

Capítulo 1

Determinación de la carga eléctrica, gota de aceite Millikan

Introducción

La carga eléctrica es una propiedad intrínseca de algunas partículas elementales, en la naturaleza existen cargas negativas y positivas las cuales son las responsables de la interacción eléctrica entre cargas o entre cargas y campos eléctricos. La carga eléctrica que posee una partícula puede calcularse midiendo la fuerza experimentada por la partícula en un campo eléctrico de magnitud conocida. A pesar de que es relativamente fácil producir un campo eléctrico, la fuerza producida por dicho campo sobre una partícula que lleva sólo uno o varios electrones en exceso es muy pequeña. Por ejemplo, un campo de 1000 V/cm producirá una fuerza de sólo $1,6 * 10^{-14}$ Newtons sobre una partícula que tenga la carga de un electrón $-1,602176565 * 10^{-19} \text{ C}$. Esta es una fuerza comparable con el peso que tendría una partícula de masa muy pequeña del orden de 10^{-12} g (1 picogramo) [3], el éxito del experimento de la gota de aceite de Millikan depende de la habilidad para medir estas pequeñas fuerzas, al observar el comportamiento de pequeñas gotas de aceite cargadas, con masas de sólo 10^{-12} gramos o menos, en un campo eléctrico y gravitacional se puede medir la velocidad de caída de la gota en el aire, y utilizando la ley de Stokes, se puede calcular la masa de la gota. La observación de la velocidad de la gota cruzando un campo eléctrico permite el cálculo de las fuerzas que actúan, y por lo tanto, la carga que lleva la gota de aceite.

Este experimento permite medir la carga total sobre una gota; es sólo a través de un análisis de los datos obtenidos y un cierto grado de habilidad experimental para que se puede determinar la carga de un sólo electrón. Seleccionando gotas que suban y bajen lentamente, se puede estar seguro de que la gota tiene un pequeño número de electrones en exceso, al observar varias de estas gotas y determinar su carga es posible ver que son múltiplos enteros de cierto valor, entonces esto es una buena indicación de la naturaleza cuantizada de la carga eléctrica, sin embargo, ya que se han utilizado diferentes gotas en la medición de cada carga, queda la pregunta del efecto de la gota misma sobre la carga; esta incertidumbre puede eliminarse cambiando la carga de una misma gota mientras la gota esta bajo observación, esto es posible manipulando la fuente de ionización, de hecho, es posible cambiar la carga sobre la misma gota varias veces. Si los resultados de las mediciones sobre la misma gota dan cargas las cuales son múltiplos enteros de la alguna misma cantidad de carga, entonces esta es una prueba de la naturaleza atómica de la electricidad.

Equipo

Antes de iniciar con las medidas es necesario identificar las partes del equipo y sus funciones, también, es importante alinear el sistema óptico, es decir, ajustar el equipo para una correcta observación de las gotas. Por favor, lea cuidadosamente esta guía, identifique en el laboratorio el equipo y sus partes, entienda por completo la forma de usarlo y ajustarlo, de esta manera será posible obtener datos confiables.

- Plataforma de aparatos y el selector de carga de placa.
- Transformador de 12 voltios DC para la lámpara halógena.
- Fuente de alto voltaje
- Atomizador con aceite no volátil (Squibb 5597 aceite mineral, densidad $=886 \text{ kg/m}^3$)*
- Soporte universal con varillas para sujeción de plataforma de aparatos.

Piezas principales

El equipo de gota de aceite de Millikan está constituido por 5 piezas principales: (ver Figura 1.1)

* La densidad del aceite mineral es 886 kg/m^3 . Sin embargo, puede haber ligeras variaciones de este valor para diferentes lotes; por lo tanto, para mayor precisión,

usted debe verificar la densidad del aceite mineral que está utilizando.

