

Náboje a kapacita – jednoduché pokusy pro rozvoj fyzikálního porozumění

Leoš DVOŘÁK

Abstrakt

V dílně si účastníci vyzkoušeli, případně sledovali jednoduché pokusy z oblasti elektrostatiky zaměřené jednak na vzájemné působení nabitých těles a jednak na vybudování pojmu kapacita od kvalitativních ukázek až po kvantitativní měření. Písemná forma příspěvku stručně připomene některé pokusy a uvede odkazy, kde jsou blíže popsány.

Charges and capacity – simple experiments to develop physics understanding

Abstract

In the workshop the participants could try or see simple electrostatics experiments aimed at interaction of charged bodies and building the concept of capacity. The experiments ranged from simple qualitative ones to quantitative measurements. In this article, some of these experiments are briefly mentioned and links to papers where the experiments are described in greater details are presented.

Úvod

Dílna byla ukázkou a přehledem sady experimentů, které byly většinou popsány již dříve v různých článcích a příspěvcích [1–7]. Některé z nich jsou volně dostupné na internetu; pro čtenáře může být zajímavá zejména publikace [1]. V následujícím přehledu spíše stručně připomeneme pokusy předváděné na dílně a nastíníme některé možnosti jejich využití ve výuce. Pokusy můžeme rozdělit na dvě skupiny. První můžeme trochu volně nazvat „**Elektrostatika s brčkou**“, další skupina bude věnována kapacitě.

Nabitá brčka se přitahuje ke stěně či jinému povrchu.

Většinu plastových brček můžeme nabít třením, například kapesníkem. Dobře se hodí papírové kapesníky. Pokusy dobře vycházejí s novými kapesníky vyndanými z balíčku; předem je třeba vyzkoušet, zda brčka, která máme, se dobře nabíjejí.

Nabitá brčka se přitahuje ke stěnám, k lavicím, stolům, ale i ke kovovým předmětům. To, že drží na vodičích, může působit na první pohled překvapivě. Je ale jasné, že záporně nabitá brčka si elektrostatickou indukcí přitáhne ze vzdálených částí kladný náboj, k němuž je přitahováno. Protože je dobrým izolantem, náboje na těch jeho částech, které se přímo nedotýkají kovu, se nevybijí.

Uvedený experiment je pro žáky dobrou motivací – zkoušejí, na kterých předmětech brčko drží, mohou sledovat, jak dlouho na stěně či jiném povrchu vydrží (může to být i doba řádu dnů!), apod. Na úvodní úrovni není nutno vysvětlovat, proč se brčko ke stěně přitahuje (mluvit

o polarizaci v úvodu elektrostatiky by bylo příliš), stačí, že jednoduché úvodní pozorování ukazuje na existenci přitažlivých sil.

Nabitá brčka se vzájemně odpuzují

Dvě nabitá brčka nabijeme třením a držíme je za konce, jen lehce ve dvou prstech, každé brčko v jedné ruce. Přiblížíme-li brčka k sobě, cítíme, že se odpuzují. (Sílu v prstech jasně cítíme i díky tomu, že brčka působí jako páky: síla elektrostatického odpuzování působí na delším rameni, prsty drží brčka jen na krátkém rameni.)

Opět jde o zcela základní pozorování: síly mezi nabitými předměty mohou být i odpudivé.

Jednoduché indikátory elektrického pole

Elektrostatické pole, resp. blízkost elektrických nábojů lze indikovat jednoduchými zařízeními, využívajícími rovněž plastová brčka. Stačí propíchnout brčko špendlíkem, aby se mohlo otáčet, jeden jeho konec nabít třením – a poměrně citlivý indikátor je hotov. Jinou možností je dát brčko na „lodičku“ z plastového kalíšku. Lépe než slovní popis to ukážou fotografie, které se však do tohoto příspěvku nevejdou; zájemce můžeme odkázat na obrázky 4 až 7 ve volně přístupném článku [4].

Odhad velikosti náboje na nabitém brčku

Všichni jsme se v hodinách fyziky učili, že jednotkou náboje je 1 coulomb, málokdo však máme představu, jaká je například velikost náboje na příslovečné ebonitové tyči zelektrované třením liščíím ohonem. Nebo na plastovém brčku nabitým třením papírovým kapesníkem. I učitelé fyziky a účastníci konferencí o fyzikálním vzdělávání, pokud je necháme odhadnout velikost náboje na brčku, se ve svých odhadech často liší o mnoho řádů, od desítek či stovek pC až po milicoulomby.

