

Leoš Dvořák, Zdeněk Šabatka,  
Věra Koudelková, Irena Dvořáková

# NÁBOJE, PROUDY A ELEKTRICKÉ OBVODY



Vzdělávací modul FYZIKA

Výukový a metodický text

Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze:  
aktivně, aktuálně a s aplikacemi – projekt OPPA



Praha 2012

Publikace byla vydána v rámci Operačního programu Praha – Adaptabilita (OPPA) a jeho projektu Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi. Řešiteli projektu jsou pracovníci Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze a Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

*Autoři textu:*

doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc., RNDr. Zdeněk Šabatka, Mgr. Věra Koudelková,  
RNDr. Irena Dvořáková, Ph.D., katedra didaktiky fyziky MFF UK v Praze

*Recenzenti:*

doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D.  
RNDr. Stanislav Gottwald

Vydalo Nakladatelství P3K s. r. o. ([www.p3k.cz](http://www.p3k.cz)) v Praze v roce 2012 v nákladu 120 ks. Vydání první.  
Ze sazby dodané autory vytiskl xPrint s. r. o.  
Publikace neprošla jazykovou korekturou.

© Leoš Dvořák, Zdeněk Šabatka, Věra Koudelková, Irena Dvořáková, 2012

© Nakladatelství P3K, 2012

ISBN 978-80-87186-78-7

# OBSAH

1. Úvodem .....	5
1.1 Jak pracovat s tímto materiálem .....	5
1.2 Proč zde najdete hlavně návody na experimenty .....	6
1.3 Kde a jak pokusy využít – a poznámky k potřebným pomůckám .....	7
1.4 Bezpečnost při práci a další obecné poznámky k pokusům .....	8
2. Něco málo teorie .....	9
2.1 Náboje, elektrické pole, napětí a kapacita .....	9
2.2 Jednoduché elektrické obvody .....	11
3. Pokusy z oblasti elektrostatiky .....	12
3.1 Elektrostatika s brčky a plastovými tyčemi .....	12
3.2 Platí Coulombův zákon a lze ho ověřit ve škole? .....	18
3.3 Pole nabité koule .....	22
3.4 Náboj, kapacita, napětí a proud .....	27
3.5 Deskový kondenzátor a jak v něm měřit pole .....	32
4. Pokusy s elektrickými obvody .....	38
4.1 Elektrické obvody téměř z ničeho .....	38
4.2 Sériové a paralelní zapojení .....	42
4.3 Ohmův zákon k vašim službám – ale někdy neplatí .....	48
4.4 Lze změřit proud tekoucí špejlí? (Aneb měření malých proudů) .....	53
5. Závěrem .....	58
Literatura .....	59

# 1. Úvodem

Tento učební materiál vznikl v rámci projektu OPPA „Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi“, řešeném v letech 2010–2012 na Přírodovědecké a na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Záměrem projektu je přispět k inovaci výuky přírodních věd a matematiky a ke zvýšení zájmu středoškoláků o tyto obory. Za fyziku byla vybrána témata z oblasti, která byla klíčová pro rozvoj moderní společnosti – z oblasti elektromagnetismu.

Technologie, které využívají elektřinu, magnetismus a elektromagnetické záření, dnes považujeme za samozřejmou součást dnešní civilizace a je jasné, že spíš než Coulombův zákon dnes mládež uchvátí nejnovější design chytrého telefonu či „vychytávky“ posledního modelu tabletu populární značky. Taková je realita a samotné zdůrazňování, že fyzika je pro tyto technologie nezbytným základem, je k motivaci středoškoláků asi málo. Naštěstí řadu aspektů elektřiny a magnetismu lze představit a přiblížit i v atraktivní formě, tak, že překvapí a zaujmou, a to aniž by šlo jen o lacinou „show“.

Východiskem výkladu elektrických jevů bývá obvykle oblast elektrostatiky. Někdy jde o oblast trochu obávanou. Rčení typu „Pomůcky jsou zastaralé, vzduch je vlhký, pokusy se nedaří“, je známo asi všem generacím fyzikářů. Moderní materiály a měřicí přístroje ovšem umožňují realizovat řadu experimentů vcelku spolehlivě, ať už jde o pokusy s jednoduchými pomůckami nebo s náročnějším přístrojovým vybavením. „Aktuálnost“ a „aplikace“ nejsou ovšem dány jen využitím současných materiálů a pomůcek. Se statickými náboji se setkáváme v běžném životě – a diskuse o tom, na jak velké napětí jsme asi nabití, když si sundáme svetr z umělých vláken a pak dostaneme „ránu“ třeba po dotyku rámu dveří, a zda tyto výboje mohou poškodit třeba některá elektronická zařízení, jsou alespoň pro některé žáky zajímavé a mohou poskytnout bližší představu o pojmech jako napětí, potenciál, náboj a kapacita.

Druhou oblastí, které se v tomto materiálu dotýkáme, je elektrický proud. I zde panuje mezi laiky řada nesprávných představ, daná často tím, že nemají reálnou zkušenost s chováním ani jednoduchých elektrických obvodů. Náměty zde uvedené snad mohou dát inspiraci, jak výuku příslušných partií oživit a jak v nich využít aktivní práci samotných žáků a studentů.

## 1.1 Jak pracovat s tímto materiálem

Jednoduchá odpověď zní: tak, jak to vám a vašim žákům a studentům bude vyhovovat.

Hlavní částí učebního materiálu, který máte před sebou, jsou kapitoly 3 a 4. Ty zahrnují několik tematických bloků – pět se věnuje oblasti elektrostatiky, čtyři problematice elektrického proudu a elektrických obvodů. Ve dvou blocích je přitom zčásti ukázána souvislost nábojů a elektrického proudu. V naprosté většině se jedná o popis experimentů využitelných ve výuce, s návody na pokusy a metodickými poznámkami.

Před zmíněnými tematickými bloky je ve druhé kapitole stručně připomenuta potřebná teorie. Nejedná se ovšem o její soustavný výklad a tato kapitola rozhodně nemá sloužit jako vzor, jak příslušné partie učit.

Vzhledem k rozsahu tištěné verze tohoto materiálu zde mohly být některé experimenty popsány jen stručně. Podrobnější popis a metodické poznámky naleznete v těchto případech na CD, které je součástí této publikace. Najdete tam i pracovní listy ve formátu textového editoru Word, abyste je mohli v případě potřeby přizpůsobit pro vaši výuku. Na CD je též celý tento učební text v elektronické formě ve verzi s barevnými obrázky a fotografiemi.

Každý tematický blok zahrnuje skupinu experimentů. Ty na sebe navazují, umožňují zkoumat příslušné téma postupně do větší hloubky a rozvíjet pochopení příslušných pojmů a jevů. Nechceme však tvrdit, že daná posloupnost pokusů a úvah je jediná možná, správná a „kanonická“. Ostatně uvidíte, že i styl, jímž jsou pokusy prezentovány, se v jednotlivých blocích mírně liší; záměrně jsme jej nesešněrovali do jedné striktní „šablony“. Celková nabídka zde prezentovaná je také zřejmě širší než odpovídá možnostem, které současné časové dotace na školách umožňují realizovat. Takže výběr a to, nač klást důraz, je ve vašich rukou.

## 1.2 Proč zde najdete hlavně návody na experimenty

Jak už bylo uvedeno výše, v tomto materiálu nenajdete „vzorový výklad“ příslušných partií, ale zejména návody na experimenty. Důvodem je skutečnost, že na našich školách dosud ještě až příliš často dominuje teoretický výklad. Tedy, zjednodušeně řečeno, vzorce a slova. Teorie je samozřejmě ve fyzice nesmírně důležitá, vzorce v sobě mají sílu nesmírně výstižného popisu reality, a pro toho, kdo se s fyzikou blíže seznámil, také hloubku, krásu a eleganci. Ale k takovému pochopení je třeba dospět, aby vzorce a slova kolem nich nebyly jen prázdnými abstrakcemi nebo něčím, co je potřeba se prostě naučit nazpaměť pro příští přezkoušení nebo test. A východiskem je právě kontakt s realitou – tedy s příslušnými experimenty. Navíc pokusy přirozeně umožňují a stimulují *aktivní* práci žáků a studentů.

Samozřejmě, je zde druhé nebezpečí. (V životě vždy proplováme mezi Scyllou a Charybdou.) V případě pokusů je to nebezpečí experimentů konaných jen „na efekt“, bez opravdového pochopení, oč v nich jde a jak zde fyzika „funguje“. Zde je místo pro vzájemné diskuse – jak mezi žáky a učitelem tak třeba ve skupinkách žáků. A také místo pro uplatnění teorie, kvantitativních měření, vzorců a výpočtů.

Tím vším vám, učitelům fyziky, samozřejmě neříkáme nic nového. Propojení pokusů, teoretických vztahů a výpočtů a diskuse se žáky je pro většinu dobrých učitelů samozřejmostí. Na druhou stranu se všichni stále učíme, jak to dělat lépe a jak to zvládat v měnících se podmínkách školy, okolního světa a s novými generacemi žáků. Aby tento učební materiál mohl být inspirací i pro tyto další aspekty využití pokusů, najdete zde metodické poznámky, komentáře, jaké otázky si lze při pokusech a interpretaci jejich výsledků klást, čeho si všimnout, případně co by bylo zajímavé dále zkoumat.

### 1.3 Kde a jak pokusy využít – a poznámky k potřebným pomůckám

Jak již bylo řečeno výše, popis, který zde u jednotlivých pokusů uvádíme, má být nabídkou a inspirací pro vás, učitele. Je na vašem rozhodnutí, které pokusy si vyberete a zařadíte do své výuky a jakou formou je budete realizovat.

Řadu zejména jednodušších experimentů lze využít jak jako pokusy demonstrační, tak jako pokusy frontální, prováděné například dvojicemi žáků v lavicích. I u demonstračních pokusů lze samozřejmě pracovat s aktivitou žáků, například nechat je předpovědět výsledek pokusu. (Někdy se tak podaří pěkně ilustrovat, že příroda se nedá ovlivnit hlasováním.) Pokusy, které dávají kvantitativní výsledky, lze samozřejmě využít i v rámci laboratorních prací. K nejnáročnějším může patřit využití v menších či větších žákovských projektech.

Vše toto záleží přirozeně na řadě faktorů, jako jsou např. časová dotace, důraz, který je na danou oblast fyziky kladen ve vzdělávacích programech, prostorové možnosti, vaše osobní preference a v neposlední řadě vybavení školy potřebnými pomůckami.

Protože právě vybavení, či spíše nevybavení kabinetů fyziky bývá často problémem, jsou v tomto učebním materiálu uvedeny i pokusy s velmi jednoduchými a levnými pomůckami – plastovými brčky, plechovkami, kousky alobalu, žárovičkami či součástkami doslova „za pár korun“. Z měřicích přístrojů, pokud jsou potřeba, může jít o běžné multimetry v ceně do několika málo set korun, tedy řádově levnější než specializované školní demonstrační měřicí přístroje.

Na druhou stranu, máte-li v kabinetu fyziky třeba měřič náboje nebo vysokonapěťový zdroj, najdete v příslušných kapitolách pokusy, v nichž je budete moci užitečně využít. Naší snahou bylo, aby nabídka experimentů byla dostatečně široká a mohla využít nejrůznější úrovně vybavení.

Poznámka k pokusům využívajícím specializovaných pomůcek:

V dále popsaných pokusech najdete i některé, které využívají specializované měřicí přístroje například od firmy Phywe. Příkladem je měřič intenzity elektrického pole nebo aparatura, která umožňuje měřit potenciál v okolí nabitě koule. Takovéto pomůcky překračují svou finanční náročností možnosti asi většiny středních škol. Přesto jsme je do přehledu experimentů zařadili, a to ze dvou důvodů:

- Tyto experimenty umožňují přímo měřit veličiny a závislosti, jejichž měření s využitím jednoduchých pomůcek by bylo buď prakticky nemožné, nebo komplikované a málo názorné.
- Dané pokusy jsou k dispozici v *Interaktivní fyzikální laboratoři (IFL)* na Matematicko-fyzikální fakultě UK – viz <http://kdf.mff.cuni.cz/ifl/>. Po dohodě sem mohou učitelé se svými žáky (ideálně se třídou rozdělenou na poloviny, tedy maximálně se 16 studenty) přijít a pokusy na daném přístrojovém vybavení provést.

## 1.4 Bezpečnost při práci a další obecné poznámky k pokusům

Při některých elektrostatických pokusech je užitečné sáhnout si na nějaký nabitý objekt, například plechovku stojící na kusu polystyrénu, kterou jsme nabili plastovou tyčí nebo z vysokonapěťového zdroje. „Rána“, kterou přitom dostaneme, není příliš silná a zdravému člověku nemůže ublížit. V zájmu bezpečnosti je však vhodné zajistit, aby takovéto pokusy nedělaly osoby s nemocným srdcem případně ty, které mají kardiostimulátor.

Jinak spočívá případné riziko úrazu jen v tom, že by se člověk, který se dotkne nabitého objektu, mohl leknout, udělat prudký pohyb, uhodit se apod. (Nepředpokládáme, že by takový člověk stál na židli, na stole či na žebříku, odkud by kvůli leknutí mohl spadnout.) Ani zdroje vysokého napětí, používané ve škole, by neměly představovat problém. Jsou konstruovány tak, aby daly jen nepatrný proud, který zdravého člověka nijak neohroží.

Problematické by bylo, pokud bychom vysokým napětím (řádu kilovoltů nebo desítek kilovoltů) nabili kondenzátor, například leydenskou láhev, o dostatečně vysoké kapacitě. Dotknout se vývodů takového kondenzátoru by už mohlo způsobit poměrně velký šok. Zahraniční zdroje, např. [1–2] uvádějí, že má-li kondenzátor nabitý na vysoké napětí energii několika desetin joulu, způsobí dotyk velký šok, při energii přes 10 J může jít o ohrožení života. (Jiné zdroje udávají tuto hranici jen 5 J.) V tomto učebním materiálu nepopisujeme žádné experimenty, při nichž by energie byly takto velké. Je však dobře si uvědomit, že i „klasická“ školní indukční elektrika by například dostatečně velkou amatérsky zhotovenou baterii leydenských lahví mohla nabít na nebezpečně vysoké hodnoty náboje a energie.

Pokud se týče pokusů s elektrickými obvody, ty, které zde popisujeme, jsou zcela bezpečné. Napětí z jedné či dvou plochých baterií nikomu neublíží ani ve vlhkém prostředí. Samozřejmě, v některých případech nejde jen o bezpečnost při práci s elektrickým proudem, například při odstraňování baňky žárovky, aby bylo možno její vlákno chladit vodou; na příslušném místě je však upozornění, jak toto při troše opatrnosti bezpečně provést.

Obecně lze k dále uvedeným pokusům poznamenat, že zejména u jednoduchých pokusů lze při volbě pomůcek poněkud improvizovat: plechovky, alobal či plastová brčka nemusí být určité značky či velikosti. Stejně tak u multimetrů nezáleží na přesném typu přístroje. Někdy, zejména v pokusech s elektrostatikou, ovšem může záležet i na detailech provedení. Je tedy přirozené, že je třeba pokusy s pomůckami, které budete konkrétně používat, před použitím ve výuce vždy předem vyzkoušet.

## 2. Něco málo teorie

Následující krátký přehled stručně připomene některé základní vztahy a zákony, které se při jevech z oblasti elektrostatiky a elektrického proudu uplatňují a které budeme při rozboru a interpretaci výsledků pokusů potřebovat.

### 2.1 Náboje, elektrické pole, napětí a kapacita

Elektrostatika se zabývá jevy, při nichž jsou elektrické náboje v klidu. Náboje<sup>1</sup> často uvažujeme jako *bodové*, tedy zanedbáváme rozměr příslušného nabitého objektu. Dva bodové náboje ve vakuu na sebe podle **Coulombova zákona** působí silou o velikosti

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}. \quad (2.1.1)$$

Zde  $Q_1$  a  $Q_2$  jsou velikosti nábojů,  $r$  jejich vzájemná vzdálenost. Konstanta  $\epsilon_0$  je *permitivita vakua*; je  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m. Často je pohodlnější počítat rovnou s hodnotou faktoru, který se objevuje v Coulombově zákoně:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \doteq 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2} \doteq 10^{10} \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}. \quad (2.1.2)$$

V případě, že náboje nejsou ve vakuu, musíme permitivitu vakua násobit *relativní permitivitou* prostředí:  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ . Pro vzduch je však relativní permitivita velmi blízká 1, takže v případě pokusů konaných ve vzduchu můžeme používat Coulombův zákon ve tvaru (2.1.1). Není asi nutno zdůrazňovat, že náboje stejných znamének se odpuzují, náboje opačných znamének se přitahují, síly mají směr spojnice obou nábojů a platí pro ně 3. Newtonův zákon.

Elektrické pole lze charakterizovat **intenzitou**  $\vec{E}$ . Ta je definována pomocí síly  $\vec{F}$ , kterou elektrické pole působí na malý (testovací) náboj  $q$ ; platí

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (2.1.3)$$

Z (2.1.3) a (2.1.1) plyne, že velikost intenzity v okolí bodového náboje o velikosti  $Q$  je

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad (2.1.4)$$

tedy ubývá nepřímo úměrně s druhou mocninou vzdálenosti. Elektrické pole bodového náboje je přitom *radiální* – elektrická intenzita míří ve směru od náboje (resp. k náboji, pokud  $Q < 0$ ). Intenzitu elektrického pole více nábojů získáme jako vektorový součet intenzit odpovídajících jednotlivým nábojům.

---

<sup>1</sup> Slovo „náboj“ používáme jak pro nabitou částici resp. například malou nabitou kuličku, tak pro veličinu měřenou v coulombech. Z kontextu je však zřejmé, co máme kdy na mysli.



Vztah (2.1.4) popisuje rovněž intenzitu pole vně rovnoměrně nabitě sféry, například vodivé koule. Ovšem pozor: pokud k vodivé kouli přiblížíme jiný náboj, rozložení nábojů na jejím povrchu se změní a pole již nepůjde popsat jednoduchými vzorci uvedenými výše.

Statické elektrické pole lze kromě intenzity (která je vektorovou veličinou, má tedy velikost a směr) popsat též skalární veličinou – **potenciálem**. Potenciál souvisí s potenciální energií náboje v elektrickém poli, ta je  $W_{\text{pot}} = q \cdot \varphi$ , kde  $q$  je náboj a  $\varphi$  potenciál v daném místě.

Potenciál bodového náboje  $Q$  je dán vztahem

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}, \quad (2.1.5)$$

klesá tedy nepřímo úměrně se vzdáleností od náboje. Stejný vztah platí pro potenciál pole vně rovnoměrně nabitě sféry.

Potenciál je obecně určen až na konstantu; ve vztahu (2.1.5) je tato konstanta určena požadavkem, aby potenciál v nekonečnu byl roven nule. (Reálně to znamená, že potenciál velmi daleko od náboje je prakticky nulový.) Rozdíl potenciálů ve dvou bodech A a B již žádnou libovolnou konstantu neobsahuje; tento rozdíl označujeme jako **napětí**:  $U = \varphi(A) - \varphi(B)$ .

Intenzita pole je vlastně spád napětí dělený příslušnou vzdáleností: Jestliže mezi dvěma body vzdálenými  $d$  je napětí  $U$ , je „průměrná“ intenzita na jejich spojnici (přesněji řečeno složka intenzity do směru jejich spojnice):

$$E = \frac{U}{d}. \quad (2.1.6)$$

Poznámka: Výše uvedené tvrzení je jen přibližné! Vztah (2.1.6) je vhodné používat jen pro velmi blízké body nebo v případě homogenního pole. (Přesně by platil v limitě  $d \rightarrow 0$ , jak bychom mohli odvodit z přesného vztahu  $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$  mezi potenciálem a intenzitou; ale gradienty či křivkové integrály do tohoto přehledu uvádět nebudeme.)

Napětí i potenciál měříme ve voltech; z (2.1.6) je zřejmé, že jednotkou intenzity je V/m; z (2.1.3) je vidět, že tuto jednotku také můžeme zapsat jako N/C. (Skutečnost, že náboj se měří v coulombech, jsme výše ani nezdůrazňovali.)

Náboj na osamoceném vodiči (například na osamoceně vodivé kouli) je úměrný jeho potenciálu:  $Q = C \cdot \varphi$ . Veličinu  $C$  nazýváme **kapacitou** vodiče. Pro „uložení“ náboje se lépe hodí **kondenzátor**. Je-li mezi jeho elektrodami napětí  $U$ , jsou na elektrodách náboje  $+Q$  a  $-Q$  a platí:

$$Q = C \cdot U. \quad (2.1.7)$$

Jde-li o *deskový kondenzátor* s elektrodami vzdálenými  $d$ , přičemž plošný obsah (jedné strany) elektrody je  $S$ , platí pro jeho kapacitu

$$C = \epsilon \frac{S}{d}. \quad (2.1.8)$$

## 2.2 Jednoduché elektrické obvody

Pokud se elektrické náboje pohybují, mluvíme o **elektrickém proudu**. Jeho velikost je dána tím, kolik náboje proteče danou plochou (obvykle průřez drátu) za jednotku času, resp. poměrem

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (2.2.1)$$

Elektrický proud tekoucí mezi dvěma body je podle **Ohmova zákona** přímo úměrný napětí mezi těmito body. Konstantou úměrnosti je **vodivost  $G$** , obvykle se však nahrazuje běžnějším **elektrickým odporem  $R$**  (tj. převrácenou hodnotou vodivosti):

$$I = G \cdot U = \frac{1}{R} U. \quad (2.2.2)$$

Je-li vodič homogenní, je velikost elektrického odporu závislá na délce  $l$  a průřezu  $S$  vodiče podle známého vztahu:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.2.3)$$

kde  $\rho$  je materiálový parametr zvaný *měrný elektrický odpor*.

