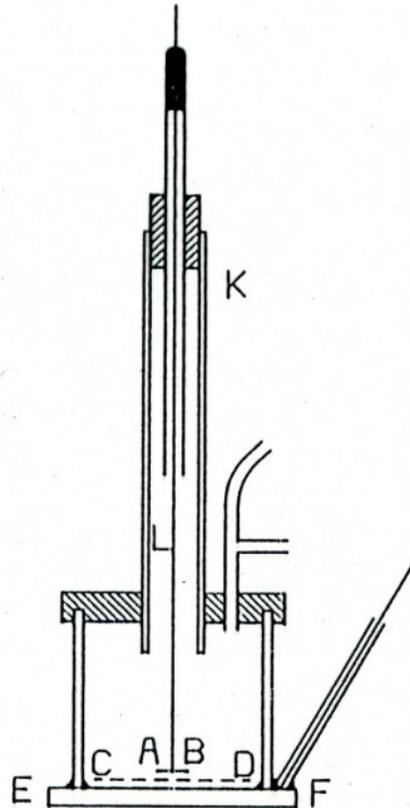
$m/e= 1.3 \cdot 10^{-7} \text{ gr/u.em}$

«Stesso ordine di grandezza del valore misurato per i raggi catodici»

AB= lastra di Zn, 1cm di diametro

Distanza massima AB, CD: 4mm
(d max molecole aria = 7.6mm)

Pressione: 1/100 mmHg



Identico valore di m/e → altro fenomeno legato alla scarica nei gas e interpretato da J.J. Thomson come «emissione di corpuscoli»:

«Emissione di carica negativa da un filamento incandescente di carbone in un'atmosfera di idrogeno a bassa pressione».

Apparato usato è stesso tipo di quello utilizzato per studiare l'effetto fotoelettrico, ma opportunamente modificato:

$$\mathbf{m/e = 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ gr/u.e.m.}}$$

«in accordo con i valori ottenuti per l'effetto fotoelettrico e per i Raggi catodici»

A questo punto Thomson → **«m» del corpuscolo**

«e» + «e/m» misurati con l'effetto fotoelettrico:



«m» dell'ordine di $3 \cdot 10^{-26}$ gr, «circa un millesimo della massa dello ione H»

JJ. Thomson (1899)

«Nella convezione di elettricità negativa a bassa pressione noi abbiamo qualcosa di più piccolo anche dell'atomo, qualcosa che implica lo splitting up dell'atomo, così che noi riusciamo a prendere da esso una parte, seppure molto piccola, della sua massa»

Da questo momento in poi, le indagini al Cavendish Laboratory sulla misura della «carica unitaria» «e», vengono proseguite, ma non in connessione al «corpuscolo», ma in un'ottica diversa:

Perfezionare la misura di «e» per giungere a una conoscenza di altre costanti di natura, prima fra tutte il numero di Avogadro.

INCISO: Per stimare il N° Avogadro (N):

Si parte dalla costante di Faraday(F) (Nota sperimentalmente) F = carica totale di una mole di cariche elementari («e») (ad es. ioni H nell'elettrolisi)

$$F = N e \rightarrow N$$

In realtà, già nel 1898, contemporaneamente a Thomson, e sotto la sua direzione, al Cavendish fu fatta un'altra misura di «e» da parte di **J.S. Townsend.**

Studia le proprietà elettriche dei gas rilasciati dall'elettrolisi dei liquidi: trasportano una carica e quando fatti «gorgogliare» attraverso un gas umido («moist gas») danno origine a una nebbia , dovuta al fatto che ogni ione si comporta come nucleo di condensazione

In particolare si interessa ai gas prodotti nell'elettrolisi dell'acido solforico [H₂SO₄] e della potassa caustica [KOH]

Studia la «nebbia» così prodotta con tre strumenti: una bilancia di laboratorio, un elettrometro, una macchina fotografica

