

L'esperimento di Millikan

Materiale utilizzato:

- Lastre metalliche con tubicino di vetro
- Microscopio
- Batterie
- Scala graduata
- Orologio
- Tubo a raggi x
- Sferette di plastica per la microscopia elettronica
- Commutatore

Premessa teorica:

Scopo di questa esperienza, sarà riprodurre un esperimento simile a quello di Millikan eseguito nel 1909 per dimostrare che la carica si presenta in unità naturali e che essa è granulare e tutti i grani hanno la stessa grandezza di carica elettrica.

Prima di tutto però è importante descrivere gli strumenti utilizzati nell'esperimento, che è stato eseguito da Alfred G. Redfield della Watson scientific computing laboratory, e descritto da Francis Lee Friedman, professore di fisica presso il Massachusetts Institute of Technology.

È inoltre fondamentale descrivere il vero e proprio esperimento compiuto dal fisico e ingegnere statunitense Robert Millikan che riuscì a misurare per la prima volta il valore della carica elettrica dell'elettrone.

(Per il concetto di elettrone e la sua scoperta e per il tubo a raggi x vedi relazioni precedenti e relazione sul rapporto carica/massa dell'elettrone).

Carica elettrica

Il valore della carica elettrica dell'elettrone, corrisponde, come valore assoluto a $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, ma ha segno negativo e quindi in realtà corrisponde a $-1,6022 \cdot 10^{-19}$ C. Il Coulomb, unità di misura della carica elettrica, è definito come la carica elettrica che attraversa in un secondo un conduttore percorso dalla corrente elettrica di un ampere ($1C = 1A \cdot 1s$).

$1C$ corrisponde a circa $6,24 \cdot 10^{18}$ volte la carica di un elettrone.

Il valore della carica elettrica dell'elettrone, viene chiamato "**carica elementare**" in quanto rappresenta il più piccolo valore di carica elettrica.

Per questo motivo il valore della carica elettrica è usata come unità standard di riferimento per le cariche elettriche delle particelle subatomiche (protone ed elettrone).

L'esperimento di Millikan

Per eseguire l'esperimento, Millikan si servì di una prima camera dove venivano spruzzate delle **goccioline d'olio** finissime, le quali passavano attraverso un foro nella seconda camera, dove veniva applicata una **differenza di potenziale** attraverso un generatore: si osservava grazie ad un microscopio graduato il comportamento delle goccioline nella camera A.

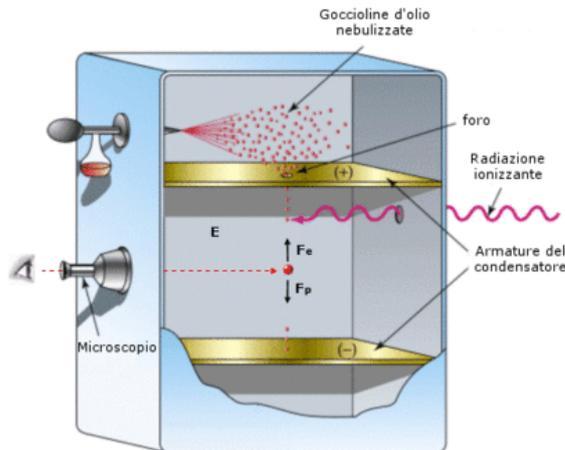
Si prevedeva che alcune goccioline si **elettrizzassero** per strofinio con cariche di entrambi i segni contro il tubo delle spruzzatore, nella camera A il loro comportamento era determinato dal segno di carica con cui erano state elettrizzate, dunque una gocciolina carica negativamente **accelerava** verso il basso mentre una carica positivamente poteva addirittura **invertire il verso del suo moto.**

In quanto le goccioline risentono della *forza di attrito viscoso dell'aria*, del *loro peso*, e della *differenza di potenziale*, è possibile determinarne la carica misurando nella velocità in quanto per il primo principio della dinamica deve essere:

$F_c = F_{\text{peso}} + F_{\text{attrito}}$ quindi $Eq = 6\pi\eta r v + mg$ e quindi la carica $q = (6\pi\eta r v + mg)s/V$

Dove η è la viscosità dell'aria, r il raggio della gocciolina, v la velocità misurata, m la massa della goccia, s la distanza tra le placche e V la tensione tra di esse.