Měrný elektrický odpor vodiče je závislý na teplotě:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta t), \quad (2.2.4)$$

kde  $\alpha$  je *teplotní součinitel elektrického odporu*. Součinitel  $\alpha$  je také závislý na teplotě – vztah (2.2.4) tak platí jen v rozumném rozsahu teplot.

Ohmův zákon platí pouze pro tzv. lineární prvky obvodu – rezistory, vodiče,... neplatí např. pro diody, žárovky a další. Jeden z případů, kdy neplatí, je popsán v kapitole 4.3.

Má-li elektrický obvod několik větví, jsou pro jeho řešení potřeba **Kirchhoffovy zákony**:

**1. Kirchhoffův zákon** je důsledkem rovnice kontinuity, čili zákona zachování náboje: Součet proudů v každém uzlu je nulový. Jinými slovy – kolik proudu do uzlu vteče, tolik ho musí vytéci, náboj nemůže v uzlu vzniknout ani zaniknout.

**2. Kirchhoffův zákon** je důsledkem Ohmova zákona pro každou uzavřenou smyčku rozvětveného obvodu: Součet úbytků napětí na všech rezistorech ve smyčce je roven součtu elektromotorických napětí na všech zdrojích v dané smyčce.

Pozn.: Uzlem je myšleno libovolné místo v obvodu, kde se stýkají alespoň tři vodiče, smyčka je libovolná uzavřená část obvodu.

## 3. Pokusy z oblasti elektrostatiky

Sekce v této kapitole se věnují jednotlivým tematickým blokům z oblasti elektrostatiky. Náročnosti pokusů odpovídá i různá náročnost na přístrojové vybavení: Blok 3.1 obsahuje pokusy s velmi jednoduchými pomůckami; v bloku 3.2 se pro měření využívají digitální váhy a vysokonapěťový zdroj. Nejnáročnější na vybavení je blok 3.3 – toto měření nabízíme v Interaktivní fyzikální laboratoři na MFF UK. Bloky 3.4. a 3.5. zahrnují jak pokusy s jednoduchými pomůckami, tak experimenty vyžadující např. vysokonapěťový zdroj a měřič náboje.

### 3.1 Elektrostatika s brčky a plastovými tyčemi

S plastovými brčky lze provádět pokusy od velmi jednoduchých vhodných i pro ZŠ až po náročnější experimenty zahrnující i kvantitativní výpočet. Navzdory své jednoduchosti (nebo možná právě díky ní) mají tyto pokusy své výhody:

- Finanční nenáročnost pomůcek
- Pokusy s plastovými brčky fungují i v podmínkách, které elektrostatickým pokusům příliš nepřejí. (Tedy když se nabíjení kovových vodičů nedaří, náboj z nich rychle „utíká“ apod.)
- Podle zkušeností jsou tyto pokusy pro žáky atraktivní a zajímavé, lze je tedy využít jako motivační

Cílem následujících jednoduchých aktivit je, aby žáci prakticky poznali („objevili“), vyzkoušeli si a uměli kvalitativně popsat a vysvětlit:

- Silové působení elektrických nábojů (odpuzování, přitahování, přitahování k nevodivým a vodivým předmětům)
- Nabíjení těles (třením i elektrostatickou indukcí)
- Jednoduché způsoby jak indikovat přítomnost elektrického pole
- Rozlišení polarit elektrických nábojů různých předmětů

Aktivity lze využít i k tomu, aby se žáci seznámili se superpozicí, tedy se skládáním elektrického pole od více nábojů. Na vyšší úrovni je cílem, aby žáci získali kvantitativní představu o velikosti nábojů a intenzity elektrického pole v okolí nabitých předmětů a uměli provést jednoduchá kvantitativní měření, odhady, případně přibližné výpočty, které lze použít pro určení velikosti náboje ze elektrovaných brček, tyčí apod.

Jeden z dále popsaných experimentů (s indikátorem s bipolárními tranzistory) může zároveň sloužit k diskusi o souvislosti pohybu nábojů s elektrickým proudem.

Základní experimenty vyžadují jen velmi jednoduché pomůcky (ne nutně všechny):

Plastová brčka, hadřík nebo papírové kapesníky, špendlíky, špejle, malé korálky, kancelářské sponky, nit; plastové tyče, skleněná tyč ev. zkumavka. Plechovka, izolační podložka (kousek polystyrénu). Další pomůcky využitelné zejména v kvantitativních experimentech: digitální váhy (s přesností alespoň 0,1 g), indikátor s bipolárními tranzistory (je popsán v materiálech na přiloženém CD).

### 3.1.1 Zelektrované brčko drží na zdi

A nejen na zdi, také na dřevěném obložení, na tabuli, ale i na kovovém rámu dveří, trubce ústředního topení apod. Lze využít jako nejjednodušší úvodní motivační pokus. Jeho provedení je jednoduché:

Brčko nabijeme třením o látku, papírový kapesník apod. a přiložíme ho blízko ke zdi či k jinému povrchu.

Náměty, co mohou žáci zkoumat:

- *Na čem všem brčko drží? Udrží se i na stropě?*
- *Jak třít brčko, aby bylo dobře zelektrované a drželo?*
- *Jak dlouho brčko na stěně či jiném povrchu vydrží, aniž by odpadlo?*
- *Náročnější námět na zkoumání: Jak velkou sílu potřebujeme k odtržení brčka?*

Poznámky:

Pokus je pro řadu žáků překvapivý. I znalejší někdy překvapí, že brčko drží i na kovových (tedy vodivých) předmětech.

Na hladkém povrchu, např. na plastové tabuli či na okně, se může brčko „kutálet“ dolů. Pomůže dát ho svisle nebo (pokud má dané brčko vroubkovanou část), poněkud jej „zalomit“. Některé druhy tkanin (např. z umělých materiálů) nemusí být pro zelektrování brčka příliš vhodné. Z plastových brček vyhoví většina druhů, přesto je potřeba pokus s danými pomůckami předem vyzkoušet.

Navzdory obecnému přesvědčení není nutno pro nabití brčko zuřivě třít mnohokrát za sebou. Podstatný je dobrý kontakt brčka s látkou, kterou ho třeme.

Brčko dokáže na zdi držet překvapivě dlouho, někdy až řadu dnů.

Možné otázky a problémy k diskusi:

- a) Proč brčko drží na zdi (obecně: na izolantech)?
- b) Proč brčko drží na vodivém povrchu? (Proč se nevybije a neodpadne?)

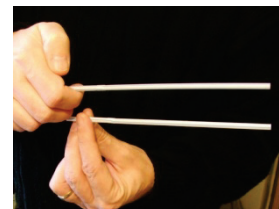
Tyto otázky ale zřejmě nemá cenu podrobně řešit v samotném úvodu do elektrostatiky, spíše se k nim vrátit, až bude probírána polarizace dielektrik či elektrostatická indukce.

### 3.1.2 Souhlasně nabitá brčka se odpuzují

Sílu můžeme dokonce cítit „na vlastní kůži“, přesněji řečeno vlastními prsty. Druhou možností je pokus, v němž síla elektrostatického odpuzování vyrovná tíhu brčka. Provedení pokusu:



- a) Třením nabitá brčka držíme tak, jak to ukazuje horní fotografie, a snažíme se je k sobě přiblížit.
- b) Nabitá brčka držíme v prstech vodorovně tak, aby byla nad sebou. Vrchní brčko držíme v prstech jen lehce, aby nesklouzlo do strany. Vidíme, že se prakticky „vznáší“, tedy že ho nadnáší odpuzivá síla od spodního brčka.



Co lze zkoumat:

- *Jak se mění síla mezi brčky, když je přibližujeme k sobě (v pokusu a))?*
- *V jaké výšce se „vznáší“ horní brčko nad spodním (v pokusu b))?* Změní se výška, když brčka zelektrujeme jen „nepořádně“, tedy slabě? Co když naopak místo spodního brčka dáme nabitá brčka dvě?

Poznámky:

V případě pokusu a) cítíme sílu v prstech výrazněji, protože brčka vlastně působí jako páka. Prsty držíme brčka na krátkém úseku, síla elektrostatického odpuzování působí i na „dlouhém rameni“.

Je třeba, aby si oba pokusy vyzkoušeli žáci sami, opravdu vlastníma rukama. Skutečnost, že cítí sílu v prstech (zejména, když se brčka snaží dostat blízko k sobě), je pro leckoho překvapivá, stejně tak „vznášení“ horního brčka.

V prvním pokusu lze diskutovat, že působení brček je vzájemné, tedy, že platí princip akce a reakce. (Sílu cítíme v prstech jedné i druhé ruky.)

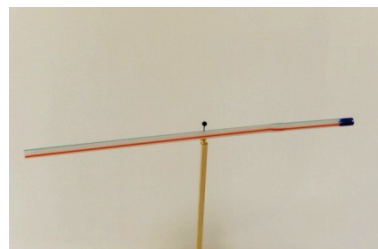
Otázky a problémy k diskusi:

- a) Jak na sebe brčka působí? Jaký zákon tu vlastně „cítíme vlastníma rukama“?
- b) Nešel by druhý pokus využít k odhadu, jak velký náboj je na brčku?

Na první otázku lze, jen smírnou nadsázkou, odpovědět, že zde vlastně „cítíme Coulombův zákon“. Druhý problém nás přivede k měření velikosti náboje – viz dále kap. 3.1.5.

### 3.1.3 Rozlišujeme kladný a záporný náboj (a víc o nabíjení třením)

K rozlišení polarit nábojů můžeme využít některého z velmi jednoduchých indikátorů přítomnosti náboje resp. elektrického pole, které jsou popsány v materiálech na přiloženém CD. Dobře vyhovuje plastové brčko, které se může otáčet kolem špendlíku zapíchnutého do špejle. (Pod brčko na špendlík navlékneme malý korálek, abychom snížili tření a brčko se mohlo volně otáčet.) Jeden konec brčka zeledrujeme třením.



K indikátoru přibližujeme předměty z různých materiálů, které jsme nabili třením. Brčko či plastová tyč zeledrovaný konec indikátoru odpuzují, skleněná tyč jej naopak přitahuje.

Co lze zkoumat:

- *Které materiály se třením nabíjejí stejně jako plastové brčko? A které stejně jako skleněná tyč? Může to záviset na látce, kterou materiál třeme?*
- *Jak je nabitý proužek izolepy, který jsme odvinuli z cívky, na níž byla izolepa navinuta?*
- *Když z některých plastových desek vyndáváme papíry, „lepí se“ na ně. Jak jsou nabitě desky a jak papíry?*

Poznámky:

Který náboj označíme za kladný a který za záporný, je věcí konvence. Historicky byl jeden z nábojů označen za kladný.

Plastové brčko nebo plastová tyč se při tření běžnou látkou nebo papírovým kapesníkem typicky nabíjejí záporně.

Příklad sloupávané izolepy nebo papírů, které ležely „přilepeny“ na plastových deskách ukazuje, že k zeledrování těles je není nutno třít; stačí, že se dotýkají svými povrchy a pak je oddělíme.

V této souvislosti lze diskutovat možné nabíjení materiálů, které se dotýkají nebo třou v různých průmyslových provozech s následnou možností vybití jiskrou s nebezpečím požáru nebo výbuchu. (Dokumenty a videa k tomuto tématu lze najít na webu, zadáme-li do vyhledávače například termín „*electrostatic hazard*“.)

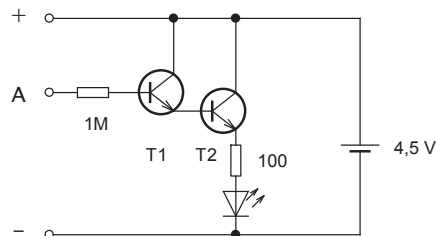
Otázky a problémy k diskusi:

- a) Poučte se v tabulkách nebo na internetu, co to je „triboelektrická řada“. Zkuste její pomocí předpovědět, nábojem jakého znaménka se nabije hřeben, když jím češeme suché vlasy. Potvrdí to pokus s indikátorem?
- b) Musíme pro zeledrování těles jejich povrch opravdu třít? Co je pro toto zeledrování podstatné?
- c) Kdy se vám v běžném životě stává, že „dostanete ránu“ statickou elektřinou?
- d) Nabitý konec brčka indikátoru se přitahuje i k naší ruce, pokud ji příliš přiblížíme, a to i když celkově nejsme nabiti kladně. Proč?

### 3.1.4 Kladné a záporné náboje – souvisí s póly na běžné baterii?

Rozlišit, který náboj je kladný a který záporný – ve smyslu toho, jak jsou označeny póly třeba na běžné ploché baterii – může indikátor s tranzistorem a svítivou diodou, který je blíže popsán na přiloženém CD a v příručce projektu věnované Polovodičům a jejich aplikacím.

Podstatné je, že LED v tomto indikátoru svítí, pokud do vstupní svorky (označené na schématu jako „A“) teče proud. Tedy pokud do ní, řečeno jinými slovy, tečou kladné náboje. (Ve skutečnosti to samozřejmě znamená, že záporné elektrony tečou opačným směrem, ale v tuto chvíli můžeme zůstat u fenomenologického popisu náboje.)



Indikátor reaguje nikoli na přítomnost náboje, ale na změny, tedy na přibližování nebo vzdalování náboje. A to ještě jen „jednosměrně“.

Přibližujeme-li ke svorce A záporně nabitě těleso, přitahuje kladné náboje z vodiče (spojeného se svorkou A, tedy i z báze tranzistoru) co nejbližší, tedy na povrch svorky A. (Ve skutečnosti se v kovovém vodiči samozřejmě pohybují záporně nabitě elektrony, viz poznámku níže). LED přitom nesvítí. Pokud záporně nabitě těleso vzdalujeme, přitahuje kladný náboj méně, ten tedy odtéká – a to do báze tranzistoru, takže LED svítí. (Alespoň chvíli, než náboj přestane téct.) Naopak pokud ke svorce A přibližujeme kladně nabitě těleso, to odpuzuje kladný náboj ze svorky A. Ten teče pryč, tedy do báze tranzistoru – a LED svítí. Při vzdalování kladně nabitého tělesa indikátor nereaguje.

Pro zvýšení citlivosti můžeme ke svorce A připojit vodič (kablík) dlouhý několik cm i více. Nesmí se ale dotýkat například uzemněné desky stolu.

Co lze zkoumat:

- *Jak reaguje indikátor, když ke svorce A přibližujeme a naopak od ní vzdalujeme zelektrovanou plastovou tyč nebo brčko? Jak reaguje, jde-li o skleněnou tyč?*
- *Co ovlivňuje reakci indikátoru? Na jak velkou vzdálenost dokáže reagovat?*
- *Jak indikátor reaguje, dotkneme-li se svorky A rukou a šoupeme podrážkou po podlaze? (Zejména na plastové podlaze.)*

Poznámky:

Pokus ukazuje, jak znaménko náboje na zelektrované plastové tyči souvisí s označením + a – pólů na baterii. Ukazuje také souvislost pohybu náboje a proudu.

Při diskusi pokusu je vhodné výrazně upozornit, že zde sice mluvíme o tom, jak „kladný náboj teče do báze“, ovšem v kovovém vodiči se uspořádaným pohybem pohybují pouze elektrony nesoucí záporný náboj. Je také vhodné zdůraznit žákům, že samotné pohyby nabitou tyčí nerozsvěcí LED: nepatrný proud do svorky A musí nejprve tranzistory mnohonásobně zesílit.

Další komentáře k indikátoru a pokusům s ním, včetně otázek do diskuse, jsou uvedeny v materiálech na přiloženém CD.

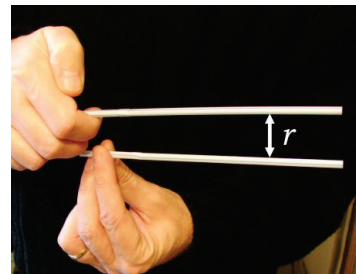


### 3.1.5 Jak velký je náboj na zeledrovaném brčku?

Náboj se měří v coulombech. Zkuste si položit otázku, jak velký náboj má zeledrované plastové brčko. Případně zkuste tuto otázku položit svým žákům. Odhady se obvykle značně liší. (Miliónkrát i víckrát!) Náboj je zkrátka jednou z veličin, o jejichž velikosti v praktických případech máme jen velmi malou představu. Pokus se dvěma brčky, popsány výše v bodě 3.1.2, umožní velikost náboje alespoň přibližně odhadnout. Provedení pokusu:

Dvě nabitá brčka držte vodorovně, horní brčko jen velmi volně. Tíha horního brčka je vyrovnána silou elektrostatického odpuzování.

Pomocí vah zjistíte hmotnost brčka; tím určíte jeho tíhu. Změřte vzdálenost mezi brčky. Náboje obou brček považujte za přibližně stejné. Z rovnosti tíhy a odpudivé síly vypočtete náboje brček.



Teoretický (přibližný) výpočet:

Elektrostatická síle mezi náboji je dána Coulombovým zákonem (2.1.1). Považujeme-li náboje za přibližně stejné (označíme je prostě jako  $Q$ ), je  $F = kQ^2 / r^2$ , kde  $k \doteq 10^{10} \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ . Tíha brčka je  $F_g = mg$ . Obě síly se rovnají, odtud  $Q = r \sqrt{\frac{mg}{k}}$ .

Jaké výsledky zhruba vycházejí:

Hmotnost brčka bývá asi 0,3 až 0,5 g. (Lze určit digitálními vahami.) Jeho tíha je tedy cca  $4 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ . Odmocnina z  $mg/k$  je tedy zhruba  $6 \cdot 10^{-7} \text{ C/m}$ , tedy 6 nC/cm. Pro brčka vzdálená několik cm tedy uvedeným hrubým odhadem vychází náboj brčka asi 10 až 20 nanocoulombů.

Pozor! Je třeba si uvědomit, že Coulombův zákon platí pro bodové náboje (resp. pro nabitě kuličky) a to naše brčka rozhodně nejsou! Výše uvedený výpočet je tedy jen hrubým odhadem. Přesnější výpočet ukazuje, že náš odhad skutečný náboj brčka podceňuje, a to až dvakrát (a pro malé vzdálenosti brček i více). Ale řádová hodnota odpovídá: brčko zeledrované třením má opravdu náboj o velikosti desítek nanocoulombů.

Poznámky:

Je vhodné předem nechat žáky diskutovat, zda náboje brček mohou být například 1 C. Stačí z Coulombova zákona vypočítat sílu mezi brčky, třeba vzdálenými 1 m, aby bylo zřejmé, že tak velké náboje na brčkách být nemohou. Vyloučit můžeme i náboje řádu mC – síla mezi brčky by stále odpovídala tíze jedné tuny.

Hmotnost brčka lze zjistit digitálními vahami; nemáme-li citlivé váhy, můžeme zvážit celý sáček brček.

Další komentáře k tomuto měření jsou uvedeny v materiálech na přiloženém CD.



## 3.2 Platí Coulombův zákon a lze ho ověřit ve škole?

Hlavním cílem této sady pokusů je demonstrovat vzájemné elektrické silové působení dvou těles. Podstata experimentů je poměrně jednoduchá. Jako model kulových vodičů použijeme ping-pongové míčky, jejichž povrch jsme nastříkali vodivou barvou. Právě tak je ale možné potřít je tuhou a vše funguje stejně. Pro uchopení míčku dobře poslouží přilepené brčko. Místo míčků můžeme rovněž použít i efektní skleněné vánoční ozdoby. Po nabití kuliček měříme velikost působící síly pomocí digitálních vah s citlivostí ideálně 1 mg.

Potřebnou aparaturu vidíme na obrázku 3.2.1.



Obr. 3.2.1. Aparatura ke zkoumání elektrických sil

*Pomůcky:*

Vysokonapěťový zdroj (případně indukční elektrika, van der Graaffův generátor, ...), ping-pongové míčky na stojánku, vodivá barva (tuha, ...), digitální váhy s rozlišovací schopností alespoň 0,01 g (lépe 0,001 g), pravítka, stativový materiál.

### 3.2.1 Elektrické odpuzování souhlasně nabitých těles

Celou sadu pokusů zahájíme důkazem, že dva elektrické náboje na sebe působí silou. Jednu kuličku na stojánku postavíme na váhy, druhou můžeme držet v ruce nebo umístit do stativu. Obě kuličky nabijeme dotykem stejné svorky indukční elektriky nebo výstupu VN zdroje. Při přiblížení kuliček (volnou kuličku přibližujeme svisle shora ke druhé na vahách) pozorujeme narůstající odpudivou elektrickou sílu – na vahách vidíme, že kulička, která na nich stojí, „těžkne“. Je totiž k váze přitlačována ještě odpudivou silou 2. kuličky.