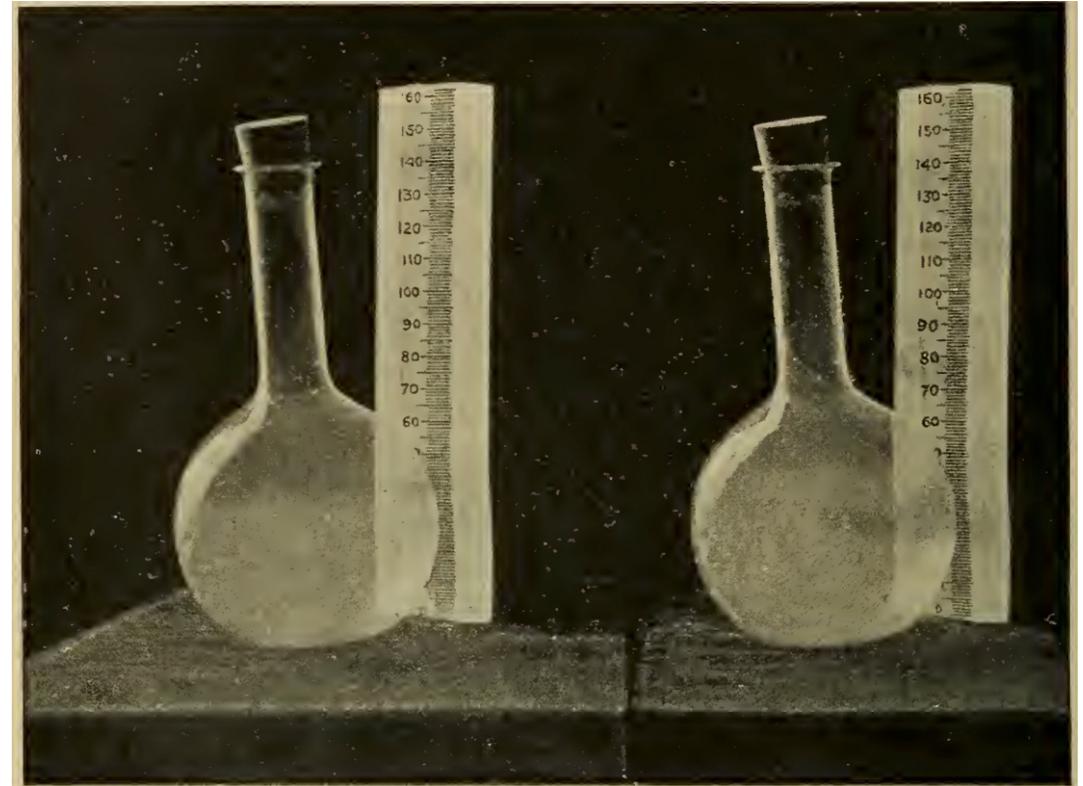
Fa due esposizioni (fotografie) a distanza di 3 minuti, mettendo dietro l'ampolla una scala graduata.

Vede che in tre minuti la nebbia è scesa di circa 10 mm. Calcola la **velocità di sedimentazione** e la uguaglia con la formula della velocità di sedimentazione data **dalla legge di Stokes** → raggio goccia «a» → peso goccia.

Divide peso della corrispondente nebbia (che ha misurato) per il peso della goccia → numero gocce per cm^3 .

Divide la carica per cm^3 (che ha misurato) per il n° gocce → carica su ogni goccia :

«e» media $\approx 3 \cdot 10^{-10}$ u.e.s



Nel 1903, sempre al Cavendish Laboratory, interviene sulla misura di «e», **H.A.Wilson** («A determination of charge on the Ions produced in air by Roentgen Rays») dando una svolta fondamentale a questo tipo di studi

Il metodo simile a quello di Thomson (1898,1899), basato sulla proprietà scoperta da C.T.R.Wilson che gli ioni prodotti in aria dai raggi Roentgen agiscono come nuclei di condensazione del vapor d'acqua quando viene prodotta, tramite una improvvisa espansione, una sovrasaturazione superiore a una definita quantità.

Però, a differenza di J.J.Thomson, aggiunge un campo elettrico e misura due velocità di sedimentazione della nebbia (una senza campo, v_1 e una con il campo, v_2). Il procedimento è identico a quello che verrà seguito da Millikan.

Ipotizzando che una goccia contenga uno ione e che quindi abbia una carica «e», dalla velocità di caduta v_1 determina la massa **m** della goccia, utilizzando la relazione [1] tra **m** e v_1 (già calcolata da J.J.Thomson nel 1899 sulla base della legge di Stokes)

$$m = 3.1 \cdot 10^{-9} v_1^{3/2} \quad [1]$$

Aggiunge un campo elettrostatico verticale X, così che la forza totale sulla goccia è:
 $Xe+mg$, (supponendo X nello stesso verso di mg).

«Poiché la velocità a regime di una sfera in un fluido viscoso è proporzionale alla forza che agisce su di essa, la velocità di caduta della goccia sarà alterata dal campo elettrico».

Sia ora v_2 (la nuova velocità)» Quindi abbiamo:

$$mg/ (mg+Xe) = v_1/v_2 \quad [2]$$

Usando l'equazione [1]: $m= 3.1 \cdot 10^{-9} v_1^{3/2}$

dalla [2] segue che :

$$e = 3.1 \cdot 10^{-9} (g/X) (v_2-v_1) v_1^{1/2} \quad [3]$$

Vantaggio del metodo: non è necessario calcolare il numero delle gocce nella nebbia, ovvero il numero di ioni presenti al momento della sua formazione. **Basta misurare le due velocità di sedimentazione**

