

## Experimento de Millikan

### COMPROBACIÓN SEGÚN MILLIKAN DEL VALOR DE LA CARGA ELEMENTAL POR MEDIO DE GOTITAS DE ACEITE CARGADAS

- Generación y selección de gotitas de aceite cargadas apropiadas y su observación en el campo eléctrico
- Medición de la velocidad de ascenso en el campo eléctrico y de la velocidad de descenso sin campo eléctrico
- Comprobación del valor de la carga elemental

UE5010400

08/16 UD



Fig. 1: Aparato de Millikan

### FUNDAMENTOS GENERALES

**Robert Andrews Millikan** logró, entre los años de 1910 a 1913, determinar el valor de la carga elemental con una exactitud hasta ese momento no alcanzada y en esta forma demostrar la cuantización de la carga eléctrica. Él obtuvo por ello en premio Nobel de Física. El experimento bautizado con su nombre se basa en la medición de la cantidad de carga de gotitas de aceite cargadas, las cuales en el

aire ascienden en el campo eléctrico de un condensador de placas y sin campo eléctrico descienden. El valor determinado por él  $e = (1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19}$  C se desvía en sólo 0,6% del valor conocido hoy en día.

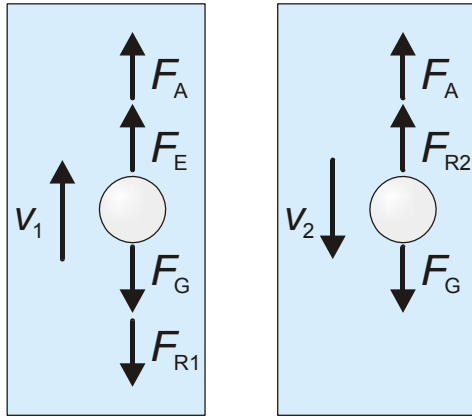


Fig. 2: Representación esquemática del balance de fuerzas para el ascenso de una gotita de aceite en el campo eléctrico (izquierda) y el descenso sin campo eléctrico (derecha).

Las fuerzas que actúan sobre una gotita de aceite, que se asume que tiene forma esférica y se encuentra en el aire en el campo eléctrico de un condensador de placas (Fig. 2), son, la fuerza de su peso,

$$(1) F_G = m_2 \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_2 \cdot g,$$

\$m\_2\$: Masa de la gotita de aceite, \$r\_0\$: Radio de la gotita de aceite, \$\rho\_2\$: Densidad del aceite, \$g\$: Aceleración de caída libre,

el empuje ascensional en el aire,

$$(2) F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_1 \cdot g,$$

\$\rho\_1\$: Densidad del aire

la fuerza del campo eléctrico \$E\$,

$$(3) F_E = q_0 \cdot E = \frac{q_0 \cdot U}{d},$$

\$q\_0\$: Carga de la gotita de aceite, \$U\$: Tensión eléctrica entre las placas del condensador, \$d\$: Distancia entre las placas del condensador

y la fuerza de fricción de Stockes

$$(4) F_{R1,2} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_0 \cdot v_{1,2}.$$

\$\eta\$: Viscosidad del aire, \$v\_1\$: Velocidad de ascenso, \$v\_2\$: Velocidad de descenso

Durante el ascenso de la gotita de aceite en el campo eléctrico se establece el balance de fuerzas (Fig. 2)

$$(5) F_G + F_{R1} = F_E + F_A$$

y al descender sin campo eléctrico

$$(6) F_G = F_{R2} + F_A.$$

De ello, se obtiene para el radio y la carga de la gotita de aceite:

$$(7) r_0 = \sqrt{\frac{9 \cdot \eta \cdot v_2}{2 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g}}$$

y

$$(8) q_0 = \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot (v_1 + v_2)}{U} \cdot r_0.$$

Radioes muy pequeños \$r\_0\$ se encuentran en el orden de magnitud del camino libre medio de las moléculas de aire, así que la fuerza de fricción de Stockes debe ser corregida. Para el radio corregido \$r\$ y la carga corregida \$q\$ se obtiene entonces:

$$(9) r = \sqrt{r_0^2 + \frac{A^2}{4}} - \frac{A}{2} \text{ con } A = \frac{b}{p}$$