Pozorujeme-li při přiblížení kuliček například přírůstek údaje na vahách o velikosti 0,010 g, pak je zřejmé, že kuličky se nyní navzájem odpuzují silou

$$(0,01 \cdot 10^{-3} \text{ kg}) \cdot g = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 98,1 \mu\text{N}.$$

Samozřejmě můžeme počítat i s přibližnou hodnotou  $g = 10 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Pro jistotu je studentům vhodné zdůraznit, že se zde rozhodně nemění hmotnost kuličky; váhy zde prostě využíváme jako siloměr.

Se studenty můžeme dále diskutovat velikost náboje na kuličkách, a jak tato závisí na velikosti (resp. kapacitě) kuliček a napětí zdroje, kterým kuličky nabíjíme.

### 3.2.2 Elektrické přitahování opačně nabitých těles, elektrostatická indukce

Stejným postupem lze předvést i přitahování opačně nabitých kuliček. Opačně nabité kuličky můžeme získat nabitím např. pomocí indukční elektriky. Kuličky se poté přitahují. Ta z nich, která je postavená na vahách, je nadlehčována a váhy ukazují menší hodnotu hmotnosti. Pokud váhy s kuličkou před začátkem pokusu vynulujeme, pak, při přiblížení opačně elektrované kuličky, váhy ukáží zápornou hodnotu.

Těžší problém nastane, pokud nemáme indukční elektriku, ale vlastníme pouze zdroj jednoho typu náboje, tj. např. VN zdroj s jednou svorkou. V takovém případě využijeme elektrostatické indukce. Postupujeme tak, že jednu kuličku nabijeme (např. kladně), druhou k ní přiblížíme a krátce se jí dotkneme uzemněným vodičem. Tím jsme na druhou kuličku přivedli záporný náboj ze země (resp. z uzemněného vodiče).

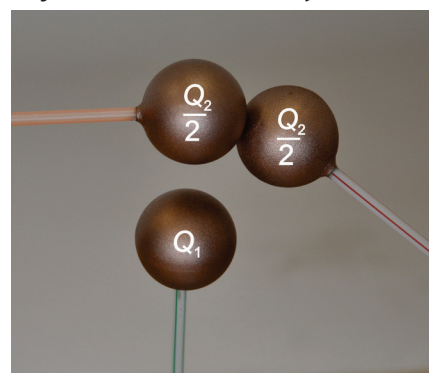
### 3.2.3 Vzájemné působení nabitého tělesa a vodiče

Podobně demonstrujeme i vzájemné přitahování nabitého tělesa a nenabitého vodiče (kovového předmětu, nenabité kuličky, ruky, ...). Na váhy opět postavíme kuličku na stojánku, kterou nabijeme. Při přiblížení vodiče pozorujeme úbytek hmotnosti na vahách, tělesa se přitahují.

Tento jev vysvětlíme opět pomocí elektrostatické indukce – na bližší straně vodiče se objevují opačné náboje (vůči náboji na kuličce na vahách) a tělesa se přitahují. Přesnější vysvětlení závisí na náboji první kuličky – rozmístění náboje vysvětlujeme z pohybu „volných“ nabitých částic (v kovu elektronů).

### 3.2.4 Ověření Coulombova zákona: závislost coulombické síly na velikosti náboje tělesa

Závislost síly působící mezi dvěma náboji na velikosti nábojů lze demonstrovat například tak, že opět sestavíme aparaturu podle obrázku 3.2.1, nabijeme obě kuličky a přiblížíme je – váhy detekují působící sílu. Pokud se jedné z kuliček dotkneme třetí volnou nenabitou kuličkou, pak se na nich náboj přerozdělí tak, že na každé z nich bude polovina (viz obrázek 3.2.2), působící síla tak klesne na polovinu. Toto dělení je reálně možné provést maximálně 3–4 krát, poté jsou již náboje tak malé, že jejich účinky váhy nedetekují.



Obr.3.2.2. Půlení elektrického náboje na kuličce

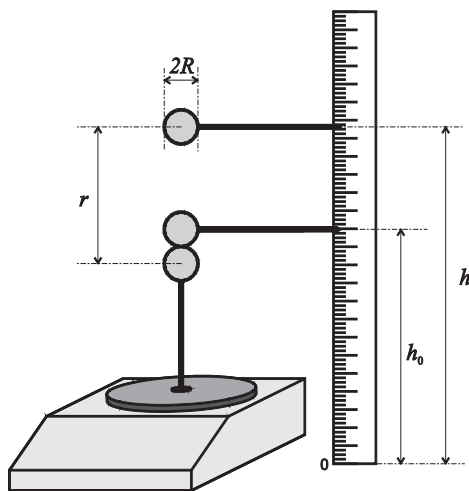
Pro provedení pokusu je nutné dávat si pozor, kde se kuličkami dotkneme. Je potřeba, aby kuličky, na nichž se náboj dělí, byly stejně vzdálené od třetí kuličky (viz obr 3.2.2) – náboj se tak rozdělí rovnoměrně. Druhou možností je provádět půlení náboje mimo dosah třetí kuličky.

Rovněž by bylo možné proměřovat závislost na velikosti náboje pečlivěji – opravdu měřit závislost síly na velikosti náboje, vynést graf, ... Pro takovéto měření ovšem potřebujeme více než tři nebo čtyři údaje. Musíme tak změnit způsob nabíjení kuliček. Nabíjet je můžeme například VN zdrojem – pokaždé s různě nastaveným výstupním napětím. Vždy po změření síly kuličky vybijeme dotykem uzemněného kabelu a opětovně nabijeme na jiný potenciál a opakujeme měření síly (resp. přírůstku hmotnosti, jíž je síla úměrná). Při tomto měření využíváme faktu, že náboj na kulovém vodiči je přímo úměrný jeho potenciálu  $\varphi$  podle vztahu  $Q = C \cdot \varphi$ , kde  $C = 4\pi\epsilon R$  je kapacita kulového vodiče o poloměru  $R$ .

### 3.2.5 Ověření Coulombova zákona: závislost coulombické síly na vzdálenosti těles

Použitím aparatury na obrázku 3.2.1 můžeme rovněž proměřit závislost elektrické síly působící mezi dvěma kulovými vodiči na vzdálenosti jejich středů. Pokus lze provést opět kvalitativně: nabité kuličky přibližujeme/oddalujeme ve svislém směru a pozorujeme průběh jejich vzájemného působení.

Měření však můžeme bez problémů provést i kvantitativně – k tomuto aparaturu doplníme o pravítko, kterým budeme měřit vzdálenost kuliček, případně o stativ, který sám obsahuje měřítko.



Obr. 3.2.3. Měření závislosti elektrické síly na vzdálenosti nabitých kuliček

Ve většině případů budeme vzdálenost měřit pomocí pravítka s rozlišením 1 mm (viz obr. 3.2.3). Zde doporučujeme neměřit přímo vzdálenost kuliček ( $r$ ), ale výšku stativu ( $h$ ), přičemž si před nebo po měření změříme výšku stativu při dotyku kuliček ( $h_0$ ). Vzdálenost středů ( $r$ ) pak i ze znalosti průměru ping-pongového míčku ( $2R \approx 4$  cm) dopočítáme.

Rozhodneme-li se měřit pokus kvantitativně, musíme si uvědomit, že Coulombův zákon nebude platit v takové formě (2.1.1), v jaké jej známe ze střední školy. Ten totiž platí pouze pro bodové

náboje. Náš pokus však obsahuje kulové vodiče s nenulovým průměrem, na nichž se navíc může náboj pohybovat. Při přiblížení takových kuliček se vlivem elektrických sil náboje na povrchu kuliček přerozdělí. Musíme proto očekávat, že výsledky v principu nemohou zcela přesně odpovídat očekávané nepřímé úměrnosti mezi silou a druhou mocninou vzdálenosti kuliček ( $F_e \sim r^{-2}$ ). Tyto nepřesnosti budou větší, budou-li kuličky větší a blíže. Proto jsme nuceni provést korekci a Coulombův zákon pro tuto situaci upravit. Je znám (viz [3]) vztah pro korekci Coulombova zákona ve výše popsaném případě. Násobící korekční faktor je nekonečnou řadou, v naší situaci však stačí použít první přiblížení (parametr  $a$  je poloměr kuličky):

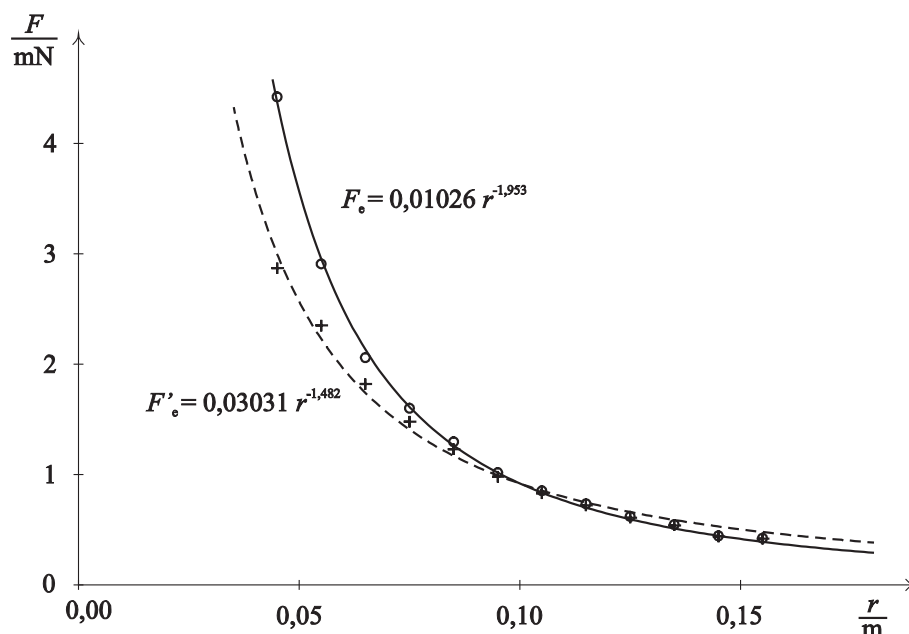
$$F'_e = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \left[ 1 - 4 \left( \frac{a}{r} \right)^3 \right]. \quad (3.2.1)$$

Díky složitosti funkce je tak pro ověření tohoto průběhu fitováním naměřených dat vhodné použít jiný program než MS Excel (např. Mathematica, Maple, Logger Pro, ...). Máme-li však k dispozici pouze Excel, můžeme provést úpravu a nevynášet do grafu skutečně měřenou sílu  $F'_e$  (viz rovnice 3.2.1), ale upravenou sílu  $F_e$

$$F_e = \frac{F'_e}{1 - 4 \left( \frac{a}{r} \right)^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}, \quad (3.2.2)$$

u které již očekáváme závislost na  $r^{-2}$ .

Následující graf ukazuje možné zpracování dat a rovněž ukazuje důležitost korekce.



Graf 3.2.1. Závislost elektrické síly na vzdálenosti kuliček. Vyneseno pro naměřenou sílu  $F'_e$ , i pro sílu s korekcí  $F_e$

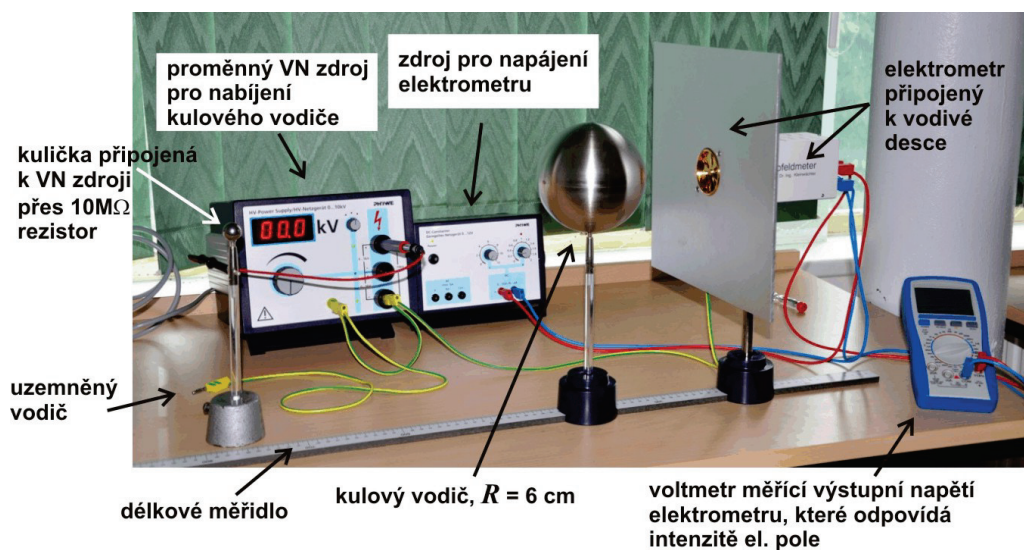
### 3.3 Pole nabité koule

Tato sada pokusů je zaměřena na proměrování elektrické intenzity a elektrického potenciálu v okolí sféricky symetrických vodičů. Tyto pokusy jsou náročnější na přístrojové vybavení. V rámci projektu si je mohli učitelé vyzkoušet během semináře. Pokusy jsou však k dispozici i studentům, a to v rámci tzv. Interaktivní fyzikální laboratoře (<http://kdf.mff.cuni.cz/ifl>) na MFF UK v Praze v Tróji, kam mohou se svými učiteli přijít.

#### 3.3.1 Intenzita elektrického pole v okolí nabitého kulového vodiče

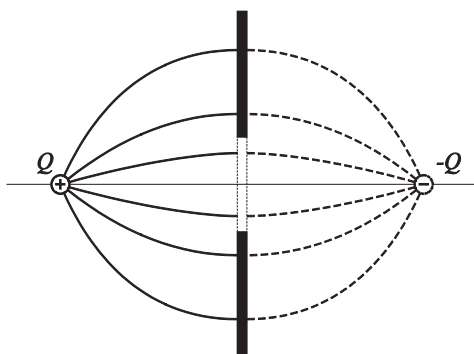
Kromě velikosti elektrické síly působící na tělesa v okolí nabitého kulového vodiče (viz předchozí podkapitola) můžeme rovněž proměřovat průběh elektrické intenzity. Z definice (2.1.3) intenzity elektrického pole plyne, že průběh intenzity kopíruje průběh elektrické síly a na vzdálenosti závisí stejně. První možností, jak průběh této veličiny zkoumat, je tedy využít výsledků experimentů z podkapitoly 3.2.

Závislosti velikosti intenzity na velikosti náboje na kouli (resp. potenciálu, na který je nabita) a na vzdálenosti od středu koule lze však měřit i přímo. Aparaturu pro tato měření a její zapojení vidíme na obrázku 3.3.1.



Obr. 3.3.1. Sestavená aparatura pro měření intenzity elektrického pole

Budeme-li měřit intenzitu, musíme si uvědomit, jakou hodnotu výsledku máme očekávat. Nabitá koule na fotografii výše totiž indukuje na vodivé desce elektrický náboj a ten ovlivňuje elektrickou intenzitu v místě měřidla. Tato situace se řeší tzv. metodou obrazů, kdy počítáme s tím, že výsledné elektrické pole v místě desky je vzniklé superpozicí elektrického pole našeho kulového vodiče a jeho obrazu, který je nabit opačně a je s původní koulí symetrický podle roviny desky (viz obrázek 3.3.2).



Obr. 3.3.2. Metoda obrazů.

V místě senzoru má tak pole dvojnásobnou intenzitu oproti intenzitě osamocené kulové vodiče.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{2Q}{r^2} \quad (3.3.1)$$

Pokud je kulový vodič nabit na potenciál  $\varphi_0$ , pak platí, že množství náboje na jeho povrchu odpovídá jeho kapacitě  $C = 4\pi\epsilon R$ , kde  $R$  je poloměr kulové plochy, podle vztahu

$$Q = C \cdot \varphi_0 = 4\pi\epsilon R \cdot \varphi_0 \quad (3.3.2)$$

Spojením rovnic (3.3.1) a (3.3.2) dostáváme výsledný vztah pro elektrickou intenzitu v závislosti na potenciálu vodiče, který v pokusu ověřujeme:

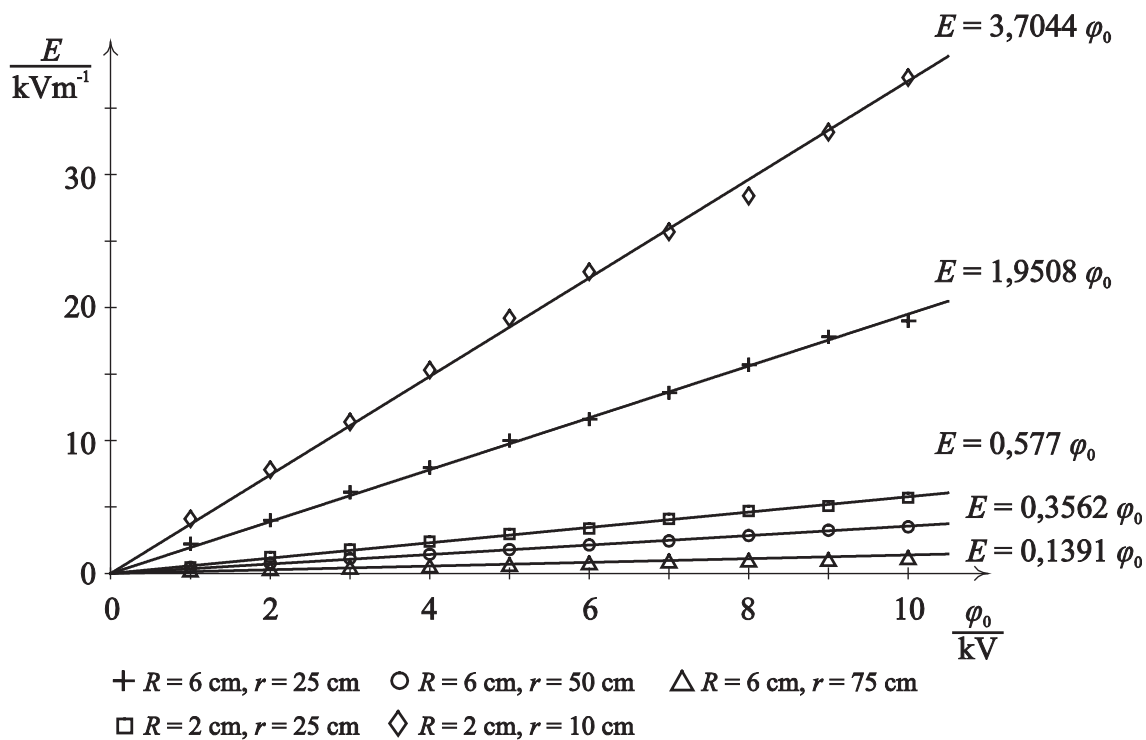
$$E = 2 \frac{R}{r^2} \cdot \varphi_0, \quad (3.3.3)$$

kde  $R$  je poloměr kulové plochy,  $r$  je vzdálenost od středu kulové plochy a  $\varphi_0$  je potenciál kulového vodiče.

#### *Závislost intenzity elektrického pole na náboji koule (potenciálu koule)*

Ptát se tedy na závislost elektrické intenzity na náboji a na potenciálu kulového vodiče se tak jeví jako dvě ekvivalentní otázky. V rámci úspory matematických operací tak budeme zjišťovat přímo závislost  $E(\varphi_0)$ . Graf 3.3.1 zachycuje měření pro dva kulové vodiče o poloměru  $R = 6$  cm a 2 cm. Měření byla provedena pro různé vzdálenosti ( $r$ ) měřidla a koule. Bylo postupováno v krocích, kdy byla koule vždy nabita dotykem vývodu VN zdroje na daný potenciál, změřena elektrická intenzita a koule poté vybita dotykem uzemněného vodiče. Celá procedura byla takto několikrát opakována pro různá napětí zdroje.



