

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Fakulta přírodovědecká

Ústav fyziky a biofyziky



Fyzikální praktikum IV

MILLIKANŮV EXPERIMENT

Milan Somora

Vedoucí praktika: Mgr. Marcel Fuciman, Ph.D.

České Budějovice 12. 6. 2017

Hodnocení:

Pracovní úlohy

1. Metodou volného pádu změřte náboje olejových kapek
2. Vytvořte graf nábojů kapek (q) jakožto funkce poloměrů kapek (r)
3. Proveďte korekci náboje pro malé poloměry kapek, utvořte histogram četností nábojů kapek
4. Vypočítejte elementární náboj

Seznam pomůcek

Milikanova aparatura (obr. 1), napětový zdroj LEYBOLD 0-600V, digitální stopky 3B SCIENTIFIC U8533341, digitální meteorologická stanice, propojovací vodiče.

Teoretický úvod

Roku 1897 J.J. Thomson objevil záporně nabitě částice s hmotností cca 1840x menší, než je hmotnost atomu vodíku. Jeho výsledky se však stále daly vysvětlit pomocí spojitého elektrického náboje. Robert A. Millikan s Harvey Fletcherem v roce 1909 ukázali, že elektrický náboj je kvantovaný.

Základem experimentu je metoda plovoucí kapky, která spočívá v proměření rychlosti volného pádu olejové kapky (ta je při vstříknutí do prostoru mezi elektrodami ionizována a nese elektrický náboj), kde její rychlost je díky viskozitě vzduchu konstantní. Poté se pomocí přiloženého napětí na deskové elektrody určí náboj, který kapka nese. Poloměr kapky r lze určit ze vztahu

$$r = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta v}{(\rho_o - \rho_v) g}}, \quad (1)$$

kde η je viskozita vzduchu, $v = \Delta x / \Delta t$ rychlost pohybu olejové kapky, $\rho_o = 873 \text{ kg.m}^3$ hustota oleje, ρ_v hustota vzduchu a $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ tíhové zrychlení.

Náboj kapičky se určí ze vztahu

$$q = 9\pi \frac{d}{U} \sqrt{\frac{2\eta^3 v^3}{(\rho_o - \rho_v) g}}, \quad (2)$$

kde d je vzdálenost mezi deskami kondenzátoru, U změřené napětí, při němž se kapka zastaví.

Z 1 a 2 je zřejmé, že pro výpočet veličin r a q je zapotřebí určit hustotu a viskozitu vzduchu. Hustota vzduchu je dána vztahem

$$\rho = \frac{p_d}{R_d T_K} + \frac{p_v}{R_v T_K}, \quad (3)$$

kde T_K [K] je naměřená teplota vzduchu, p_v [Pa] je tlak vodních par, $R_d = 287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ je měrná plynová konstanta suchého vzduchu, $R_v = 461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ měrná plynová konstanta vodních par.

Tlak vodních par p_v určíme ze vztahu

$$p_v = \varphi p_{\text{sat}}, \quad (4)$$

kde φ je relativní vlhkost vzduchu a p_{sat} je tlak saturovaných vodních par, pro který platí

$$p_{\text{sat}} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.5T_C}{T_C+237.3}}, \quad (5)$$

kde vypočtený tlak je v hPa a teplotu je nutno zadávat v °C. Parciální tlak suchého vzduchu p_d pak dopočteme ze vztahu

$$p_d = p_L - p_v, \quad (6)$$

kde p_L je naměřený tlak vzduchu.

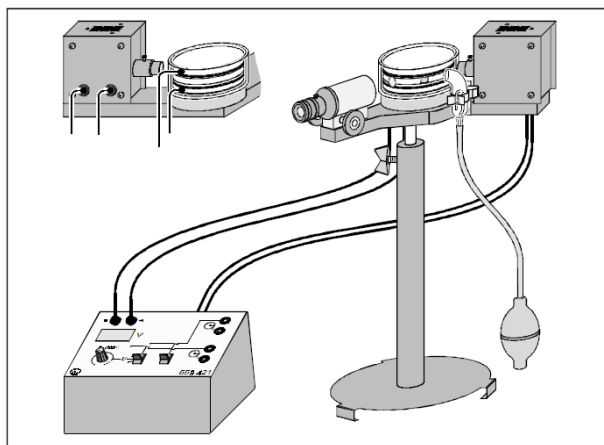
Dynamickou viskozitu plynu určíme ze Sutherlandova vztahu

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (7)$$

kde $\eta_0 = 18.27 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$, T [K] je teplota vzduchu, $T_0 = 291.15 \text{ K}$ a $C = 120 \text{ K}$ (látková konstanta).

Postup měření

1. Zapojila se sestava podle obrázku 1.
2. Zkontroloval se stav oleje v rozprašovači.
3. Zdroj napětí byl nastaven na 0 V, spínač¹ přepnut do polohy OFF a poté zdroj zapnut..
4. Okulár mikroskopu byl nastaven tak, aby byla jasně vidět mikrometrická škála. Na škále byla vybrána vzdálenost 1 mm, ve které byla měřena rychlost volného pádu sledované kapky.
5. Z meteorologické stanice byla zaznamenána teplota, tlak a relativní vlhkost v laboratoři (tabulka 1).
6. Gumovým balónkem byl vstříknut olej mezi desky kondenzátoru a vytipována kapka pro sledování.
7. Na zdroji byla nastavena taková úroveň napětí, aby kapka přestala padat.
8. Po vypnutí zdroje napětí se kapka dala do pohybu. Současně byly spuštěny stopky.
9. Čas, za který kapka danou vzdálenost urazila a napětí, které ji udržovalo v rovnovážném stavu, byly zaznamenány do tabulky 2.
10. Body 6 - 9 byly opakovány, dokud nebylo dosaženo požadovaného počtu měření.



