

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta



FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM III

Téma: Úloha 1 – Milikanův experiment
Autor: Šimon Povondra
Datum: 11.10.2023
Obor: Měřicí a výpočetní technika
Semestr: 5. semestr

Hodnocení:

1. Zadání – Milikanův experiment

Experimentálně stanovit hodnotu elektrického elementárního náboje e pomocí Milikanova experimentu – metodou tzv. padající kapky.

2. Seznam pomůcek

Základní deska, mikroskop s milimetrovou škálou, deskový kondenzátor, osvětlovací zařízení, olej, rozprašovač oleje, gumový balónek.

3. Teorie

První snahy o zjištění elektrického elementárního náboje elektronu e byly již na konci 19. století, kdy se o to pokoušel J. S. Townsend (student samotného J. J. Thomsona – objevitele elektronu). Townsend používal vodní kapky, jež padaly do kyseliny sírové. Elementární náboj určil na přibližných $e = 1,001 \cdot 10^{-19}$ C. Později, v letech 1906 až 1914 byl proveden takzvaný Milikanův experiment za kterým stál Harvey Fletcher a Robert A. Milikan, jenž roku 1923 obdržel za tento objev Nobelovu cenu. Milikan využil olejové kapky (které se vypařují pomaleji než kapky vodní). A jeho experimentem byl elementární náboj určen na $e = 1,592 \cdot 10^{-19}$ C. Po zahrnutí viskozity vzduchu byla takto hodnota upravena na $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. [1]

Pro zjištění elementárního náboje elektronu e bylo využíváno metody tzv. padající kapky. Při ní byly kapičky ricinového oleje udržovány na stále teplotě a vstříknuty mezi desky kondenzátoru využitím rozprašovače. Když nebyl kondenzátor nabitý, kapičky padaly (kvůli působení tíhové síly). V případě nabití kondenzátoru začala působit elektrostatická síla a kapičky začaly stoupat směrem vzhůru. Pokud byl kondenzátor vhodně nabit, účinky tíhové a elektrostatické síly se vyrušily a kapičky o stejné tíze zůstaly v ustálené poloze. Dodatečná změna náboje kapiček byla pomocí rentgenového záření. Milikan tímto pokusem dokázal, že elektrický náboj je kvantován. A náboj každé kapičky je pouze celočíselným násobkem elementárního náboje. [1] [2]

Ze Sutherlandova vztahu se zjistí dynamická viskozita vzduchu:

$$\eta_{\text{vzduchu}} = \eta_0 \cdot \frac{T_0 + C}{\bar{T} + C} \cdot \left(\frac{\bar{T}}{T_0} \right)^{3/2} [\mu\text{Pa}] \quad (1)$$

kde je $\eta_0 = 18,27 \mu\text{Pa}$ dynamická viskozita vzduchu při teplotě T_0 , $T_0 = 291,15$ K referenční hodnota teploty, \bar{T} teplota vzduchu a $C = 120$ K Sutherlandova konstanta.

K určení hustoty vzduchu je třeba znát tlak saturovaných par p_{sat} , který poslouží k vypočítání tlaku vodních par p_v a ten následně k výpočtu parciálního tlaku suchého vzduchu p_d .

Tlak saturovaných par p_{sat} :

$$p_{\text{sat}} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{T + 237,3}} [\text{hPa}] \quad (2)$$

kde je t teplota vzduchu ve $^{\circ}\text{C}$.

Tlak vodních par p_v :

$$p_v = \varphi \cdot p_{\text{sat}} [\text{hPa}] \quad (3)$$

kde je φ vlhkost vzduchu a p_{sat} [hPa] tlak saturovaných par.

Parciální tlak suchého vzduchu p_d :

$$p_d = p - p_v [\text{hPa}] \quad (4)$$

kde je p [hPa] tlak vzduchu a p_v [hPa] tlak vodních par.

Hustota vzduchu ρ_1 :

$$\rho_1 = \frac{p_d}{R_d \cdot T} + \frac{p_v}{R_v \cdot T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (5)$$

kde je p_d parciální tlak suchého vzduchu, $R_d = 287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ měrná plynová konstanta suchého vzduchu, T teplota vzduchu, p_v tlak vodních par a $R_v = 461,495 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ měrná plynová konstanta vodních par.