Millikan noto che i valori misurati di q erano tutti multipli e sottomultipli di una carica fondamentale, quella dell'elettrone. In natura quindi la carica risulta quantizzata, assume solo un insieme di valori ben definiti.



Ecco un'immagine esplicativa dell'esperimento.

Chiariti questi concetti fondamentali, possiamo descrivere gli strumenti utilizzati da Alfred Redfield per eseguire l'esperimento, dove porterà delle cariche su due lastre tramite delle batterie: una positiva su una lastra, una negativa sull'altra, ciò produrrà una forza elettrica fra le lastre su ogni granello di carica che emerremo tra esse. Servirà un oggetto molto piccolo per portare i grani di carica poiché lo scopo è quello di misurare la forza sulla più piccola quantità di carica, dunque servirà un microscopio per vederli.

Le lastre metalliche

Fondamentali per la realizzazione dell'esperimento saranno le due lastre metalliche sottostanti con un tubo di vetro:



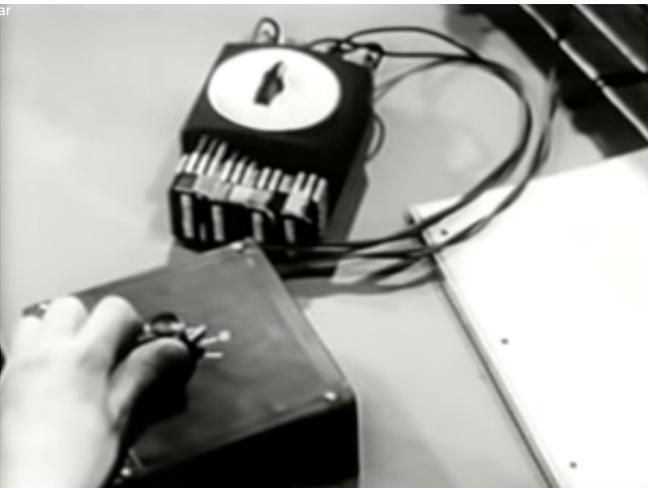
Le due lastre distano circa 3,1 mm tra loro e presentano un tubicino di vetro inserito con un foro sul fondo, dove quindi scenderanno alcune particelle spruzzate nel tubo. (Nel nostro caso si tratterà di sferette di plastica molto piccole per la microscopia elettronica dal peso di $2,8 \cdot 10^{-14}$ N)

È necessario sottolineare il fatto che il fondo del tubo è in metallo e una volta inserito arriva perfettamente in piano con la lastra metallica superiore.

In questo modo si può ottenere una situazione elettrica ben definita con cariche sulla lastra superiore e cariche sulla lastra inferiore che esercitano forze sui pochi grani di carica presenti sulla sferetta entrata nello spazio passando attraverso il foro.

Servirà in seguito **sorgente di luce** che illumina lo spazio tra le due lastre connesse con i fili alle batterie, che sono 4, e attraverso una **manopola** se ne può inserire un numero qualunque da 1 a 4.

Con un **commutatore** si possono connettere le batterie alle lastre. Quando questo è in posizione superiore, un capo della batteria è connesso ad una lastra, l'altro all'altra lastra. Quando è in posizione inferiore il collegamento è invertito e in posizione centrale la batteria è esclusa. Le lastre sono legate tra loro e così non c'è una forza elettrica su una particella nel mezzo.



Ecco in alto la manopola per inserire le batterie, e in basso il commutatore.

