

Práctica 3:

Experimento de Millikan

Carlos Rubén Carrera Padilla, Orozco González Luis René
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
Fecha de entrega: 21 de abril de 2021

21 de abril de 2021

Resumen

Millikan empleó un dispositivo para determinar la carga eléctrica de pequeñas gotitas de aceite, analizando las diferentes fuerzas que se ejercen sobre una gota que se encuentra bajo la influencia de un campo eléctrico. En este trabajo se reprodujo el experimento de Millikan. A partir de la estimación de las velocidades límite, caída y retocoso, de las gotas de aceite, se calcularon los radios de las gotas de aceite, en promedio $a = 5.433 \times 10^{-6} \pm 6.4286 \times 10^{-7} \text{ m}$, lo cual se encuentra en el rango esperado $4 \times 10^{-6} \text{ m}$ a $5 \times 10^{-8} \text{ m}$. La magnitud de carga eléctrica mínima estimada fue $-5.56065 \times 10^{-21} \pm 3.78864 \times 10^{-21} \text{ C}$, valor dos órdenes por debajo del valor teórico $-1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$.

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor de 1890 muchos científicos estaban interesados en el estudio de la radiación, la emisión y transmisión de la energía a través del espacio en forma de ondas. Para investigar este fenómeno se utilizaron los tubos de rayos catódicos (Véase Fig 1) en diversos experimentos, algunos de estos se les aplicaba campos eléctricos y magnéticos para modificar el comportamiento los rayos catódicos que viajaban dentro del tubo. Se observó que cuando se co-

campos electromagnéticos y eléctricos que atraviesan las partículas que conforman los rayos catódicos deben de tener carga negativa, comúnmente llamados electrones.

El físico inglés J.J. Thomson teniendo conocimiento de lo ya expuesto utilizó un tubo de rayos catódicos y su conocimiento de la teoría electromagnética para determinar la relación entre la carga eléctrica y la masa del electrón. El número que él obtuvo es $-1.76 \times 10^{-19} \text{ C/g}$ donde C es la unidad de carga, en Coulombs. Más tarde, entre 1908 y 1917, R. A. Millikan llevó a cabo una serie de experimentos y encontró que la carga de un electrón es de $-1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$.

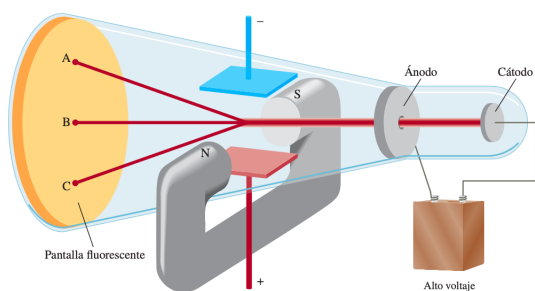


Figura 1: Tubo de rayos catódicos con un campo eléctrico perpendicular a la dirección de los rayos catódicos y un campo magnético externo. [1] *Fundamentos de Química. R. Chang*

necta un campo magnético y el campo eléctrico permanece desconectado, los rayos catódicos alcanzaban el punto A del tubo. Cuando solo está conectado el campo eléctrico el rayo alcanza el punto C. Cuando, tanto el campo magnético como el campo eléctrico no están conectados o bien, cuando ambos lo están pero se equilibran dichos rayos alcanzan el punto B. Teniendo lo anterior en cuenta y sabiendo que un cuerpo cargado en movimiento se comporta como un imán lo que permite interactuar con

1.1. Experimento de Millikan

El experimento tuvo como objetivo determinar el valor de la carga del electrón. Millikan empleó un dispositivo con el cual podía determinar la carga eléctrica de pequeñas gotitas de aceite, analizando las diferentes fuerzas que se ejercen sobre una gota que se encuentra bajo la influencia de un campo eléctrico. El aparato que empleó Millikan, constaba de una cámara formada por un par de placas metálicas, un atomizador y un microscopio con graduación interior, dispuesto de manera semejante a como se muestra en la figura siguiente:

A y B son dos láminas horizontales exactamente paralelas. Mediante un atomizador se esparce el aceite en finas gotitas sobre la lámina superior y se deja que algunas ellas caigan a través de un pequeño orificio en esta lámina. Se dirige un haz de luz entre las dos láminas y se dispone un anteojo con su eje perpendicular al haz luminoso. Las gotitas de aceite iluminadas por el haz aparecen, cuando se miran por el anteojo, como minúsculas estrellas brillantes, cayendo lentamente bajo la acción conjunta de su peso, el empuje del aire y la fuerza de viscosidad que se opone a su movimiento.