Poloměr kapky:

$$r = \sqrt{\frac{9}{2} \cdot \frac{\eta \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}} [\text{m}] \quad (6)$$

kde je η dynamická viskozita vzduchu, Δs vzdálenost, kterou kapka urazila na milimetrové stupnici, Δt jak dlouho trvalo kapce urazit danou vzdálenost Δs , $\rho_2 = 873 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ hustota oleje, ρ_1 hustota vzduchu a $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gravitační zrychlení. [1] [3]

Náboj kapky:

$$q = 9\pi \cdot \frac{d}{U} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \eta^3 \cdot \left(\frac{\Delta s}{\Delta t}\right)^3}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}} [\text{C}] \quad (7)$$

kde je d [mm] vzdálenost mezi deskami kondenzátoru a U [V] změřené napětí. [3]

Korekce náboje kapky (využitím Cunninghamova vztahu pro malé poloměry):

$$q_c = \frac{q}{\sqrt{\left(1 + \frac{A}{r}\right)^3}} \text{ [C]}$$

(8)

kde je $A = 0,07776 \text{ } \mu\text{m}$ koeficient tření olejové kapky ve vzduchu (za standartního tlaku vzduchu a teploty $25 \text{ } ^\circ\text{C}$). [3]

Elementární náboj e :

$$e = \frac{q_c}{n} \text{ [C]}$$

(9)

kde je n počet částic tvořící náboj q .

4. Postup měření

Pozn.: V průběhu experimentu byl zapisován tlak, teplota a vlhkost v místnosti, a to vždy přibližně každé třetí až čtvrté měření (z celkových 30).

Nejprve bylo zkontrolováno zapojení dle návodu a obrázku a bylo ověřeno, zda je dostatečné množství oleje v rozprašovači. Byl zapnut zdroj (a s ním i lampa), napětí bylo nastaveno na 0 V a přepínač byl dán na pozici off (vypnuto). Následně se zaostřila čočka tak, aby byla vidět milimetrová škála co možná nejostřeji. Po zaostření byla umístěna do vertikální polohy. Využitím gumového balónku byly vstříknuty kapičky oleje mezi desky kondenzátoru. Pohybem mikroskopu po základní desce bylo zaostřeno na některou z libovolných kapiček (tak aby byla vidět jako světelný bod). Většina kapiček bez přiloženého napětí padala. Následně se nastavili stopky na měření času a daly se do pozice START. Vybrala se vhodná kapička a pomocí určitého napětí se zadržela v takové poloze, kdy ani nepadala ani nestoupala. Napětí se zapsalo do předem připravené tabulky. Vyplo se napětí a ve stejnou chvíli se sepnuly stopky. Měřil se pád kapičky na určité vzdálenosti (využitím milimetrové stupnice). Když tuto vzdálenost kapička urazila, stopky se zastavily. Do tabulky byla vnesena daná vzdálenost a čas po který kapička padala. Resetovaly se stopky. Tento proces se opakoval celkem 30krát, a to vždy pro jinou kapičku.

5. Výpočty a přehled výsledků měření

Tabulka 1: Tabulka zobrazující všechny naměřené hodnoty během Milikanova experimentu

| Číslo měření | Napětí U [V] | Vzdálenost Δs [mm] | Čas Δt [s] | Teplota t [°C] | Tlak p [hPa] | Vlhkost φ [%] |
|--------------|----------------|----------------------------|--------------------|------------------|----------------|-----------------------|
| 1 | 52,30 | 1,00 | 4,31 | 22,1 | 971,9 | 52 |
| 2 | 60,60 | 1,00 | 4,62 | 22,2 | 972,0 | 53 |
| 3 | 15,30 | 2,00 | 31,61 | | | |
| 4 | 260,60 | 2,00 | 5,19 | | | |
| 5 | 303,90 | 2,00 | 14,88 | | | |
| 6 | 40,60 | 2,00 | 17,79 | 22,2 | 971,9 | 54 |
| 7 | 17,20 | 2,00 | 13,29 | | | |
| 8 | 330,80 | 2,00 | 6,39 | | | |
| 9 | 9,80 | 2,00 | 25,51 | | | |
| 10 | 117,50 | 2,00 | 18,81 | 22,5 | 971,9 | 54 |
| 11 | 144,90 | 1,00 | 8,49 | | | |
| 12 | 41,30 | 1,00 | 12,71 | | | |
| 13 | 123,00 | 1,00 | 10,47 | | | |
| 14 | 132,70 | 1,00 | 17,17 | 22,7 | 971,8 | 54 |
| 15 | 146,50 | 1,00 | 18,15 | | | |
| 16 | 56,10 | 1,00 | 8,61 | | | |
| 17 | 68,90 | 1,00 | 8,37 | | | |
| 18 | 61,30 | 2,00 | 16,21 | 22,9 | 971,7 | 54 |
| 19 | 46,50 | 2,00 | 15,30 | | | |
| 20 | 92,90 | 2,00 | 8,51 | | | |
| 21 | 20,10 | 2,00 | 35,43 | | | |
| 22 | 155,20 | 3,00 | 16,13 | 23,1 | 971,7 | 54 |
| 23 | 115,10 | 3,00 | 30,60 | | | |
| 24 | 122,90 | 2,00 | 15,22 | | | |
| 25 | 260,00 | 2,00 | 26,97 | | | |
| 26 | 365,70 | 2,00 | 2,91 | 23,3 | 971,7 | 54 |
| 27 | 50,10 | 2,00 | 23,73 | | | |
| 28 | 41,60 | 2,00 | 18,94 | | | |
| 29 | 50,30 | 2,00 | 16,91 | 23,4 | 971,6 | 54 |
| 30 | 83,80 | 2,00 | 11,89 | | | |