Na odhad velikosti náboje prostě nemáme zkušenost a „fyzikální cit“. Představme si, že podobně bychom s rozptylem více než šesti řádů odhadovali délky. To bychom délku brčka odhadovali od zlomků milimetru až po skoro kilometr! Laikové občas zkusí jako odhad říct i jednotky coulombů. To je dobrá příležitost komentovat velikost členu $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ v Coulombově zákoně: Dva náboje o velikosti 1 C vzdálené 1 m by se odpuzovaly silou téměř 10^{10} N, což odpovídá tíze miliónu tun. To by asi neudržel ani Superman...

S využitím Coulombova zákona lze ale náboje na brčkách docela dobře přibližně určit. Stačí nabitá brčka držet nad sebou tak, aby tíha horního brčka byla vyvážena silou elektrostatického odpuzování. (Brčka držíme vodorovně, horní jen velmi lehce, viz obr. 3 v [4], jejich vzdálenost r je obvykle několik cm.) Považujeme-li náboje brček za přibližně stejné (označíme je Q), je odpudivá síla podle Coulombova zákona $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{r^2}$. V našem případě je rovna mg , kde m je hmotnost brčka (cca 0,5 g, lze změřit malými digitálními váhami). Odsud už lze vypočítat Q .

Samozřejmě, náš odhad je jistě velmi nepřesný: brčka přece nejsou bodové náboje! Přesnější výpočet, který se do tohoto příspěvku nevejde, však ukáže, že chyba, kterou dělá-

me, není řádová. (Zde uvedený přibližný výpočet vede k podcenění hodnoty náboje, skutečná hodnota však obvykle není více než dvojnásobkem našeho odhadu.)

A jak velký náboj je na brčku zeлектроvaném třením? Desítky nanocoulombů. Na větší plastové tyči může být náboj až stovky nC.

Indikátor s bipolárními tranzistory

Polovodičové indikátory elektrostatického pole obvykle využívají tranzistory řízené polem. Proto může být trochu překvapivé, že jednoduchý elektrostatický indikátor lze postavit se dvěma či třemi běžnými bipolárními tranzistory, např. typu BC547C, resp. BC337. Tento typ indikátoru byl popsán již v příspěvku [5] na Veletrhu nápadů učitelů fyziky. Podrobnější popis indikátoru, jeho vlastností a pokusů s ním lze najít v článkách [6] a [7], jednoduchou variantu se dvěma tranzistory a LED pak v kapitole 3.1.4 publikace [1]. Tento indikátor je také velmi vděčnou konstrukcí, kterou si mohou sami vyrobit učitelé i žáci, viz [8].

Poznamenejme, že daný přístroj ve skutečnosti indikuje malé proudy přicházející do vstupní elektrody. Neindikuje tedy samotné elektrické pole, ale jeho změny. Například změny, které působí nabitá tyč, kterou přibližujeme a zase vzdalujeme od vstupní elektrody. Pohyb větší plastové tyče lze indikovat na vzdálenost přes jeden metr.

Pokusy týkající se kapacity

Cílem následujících pokusů je spíše intuitivně vybudovat pojem kapacita a seznámit se s kondenzátorem a jeho vlastnostmi.

Velká a malá plechovka

Velkou a malou plechovku postavíme vedle sebe na izolační podložky a propojíme kouskem vodiče. Malá plechovka může být např. od kondenzovaného mléka, velká plechovka by měla mít rozměry řádu desítek cm, takové lze získat např. ve školní kuchyni. Izolačními podložkami mohou být např. plastové kelímky. Vodič, např. kousek drátu, jen lehce položíme na plechovky shora, abychom ho mohli snadno odstranit, např. plastovým brčkem, a plechovky přitom nevybít.

Spojené plechovky nabijeme na vysoké napětí. Ideálním zdrojem je školní zdroj vysokého napětí, který dává 10 kV i více. Pokud jej nemáme, lze plechovky nabít i větší plastovou tyčí.

Plechovky nabijeme a odstraníme vodič, který je spojoval. Pak požádáme dobrovolníka (žáka či studenta), aby si nejprve sáhl na malou, a poté na velkou plechovku. Od malé plechovky dostane malou, někdy téměř neznatelnou „ránu“, od velké plechovky ránu výrazně citelnější. Obě plechovky byly spojené – pokud už žáci znají pojem napětí, můžeme říci, že na obou plechovkách bylo stejné napětí vůči zemi (případně na vyšší úrovni lze použít i termín potenciál). Protože ale větší plechovka dala větší ránu, evidentně na ní „něčeho“ bylo víc. Pro ono „něco“ jsme zřejmě už dříve použili termín náboj. Větší plechovka má tedy vyšší schopnost – vyšší kapacitu – pojmout při stejném napětí více náboje. Kvalitativně jsme tedy dospěli k pojmu kapacita a snad pro to získali i trochu fyzikální cit.

