

# ELEKTROSTATICKÉ EXPERIMENTY

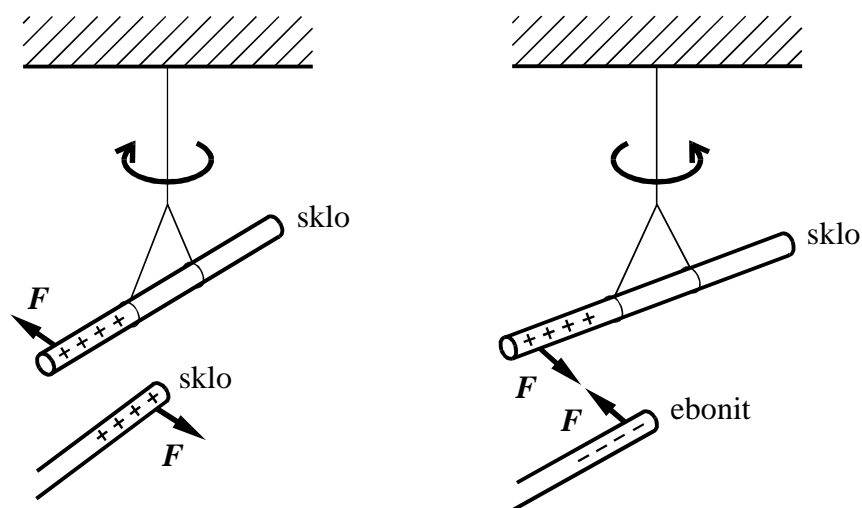
## Obecná část

Již staří Řekové věděli, že když budou třít kus jantaru, bude pak přitahovat kousky slámy. Tato dávná pozorování nám zanechala jedno významné slovo: *elektron*. Elektron znamená řecky jantar.

V roce 1600 objevil William Gilbert, že elektrizace (neboli nabíjení) není omezena pouze na jantar, ale že je jevem všeobecným. Vědci se pak vrhli na nabíjení všemožných objektů včetně kuřat a lidí. Experimenty Charlese Coulomba v roce 1785 prokázaly, že síla mezi elektrickými náboji klesá s kvadrátem vzdálenosti.

Na důkaz existence elektrických nábojů a síly mezi nimi můžeme provést nesčetné množství jednoduchých experimentů. Po protažení hřebenu vlasy shledáme, že hřeben přitahuje kousky papíru. Jiný jednoduchý experiment je třít nafouknutý balónek vlnou. Balónek pak bude přitahován ke zdi nebo stropu, často na dlouhou dobu. Chovají-li se materiály tímto způsobem, říkáme, že jsou *elektrizovány*, že se staly *elektricky nabitými*. Tyto experimenty se daří nejlépe v suchém prostředí, protože vlhkost působí jako vodič, jenž nám vytvořený náboj z elektrizovaného tělesa odvede do země.

Systematickými experimenty můžeme zjistit, že existují dva druhy elektrického náboje. Nabijme např. skleněnou tyč třením jednoho jejího konce hedvábím. Při velmi těsném dotyku mezi tyčí a hedvábím se přenesou malé množství náboje z jednoho předmětu na druhý a tím se naruší elektrická neutralita každého z nich. Zavěsíme pak tyč na nevodivé vlákno. Přiblížíme-li k ní druhou skleněnou tyč podobně nabitou, obě tyče se navzájem odpuzují. Pokud však



Obr. 1

budeme třít např. ebonitovou tyč liščím ohonem a přiblížíme ji k původní zavěšené skleněné tyči, zjistíme, že se obě tyče budou navzájem přitahovat (obr. 1). Podobně bychom zjistili, že dvě ebonitové tyče se navzájem odpuzují. Tento jev je tedy

důkazem existence dvou druhů náboje, z nichž stejné se odpuzují a opačné přitahují. Benjamin Franklin v r. 1749 rozhodl, že náboj na skleněné tyči bude označován jako kladný a náboj na ebonitové tyči jako záporný. A protože sklo při tření hedvábím ztrácí elektrony (jak dnes víme), označujeme náboj elektronu jako **záporný**.

Dnes víme, že náboje je v běžných předmětech obrovské množství, ale tyto předměty obsahují stejné množství nábojů obojího druhu: kladná jádra atomů a záporné elektrony. V takovém případě je předmět *elektricky neutrální* (není nabit). Pokud se ale naruší rovnováha obou druhů nábojů, projeví se jejich rozdíl jako volný náboj, který může silově interagovat s jinými předměty. Pak je předmět nabitý.

