Physique atomique

Expérience d'introduction à la physique atomique

Expérience de Millikan

CONFIRMER LA VALEUR DE LA CHARGE ELEMENTAIRE A L'AIDE DE GOUTTELETTES D'HUILE CHARGEES D'APRES MILLIKAN

- **Générer et sélectionner des gouttelettes d'huile chargées appropriées et les observer dans le champ électrique**
- **Mesurer la vitesse de montée dans le champ électrique et la vitesse de descente sans champ électrique**
- **Confirmer la valeur de la charge élémentaire**

UE5010400

08/16 UD

Fig. 1: Appareil de Millikan

NOTIONS DE BASE GENERALES

Dans les années 1910 à 1913, *Robert Andrews Millikan* réussit à déterminer la charge élémentaire avec une précision alors inégalée et ainsi à confirmer la quantification des charges, ce qui lui valut d'obtenir le prix Nobel de physique. L'expérience qui porte son nom repose sur la mesure de la quantité de charges de gouttelettes d'huile chargées qui montent dans l'air dans le champ électrique d'un condensateur à plaques et qui descendent sans champ électrique. La valeur e = (1,592 ± 0,003)·10^{-19} C qu'il a déterminée ne diverge que de 0,6 % de la valeur connue de nos jours.

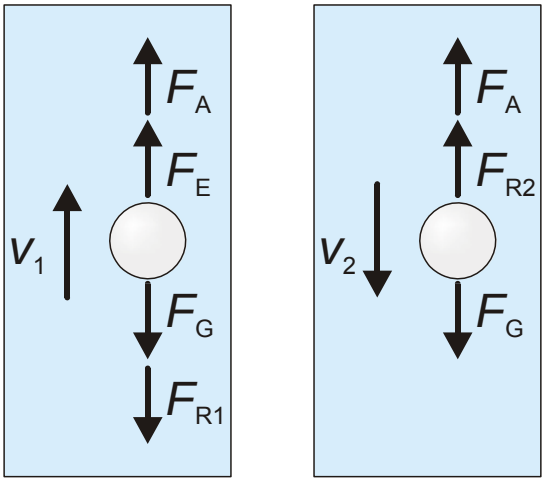

Fig. 2: Représentation schématique du bilan des forces pour la montée d'une gouttelette d'huile dans le champ électrique (à gauche) et de sa descente sans champ électrique (à droite)

Les forces qui agissent sur une gouttelette d'huile considérée sphérique et se trouvant dans l'air dans le champ électrique d'un condensateur à plaques (Fig. 2) sont : le poids

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

m_2 : masse de la gouttelettes d'huile, r_0 : rayon de la gouttelettes d'huile, ρ_2 : densité d'huile, g : accélération de la pesanteur

la force ascensionnelle dans l'air,

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

ρ_1 : densité de l'air

la force dans le champ électrique E,

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

q_0 : charge de la gouttelette d'huile, U : tension électrique appliquée entre les plaques de condensateur, d : écart des plaques de condensateur

et la force de frottement de Stokes

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

η: viscosité de l'air, v_1 : vitesse de montée, v_2 : vitesse de descente

Lorsque la gouttelette d'huile monte dans le champ électrique, les forces s'équilibrent (Fig. 2)

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

et en cas de descente sans champ électrique

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

Pour le rayon et la charge de la gouttelette d'huile, il en résulte :

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

et

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

Les très petits rayons r_0 se situent dans l'ordre de grandeur de la longueur de parcours libre moyenne de la molécule d'air, de sorte qu'il faut corriger la force de frottement de Stokes. Pour le rayon corrigé r et la charge corrigée q, il en résulte :

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

b = 82 µm·hPa = constant, p : pression d'air

(10) $q = q_0 \cdot \left(1 + \frac{A}{r}\right)^{-1,5}$.

LISTE DES APPAREILS

1	Appareil de Millikan @230V	1018884 (U207001-230)
ou		
1	Appareil de Millikan @115V	1018882 (U207001-115)

MISE EN SERVICE

- Placer l'appareil de Millikan sur une surface plane.
- Tourner le régulateur vertical jusqu'en butée dans le sens des aiguilles d'une montre (cf. Fig. 3).
- Glisser le microscope de mesure jusqu'en butée sur le pied de l'appareil de base et le fixer à la partie inférieure avec la vis moletée.
- À l'aide des commandes de mise au point, avancer le microscope de mesure tout à fait en avant et, avec le régulateur vertical, l'orienter grossièrement à la fenêtre d'observation dans la chambre d'expérimentation.
- Ouvrir le capot de protection de la chambre d'expérimentation, placer le niveau à bulle sur la plaque supérieure du condensateur à plaques et optimiser l'orientation horizontale à l'aide des pieds.