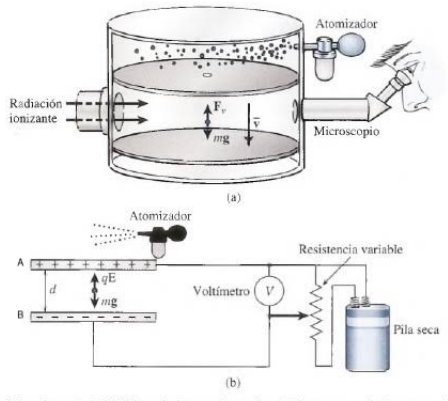


Figura 2: Esquema del experimento de la gota de aceite de Millikan.[2] *Experiments in Modern Physics. Melissinos.*

Se observa que las gotas de aceite se cargan eléctricamente al ser pulverizadas, probablemente a causa del rozamiento. Esta carga es negativa lo que indica que las gotas han adquirido uno o más electrones en exceso. Si se carga ahora la lámina superior positivamente y la inferior negativamente la región comprendida entre ambas se convierte en un campo eléctrico uniforme. Modificando de forma adecuada la intensidad del campo eléctrico, la fuerza ejercida por éste sobre una gota con carga negativa puede hacerse exactamente igual al peso de la gota menos el empuje del aire, de tal modo que la gota quede quieta entre las dos láminas.

$$qE = mg - F_1 = \frac{4}{3}\pi a^3 g (\rho - \rho') \quad (1)$$

donde q es la carga de la gota; E , la intensidad del campo eléctrico; g , la aceleración de la gravedad; a , el radio de la gota, ρ , su densidad y ρ' la densidad del aire.

Por consiguiente puede calcularse la carga cuando se conocen E , g , a , ρ y ρ' , el problema es que los radios de las gotas de aceite son del orden de $10^{-5}cm$ es decir demasiado pequeños para ser medidos directamente. Por lo que Millikan optó por suprimir el campo eléctrico, las gotas caen lentamente y su velocidad de caída puede medirse observando el tiempo que tardan en pasar entre retículos transversales dispuestos en el anteojo. Para que lo anterior tenga sentido se utilizó la ley de Stokes la cual nos dice que un cuerpo que cae en un medio viscoso aumenta su velocidad hasta alcanzar una velocidad límite, tal que la fuerza resultante hacia abajo (peso menos empuje) es igual a la resistencia debida a la viscosidad.

$$\frac{4}{3}\pi a^3 g (\rho - \rho') = 6\pi\eta a \vec{v} \quad (2)$$

siendo η el coeficiente de viscosidad del medio, y \vec{v} , la velocidad límite. Puesto que Millikan conocía g , ρ , ρ' y η y puede medirse \vec{v} le fue posible calcular el valor de a , y mediante la ecuación 1 determinar q obteniendo un valor de $1.60 \times 10^{-19}C$ o $4.774 \times 10^{-10}u.e.s$,

$$e_n = \frac{4}{3}\pi d \sqrt{\frac{1}{\rho g} \left(\frac{9\eta}{2}\right)^3 \left(1 + \frac{b}{pa}\right)^{-3/2} \frac{(v_f + v_r)\sqrt{v_f}}{V}}$$

Figura 3: (3).[2] *Experiments in Modern Physics. Melissinos.*

También llego a la conclusión que la carga eléctrica no es algo que pueda dividirse indefinidamente si no que existe en la naturaleza en forma de múltiplos de una unidad e .