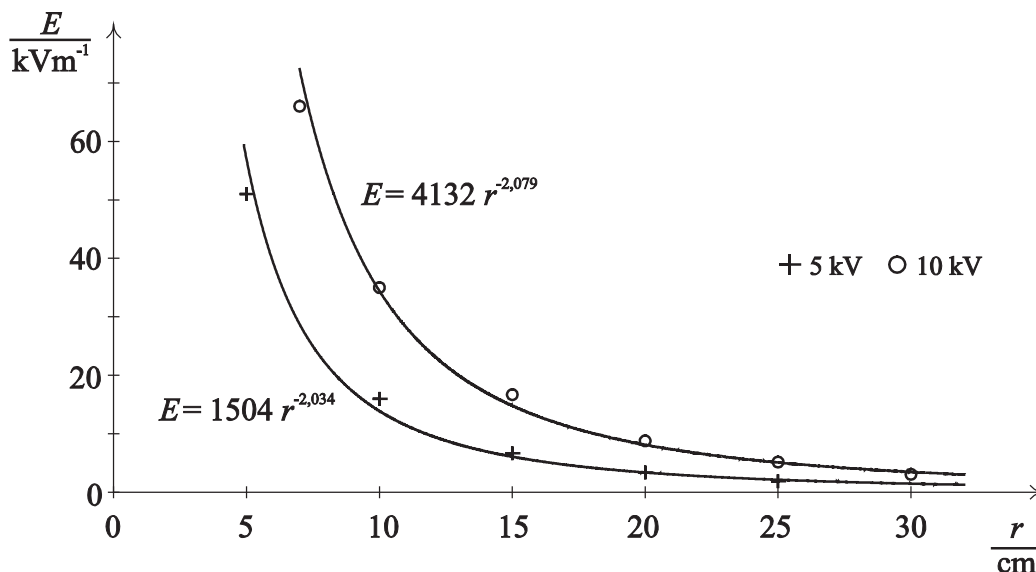


Graf 3.3.1. Závislost intenzity elektrického pole potenciálu koule

*Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti od středu kulového vodiče*

Obdobně měříme závislost elektrické intenzity v závislosti na vzdálenosti: uspořádání experimentu je stejné. Kouli nabijeme na určitý potenciál a poté ji vzdalujeme od desky, ve které je připevněn elektrometr.

V následujícím ukázkovém měření byl použit kulový vodič s poloměrem 6 cm, který na počátku jednou nabijeme na potenciál 5 kV, podruhé na 10 kV.



Graf 3.3.2. Závislost intenzity elektrického pole na vzdálenosti

### 3.3.2 Elektrický potenciál v okolí nabitého kulového vodiče

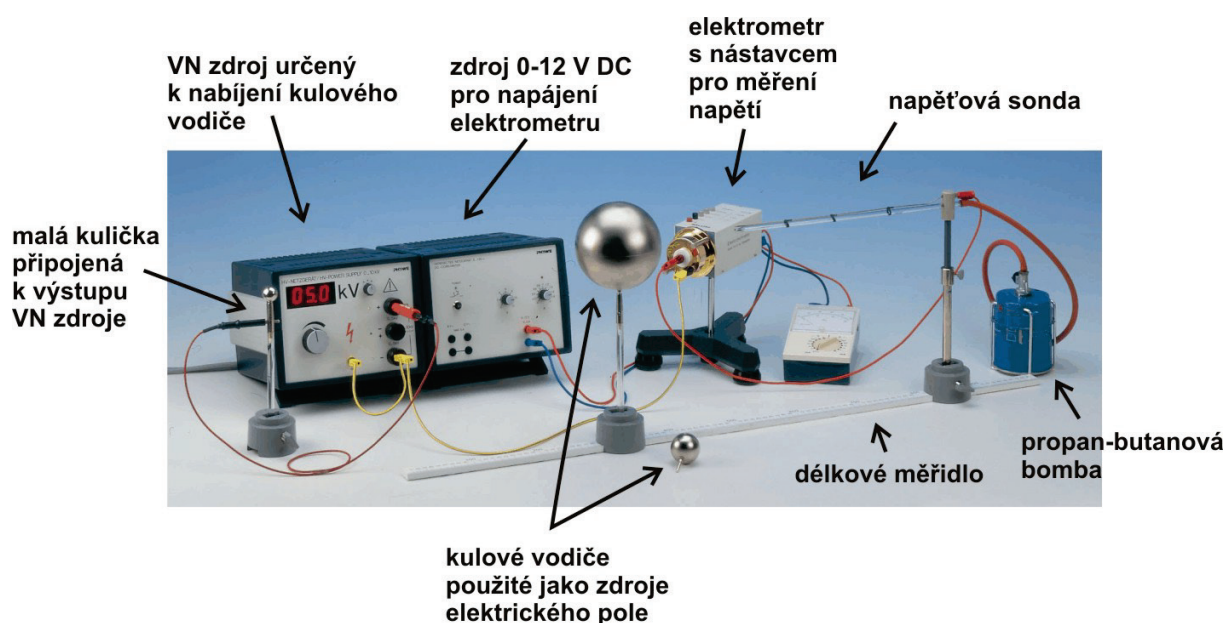
Teorie předpovídá, že elektrický potenciál  $\varphi$  v okolí kulového vodiče závisí na vzdálenosti  $r$  od středu kulové plochy podle vztahu (2.1.5). Kouli nabíjíme (stejně jako v části 3.3.1) přivedením na potenciál  $\varphi_0$ , dodáme jí tak náboj  $Q$ , jehož velikost je dána vztahem (3.3.2). Spojením rovnic (2.1.5) a (3.3.2) získáváme vztah pro výpočet potenciálu ve vzdálenosti  $r$  od koule o poloměru  $R$ , jež je proti zemi na potenciálu  $\varphi_0$

$$\varphi = \frac{R}{r} \cdot \varphi_0, \quad (3.3.4)$$

Pozn.: Při měření budeme přímo určovat veličiny  $\varphi$ ,  $\varphi_0$ ,  $r$ ,  $R$ . Pro ověření závislosti  $\varphi(r)$  a  $\varphi(\varphi_0)$  tak můžeme používat vztah (3.3.4). Pokud však uznáme, že použití náboje  $Q$  jako veličiny je názornější, můžeme vždy pro konkrétní potenciál  $\varphi_0$  určit (podle rovnice (3.3.2)) i náboj  $Q$  a údaje použít pro ověření vztahu (2.1.5).

*Aparatura, typy a komentáře k postupu měření*

Pro měření používáme uspořádání na obrázku 3.3.3.



Obr. 3.3.3. Sestavená aparatura pro měření potenciálu elektrického pole

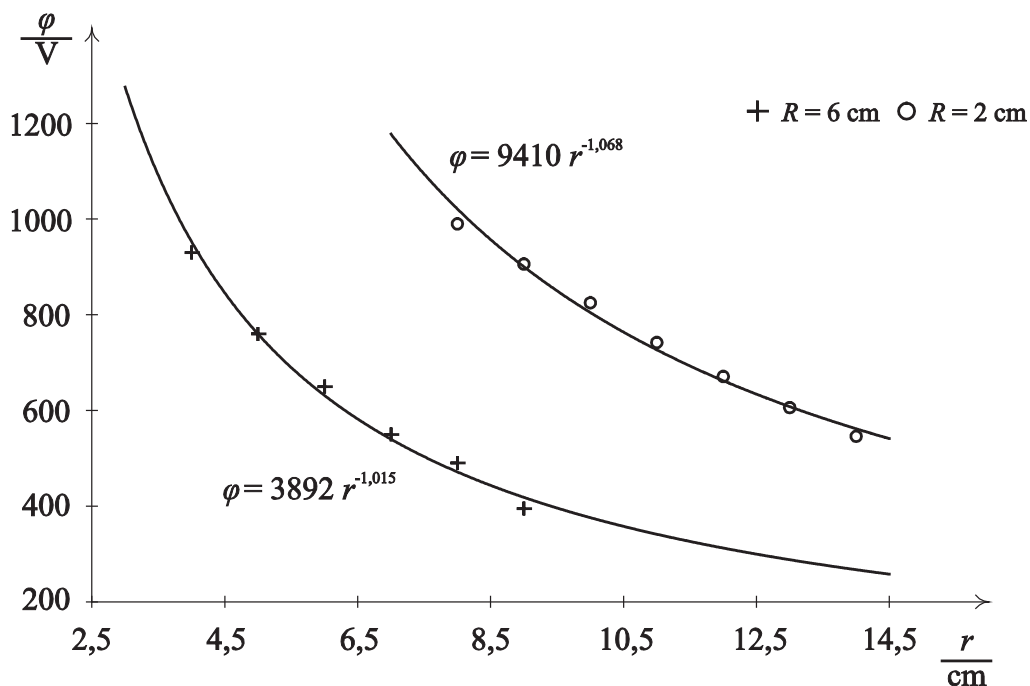
Napěťová sonda je připojena k elektrometru, který nyní pracuje v režimu „napětí“ a jehož výstupní napětí (0–10 V) odpovídá podle zvoleného rozsahu 10 V, 100 V a 1000 V napětí mezi koncem napěťové sondy a zemí.

Napěťová sonda představuje drát, který je ukončen hrotem. Tento hrot je nutné, pro správné fungování sondy, udržovat v plameni cca 5 mm vysokém – tím zabezpečíme dostatek elektricky nabitých částic v okolí hrotu.



Při určování závislosti  $\varphi(r)$  potenciálu na vzdálenosti od zdroje ponecháváme konstantní napětí VN zdroje a měníme vzdálenost koule od hrotu sondy<sup>2</sup>. Ukázkové měření (graf 3.3.3) bylo provedeno pro koule o poloměru 2 a 6 cm, jejichž potenciál proti zemi byl 1 kV.

Při určování závislosti  $\varphi(\varphi_0)$  potenciálu v okolí koule na potenciálu koule ponecháváme konstantní vzdálenost koule a sondy a měníme velikost napětí na VN zdroji, kterým nabíjíme kouli.



Graf 3.3.3. Závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti  $\varphi(r)$

Pozn.: Pohledem na graf 3.3.3 výše nás jistě napadne, proč experimentátor nepokračoval v měření i na delších vzdálenostech. Ukázalo se však, že při větších vzdálenostech výsledek není dobrý (neodpovídá hledané závislosti), což však je způsobeno především ovlivněním okolními tělesy – především samotným experimentátorem v blízkosti pokusu.

<sup>2</sup> Sondy nastavíme tak, aby při dotyku koule mířila do jejího středu.

### 3.4 Náboj, kapacita, napětí a proud

Cílem níže uvedených pokusů je, aby se žáci prakticky seznámili s pojmem kapacita a „objevili“, případně si prakticky kvalitativně i kvantitativně ověřili souvislost náboje, napětí a kapacity. Dále by měli získat alespoň přibližnou představu o velikostech nábojů a napětí, s nimiž se mohou setkat kolem sebe – tedy na něž se předměty kolem nás mohou nabít díky tření.

Některé experimenty vyžadují jen velmi jednoduché pomůcky: Plechovky (alespoň dvou různých velikostí), izolační podložka (polystyrén), kus drátu, plastová tyč, hadřík, alobal, plastové kelímky; zářivka nebo doutnavka.

Nepatrně náročnější pomůcky: Kondenzátory (0,1  $\mu\text{F}$  a 10  $\mu\text{F}$ , v provedení označeném jako „fóliové“, dále elektrolytické 47  $\mu\text{F}$  a 470  $\mu\text{F}$ ; lze nahradit i jinými hodnotami), multimetr.

Pro kvantitativní měření potřebujeme: Školní zdroj vysokého napětí (např. 10 kV nebo regulovatelný). Měřič náboje.

#### 3.4.1 Nejjednodušší kvalitativní pokus

V tomto pokusu jednoduše zjistíme, že vodivá tělesa na stejném potenciálu (tj. stejném napětí proti zemi) na sobě mohou mít různě velký náboj. Opravdu je tomu tak: Větší těleso pojme větší náboj.

Odtud už je jen krok k tomu, říci, že větší těleso má větší **kapacitu** pojmout elektrický náboj.



Provedení pokusu:

Různě velké plechovky postavte na izolační podložky (např. z polystyrénu), spojte je vodičem a nabijte plastovou tyčí. Pak vodič odstraňte (tak, abyste plechovky nevybili). Dotkněte se nejprve malé plechovky, pak velké. Velká dává citelně větší „ránu“.

Plechovek se také můžeme dotýkat zářivkou nebo doutnavkou a porovnávat intenzitu bliknutí.

Co lze zkoumat:

- *Velikost „rány“, kterou ucítíme v závislosti na velikosti plechovky.*
- *Hlasitost jiskry, která přeskochí.*
- *Intenzitu, s jakou blikne doutnavka či zářivka, kterou se postupně dotkneme jednotlivých plechovek.*
- *Máme-li měřič náboje, můžeme měřit náboj na jednotlivých plechovkách.*

Poznámka:

Odhadovat velikost náboje „ranou“, kterou dostaneme, se může zdát nespolehlivé a primitivní, ale ve skutečnosti právě tento způsob používal při svých pokusech v osmnáctém století Henry Cavendish a dokonce tak jako první již dlouho před Ohmem objevil Ohmův zákon. Další poznámky a otázky k pokusu jsou uvedeny v materiálech na přiloženém CD.

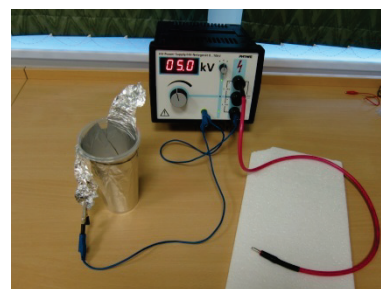
### 3.4.2 Jak „uskladnit“ co nejvíc náboje: kondenzátor

Mohli bychom při stejném napětí „uskladnit“ víc náboje? Můžeme vzít větší plechovku – ale kde vzít třeba třímetrovou? Lepší je vyrobit si **kondenzátor**. Stačí dva kusy alobalu na vnějším a vnitřním povrchu plastového kelímku. (Je vhodné použít dva plastové kelímky, jeden vylepit alobalem zevnitř, druhý polepit zvenku. Vsouváním dalších kelímků lze zvětšovat vzdálenost elektrod.)



Pro následující pokus spojte vnější elektrodu kondenzátoru s uzemněním (lze použít kolík zásuvky). Varianty provedení pokusu:

- 1) Kondenzátor použijeme místo jedné z plechovek v pokusu z bodu 3.4.1. Vnitřní elektrodu kondenzátoru tedy spojíme drátem s plechovkou na izolační podložce, nabijeme plastovou tyčí, odstraníme vodivé spojení a sáhneme na plechovku a pak na elektrodu kondenzátoru. Kondenzátor dá výrazně větší „ránu“ než plechovka.
- 2) Kondenzátor nabijeme ze zdroje vysokého napětí např. na 5 nebo 10 kV. Kondenzátor vybijeme vodičem spojeným se zemí, tedy s druhým pólem kondenzátoru. Všimneme si výrazné jiskry. Pokud bychom místo kondenzátoru použili jen plechovku, je jiskra mnohem slabší. Pozor! Vybíjet kondenzátor dotykem ruky by mohl být v závislosti na kapacitě a napětí zážitek spíše pro „tvrdší povahy“.



Co lze zkoumat:

- Velikost „rány“, záblesku zářivky apod. v porovnání s podobně velkou plechovkou.
- S VN zdrojem: Závislost náboje (rány, záblesku atd.) na vzdálenosti mezi stěnami plechovky a ploše stěn. Závislost náboje na napětí.

Pro označení, jak je které zařízení „schopnější uskladnit“ náboj, je zde už přirozeně vhodné používat pojem **kapacita**.

Poznámka k bezpečnosti práce s vysokým napětím:

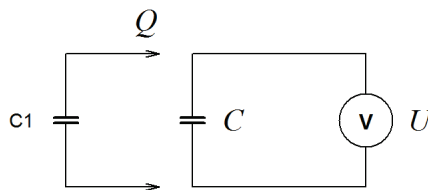
Školní zdroj vysokého napětí dává malý proud, takže jeho užití není nebezpečné. Přesto je vhodné pracovat s ním opatrně, nesáhnout si například rukama na oba jeho vývody současně. Pokud vysokým napětím nabijeme kondenzátor resp. leydenskou láhev, je na místě opatrnost, protože i když by ještě šok z vlastního dotyku nebyl nebezpečný, mohlo by dojít ke zranění vinou úleku, prudkého pohybu apod. Zároveň zde platí to již výše uvedené upozornění: Tyto pokusy nesmějí provádět osoby se srdeční vadou nebo kardiostimulátorem.

Další komentáře a problémy k diskusi jsou v materiálech na přiloženém CD.

### 3.4.3 Hrátky s kondenzátory: jak s nábojem roste napětí

V tomto pokusu fakticky „objevíme“ přímou úměrnost mezi nábojem a napětím na kondenzátoru, tedy vlastně vztah  $Q = C \cdot U$ .

Do kondenzátoru  $C$  o kapacitě  $10 \mu\text{F}$  budeme opakovaně přivádět stejný náboj  $Q$ . Měření napětí na kondenzátoru ukáže, že napětí roste přibližně o stále stejnou hodnotu.



Jak dodávat stále stejný náboj? Využijeme druhý kondenzátor,  $C_1$ , o kapacitě  $0,1 \mu\text{F}$ , který vždy nabijeme z baterie  $9 \text{ V}$  (nebo z ploché baterie  $4,5 \text{ V}$ ). Aniž bychom museli předem znát vztah mezi kapacitou, nábojem a napětím, je jasné, že stejný kondenzátor se ve stejných podmínkách, tedy stejným napětím nabije vždy na stejný náboj. Ten se pak prakticky celý vybijí do kondenzátoru  $C$ .

Co budeme zkoumat:

- *Jak roste napětí  $U$  na kondenzátoru  $C$  v závislosti na tom, kolikrát jsme do něj vybili menší kondenzátor  $C_1$ ?*

Co z pokusu plyne:

Menší kondenzátor ( $C_1$ ) připojením k baterii nabijeme vždy stejným nábojem  $Q$ . Po opakovaném vybití do  $C$  je tedy na kondenzátoru  $C$  postupně náboj  $Q, 2Q, 3Q, \dots$ . Napětí také postupně roste – také je větší asi dvakrát, třikrát, ... Náboj a napětí na kondenzátoru tedy jsou vzájemně úměrné,  $Q \sim U$ . A protože, jak víme z předchozích pokusů, při stejném napětí náboj roste s kapacitou  $C$ , přirozeně dospíváme ke vztahu  $Q = C \cdot U$ .

Poznámky k provedení pokusu:

Kondenzátor  $C$  před pokusem vybijeme, tj. krátce zkratujeme jeho vývody.

Opakované vybití  $C_1$  do  $C$  je třeba dělat dost rychle. Kondenzátor  $C$  se totiž vybíjí proudem do voltmetru a napětí na něm proto s časem klesá. Naštěstí jen pomalu: běžné multimetry mají vnitřní odpor  $10 \text{ M}\Omega$  a výpočtem lze určit, že za  $1 \text{ s}$  se napětí v tomto případě zmenší asi o  $1 \%$ . Pokud náboj  $Q$  dodáváme např. každé  $2$  až  $3 \text{ s}$ , nejsou chyby příliš významné.

Pozor, abychom kondenzátor  $C_1$  nechtěně nevybíjeli tím, že se prsty dotýkáme obou jeho vývodů. ( $C_1$  nemá příliš velkou kapacitu a proud procházející našimi prsty by mohl odvést dost náboje.) Je vhodné kondenzátor i s částí vývodů přelepit např. kouskem izolepy.

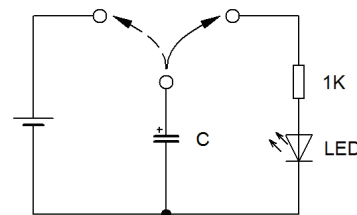
Kondenzátor  $C$  musí být tzv. fóliový, nikoli elektrolytický. Chemické děje v elektrolytickém kondenzátoru totiž mohou zapříčinit, že po vybití původně nabitého kondenzátoru na něm nezůstane nulové napětí, ale začne pozvolna stoupat, což by rušilo pokus a činilo ho nevěrohodným.

S rostoucím počtem vybití kondenzátoru  $C_1$  do kondenzátoru  $C$  samozřejmě přestane být napětí na  $C$  úměrné počtu přenosů náboje. Jakmile je totiž na  $C$  nezanedbatelné napětí, nevybijí se do něj celý náboj  $Q$  z kondenzátoru  $C_1$ . To, že přírůstky napětí nemohou být stále stejné, je zřejmé i z názorné úvahy: výsledné napětí po libovolně mnoha krocích nemůže být vyšší než napětí baterie, z níž nabíjíme  $C_1$ .

### 3.4.4 Nabitým kondenzátorem rozsvítíme LED

Náboj z kondenzátoru se nemusí vybit jen jiskrou nebo dotykem přes naše tělo. Můžeme jej nechat téci svítivou diodou (LED). Protékající proud „LEDku“ alespoň krátce rozsvítí.

Pokus ukáže, alespoň kvalitativně, jak náboj souvisí s proudem. Budeme pro něj ovšem potřebovat kondenzátory o výrazně větší kapacitě. Vyhoví elektrolytické kondenzátory o kapacitách např.  $47\ \mu\text{F}$  a  $470\ \mu\text{F}$ . (Lze použít i jiné kapacity např.  $100\ \mu\text{F}$  a  $1000\ \mu\text{F}$ ; je vhodné, když se kapacity kondenzátorů dost odlišují.)



Kondenzátor nabijeme z baterie 4,5 V nebo 9 V a připojíme k LED se sériově zapojeným rezistorem, jak to ukazuje schéma. V zapojení by šlo použít i přepínač, ale jednodušší je vodič spojený s kondenzátorem připojit krátce k baterii a pak k LED s rezistorem. V zapojení je potřeba dát pozor na polaritu elektrolytického kondenzátoru. Na jeho obalu bývá vyznačen záporný pól.