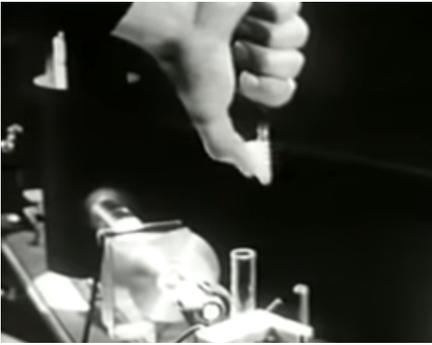
Spiegato il funzionamento di questi strumenti principali utilizzati da Redfield, possiamo passare alla vera e propria esecuzione dell'esperimento, che possiamo suddividere in due parti. Infatti prima dell'esperimento vero e proprio, Redfield compirà un altro esperimento per comprendere al meglio ciò che accade alle sferette che entrano tra le due lastre metalliche.

Esecuzione dell'esperienza:

Prima di tutto Redfield fa passare un filo nel foro del tubo e fra lo spazio delle lastre metalliche per mettere a fuoco il microscopio. In seguito con una scala graduata, misura lo spazio visibile dal microscopio: 1 mm circa.



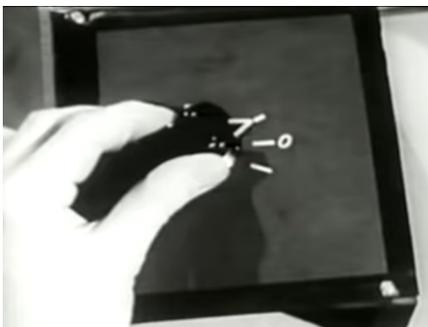
Successivamente da una sospensione in acqua prende delle sferette da inserire nel tubo di vetro con uno spazzolino e le spruzza sul tubo, che presenta l'estremità superiore aperta.



Alcune sferette scenderanno nel foro del tubo di vetro fino ad arrivare nello spazio fra le lastre. Osservandole con il microscopio si nota che queste cadono verso il basso a velocità costante tirate dalla gravità.



In seguito Redfield, utilizzando la manopola del commutatore, mette un po' di cariche sulle lastre. Alcune delle particelle sono cariche infatti sono tirate verso l'altro dalla forza elettrica. Girando la manopola dalla parte opposta, quindi invertendo la carica, alcune cadono, alcune salgono ma non sono le stesse di prima.



Questo significa che ci sono due gruppi di particelle con carica opposta sicchè quando una sale l'altra scende e viceversa. Ogni volta ciascuna particella si muove però con una sua velocità costante.

Osservando nuovamente le particelle tirate verso il basso dalla sola gravità queste accelerano e mentre accelerano la resistenza dell'aria aumenta rapidamente fino a esercitare una forza uguale e opposta a quella esercitata dalla gravità.

Quando le due forze sono uguali, le particelle si muovono uniformemente, ma questo processo di accelerazione è molto difficile da vedere. Ciononostante si notava che le velocità erano costanti ed erano differenti per differenti particelle.

Queste differenze nascevano dal fatto che le particelle erano diverse di tipo, grandezza, massa e forse anche di carica. Per evitare parte delle differenza e disporre di un comportamento uniforme, Redfield si serve di particelle di di dimensioni di massa costante.

Disponendo di particelle tutte uguali, ogni differenza di comportamento che rimane deriva solo dal fatto che c'è un diverso numero di grani di carica sulle particelle.

Le particelle in questione sono le sferette di plastica citate nella premessa teorica, di peso $2,8 \cdot 10^{-14}$ N e diametro di $1,8 \cdot 10^{-6}$ m.



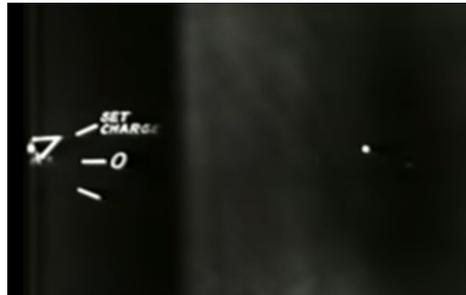
Facendole passare attraverso il foro del tubo di vetro e quindi tra le lastre metalliche, si notava che queste piccole sfere di plastica cadevano per effetto della gravità e scendevano tutte alla stessa velocità.