Doplňující data k měření [4]:

- elementární náboj elektronu $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$

Jelikož mikroskop dvojnásobně zvětšoval, bylo nutné vydělit naměřenou vzdálenost dvěma, aby se získala vzdálenost skutečná. Zároveň byla přepočtena teplota ze stupňů na kelviny (kdy $0\text{ °C} = 273,15\text{ K}$).

Tabulka 2: Zobrazující všechny naměřené hodnoty včetně přepočtené vzdálenosti a teploty na kelviny

| Číslo měření | Napětí U [V] | Vzdálenost Δs [mm] | Čas Δt [s] | Teplota t [K] | Tlak p [hPa] | Vlhkost φ [%] |
|--------------|----------------|----------------------------|--------------------|-----------------|----------------|-----------------------|
| 1 | 52,30 | 0,50 | 4,31 | 295,25 | 971,9 | 52 |
| 2 | 60,60 | 0,50 | 4,62 | 295,35 | 972,0 | 53 |
| 3 | 15,30 | 1,00 | 31,61 | | | |
| 4 | 260,60 | 1,00 | 5,19 | | | |
| 5 | 303,90 | 1,00 | 14,88 | | | |
| 6 | 40,60 | 1,00 | 17,79 | 295,35 | 971,9 | 54 |
| 7 | 17,20 | 1,00 | 13,29 | | | |
| 8 | 330,80 | 1,00 | 6,39 | | | |
| 9 | 9,80 | 1,00 | 25,51 | | | |
| 10 | 117,50 | 1,00 | 18,81 | 295,65 | 971,9 | 54 |
| 11 | 144,90 | 0,50 | 8,49 | | | |
| 12 | 41,30 | 0,50 | 12,71 | | | |
| 13 | 123,00 | 0,50 | 10,47 | | | |
| 14 | 132,70 | 0,50 | 17,17 | 295,85 | 971,8 | 54 |
| 15 | 146,50 | 0,50 | 18,15 | | | |
| 16 | 56,10 | 0,50 | 8,61 | | | |
| 17 | 68,90 | 0,50 | 8,37 | | | |
| 18 | 61,30 | 1,00 | 16,21 | 296,05 | 971,7 | 54 |
| 19 | 46,50 | 1,00 | 15,30 | | | |
| 20 | 92,90 | 1,00 | 8,51 | | | |
| 21 | 20,10 | 1,00 | 35,43 | | | |
| 22 | 155,20 | 1,50 | 16,13 | 296,25 | 971,7 | 54 |
| 23 | 115,10 | 1,50 | 30,60 | | | |
| 24 | 122,90 | 1,00 | 15,22 | | | |
| 25 | 260,00 | 1,00 | 26,97 | | | |
| 26 | 365,70 | 1,00 | 2,91 | 296,45 | 971,7 | 54 |
| 27 | 50,10 | 1,00 | 23,73 | | | |
| 28 | 41,60 | 1,00 | 18,94 | | | |
| 29 | 50,30 | 1,00 | 16,91 | 296,55 | 971,6 | 54 |
| 30 | 83,80 | 1,00 | 11,89 | | | |

Pro jednodušší počítání byla z naměřené teploty, tlaku a relativní vlhkosti vzduchu vypočítána střední hodnota. Pro **teplotu** následovně:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n=9} T_i}{9} \text{ [K]}$$

$$\bar{T} = 295,86 \text{ K}$$

K ní poté střední kvadratická odchylka teploty:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum (T_i - \bar{T})^2}{9 \cdot (9 - 1)}} \text{ [K]}$$

$$\sigma_T = 0,16 \text{ K}$$

$$\bar{T} = (295,86 \pm 0,16) \text{ K}$$

Pro **tlak** vyjde střední hodnota:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n=9} p_i}{9} \text{ [hPa]}$$

$$\bar{p} = 971,79 \text{ hPa}$$

K ní střední kvadratická odchylka:

$$\overline{\sigma_p} = \sqrt{\frac{\sum (p_i - \bar{p})^2}{9 \cdot (9 - 1)}} \text{ [hPa]}$$

$$\overline{\sigma_p} = 0,05 \text{ hPa}$$

$$\bar{p} = (971,79 \pm 0,05) \text{ hPa}$$

Relativní vlhkost vzduchu vyjde:

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^{n=9} \varphi_i}{9} \text{ [%]}$$

$$\bar{\varphi} = 53,7$$

K ní střední kvadratická odchylka:

$$\overline{\sigma_\varphi} = \sqrt{\frac{\sum (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}{9 \cdot (9 - 1)}} \text{ [%]}$$

$$\overline{\sigma_\varphi} = 0,2 \text{ %}$$

$$\bar{\varphi} = (53,7 \pm 0,2) \text{ %}$$

Dosazením do vzorce 1 se zjistí **dynamická viskozita vzduchu**:

$$\eta_{\text{vzduchu}} = \eta_0 \cdot \frac{T_0 + C}{\bar{T} + C} \cdot \left(\frac{\bar{T}}{T_0} \right)^{3/2} \text{ [μPa]}$$

$$\eta_{\text{vzduchu}} = 18,27 \cdot \frac{291,15 + 120}{295,86 + 120} \cdot \left(\frac{295,86}{291,15} \right)^{3/2} \text{ [μPa]}$$

$$\eta_{\text{vzduchu}} = 18,503 \text{ μPa}$$

Chyba se vypočítá pomocí parciální derivace:

$$\delta X = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial A} \cdot \delta A \right)^2 + \dots}$$

Po dosazení hodnot:

$$\delta \eta_{\text{vzduchu}} = 0,008 \text{ μPa}$$

$$\eta_{\text{vzduchu}} = (18,503 \pm 0,008) \text{ μPa}$$

Tlak saturovaných par p_{sat} se vypočítá pomocí vzorce 2:

$$p_{\text{sat}} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{T+237,3}} [\text{hPa}]$$

$$p_{\text{sat}} = 27,6 \text{ hPa}$$

Chyba se vypočte pomocí parciální derivace:

$$\delta p_{\text{sat}} = 0,2 \text{ hPa}$$

$$\mathbf{p_{sat} = (27,6 \pm 0,2) \text{ hPa}}$$

Tlak vodních par p_v se spočítá využitím vzorce 3:

$$p_v = \varphi \cdot p_{\text{sat}} [\text{hPa}]$$

$$p_v = 53,67 \cdot 27,60 [\text{hPa}]$$

$$p_v = 14,81 \text{ hPa}$$

Chyba se vypočte pomocí parciální derivace:

$$\delta p_v = 0,13 \text{ hPa}$$

$$\mathbf{p_v = (14,81 \pm 0,13) \text{ hPa}}$$

Parciální tlak suchého vzduchu p_d se spočítá využitím vzorce 4:

$$p_d = p - p_v [\text{hPa}]$$

$$p_d = 956,98 \text{ hPa}$$

Chyba se vypočte pomocí parciální derivace:

$$\delta p_d = 0,14 \text{ hPa}$$

$$\mathbf{p_d = (956,98 \pm 0,14) \text{ hPa}}$$

Hustota vzduchu ρ_1 se spočítá využitím vzorce 5:

$$\rho_1 = \frac{p_d}{R_d \cdot T} + \frac{p_v}{R_v \cdot T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho_1 = \frac{95698}{287,058 \cdot T} + \frac{1481}{461,495 \cdot T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho_1 = 1,1376 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Chyba se vypočte pomocí parciální derivace:

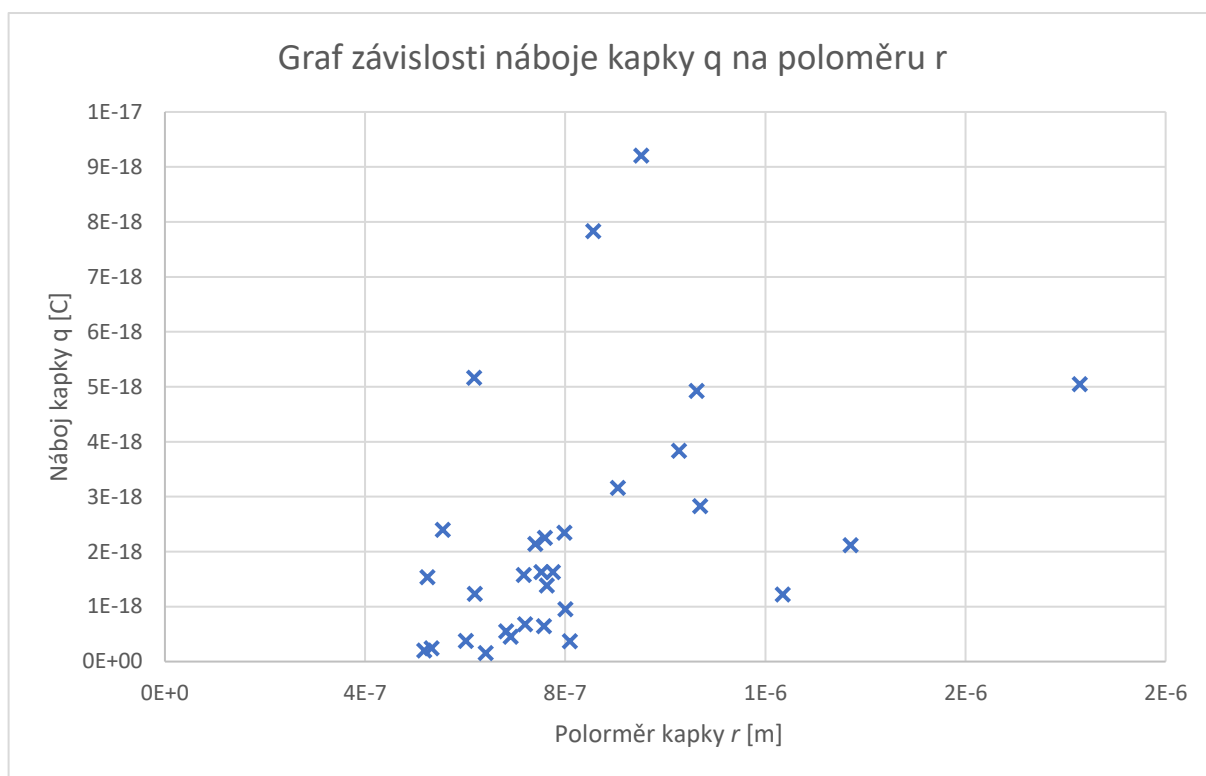
$$\delta p_d = 0,0006 \text{ hPa}$$

$$\mathbf{\rho_1 = (1,1376 \pm 0,0006) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

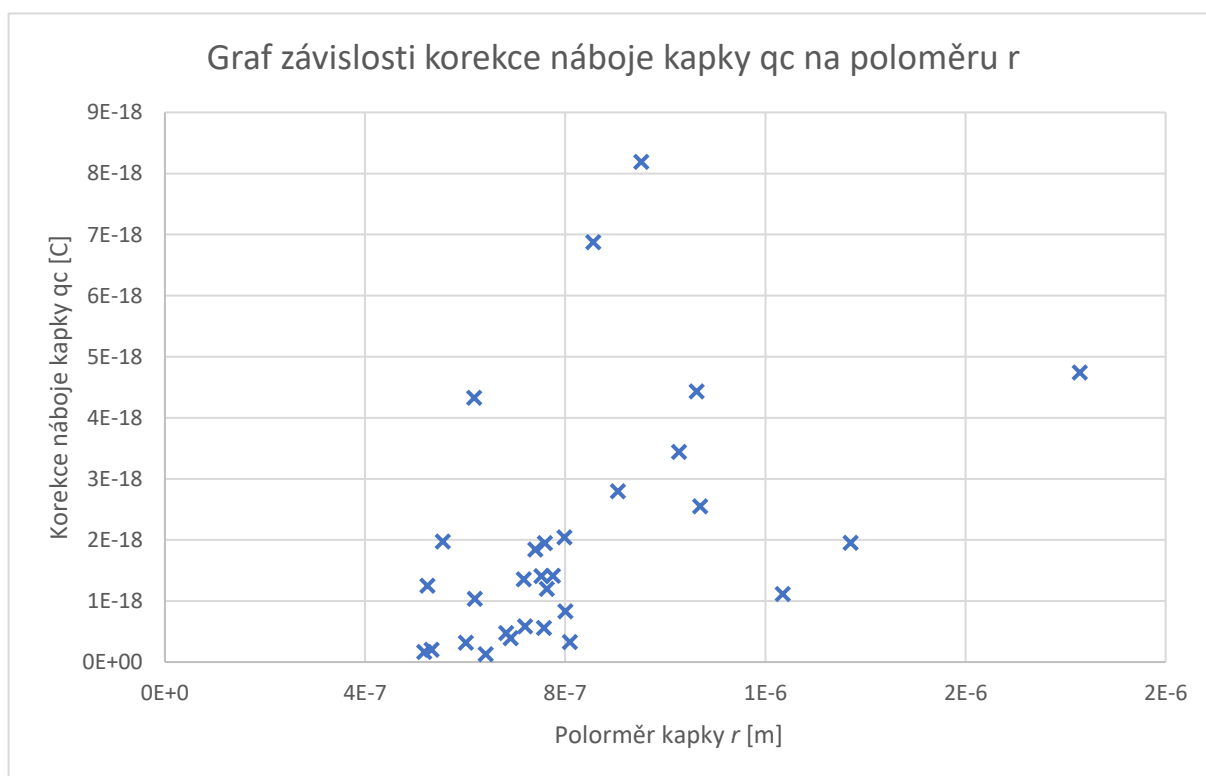
Poloměr kapky (vzorec 6), náboj kapky (vzorec 7), korekce náboje kapky (vzorec 8) a chyby měření (využitím parciálních derivací) ke každému z nich se vypočítali pro každé z 30 měření pomocí excelu a jsou umístěné v tabulce 3:

Tabulka 3: Tabulka zobrazující poloměr kapky r , náboj kapky q , korekci náboje kapky q_c a jejich chyby

| Číslo měření | Poloměr kapky r [m] | Chyba poloměru kapky δr [m] | Náboj kapky q [C] | Chyba náboje kapky δq [C] | Korekce náboje kapky q_c [C] | Chyba korekce náboje kapky δq_c [C] |
|--------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | 1,06E-06 | 1,64E-08 | 4,93E-18 | 2,33E-19 | 4,43E-18 | 2,10E-19 |
| 2 | 1,03E-06 | 1,58E-08 | 3,84E-18 | 1,81E-19 | 3,44E-18 | 1,62E-19 |
| 3 | 5,55E-07 | 4,17E-09 | 2,40E-18 | 7,45E-20 | 1,97E-18 | 6,12E-20 |
| 4 | 1,37E-06 | 1,10E-08 | 2,12E-18 | 5,42E-20 | 1,95E-18 | 4,99E-20 |
| 5 | 8,09E-07 | 6,13E-09 | 3,74E-19 | 9,06E-21 | 3,26E-19 | 7,91E-21 |
| 6 | 7,40E-07 | 5,59E-09 | 2,14E-18 | 5,41E-20 | 1,84E-18 | 4,66E-20 |
| 7 | 8,56E-07 | 6,49E-09 | 7,83E-18 | 2,34E-19 | 6,87E-18 | 2,05E-19 |
| 8 | 1,23E-06 | 9,71E-09 | 1,22E-18 | 3,06E-20 | 1,11E-18 | 2,79E-20 |
| 9 | 6,18E-07 | 4,65E-09 | 5,17E-18 | 2,01E-19 | 4,33E-18 | 1,69E-19 |
| 10 | 7,19E-07 | 5,43E-09 | 6,81E-19 | 1,65E-20 | 5,84E-19 | 1,42E-20 |
| 11 | 7,57E-07 | 1,14E-08 | 6,43E-19 | 2,97E-20 | 5,56E-19 | 2,57E-20 |
| 12 | 6,19E-07 | 9,31E-09 | 1,23E-18 | 5,73E-20 | 1,03E-18 | 4,81E-20 |
| 13 | 6,82E-07 | 1,03E-08 | 5,54E-19 | 2,55E-20 | 4,71E-19 | 2,17E-20 |
| 14 | 5,33E-07 | 8,00E-09 | 2,44E-19 | 1,12E-20 | 1,99E-19 | 9,16E-21 |
| 15 | 5,18E-07 | 7,78E-09 | 2,04E-19 | 9,35E-21 | 1,65E-19 | 7,60E-21 |
| 16 | 7,52E-07 | 1,14E-08 | 1,63E-18 | 7,55E-20 | 1,40E-18 | 6,52E-20 |
| 17 | 7,63E-07 | 1,15E-08 | 1,38E-18 | 6,41E-20 | 1,20E-18 | 5,54E-20 |
| 18 | 7,75E-07 | 5,86E-09 | 1,63E-18 | 4,02E-20 | 1,41E-18 | 3,49E-20 |
| 19 | 7,98E-07 | 6,04E-09 | 2,35E-18 | 5,87E-20 | 2,04E-18 | 5,11E-20 |
| 20 | 1,07E-06 | 8,25E-09 | 2,83E-18 | 7,02E-20 | 2,55E-18 | 6,32E-20 |
| 21 | 5,24E-07 | 3,94E-09 | 1,54E-18 | 4,36E-20 | 1,25E-18 | 3,54E-20 |
| 22 | 9,52E-07 | 4,84E-09 | 9,21E-18 | 2,11E-19 | 8,19E-18 | 1,88E-19 |
| 23 | 6,91E-07 | 3,47E-09 | 4,56E-19 | 7,92E-21 | 3,89E-19 | 6,75E-21 |
| 24 | 8,00E-07 | 6,05E-09 | 9,55E-19 | 2,32E-20 | 8,31E-19 | 2,02E-20 |
| 25 | 6,01E-07 | 4,52E-09 | 3,79E-19 | 9,17E-21 | 3,16E-19 | 7,65E-21 |
| 26 | 1,83E-06 | 1,66E-08 | 5,05E-18 | 1,44E-19 | 4,74E-18 | 1,35E-19 |
| 27 | 6,41E-07 | 4,82E-09 | 1,54E-19 | 3,72E-21 | 1,30E-19 | 3,14E-21 |
| 28 | 7,17E-07 | 5,41E-09 | 1,58E-18 | 3,93E-20 | 1,35E-18 | 3,37E-20 |
| 29 | 7,59E-07 | 5,73E-09 | 2,26E-18 | 5,69E-20 | 1,95E-18 | 4,92E-20 |
| 30 | 9,05E-07 | 6,89E-09 | 3,16E-18 | 7,92E-20 | 2,80E-18 | 7,00E-20 |