Co lze zkoumat:

- *Délku bliknutí LED v závislosti na kapacitě kondenzátoru.*

Z předchozích pokusů víme, že při stejném napětí je na kondenzátoru s větší kapacitou větší náboj. Nyní vidíme, že s větším kondenzátorem LED svítí déle.

Závěry, které můžeme udělat z daného pozorování:

- LED svítí, když jí prochází elektrický proud. Z kondenzátoru tedy do LED tekla proud. Jinými slovy, tok náboje znamená proud.
- Při vybíjení většího náboje (z většího kondenzátoru) tekla proud déle.

Alespoň kvalitativně tedy dospíváme k představě typu „náboj = proud krát čas“.

Poznámka:

Pro vážnější zájemce by už z takto jednoduchého pokusu bylo možno vztah mezi nábojem, proudem a časem vyvozovat i polokvantitativně. Vyžadovalo by to ovšem znalost Ohmova zákona. Z rozdílu napětí na kondenzátoru a na LED určíme proud rezistorem  $1\ \text{k}\Omega$  (ten je řádu miliampér), z napětí a kapacity kondenzátoru určíme náboj (pro  $C = 470\ \mu\text{F}$  a napětí 5 až 9 V je to několik milicoulombů). LED v pokusu svítí zhruba sekundu, v souladu se vztahem  $Q = I \cdot t$ . Samozřejmě, ve skutečnosti proud s časem klesá, ale odvozovat příslušnou exponenciální závislost a časovou konstantu by už byla záležitost do semináře pro pokročilé studenty.

Poznámka k aplikacím:

I když technologie „uskladnění náboje“ je jiná, stojí za to uvědomit si, že údaj o „kapacitě baterií“ a akumulátorů (třeba 2000 mAh) vlastně také určuje množství náboje, které může baterie připojeným obvodem či spotřebičem „prohnat“.

### 3.4.5 Jakou má co kapacitu

Jakou kapacitu má malá plechovka? Jakou velká? Jakou kondenzátor, který jsme sestrojili v části 3.4.2? A jakou kapacitu má člověk?

Známe-li náboj a napětí, můžeme kapacitu vypočítat. (Z již výše uvedeného vztahu  $Q = C \cdot U$  je jasné, že  $C = \frac{Q}{U}$ .) Pro pokusy je nutný školní zdroj vysokého napětí a měřič náboje.



Provedení pokusu:

Nabijte různé vodivé předměty ze školního zdroje vysokého napětí, např. na 5 nebo 10 kV. Po odpojení od zdroje změřte jejich náboj. Z těchto údajů vypočtete kapacitu  $C$ .

Co lze zkoumat:

- *Jaká je kapacita různě velkých plechovek? (Plechovky musí stát na izolační podložce.)*
- *Jaká je kapacita člověka stojícího na izolační podložce? Závisí na velikosti člověka?*
- *Jaká je kapacita kondenzátoru sestaveného z kelímků a alobalu? Jaká je kapacita leydenské lahve?*

Poznámky:

Jeden pól zdroje vysokého napětí je třeba uzemnit. Uzemnit je třeba také příslušnou svorku měřiče náboje. Náboj je třeba měřit opravdu až po odpojení plechovky, člověka apod. od zdroje! Jinak by do měřiče náboje tekla stále proud ze zdroje a údaj měřiče by stále rostl.

Je vhodné, jestliže jeden člověk nabíjí plechovku apod. ze zdroje a jiný člověk pak provede měření náboje. Vodič připojený k měřiči náboje je vhodné držet kusem izolantu. (Dobrym izolantem je plastové brčko.) Těsně před měřením je třeba měřič náboje vynulovat.

Při měření kapacit kondenzátoru z kelímků či leydenské lahve je vhodné volit nižší napětí, např. 1 kV, aby náboj nebyl příliš velký a nebyl mimo rozsah měřiče náboje.

Jaké výsledky lze očekávat:

U vodivých předmětů obecně jednotky až desítky pikofaradů. Malá plechovka např. 5 až 10 pF, velká např. 20 až 30 pF. Kapacita člověka na izolační podložce bývá okolo 100 pF. Kondenzátor z kelímků může mít i 250 pF, leydenské lahve třeba z indukční elektriky ještě více, například až 1000 pF i víc.

Tyto hodnoty souvisí s teoretickým vztahem  $C = 4\pi\epsilon_0 R$  pro kapacitu vodivé koule poloměru  $R$  v prázdném prostoru. Odtud vychází, že koule o poloměru 1 cm má kapacitu asi 1 pF (přesněji asi 1,1 pF). Ve starých knihách bývala někdy kapacita kondenzátorů udávána v cm. Člověk sice není koule o poloměru 100 cm, takže kdyby byl v prázdném prostoru, měl by kapacitu nižší než 100 pF, ale přítomnost blízkých předmětů, podlahy apod. kapacitu zase zvyšuje.



### 3.5 Deskový kondenzátor a jak v něm měřit pole

Cílem následujících aktivit je, aby se žáci prakticky seznámili s kondenzátorem a jeho vlastnostmi. Dále by měli získat představu, jak spolu souvisí kapacita kondenzátoru a jeho rozměry.

Na vyšší úrovni je cílem, aby žáci získali povědomost o průběhu intenzity a potenciálu uvnitř kondenzátoru.

*Pomůcky:*

Základní experiment (3.5.1) vyžaduje následující pomůcky:

Hliníková fólie (alobal), silnější kniha formátu alespoň A4 (cca 300 stran a více), multimetr s možností měřit kapacitu, pravítko, posuvné měřítko, různé deskové materiály (sklo, dřevo, různé druhy papíru, eurofolie, látka, guma, ...), špejle.

Další pomůcky využitelné zejména v kvantitativních experimentech (3.5.2):

Hliníkové desky, elektrometr, potenciálová sonda, zdroj 0–600 V, zdroj 12 V, digitální multimetry, stativový materiál, butanový hořák.

#### 3.5.1. Jednoduchý deskový kondenzátor

*Sestavení a měření kapacity*

Zkuste si vyrobit vlastní kondenzátor. Pro základní představu a prozkoumání jeho vlastností nám poslouží velmi jednoduché uspořádání. Do silnější knížky (cca 300 stran) vložíme dvě kovové fólie (např. alobal). Tyto fólie tvoří desky kondenzátoru, papír je dielektrikem (izolantem). Typické velikosti kapacity takového kondenzátoru jsou v řádech stovek pikofarad.

Kapacitu budeme měřit pomocí multimetru s možností měření kapacity, jehož svorky připojíme k jednotlivým fóliím.



Obr. 3.5.1. Pomůcky pro sestavení jednoduchého kondenzátoru

Poznámka: Je potřeba dát si pozor na některé levnější multimetry (i ty však dostačují), které i při nepřipojeném kondenzátoru ukazují nějakou nenulovou hodnotu kapacity. Většinou však mají tlačítko pro nastavení nulové hodnoty, kterého v takovém případě využijeme. Není-li tomu tak, musíme za kapacitu měřeného kondenzátoru brát přírůstek toho, co nám ukazuje multimetr oproti údaji bez připojení k fóliím.

*Co lze zkoumat*

Pomocí výše zmíněného výrobku můžeme zkoumat vztah pro kapacitu kondenzátoru v závislosti na jeho parametrech. Z teorie (rovnice (2.1.8)) víme, jak kapacita závisí na elektrické permitivitě mezi deskami, účinné ploše desek kondenzátoru a vzdálenosti desek. Tyto závislosti můžeme postupně ověřovat.

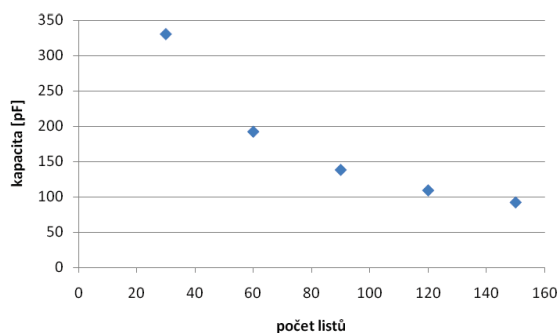
### Závislost kapacity deskového kondenzátoru na vzdálenosti jeho desek

Chceme-li pouze naznačit (jednoduše demonstrovat) nepřímou úměru mezi kapacitou a vzdáleností desek, stačí knihu zmáčknout, a tak vzdálenost zmenšit. Na multimetru pozorujeme zvýšení kapacity kondenzátoru.

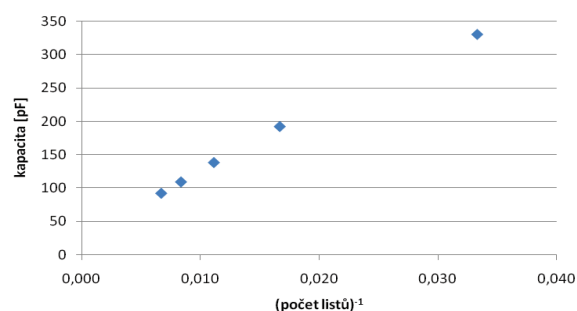
Přesněji můžeme závislost demonstrovat vkládáním různého počtu papírů mezi fólie. Postupně zaznamenáme do tabulky (např. tabulka 3.5.1) hodnoty kapacity a počtu listů, tyto poté rovněž vyneseme do grafu. Z něj je již závislost jasně patrná. Chceme-li být přesnější, můžeme naměřenými daty proložit křivku, která bude velmi dobře odpovídat grafu nepřímé úměrnosti.

**Tab. 3.5.1. Určení kapacity kondenzátoru při různém počtu listů mezi jeho deskami**

počet listů	(počet listů) <sup>-1</sup>	Kapacita (pF)
30	0,033	330
60	0,017	192
90	0,011	138
120	0,008	109
150	0,007	92



**Graf 3.5.1. Závislost kapacity kondenzátoru na počtu listů mezi deskami**



**Graf 3.5.2. Závislost kapacity kondenzátoru na (počtu listů)<sup>-1</sup> mezi deskami**

Měření můžeme lépe kvantifikovat, budeme-li vzdálenost desek určovat ne v počtech listů, ale v milimetrech pomocí posuvného měřítka.

### Závislost kapacity deskového kondenzátoru na velikosti desek kondenzátoru

Závislost budeme samozřejmě demonstrovat změnou velikosti fólií. Tuto změnu můžeme zařídit dvěma způsoby. Jednak lze měnit velikost obou fólií zároveň, či pouze jedné z nich.

Při určování závislosti je možné udávat velikost fólií buď v dílech původní velikosti, nebo ji kvantifikujeme v cm<sup>2</sup>.

Se studenty diskutujeme pojem tzv. účinné plochy desek kondenzátoru, kterou můžeme rovněž měnit vzájemným posouváním fólií a tím zmenšováním/zvětšováním účinné plochy.



### *Závislost kapacity deskového kondenzátoru na elektrických vlastnostech izolantu mezi deskami*

Tuto závislost demonstrujeme tak, že si přichystáme různé materiály (sklo, dřevotříska, papír, eurofólie, látka, guma, ...), z nichž vytvoříme plochy o stejné tloušťce. Na ně poté připevníme fólie a porovnááme naměřenou kapacitu. Fólie je nutno k dielektriku dostatečně přitlačit.

Pokud změříme parametry kondenzátoru ( $S$ ,  $d$ ), pak je možné určit i velikost permitivity použitých dielektrik, která je pro nás jinak těžko měřitelná.

#### *Poznámky*

Zmíněné pokusy lze použít jako demonstrační, ale rovněž pro samostatnou práci studentů v hodině.

Rovněž můžeme postupovat opačně – nemusíme ověřovat vztah, který „spadne“ z nebe, ale naopak jej můžeme z našich pokusů vyvodit.

### **3.5.2 Elektrické pole deskového kondenzátoru**

Nepříliš obvyklým pokusem na střední škole je měření intenzity elektrického pole kondenzátoru a obzvláště měření potenciálu elektrického pole uvnitř kondenzátoru. Tyto pokusy jsou totiž náročnější na přístrojové vybavení. V rámci projektu si je mohli učitelé vyzkoušet během semináře. Pokusy jsou však k dispozici i studentům, a to v rámci tzv. Interaktivní fyzikální laboratoře (<http://kdf.mff.cuni.cz/ifl>) na MFF UK v Praze v Tróji, kam mohou se svými učiteli přijít.

#### *Sestavení pokusu*

Aparatura se skládá z deskového kondenzátoru, který je připojen ke stejnosměrnému zdroji (0–300 V). Dále budeme potřebovat sondu intenzity elektrického pole a její rozšíření pro měření elektrického potenciálu uvnitř kondenzátoru. Zapojení se liší podle toho, co chceme měřit – fotografie jednotlivých zapojení jsou připojeny k popisu daných pokusů.

#### *Co lze zkoumat*

V případě dvou opačně nabitých rovnoběžných desek platí, že mezi deskami nalezneme homogenní elektrické pole s intenzitou (viz rovnice (2.1.6))

$$E = \frac{U}{d} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d}, \quad (3.5.1)$$

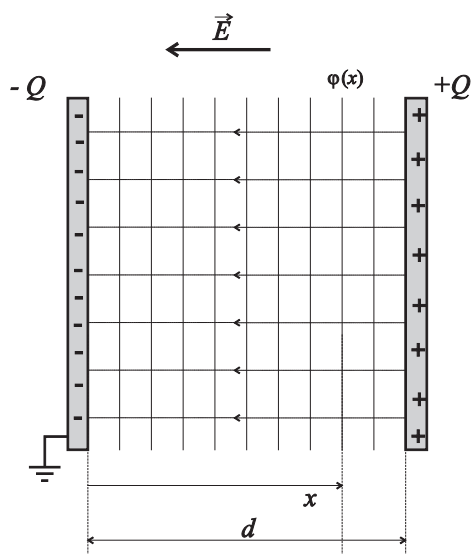
kde  $U$  je napětí (resp. rozdíl potenciálů  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ ) mezi deskami a  $d$  jejich vzdálenost.

V dané situaci rovněž platí, že potenciál ve vzdálenosti  $x$  např. od desky s potenciálem  $\varphi_1$  je

$$\varphi = \varphi_1 + \frac{U}{d}x. \quad (3.5.2)$$

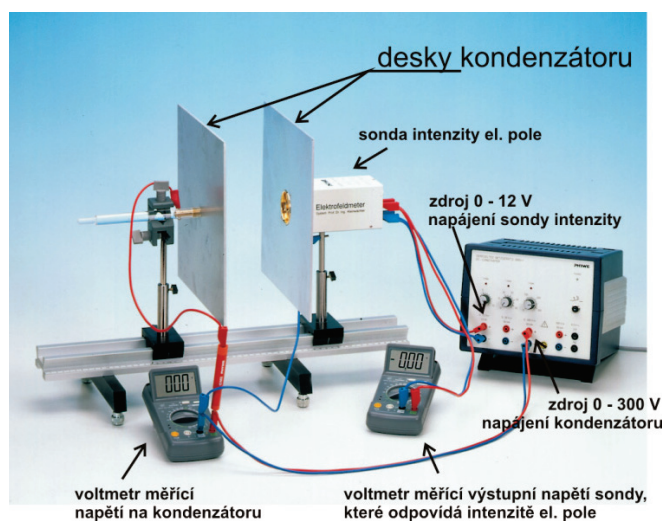
V případě, že je první deska uzemněná, pak je  $\varphi_1 = 0$  V a vztah (3.5.2) se zjednoduší na

$$\varphi = \frac{U}{d} x. \quad (3.5.3)$$



Obr. 3.5.2. Pole deskového kondenzátoru

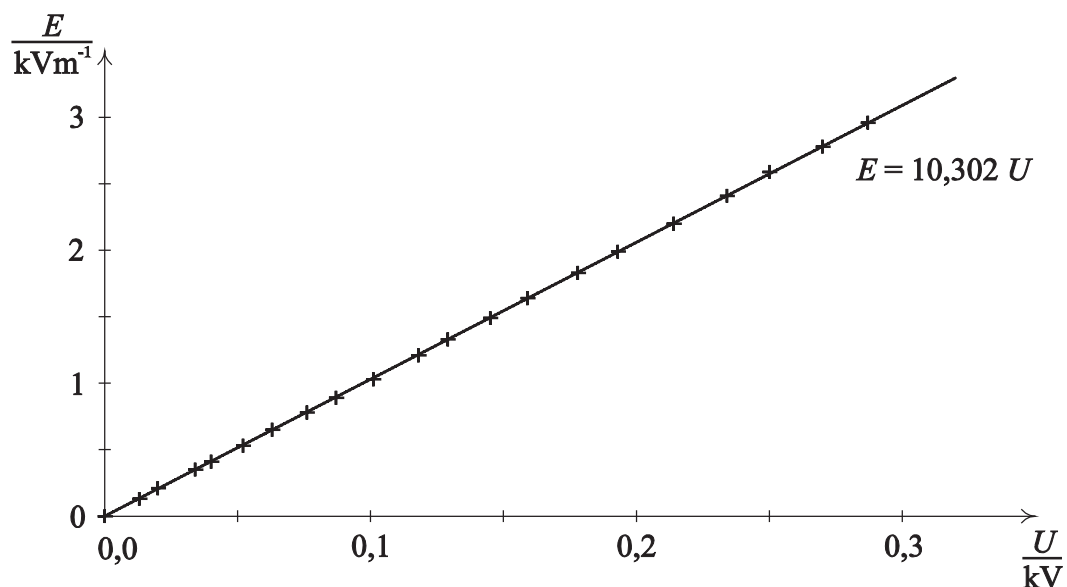
*Závislost elektrické intenzity na napětí mezi deskami kondenzátoru*



Obr. 3.5.3. Aparatura pro zkoumání elektrické intenzity pole deskového kondenzátoru

V této části prověříme vztah (2.1.6) tak, že  $d$  ponecháváme konstantní,  $U$  je nezávislá proměnná a  $E$  závisle proměnná. Uspořádání pokusu vidíme na fotografii výše.

Doporučená vzdálenost desek je přibližně 10 cm. Tato vzdálenost byla použita i při ukázkovém měření – viz graf 3.5.3.



Graf 3.5.3. Závislost elektrické intenzity pole deskového kondenzátoru na napětí na deskách

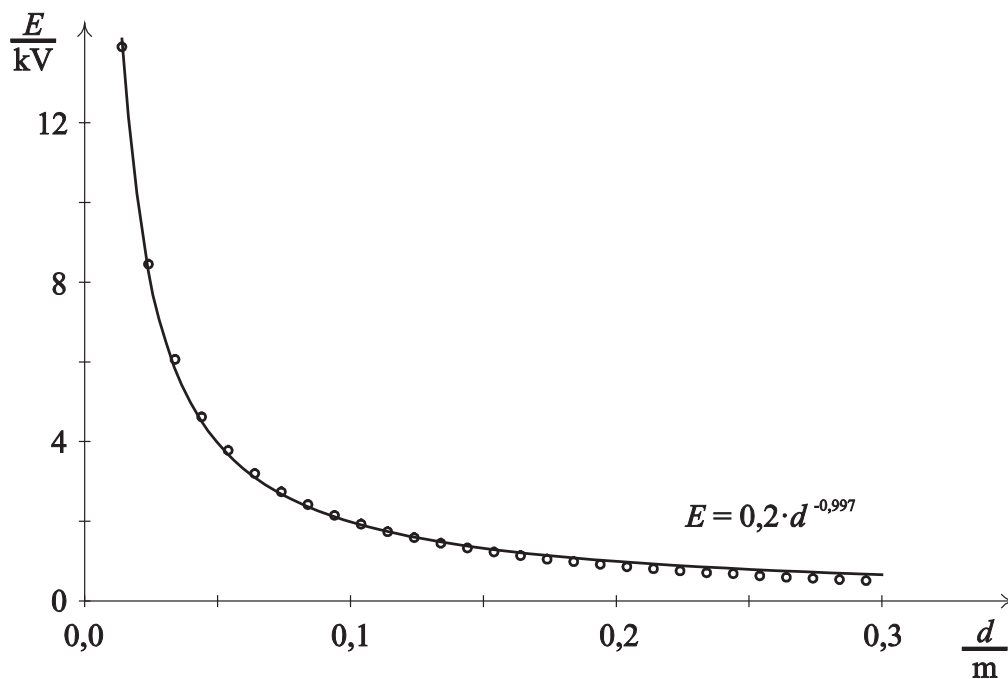
Koeficient úměrnosti v proložené lineární závislosti  $10,302 \text{ m}^{-1}$  velice dobře (odchylka cca 3 %) odpovídá nastavené vzdálenosti desek.

#### *Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti desek kondenzátoru*

Ve stejném uspořádání aparatury, jako je na obrázku u předchozího měření, můžeme proměřit i závislost elektrické intenzity na vzdálenosti desek kondenzátoru. Desky připojíme na pevně zvolené napětí a postupně je vzdalujeme.

Při ukázkovém měření (graf 3.5.4) bylo napětí nastaveno na hodnotu 200 V a postupně byla zvyšována vzdálenost desek.

K vynesení dat a jejich aproximaci bylo v tomto případě využito programu Logger Pro, daty je proložena křivka s rovnicí typu  $y = A \cdot x^B$ .