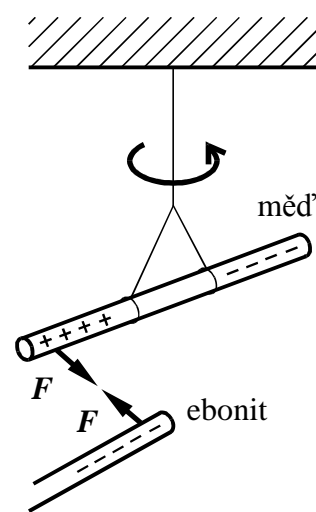
### Vodiče a ne vodiče

V některých látkách se mohou náboje pohybovat značně volně. Takové látky nazýváme *vodiče* (kovy, voda, lidské tělo). V jiných látkách (např. sklo, ebonit, umělé hmoty) se nemůže volně pohybovat prakticky žádný volný náboj. Tyto látky nazýváme *nevodiče (izolanty)*.

Budeme-li třít měděnou tyč (vodič) vlnou, můžeme ji též elektricky nabít. Nesmíme ji ovšem držet v ruce, protože naším vodivým tělem by byl náboj z celé tyče okamžitě odveden do podlahy (a zemského povrchu) a tyč by zůstala vůči zemi nenabita. Uzemnit předmět znamená tedy vytvořit vodivou cestu mezi ním a zemským povrchem. Zem si můžeme představit jako nekonečnou „nádrž“ ve které se mohou elektrony neomezeně pohybovat.

Volná pohyblivost náboje umožňuje ještě jev zvaný *elektrostatická indukce*:

Záporně nabitá ebonitová tyč bude přitahovat libovolný konec izolované neutrální (nenabité) měděné tyče (obr. 2). Vodivostní elektrony v bližším konci měděné tyče budou totiž odpuzeny záporným nábojem ebonitové tyče ke vzdálenějšímu konci a způsobí v bližším konci tyče nedostatek elektronů a tím převažující kladný náboj. Ten je přitahován k zápornému náboji ebonitové tyče. Měděná tyč je sice jako celek neutrální, ale říkáme, že má *indukovaný náboj*.



Obr. 2

Pomocí elektrostatické indukce můžeme snadno nabít vodivý předmět následujícím postupem (viz. obr. 3):

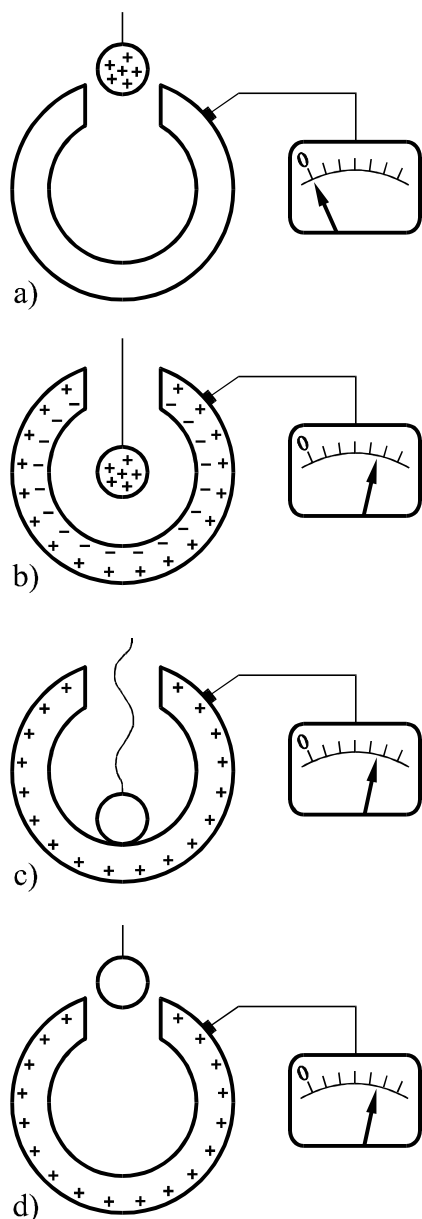
- Přiblížíme záporně nabitou ebonitovou tyč k vodivému tělesu, jež je izolováno od země. Rozložení náboje na povrchu tělesa se v důsledku odpuzivých sil změní (některé elektrony budou vypuzeny doprava).
- Vytvoříme vodivé spojení tělesa se zemí v místě největší koncentrace elektronů. Některé elektrony díky tomu odečou do země.
- Vodivé spojení odstraníme. Těleso bude mít nedostatek elektronů – bude mít

nerovnoměrně rozložený kladný náboj.