Obrázek 1: Sestava pro určení náboje olejové kapky

¹použitý zdroj napětí byl vybaven spínačem, kterým se aktivovalo nebo deaktivovalo nastavené napětí

Teplota vzduchu T_C	24.40 °C
Teplota vzduchu T_K	297.55 K
Tlak vzduchu p_L	963.20 hPa
Relativní vlhkost vzduchu φ	30 %

Tabulka 1: Naměřené hodnoty v laboratoři meteorologickou stanicí

Naměřené hodnoty

Část I - určení hustoty a viskozity vzduchu

V této části bude určena hustota vzduchu v laboratoři a jeho dynamická viskozita, včetně chyb jednotlivých měřených veličin. Jelikož se jednalo o nepřímé měření (výsledek byl dán výpočtem), byly do vzorců dosazeny krajní hodnoty určené z chyb měřících přístrojů (tzv. systematické chyby) a z nich pak vypočítán interval chyby měřené veličiny.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Fyzikální konstanty byly použity z MFCHT [1].

Tlak saturovaných vodních par

Z rovnice (5) platí²:

$$p_{\text{sat}} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot 22.4}{22.4 + 237.3}} = 30.56038249 \text{ hPa.} \quad (8)$$

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba měření teploty vzduchu v laboratoři $\delta T_C = \pm 0.10 \text{ °C}$, potom

$$p_{\text{sat}+} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot 22.5}{22.5 + 237.3}} = 30.74372349 \text{ hPa,}$$

$$p_{\text{sat}-} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot 22.3}{22.3 + 237.3}} = 30.37799593 \text{ hPa,}$$

výsledná chyba

$$\delta p_{\text{sat}} = [(p_{\text{sat}+}) - (p_{\text{sat}-})] / 2 = \pm 0.18286378 \text{ hPa.} \quad (9)$$

Tlak saturovaných vodních par je tedy

$$p_{\text{sat}} \doteq (30.56 \pm 0.18) \text{ hPa.}$$

²výsledek v hektopascálech, teplota vzduchu ve stupních Celsia

Tlak vodních par

Byl vypočítán z tlaku saturovaných par p_{sat} (8) na základě rovnice (4):

$$p_v = \frac{30\%}{100} \cdot 30.56038249 \text{ hPa} = 9.168114747 \text{ hPa}. \quad (10)$$

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba určení tlaku saturovaných vodních par δp_{sat} (9), potom

$$p_{v+} = \frac{30\%}{100} \cdot p_{\text{sat}+} = \frac{30\%}{100} \cdot 30.74372349 \text{ hPa} = 9.223117046 \text{ hPa},$$

$$p_{v-} = \frac{30\%}{100} \cdot p_{\text{sat}-} = \frac{30\%}{100} \cdot 30.37799593 \text{ hPa} = 9.113398779 \text{ hPa},$$

výsledná chyba

$$\delta p_v = [(p_{v+}) - (p_{v-})] / 2 = \pm 0.0548591335 \text{ hPa}. \quad (11)$$

Tlak vodních par je tedy

$$p_v \doteq (9.17 \pm 0.06) \text{ hPa}.$$

Parciální tlak suchého vzduchu

Byl vypočítán z tlaku vodních par p_v (10) a naměřeného tlaku vzduchu p_L v laboratoři (tab. 2). Z rovnice (6) platí:

$$p_d = 963.20 \text{ hPa} - 9.17 \text{ hPa} = 954.03 \text{ hPa}. \quad (12)$$

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba měření tlaku vzduchu v laboratoři $\delta p_L = \pm 0.10 \text{ hPa}$ a chyba určení tlaku vodních par δp_v (11), potom

$$p_{d+} = 963.30 \text{ hPa} - 9.23 \text{ hPa} = 954.07 \text{ hPa},$$

$$p_{d-} = 963.10 \text{ hPa} - 9.11 \text{ hPa} = 953.99 \text{ hPa},$$

výsledná chyba

$$\delta p_d = [(p_{d+}) - (p_{d-})] / 2 = \pm 0.04 \text{ hPa}. \quad (13)$$

Parciální tlak suchého vzduchu je tedy

$$p_d = (954.03 \pm 0.04) \text{ hPa}.$$

Hustota vzduchu v laboratoři

Pro výpočet hustoty vzduchu byly použity výše vypočtené hodnoty, tedy parciální tlak suchého vzduchu p_d (12), tlak vodních par p_v (10) a naměřená teplota vzduchu v laboratoři T_K (tab. 1). Z rovnice (3) platí: ³

$$\rho_v = \frac{95403.000 \text{ Pa}}{287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 297.550 \text{ K}} + \frac{916.812 \text{ Pa}}{461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 297.550 \text{ K}} = 1.123623199 \text{ kg} \cdot \text{m}^3. \quad (14)$$