Graf 3.5.4. Závislost elektrické intenzity pole deskového kondenzátoru na vzdálenosti desek

Jak je patrné z grafu, závislost intenzity na vzdálenosti desek byla parametrizována jako

$$E = 0,2 \cdot d^{-0,997} \quad (3.5.4)$$

Tento vztah velmi dobře odpovídá předpokládané rovnici (2.1.6), resp. (3.5.1).

#### *Průběh elektrického potenciálu v nabitém deskovém kondenzátoru*

S aparaturou (v jiné konfiguraci) lze také měřit a ověřovat vztah (3.5.3) a zkoumat tak průběh potenciálu uvnitř deskového kondenzátoru. Další podrobnosti viz příložené CD.

## 4. Pokusy s elektrickými obvody

Tematický celek elektrické obvody patří do výuky fyziky obvykle již v šestém ročníku základní školy. V úvodním bloku 4.1 se proto věnujeme počátečním experimentům, které pomáhají žákům porozumět základním zákonitostem fungování elektrických obvodů. V dalších částech této kapitoly se budeme věnovat Kirchhoffovým zákonům a Ohmovu zákonu, tedy problematice, která může některým čtenářům připadat poměrně jednoduchá, ale s níž mají studenti často spojenou řadu miskoncepcí a mylných představ. Kapitulu zakončíme jednoduchými způsoby měření a indikace i poměrně nepatrných proudů a dotkneme se i problematiky kapacitních proudů.

### 4.1 Elektrické obvody téměř z ničeho

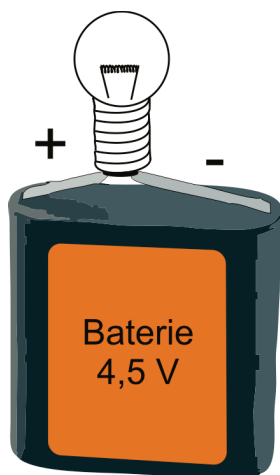
Jak jsme již uvedli výše, tento blok je věnován experimentům, které žákům a studentům pomáhají porozumět základním zákonitostem spojeným s elektrickými obvody. Experimenty jsou tedy jednoduché a sestavené tak, aby pomáhaly u žáků identifikovat případné chybné intuitivní představy a postupně budovat správné představy.

Zadání úkolů je zde psáno italikou, metodické komentáře následují za textem úloh. Další úlohy k tomuto tématu jsou uvedeny v pracovním listu na přiloženém CD.

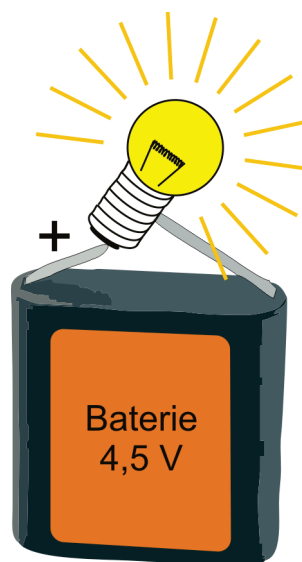
#### 4.1.1 Kolik „konců“ má žárovka a baterie?

*Vezměte si malou žárovku bez objímky a plochou baterii. Rozsviďte žárovku. Nakreslete pomocí obrázku (ne schematických značek!), kudy prochází proud.*

Zdánlivě velmi jednoduchý experiment má své úskalí. Jestliže ho svým žákům či studentům zadáte, zjistíte možná, že někteří z nich se budou pokoušet dotknout se spodní části žárovky obou kontaktů baterie současně a budou se divit, že se to nedaří a tedy nejde žárovku rozsvítit. Zjistíte tedy, že žáci mají chybnou představu o zapojení žárovky do elektrického obvodu. Doporučujeme nechat žáky chvíli s úkolem „bojovat“ a počkat, až pomocí vlastního experimentování nebo nahlédnutím k sousedovi správné řešení všichni najdou. Zjistí, že baterie má dva „konce“ a žárovka také, a tyto konce musí být propojeny, aby žárovka svítila. Nakreslením obrázku si toto zjištění ještě upevní.



Obr. 4.1.1 Časté chybné řešení



Obr. 4.1.2 Správné řešení

#### 4.1.2 Zasoutěžte si!

*Budete pracovat ve dvojici. Máte k dispozici žárovku bez objímky a plochou baterii. Zapojte žárovku tak, aby svítila přes co nejvíc kusů věcí současně. Na tuto soutěž máte omezený čas (přesně 7 minut) a smíte používat pouze vlastní věci (z penálů, kapes, aktovek), nikoliv pomůcky připravené k dalším experimentům. Zapište na přiložený papír rekord vaší skupiny.*

*Jaké všechny podmínky musí být splněny, aby žárovka svítila? Zapište si je!*

*Nakreslete si realistický obrázek vašeho zapojení. Pak nakreslete stejný obvod pomocí schematických značek. Umíte vysvětlit, z jakého důvodu používáme schematické značky?*

Tato soutěž je velmi oblíbenou aktivitou, žáci celkem běžně zvládají rozsvítit žárovku přes dvacet předmětů (mince, kružítka, nůžky, atd.). Doporučujeme, abyste během soutěže procházeli po třídě, kontrolovali, zda žárovka skutečně svítí přes daný počet předmětů, jak skupiny hlásí, a zapisovali průběžné rekordy třídy na tabuli. Je vhodné také upozornit ty žáky, kteří v zápalu soutěže začnou rozebírat své svazky klíčů, aby si je po skončení soutěže omylem nepomíchali. Stejně tak nedoporučujeme do obvodu zapojovat tenký zlatý řetízek, mohl by se procházejícím proudem natavit.



Obr. 4.1.3 Soutěž – Rozsviť žárovku přes co nejvíc kusů věcí současně

Žáci si při této aktivitě uvědomí, že pro to, aby žárovka svítila, musí být splněny následující podmínky:

- všechny předměty musí být vodivé
- předměty se musí dotýkat
- baterie i žárovka musí být funkční a musí být správně zapojeny (žárovka se musí dotýkat oběma konci!)
- věci musejí být zapojeny „dokola“, tedy obvod musí být uzavřený

V další části úlohy si žáci uvědomí, že realistický obrázek zapojení je nepřehledný, a proto je vhodné pro nákres elektrického obvodu používat schematické značky.

#### 4.1.3 Tři typy úloh týkajících se elektrických obvodů

Při zadávání úloh týkajících se elektrických obvodů se setkáváme jednak se schématem, jednak se slovním popisem funkce obvodu (případně s tabulkou, která tuto funkci přehledně vyjadřuje) a samozřejmě s reálným zapojením obvodu. Každý z těchto prvků může být obsažen v zadání úlohy, zbývající dva prvky pak jsou požadovány v řešení úlohy (příklady všech tří typů úloh jsou uvedeny v pracovním listu na CD). Jedná se tedy o vyjadřování stejného problému pomocí různých reprezentací (realita, slovní popis, tabulka, schéma). Rozvíjení dovednosti vyjadřovat se pomocí různých typů textů a záznamů patří mezi důležité role výuky, a fyzika k tomu dává mnoho příležitostí.

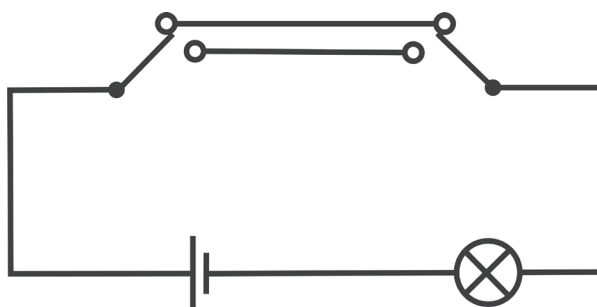
#### 4.1.4. Použití přepínače

Prozkoumejte a popište funkci přepínače. Navrhněte a zapojte obvod, ve kterém budete pomocí přepínače střídavě rozsvěcovat nebo zhasínat dvě žárovky.

Přepínač patří mezi důležité součástky používané v elektrických obvodech a žáci by se s ním tedy měli také seznámit. Na úvodní úlohu pak navazuje úloha, ve které je přepínač využit v zapojení, které většina žáků zná z vlastní zkušenosti – ať již doma nebo ve škole:

Navrhněte schéma zapojení, při kterém můžete libovolným vypínačem na dvou koncích chodby rozsvítit i zhasnout žárovku (schodišťový vypínač). Zapojte navržený obvod a ověřte správnost experimentem.

Pro kohokoliv, kdo řešení této úlohy nezná (a to jak pro žáky, tak pro učitele) je úloha poměrně náročná. Doporučujeme ji však do výuky zařadit ať již v rámci vyučovací hodiny nebo jako dobrovolný domácí úkol, neboť umožňuje žákům objevovat řešení, upravovat ho, pokud první návrh zadání nevyhovuje, ověřovat svoji hypotézu, atd., provádět tedy skutečnou badatelskou práci. Z tohoto důvodu je také v zadání úlohy použito slovo vypínač (jako označení, které všichni používáme pro reálnou součástku na chodbě), nikoliv přepínač. Řešení problému je vidět na obrázku 4.1.4.



Obr. 4.1.4 Zapojení „schodišťového vypínače“



## 4.2 Sériové a paralelní zapojení

Úlohy v tomto bloku jsou koncipovány tak, aby se daly řešit jak teoreticky, tak experimentálně. Lze je tedy studentům zadat na rozmyšlenou za domácí úkol, mohou být použity ve formě demonstračních i žákovských experimentů.

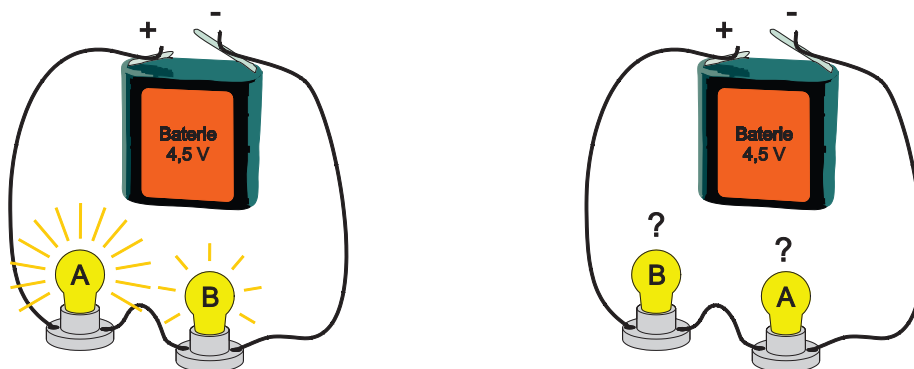
V základní podobě byly tyto pokusy inspirovány úlohami P. Hewitta [4].

### 4.2.1 „Kterou dřív?“ (Zapojení dvou žárovek s různým odporem)

*Pomůcky*

- Vodiče, dvě žárovky (3,5 V/0,2 A a 3,5 V/0,3 A), baterie 4,5 V.
- Pro rozšíření: dvě žárovky 230 V/100 W a 60 W.

*Zadání*



V obvodu zapojeném na obrázku vlevo žárovka A svítí jasněji než žárovka B. Co se stane, pokud žárovky prohodíme?

- a) Žárovka A bude opět svítit jasněji
- b) Žárovka B bude svítit jasněji
- c) Nastane jiná situace

*Doplňující otázky*

- 1) Jak se liší proud tekoucí žárovkami?
- 2) Která z žárovek má větší příkon?
- 3) Jak se liší napětí na žárovkách?
- 4) Která žárovka má větší odpor?
- 5) Která z žárovek bude svítit jasněji, pokud je zapojíme paralelně?
- 6) Lze ještě před zapojením obvodu poznat, která z žárovek bude svítit více? (Rozuměj, z údajů o jejich jmenovitém napětí a proudu.)

## Řešení

Odpověď: a)

Žárovky jsou zapojeny sériově, takže oběma prochází stejný proud. Různý jas žárovek indikuje, že mají různý odpor. Žárovka A není jasnější kvůli tomu, že by byla pro proud tekoucí z baterie „první v řadě“ (proud by jí tekl první a ona by jej odebírala žárovce B)!

Doplňující otázky:

- 1) Proud tekoucí oběma žárovkami je stejný. (Demonstrujeme ampérmetrem, který postupně zapojujeme do různých míst obvodu. Případně použijeme tři ampérmetry současně.)
- 2) Jak je vidět z prvního obrázku, žárovka A svítí více. Proti žárovce B tedy za stejný čas vydá větší množství energie. Má tedy větší výkon. Za stejný čas tedy spotřebuje i více energie a její příkon je tedy větší než žárovky B.
- 3) K vyřešení této úlohy musíme vědět, jaký je vztah mezi proudem, napětím a výkonem ( $P = U \cdot I$ ). Zajímáme-li se o napětí, pak zjistíme, že  $U = P/I$ . Jelikož proud teče oběma žárovkami stejný a žárovka A má větší výkon, pak na ní naměříme i větší napětí. V tomto zapojení tedy obě žárovky fungují jako dělič napětí. (Můžeme ověřit pomocí voltmetrů.)
- 4) Odpor zjistíme ze známého vztahu  $U = R \cdot I$ . Za předpokladu, že proud oběma žárovkami je stejný a napětí na žárovce A je větší, pak můžeme konstatovat, že žárovka A má větší odpor než žárovka B.
- 5) Pokud žárovky zapojíme ke zdroji paralelně, bude na obou stejné napětí. Žárovkou A však poteče menší proud (její odpor je větší). Z toho tedy plyne, že její příkon (i výkon) bude menší – tj. za stejný čas spotřebuje (resp. vydá) menší množství energie, kterou my vnímáme jako světlo a teplo.
- 6) Odpor žárovek při jmenovitém napětí lze určit z údajů uvedených na jejich bocích. Při sériovém zapojení však tento odpor číselně neodpovídá skutečnému, alespoň však můžeme určit, která z žárovek má odpor větší – tím tedy určíme (podle řešení otázky 4 a 5), která bude svítit více.

## Komentáře

Ve svém základním zadání je tato úloha zaměřena především na to, aby se studenti zbavili časté miskoncepce, ve které tvrdí, že proud je po cestě „spotřebováván“. Úlohu by šlo jistě ještě rozšířit o další žárovku s jiným odporem – tak, aby byl dojem „slábnoucího proudu“ ještě silnější.

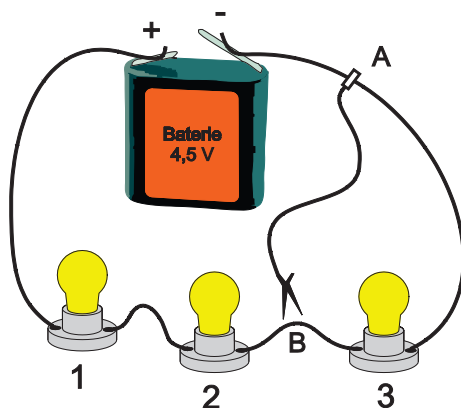
Efekt změny svitu je možno ukázat s klasickými malými žárovičkami, kterými při stejném jmenovitém napětí prochází různý proud (i jinými, než uvedenými výše, např. 6 V/0,3 A a 6 V/0,1 A). Daleko názornější je však pokus, provedeme-li jej s klasickými žárovkami 230 V/60 W a 100 W.

## 4.2.2 Sériové zapojení žárovek

### Pomůcky

Vodiče, baterie 4,5 V, tři stejné žárovky (3,5 V/0,2 A)

### Zadání



Jednoduchý sériový obvod sestává z tří identických žárovek napájených baterií. Všimneme si, jak žárovky svítí; pak body A a B vodivě spojte kabelem.

- Co se stane s jasnem žárovky 3?
- Jak se změní proud v obvodu? Vzroste, klesne, nebo zůstane stejný?
- Co se stane s jasnem žárovek 1 a 2?
- Jak se změní napětí na žárovkách 1 a 2? Vzroste, klesne, nebo zůstane stejné?
- Jak se změní elektrická energie spotřebovaná obvodem za stejný časový úsek? Vzroste, klesne, nebo zůstane stejná?

### Řešení

- Žárovka 3 je zkratována. Již přes ni neteče proud, a proto tedy nesvítí.
- Proud v obvodu vzroste. Proč? Protože celkový odpor v obvodu klesl. Zatímco nejprve proud procházel přes 3 žárovky, nyní musí projít pouze dvěma.
- Žárovky 1 a 2 budou svítit jasněji, neboť se zvýšil proud, který jimi prochází.
- Napětí na žárovkách 1 a 2 vzrostlo. Zatímco před tím se napětí dělilo mezi tři žárovky, nyní se dělí pouze mezi dvěma. Každé ze žárovek je tak tedy nyní dodáváno více energie.
- Celková energie odebíraná z baterie se zvětší. Ve „dvoužárovkovém“ obvodu je větší proud. Z toho pak při stejném napětí baterie vyplývá větší příkon a tedy i více energie vyzářené ve formě světla a tepla.

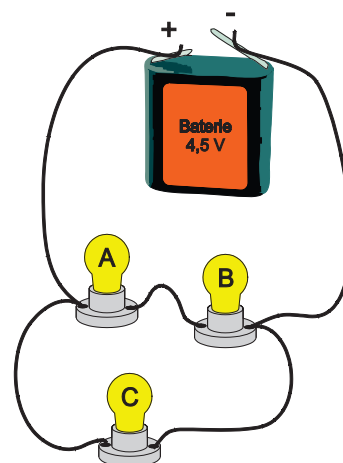
### 4.2.3 Paralelní zapojení žárovek

#### Pomůcky

Vodiče, baterie 4,5 V, tři stejné žárovky (3,5 V/0,2 A).

#### Zadání

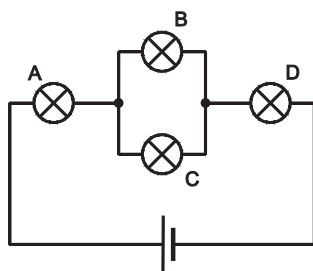
Jak ukazuje obrázek, tři stejné žárovky jsou připojeny ke 4,5 voltové baterii.



- 1) Jak se liší proud žárovkami?
- 2) Jak se liší napětí na žárovkách?
- 3) Jak se liší příkon jednotlivých žárovek?
- 4) Jak se změní příkon žárovky C, když vyšroubujeme žárovku A?
- 5) Jak se změní příkon žárovky A, když naopak vyšroubujeme žárovku C?

#### Rozšíření<sup>3</sup>

Na následujícím obrázku je zachycen elektrický obvod sestávající ze čtyř identických žárovek a 4,5 V baterie.



Co se stane, pokud jednu ze žárovek B, C vyšroubujeme?

- i. Jak se změní jas zbývajících žárovek?
- ii. Změní se proud obvodem?

#### Řešení

- 1)  $I_C > I_A = I_B$ ; Vysvětlení: Sériově zapojené žárovky A a B jsou připojeny na stejné napětí jako žárovka C. Jelikož dvě sériově zapojené žárovky mají větší odpor, musí jimi téci menší proud.
- 2) Napětí na žárovkách A a B mají velikost 2,25 V. Na žárovce C je napětí 4,5 V.
- 3) Příkon žárovek A a B je stejný. Oběma prochází stejný proud a na obou je stejné napětí. Na žárovce C je dvojnásobné napětí a prochází jí i větší proud, tudíž je její příkon rovněž větší.
- 4) Nezmění se. Napětí na žárovce C se nezmění. Proud, který jí prochází je také stále stejný (je to stejná žárovka připojená na stejné napětí).
- 5) Nezmění se. Obdobná situace, jako v předcházejícím případě.

<sup>3</sup> Zapojení vychází ze základního zapojení v pokusu 4.2.2. Pouze k prostřední žárovce 2 připojíme ještě jednu paralelně.

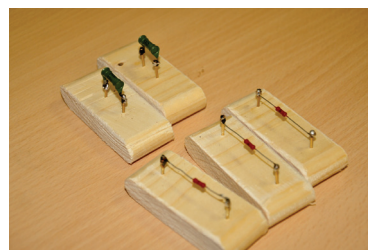
- i. Všechny tři zbylé žárovky budou svítit stejně jasně. A, D budou svítit slaběji než na začátku. Ta z žárovek B, C která zůstala zašroubována, bude oproti výchozímu stavu svítit jasněji.
- ii. Celkový proud protékající obvodem klesne.

Po zapojení tohoto obvodu pozorujeme, že žárovky B, C budou svítit slaběji než zbývající dvě. Je to z toho důvodu, že proud se v uzlu dělí na dvě části (jedna větev vede přes žárovku B, druhá přes žárovku C). Pokud jednu z paralelně zapojených žárovek vyšroubujeme (vyberme si například žárovku C), vzroste celkový odpor obvodu. (Dvě paralelně zapojené žárovky mají menší odpor než jediná.) Z toho pak plyne, že obvodem poteče menší proud. Na žárovkách A, D bude menší napětí a budou svítit méně. Žárovka B bude nyní, ve srovnání se svým předchozím stavem, svítit jasněji (napětí na ní je nyní vyšší) a stejně jasně jako žárovky A, D.