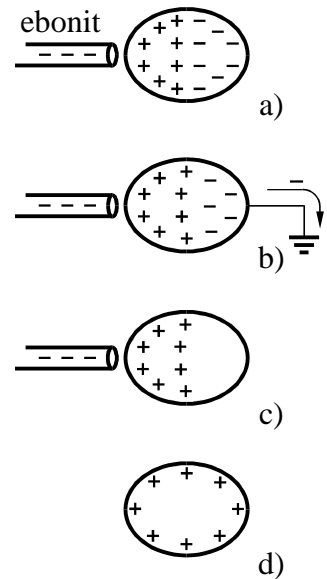
d) Ebonitovou tyč opět oddálíme – těleso zůstane pozitivně nabito.

Poznamenejme, že ebonitová tyč při tomto procesu neztratila nic ze svého záporného náboje.

Další zajímavý jev založený na elektrostatické indukci je tzv. „Faraday Ice Pail“ experiment (nazvaný podle kbelíku na led, jenž Faraday poprvé k tomuto experimentu použil). Zde vnoříme kladně nabitou kovovou kuličku (zavěšenou na nevodivém vlákně) do duté vodivé nádoby skrz malý otvor (obr. 4). Nádoba je přitom izolována od země a připojena na elektrometr (což



Obr. 4



Obr. 3

je vlastně voltmetr s nekonečným vnitřním odporem). Při vnoření kuličky se indukuje záporný náboj na vnitřní stěně nádoby (b). Ten ovšem zanechá stejně velký pozitivní náboj na stěně vnější. Přítomnost kladného náboje na vnější stěně je indikována výchylkou elektrometru. Pokud v tomto okamžiku kuličku opět vytáhneme, výchylka elektrometru se vrátí opět na nulu (indukovaný náboj zmizí). Dotkneme-li se však kuličkou vnitřní stěny vodivé nádoby, její náboj se zneutralizuje s nábojem vnitřní stěny (c). Kulička již nebude nabitá! Údaj elektrometru se však nezmění ani když kuličku poté vytáhneme (d). To ukazuje, že náboj se z kuličky přenesl na vnější povrch a zde zůstal. Tento jev je důsledkem (a zároveň důkazem) platnosti Coulombova a Gaussova zákona (lze nalézt v četné literatuře).

Právě tohoto jevu použijeme v naší laboratorní úloze ke zjišťování velikosti náboje. Faradayova nádoba je v našem případě tvořena válcem o průměru 10 cm a výšce 15 cm zhotoveného z kovové síťky. Dno válce stojí na třech izolačních nožičkách. Válec je spojen se „živou“ svorkou elektrometru (obr. 5). Kolem této nádoby je umístěn ještě navíc jeden válec s větším průměrem ze stejného materiálu, jenž vytváří „zem“. Je spojen s druhou, uzemňovací svorkou elektrometru. Tento druhý válec je velmi důležitý, neboť působí jako stínění před vlivy vnějších

nábojů a zároveň vytváří spolu s vnitřní nádobou kondenzátor o přesně definované kapacitě  $C_v$ . K této kapacitě je ještě paralelně připojena vnitřní kapacita elektrometru a jeho přívodního vodiče  $C_e$  (elektrometr si můžeme představit jako voltmetr s nekonečně velkým vnitřním odporem a určitou kapacitou připojenou paralelně k jeho svorkám).

Chceme-li nyní zjistit velikost náboje nějakého tělesa, jednoduše vložíme těleso (co nejlouhěji) do Faradayovy nádoby. Indukovaný náboj na vnější stěně nádoby pak způsobí vznik napětí, které je úměrné velikosti vloženého náboje a můžeme je číst na elektrometru. Chceme-li znát absolutní velikost vloženého náboje přesně, potřebujeme znát celkovou kapacitu nádoby s připojeným elektrometrem a vloženým předmětem. (Je-li však předmět malý, ovlivní celkovou kapacitu málo.) Pokud známe celkovou kapacitu, můžeme vypočítat náboj ze známého vztahu  $Q = CU$ .

Pozn.: Kapacita je uvedena u úlohy.