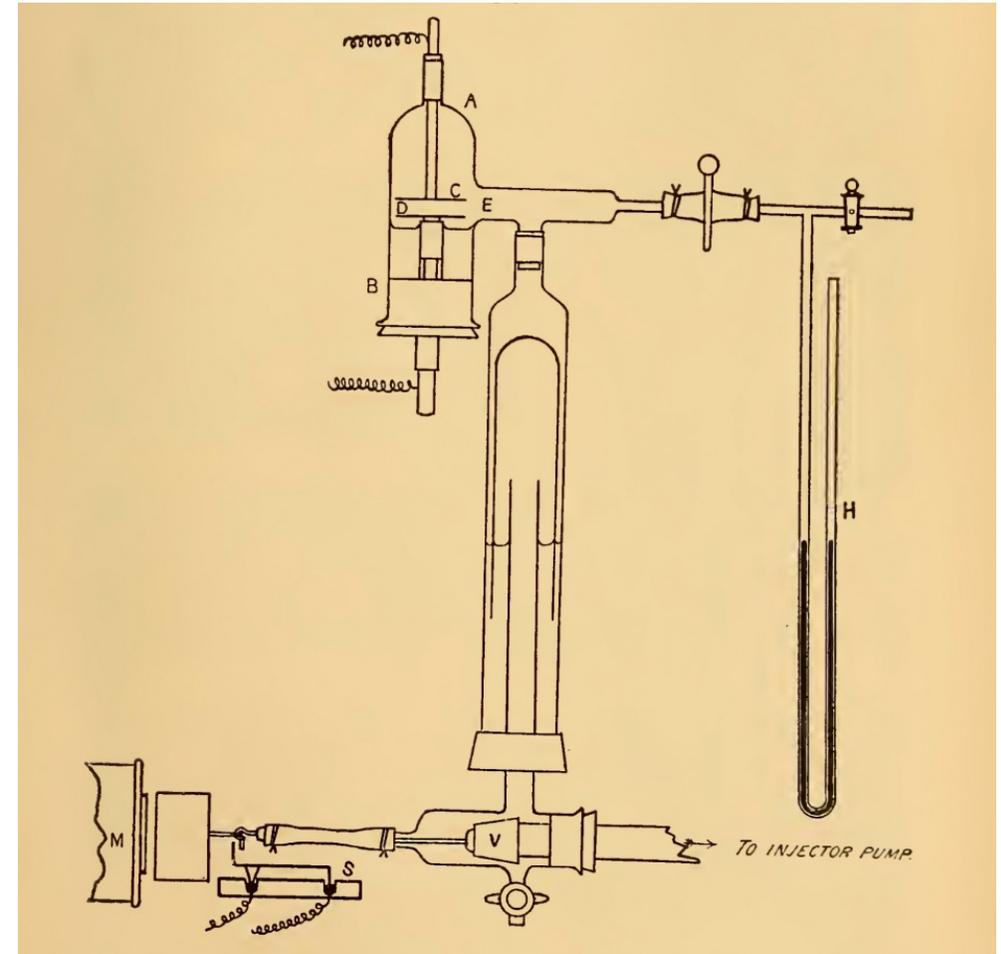
Tubo di vetro AB ($d=4\text{ cm}$; $l=10\text{ cm}$), in collegamento con apparato da **espansione**, tale che gocce formate solo sugli ioni (-). La **nebbia formata tra i dischi CD**, sottoposta a una **d.d.p.** fino a 2000 V.

Un sottile fascio di luce veniva fatto passare tra i dischi C e D per **illuminare la nube** e consentire che la superficie superiore potesse essere osservata.

Lo spazio sotto i dischi CD riempito d'acqua così che l'aria tra i dischi era satura di umidità.

Un tubo a raggi X posto nelle vicinanze in modo da ionizzare l'aria tra C e D.

Veniva fatta un'espansione improvvisa in modo da formare una nebbia e veniva misurato il tempo che la superficie superiore della nebbia impiegava nello scendere dal piatto superiore a quello inferiore e questo dava **v_1 , la «velocità di caduta senza campo elettrico».**



APPARATO di H.A.WILSON (1903)

Successivamente, l'esperimento veniva ripetuto, con la variante che, immediatamente dopo l'espansione, i **dischi C D** venivano **connessi alla batteria** e così veniva misurata **v_2 , la velocità di caduta con il campo elettrico.**

Problema dell'evaporazione → necessità di fare le misure velocemente.
Quindi il campo messo nella direzione che accelerasse la caduta.

Altro metodo di sperimentazione usato: misurare la velocità di caduta prima con il **campo in una direzione (v_2)**, poi nella **direzione opposta (v_3)**

Quindi: $(mg+Xe)/(mg-Xe) = v_2/v_3$.