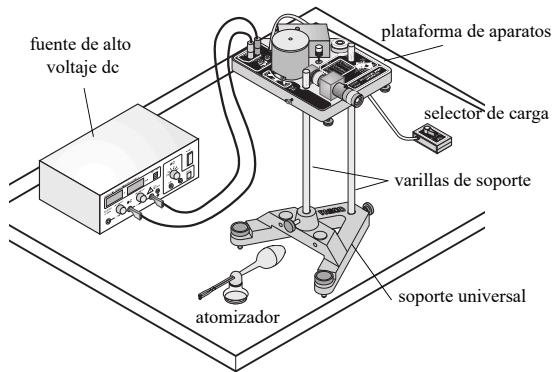


Figura 1.1: Piezas principales del equipo

Componentes de la plataforma

En la plataforma de aparatos se encuentran el cuerpo principal del equipo, es necesario que la plataforma este nivelada y a una altura tal que sea cómoda para el observador. A continuación se describen sus componentes. (Ver Figura 1.3)

- Cámara de observación de las gota.
- Microscopio (30X, campo brillante), con retícula (cuadrícula con separación de línea: 0,5mm divisiones mayores, 0,1mm divisiones menores), anillo de enfoque óptico, y anillo de enfoque de gota.
- Lámpara halógena (bombilla halógena de 12V, 5W).
- Alambre de enfoque (para el ajuste del alcance de visión del microscopio)
- Conectores de voltaje para las placas.
- Conectores del termistor (termistor está montado en el interior del equipo)
- Tablas de termistor (resistencia vs temperatura).
- Palanca fuente de ionización (con tres posiciones: Ionización ON, OFF, y pulverización de gota).
- Burbuja de nivel.
- Selector de carga de placa del condensador (con un cable de 1 metro para evitar la vibración de la plataforma durante la actividad de conmutación).

Cámara de observación de las gotas

Es allí donde se rocian las gotas con el atomizador, para que caigan con velocidad constante y puedan ser observadas con el microscopio. Figura 1.2, es importante que entienda su configuración ya que es necesario abrirla y desarmarla varias veces para limpiar los residuos de aceite.

- Tapa.
- Carcasa.
- Tapa de acople.
- Placa superior del capacitor (latón).
- Espaciador de plástico (aprox 7,6mm de espesor).
- Placa inferior del capacitor (latón).
- Fuente partículas alfa de Torio-232 (0,00185 μ ci)
- Lente convexa.

Nota: El torio-232 es una fuente de partículas Alfa, de baja emisor con una vida media de $1,41 \times 10^{10}$ años, su uso no esta regulado ni es peligroso para el usuario de este equipo.

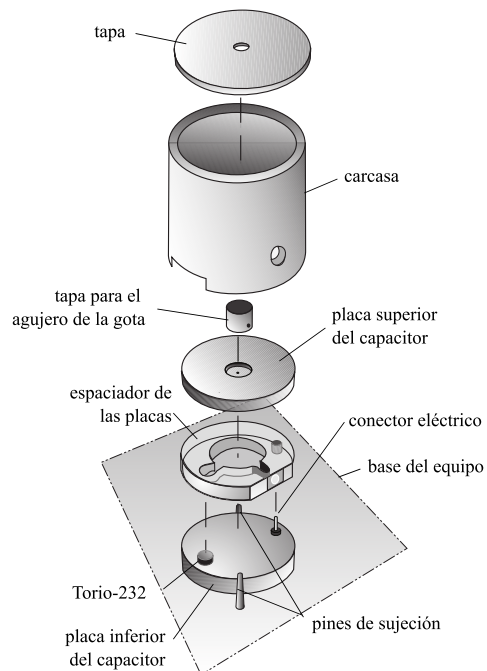


Figura 1.2: Componentes de cámara de observación

Alineación del sistema óptico

El sistema óptico está conformado por el microscopio y la lámpara de halógeno. Es el encargado de hacer visbles las gotas dentro de la cámara y la cuadrícula de referencia para toma de las medidas, por lo tanto, es necesario enfocarlo para ser ajustado a la agudeza visual del usuario.