\$b = 82 \mu\text{m} \cdot \text{hPa} = \text{constante}\$, \$p\$: Presión atmosférica

$$(10) q = q_0 \cdot \left(1 + \frac{A}{r}\right)^{-1.5}.$$

LISTA DE APARATOS

1	Aparato de Millikan @230V	1018884 (U207001-230)
0		
1	Aparato de Millikan @115V	1018882 (U207001-115)

PUESTA EN FUNCIONAMIENTO

- El aparato de Millikan se instala en un puesto de experimentación plano.
- El ajuste vertical se gira hasta el tope en sentido de la manecillas del reloj (ver Fig. 3).
- El microscopio de medición se desplaza hasta el tope en la barra soporte del aparato básico y se fija en el lado inferior utilizando el tornillo moleteado.
- El microscopio de medición se desplaza totalmente hacia adelante utilizando el engranaje de focalización y por medio del ajuste vertical se orienta aproximadamente hacia la ventana de observación en la cámara de experimentación.
- Se abre la caperuza de recubrimiento de la cámara de experimentación, el nivel de burbuja se coloca sobre la placa superior del condensador de placas y se orienta horizontalmente y por medio de los pies de ajuste se optimiza la orientación.

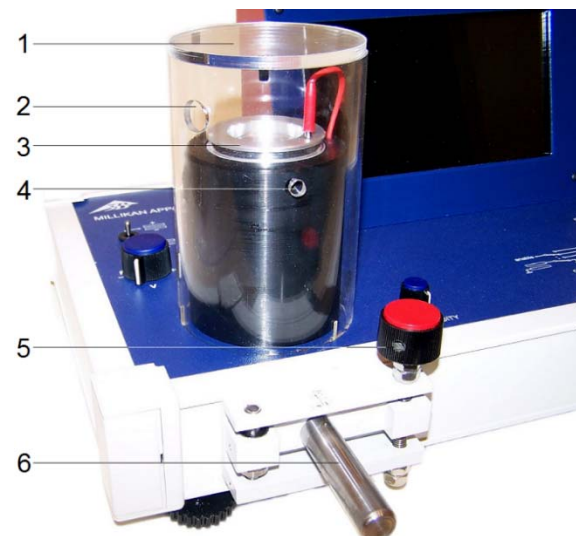


Fig. 3 Cámara de experimentación: 1 Caperuza de recubrimiento, 2 Alojamiento para pulverizador de aceite, 3 Placa superior del condensador, 4 Ventana de observación, 5 Ajuste vertical del microscopio, 6 Barra soporte para el microscopio de medición

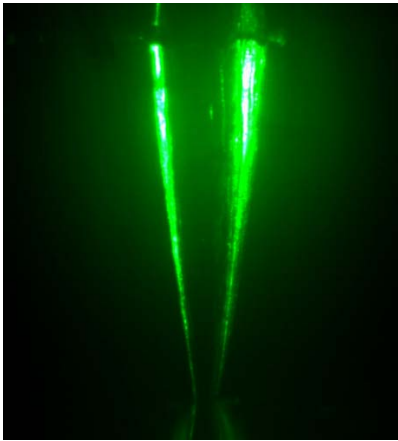


Fig.4 Vista de la aguja de ajuste focalizada, a través del microscopio de medición

- La aguja de ajuste se inserta en la placa superior del condensador de placas y el microscopio se enfoca en la aguja (ver Fig. 4). Para ello se elige la intensidad de luz apropiada y se reajusta la altura del microscopio de medición por medio del ajuste vertical.
- Se retira la aguja de ajuste y se vuelve a cerrar la cámara de experimentación.
- El pulverizador de aceite se llena hasta la mitad de aceite de Millikan y se coloca con cuidado en su punto de alojamiento en la cámara de experimentación.

## REALIZACIÓN

### Inicio de la unidad de indicación y manejo

- El aparato de Millikan se conecta a la red por medio de la fuente de alimentación enchufable.

La unidad de indicación y manejo está lista a funcionar inmediatamente después de la conexión del aparato de Millikan.