In questo caso:

$$e = (3.1 \cdot 10^{-9}) / (2 \cdot 3/2) (g/X) (v_2 - v_3) (v_2 + v_3)^{1/2}$$

11 Sets di misure, di v_1 e v_2 , variando la distanza tra le lastre e il valore del campo:

«Risultato medio dei presenti esperimenti: $e = 3.1 \cdot 10^{-10}$ u.e.s. »

PUNTO IMPORTANTE: Si accorge che «Quando non veniva applicato alcun campo, l'intera nebbia cadeva alla stessa velocità e la sua superficie superiore era netta. Non è stato rilevato alcun segno di separazione in serie. Quando il campo veniva applicato, la nebbia scendeva più velocemente di prima... Dopo pochi secondi la superficie della nebbia iniziava a separarsi in due; evidentemente alcune parti della nebbia cadono più velocemente delle altre. La linea di separazione tra i due set era abbastanza netta. A volte sono stati osservati tre sets.»

Spiegazione: «quando si forma la nebbia alcune delle goccioline contengono più di uno ione e quindi i tre sets corrispondono a goccioline con numero di cariche diverse»

«Se supponiamo che le goccioline nei tre insiemi abbiano tutte le stesse dimensioni, **ma abbiano cariche diverse**, allora è facile calcolare queste cariche.»

Misura le corrispondenti velocità di caduta e calcola le corrispondenti cariche, che risultano:

«Set principale», carica per gocciolina: $2.04 \cdot 10^{-10}$ u.e.s;

«Secondo set»: $3.94 \cdot 10^{-10}$ u.e.s;

«Primo set»: $6.94 \cdot 10^{-10}$ u.es

CONCLUSIONE

« Pertanto, se il set «principale» ha uno ione per gocciolina, il «secondo» ne ha 2 e il «Primo» ~ 3 .

Neppure per un attimo ha il dubbio che le cariche misurate non siano un multiplo intero della carica unitaria, cioè il massimo comune divisore dei tre valori ricavati.

A questo punto avrebbe potuto assumere come «carica unitaria» questo valore, ma non lo fa (si ferma al precedente risultato di «e»).

Questa procedura verrà seguita invece da Millikan.

Dicembre 1907: Primo intervento di **Millikan, con Mr L.Begeman** (tecnico di laboratorio) al Chicago Meeting della Physical Society «On the charge carried by the negative ion of an ionized gas.».

Si conosce solo l'abstract, che è molto corto ed ermetico. Dicono che il loro obiettivo: discutere sorgenti di errori nelle precedenti stime di «e» ed eliminarle. Però non viene esplicitato come (essendo un abstract). Dichiarano che **il metodo è essenzialmente quello usato** da H.A.Wilson.

A differenza di Wilson, per ionizzare il gas, (non viene specificato che gas) usano il Radio. Usano un telescopio micrometrico a fuoco corto. Fanno 10 sets di misure, variando la d.d.p. applicata.

Otengono come valore medio di «e»: **$4.03 \cdot 10^{-10}$ u.e.s.**

A distanza di quasi due anni, (23 ottobre 1909) **Millikan**, questa volta da solo, presenta al Princeton Meeting della Physical Society il lavoro «**A new modification of the cloud method of measuring the elementary electrical charge, and the most probable value of that charge**», che verrà poi pubblicato in forma estesa e con lo stesso titolo sul Phil.Mag del 1910.

Motivazione: «Tra tutte le costanti fisiche ce ne sono due che sono di importanza fondamentale, La velocità della luce e la «carica elettrica elementare». Mentre la prima è nota con una precisione di una parte su 20.000, la seconda è molto incerta.»

Quindi obiettivo: **determinare valore della «carica elementare» con grande precisione.**

La modifica più importante è quella di fare «**osservazioni non sulla superficie della nebbia, ma su singole gocce isolate che portano cariche multiple**».

Il riferimento all'osservazione di Wilson sulla possibilità di avere ioni con cariche multiple è chiaro.

Per ridurre il problema dell'evaporazione, osserva la caduta delle gocce attraverso distanze più corte e per tempi più brevi.

Millikan accumula su una stessa goccia, a rotazione, più cariche e misura le corrispondenti velocità di caduta. Determina la carica presente ogni volta.

Parte dall'assunto che esista una «carica elettrica elementare» e **che tutte le cariche misurate siano multipli interi di questa carica**, così come veniva unanimamente riconosciuto, a partire già da Stoney nel 1871 e come aveva già mostrato H.A. Wilson, senza dargli troppa importanza, perché considerato scontato...).

Considera quindi questa carica il massimo comune divisore delle cariche misurate.

Pertanto, dividendo le cariche misurate per questo valore, stabilisce quante «cariche elettriche fondamentali» sono presenti nelle varie gocce.