Enfoque del microscopio

1. Desenrosque el alambre de enfoque de su lugar de almacenamiento en la plataforma y cuidadosamente insértelo en el agujero en el centro de la placa superior del capacitor. (Figura 1.4).

2. Conecte el transformador de 12V DC a la lámpara mediante el cable jack en la caja negra de la lámpara halógena, Figura 1.3, que esta cerca a la burbuja de

nivel del equipo.

3. Gire el anillo de enfoque óptico del microscopio hasta que se vea claramente la cuadrícula

4. Observe el alambre de enfoque a través del microscopio y trate de verlo nítido girando el anillo de enfoque de gota.

Nota: Es mas fácil enfocar el dispositivo óptico sin utilizar gafas.

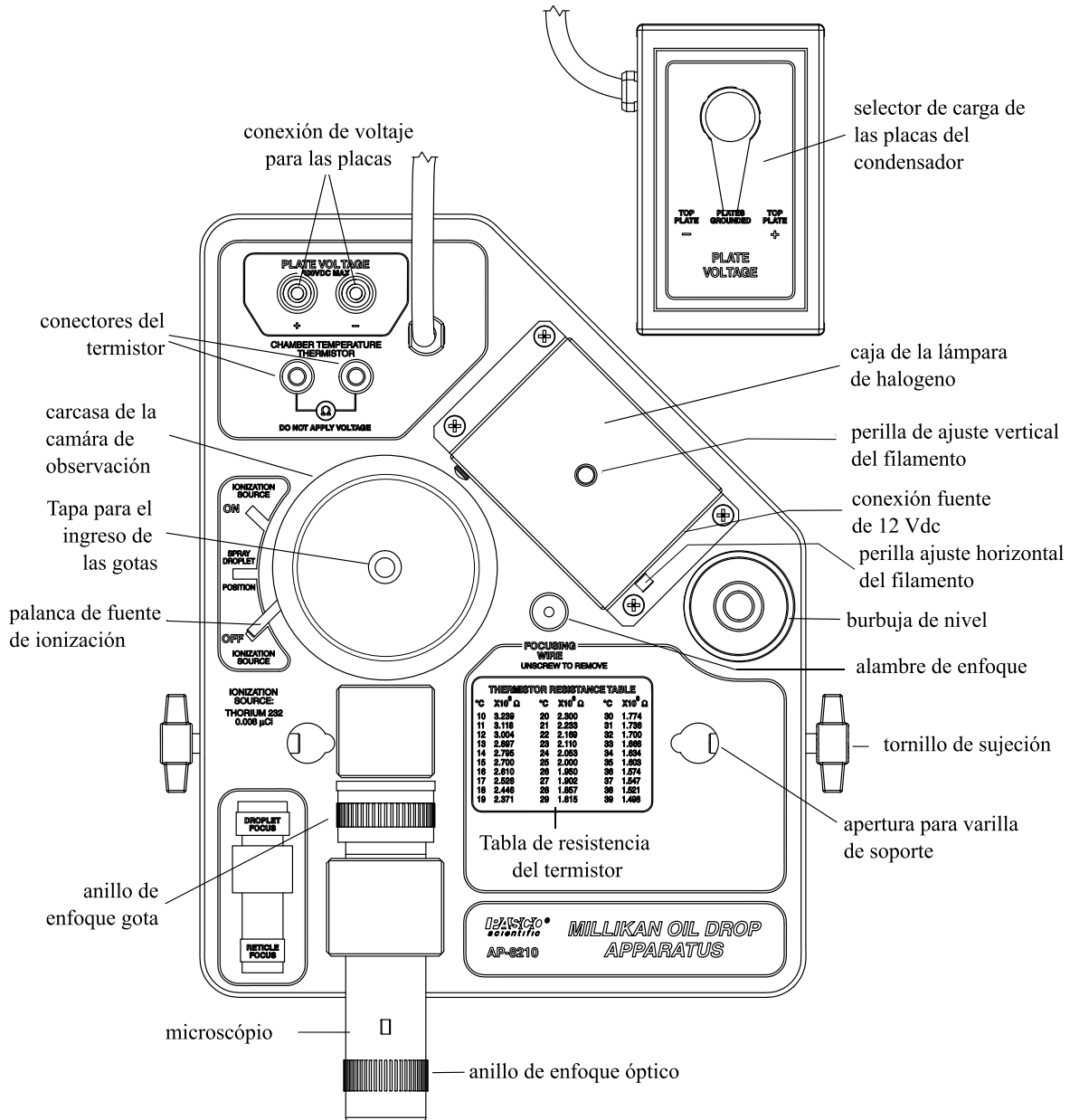


Figura 1.3: Componentes de la plataforma

Enfoque de la lámpara de halógeno

1. Gire la perilla de ajuste de filamento horizontal, la luz está mejor enfocada cuando el lado derecho del alambre está más brillante que su centro.

2. Mientras ve el alambre a través del microscopio, gire la perilla de ajuste vertical del filamento hasta que la luz es más brillante en el alambre que está sobre la

cuadrícula.

3. Atornille el alambre de enfoque a su lugar de almacenamiento en la plataforma.

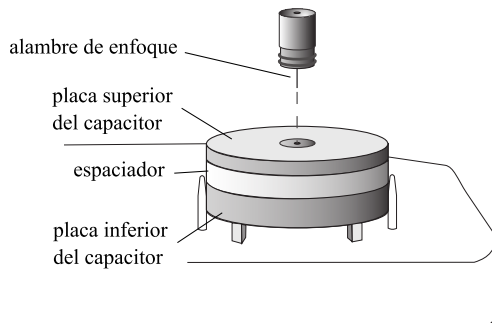


Figura 1.4: El alambre de enfoque se introduce en la cámara de las gotas

Funciones de los Controles

Los controles del aparato de Millikan tienen como función regular la entrada de las gotas a la cámara de observación y la dirección del campo eléctrico del capacitor