#### 4.2.4 „Nekonečný“ obvod

##### Pomůcky

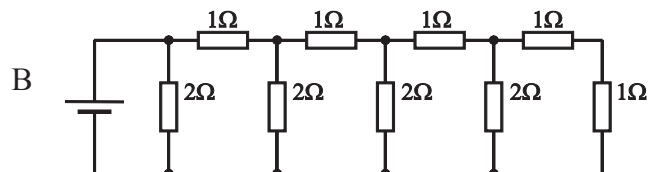
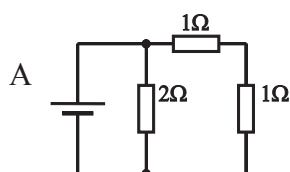
Baterie 4,5 V, rezistory, ručkový ampérmetr, vodiče.



##### Zadání

Kterým z následujících obvodů protéká při stejném napětí baterie větší proud?

- a) Obvodem A
- b) Obvodem B
- c) V obou případech je proud odebíráný z baterie stejný.



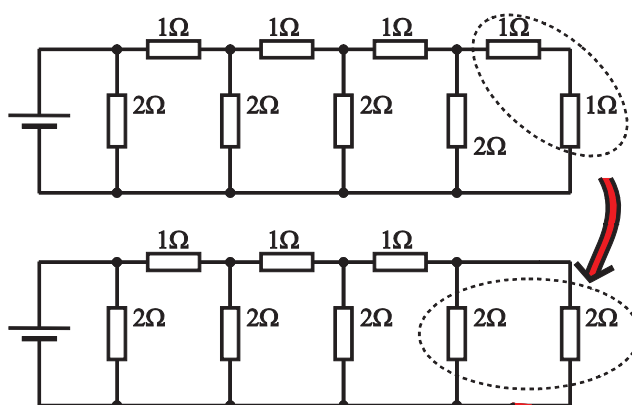
##### Řešení

- c) V obou případech je proud odebíráný z baterie stejný.

Pro správné řešení této situace si musíme uvědomit, jakým způsobem počítáme odpor paralelně a sériově zapojených rezistorů. Abychom porovnali proud protékající jednotlivými obvody, je zapotřebí určit celkový odpor připojený k baterii.

Vysvětlení provedeme po krocích:

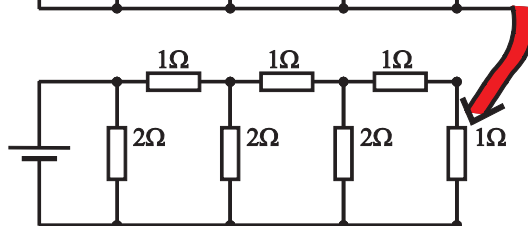
Chceme-li určit celkový odpor takto rozvětveného obvodu, můžeme postupovat „odzadu“. Dva poslední rezistory (každý o odporu  $1\ \Omega$ ) jsou zapojeny sériově. Jejich celkový odpor je tedy  $2\ \Omega$ . Můžeme si tedy představit, že tyto dva rezistory nahradíme jedním o stejném odporu ( $2\ \Omega$ ). Tento rezistor je s dalším v řadě spojen paralelně. Celkový odpor těchto dvou je tedy  $1\ \Omega$ .



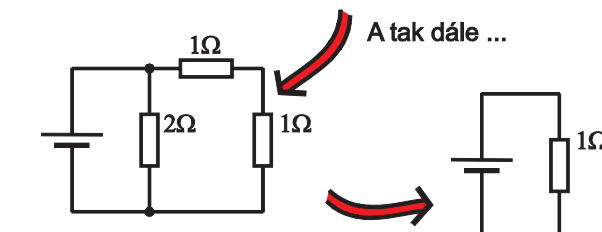
Počítáme podle rovnice:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2\ \Omega} + \frac{1}{2\ \Omega}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\Omega} \Rightarrow R = 1\ \Omega$$



Stejným myšlenkovým postupem nahrazujeme další a další rezistory, až zjistíme, že se dostaneme (přes obvod v případě A) k jednoduchému obvodu, ve kterém je k baterii připojen pouze jeden rezistor o odporu  $1\ \Omega$ .



### Komentář

I tento pokus lze provést prakticky. Do problémů s přípravou pokusu se však dostáváme díky rezistorům, které lze koupit v prodejních s elektronikou. Všechny klasické rezistory mají garanci přesnosti 1–5 %, dají se sehnat však sehnat i metalizované rezistory s vyšší přesností (až 0,1 %). Nicméně, za kvalitu si připlatíme. Chceme-li tak zůstat u levnějších, které poslouží stejně dobře, musíme jich koupit více a např. pomocí ohmmetru zjistit, které z nich budou vyhovovat.

Nemusíme shánět rezistory s odporem přesně  $1\ \Omega$  a  $2\ \Omega$ . Stačí nám takové, jejichž poměr odporů je přibližně 1:2. Protože se nám jen těžko podaří dosáhnout dokonalého přesnosti v sestavení takto ideálního obvodu, je výhodné použít pro měření proudu analogový ampérmetr, který „zakryje“ tuto nepřesnost. Studenti pak nebudou rušeni tím, že na posledním desetinném místě rozlišení digitálního ampérmetru se hodnoty proudu liší. V rámci seminářů pro učitele byly například vybrány odpory s odpory  $5,3\ \text{k}\Omega$  a  $2,66\ \text{k}\Omega$ . Chcete-li však do experimentu zainvestovat (cca 5 Kč/ks), nic vám nebrání nakoupit např. rezistory s přesností 0,1 % a odpory  $1\ \text{k}\Omega$  a  $2\ \text{k}\Omega$ , které jsou na trhu k dostání.

## 4.3 Ohmův zákon k vašim službám – ale někdy neplatí

Hlavním cílem této podkapitoly je bližší seznámení se s elektrickým odporem, Ohmovým zákonem a mezemi jeho platnosti. V první části podkapitoly jsou popsány různé způsoby určení odporu neznámého rezistoru, druhá část se věnuje platnosti Ohmova zákona, třetí pak závislosti odporu na rozměrech vodiče. U každé části jsou pro přehlednost sepsány potřebné pomůcky. Vzorové měření druhé a třetí části je spolu s krátkými videi a poznámkami k experimentům k dispozici na adrese [5].

### 4.3.1 Odpor rezistoru

*Vezměte si rezistor. Zjistěte jeho odpor několika různými způsoby, tyto způsoby pak porovnejte z hlediska přesnosti.*

Pomůcky:

- běžný rezistor s neuvedenou hodnotou odporu (vyhovuje jakýkoliv rezistor s odporem v desítkách až stovkách ohmů, ne rezistor ze školní soupravy, který má na krabičce odpor uveden)
- proměnný zdroj stejnosměrného napětí do cca 10 V (nebo zdroj konstantního stejnosměrného napětí a reostat)
- dva multimetry (případně digitální voltmetr a ampérmetr s dataloggerem)
- vodiče, krokosvorky

Asi nejobvyklejší metodou, jak určit odpor rezistoru, je samozřejmě změřit napětí a proud v obvodu s příslušným rezistorem a použít Ohmův zákon.

Navazující metodou je zjištění voltampérové charakteristiky (závislosti napětí na proudu<sup>4</sup>) a určení odporu jako směrnice vzniklé lineární funkce. Zapojení je stejné jako v předchozím případě, na zdroji proměnného napětí měníme napětí a odečítáme hodnoty na voltmetru a ampérmetru. Hodnoty lze samozřejmě jednak odečítat ručně z multimetru a vynášet např. na milimetrový papír, výhodné je zde ale použití digitálního ampérmetru a voltmetru připojeného k počítači nebo dataloggeru – měření tak lze provést velmi rychle.

Třetí způsob využívá toho, že většina běžných multimetrů dovoluje měřit přímo odpor – rezistor připojíme k multimetru nastavenému jako ohmmetr a odečteme hodnotu odporu přímo. Námětem do diskuze se studenty pak může být, na jakém principu ohmmetr pracuje. Poslední způsob už není „měřicí“ – na rezistorech je jejich odpor značen soustavou barevných proužků, lze ho tak odečíst přímo z tzv. „tabulky barevného značení rezistorů“.

---

<sup>4</sup> Jako voltampérová charakteristika (zkráceně VA charakteristika) se obvykle uvádí závislost proudu na napětí. Vzhledem ke snadnějšímu odečtení odporu je v tomto experimentu výhodnější použít závislost napětí na proudu.



Všechny tři měřicí způsoby jsou založeny na použití Ohmova zákona – nejběžnější princip měření ohmmetrem spočívá v tom, že do rezistoru pustí malý proud a měří na něm napětí.

První zmíněná metoda měření je pro studenty asi nejběžnější a nejjednodušší, druhá však vylučuje některé možné zdroje chyb – od špatně odečtené hodnoty na multimetru po nevhodně zvolený rozsah.

### 4.3.2 Odpor žárovky

*1. úkol: Stejným způsobem, jakým jste měřili voltampérovou charakteristiku rezistoru, změřte VA charakteristiku žárovky.*

Pomůcky:

- běžná žárovka na napětí 230 V (tj. s objímkou E27, na jejím příkonu nezáleží), je vhodné nechat studentům i krabičku s „továrními údaji“
- proměnný zdroj stejnosměrného napětí do cca 10 V (nebo zdroj konstantního stejnosměrného napětí a reostat)
- dva multimetry (případně digitální voltmetr a ampérmetr s dataloggerem)
- vodiče, krokosvorky

Pozn. Využití žárovky na 230 V má několik výhod – z motivačního pohledu je pro studenty nové, když měří s něčím, co je určeno na vyšší napětí; z praktického pohledu je pro měření vhodnější větší rozsah napětí – se žárovčkou na 3,5 V bychom získali jen malý počet hodnot a nelinearita by nebyla tak dobře vidět; žárovku na 230 V lze pak navíc poměrně jednoduše upravit pro další měření – viz dále.

Experiment je pro studenty na začátku zdánlivě nezajímavý a stejný jako předchozí. Překvapující může být až fakt, že závislost není lineární. Následně je proto vhodné nechat prostor pro diskuzi, kterou je možno vyhrotit až způsobem „bud' jste objevili, že je celý Ohmův zákon špatně a přepíšeme fyziku, nebo zkuste vymyslet, kde jinde by mohl být problém“. Jako jeden z nápadů se po chvíli nejspíš objeví, že elektrický odpor závisí na teplotě a vlákno se procházejícím proudem zahřívá. Jako další úkol je pak vhodné nechat studenty navrhnout ověření jejich hypotéz (a navrhovaná ověření pokud možno provést, pokud to podmínky školy dovolují). Postup úpravy žárovky pro ověření hypotézy, že neplatnost Ohmova zákona pro žárovku je způsobena teplotní závislostí odporu, je popsána dále.

### Úprava žárovky

Pokud se vlákno procházejícím proudem zahřívá a tím se mění jeho odpor, je potřeba žárovku upravit tak, aby bylo možné vlákno udržovat na konstantní teplotě. Dále je popsán způsob, jak lze ze žárovky sundat baňku bez porušení vlákna.

Pozn. Vzhledem k možnému pořezání/popálení je třeba důsledně dbát na bezpečnost. Úpravu žárovky by měl provádět výhradně vyučující za dodržení běžných bezpečnostních opatření.

Nad plynovým kahanem zahřejeme skleněnou baňku žárovky v místě, kde přiléhá ke kovovému závitu. S baňkou postupně otáčíme, aby se prohřála po celém obvodu. Po několika desítkách sekund žárovku ponoříme (závitěm nahoru) do sklenice se studenou vodou – baňka díky teplotnímu šoku odpadne. Celý postup je natočen na video, které je k dispozici na adrese [5] jako součást experimentu Voltampérová charakteristika rezistoru a žárovky.

Pozor, na zbytku žárovky mohou zůstat ostré skleněné hrany – je třeba dbát na bezpečnost!

*2. úkol: Změřte charakteristiku upravené žárovky a ověřte tak svou hypotézu.*

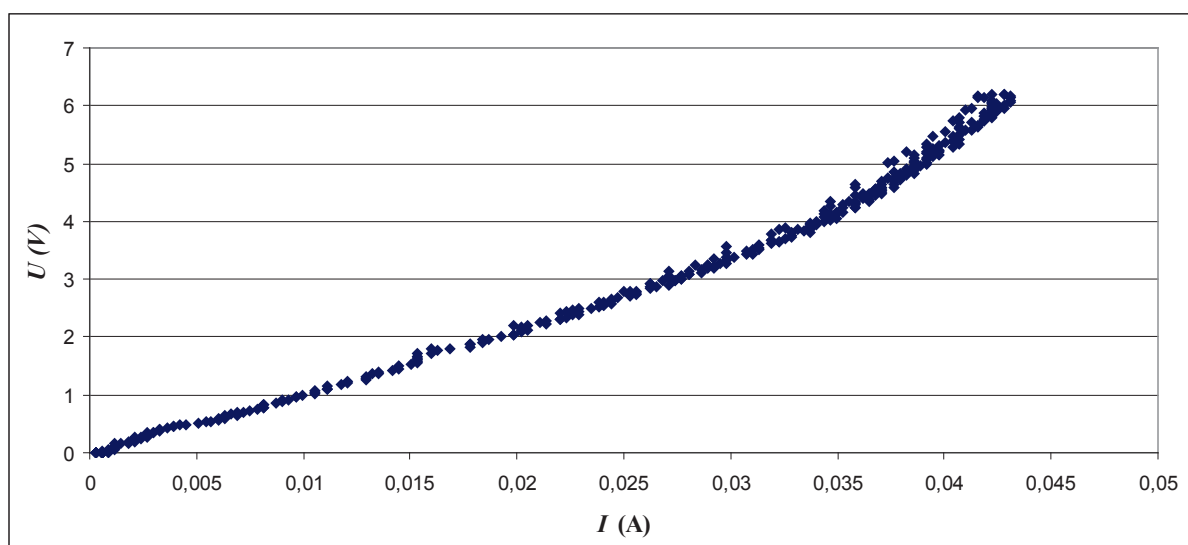
Žárovku bez baňky ponořte do sklenice s vodou tak, aby bylo vlákno chlazené. Měření VA charakteristiky zopakujte. Vzhledem k tomu, že teplota vlákna (a tedy jeho odpor) už bude konstantní, vyjde závislost napětí na proudu lineární. Ze směrnice přímky je vhodné, podobně jako u měření VA charakteristiky rezistoru, určit odpor vlákna.

*3. úkol: Z údajů zjištěných na krabičce vypočítejte odpor vlákna žárovky a hodnotu porovnejte s hodnotou zjištěnou z vašeho měření.*

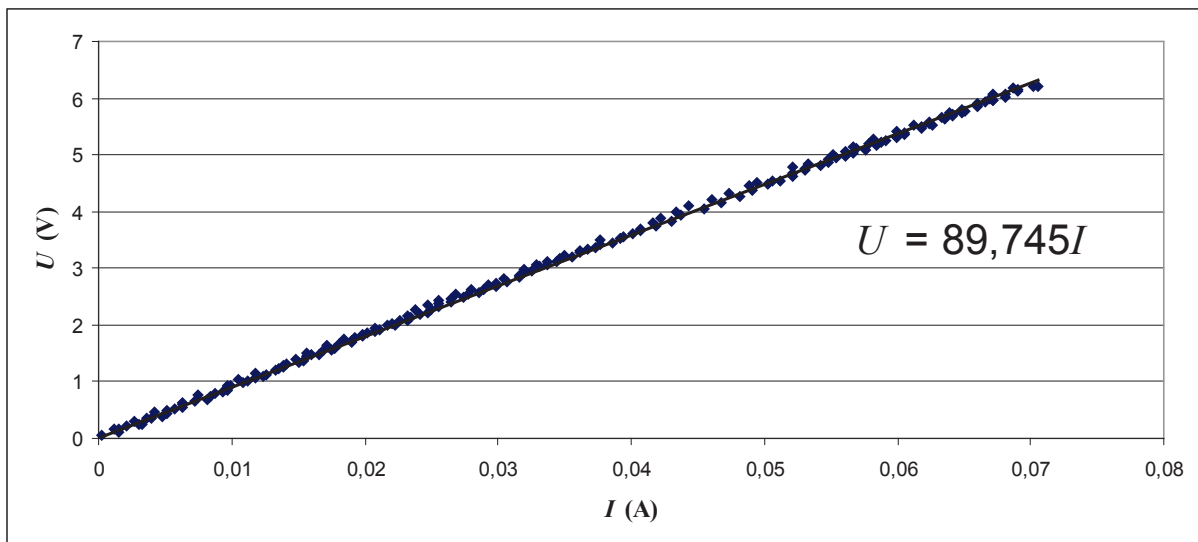
Z krabičky od žárovky se lze dozvědět příkon a napětí. Hodnota odporu, vypočtená z těchto údajů, je mnohonásobně větší než hodnota změřená z VA charakteristiky. Nechte studenty nad zjištěným rozparem přemýšlet a své nápady diskutovat. Řešení problému je uvedeno v následující ukázce měření.

### Ukázka měření

K měření byla použita žárovka 230 V/40 W. Její původní VA charakteristika a charakteristika bez baňky jsou vidět na následujících grafech.



Graf 4.3.1. VA charakteristika žárovky



**Graf 4.3.2. VA charakteristika upravené žárovky**

Z grafu 4.3.2 je vidět směrnice proložené přímkou a tedy odpor vlákna žárovky přibližně:  $R_1 = 90 \Omega$ .

Z příkonu a napětí uvedeného na krabici můžeme vypočítat „jmenovitý odpor“ vlákna:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_2} \Rightarrow R_2 = \frac{U^2}{P}$$

Pro zadané hodnoty pak vychází:

$$R_2 = \frac{230^2}{40} \Omega; \quad R_2 = 1320 \Omega$$

Rozpor mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou odporu je přímým důsledkem závislosti odporu žárovky na teplotě – „jmenovitý odpor“ jsme počítali pro mnohem vyšší hodnoty napětí a příkonu (a tedy proudu) než jaké parametry měla žárovka při měření VA charakteristiky.

### 4.3.3 Závislost odporu na geometrii vodiče

Pomůcky:

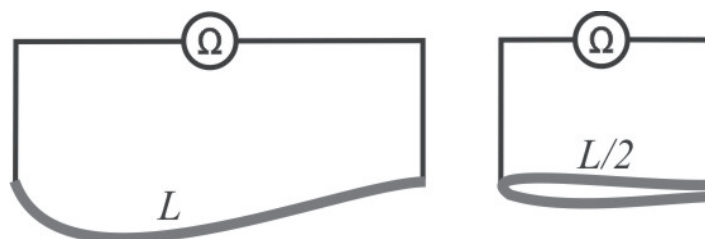
- odporový drát
- ohmmetr
- vodiče, krokosvorky, delší pravítko, posuvné měřítko nebo mikrometr

1. úkol: *Ověřte vztah pro závislost odporu vodiče na jeho rozměrech.*

Pro snadné měření je šikvné odporový drát přilepit k delšímu pravítku či pásmu. K jednomu konci odporového drátu je vhodné ohmmetr připojit napevno, druhý vodič od ohmmetru postupně posouvajte (např. po 10 cm). Dbejte na dobrý kontakt mezi vodičem a odporovým drátem (i při použití krokosvorky). Experiment lze provádět jednak kvalitativně – dvakrát delší drát má dvakrát větší odpor, jednak lze naměřené hodnoty vynést do grafu a proložit jimi přímkou.

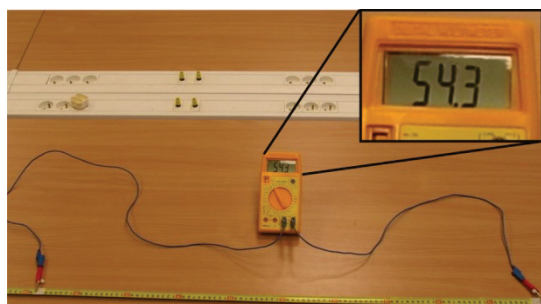
Máte-li k dispozici posuvné měřítko či mikrometr, lze změřit průměr vodiče a dopočítat měrný odpor materiálu. Vypočtenou hodnotu je samozřejmě vhodné porovnat s tabulkami či s hodnotou uvedenou na obalu odporového drátu.

2. úkol: *Změřte odpor kousku odporového drátu. Poté drát přehněte napůl a k oběma jeho novým „koncům“ připojte ohmmetr. Nejdříve si rozmyslete, jakou hodnotu odporu naměříte. Svůj výpočet pak ověřte experimentem.*

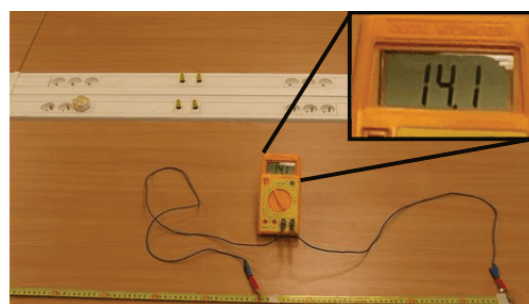


Obr. 4.3.1. K zadání 2. úkolu

Vzhledem k tomu, že délka tohoto „nového drátu“ je poloviční a průřez se zvětšil dvakrát, naměřený odpor by měl být přibližně čtvrtinový, jak je vidět na obrázcích 4.3.2 a 4.3.3.