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Para la realización de este experimento se utilizó un aparato de Millikan, el cual separa las bóvedas principales mediante una placa metálica con tres orificios de unos pocos milímetros de radio. Para la observación se empleó un microscopio óptico y una lampara colocados en las aperturas frontal (cualquiera) y trasera, respectivamente. Se utilizaron dos fuentes de poder. La primera fue empleada para encender la lámpara que ilumina la segunda cámara del aparato. La segunda fuente de poder es la responsable de generar el campo eléctrico en la segunda cámara. Para ello, esta se conecta mediante un par de cables banana a un switch doble (capaz de invertir el campo) y, otro par, del switch a las placas metálicas entre las cuales se origina la segunda cámara.

La configuración final se observa en la figura 4. Para lograr que el microscopio y el aparato se encontrasen a la misma altura, se utilizó una mesita y una mesa elevadora. Cómo muestra se utilizó aceite de bebé.

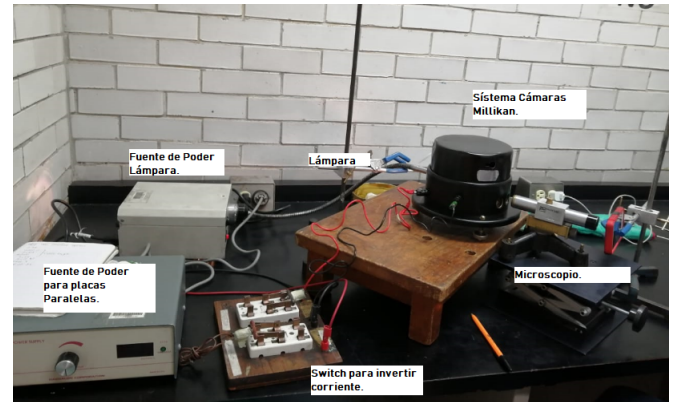


Figura 4: Fotografía de Arreglo experimental.

2.2. Procedimiento

Una vez acomodado todo, sin encender el campo, lo primero que se hace es enfocar el microscopio y garantizar la observación. Con ayuda de un alambre, como objetivo, que pasa a través de alguno de los orificios de la primera

placa se enfoca el microscopio desplazándolo ligeramente de adelante hacia atrás hasta lograr ver algo. Este procedimiento es tardado y puede ser infructuoso muchas ocasiones, se recomienda verificar la alineación del microscopio con los orificios, así como la correcta intensidad de luz que permita localizar el alambre objetivo.

A continuación, se alineó el dispositivo con el cuál se iban a reunir los datos (vídeos), es decir, un celular.

Con todo alineado, se coloca la tapa de la primera cámara del aparato de Millikan y se presiona el atomizador un par de veces en la apertura de la tapa. Casi inmediatamente se observan esferas de aceite pasar por los orificios desplazándose hacia el otro extremo de la cámara. Hay que tener en cuenta que el microscopio invierte la imagen.

Localizando un conjunto de gotas de aceite que se muevan (caigan) con velocidad constante se procede a encender el campo. Para ello, se coloca el potenciómetro de la fuente en el voltaje deseado y se abre el switch interruptor.

Al observar el retroceso por una distancia considerable (unos cuantos milímetros) se apaga el switch dejando que las gotas caigan de nuevo hasta una distancia deseable para volver a encender el switch y repetir el proceso tanto como trayectorias se quieran analizar.

En este trabajo se realizaron tres corridas relacionadas con tres partículas distintas para un campo eléctrico similar, 2.5 Kv (máximo proporcionado por la fuente). En cada corrida se invirtió el campo eléctrico cinco veces, es decir, se obtuvieron 10 trayectorias.