### Měření

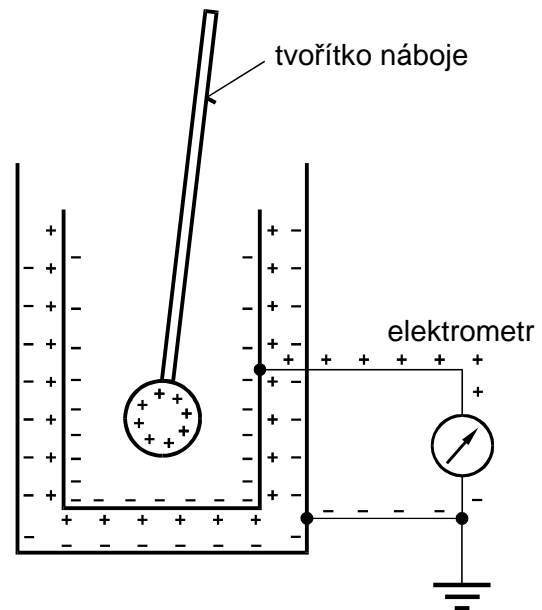
Elektrometr a Faradayovu nádobu připravte k provozu podle návodu příloženého u úlohy. Pokaždé, když budete provádět měření náboje, musíte vybit elektrometr s nádobou tak, že na pár sekund stisknete „ZERO SWITCH“ (který musí být v poloze „PUSH TO ZERO“).

**POZOR!** Nedotýkejte se Faradayovy nádoby pokud nejste uzeměni. Statická elektřina z vašeho těla může snadno zničit vstupní obvod elektrometru. Během celého experimentu je nutné, aby byl experimentátor stále uzeměn, aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivňování nábojem z vašeho těla. Je tedy vhodné se druhou rukou držet například stínícího válce nebo zemnicí desky.

Během celého měření je nutné občas překontrolovat a nastavit nulovou polohu elektrometru tak, jak je to popsáno v návodu k přípravě k provozu (příložen u úlohy).

Po skončení měření je třeba vždy dát „ZERO SWITCH“ do polohy „ZERO LOCK“ a elektrometr vypnout!

K experimentům budete dále používat jednoduchá tvořítka náboje (obr. 6) a testovací sondu. Tvořítka náboje sestávají z nevodivého izolačního držadla opatřeného na konci mírně vodivým ( $\sim 10^3 \Omega$ ) diskem potaženým vrstvou materiálu, jenž se snadno nabíjí. Disk s bílou vrstvou se nabíjí kladně, disk modré barvy získává



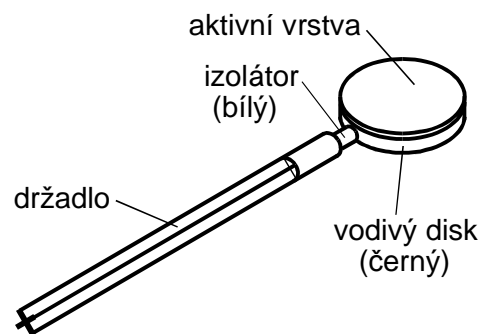
Obr. 5 Faradayova nádoba

záporný náboj. Jednoduše třete o sebe rychle modrý a bílý povrch a disky se nabijí.

Testovací sonda je opět nevodivé držadlo opatřené vodivým diskem potaženým hliníkovou vrstvičkou. Je určena pro snímání vzorku náboje z nabitých vodivých povrchů.

Potřebujete-li tvořítko nebo sondu vybit, dotkněte se vodivým diskem země (zemnicí desky). Pokud se nedaří tvořítko nebo sondu zcela vybit, dýchněte lehce na bílý izolátor a znovu uzemněte. Vlhkost z vašeho dechu vytvoří vodivou cestu a pomůže vybit zbytkový náboj na izolátoru. Nedotýkejte se izolátorů rukou! Mastné nečistoty z pokožky mohou vytvořit vodivou cestu a náboj by se pak na tvořítku neudržel (odteče přes vaši ruku do země). Příležitostně je nutné vyčistit povrch disku a izolátor pomocí lihu.

Pozn.: Užíváte-li tvořítko bezprostředně po vyčištění, mohou produkovat zpočátku nedostatečné množství náboje.