Successivamente Redfield prova ad equilibrare le sfere mettendo la giusta quantità di carica sulle lastre. Se ne aggiungeva troppa, le particelle si muovevano verso l'alto, diminuendo il numero di batterie le aveva quasi equilibrate e si potevano notare due sferette.



Si può tenere conto solo della sferetta a destra perché il moto browniano finisce per separare le due sferette.

In seguito Redfield segna sulla manopola la posizione in cui le due sferette stanno in perfetto equilibrio in modo da poterla ritrovare esattamente, ed essa corrisponde quasi esattamente a tre batterie inserite. Questa quantità di carica sulle lastre è chiamata carica di equilibrio (set charge). Sappiamo così che con la carica di equilibrio sulle lastre, una sfera che porti la quantità di carica di questa sarà in equilibrio.



Togliendo la carica dalle lastre, eliminando la forza elettrica, si fa cadere la sfera. Impostando la carica di equilibrio, si riesce a farla fermare. Essa si trova in equilibrio in tutto il campo visuale del microscopio.

Per poter lavorare con questa sfera è necessario tirarla verso l'alto, infatti Redfield aggiunge altre batterie.

Quando la manopola del commutatore si trova nella posizione più alta, le batterie addizionali sono inserite, e sulle lastre c'è più carica, quindi la sfera è tirata verso l'alto. Possiamo riassumere il comportamento della sfera in questo modo:

Non c'è carica sulle lastre=la sfera cade.

Carica di equilibrio= la sfera sta ferma.

Carica addizionale= si muove verso l'alto.

Con questa tecnica si può mantenere la particella nel campo del microscopio durante l'esperimento (simile a quello di Millikan), nel quale verrà cambiata la carica sulla sfera.

Ora osserviamo come è possibile misurare la carica aggiunta o sottratta quando viene cambiata la carica sulla sferetta.

Quando la sfera sta ferma la forza elettrica diretta verso l'alto è uguale alla forza di gravità che è però diretta verso il basso.

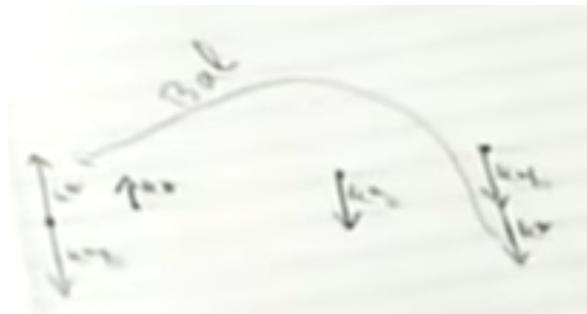
Quando cambiamo carica, interviene una **forza elettrica addizionale**, chiamata **forza efficace** che fa muovere la sfera o verso l'alto o verso il basso. Sotto l'azione di questa forza la sfera accelera arrivando ad avere una velocità costante quando la resistenza dell'aria farà equilibrio spingendo in senso opposto.



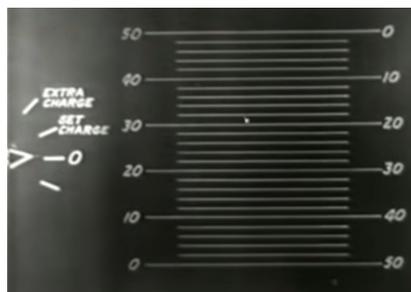
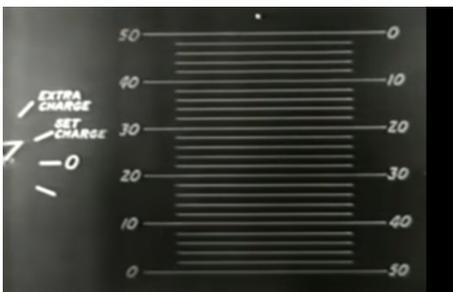
Questa velocità costante è una misura della forza addizionale efficace. Sappiamo che per queste sferette la forza risultante efficace produce una velocità del moto che è proporzionale alla forza stessa. Redfield andrà a verificare questa relazione.