Graf 1: Graf zobrazující závislost velikosti náboje q na poloměru kapky r



Graf 2: Graf zobrazující závislost velikosti korekce náboje q_c na poloměru kapky r

K výpočtu elementárního náboje je nejprve nutné zjistit, kolika elektrony je daný náboj kapky tvořen. To lze zjistit se znalostí tabulkové hodnoty elementárního náboje ($e_{\text{tab}} = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$):

$$n = \frac{q_c}{e_{\text{tab}}}$$

Výpočty byly provedeny pomocí excelu, následně byl počet zaokrouhlen na celé číslo. Hodnoty jsou umístěny v tabulce 4.

Elementární náboj e se pak se znalostí počtu elektronů n spočítá využitím vzorce 9:

$$e = \frac{q_c}{n} [\text{C}]$$

Chyba se vypočítá pomocí parciální derivace.

Tabulka 4: Tabulka zobrazující počet elektronů n , elementární náboj e a jeho chybu

| Číslo měření | Počet elektronů n | Elementární náboj $e \cdot 10^{-19} [\text{C}]$ | Chyba elementárního náboje $\delta e \cdot 10^{-19} [\text{C}]$ |
|--------------|---------------------|--|--|
| 1 | 28 | 1,58 | 0,07 |
| 2 | 21 | 1,64 | 0,08 |
| 3 | 12 | 1,64 | 0,05 |
| 4 | 12 | 1,63 | 0,04 |
| 5 | 2 | 1,63 | 0,04 |
| 6 | 12 | 1,54 | 0,04 |
| 7 | 43 | 1,60 | 0,05 |
| 8 | 7 | 1,59 | 0,04 |
| 9 | 27 | 1,60 | 0,06 |
| 10 | 4 | 1,46 | 0,04 |
| 11 | 3 | 1,85 | 0,09 |
| 12 | 6 | 1,72 | 0,08 |
| 13 | 3 | 1,57 | 0,07 |
| 14 | 1 | 1,99 | 0,09 |
| 15 | 1 | 1,65 | 0,08 |
| 16 | 9 | 1,56 | 0,07 |
| 17 | 7 | 1,71 | 0,08 |
| 18 | 9 | 1,57 | 0,04 |
| 19 | 13 | 1,57 | 0,04 |
| 20 | 16 | 1,59 | 0,04 |
| 21 | 8 | 1,56 | 0,04 |
| 22 | 51 | 1,61 | 0,04 |
| 23 | 2 | 1,94 | 0,03 |
| 24 | 5 | 1,66 | 0,04 |
| 25 | 2 | 1,58 | 0,04 |
| 26 | 30 | 1,58 | 0,05 |
| 27 | 1 | 1,30 | 0,03 |
| 28 | 8 | 1,69 | 0,04 |
| 29 | 12 | 1,62 | 0,04 |
| 30 | 17 | 1,64 | 0,04 |