Obr. 6 Tvořítko náboje

### A. Experiment 1

- 1) Třete obě tvořítko náboje vzájemně, abyste na nich vytvořili náboj.
- 2) Vložte jedno nabitě tvořítko co nehlouběji do Faradayovy nádoby, ale nedotýkejte se jí. Pamatujte na to, že musíte být stále uzemněni. Zaznamenejte údaj elektrometru.
- 3) Vyjměte tvořítko z nádoby a opět zaznamenejte údaj elektrometru.
- 4) Vložte tvořítko opět do nádoby, tentokrát se ale dotkněte tvořítkem jejího povrchu a opět jej vyjměte. Zaznamenejte údaj elektrometru.
- 5) Vybijte Faradayovu nádobu a elektrometr. Pak vložte tvořítko do nádoby opět a sledujte elektrometr. Zůstal nějaký náboj na tvořítku? Vysvětlete!

### B. Experiment 2

- 1) Začněte s vybitými tvořítky náboje.
- 2) Třete vzájemně modrý a bílý povrch.
- 3) Užitím Faradayovy nádoby změřte velikost a polaritu jejich nábojů. Uvědomíte-li si výsledky experimentu 1, zjistíte, že není nutné se dotýkat tvořítky nádoby.
- 4) Jaký je vztah mezi vyprodukovanými náboji?

### C. Experiment 3

- 1) Důkladně vybitá tvořítko náboje třete vzájemně uvnitř Faradayovy nádoby. Jaký je údaj elektrometru?
- 2) Vyjměte jedno tvořítko a zaznamenejte údaj elektrometru.
- 3) Tvořítko vraťte a vyjměte druhé. Opět zaznamenejte údaj elektrometru.
- 4) Vysvětlete jev!

## D. Experiment 4

- 1) Vybijte tvořítka náboje a třete bílé tvořítka vůči hliníkové testovací destičce. Změřte velikosti a polarity nábojů.
- 2) Totéž proveďte s modrým tvořátkem náboje.
- 3) Sestavte seznam těchto tří materiálů tak, že třeme-li materiál níže zapsaný s materiálem výše zapsaným, bude náboj na materiálu výše zapsaném vždy pozitivní. Takový seznam se nazývá **elektrostatická série**.

## E. Měření hustoty náboje na povrchu vodivého tělesa

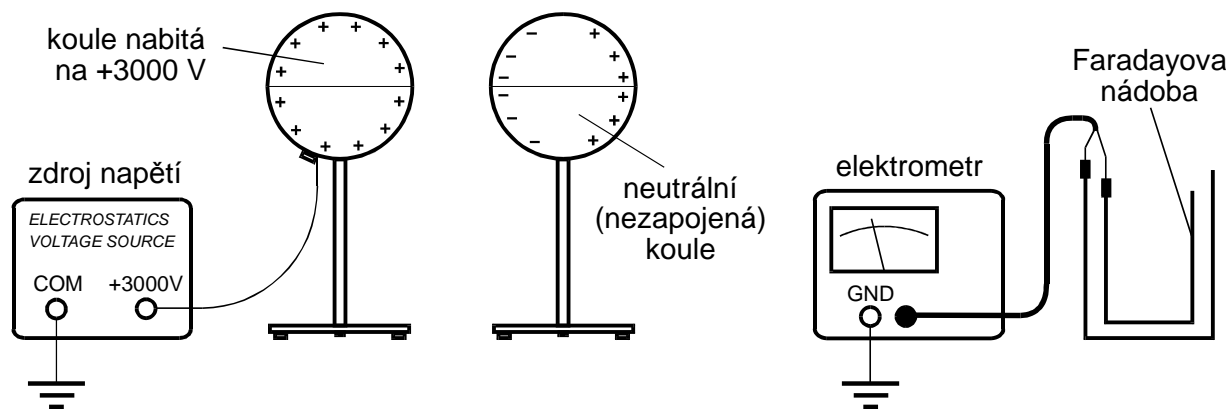
Gaussův zákon

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

udává vztah mezi celkovým tokem intenzity elektrického pole uzavřenou Gaussovou plochou a celkovým nábojem  $Q$  obklopeným touto plochou (ve vakuu). Veličina  $\epsilon_0 = 8,854188 \cdot 10^{-12}$  [F/m] je permitivita vakua. Z tohoto zákona lze vyvodit, že se náboj zdržuje na povrchu vodiče a jeho plošná hustota  $\sigma = Q_S/S$  je přímo úměrná velikosti intenzity elektrického pole  $E$  v daném místě těsně nad povrchem vodiče:

$$\sigma = E \cdot \epsilon_0 \quad (2)$$

Plošná hustota náboje na povrchu je tedy obecně různá v různých místech vodiče. Tento fakt experimentálně ověříme. Změříme rozdělení hustoty indukovaného náboje na izolované neutrální kouli, kterou postavíme do blízkosti jiné koule, jež je nabitá na potenciál 3000 V vůči zemi. Experimentální uspořádání bude vypadat podle obr. 7:



Obr. 7 Měření hustoty náboje na povrchu vodivého tělesa

Rozdělení náboje na povrchu neutrální koule budeme zaznamenávat pomocí testovací sondy a Faradayovy nádoby s elektrometrem. Když se vodivou testovací sondou dotkneme povrchu vodiče, stane se sonda součástí jeho povrchu a získá tak stejnou hustotu náboje. Podmínkou je, aby disk sondy nenarušil příliš tvar vodiče a tím i tvar elektrického pole nad vodičem. Došlo by ke změně hustoty náboje a měření by nebylo přesné. Proto musíme disk sondy přikládat k povrchu vodiče

vždy tak, abychom minimalizovali změnu tvaru povrchu – tedy naplocho (viz obr. 8). Pro přesné určování hustoty náboje je tedy nutné, aby byl měřený vodič značně větší než sonda a měl relativně velký poloměr křivosti v místě dotyku sondy.

Důležitý aspekt tohoto měření je zákon zachování náboje. Testovací sonda vždy odebere určitou část náboje z měřeného tělesa. Tento náboj musíme do tělesa opět vrátit (při odebrání následujícího vzorku). Pokud bychom sondu s odebraným

nábojem uzemnili (nebo se dotkli Faradayovy nádoby), náboj by se odvedl do země a na měřeném tělese by pak chyběl. To by se začalo nabíjet. Nesmíme se tedy dotýkat sondou Faradayovy nádoby ani sondu uzemňovat!

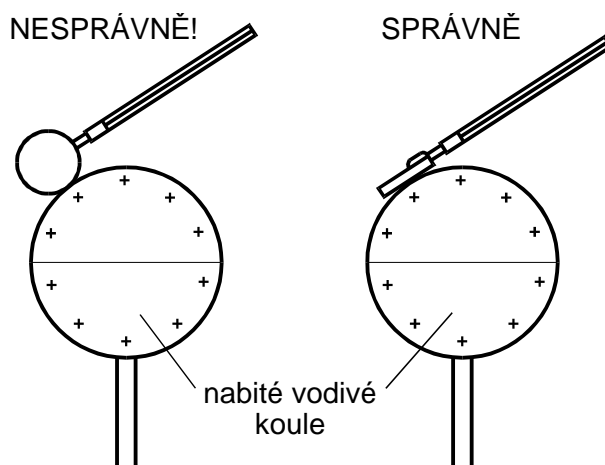
Měření proveďte pro jednu vzdálenost koulí volenou z intervalu 16 až 22 cm (měřeno mezi **středy** koulí) podle pokynů vyučujícího. Nabitou kouli je třeba umístit minimálně 1,5 m od Faradayovy nádoby. Před vlastním začátkem měření vzdalte neutrální kouli alespoň na 1 metr od nabité koule a na okamžik ji uzemněte, aby byla skutečně dokonale vybitá (neutrální). Nedotýkejte se izolačních tyčí, na nichž koule stojí. Nečistoty způsobují svod a odvádí náboj do země!

Vzorky náboje odeberte na jedenácti místech koule ve svislé rovině procházející středy koulí. Pro grafické vyjádření výsledku zvolte vhodné zobrazení (např. podle obr. 9). Protože napětí měřené elektrometrem je přímo úměrné hustotě náboje, postačí uvést přímo toto napětí. Pouze pro největší kladnou a největší zápornou naměřenou hodnotu vypočtete též hustotu náboje v  $[C/m^2]$ . Proto si nezapomeňte změřit plochu testovací sondy a opsat celkovou kapacitu Faradayovy nádoby s elektrometrem.

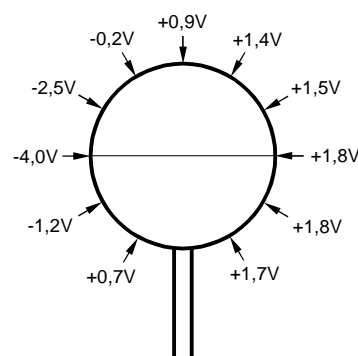
### F. Ověření vztahu $Q = C \cdot U$ u kondenzátoru při konstantním náboji

Měření budete provádět na měřicím deskovém kondenzátoru s proměnlivou kapacitou. Ke kondenzátoru připojte elektrometr podle obr. 10. Elektrometr připravíte k provozu podle návodu přiloženého u úlohy. Jelikož je k měřicímu kondenzátoru připojen elektrometr paralelně, má měřicí systém celkovou kapacitu  $C = C_m + C_e$ , kde  $C_m$  je kapacita měřicího kondenzátoru a  $C_e$  kapacita elektrometru s přírady, jejíž velikost je přibližně 40 pF.