Obr. 4.3.2 Odpor 1 m kanthalového drátu



Obr. 4.3.3. Odpor přepůleného kanthalového drátu

## 4.4 Lze změřit proud tekoucí špejlí? (Aneb měření malých proudů)

Cílem pokusů v této části je, aby se žáci seznámili se situacemi, kdy určitý, byť malý proud může téci i předměty, které zdánlivě izolují.

Pokusy mají zároveň přesah i k dalším modulům resp. příručkám projektu: Jednak k modulu *Polovodiče a jejich aplikace* (ukážeme, jak lze malý proud zesílit tranzistorem) a k modulu *Střídavé proudy* (uvidíme, jak střídavý proud síťové frekvence může procházet přes izolující vrstvu díky vzájemné kapacitě vodičů).

Pomůcky:

Multimetr, rezistory s odporem  $10\text{ M}\Omega$ , plochá baterie, kondenzátor  $10\text{ }\mu\text{F}$  (v provedení označeném jako „fóliové“), plechovka, špejle, izolační podložka (polystyrén nebo plastový kelímek), vodiče s krokodýlky, alobal, tenká plastová fólie („euroobal“ apod.), střídavý zdroj o napětí  $6\text{ V}$  nebo více. Pro část 4.4.4: tranzistor např. BC547, rezistor  $120\text{ }\Omega$ , svítivá dioda. Pro variantu měření proudu špejlí: vysokonapěťový zdroj (např.  $10\text{ kV}$ ).

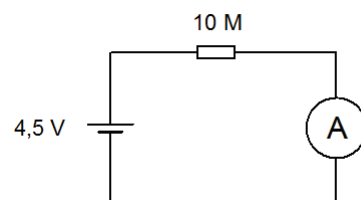
### 4.4.1 Měření malých proudů

Zdrojem napětí v těchto pokusech bude plochá baterie, proud budeme měřit multimetrem.

Pokus 1 (přípravný):

*Připojte k ploché baterii rezistor o odporu  $10\text{ M}\Omega$  a změřte proud tekoucí tímto rezistorem.*

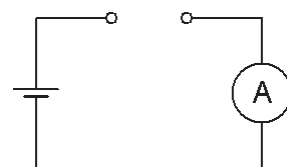
*Jak velký proud prochází rezistorem? Na jakém rozsahu ampérmetru ho můžeme změřit?*



Pokus 2:

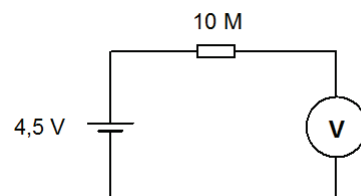
*Místo rezistoru nechte procházet proud z ploché baterie vlastními prsty, případně z jedné ruky do druhé.*

*(Viz schéma – svorky spojujeme prsty. Svorky lze připojit ke dvěma kouskům alobalu a na ně pokládat dlaně. Pro jistotu je lepší do série s ampérmetrem zapojit rezistor o odporu řekněme  $100\text{ }\Omega$ , aby se při náhodném zkratu svorek nespálila pojistka v ampérmetru.)*



Pokus 3:

*Zapojte do série plochou baterii, rezistor o odporu  $10\text{ M}\Omega$  a voltmetr (multimetr zapojený jako voltmetr). Jaké napětí ukáže voltmetr?*



Co lze zkoumat a diskutovat:

- Jaký proud prochází naším tělem při pokusu 2? Závisí na vlhkosti kůže? Závisí na ploše „elektrod“, dotýkajících se naší kůže? Závisí na místě, kde se dotýkáme kůže?
- Jak vysvětlíme výsledek pokusu 3? (Související, nepatrně náročnější problém: Určete z výsledku pokusu vnitřní odpor voltmetru.)
- Zapojte v pokusu 3 místo jednoho rezistoru dva, tři či více rezistorů o odporu  $10\text{ M}\Omega$  v sérii. Jaký je proud? Jak vysvětlíme výsledek?
- Uvědomte si, že v pokusu 3 vlastně voltmetrem měříme proud procházející obvodem. Jaký proud prochází voltmetrem, když ten ukazuje napětí  $1\text{ V}$ ? (Vnitřní odpor multimetrů bývá  $10\text{ M}\Omega$ .)
- Jaký nejmenší proud můžeme voltmetrem „zapojeným jako ampérmetr“ změřit?

Poznámky:

Pokus 3 ukazuje poněkud netradiční využití voltmetru – používáme ho zde k měření proudu, tedy ve funkci ampérmetru. Výsledky lze vysvětlit pomocí Ohmova zákona: protékající proud  $I$  na vnitřním odporu voltmetru  $R_i$  vytvoří úbytek napětí  $R_i \cdot I$ . Pro  $R_i = 10^7\ \Omega$  odpovídá proudu pouhých  $10^{-10}\text{ A}$  (tedy  $100\text{ pA}$ ) napětí  $1\text{ mV}$ . Multimetr přitom na nejcitlivějším rozsahu ukazuje i desetiny  $\text{mV}$ .

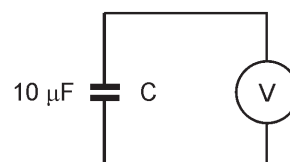
Výsledky pokusu 3 lze vysvětlit i tak, že se na zapojený obvod díváme jako na dělič napětí.

Některé nejlevnější multimetry mají vnitřní odpor jen  $1\text{ M}\Omega$ . Pokud použijete takový voltmetr, bude citlivost měření proudu desetkrát nižší. V pokusech 1 a 3 by v tomto případě bylo vhodnější použít rezistor o odporu  $1\text{ M}\Omega$ .

#### 4.4.2 Vybíjení kondenzátoru

Zdrojem napětí v těchto pokusech bude opět plochá baterie, měřit budeme multimetrem.

*Nabijte kondenzátor  $10\ \mu\text{F}$  z ploché baterie a připojte ho k voltmetru podle schématu. Měřte napětí v závislosti na čase. (Třeba každých  $10\text{ s}$ .) Výsledky můžete vynést do tabulky.*



Co lze zkoumat a diskutovat:

- Proč napětí na kondenzátoru klesá?
- Jak napětí na kondenzátoru klesá s časem?
- Určete z měření časovou konstantu, tedy čas, za který napětí klesne na  $1/e$ . (Tedy asi na  $36\%$  původní hodnoty.)
- Pokud časovou konstantu začneme počítat třeba až od okamžiku, kdy napětí na kondenzátoru je  $1\text{ V}$ , bude její hodnota stejná nebo odlišná od hodnoty vycházející z počátečního napětí?

Poznámky:

V analogii s průběhem radioaktivního rozpadu by šlo též určovat „poločas“ poklesu napětí, tedy dobu, za níž napětí klesne na polovinu.

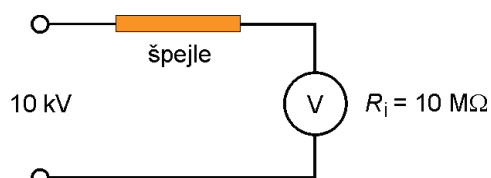
Další možnosti zpracování výsledků tohoto pokusu jsou v materiálech na přiloženém CD.

### 4.4.3 Měříme proud špejlí

Zdrojem napětí v těchto pokusech bude vysokonapěťový zdroj případně nabitá plechovka, proud budeme měřit multimetrem (voltmetrem využívaným jako ampérmetr, viz pokus 3 v části 4.4.1).

Provedení pokusu 1:

Připojte výstup z VN zdroje přes špejli k voltmetru. (Viz schéma. Konce špejle, k nimž připojujeme přívodní dráty, je vhodné obalit alobalem.)

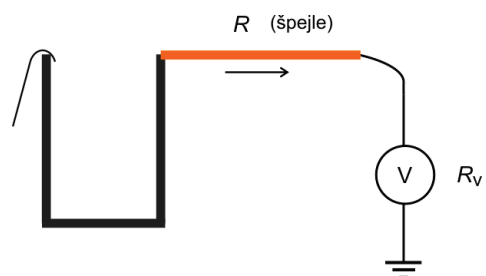


Z napětí, které ukazuje voltmetr, vypočtete proud. (Předpokládáme voltmetr s vnitřním odporem  $10\text{ M}\Omega$ . Vnitřní odpor voltmetru lze ověřit pokusem 3 z aktivity 4.4.1 výše.)

Provedení pokusu 2:

Měřte proud, který teče z nabitě plechovky špejlí.

Druhý pól měřicího přístroje uzemněte třeba na kolík zásuvky. Plechovku nabijte např. zelektrovanou tyčí.



Poznámka:

Pokud je proud tekoucí špejlí neměřitelně malý, je zřejmě špejle příliš suchá a je třeba ji před pokusem nepatrně navlhčit. (Stačí na ni trochu dýchnout – ale pozor, předem raději odpojte přívod od vysokonapěťového zdroje. Pokud je špejle vlhčí, nemusíte ani používat vysokonapěťový zdroj; stačí napětí ploché baterie.) Místo špejle můžeme použít slanou tyčku (z těch tenkých, co jsou v prodejnách potravin v celých balíčcích), ta bývá vodivější.

Co lze zkoumat a diskutovat:

- Z pokusu 1 určete odpor špejle.
- Z odporu špejle a její délky a plochy průřezu určete měrný odpor dřeva. Porovnejte výsledek s hodnotou nalezenou v tabulkách či na internetu.
- Jak závisí proud na vlhkosti špejle?
- Co z uvedených pokusů plyne pro bezpečnost v případě například vyprošťování člověka zasaženého elektrickým proudem?

Poznámky:

V závislost na vlhkosti špejle se proud může měnit o mnoho řádů. V otázce c) nám jde jen o kvalitativní závislost. Také měrný odpor dřeva závisí na vlhkosti velmi podstatně.

V pokusu 2 si lze všimnout, jak se proud špejlí mění s časem, a porovnat to s výsledky pokusu 4.4.2. Tyto a další aspekty pokusů jsou dále diskutovány v materiálech na přiloženém CD.



#### 4.4.4 Malý proud můžeme zesílit

V tomto pokusu ukážeme, jak lze slabý proud zesílit tranzistorem.

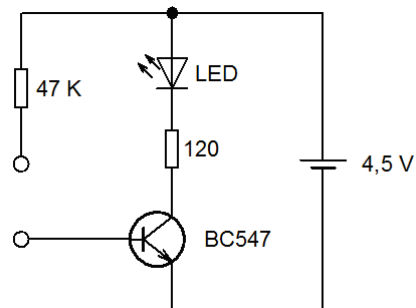
Provedení pokusu:

Zapojte tranzistor podle schématu. Proud v kolektorovém obvodu bude indikovat svítivá dioda (LED).

Jsou-li svorky rozpojené, LED nesvítí. Při spojení svorek se LED rozsvítí.

Co lze zkoumat:

- Změřte proud tekoucí do báze tranzistoru a porovnejte ho s proudem tekoucím svítivou diodou.
- Propojte svorky vlastními navlhčenými prsty. Rozsvítí se LED?
- Zkoušejte propojit svorky suchou špejlí, navlhčenou špejlí, rezistorem o odporu  $10\text{ M}\Omega$ . Ve kterých případech bude LED alespoň slabounce svítit?



Poznámky:

I při přímém propojení svorek je proud tekoucí do báze tranzistoru jen malý, pouze asi  $0,1\text{ mA}$ ; svítivou diodou přitom prochází proud podstatně větší, zhruba  $20\text{ mA}$ .

Při propojení svorek rezistorem o odporu  $10\text{ M}\Omega$  teče do báze tranzistoru proud přibližně  $0,4\text{ }\mu\text{A}$ ; svítivou diodou v tomto případě poteče proud asi  $0,1\text{--}0,2\text{ mA}$ , při zastínění LED by mělo být vidět, že slabě svítí.

I vodivost lidského těla stačí k tomu, aby proud do báze po zesílení rozsvítil LED. Uvádí se, že změny odporu kůže se využívají i v detektoru lži – to by mohlo sloužit jako motivace k pokusům, jako je tento. Naše zařízení je ale pro detektor lži příliš primitivní, takže se nemusíme obávat, že by se hodina fyziky zvrhla v zasedání vyšetřovací komise či inkviziční tribunál. :-)

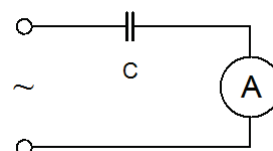
Proud suchou špejlí je typicky příliš malý, než aby na něj naše zařízení reagovalo.

#### 4.4.5 Střídavý proud prochází kondenzátorem

Tento pokus demonstruje, jak střídavý proud prochází i kondenzátorem o malé kapacitě.

Provedení pokusu:

Zapojte obvod podle schématu. Kondenzátor si zhotovte sami ze dvou kusů alobalu, které oddělíte plastovou fólií, např. euroobalem. Můžete také použít kondenzátor z plastových kelímků a alobalových polepů popsany výše v kap. 3.4.2. Pro napájení použijte zdroj střídavého napětí  $6\text{ až }12\text{ V}$  o frekvenci  $50\text{ Hz}$ , tedy přetransformované napětí ze sítě. Ampérmetrem změřte procházející proud.



Co lze zkoumat:

- Jak velký proud prochází kondenzátorem?
- Jak se velikost proudu změní, když elektrody kondenzátoru přitiskneme k sobě?
- Jak závisí na ploše elektrod (resp. na tom, na jak velké ploše se překrývají)?
- Jak proud kondenzátorem závisí na napětí?

Poznámky:

Na začátku pokusu je vhodné ukázat, že fólie opravdu izoluje, tj. že jí neprochází stejnosměrný proud. (Pro další měření pak nezapomeňte ampérmetr přepnout na měření střídavého proudu.) Do série s ampérmetrem je bezpečnější zapojit rezistor o odporu dejme tomu  $100\ \Omega$  na ochranu proti zkratu.

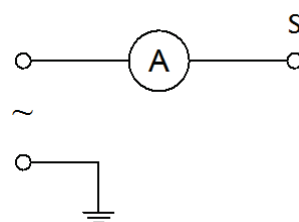
Pro zájemce o kvantitativní výpočty lze z naměřeného proudu vypočítat kapacitu kondenzátoru.

#### 4.4.6 Střídavý proud může téci do člověka stojícího na izolované podložce

Jde o variantu předchozího pokusu. Kondenzátorem bude nyní kapacita člověka vůči zemi.

Provedení pokusu:

*Jeden pól zdroje střídavého napětí 6–12 V uzemněte, ke druhému připojte ampérmetr. Svorky S se dotkněte – můžete přitom stát na izolační podložce (například polystyrenové desce). Změřte proud, který do vás prochází.*



Při pokusu měříte kapacitní proud, který do vás prochází. (Obvod se uzavírá přes kapacitu vašeho těla vzhledem k zemi.)

Co lze zkoumat a diskutovat:

- a) Jak závisí velikost proudu na napětí zdroje?
- b) Jak velký proud by vámi procházel, kdyby napětí zdroje bylo 230 V? Mohl by tento proud rozsvítit malou doutnavku?
- c) Problém pro ty, kdo mají rádi výpočty: Odhadněte z výsledku pokusu vaši kapacitu (vůči zemi).

Poznámka:

V souvislosti s otázkou b) lze diskutovat funkci fázové zkoušečky s doutnavkou a samozřejmě při této příležitosti vyzkoušet, jak indikuje, ve které zdířce v zásuvce je fáze.

Kapacitu člověka, vypočtenou v rámci otázky c), lze porovnat s hodnotou zjištěnou v měření v kap. 3.4.5.

## 5. Závěrem

V celé příručce jsme se věnovali zejména pokusům, které mohou přispět k pochopení základních pojmů a jevů z oblasti elektrostatiky a elektrických obvodů. Jak ale reagovat na případné dotazy žáků, zda nejde o oblasti již „prastaré“, v nichž se nic nového neděje a které nás nemusí ve 21. století vlastně zajímat?

Nejlépe tak, že to není pravda. I když elektrické jevy jsou známy od starověku a staré indukční elektriky a další elektrostatické generátory se hezky vyjímají v technických muzeích, neznamená to, že by na tuto oblast fyziky jen padal prach. Elektrostatické přitahování se využívá při nanášení barev a dalších materiálů (nechte své žáky na webu vyhledat například termín *electrostatic coating*) a v elektrostatických odlučovačích (heslo *electrostatic precipitation* má na webu přes 2 milióny odkazů), elektrostatické odpuzování v kopírovacích strojích („xeroxech“) a laserových tiskárnách. Zde už jde počet webových odkazů do stamilionů, ale najít vysvětlení principu těchto zařízení asi bude pro žáky hračkou, např. na webu [6], ale informace jsou i na řadě českých stránek.

Elektrostatika se využívá i tam, kde bychom ji možná nečekali. Například většina levných mikrofónů k počítačům, v hlasových záznamnících apod. jsou elektretové mikrofony. Princip funkce lze opět najít na webu. Nebo vaše žáky více zaujme něco ze současných pokročilých technologií, třeba tvorba nanovláken? Nechte je vyhledat hesla *electrospinning*, nebo *nanospider* – u druhého z nich se poučí, jak v tomto oboru můžeme být hrdi i na výzkum na Technické univerzitě v Liberci.

Pokud by ani toto někomu nestačilo, snad ho o tom, že i oblast elektrostatiky je živoucí vědeckou disciplínou, může přesvědčit existence časopisu *Journal of Electrostatics* vydávaného renomovaným nakladatelstvím Elsevier.

A elektrické obvody? Ty jsou v současném světě všude kolem nás. Ani je nevnímáme. Ale kdyby náraz přestal platit Ohmův zákon nebo jeden z Kirchoffových zákonů, už bychom si ani mobilem ani na Facebooku neřekli, co se to vlastně děje. Naše moderní technologie by přestaly fungovat, jako když sfoukne svíčku. Naštěstí takováto představa patří jen do katastrofických sci-fi; fyzikální zákony se takhle macešsky nechovají.

A budou-li žáci oponovat, že v běžném životě se bez jejich znalostí obejdeme a nechce-li být člověk inženýr či přírodovědec, stačí mu jen umět zmáčknout správný knoflík či kliknout na tu pravou ikonu na obrazovce? Jistě, ale člověk se odjakživa snažil vyznat ve světě kolem sebe, chápat ho – a pak toho pochopení také využít. A k tomu pochopení by dnes mělo patřit alespoň základní povědomí o principech využívaných ve všech těch „černých skříňkách“ kolem nás.

Pokud k tomu pochopení u vašich žáků a studentů přispějí alespoň některé z pokusů, které jsme popsali v této příručce, pak splnila svůj účel.

# Literatura

## Citovaná literatura

- [1] Moore A. D.: *Electrostatics. Exploring, controlling and using static electricity*. 2nd ed. Laplacian Press, Morgan Hill CA, 1997.
- [2] Morse, R. A.: *Teaching about Electrostatics*. AATP, College Park, 1992.
- [3] Larson, C. O. and Goss, E. W.: *A Coulomb's Law Balance Suitable for Physics Majors and Nonscience Students*. Am. J. Phys. **38** (1970), 1349-1352
- [4] *Next Time Questions*. Dostupné online: <http://www.arborsci.com/next-time-questions>
- [5] <http://kdf.mff.cuni.cz/pokusy/> – úlohy č. 894 a 965
- [6] *Howstuffworks*. Dostupné online: <http://www.howstuffworks.com/>

## Další literatura, z níž lze čerpat informace a náměty na pokusy

Náměty a návody na pokusy týkající se elektrostatiky a elektrických obvodů lze najít v řadě učebnic, příruček a skript, například:

Svoboda E. a kol.: *Pokusy z fyziky na střední škole 3*. Prometheus, Praha 1999.

Svoboda M. a kol.: *Praktikum školních pokusů I*. Karolinum, Praha, 1993.

Ze starších pak např.:

Hlavička A.: *Pokusy z elektřiny I a II*. SPN, Praha 1955.

Mnoho námětů na pokusy včetně jejich inovovaných variant se samozřejmě objevuje na konferencích věnovaných fyzikálnímu vzdělávání a lze je tedy nalézt ve sbornících těchto konferencí. Jde zejména o konference Veletrh nápadů učitelů fyziky, Dílny Heuréky, konference ve Vlachovicích a další. Řada těchto příspěvků je dnes dostupných i v souhrnných sbornících, například:

*Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání*. („Supersborník“ vybraných příspěvků konference Veletrhu nápadů učitelů fyziky.) Dostupné online: <http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/>

Dvořák L. a kol. (ed.): *Dílny Heuréky 2009-2010. Sborník konferencí projektu Heuréka*. (sborník na CD – jako bonus zahrnuje i sborníky z let 2003-2008). Prometheus, Praha, 2011.

Návody na „klasické“ školní pokusy z elektřiny a magnetismu doplněné krátkými instruktážními videoklipy lze nalézt na nových stránkách:

Šabatka Z. a kol.: *Sbírka fyzikálních pokusů*. Dostupné online: <http://kdf.mff.cuni.cz/pokusy/>.

O miskoncepcích žáků a studentů, včetně miskoncepcí týkajících se elektrických obvodů, se lze poučit v nové publikaci:

Mandíková D., Trna J.: *Žákovské nekoncepce ve výuce fyziky*. Paido, Brno, 2011. ISBN 978-80-7315-226-0