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba měření teploty vzduchu v laboratoři $\delta T_C = \pm 0.10^\circ \text{C}$ (což je $\delta T_K = 3.73 \text{ K}$), chyba měření tlaku vzduchu $\delta p_L = \pm 0.10 \text{ hPa} = 10 \text{ Pa}$, chyba určení tlaku vodních par δp_v (11) a chyba určení parciálního tlaku suchého vzduchu δp_d (13), potom

$$\begin{aligned} \rho_{v+} &= \frac{p_{d+}}{287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 301.280 \text{ K}} + \frac{p_{v+}}{461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 301.280 \text{ K}} = \\ &= \frac{95407.000 \text{ Pa}}{287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 301.280 \text{ K}} + \frac{926.812 \text{ Pa}}{461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 301.280 \text{ K}} = 1.109830344 \text{ kg} \cdot \text{m}^3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{v-} &= \frac{p_{d-}}{287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 293.82 \text{ K}} + \frac{p_{v-}}{461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 293.82 \text{ K}} = \\ &= \frac{95399.000 \text{ Pa}}{287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 293.820 \text{ K}} + \frac{906.812 \text{ Pa}}{461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 293.820 \text{ K}} = 1.137766251 \text{ kg} \cdot \text{m}^3, \end{aligned}$$

výsledná chyba

$$\delta \rho_v = [(\rho_{v-}) - (\rho_{v+})] / 2 = \pm 0,0139679535 \text{ kg} \cdot \text{m}^3. \quad (15)$$

Hustota vzduchu v laboratoři je tedy

$$\rho_v \doteq (1.12 \pm 0,01) \text{ kg} \cdot \text{m}^3.$$

³tlaky dosazovány v Pascalech, teplota vzduchu v Kelvinech

Dynamická viskozita vzduchu v laboratoři

Pro výpočet byl použit Stüherlandův vztah (7), tedy

$$\eta = 18.27 \mu\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \frac{291.15 \text{ K} + 120.00 \text{ K}}{297.55 \text{ K} + 120.00 \text{ K}} \cdot \left(\frac{297.55 \text{ K}}{291.15 \text{ K}} \right)^{3/2} = 18.6 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}. \quad (16)$$

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba měření teploty vzduchu v laboratoři $\delta T_C = \pm 0.10^\circ\text{C}$ (což je $\delta T_K = 3.73 \text{ K}$), potom

$$\eta_+ = 18.27 \mu\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \frac{291.15 \text{ K} + 120.00 \text{ K}}{301.28 \text{ K} + 120.00 \text{ K}} \cdot \left(\frac{570.80 \text{ K}}{291.15 \text{ K}} \right)^{3/2} = 18.8 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s},$$

$$\eta_- = 18.27 \mu\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \frac{291.15 \text{ K} + 120.00 \text{ K}}{293.82 \text{ K} + 120.00 \text{ K}} \cdot \left(\frac{24.3 \text{ K}}{291.15 \text{ K}} \right)^{3/2} = 18.4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s},$$

výsledná chyba

$$\delta\eta = [(\eta_+) - (\eta_-)] / 2 = \pm 0.20 \text{ Pa} \cdot \text{s}. \quad (17)$$

Dynamická viskozita vzduchu v laboratoři je tedy

$$\eta = (18.60 \pm 0.20) \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

Část II - výpočet poloměru kapky a jejího náboje

V této části bude určena velikost elementárního náboje změřeného v naší laboratoři. Měřené veličiny byly vypočteny včetně chyb, které se projevily ve výpočtu výsledného elementárního náboje. I zde se jednalo o nepřímé měření, proto byly do vzorců dosazeny krajních hodnoty a z nich pak určen interval chyby měřené veličiny.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Jelikož se jedná o větší množství dat, byly výsledky přesunuty do přílohy A.

Rychlosti kapek

Výsledky viz příloha A - obr. 4.

Nejdříve byla spočítána průměrná rychlost v pohybu pro každou olejovou kapku. Volný pád každé kapky byl měřen na dráze $\Delta x = 1 \text{ mm}$ a čas pádu t byl měřen stopkami, tedy

$$v_i = \frac{\Delta x}{\Delta t_i}.$$

Č. měření	Δt ms	U V	Č.měření	Δt ms	U V
1	7873	546	11	24561	154
2	12022	175	12	11994	82
3	21965	37	13	15388	131
4	14075	228	14	6256	172
5	28543	42	15	18651	149
6	18402	57	16	26562	142
7	18831	184	17	11079	98
8	13201	307	18	13307	203
9	6965	133	19	17485	123
10	92446	220	20	23167	108

Tabulka 2: Naměřené hodnoty při určování el. náboje olejových kapek

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba čtení z mikrometrické stupnice $\delta x = \pm 0.05 \text{ mm}$ a chyba určení času $\delta t = \pm 0.001 \text{ s}$, potom

$$v_{i+} = \frac{\Delta x + 0.00005 \text{ m}}{\Delta t_i + 0.001 \text{ s}},$$

$$v_{i-} = \frac{\Delta x - 0.00005}{\Delta t_i - 0.001},$$

výsledná chyba

$$\delta v_i = [(v_{i+}) - (v_{i-})] / 2. \quad (18)$$

Poloměry kapek

Výsledky viz příloha A - obr. 5.

Z vypočtené rychlosti byl na základě vztahu (1) vypočítán poloměr r pro každou kapku, tedy

$$r_i = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta v_{i+}}{(\rho_o - \rho_v) g}}.$$

Do vztahu bylo nutné dosadit také dynamickou viskozitu η a hustotu vzduchu ρ_v v laboratoři, které byly předem určeny (16, 14).