Kapacitu měřicího kondenzátoru budete počítat podle vztahu:



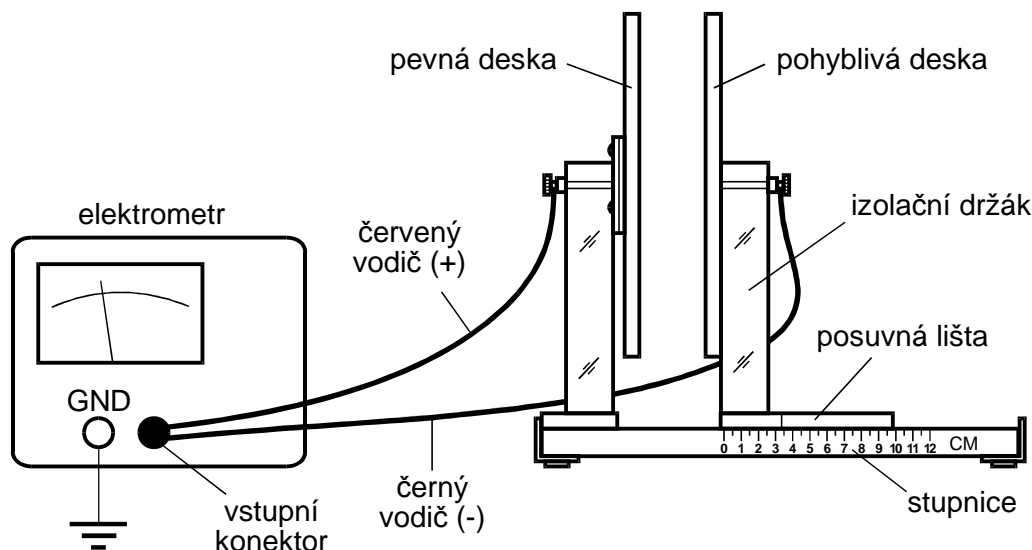
Obr. 8 Práce s testovací sondou



Obr. 9

$$C_m = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (3)$$

kde  $S$  je plocha desek kondenzátoru a  $d$  je vzdálenost mezi deskami. Vztah platí dostatečně přesně pouze pro velký poměr  $S/d$ . V našem případě však vstupuje do



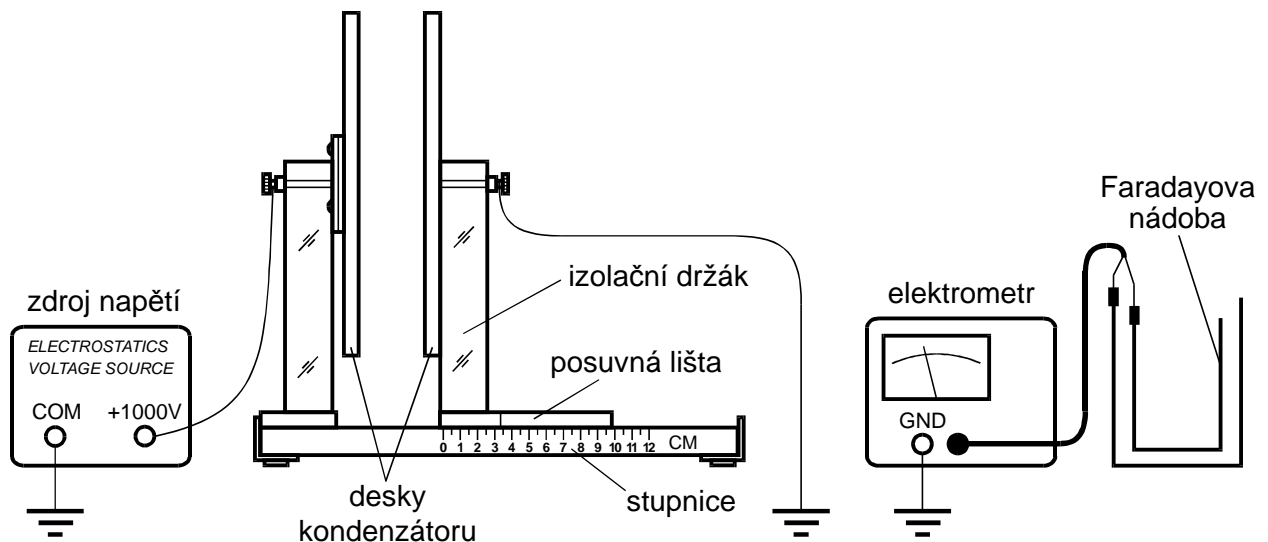
Obr. 10 Měření napětí na kondenzátoru při konstantním náboji