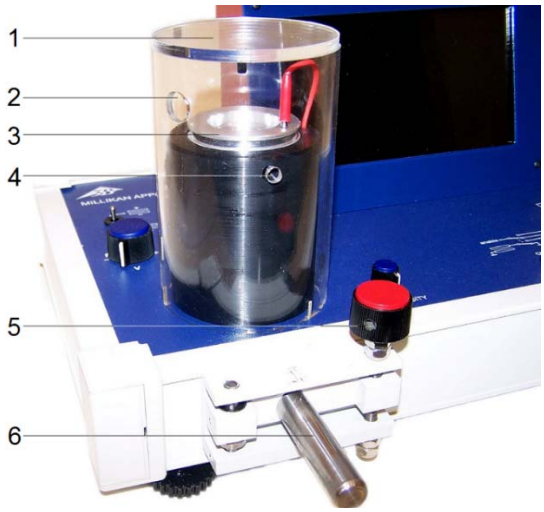

Fig. 3 Chambre d'expérimentation : 1 Capot de protection, 2 Logement pour pulvérisateur d'huile, 3 Plaque de condensateur, 4 Fenêtre d'observation, 5 Régulateur vertical pour tête de microscope, 6 Trépied pour microscope de mesure

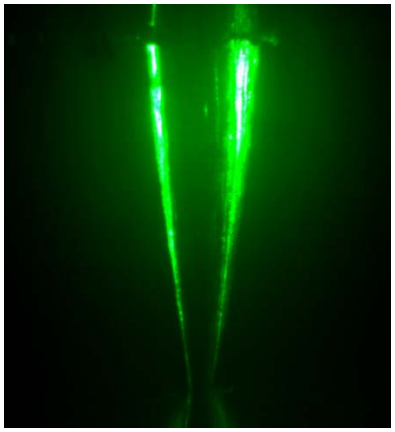

Fig.4 Vue à travers le microscope de mesure sur l'aiguille d'ajustage nette

- Enficher l'aiguille d'ajustage dans la plaque supérieure du condensateur à plaques et effectuer une mise au point du microscope par rapport à l'aiguille (cf. Fig. 4). Pour cela, choisir une intensité lumineuse appropriée et rajuster la hauteur du microscope de mesure au moyen du régulateur vertical.
- Retirer l'aiguille d'ajustage et refermer la chambre d'expérimentation.
- Remplir le pulvérisateur d'huile environ de moitié avec de l'huile Millikan et le placer avec précaution dans le logement de la chambre d'expérimentation.

REALISATION

Démarrage de l'unité d'affichage et de commande

- Brancher l'appareil de Millikan au secteur via l'alimentation enfichable.

Dès que l'appareil de Millikan est branché, l'unité d'affichage et de commande est prête au service.

- Cliquer sur le bouton « Wählen » (« Sélection-ner ») pour accéder au menu de langue.
- Choisir la langue désirée en cliquant sur le bouton correspondant, puis confirmer le choix en cliquant sur le bouton « Eingeben » (« Entrer »). On retourne automatiquement au menu principal
- Dans le menu principal, cliquer sur le bouton « Weiter » (« Continuer ») pour accéder au menu de mesure.

Optimisation de l'intensité lumineuse

- Regarder à travers le microscope de mesure dans la cellule de mesure (l'espace entre les plaques du condensateur) et régler une intensité lumineuse appropriée. Le cas échéant, adapter l'intensité lumineuse pendant la mesure.

Génération, sélection et observation de gouttelettes d'huile chargées

- Comprimer brièvement, mais puissamment la poire pour générer des gouttelettes d'huile chargées et les pulvériser dans la cellule de mesure.

Note :

Par la suite, l'état de charge aléatoire des gouttelettes d'huile ainsi chargées n'est plus influencé de l'extérieur. De ce fait, l'appareil de Millikan se passe de source de rayonnement radioactif. Comme dans le montage de Millikan, les gouttelettes d'huile sont introduites par le haut dans la chambre d'expérimentation et notamment dans la cellule de mesure.