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba určení dynamické viskozity vzduchu $\delta\eta$ (17) a chyba určení rychlosti kapky δv_i (18), potom

$$r_{i+} = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta_+ v_{i+}}{(\rho_o - \rho_{v+}) g}},$$

$$r_{i-} = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta_- v_{i-}}{(\rho_o - \rho_{v-}) g}},$$

výsledná chyba

$$\delta r_i = [(r_{i+}) - (r_{i-})] / 2. \quad (19)$$

Náboje kapek

Výsledky viz příloha A - obr. 6.

Obdobným způsobem byl ze vztahu (2) vypočítán elektrický náboj q opět pro každou kapku zvlášť, tedy

$$q_i = 9\pi \frac{d}{U} \sqrt{\frac{2\eta^3 v_i^3}{(\rho_o - \rho_v) g}}.$$

Na obrázku 2 je ukázáno, že náboj olejové kapky je závislý i na jejím poloměru.

Výpočet chyby:

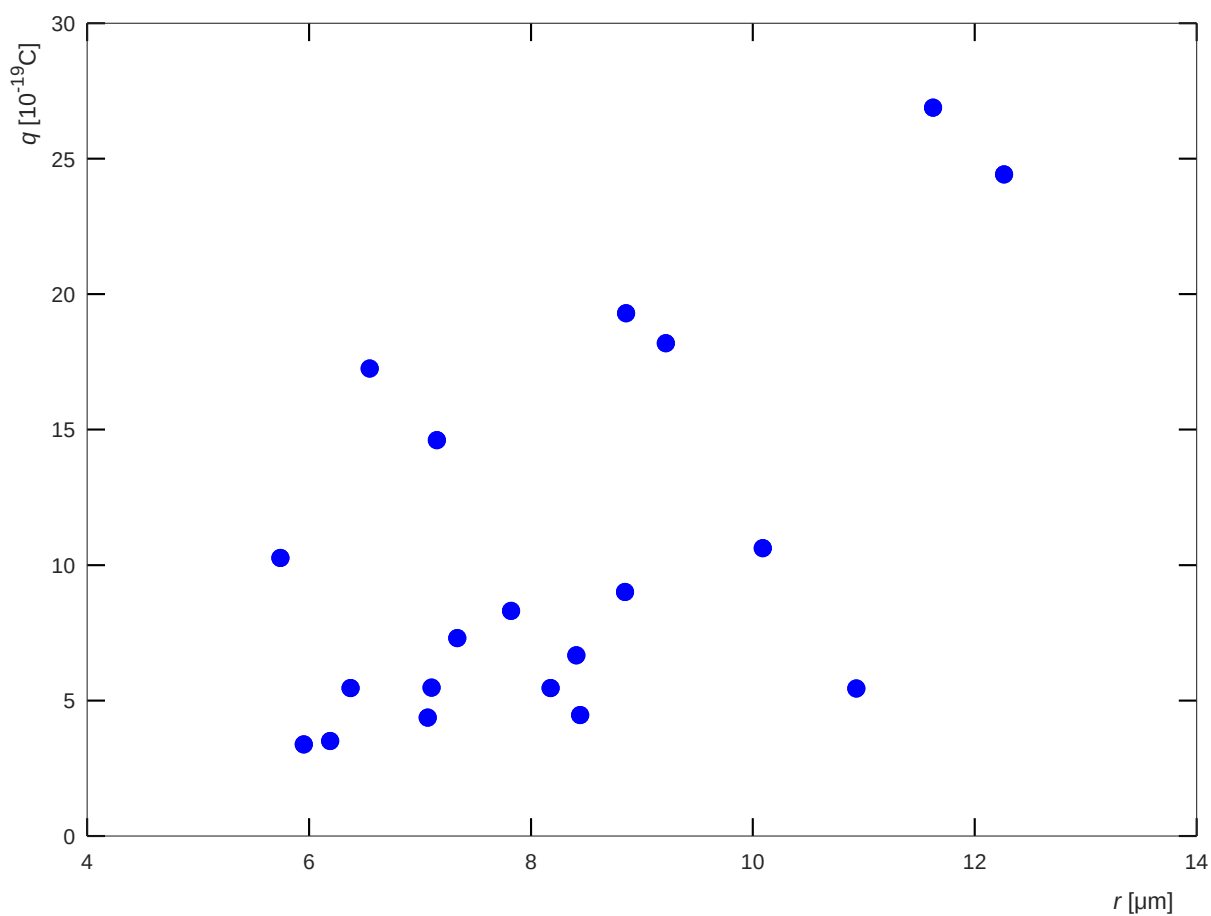
Do výpočtu byla zahrnuta chyba vzdálenosti mezi deskami kondenzátoru $\delta d = \pm 0,05$ mm a přesnost napětového zdroje $\delta U = \pm 1$ V. Dále byla zahrnuta chyba určení rychlosti kapky δv_i (18), chyba určení hustoty vzduchu ρ_v (15) a chyba určení jeho dynamické viskozity $\delta\eta$ (17), potom

$$q_{i+} = 9\pi \frac{d + 0,00005 \text{ m}}{U + 1 \text{ V}} \sqrt{\frac{2\eta_+^3 v_{i+}^3}{(\rho_o - \rho_{v+}) g}},$$

$$q_{i-} = 9\pi \frac{d - 0,00005 \text{ m}}{U - 1 \text{ V}} \sqrt{\frac{2\eta_-^3 v_{i-}^3}{(\rho_o - \rho_{v-}) g}},$$

výsledná chyba

$$\delta q_i = [(q_{i+}) - (q_{i-})] / 2. \quad (20)$$



Obrázek 2: Náboj olejové kapy q je funkcí jejího poloměru r

Určení elementárního náboje

Výsledky viz příloha A - obr. 8.