Los vídeos con la información obtenida fueron analizados en el software Tracker [3]. La intención es comparar la distancia recorrida verticalmente con el tiempo requerido y a partir de allí calcular la velocidad finales para hallar los radios, posteriormente, las cargas.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calibración de Tracker se llevó a cabo seteando la regla métrica del programa con la distancia en milímetros de la mirilla. Se añadió un sistema de referencia conveniente y se delimitó la duración del vídeo. A continuación, se colocó marcas para los distintos fotogramas en función del movimiento de la partícula que presentaba movimiento en dirección a la placa cargada positivamente del dispositivo de Millikan para poder obtener los datos en el movimiento vertical al igual que su tiempo. Al graficar las anteriores series de datos se obtuvieron gráficas de posición contra tiempo las cuales presentan tendencias lineales como se puede observar:

Se observa que las pendientes de estas gráficas corresponden a la velocidad límite de las gotas de aceite analizadas con unidades $[\frac{s}{m}]$, esto es así por que al graficar de esta manera $t = a \cdot y + t_0$ donde A es igual $[\frac{s}{t}]$. Por lo tanto, $V = \frac{1}{A}$.

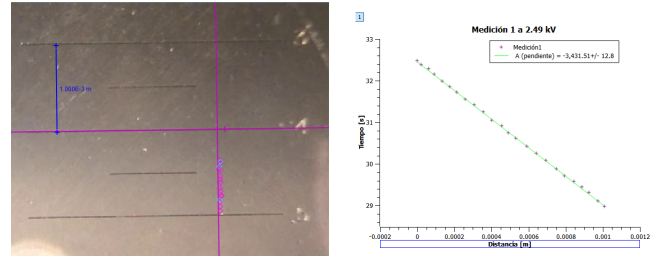


Figura 5: Análisis en Tracker y ajuste de los datos posición contra tiempo.

Se obtuvieron treinta trayectorias distintas juntando las tres partículas estudiadas. Cada partícula posee diez gráficas de $yvs t$, de las cuales cinco corresponden a movimientos de caída y los otros cinco a movimientos debido al campo eléctrico. A continuación se muestran tres de las gráficas obtenidas de las tres partículas, figura 6. Es sumamente importante hacer énfasis en no considerar la signatura debido a que solo nos señala la dirección en el que se lleva a cabo el movimiento, lo importante es la pendiente, es decir, la rapidez.

Las velocidades encontradas para cada una de las tres gotas de aceite analizadas se presentan en las siguientes dos gráficas: Las gráficas anteriores, Figura 7 y 8, de velocidad contra número de corrida tomada, sirven para observar un comportamiento constante. Este comportamiento verifica que las gotas de aceite llegan a una velocidad terminal en ambos casos, sin campo eléctrico y con campo.

Muestra	Velocidad Sin Campo [m/s]	Velocidad con Campo [m/s]
Gota 1	0.000347 +/- 34E-6	0.000284 +/- 4.0E-6
Gota 2	0.000399 +/- 6.7E-6	0.000893 +/- 4.87 E-5
Gota 3	0.000248 +/- 2.9 E-6	0.000297 +/- 4.44E-5

Tabla 1: Tabla de Gotas analizadas contra sus velocidades promedio con, y sin, campo eléctrico de 2.5 kv.

A partir de las velocidades límite se puede obtener el radio de las gotas de aceite utilizando:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta V_{fs}}{2g\rho}}$$

Donde v_{fs} corresponde a la velocidad final sin campo, $\eta = 0.0018 Pa s$ viscosidad del aire [4], $\rho = 913.44 kg/m^3$ densidad del aceite mineral [1], y $g = 9.81 m/s^2$. Comparando los radios obtenidos contra el libro [2], el cual, sugiere que estos radios deberían estar en el rango de $5 \times E - 6 m$ a $5 \times E - 8 m$; se logró medir, indirectamente, radios que pertenecen a dicho rango.

Finalmente se calculó la carga obtenida para las gotas utilizando la ecuación 3 y las velocidades finales con campo eléctrico.. Para ello se averiguo: los valores de