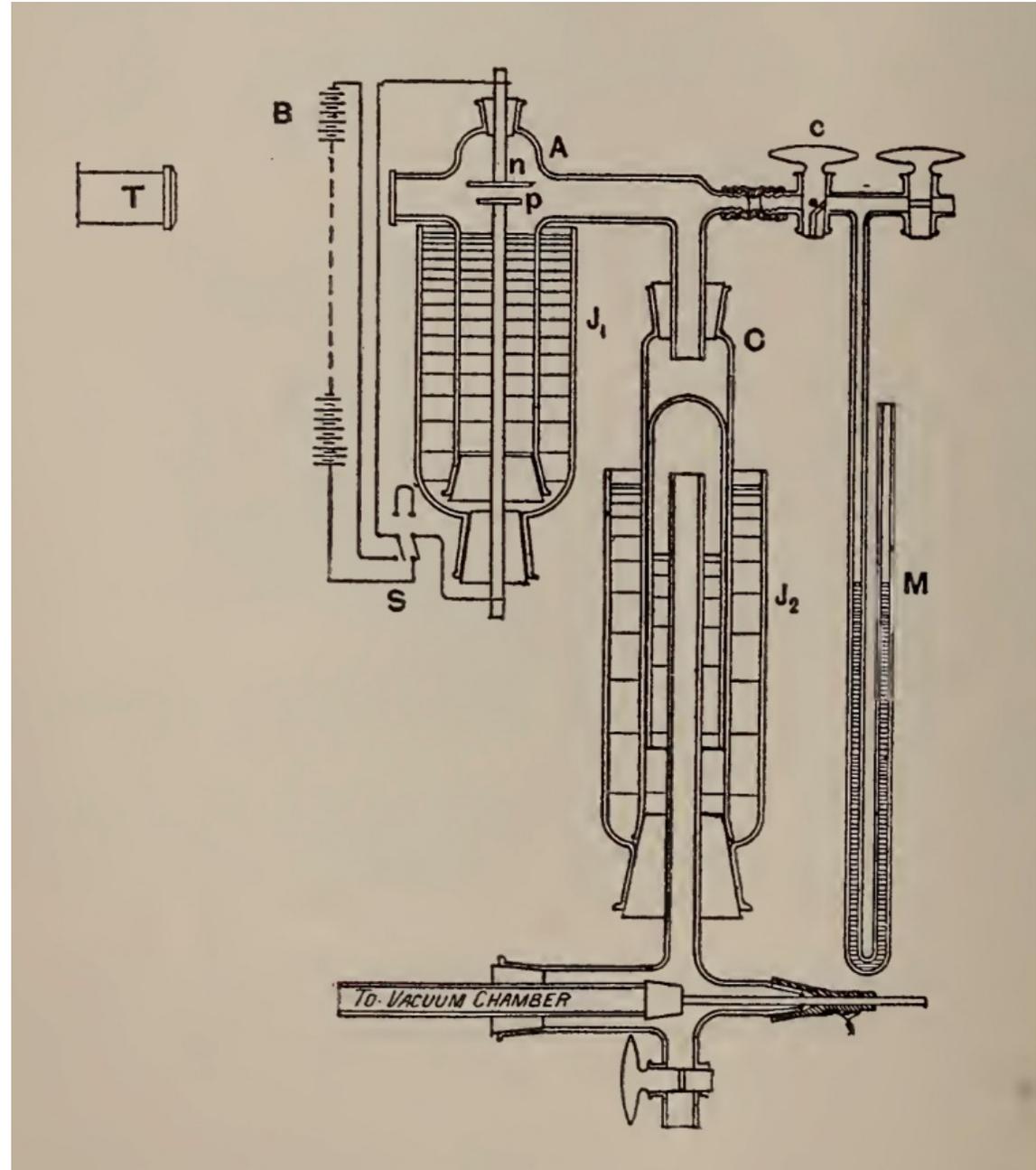
Apparato Millikan (1910)

Apparato simile a quello di H.A. Wilson.
Impianto per espansione adiabatica,
collegato alla zona di osservazione
(tra le armature «n» e «p»).

Tra queste è applicato un campo
elettrico.

T= telescopio con cui studiare una
singola goccia.

Varia la distanza tra le armature, varia il
campo, usa come sostanze con cui
formare le gocce alcool e acqua



In totale fa 38 osservazioni suddivise in 6 gruppi, ognuno **per ciascuna «carica multipla» studiata**, e per ognuna di esse **ne calcola il valore**, usando la stessa formula di Wilson [2], che lega la velocità v_1 della goccia in assenza di campo elettrico a quella, v_2 , in presenza del campo elettrico (X):

$$mg / (mg + Xe) = v_1 / v_2 \quad [2]$$

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

MA correggendo la costante $3.1 \cdot 10^{-9}$ sulla base di nuove misure sulla viscosità, in **$3.422 \cdot 10^{-9}$** per l'acqua e in **$3.353 \cdot 10^{-9}$** per l'alcool.