Odhadovat množství náboje pomocí toho, jak velkou ránu pocítíme, když se nabitá plechovky dotkneme, může vypadat velmi nefyzikálně. Kupodivu ale tuto metodu již v historii nejméně jeden fyzik využil, a to nikdo menší než Henry Cavendish – viz velmi zajímavý

článek [9]. (Cavendish tímto způsobem neodhadoval náboj, ale proud, a objevil tak dlouho před G. S. Ohmem vztah, který dnes známe jako Ohmův zákon.)

Kondenzátor má větší kapacitu než izolovaný vodič podobných rozměrů

Na vnější povrch plastového kelímku nalepíme alobal. (Lze jej přilepit izolepou, dno můžeme nechat nepolepené.) Do druhého kelímku vlepíme alobal na vnitřní povrch, kousek alobalu necháme přečnívat ven jako vývod. Pokud nabijeme z VN zdroje jen jeden polepený kelímek stojící na izolované podložce, dostaneme při dotyku jen malou ránu, případně, při vybití vůči zemi (uzemněním může být např. kolík zásuvky), přeskočí jen malá jiskřička. Vsuneme-li kelímky do sebe, vzniknou dvě elektrody oddělené dielektrikem – vytvořili jsme kondenzátor. Po nabití VN zdrojem na 5 nebo 10 kV a odpojení zdroje při vybití přeskočí výrazná jiskra a je slyšet „prásknutí“. Je zřejmé, že kondenzátor nashromáždil mnohem větší množství náboje, má tedy podstatně větší kapacitu, než izolovaný vodič. (Poznámka: Zde už je na místě určitá opatrnost: vybíjet kondenzátor rukama dá velmi citelnou ránu a rozhodně by tento pokus neměli provádět jedinci lekávi, se slabším srdcem a už vůbec ne jedinci s kardiostimulátorem nebo podobnými pomůckami! Ty bychom vůbec měli z podobných elektrostatických pokusů vyloučit.)

Vybíjení různých kondenzátorů do LED

Jde o kvalitativní pokus. Několik různých kondenzátorů (např. 4,7 μF , 47 μF , 470 μF a 4,7 mF) nabitých z malé baterie 9 V necháme postupně vybíjet přes rezistor o odporu 390 Ω (může být v rozsahu asi 330 až 470 Ω). S kondenzátory o menších kapacitách LED blikne krátce, při větší kapacitě je svit výrazně delší. Pokus lze využít k diskusi o souvislosti náboje s proudem: na větším kondenzátoru je větší náboj, ten vydrží protékat LEDkou delší dobu. (Podrobněji viz kap. 3.4.4 v [1].)

Postupné přidávání náboje do kondenzátoru

Ke kondenzátoru 10 μF připojíme paralelně voltmetr (multimetr); kondenzátor vybíjeme. Voltmetr samozřejmě ukazuje nulové napětí.

Kondenzátor 0,1 μF nabijeme baterií 9 V a vybíjeme jej do kondenzátoru 10 μF . Nabití „malého kondenzátoru“ a jeho vybití do „velkého“ opakujeme a sledujeme napětí na voltmetru. Napětí roste v každém kroku vždy asi o 90 mV.

Interpretace: „Malý“ kondenzátor je z baterie nabit vždy na stejný náboj a prakticky celý tento náboj odevzdá do „velkého“ kondenzátoru. Pokus ukazuje, že napětí na velkém kondenzátoru je přímo úměrné počtu kroků – tedy přímo úměrné dodanému náboji. Z pokusu tedy vyplývá, že napětí na kondenzátoru je přímo úměrné náboji na něm: $U = k \cdot Q$. Pak už se stačí dohodnout, že konstantu k budeme označovat jako $\frac{1}{C}$ a získáme známý vzorec

$$Q = C \cdot U.$$

Technické poznámky: Je potřeba použít multimetr s dostatečně vysokým vstupním odporem. Běžné multimetry, kromě nejlevnějších, mají vstupní odpor 10 M Ω , což vyhoví, pokud opakované přivádění náboje provádíme dosti rychle. (Za 1 s napětí na velkém kondenzátoru poklesne asi o 1 %. Pokud chceme chyby zmenšit, lze použít kondenzátory vyšších kapacit.) Dále je jasné, že přímá úměrnost mezi počtem kroků a napětím na kondenzátoru platí

(přibližně) jen pro malý počet kroků, kdy napětí na větším kondenzátoru je dost nízké. Podrobněji viz kap. 3.4.3 v [1]