Palanca de fuente de ionización

1. Cuando la palanca de ionización está en la posición OFF, la fuente de ionización está protegida por un plástico, por lo que prácticamente no hay partículas alfa en la cámara de la gotas.

2. En la posición ON, se retira el blindaje plástico y la zona de caída está expuesta a las partículas alfa de la fuente de Torio 232.

3. En la posición de rocío de gota, la cámara se ventila por un pequeño agujero que permite que el aire escape cuando la gotas se introducen en la cámara.

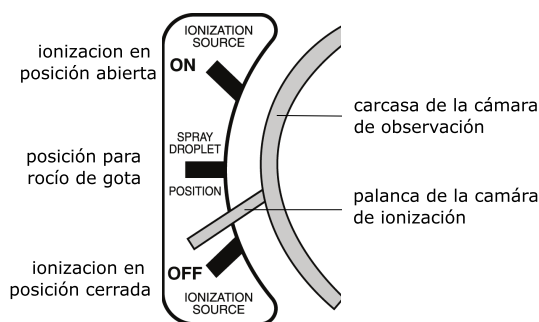


Figura 1.5: Posiciones de la palanca de ionización

Selector de carga de placas del capacitor

El selector le permite cambiar la dirección del campo eléctrico del capacitor, el selector de carga tiene tres posiciones:

1. TOP PLATE -: la placa superior del capacitor está con carga negativa

2. TOP PLATE +: la placa inferior del capacitor está con carga negativa.

3. PLATES GROUNDED: las placas están desconectadas de la alimentación de alta tensión, el capacitor se descarga anulando el campo eléctrico.

Ajuste y medición del voltaje

1. Conecte el alto voltaje de la fuente de alimentación de DC a los conectores de voltaje de las placas del capacitor utilizando cables con conector banana y ajuste para entregar alrededor de 500V.

2. Utilice el multímetro digital para verificar la tensión entregada a las placas del condensador. Hágalo sobre los conectores no directamente en las placas del capacitor ni sobre la fuente DC.