Nejprve byla provedena korekce náboje q_i na q_{ci} pro každou kapku pomocí Cunninghama vztahu⁴, tedy

$$q_{ci} = \frac{q_i}{\sqrt{\left(1 + \frac{A}{r_i}\right)^3}}.$$

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba určení náboje kapky δq_i (20) a chyba určení poloměru kapky δr_i (19), potom

$$q_{ci+} = \frac{q_{i+}}{\sqrt{\left(1 + \frac{A}{r_{i+}}\right)^3}},$$

$$q_{ci-} = \frac{q_{i-}}{\sqrt{\left(1 + \frac{A}{r_{i-}}\right)^3}},$$

výsledná chyba

$$\delta q_{ci} = [(q_{ci+}) - (q_{ci-})] / 2. \quad (21)$$

Poté byl pro každou kapku vypočítán násobek (četnost) n elementárního náboje, který tvoří celkový náboj olejové kapky⁵. Násobek byl určen ze známého elementárního náboje $e = 1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ [1], tedy

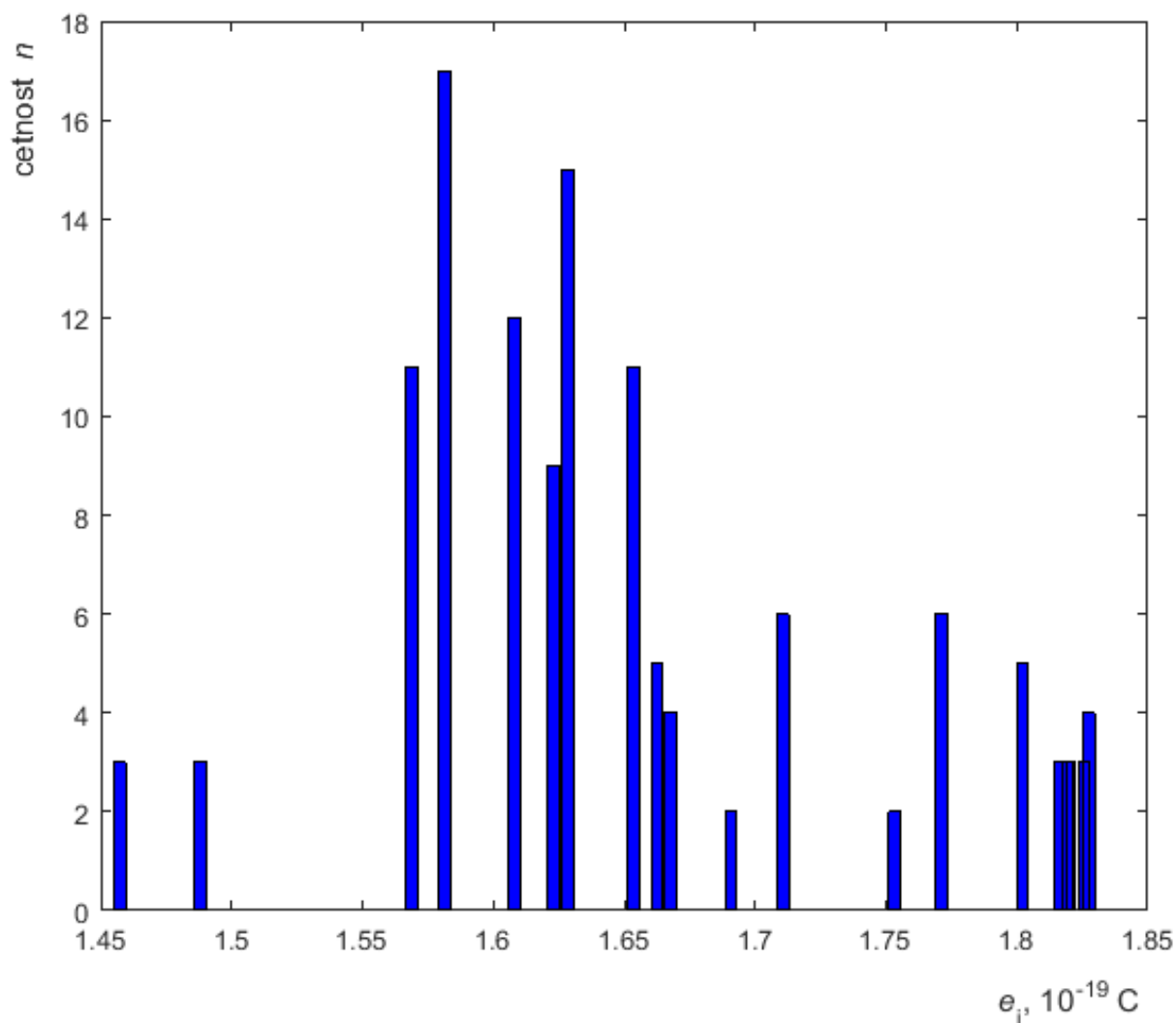
$$n_i \doteq \frac{q_{ci}}{e}. \quad (22)$$

Histogram četnosti pozorovaných nábojů je na obrázku 3. Násobky n_i byly zaokrouhleny na celá čísla a z nich na základě vztahu $e_i = q_{ci}/n_i$ vypočítány elementární náboje pro každou kapku zvlášť. Nakonec byl z hodnot e_i určen aritmetický průměr \bar{e} , který v tomto případě vyjadřuje průměrnou hodnotu elementárního náboje změřeného v našich podmínkách, tedy

$$\bar{e} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} e_i = 1.68883 \cdot 10^{-19} \text{ C}. \quad (23)$$

⁴A = 0.07776 μm je koeficient tření olejové kapky ve vzduchu za standardního tlaku a teploty 25°C

⁵Celkový náboj kapky je násobkem elementárního náboje, tj. $e = 1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.