- Con un clic en el botón "Selección", se llega al menú de selección de lenguaje.
- Se selecciona el lenguaje deseado haciendo un clic en el botón correspondiente y se confirma haciendo un clic en "Entrar". Se retorna automáticamente al menú principal..
- En el menú principal se hace un clic en "Seguir" para llegar al menú de medición.

### Optimización de la intensidad de la luz

- Se mira en la celda de medición (espacio entre las placas del condensador) por medio del microscopio y se ajusta la intensidad de luz apropiada. Si es necesario se adapta la intensidad de la luz durante la medición.

### Producción, selección y observación de las gotitas de aceite cargadas

- Por medio de una corta y fuerte compresión de la bola de soplador se producen y se pulverizan gotitas de aceite en la celda de medición.

### Observación:

El estado de carga aleatorio de las gotitas de aceite cargadas en esta forma no se puede volver a influir desde fuera a conti-

nuación. En esta forma, el aparato de Millikan funciona sin aplicar una fuente de radiación radioactiva. Como en el montaje de Millikan, las gotitas de aceite se dejan entrar por arriba en la cámara de experimentación y especialmente en la celda de medición.

- Se espera hasta que aparezcan en la celda de medición gotitas de aceite apropiadas. Esto puede demorar unos segundos.
- De las gotitas de aceite visibles se escoge una que descienda lentamente (alrededor de 0,025 – 0,1 mm/s).
- En caso necesario se reajusta el enfoque del microscopio.

### Observaciones generales:

La meta es, producir un pequeño número de gotitas de aceite aisladas, no una nube grande y clara de la cual una gotita de aceite se seleccione. Una compresión repetida de la bola de soplador conduce a que lleguen muchas gotitas de aceite a la celda de medición, especialmente por delante del foco del microscopio de medición. Allí afectan la observación de gotitas de aceite que se encuentren en el foco.

Una gotita de aceite apropiada aparece como un punto claro resplandeciente en el foco del microscopio de medición.

Cuando llega mucho aceite a la celda de medición, ésta tiene que ser limpiada. Si después de repetidas compresiones de la bola de soplador no se encuentra ninguna gotita de aceite en la celda de medición, puede que la apertura en la placa superior del condensador esté obstruida y debe ser limpiada.

### Medición según el método de ascenso

- Se selecciona la polaridad de la tensión  $U$ , p.ej. Placa superior "+", de la inferior "-".
- Tiempos  $t_1$  y  $t_2$  eventualmente guardados se ponen en cero pulsando "Reset".
- Se produce, se observa y se selecciona una gotita de aceite apropiada, como se describe como arriba.
- El interruptor  $U$  se pone en ON. Se ajusta la tensión  $U$  de tal forma que la gotita de aceite pase lentamente hacia arriba por encima de la primera posición de escala previamente seleccionada, en la parte superior de la celda de medición.
- El interruptor  $U$  se pone en OFF, así se deja que la gotita de aceite vuelva a descender.
- El interruptor  $t$  se pone en ON, en el momento en que la gotita de aceite ha vuelto a llegar a la primera posición y así se inicia la medición del tiempo  $t_2$ .
- El interruptor  $U$  se pone en ON en el momento en que la gotita de aceite a llegado a una segunda posición de escala prevista, en la región inferior de la celda de medición, en esta forma se deja que la gotita de aceite suba. La medición del tiempo  $t_2$  se detiene la medición del tiempo  $t_1$  se inicia automáticamente.
- El interruptor  $t$  se pone en OFF, en el momento en que la gotita de aceite ha llegado nuevamente a la primera posición y así se detiene la medición del tiempo  $t_1$ .
- El interruptor  $U$  se pone en OFF.
- Los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  además la tensión  $U$  ("Previous Voltaje") se leen en el display y se anotan junto con la distancia de la posición de escala.
- Se repite muchas veces la medición para diferentes gotitas de aceite.

Tab. 1: Cargas  $q_i$  determinadas de los valores de medida de diez diferentes gotitas de aceite y los valores  $\epsilon_i$  determinados para la carga elemental.