I valori delle sei cariche studiate da Millikan: sono (10^{-10} ues) :
13.85; 18.25; 9.284; 24.14; 9.742; 28,16 :

«Si osserverà che **l'unica carica elementare possibile** di cui le cariche osservate sono multipli è **$4.65 \cdot 10^{-10}$** , e inoltre che le cariche misurate rappresentano tutti i possibili multipli di questa carica tra 2 e 6. Questo mostra che la carica elementare non può essere la carica più piccola che abbiamo osservato: vale a dire, $9.3 \cdot 10^{-10}$ poiché abbiamo ottenuto multipli della metà di questa quantità, sia dispari che pari.

Inoltre, la carica elementare non può essere un sotto-multiplo (es. metà) di $4.65 \cdot 10^{-10}$, perché allora le cariche rappresenterebbero solo multipli pari di questa carica elementare, e non c'è motivo perché multipli dispari non sono stati osservati».

Questo è l'unico punto in cui parla della molteplicità della carica.

Quindi si sente giustificato a prendere per «e» il massimo comune divisore e sulla base di questo valore stabilire il numero delle cariche sulle varie gocce.

Un valore di «e» molto simile (**$4.66 \cdot 10^{-10}$**) veniva trovato da «Mr. Begeman con «il metodo regolare di Wilson» e studiando «gli spessori» (layers) corrispondenti alle cariche multiple

A distanza di poco più di un anno (1911) interviene nuovamente **Millikan**, ormai sempre da solo, con il suo **famoso esperimento con la goccia d'olio**.

« The isolation of an ion, a precision measurement of its charge, and the correction of Stokes's Law ».

Lo schema dell'esperimento è sostanzialmente quello inventato da H.A. Wilson e adottato in precedenza da Millikan, anche assieme a Begeman.

Il grande salto di qualità è che ora **non viene più studiata una goccia d'acqua o di alcool, creata da una espansione adiabatica**, ma viene usata **una goccia d'olio, cioè una goccia di una sostanza non volatile, prodotta direttamente da un vaporizzatore**,

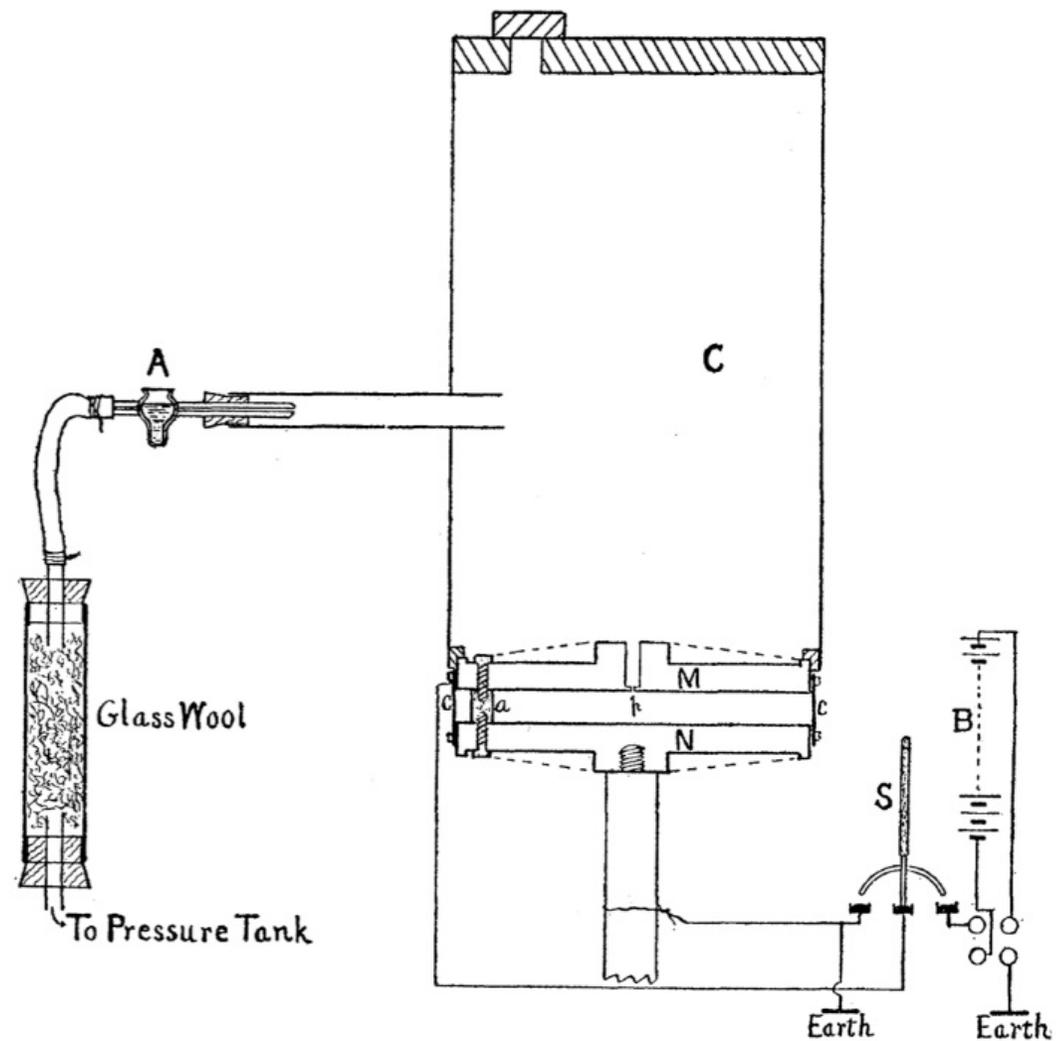
con il grande vantaggio di **eliminare una serie di errori**, legati soprattutto all'evaporazione dell'acqua, e di poter **«tenere sotto osservazione per una lunghezza indefinita di tempo»** la goccia in esame.