- Attendre que des gouttelettes d'huile appropriées apparaissent dans la cellule de mesure. Cela peut durer quelques secondes.
- Parmi les gouttelettes d'huile visibles, en choisir une qui descend lentement (≈ 0,025 – 0,1 mm/s).
- Le cas échéant, corriger la mise au point du microscope.

Notes générales :

L'objectif est de générer un petit nombre de gouttelettes d'huile, pas de grand nuage clair, pour en choisir une parmi elles. Si l'on appuie plusieurs fois sur la poire, un trop grand nombre de gouttelettes d'huile accèdent dans la cellule de mesure, notamment devant le foyer du microscope de mesure. Là, elles perturbent l'observation des gouttelettes d'huile qui se trouvent dans le foyer.

Une gouttelette d'huile appropriée se présente sous la forme d'un point lumineux dans le foyer du microscope de mesure.

Si la cellule de mesure reçoit trop d'huile, il faut la nettoyer. Si aucune gouttelette d'huile ne se trouve dans la cellule de mesure, même après plusieurs pression de poire, il se peut que l'orifice dans la plaque supérieure du condensateur soit bouché. Il faut alors le nettoyer.

Mesure selon la méthode ascendante

- Sélectionner la polarité de la tension U, par ex. plaque supérieure « + », plaque inférieure « – ».
- Remettre éventuellement les durées enregistrées t_1 et t_2 à zéro avec « Reset ».
- Générer, observer et choisir une gouttelette d'huile appropriée comme décrit ci-dessus.
- Régler le commutateur U sur ON. Régler une tension U de sorte que la gouttelette d'huile remonte lentement au-delà de la première position de graduation présélectionnée dans l'étendue supérieure de la cellule de mesure.
- Régler le commutateur U sur OFF, pour laisser descendre à nouveau la gouttelette d'huile.
- Régler le commutateur t sur ON dès que la gouttelette d'huile a atteint de nouveau la première position et démarrer ainsi la mesure du temps t_2.
- Régler le commutateur U sur ON dès que la gouttelette d'huile a atteint une deuxième position de graduation présélectionnée dans l'étendue supérieure et faire monter ainsi la gouttelette d'huile. La mesure de temps t_2 s'arrête et la mesure de temps t_1 démarre automatiquement.
- Régler le commutateur t sur OFF dès que la gouttelette d'huile a atteint de nouveau la première position présélectionnée, et arrêter ainsi la mesure du temps t_1.
- Régler le commutateur U sur OFF.
- Lire les temps t_1 et t_2 et la tension U (« previous voltage ») à l'écran et noter les valeurs avec l'écart de la position de graduation.
- Dans la mesure du possible, répéter la mesure pour différentes gouttelettes d'huile.

Tab. 1 : Charges q_i de dix gouttelettes d'huile différentes déterminées à partir des valeurs de mesure et valeur e_i qui en résulte pour la charge élémentaire

i	t_{1i} s	t_{2i} s	U_i V	Polarité	r_i µm	q_i 10^{-19} C	Δq_i 10^{-19} C	n_i	e_i 10^{-19} C	Δe_i 10^{-19} 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

EXEMPLE DE MESURE ET EVALUATION

Paramètres significatifs pour l'évaluation

Écart d des plaques de condensateur :	3 mm
Parcours s (entre repère supérieur 6 et repère inférieur 4 sur le réticule gradué) :	1 mm
Viscosité de l'air η	$1{,}876 \cdot 10^{-5}$ kg/(m·s)
Densité de l'air ρ_1 (25°C, 1013 hPa)	1,184 kg/m^3
Densité de l'huile ρ_2 (25°C)	871 kg/m^3
Accélération de la pesanteur g	9,81 m/s
Pression d'air p	1014 hPa
Paramètre de correction b	82 µm·hPa
Paramètre de correction A	8,1 10^{-8} m

Note :

Pendant toute la mesure, la viscosité et la pression d'air sont restées constantes. Si ces conditions ne sont pas garanties, par ex. en cas de mesures réalisées sur plusieurs jours, tenez compte des valeurs pour chaque mesure individuelle.

Précisions des mesures

Écart des plaques de condensateur, Δd:	0,1 mm
Parcours, Δs	50 µm
Temps (commande à quartz), Δt	1 µs
Tension, ΔU (0,5% de la valeur maximale 1000 V ± 5 digits)	5,5 V

Les précisions de mesure des paramètres de matériau, de conditions ambiantes et de correction ne sont pas importantes et peuvent être négligées.

En revanche, les précisions pour l'écart des plaques de condensateur, Δd, et pour le parcours entre les repères sélectionnés sur le réticule gradué, Δs, revêtent une importance majeure.