Per la verifica si lascia cadere la sfera liberamente e dunque si misura la velocità in quanto la sfera è soggetta solo alla forza di gravità. Poi per avere una seconda forza nota e quindi per verificare la proporzionalità della velocità alla forza, Redfield utilizza la forza elettrica che tiene la sfera in equilibrio. Dunque considera questa forza elettrica che tiene la sfera e la rovescia, per poi sommarla alla forza di gravità. Per mezzo del commutatore tutto il sistema elettrico viene rovesciato.

In questo modo prima avevamo una certa forza, e ora una esattamente doppia, quindi la velocità con la prima forza, è esattamente la metà di quella con la seconda.

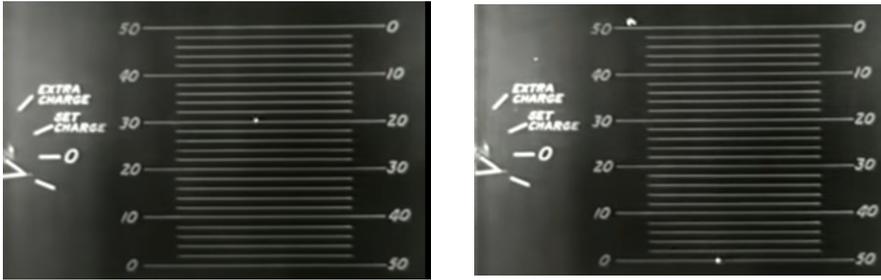


Redfield misura appunto con che velocità la sfera in equilibrio cade per la gravità, servendosi di un reticolo e di un orologio che batte intervalli di un secondo.



In 5 secondi la sferetta percorreva verso il basso 23 divisioni del reticolo. In una seconda misurazione sempre in 5 secondi, ne compiva 24.

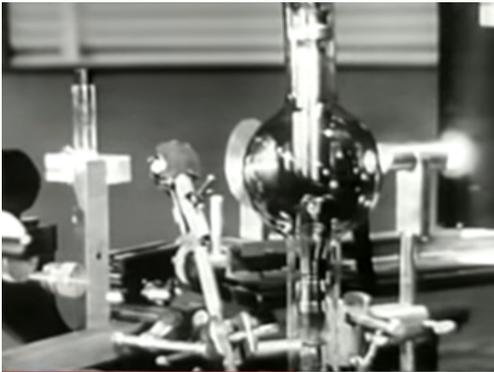
Redfield compie lo stesso procedimento invertendo però la forza e in una prima misurazione in 5 secondi venivano percorse 48 divisioni, in una seconda prova i valori erano esattamente gli stessi: 48 divisioni in 5 secondi.



Dunque Redfield dimostra che la forza e la velocità sono direttamente proporzionali, poiché quando la forza raddoppia, raddoppia anche la velocità. Dimostrato che forza e velocità sono proporzionali, nell'esperienza vero e proprio, si utilizzerà la velocità come misura della forza.

Dopo questo primo esperimento con il quale Redfield ha chiarito come varia il movimento della sferetta e con il quale ha dimostrato che la forza e la velocità sono effettivamente direttamente proporzionali, possiamo passare al vero esperimento.

Redfield con un tubo a raggi X cambierà la carica sulla sferetta, ma per proteggersi posiziona attorno al tubo uno schermo con un'apertura che permette ai raggi X di raggiungere lo spazio tra le due lastre metalliche.



Se i raggi cambiano la carica sulla sfera, la carica aggiunta cambierà la forza, alterando l'equilibrio. E dalla velocità con cui si muove, possiamo scoprire di quanto la carica è cambiata.

Applicando i raggi X ad una sfera in equilibrio per cambiare la carica, Redfield nota che essa si muove, questo perché è la carica sulla sfera ad essere cambiata, mentre la carica sulle lastre che la tira verso l'alto è sempre la stessa.

In seguito la fa scendere per poter misurare la carica aggiunta dalla velocità con cui risalirà.



La sferetta percorre 12 divisioni in 5 secondi. Ciò significa che la forza addizionale la fa salire verso l'alto di 12 divisioni in 5 secondi.