hry tolik rušivých vlivů a nepřesností, že můžeme tuto chybu zanedbat. (Např. vzájemná kapacita přívodních vodičů, závisící silně na jejich poloze, je srovnatelná s minimální kapacitou našeho měřicího kondenzátoru.) Toto měření má tedy spíše demonstrativní charakter a jeho přesnost není velká.

Postup:

- 1) Rozsah elektrometru zvolte 30 V.
- 2) Pohyblivou desku kondenzátoru nastavte na vzdálenost 15 mm od desky pevné.
- 3) Kondenzátor nabijte vodičem ze zdroje napětím 30 V. **(POZOR! Nesplést zdířky zdroje! Napětí větší než 100 V spolehlivě zničí elektrometr! V případě nejasností se obraťte na vyučujícího.)** Elektrometr musí napětí 30 V v okamžiku připojení vodiče ukázat. Vodič odpojte. V systému je nyní uskladněn určitý náboj  $Q$ , který nemá kam odtéci a při změně kapacity kondenzátoru se nemění.
- 4) Změňte vzdálenost desek a zaznamenejte napětí. Pokud vzdálenost zmenšíte, napětí se zmenší, při zvětšení vzdálenosti se napětí zvětší a je nutno přepnout elektrometr na rozsah 100 V.
- 5) Opakováním kroků 2), 3) a 4) proměřte závislost napětí na vzdálenosti desek 1, 2, 4, 7, 9, 12, 20, 25, 35, 45 a 60 mm. Nezapomeňte, že musíte být při měření stále uzemněni. Opakované nabíjení provádíme proto, abychom omezili vliv svodu izolace, jež způsobuje pomalý úbytek náboje (vybíjení kondenzátoru).
- 6) Znázorněte graficky (doma) závislost napětí na převrácené hodnotě celkové kapacity  $1/C$ . Provéřte, zda je tato přímková a potvrzuje tak vztah  $Q = C \cdot U$ . Má tato závislost procházet počátkem?





Obr. 11 Měření náboje na kondenzátoru při konstantním napětí

### G. Ověření vztahu $Q = C \cdot U$ u kondenzátoru při konstantním napětí

Měření budete provádět opět na měřicím kondenzátoru s proměnlivou kapacitou. K pevné desce kondenzátoru připojte stejnosměrné napětí o velikosti 1000 V podle obr. 11. Zdroj dodá do kondenzátoru určitý náboj, jehož velikost závisí na nastavené kapacitě.

- 1) Změřte pomocí testovací sondy a Faradayovy nádoby hustotu náboje  $\sigma$  na vnitřním povrchu **uzemněné** desky kondenzátoru v závislosti na kapacitě kondenzátoru. Vzorky náboje odebírejte ze středu desky. Vzdálenost desek nastavujte postupně na 1,5 1,7 1,9 2,5 2,8 3,5 cm a dále po jednom centimetru až do 6,5 cm.
- 2) Změřte hustotu náboje na vnější ploše obou desek kondenzátoru pro jednu zvolenou vzdálenost desek. Zdůvodněte výsledek!
- 3) Kapacitu kondenzátoru počítejte podle vztahu (3).
- 4) Sestrojte grafickou závislost hustoty náboje  $\sigma$  na kapacitě kondenzátoru  $C_m$ . Proložte přímkou lineární regresi. (viz kap. „Chyby měření“, odst. D.)

Poznámka: Výstup zdroje pro elektrostatické experimenty je opatřen ochranným odporem, který při náhodném dotyku omezí proud na takovou velikost, že nehrozí poškození zdraví.

### Pracovní úkol

- 1) Proved'te experimenty **A** až **E**.
- 2) Podle rozhodnutí vyučujícího proved'te buď experiment **F** nebo **G**.