Tramite un «**nebulizzatore commerciale**» (questo metodo «già introdotto da J.Y.Lee per studiare il moto browniano nel 1908») veniva prodotta nella camera C una nube di piccole gocce d'olio (esse si caricavano per attrito, all'uscita del nebulizzatore).

Una o più di queste gocce, attraverso un piccolo foro «p», venivano fatte cadere nello spazio tra le armature M e N (distanti 16 mm) di un condensatore piano, dopo di che il foro veniva chiuso.

Illuminando opportunamente l'apparato, «l'aspetto della goccia era quello di una stella luminosa su uno sfondo nero».

Un campo elettrico (3000 - 5000 V) poteva essere messo e tolto tra M e N.



Millikan utilizzava anche in questo caso la relazione tipo [2], ricavata da H.A.Wilson, che legava la velocità v_1 della goccia in assenza di campo elettrico a quella, v_2 , in presenza del campo elettrico (F), tenendo conto questa volta anche **della spinta di Archimede.**

Sulla base della legge di Stokes, ricavava v_1 , cioè la velocità di caduta di una goccia di raggio a , di densità σ in un mezzo di densità ρ e di coefficiente di viscosità dinamica μ , sotto l'azione della gravità:

$$v_1 = (2/9) (ga^2 / \mu) (\sigma - \rho).$$

e da questa ricavava per e_n l'espressione (4)

$$e_n = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\mu}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{g(\sigma - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(v_1 + v_2) v_1^{\frac{1}{2}}}{F} \quad [4]$$

Questo nuovo sistema della goccia d'olio, dava, secondo Millikan i seguenti vantaggi:

1) «era possibile» catturare su una piccola goccia d'olio e tenerla sotto osservazione per un tempo indefinito un singolo ione o qualsiasi numero desiderato di ioni, **tra 1 e 150**.

2) «dare una dimostrazione diretta e tangibile della correttezza della concezione avanzata molti anni fa e supportata dalle prove provenienti da molte fonti, che **tutte le cariche elettriche, comunque prodotte, sono multipli esatti di una definita carica elementare**, o, in altri termini, che la carica elettrica invece di essere diffusa uniformemente sopra la superficie carica, ha una struttura granulare, costituita da un numero esatto di granelli o atomi di elettricità, tutti esattamente uguali, posti sulla superficie del corpo carico».

3) Determinare **con esattezza il valore della carica elettrica elementare**, che è esente da ogni discutibile ipotesi teorica ed è limitato nella precisione solo da quello ottenibile nella misura del coefficiente di viscosità dell'aria.

«Le osservazioni sulla stessa goccia venivano fatte in genere per periodi a volte fino a quattro ore e mezza, cambiando il valore del campo e **facendola muovere in su e in giù** (invertendo il campo)».

«La caratteristica essenziale del metodo consisteva nel **cambiare ripetutamente** la carica su una goccia tramite la cattura di ioni dall'aria (per aumentare il numero di ioni presenti, veniva posto nelle vicinanze anche **un tubo a Raggi X**) e quindi ottenere una serie di cariche con ciascuna goccia».

[Procedimento già seguito in precedenza con le gocce d'acqua!]



Cariche usate da 1 fino a 150:

“La più piccola quantità di elettricità capace di esistenza separata” :
 $e = 4.901$ con un errore del 0.2 %

Millikan 1913 «**On the elementary electrical charge and the Avogadro constant**»

Obiettivo: introdurre alcuni miglioramenti nel metodo della goccia d'olio per determinare «**e**» ed «**N**» « in modo da **ottenere una precisione più elevata** di quanto non fosse prima possibile **nella valutazione di queste costanti fondamentali.**»

«I miglioramenti introdotti riguardavano il sistema ottico, una nuova disposizione per misurare le velocità e le pressioni; l'eliminazione» più perfetta» della convezione; «la prova sperimentale della correttezza di tutte le ipotesi alla base del metodo, vale a dire (a) che una carica non altera la resistenza del mezzo sul corpo carico; (b) che le gocce d'olio agiscono come sfere solide. Veniva poi introdotta una nuova espressione, sulla base della legge di Stokes, per il calcolo di «e» che teneva conto del raggio della goccia.