+

Figure 3: Histogram četnosti pozorovaných nábojů.

Výpočet chyby:

Do výpočtu byla zahrnuta chyba korekce náboje kapky δq_{ci} (21) a chyba určení poloměru kapky δr_i (19), potom

$$e_{i+} = \frac{q_{ci+}}{n_i},$$

$$e_{i-} = \frac{q_{ci-}}{n_i},$$

výsledná chyba

$$\delta e_i = \pm [(e_{i+}) - (e_{i-})] / 2.$$

Z chyb δe_i byl spočítán aritmetický průměr

$$\overline{\delta e} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \delta e_i = 0.89979 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad (24)$$

poté odchylky od aritmetického průměru

$$\overline{\Delta \delta e_i} = \delta e_i - \overline{\delta e} = \delta e_i - 0.89979 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

a nakonec chyba aritmetického průměru, tj. absolutní chyba, která udává interval, ve kterém se s nejvyšší pravděpodobností vyskytuje skutečná hodnota měřeného elementárního náboje, tedy

$$\overline{\sigma e} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (\Delta \delta e_i)^2}{20(20-1)}} = \pm 0.0136256 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Hodnota změřeného elementární náboje leží v intervalu

$$e = (\bar{e} \pm \overline{\sigma e}).$$

Odhadujeme tedy, že elementární náboj změřený Millikanovou sestavou v naší laboratoři má hodnotu

$$e = (1.69 \pm 0.01) \cdot 10^{-19} \text{ C}. \quad (25)$$

Chyby měření

U následujících přístrojů nebyly výrobcem uvedeny třídy přesnosti. Chyby měření proto byly odhadnuty.

Digitální stopky

Měřicí rozsah 1 – 99999 ms, maximální chyba naměřené hodnoty byla odhadnuta podle nejmenšího dílku na stupnici, tedy $\delta t = \pm 0.001 \text{ s}$.

Napět'ový zdroj

Měřicí rozsah 0 – 600 V, maximální chyba naměřené hodnoty byla odhadnuta podle nejmenšího dílku na stupnici, tedy na $\delta U = \pm 1 \text{ V}$.

Mikrometrická stupnice

Chyba čtení byla odhadnuta na $\delta x = \pm 0.05 \text{ mm}$, tedy na polovinu velikosti jednoho dílku.

Meteorologická stanice

Údaje naměřené meteorologickou stanicí v laboratoři - maximální chyba naměřené hodnoty byla odhadnuta podle nejmenšího dílku na stupnici, tedy teplota $\delta T_C = \pm 0.1^\circ\text{C}$ ($\delta T_K = 3,73\text{ K}$), relativní vlhkost $\delta\varphi = \pm 1\% = \pm 0,01$ a tlak v laboratoři $\delta p_L = \pm 0.1\text{ hPa}$.

Vzdálenost mezi deskami kondenzátoru

Vzdálenost mezi deskami kondenzátoru byla odhadnuta na $\delta d = \pm 0,05\text{ mm}$.

Diskuze

Jelikož se jednalo o nepřímé měření (výsledek byl dán výpočtem), byly do vzorců dosazeny krajní hodnoty určené z chyb měřících přístrojů (tzv. systematických chyb) a z nich pak vypočítán interval chyby měřené veličiny (tzv. absolutní chyba):

Tlak saturovaných vodních par $p_{\text{sat}} \doteq (30.56 \pm 0.18)\text{ hPa}$.

Tlak vodních par $p_v \doteq (9.17 \pm 0.06)\text{ hPa}$.

Parciální tlak suchého vzduchu $p_d = (954.03 \pm 0.04)\text{ hPa}$.

Hustota vzduchu v laboratoři $\rho_v \doteq (1.12 \pm 0,01)\text{ kg}\cdot\text{m}^3$.

Dynamická viskozita vzduchu v laboratoři $\eta = (18.60 \pm 0.20) \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Rychlosti kapek, jejich poloměry a velikosti jejich nábojů jsou uvedeny v příloze A.

Hodnota elementárního náboje změřeného Millikanovou sestavou v naší laboratoři byla odhadnuta na $e = (1.69 \pm 0.01) \cdot 10^{-19}\text{ C}$.

Větší přesnosti bychom dosáhli lepšími přístroji, lepšími podmínkami v laboratoři (minimalizováním tzv. náhodných chyb) a větším počtem měření. Během měření nedošlo k hrubým chybám.

Závěr

Hodnota naměřeného elementárního náboje je $e = (1.69 \pm 0.01) \cdot 10^{-19}\text{ C}$.

Literatura

- [1] MIKULČÁK J., KLIMEŠ, B. a kolektiv. (1989): *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 206 s., ISBN 54-09-12/1b.