Condiciones óptimas para la toma de datos

1. Disponga el aparato a nivel, sobre una mesa sólida con la mirilla a una altura que permita al experimentador sentarse derecho mientras observa las gotas. Si es necesario alcanzar la altura apropiada, realice el montaje del aparato sobre dos varillas de soporte (ver figura 1.1).

2. Nivele el aparato con los tornillos de sujeción de la plataforma. Verifique con la burbuja de nivel.

3. Oscurezca el cuarto tanto como le sea posible, pero que le permita la lectura del cronómetro y registrar los datos.

4. Asegúrese de que el fondo detrás del aparato está oscuro.

5. Asegurese de ubicar el equipo en un lugar con pocas vibraciones y al tomar datos evite maipular el microscopio.

6. Es necesario conocer la temperatura interna de la cámara de observación de las gotas, para ello conecte el multímetro a los conectores de termistor, Figura 1.3 y mida la temperatura.

NOTA: Aunque el equipo está diseñado para bloquear el calor que genera la lámpara de halógeno, la temperatura dentro de la cámara de observación de las gotas puede aumentar después de una prolongada exposición a la luz, por lo tanto, la temperatura se debe determinar periódicamente (aproximadamente cada 15 minutos).

Cálculo de la carga de la gota de aceite

Analizando las fuerzas que actúan sobre la gota obtendremos la ecuación que determina la carga eléctrica que posee [1]. La figura 1.6, del lado izquierdo muestra las fuerzas que actúan sobre la gota cuando está cayendo en el aire y ha alcanzado su velocidad final, (la velocidad final se alcanza en unos pocos milisegundos en este experimento). Aquí, v_f es la velocidad de caída, k , es el coeficiente de fricción entre el aire y la gota, m , es la masa de la gota, y g es la aceleración de la gravedad.

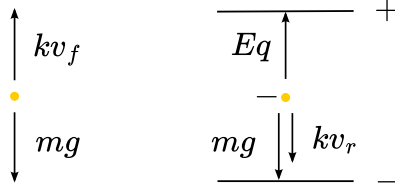


Figura 1.6: Fuerzas sobre una gota en bajada, y en subida impulsada por un campo eléctrico

Como las gotas ya han alcanzado la velocidad terminal su aceleración es cero y por lo tanto, las fuerzas que actúan sobre ella son iguales y opuestas:

$$mg = kv_f \quad (1.1)$$

La figura 1.6, del lado derecho muestra las fuerzas que actúan sobre la gota cuando está pasando bajo la influencia de un campo eléctrico, aquí E es la intensidad de campo eléctrico, q es la carga llevada por la gota, y v_r es la velocidad de subida; haciendo la suma vectorial tenemos:

$$qE = mg + kv_r \quad (1.2)$$

En ambos casos también hay una pequeña fuerza de flotación ejercida por el aire sobre la gota, sin embargo, ya que la densidad del aire es sólo alrededor de una milésima de la del aceite, esta fuerza puede ser omitida.

Eliminando k de la ecuación (1.1) y (1.2) y despejando q tenemos:

$$q = \frac{mg(v_f + v_r)}{Ev_f} \quad (1.3)$$

donde m es la masa de la gota y g la aceleración de la gravedad, como aún no conocemos la masa de la gota la podemos eliminar con la expresión:

$$mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho g \quad (1.4)$$

aquí a , es el radio de la gota y ρ la densidad del aceite, sustituyendo la ecuación (1.4) en (1.3) se llega a:

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g (v_f + v_r)}{3Ev_f} \quad (1.5)$$

para calcular a , se usa la ley de Stokes ¹ $F = 6\pi\eta av_f$, esta expresión nos indica la fuerza que experimenta una

partícula que cae con velocidad terminal por un medio viscoso, aquí η , es el coeficiente de viscosidad del aire, igualando esta ecuación con el lado derecho de la ecuación (1.4) se puede obtener el radio de la gota a :