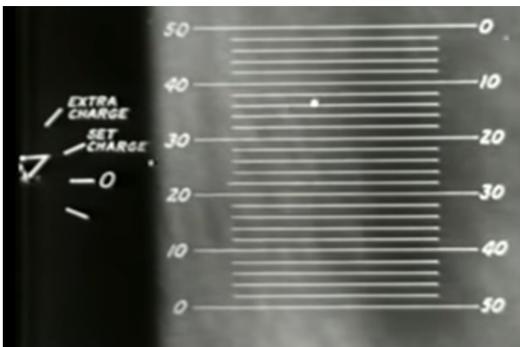
Redfield prova a cambiare la carica così da poter misurare la nuova carica. La sfera questa volta percorre 22 divisioni in 5 secondi. Quindi la carica era aumentata.

Cambiando ancora la carica, la sfera compie 46 divisioni sempre in 5 secondi, dunque la carica è aumentata ancora.

Redfield cambia la carica un'ulteriore volta e questa volta osserva la sfera che sembra muoversi più lentamente. Le divisioni che registra questa volta sono 34.

Cambiando ancora la carica nota che la sferetta si muove ancora più lentamente, ma in quanto sale ancora, significa che la carica deve essere ancora maggiore di quella di equilibrio; le divisioni registrate sono 13.

Nella misurazione successiva, dopo aver cambiato ancora la carica, registra 11 divisioni. Dopodiché la volta successiva cambia ancora carica e nota che questa volta c'era meno carica che all'equilibrio, quindi la sferetta va lasciata scendere e si può tenere in equilibrio solo tramite le batterie addizionali. Le divisioni percorse sono 12 verso il basso.

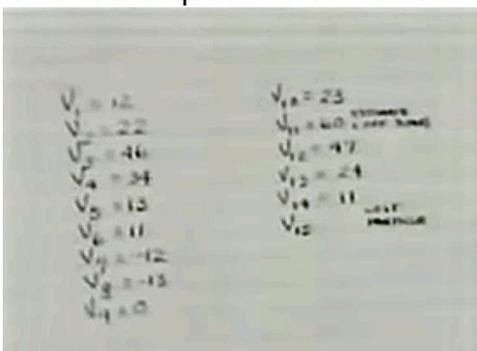


Questo significa che la forza elettrica addizionale ha il senso contrario, la carica è tanto diminuita che la forza efficace spinge la sferetta verso il basso di 12 divisioni.

Redfield continua a cambiare carica ma a un certo punto si accorge che anche con le batterie addizionali non riesce a tirare verso l'alto la sferetta, questa cade sempre.

Ciò significa che è presente solo la gravità che la tira in basso perché sulla sferetta non c'è più carica.

Finito così l'esperimento, Redfield osserva i valori ottenuti di tutte le misurazioni eseguite e nota che questi valori non sono distribuiti casualmente:



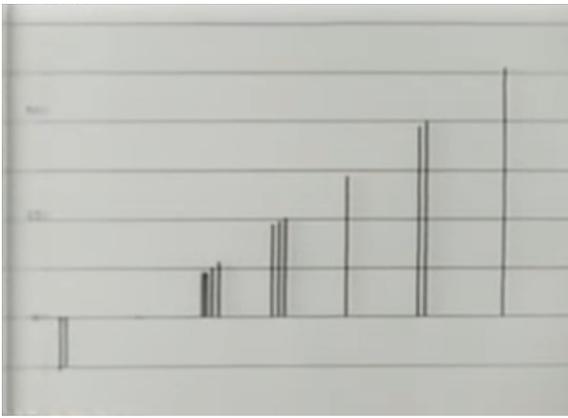
V1=12	V7= -12	V13=24
V2=22	V8=-13	V14=11
V3=46	V9=0	V15=/ /
V4=34	V10=23	
V5=13	V11=40	
V6=11	V12= 47	

(Nella tabella a sinistra si riportano i valori ottenuti solo probabili ,in quanto non perfettamente leggibili dalle annotazioni originali)

Infatti osservandoli attentamente notiamo che questi valori cadono in gruppi: un gruppo attorno le 11/12 divisioni, uno intorno al doppio(22/23) e uno attorno al triplo(34).