Přílohy

Příloha A

Č. měření	v_i	v_{i+}	v_{i-}	δv_i
	m/s	m/s	m/s	m/s
1	0.000127016	0.00013335	0.000120681	6.33469E-06
2	8.31808E-05	8.73326E-05	7.90284E-05	4.15212E-06
3	4.5527E-05	4.78011E-05	4.32526E-05	2.27428E-06
4	7.1048E-05	7.45951E-05	6.75004E-05	3.54735E-06
5	3.50349E-05	3.67853E-05	3.32843E-05	1.75052E-06
6	5.43419E-05	5.70559E-05	5.16276E-05	2.71414E-06
7	5.31039E-05	5.57562E-05	5.04514E-05	2.65238E-06
8	7.57518E-05	7.95334E-05	7.19697E-05	3.78185E-06
9	0.000143575	0.000150732	0.000136416	7.15814E-06
10	0.000108155	0.00011355	0.000102758	5.39605E-06
11	4.0715E-05	4.2749E-05	3.86808E-05	2.03409E-06
12	8.3375E-05	8.75365E-05	7.92129E-05	4.1618E-06
13	6.49857E-05	6.82306E-05	6.17404E-05	3.24506E-06
14	0.000159847	0.000167812	0.000151878	7.96678E-06
15	5.36164E-05	5.62942E-05	5.09383E-05	2.67795E-06
16	3.76478E-05	3.95287E-05	3.57667E-05	1.88097E-06
17	9.02609E-05	9.47653E-05	8.57556E-05	4.5049E-06
18	7.51484E-05	7.88999E-05	7.13964E-05	3.75177E-06
19	5.71919E-05	6.0048E-05	5.43354E-05	2.85632E-06
20	4.31648E-05	4.53211E-05	4.10084E-05	2.15638E-06

Obrázek 4: Rychlosti kapek

Č. měření	r_i	r_{i+}	r_{i-}	δr_i
	m	m	m	m
1	1.0933E-05	1.12664E-05	1.06034E-05	3.31509E-07
2	8.84754E-06	9.11753E-06	8.58059E-06	2.68467E-07
3	6.54554E-06	6.7454E-06	6.34793E-06	1.98739E-07
4	8.17686E-06	8.42643E-06	7.9301E-06	2.48166E-07
5	5.74197E-06	5.91733E-06	5.56859E-06	1.74371E-07
6	7.15119E-06	7.36952E-06	6.93533E-06	2.17097E-07
7	7.06926E-06	7.2851E-06	6.85587E-06	2.14614E-07
8	8.44321E-06	8.70089E-06	8.18843E-06	2.5623E-07
9	1.16239E-05	1.19782E-05	1.12735E-05	3.5236E-07
10	1.00887E-05	1.03964E-05	9.7844E-06	3.06002E-07
11	6.18996E-06	6.37898E-06	6.00307E-06	1.87958E-07
12	8.85786E-06	9.12816E-06	8.5906E-06	2.6878E-07
13	7.82023E-06	8.05895E-06	7.58421E-06	2.37366E-07
14	1.22649E-05	1.26386E-05	1.18953E-05	3.71691E-07
15	7.10329E-06	7.32016E-06	6.88887E-06	2.15645E-07
16	5.95224E-06	6.13402E-06	5.77252E-06	1.80749E-07
17	9.21638E-06	9.49759E-06	8.93834E-06	2.79627E-07
18	8.40951E-06	8.66617E-06	8.15575E-06	2.5521E-07
19	7.33632E-06	7.56029E-06	7.11487E-06	2.22706E-07
20	6.37347E-06	6.56809E-06	6.18105E-06	1.93522E-07

Obrázek 5: Poloměry kapek

Č. měření	q_i	q_i^+	q_i^-	δq_i
	C	C	C	C
1	5.44987E-19	6.00258E-19	3.41865E-20	2.83036E-19
2	9.01127E-19	9.88749E-19	1.18646E-20	4.88442E-19
3	1.7258E-18	1.85442E-18	2.62942E-21	9.25895E-19
4	5.45986E-19	5.99879E-19	7.99968E-21	2.9594E-19
5	1.02634E-18	1.10631E-18	1.36596E-21	5.52473E-19
6	1.46089E-18	1.58437E-18	4.09286E-21	7.9014E-19
7	4.37181E-19	4.79846E-19	3.86372E-21	2.37991E-19
8	4.46417E-19	4.9103E-19	9.39026E-21	2.4082E-19
9	2.68878E-18	2.94468E-18	4.64415E-20	1.44912E-18
10	1.06276E-18	1.16741E-18	2.28727E-20	5.7227E-19
11	3.50671E-19	3.84495E-19	1.98871E-21	1.91253E-19
12	1.92988E-18	2.10397E-18	1.1934E-20	1.04602E-18
13	8.31275E-19	9.10392E-19	6.40084E-21	4.51996E-19
14	2.44239E-18	2.67931E-18	6.07395E-20	1.30928E-18
15	5.47709E-19	6.00397E-19	3.95762E-21	2.9822E-19
16	3.3815E-19	3.70567E-19	1.63506E-21	1.84466E-19
17	1.81891E-18	1.98689E-18	1.45528E-20	9.86167E-19
18	6.67073E-19	7.32519E-19	9.20437E-21	3.61657E-19
19	7.30947E-19	8.0013E-19	4.65079E-21	3.9774E-19
20	5.45834E-19	5.96841E-19	2.30151E-21	2.9727E-19