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}} \quad (1.6)$$

sin embargo, la ley de Stokes no es aplicable para partículas cuya velocidad es inferior a 0,1 cm/s [2], por lo tanto, hay que multiplicar por un factor de corrección y obtener:

$$\eta_{eff} = \eta \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (1.7)$$

donde b es una constante, p es la presión atmosférica y a es el radio de las gotas calculado con la ley de Stokes sin corrección, (ecuación (1.6)). Reemplazando en la ecuación (1.6) llegamos a:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)} \quad (1.8)$$

sustituyendo en la ecuación (1.5) se llega a:

$$q = \frac{4\pi}{3} \rho g \left(\sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right]} \right)^3 \frac{v_f + v_r}{Ev_f} \quad (1.9)$$

ahora bien, la magnitud del campo eléctrico al interior de un capacitor viene dado por:

$$E = \frac{V}{d} \quad (1.10)$$

donde V , es la diferencia de potencial de las placas y d , es la separación entre las placas del capacitor; sustituyendo este valor en la ecuación (1.9) se llega a:

$$q = \left[\frac{4\pi d}{3} \sqrt{\frac{1}{\rho g} \left[\frac{9\eta}{2} \right]^3} \right] \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)^3} \right] \left[\frac{(v_f + v_r)\sqrt{v_f}}{V} \right] \quad (1.11)$$

Los términos del primer paréntesis se determinan sólo una vez ya que son parámetros del equipo, el segundo paréntesis es determinado por cada gota y el tercer término entre paréntesis se determina con el cambio en la carga de las gotas, aquí:

q - carga transportada por la gota (Culombios)

d - la distancia de separación de las placas del capacitor (m)

ρ - densidad del aceite (kg/m^3)

g - aceleración de la gravedad (m/s^2)

η - viscosidad del aire (Ns/m^2)

b - constante, igual a $8,2 * 10^{-3} Pa * m$

p - Presión barométrica (Pascuales)

a - radio de la gota en metros tal como se calcula por

¹George Gabriel Stokes fue un matemático y físico irlandés que realizó contribuciones importantes a la dinámica de fluidos, incluyendo las ecuaciones de Navier-Stokes, la óptica y la física matemática, incluyendo el teorema de Stokes. Fue secretario y luego presidente de la Royal Society de Inglaterra

la ecuación (1.6)

v_f - la velocidad de caída (m / s)

v_r - velocidad de subida (m / s)

V - Diferencia de potencial a través de las placas (vol-
tios)

Procedimiento experimental

Una vez el equipo este enfocado, y correctamente conectado a la fuente de poder proceda a introducir las gotas de aceite. el observador debe estar sentado de manera cómoda y el equipo ubicado a la altura de los ojos, la toma de datos requiere paciencia y un tiempo suficientemente largo para observar la trayectoria de las gotas.

Introducción de las gotas

1. Ponga el aceite no volátil de densidad conocida en el atomizador (por ejemplo, Squibb 5597 Aceite mineral, la densidad: 886kg/m^3).

2. Prepare el atomizador apretando rápidamente la bombilla hasta que el aceite salga.

3. Mueva la palanca de fuente de ionización a la posición para rocío de la gota (figura 1.5) para permitir que el aire salga de la cámara durante la introducción de las gotas.

4. Coloque la boquilla del pulverizador en el agujero de la tapa de la cámara de observación de las gotas. Tenga en cuenta que la punta de la atomizador debe estar dirigida hacia abajo (90° medidos desde la línea horizontal).

5. Mientras observa a través del microscopio, apriete el bombilla del atomizador rápidamente UNA SOLA VEZ, luego apriete lentamente para obligar a las gotas a cruzar por el espacio entre las dos placas del capacitor.

6. Cuando vea una lluvia de gotas a través del microscopio, mueva la palanca de fuente de ionización a la posición OFF.

Nota: Una vez inicie el experimento la tapa de acople evita que gotas adicionales de aceite entren a la cámara de observación.