A questo punto si suppone che questi siano tutti vicini a multipli interi di 11,8.

In seguito, in un grafico riportiamo tutti i dati in ordine crescente e li confrontiamo con rette orizzontali distanti 11,8 tra loro.



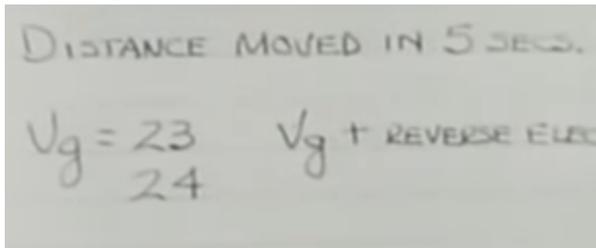
A sinistra si può notare il valore verso il basso che risulta leggermente maggiore di 11,8. Leggermente più a destra vi è un punto di equilibrio, una volta che si è trovata la stessa carica con cui eravamo partiti. A destra di questo vi è invece un gruppo attorno a 11,8 verso l'alto. Il gruppo seguente è circa il doppio, poi il triplo e così via.

Quindi si può ben notare che *la carica aggiunta o sottratta dalla sferetta, è sempre cambiata secondo un'unità naturale.*

Non si è mai trovata una velocità tra 11,8 e zero, ma sempre multipli interi di un'unità naturale di carica.

A questo punto viene spontaneo chiedersi se la carica sulla sferetta quando questa stava in equilibrio, era anch'essa un multiplo della nostra unità fondamentale di carica.

Per poterlo comprendere, è necessario osservare la velocità di caduta della sferetta con la sola gravità (V_g).



La forza elettrica dovuta alla carica di equilibrio compensa esattamente la gravità, per cui la velocità di caduta con la sola gravità è una misura di questa forza elettrica, e quindi della carica sulla sferetta. Dunque la velocità ($V_g=23/24$) mostrava che c'erano **due unità naturali** di carica sulla sfera, quando la sfera era in equilibrio.

Riassumendo si può affermare che aggiungendo delle cariche su due lastre che distano 3,1 mm tra loro, Redfield ha equilibrato fra le due lastre una sferetta con 2 cariche elementari.

In seguito ha caricato le due lastre con delle batterie e la manopola indicava che le batterie inserite erano 3.

La sfera pesa $2,8 \cdot 10^{-14}$ N, quindi la forza elettrica deve avere questo valore su 2 cariche elementari.

La forza elettrica delle 3 batterie che caricano le due lastre è perciò $1,4 \cdot 10^{-14}$ N, su ogni carica elementare tra le lastre.

Le considerazioni finali che possiamo trarre da questa esperienza, dimostrano proprio le tesi iniziali, che aveva verificato anche Millikan.

Prima di tutto esistono unità elementari di carica, in secondo luogo, la natura fornisce grani di carica tutti della stessa grandezza, sicché misurando le forze notiamo sempre uno, o due o tre di questi grani o un qualche numero intero, e dunque **esiste un'unità naturale di carica di cui tutte le cariche sono composte.**

Conclusioni:

Grazie a questa esperienza virtuale, siamo riusciti a comprendere a pieno il concetto di carica elementare, osservando la riproduzione di un esperimento simile a quello di Millikan, studiato precedentemente nella teoria.

Grazie agli strumenti adatti infatti, attraverso questo esperimento eseguito da Alfred G. Redfield, grazie all'osservazione dell'ultimo grafico in particolare, e dei valori della velocità, siamo giunti alla dimostrazione di due punti fondamentali: la carica si presenta in unità naturali, essa è granulare e tutti i grani hanno la stessa grandezza di carica elettrica.

Bibliografia:

<https://youtu.be/pvIEa627gpA> (link per il filmato sull'esperienza)

<https://www.brandeis.edu/physics/people/profiles/redfield-alfred.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_Lee_Friedman

<https://www.chimica-online.it/download/carica-elementare.htm>