$i$	$t_{1i}$ s	$t_{2i}$ s	$U_i$ V	Polarität	$r_i$ $\mu\text{m}$	$q_i$ $10^{-19}\text{ C}$	$\Delta q_i$ $10^{-19}\text{ C}$	$n_i$	$\epsilon_i$ $10^{-19}\text{ C}$	$\Delta \epsilon_i$ $10^{-19}\text{ C}$
1	12,426	13,780	107,0		0,81	-11,1	0,9	-7	1,59	0,13
2	14,414	17,433	109,4		0,71	-7,9	0,6	-5	1,58	0,12
3	13,604	9,053	292,6		1,00	-6,2	0,4	-4	1,55	0,10
4	13,641	23,631	190,9		0,61	3,5	0,2	2	1,75	0,10
5	10,502	14,858	246,1		0,78	4,9	0,3	3	1,63	0,10
6	14,203	21,674	110,9		0,64	6,3	0,5	4	1,58	0,13
7	9,814	10,228	279,4		0,94	6,6	0,4	4	1,65	0,10
8	13,813	16,824	120,4		0,73	7,6	0,6	5	1,52	0,12
9	9,936	16,380	112,1		0,74	10,2	0,8	6	1,70	0,13
10	13,184	12,214	124,5		0,86	10,6	0,8	7	1,51	0,11

### EJEMPLO DE MEDICIÓN Y EVALUACIÓN

#### Parámetros relevantes para la evaluación

Distancia $d$ entre las placas del condensador :	3 mm
Camino $s$ (entre la marca 6 de arriba y la marca 4 de abajo en la escala del ocular):	1 mm
Viscosidad del aire $\eta$	$1,876 \cdot 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
Densidad del aire $\rho_1$ (25°C, 1013 hPa)	$1,184\text{ kg}/\text{m}^3$
Densidad del aceite $\rho_2$ (25°C)	$871\text{ kg}/\text{m}^3$
Aceleración de caída libre $g$	9,81 m/s
Presión atmosférica $p$	1014 hPa
Parámetro de corrección $b$	$82\ \mu\text{m}\cdot\text{hPa}$
Parámetro de corrección $A$	$8,1\ 10^{-8}\text{ m}$

#### Observación:

La viscosidad del aire y la presión atmosférica han permanecido constantes durante toda la medición. Si esto no se puede garantizar, p. ej. en caso de la realización de varias mediciones en diferentes días, los valores deben ser considerados correspondientemente para cada una de las mediciones individuales.

#### Exactitud de medida

Distancia entre las placas del condensador, $\Delta d$ :	0,1 mm
Camino, $\Delta s$	50 $\mu\text{m}$
Tiempo (controlado por cuarzo), $\Delta t$	1 $\mu\text{s}$
Tensión, $\Delta U$ (0,5% del valor máximo de 1000 V $\pm$ 5 dígitos)	5,5 V

Las exactitudes de medición de los parámetros de material y medio ambiente no son significantes y por lo tanto pueden despreciarse.

La mayor significancia la tienen las exactitudes para la distancia entre las placas del condensador  $\Delta d$  y el camino entre las marcas elegidas en la escala del ocular  $\Delta s$ .

#### Determinación de las velocidades y de la carga

- De los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  medidos se determina cada vez la velocidad de ascenso y de descenso

$$(11) \quad v_{1,2} = \frac{s}{V \cdot t_{1,2}}$$

$s$ : Camino entre dos marcas seleccionadas en la escala del ocular,  $V = 2$ : Aumento del objetivo y a partir de allí, se determina, según la ecuación (10) la carga  $q$  de la gotita de aceite (Tab. 1).

Tab. 2: Determinación del número entero mínimo, que se obtiene como el producto de la relación de cargas  $q_i/q_k = 1,4$  y del número entero fijado  $n_k$ .