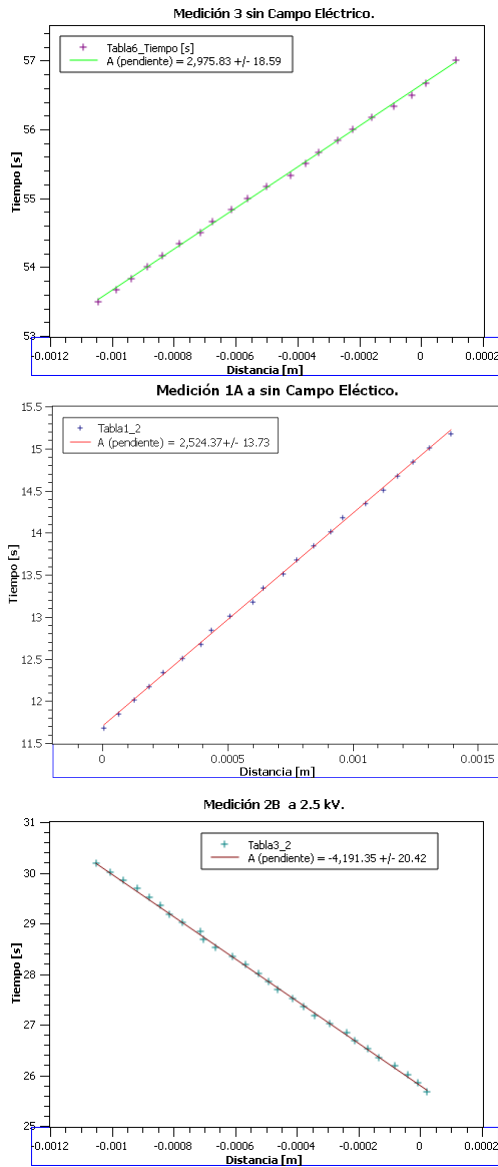


Figura 6: Movimiento de tres partículas distintas, mediciones diferentes, sometidas a condiciones similares. La primeras dos gráficas muestran el movimiento de dos partículas cayendo sin la interacción del campo eléctrico. La gráfica tercera muestra el movimiento de una partícula debido a su interacción con el campo eléctrico.

Muestra	Radio [m]
Gota 1	0.000005547 +/- 6.37 E-6
Gota 2	0.00000601 +/- 8.22 E-6
Gota 3	0.00000474 +/- 7.46E-6

Tabla 2: Radios obtenidos para las tres distintas gotas analizadas.

la constante de corrección $b = 6.17 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{cmHg}$ [5], la presión $p = 585.19 \text{ cmHg}$. Con una distancia de separación de $4.7 \times 10^{-3} \text{ m}$ y un voltaje de 2500 V.

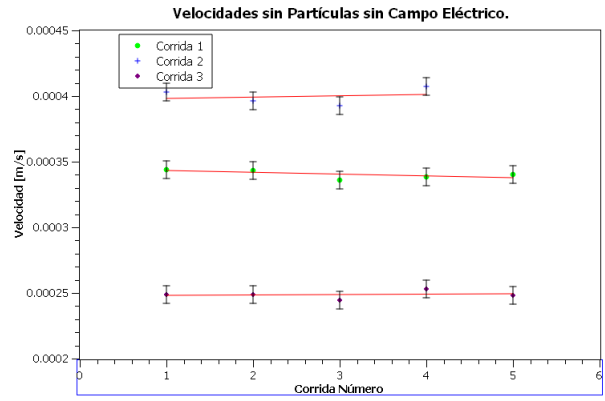


Figura 7: Gráfica de Velocidad de gotas sin campo eléctrico contra número de corrida de datos recopilada.

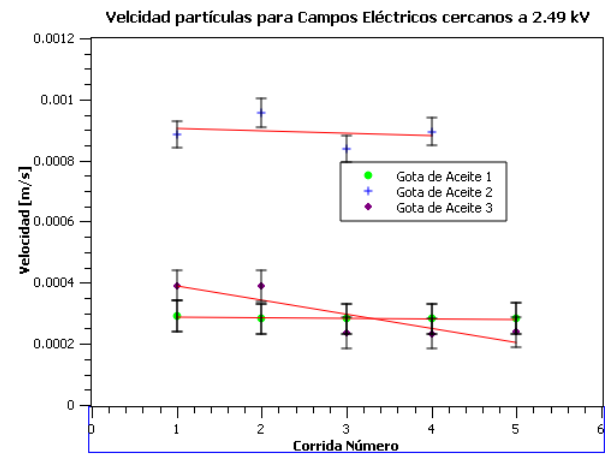


Figura 8: Gráfica de Velocidad de gotas al aplicar un eléctrico entre las placas contra número de corrida de datos recopilada.