Obrázek 6: Náboje kapek

Č. měření	q_{ci}	q_{ci+}	q_{ci-}	δq_{ci}
	C	C	C	C
1	5.44987E-19	5.94096E-19	3.38139E-20	2.80141E-19
2	9.01127E-19	9.76234E-19	1.17052E-20	4.82264E-19
3	1.7258E-18	1.82281E-18	2.58183E-21	9.10114E-19
4	5.45986E-19	5.9167E-19	7.88344E-21	2.91893E-19
5	1.02634E-18	1.08486E-18	1.33784E-21	5.4176E-19
6	1.46089E-18	1.55962E-18	4.02498E-21	7.77799E-19
7	4.37181E-19	4.72264E-19	3.79891E-21	2.34233E-19
8	4.46417E-19	4.8452E-19	9.25807E-21	2.37631E-19
9	2.68878E-18	2.91624E-18	4.59651E-20	1.43514E-18
10	1.06276E-18	1.15444E-18	2.26027E-20	5.65917E-19
11	3.5067E-19	3.7757E-19	1.95069E-21	1.8781E-19
12	1.92988E-18	2.07737E-18	1.17738E-20	1.0328E-18
13	8.31275E-19	8.97373E-19	6.30364E-21	4.45535E-19
14	2.44239E-18	2.65477E-18	6.01487E-20	1.29731E-18
15	5.47709E-19	5.90956E-19	3.89155E-21	2.93532E-19
16	3.3815E-19	3.6363E-19	1.60257E-21	1.81014E-19
17	1.81891E-18	1.96273E-18	1.43649E-20	9.74184E-19
18	6.67072E-19	7.22769E-19	9.07428E-21	3.56847E-19
19	7.30946E-19	7.87943E-19	4.57557E-21	3.91684E-19
20	5.45834E-19	5.86397E-19	2.25875E-21	2.92069E-19

Obrázek 7: Korekce nábojů kapek

Č. měření	qci	četnost n	ei=qci/n		ei±		ei-		δei		(Δδei)^2	
	C		C	C	C	C	C	C	C	C		
1	5.4499E-19	3	1.8166E-19	1.9803E-19	1.1271E-20	9.338E-20	-3.40051E-21	1.15635E-41				
2	9.0113E-19	5	1.8023E-19	1.9525E-19	2.341E-21	9.6453E-20	-6.47295E-21	4.18991E-41				
3	1.7258E-18	11	1.5689E-19	1.6571E-19	2.3471E-22	8.2738E-20	7.24229E-21	5.24507E-41				
4	5.4599E-19	3	1.82E-19	1.9722E-19	2.6278E-21	9.7298E-20	-7.3179E-21	5.35516E-41				
5	1.0263E-18	6	1.7106E-19	1.8081E-19	2.2297E-22	9.0293E-20	-3.13366E-22	9.81983E-44				
6	1.4609E-18	9	1.6232E-19	1.7329E-19	4.4722E-22	8.6422E-20	3.55783E-21	1.26581E-41				
7	4.3718E-19	3	1.4573E-19	1.5742E-19	1.2663E-21	7.8078E-20	1.19023E-20	1.41665E-40				
8	4.4642E-19	3	1.4881E-19	1.6151E-19	3.086E-21	7.921E-20	1.07696E-20	1.15984E-40				
9	2.6888E-18	17	1.5816E-19	1.7154E-19	2.7038E-21	8.442E-20	5.56016E-21	3.09153E-41				
10	1.0628E-18	6	1.7713E-19	1.9241E-19	3.7671E-21	9.432E-20	-4.33962E-21	1.88323E-41				
11	3.5067E-19	2	1.7534E-19	1.8879E-19	9.7534E-22	9.3905E-20	-3.92498E-21	1.54055E-41				
12	1.9299E-18	12	1.6082E-19	1.7311E-19	9.8115E-22	8.6066E-20	3.91342E-21	1.53149E-41				
13	8.3127E-19	5	1.6625E-19	1.7947E-19	1.2607E-21	8.9107E-20	8.72967E-22	7.62072E-43				
14	2.4424E-18	15	1.6283E-19	1.7698E-19	4.0099E-21	8.6487E-20	3.4925E-21	1.21976E-41				
15	5.4771E-19	3	1.8257E-19	1.9699E-19	1.2972E-21	9.7844E-20	-7.86417E-21	6.18452E-41				
16	3.3815E-19	2	1.6907E-19	1.8182E-19	8.0129E-22	9.0507E-20	-5.27027E-22	2.77757E-43				
17	1.8189E-18	11	1.6536E-19	1.7843E-19	1.3059E-21	8.8562E-20	1.41768E-21	2.00982E-42				
18	6.6707E-19	4	1.6677E-19	1.8069E-19	2.2686E-21	8.9212E-20	7.68059E-22	5.89915E-43				
19	7.3095E-19	4	1.8274E-19	1.9699E-19	1.1439E-21	9.7921E-20	-7.94099E-21	6.30593E-41				
20	5.4583E-19	3	1.8194E-19	1.9547E-19	7.5292E-22	9.7356E-20	-7.37645E-21	5.44119E-41				
		Průměr:	1.6888E-19		Průměr:	8.9979E-20	Průměr:	7.05492E-40				

Obrázek 8: Výpočet elementárního náboje a absolutní chyby