$n_k$	$1,4 \cdot n_k$
1	1,4
2	2,8
3	4,2
4	5,6
<b>5</b>	<b>7,0</b>
6	8,4
7	9,8
8	11,2
9	12,6
10	14,0

**Determinación de  $n$**

Si una carga elemental  $e$  existe, para las cargas  $q_i$  y  $q_k$  medidas ( $j,k = 1,2,3, \dots, 10$ ) para cada dos gotitas de aceite debe valer:

$$(12) \quad q_j = n_j \cdot e \text{ y } q_k = n_k \cdot e \text{ con } n_j, n_k \in \mathbb{Z}$$

De aquí sigue:

$$(13) \quad \frac{q_j}{q_k} = \frac{n_j}{n_k} \Leftrightarrow n_j = \frac{q_j}{q_k} \cdot n_k$$

Los números enteros  $n_j$  y  $n_k$  se pueden determinar como sigue, sin limitar la generalidad, se asume que  $|q_j| > |q_k|$  :

- De las cargas medidas (Tab. 1) se forman por parejas las relaciones  $q_i/q_k$  con  $|q_i| > |q_k|$ .
- Se elige un juego de diferentes pares de cargas (dentro del marco de la exactitud de medida) de la misma relación de cargas.

Los pares de cargas  $(q_1, q_2)$ ,  $(q_4, q_5)$  y  $(q_8, q_{10})$ , cuya relación de cargas cada vez da por resultado  $\approx 1,4$ , forman p.ej. un juego como tal, el cual se considera a continuación.

- Se fijan los números enteros  $n_k = 1, 2, 3, \dots$  y sucesivamente se calcula  $1,4 \cdot n_k$  Tab. 2. Entre los valores calculados se identifica el valor que corresponde al número entero *mínimo* o se encuentra lo más cerca del número entero *mínimo*. A ese número se le asigna  $n_j$ .

De la Tab. 2 se obtiene como número entero mínimo  $n_j = 7$ , cuando  $n_k = 5$ . Como las magnitudes de las cargas  $q_1$  y  $q_{10}$  así como  $q_2$  y  $q_8$  concuerdan, dentro del marco del error de medición, y las magnitudes de las cargas  $q_4$  y  $q_5$  son menores en un factor  $\approx 2,3$  se le asigna al par de cargas  $(q_1, q_2)$  el par de valores  $(n_1, n_2) = (-7, -5)$  y al par de cargas  $(q_8, q_{10})$  el par de valores  $(n_8, n_{10}) = (5, 7)$ .

Al par de cargas  $(q_4, q_5)$  se le asigna el par de números  $(n_4, n_5) = (2, 3)$  debido a que  $7 / 2,3 = 3,0$  y  $5 / 2,3 = 2,2$ .

- Se determinan los valores  $n_i$  para las otras cargas, según

la ecuación (13), a partir de las relaciones para una carga con  $n_i$  ya determinado. Todos los valores para  $n_i$  se anotan en Tab. 1.

Ejemplo para la determinación de  $n_6$  a partir de  $n_1$ :  $q_1 / q_6 = -1,8$  y  $n_1 / -1,8 = 3,9$ , así que a  $n_6$  se le asigna el valor 4.

Alternativamente, las cargas  $q_i$  (Tab. 1) se pueden cada vez dividir por números enteros  $n_i$  así que los valores resultantes muestren la mínima dispersión alrededor del valor medio (no ponderado). Como medida para la dispersión se considera la desviación estándar.

**Determinación de  $e$**

- Se dividen cada vez las cargas  $q_i$  y sus correspondientes errores de medida  $\Delta q_i$  por  $n_i$  y así se determinan los valores  $e_i$  y  $\Delta e_i$  para la carga elemental y sus errores de medida para las mediciones individuales (Tab. 1).
- Se determina el mejor valor estimado  $e$  para la carga elemental así como su error estándar  $\Delta e$  a partir de los valores  $e_i$  y sus errores de medida  $\Delta e_i$  determinando el valor medio ponderado:

$$(14) \quad e \pm \Delta e = \frac{\sum w_i \cdot e_i}{\sum w_i} \pm \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \text{ con } w_i = \left( \frac{1}{\Delta e_i} \right)^2$$

A partir de aquí, con los valores de la Tab. 1 se obtiene:

$$(15) \quad e \pm \Delta e = \left( \frac{1286}{799} \pm \frac{1}{28} \right) \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ = (1,61 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

El resultado tiene aun más significación mientras más valores se tomen, es decir, mientras mayor es el volumen de las muestras y menor es el número  $n$  de cargas en las gotitas de aceite. Debido a las inexactitudes, especialmente de la medición de distancia entre las placas del condensador y de la lectura en la escala del microscopio se debe hacer  $n \leq 7$ .