Con questi perfezionamenti, attraverso un **lavoro certosino**, che aveva coinvolto lo studio di circa un centinaio di gocce, nelle più disparate condizioni, con gocce contenenti fino a 58 cariche e per tempi a volte di 60 giorni consecutivi con la stessa goccia, giungeva ai valori:

$$e = 4.774 \pm 0,009 \cdot 10^{-10}$$

$$N = 6.062 \pm 0,012 \cdot 10^{23}$$

“La differenza tra questi ultimi valori e quelli originariamente ricavati con il metodo della goccia d’olio , cioè $e = 4.891$ ed $N=5.992$ è dovuta allo **studio più elaborato e più prolungato nel tempo....** La differenza principale è dovuta all’**eliminazione dei difetti del sistema ottico originale**».

Sembra, insomma, che il problema di Millikan sia la precisione della misura di «e».

Non a caso alla fine dell'articolo si confronta con le stime recentemente fatte da altri, con nuovi metodi nel frattempo messi a punto.

« A quanto mi risulta, al momento **non esiste alcuna determinazione di e o di N con qualsiasi altro metodo che non implichi un'incertezza almeno 15 volte più grande di quella rappresentata nelle misure sopra riportate.**

In particolare il metodo radioattivo di **Regener** (1909) porta a una stima di «e» con un'incertezza del 3%. Il metodo fondato sul moto browniano porta a risultati che oscillano tra il "valore" di **Perrin** (1911) $e = 4,24 \cdot 10^{-10}$ e il valore di **Fletcher** (1911), $5,01 \cdot 10^{-10}$ Il metodo di radiazione di **Plank** (1913) porta a un errore dello 0.5 %. Altri metodi hanno un limite di accuratezza del 3 per 100. I risultati medi di ciascuno dei precedenti tre metodi (quelli più precisi) cadono bene entro i limiti del valore trovato con il metodo della goccia d'olio»

Con questi risultati, l'obiettivo di Millikan sembrava raggiunto e la sua missione conclusa!

Stoney, Helmholtz: **Esistenza di una «carica elementare» associata a ione monovalente**

Stoney: **Prima misura indiretta della «carica elementare» associata agli ioni (»elettrone«)**

Thomson (1898) **Prima misura diretta della «carica elementare» associata agli ioni**

Thomson (1903), Wilson (1903), Millikan- Bergnau (1908), Millikan (1910), Millikan (1911)

Millikan (1913) **misura diretta sempre più precisa della «carica elementare», associata agli ioni.**

(Millikan non parla MAI di «carica dell'elettrone», ma solo di «carica elettrica elementare»).

La prima vera misura diretta della carica dell'elettrone («corpuscolo»), inteso come particella subatomica, dotata di una propria carica e di una propria massa è quella di J.J.Thomson (1899):

Misura «obbligatoria», realizzata come parte integrante di una scoperta («corpuscolo»).

(Misurando «e», una volta misurato e/m, riesce a stimare «m» e quindi a caratterizzare il «corpuscolo» e a dimostrare «l'esistenza di masse molto più piccole dell'atomo»)

Questo filone di ricerca, nato dallo studio dei raggi catodici e sfociato in una misura sempre più precisa della “carica elementare” ha portato a Tre Premi Nobel

Motivazione premio Nobel per la Fisica: P.Lenard (1905):

"for his work on cathode rays."

Motivazione premio Nobel per la Fisica: J.J.Thomson (1906)

"in recognition of the great merits of his theoretical and experimental investigations on the conduction of electricity by gases.“

Motivazione premio Nobel per la Fisica: Millikan (1923)

"for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect.".

IN NESSUN PREMIO SI FA RIFERIMENTO ALL'ELETTRONE

$$\frac{1 \text{ u.e.s.}}{1 \text{ u.e.m.}} \approx 3 \cdot 10^{10}$$

$$\frac{\text{u.e.s.}}{\text{Coul.}} = 3 \cdot 10^9$$

$$\text{J.J. Thomson (1899)} \left\{ \begin{array}{l} 2.2 \times 10^{-19} \text{ Coul.} \\ \text{vs} \\ 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coul.} \end{array} \right.$$

→ $\frac{e}{m}?$
60

INCISO

$$v_1 = 2ga^2/9\gamma \quad m = 4/3 \pi a^3$$

SEGUE:

$$a = (9 \gamma v_1 / 2g)^{1/2}$$

SEGUE:

$$m = 4/3 \pi (9 \gamma v_1 / 2g)^{3/2}$$

SEGUE:

$$m = 3.1 \cdot 10^{-9} v_1^{3/2}$$