Si no logra observar ninguna gota, repita el procedimiento una vez más, si luego de ello no observa nada es posible que el agujero por donde entran las gotas este tapado y es necesaria su limpieza, por favor evite inundar de aceite la cámara de observación

Nota: La técnica exacta de introducción de las gotas tendrá que ser desarrollada por el experimentador, tenga paciencia. El objetivo es conseguir un pequeño número de gotas, no una gran cantidad de ellas, si genera demasiadas gotas se crea una nube que dificulta seleccionar la gota apropiada. Es importante recordar que las gotas se ven obligadas a entrar en la cámara de observación por la presión del atomizador; por lo tanto, el uso excesivo del atomizador puede causar que demasiadas gotas sean forzadas a entrar y que el exceso de aceite en la cámara dificulte la visión y enfoque del microscopio.

Selección de la gota

1. A partir de las gotas que se tiene a la vista escoja la que caiga mas lentamente ($0,02 - 0,05\text{mm/s}$), recuerde que el selector de carga del capacitor debe estar en placas a tierra (plates grounded) y que la gota puede subir o bajar manipulando el selector de carga de la placa.

SUGERENCIA: Una gota puede tardar 15s en caer a través de la cuadrícula ($0,5\text{mm}$), subirá la misma distancia bajo la influencia de un campo eléctrico (1000V/cm) con los siguientes tiempos y cargas: 15s si la carga de la gota es de 1 electrón e , 7s con carga de $2e$, 3s con carga de $3e$. Estos valores son aproximados pueden variar dependiendo del tamaño de la gota.

2. Cuando encuentre una gota de tamaño adecuado puede mejorar la visión de ella con el anillo de enfoque del microscopio, una gota bien enfocada se verá como un punto brillante.

3. Ionice la gotica seleccionada llevando la palanca de ionización a la posición ON, durante unos segundos.

Nota: Si tiene demasiadas gotas a la vista, se puede eliminar muchas de ellas activando las placas del capacitor durante varios segundos.

Si usted encuentra que las gotas no reaccionan al campo eléctrico es porque no han adquirido carga, para ello, mueva la palanca de la fuente de ionización a la posición ON durante 5s más.

Toma de datos

1. Mida la velocidad de subida (placas cargadas) y de bajada (placas sin carga) de la gotica seleccionada de 10 a 20 veces. Controle la gota utilizando el selector de carga de placa.

Nota: La mayor exactitud de la medición se logra cuando se mide el tiempo que demora la gota en cruzar un cuadro grande completo. (Estos cuadros son $0,5\text{mm}$ de lado.)

2. Calcule la carga de la gota, utilizando las ecuaciones dadas (1.11). (Si el resultado de este primer cálculo

es mayor a 5 veces la carga del electrón, es preferible utilizar gotas que se muevan mas lentamente.)

Variación de la carga de la gota

1. Introduzca más goticas de aceite en la cámara utilizando el procedimiento descrito previamente y seleccione otra gota.

2. Mida nuevamente el tiempo de subida y bajada de la gota alrededor de 10 a 20 veces o hasta que pierda de vista la gota.

3. Lleve la gotica a la parte superior del campo de visión y mueva la palanca de ionización en la posición ON unos pocos segundos mientras la gota cae.

4. Manipule la gota cambiando la polaridad de las placas del capacitor, si nota que el tiempo de subida disminuye quiere decir que aumento la carga sobre la gota, mida estas nuevos tiempos de subida de 10 a 20 veces si es posible.

5. Si la gotica se encuentra todavía a la vista, intente cambiar la cargará en la gota mediante la introducción de más partículas alfa, (palanca de ionización en la posición ON), y mida la nueva velocidad de subida si es posible.

NOTA: En lo posible es preferible tomar la mayor cantidad de datos con la misma gota.

Referencias

- [1] Robert A. Millikan's book, The Electron (University of Chicago Press, Chicago, 1993)
- [2] Introduction to Theoretical Physics, by L. Page (New York, Van Nostrand), Chapter 6.
- [3] Instruction manual and experiment guide for the PASCO scientific model AP 8210