Détermination des vitesses et de la charge

- Les temps de montée et de descente mesurés t_1 et t_2 permettent de déterminer les vitesses de montée et de descente

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

  s : distance entre deux repères sélectionnés sur le réticule gradué, V = 2 : agrandissement d'objectif

et, selon l'équation (10), la charge q de la gouttelette d'huile (Tab. 1).

Tab. 2: Détermination du plus petit nombre entier, produit résultant du rapport de charge q_j/q_k = 1,4 et du nombre entier réglé n_k.

n_k	$1{,}4 \cdot n_k$
1	1,4
2	2,8
3	4,2
4	5,6
5	**7,0**
6	8,4
7	9,8
8	11,2
9	12,6
10	14,0

Détermination de *n*

S'il existe une charge élémentaire *e*, il faut que soit applicable pour les charges mesurées q_j et q_k (j, k = 1, 2, 3, …, 10) de deux gouttelettes d'huile chacune :

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

Il en résulte :

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

On peut déterminer les nombres entiers n_j et n_k de la manière suivante, tout en supposant, sans restriction de la généralité $|q_j| > |q_k|$:

- À partir des charges mesurées (Tab. 1), formez deux par deux les rapports q_j/ q_k avec $|q_j| > |q_k|$.
- Sélectionnez un jeu de paires de charges différentes présentant les mêmes rapports de charges (dans le cadre de la précision de mesure).

Les paires de charges (q_1,q_2), (q_4,q_5) et (q_8,q_{10}), dont le rapport de charge donne ≈ 1,4, forment par ex. un tel jeu, que nous allons étudier par la suite.

- Réglez les nombres entiers n_k = 1, 2, 3, … et calculez successivement $1{,}4 \cdot n_k$ (Tab. 2). À partir des valeurs calculées, identifiez la valeur qui correspond au nombre entier *le plus petit* ou qui se situe le plus près du nombre entier *le plus petit*. n_j est affecté à cette valeur.

Il résulte du Tab. 2 que le nombre entier le plus petit est n_j = 7, si n_k = 5. Comme les valeurs des charges q_1 et q_{10} ainsi que q_2 et q_8 coïncident dans le cadre des erreurs de mesure et que les valeurs des charges q_4 et q_5 sont inférieures du facteur ≈ 2,3, la paire de valeurs (n_1,n_2) = (−7,−5) est affectée à la paire de charges (q_1,q_2) et la paire de valeurs (n_8,n_{10}) = (5,7) à la paire de charges (q_8,q_{10}).

La paire de valeurs (n_4,n_5) = (2,3) est affectée à la paire de charges (q_4,q_5) en raison de 7 / 2,3 = 3,0 et 5 / 2,3 = 2,2.

- Déterminez les valeurs de n_i pour les autres charges d'après l'équation (13) à partir des rapports avec une charge avec n_i déjà déterminé. Notez toutes les valeurs pour n_i dans le Tab. 1.

Exemple pour déterminer n_6 à partir de n_1 : q_1 / q_6 = −1,8 et n_1 / −1,8 = 3,9, de sorte que la valeur 4 soit affectée à n_6.

Comme variante, les charges q_i déterminées à partir des mesures (Tab. 1) peuvent être divisées par des nombres entiers n_i de sorte que les valeurs qui en résultent présentent la plus petite dispersion possible autour de la moyenne (non pondérée). L'écart standard sert de référence à la dispersion.

Détermination de *e*

- Divisez chacune des charges q_i et leurs erreurs de mesure Δq_i par n_i et déterminez ainsi les valeurs e_i et Δe_i pour la charge élémentaire et leurs erreurs de mesure pour les mesures individuelles (Tab. 1)
- On détermine la meilleure estimation *e* possible pour la charge élémentaire ainsi que l'erreur standard Δe à partir des valeurs e_i des mesures individuelles et de leurs erreurs de mesure Δe_i en formant une moyenne pondérée :

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

Avec les valeurs du Tab. 1, il en résulte :

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

Plus on enregistre de valeurs de mesure, plus le résultat est pertinent. Autrement dit, plus l'échantillon est volumineux, plus le nombre *n* de charges sur les gouttelettes d'huile est petit. En raison des imprécisions, notamment de l'écart des plaques à condensateur et de la lecture sur la graduation du microscope, il est recommandé d'avoir $n \leq 7$.

© Copyright 2016 3B Scientific GmbH