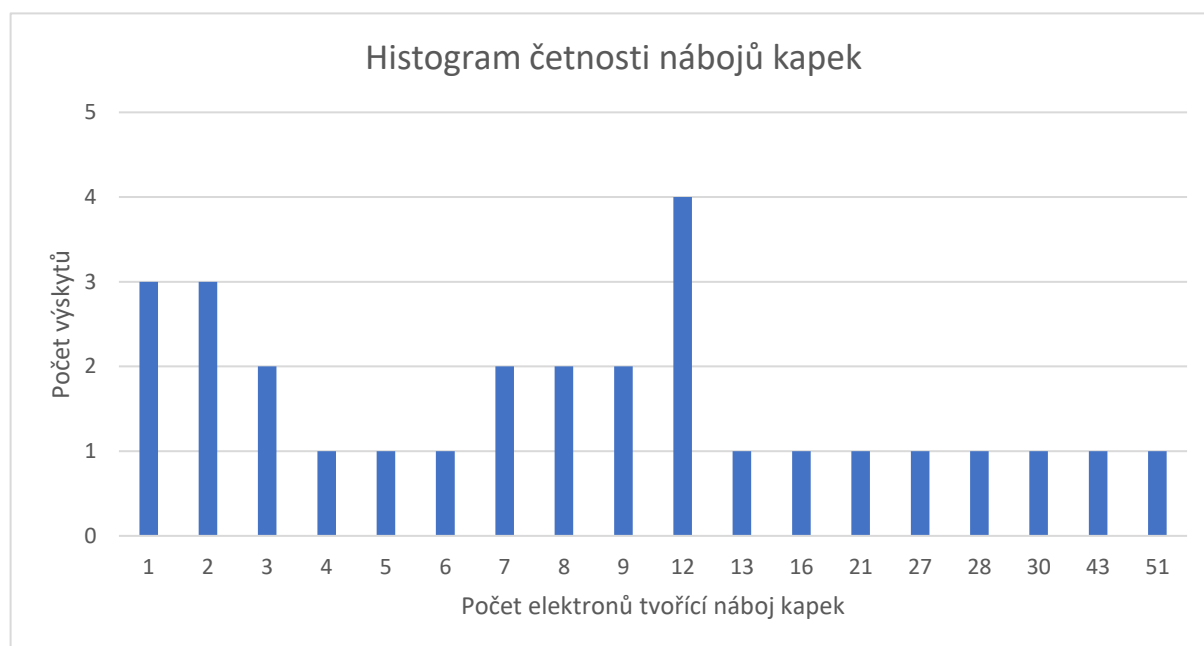
Střední hodnota **elementární náboj e** potom vypočítá jako průměrná hodnota elementárního náboje ze všech 30 měření.

$$e = 1,63 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Chyba se vypočítá jako střední kvadratická chyba se zahrnutím jednotlivých chyb elementárního náboje spočtených parciální derivací.

$$\delta e = 0,02 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$e = (1,63 \pm 0,2) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



Graf 3: Histogram četnosti pozorovaných nábojů kapky

6. Diskuse

Pro měření byly vždy vybírány větší, dobře pozorovatelné kapičky. Zjištěná hodnota elementárního náboje e vychází na $e = (1,63 \pm 0,2) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Relativní chyba vychází zhruba na 1,2 %. Tabulková hodnota elementárního náboje je $e_{\text{tab}} = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Odchylka tabulkové hodnoty od naměřené je zhruba 1,8 %. Měření lze tedy považovat za úspěšné.

Chyba měření mohla být způsobena nepřesným odečtem z milimetrové stupnice, nevčasným zastavením stopek, nedokonalé odhadnutým napětím, při kterém se kapička oleje nepohybovala apod.

Výsledky jsou zobrazeny v grafech 1 až 3. A finální hodnota elementárního náboje z tabulky 4 je umístěna v závěru.

7. Závěr

Hodnota elementárního náboje e zjištěná vlastním měřením v praktiku:

$$e = (1,63 \pm 0,2) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

8. Literatura

- [1] Milikanův experiment. online. In: *Zadání do Fyzikálních praktik IV*. Dostupné z: https://elearning.jcu.cz/pluginfile.php/434390/mod_resource/content/2/1_Millikan%C5%AFv_experiment.pdf. [cit. 2023-10-14].
- [2] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Millikanův pokus. online. In: *Encyklopedie fyziky*. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/708-millikanuv-pokus>. [cit. 2023-10-14].
- [3] JANICH, A.; LÖFFELMANN, J. a TROJANOVÁ, A. Millikanův experiment. online. In: *Týden vědy*. 2016. Dostupné z: <https://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2016/cd/sbpdf/millikan.pdf>. [cit. 2023-10-14].
- [4] KUBÁČEK, Pavel. Základní fyzikální konstanty. online. In: *Základy fyzikální chemie*. 2006. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/podpora/konstanty.htm. [cit. 2023-10-08].

9. Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Zadání – Milikanův experiment | 2 |
| 2. Seznam pomůcek..... | 2 |
| 3. Teorie | 2 |
| 4. Postup měření | 4 |
| 5. Výpočty a přehled výsledků měření | 5 |
| 6. Diskuse..... | 12 |
| 7. Závěr | 12 |
| 8. Literatura | 13 |
| 9. Obsah | 13 |