Resultados de Carga mínima experimental encontrados.

Carga por gota [C]	Número de Cargas	Carga Mínima Experimental [C]	Promedio	Desviación
9.9346E-21	1	9.934E-21 +/- 2.6 E-21	5.56065E-21	3.78864E-21
1.0333E-20	3	3.444E-21 +/- 3.8 E-21		
2.1139E-19	64	3.303E-21 +/- 4.5 E-21		

Tabla 4: Resultados de Carga mínima experimental encontrados.

El resultado obtenido no refleja todo lo elaborado en la experimento. Se reconoce que este experimento presenta una alta dificultad al momento de la alineación. Esto lleva al observador invertir mucho tiempo en esta tarea, así como a errores sistemáticos. Superada esa etapa del experimento la toma de datos es relativamente sencilla.

El análisis de datos en vídeo se vuelve tedioso debido a la gran cantidad de trayectorias y puntos a marcar (con los cuales se calcula las velocidades). A pesar de eso, se observa velocidades casi constantes en la

mayoría de los casos, y los errores se atribuyen a colocar los puntos de medición en lugares de poca resolución.

El experimento presenta una gran sensibilidad a erratas en el último cálculo de carga eléctrica. Debido, a como se mencionó, a pesar de haber obtenido velocidades y radios en el rango necesarios, el cálculo (la evaluación de cantidades constantes) fue infructuosa y presentaba mucha discrepancia con los datos teóricos.

Otra fuente de error fueron las perforaciones extra que posee la placa, debido a ellas se observaban más gotas a distintas distancias que, por perspectiva, parecían más pequeñas y dificultar identificar las que salían por el orificio enfocado. En los vídeos se hizo más notorio este defecto debido a que al señalar una gota no se podía distinguir si esta era originalmente pequeña o por perspectiva se veía así. Esto es una causa de error en las velocidades porque quizá se registraba una velocidad mayor o menor (por poco) a la real.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos fueron medianamente aceptables, se llegó a calcular los radios de las gotas de aceite, en promedio $a = 5.433\text{E-}06 \pm 6.4286\text{ E-}07\text{ m}$, lo cual se encuentra en el rango esperado $4 \times E^{-6}\text{ m}$ a $5 \times E^{-8}\text{ m}$. La carga eléctrica mínima estimada fue $5.56065\text{E-}21 \pm 3.78864\text{E-}21$, valor dos órdenes por debajo del valor teórico.

El resultado obtenido no refleja todo lo elaborado en la experimento. La etapa más complicada es lograr una configuración funcional del arreglo experimental, es decir, el enfoque del microscopio satisfactorio.

Se propone como apoyo al experimento, intentar otras formas de reunir datos, como los sería un circuito de vídeo de una cámara que se conozca la graduación y una televisión donde desplegar la imagen.

Otro factor importante que puede ayudar a futuras experimentaciones es trabajar con voltajes mayores, con la intención de observar comportamientos uniformes en la mayoría de las gotas y no solo de algunas aisladas.

REFERENCIAS

- [1] R. Chang. *FUNDAMENTOS DE QUIMICA*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2011. ISBN 9786071505415. URL <https://books.google.com.mx/books?id=TUuUZwEACAAJ>.
- [2] Adrian C Melissinos and Jim Napolitano. *Experiments in modern physics*. Gulf Professional Publishing, 2003.
- [3] Johannes Klein, Stefan Leupold, Ilona Biegler, Rebekka Biedendieck, Richard Münch, and Dieter Jahn. Tlm-tracker: software for cell segmentation, tracking and lineage analysis in time-lapse microscopy movies. *Bioinformatics*, 28(17):2276–2277, 2012.
- [4] Daniel R Gustafson. *Physics: Health and the human body*. Wadsworth Publishing Company, 1980.
- [5] Ray C Jones. The millikan oil-drop experiment: Making it worthwhile. *American Journal of Physics*, 63(11):970–977, 1995.