Jakou má kdo kapacitu? (Měření náboje na plechovkách a na člověku)

K následujícímu napětí potřebujeme VN zdroj o známém napětí (např. 10 kV) a měřič náboje. Plechovku umístěnou na izolované podložce nabijeme napětím U (např. 10 kV) proti zemi, pak VN zdroj odpojíme a změříme náboj Q na plechovce. Kapacitu plechovky (coby izolovaného vodiče) určíme ze vztahu $C = \frac{Q}{U}$. Pro malou plechovku vychází kapacita několik pikofaradů, pro velkou plechovku až kolem 20 pF. Zde můžeme pro zajímavost připomenout, že historicky se kapacita měřila v centimetrech, že kapacita osamocené koule o poloměru 1 cm je asi 1,1 pF a obecně je kapacita koule úměrná jejímu poloměru. Plechovka sice není koule, ale závislost na rozměrech lze očekávat zhruba stejnou.

Atraktivním experimentem je změřit kapacitu člověka stojícího na izolační podložce. Provedeme to stejně jako s plechovkou: člověka nabijeme z VN zdroje, změříme jeho náboj a vypočteme jeho kapacitu. Bývá asi 80 až 100 pF; můžeme přitom diskutovat, „kdo je větší kapacita“.

Jiná možnost, jak měřit kapacitu člověka

Poznamenejme, že kapacitu člověka je možno měřit i pomocí střídavého proudu. Zdrojem napětí může být například školní transformátor s výstupem 12 V. Jeden jeho vývod uzemníme, jeden přes rezistor R o odporu např. 1 M Ω přivedeme na člověka stojícího na izolační podložce. K rezistoru paralelně připojíme multimetr a měříme střídavé napětí na R . Tím určíme proud a z něj a známého napětí zdroje impedanci člověka při frekvenci 50 Hz. Z impedance pak už jednoduše určíme kapacitu.

Závěr

Výše uvedené stručné popisy pokusy spíše jen nastínily. Přesto doufám, že spolu s literaturou [1–8] mohou být pro výuku na různých stupních škol vhodnou inspirací.

Literatura

1. DVOŘÁK L., ŠABATKA Z., KOUDELKOVÁ V., DVOŘÁKOVÁ I. Náboje, proudy, elektrické obvody, P3K Praha, 2012, 60 s., ISBN 978-80-87186-78-7. Dostupné na World Wide Web: <<http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/naboje.pdf>>.
2. DVOŘÁK L. Náboje kam se podíváš. In.: Dílny Heuréky 2009-2010. Sborník konferencí projektu Heuréka (Náchod, 2.–4. 10. 2009, 1.–3. 10. 2010). Editoři: L. Dvořák, I. Dvořáková, V. Koudelková. Prometheus, Praha 2011. ISBN 978-80-7196-424-7. s. 13–33.
3. DVOŘÁK L. Kondenzátory a cívky. In: Dílny Heuréky 2011. Sborník konference projektu Heuréka (Náchod, 30. 9. – 2. 10. 2011). Editoři: L. Dvořák, I. Dvořáková, V. Koudelková. Prometheus, Praha 2011. ISBN 978-80-7196-426-1. s. 19–42.
4. DVOŘÁK L. Low-cost electrostatic experiments. Latin American Journal of Physics Education, Volume 6, Suppl. I, August 2012, 153–158. Dostupné na World Wide Web: <http://www.lajpe.org/icpe2011/28_Leos_Dvorak.pdf>.

5. DVOŘÁK L. Netradiční měřicí přístroje 2: Indikátor malých proudů In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 7. Prometheus, Praha, 2002, s. 143–148. Dostupné na World Wide Web: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/pdf/07-03-Dvorak_L.pdf>.
6. DVOŘÁK L. Bipolar transistors can detect charge in electrostatic experiments Phys. Educ. 47 (2012), p. 434–438.
7. DVOŘÁK L, PLANINŠIČ G. Experiments with charge indicator based on bipolar transistors Phys. Educ. 47 (2012), p. 721–727.
8. DVOŘÁK L. Polovodiče a jejich aplikace, P3K Praha, 2012, 44 s., ISBN 978-80-87186-83-1. Dostupné na World Wide Web: <<http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/polovodice.pdf>>
9. STEPHENSON R. J. The Electrical Researches of the Hon. Henry Cavendish, F. R. S. The American Physics Teacher (Am. J. Phys.) 6 (No. 2, April 1938), p. 55–58.

Kontaktní adresa

doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc.

katedra didaktiky fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta UK v Praze

V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

Telefon: +420 221 922 409

E-mail: leos.dvorak@mff.cuni.cz