

# Hrátky s elektrickým nábojem

Leoš Dvořák

KDF MFF UK Praha; leos.dvorak@mff.cuni.cz

Elektrostatika je oblast nabízející spoustu krásných pokusů, které mohou zaujmout žáky všech věkových kategorií. Provedení pokusů však občas může být „noční můrou“ a výsledek je nutno někdy komentovat známými slovy „vzduch je vlhký, pokusy se nedaří“.

V příspěvku chci stručně popsat několik pokusů, které snad mají šanci vycházet i v poněkud méně příznivých podmínkách. (Alespoň někdy, alespoň některé... :-)) Jde ve většině případů o varianty známých a leckdy velice starých pokusů – snad ale některé mohou být pro čtenáře něčím nové nebo mu poskytnout inspiraci.

Vzhledem k zaměření semináře se omezují hlavně na pokusy kvalitativní; pouze v několika případech se zmíníme o kvantitativních údajích a výsledcích. Některé možnosti jednoduchých kvantitativních měření jsou popsány v [1-3].

## Plastové brčko – mnohostranná pomůcka

V učebnicích fyziky pro ZŠ se často jako úvodní uvádějí pokusy s plastovými sáčky. Výbornou pomůckou jsou ale také obyčejná plastová brčka. Právě na ně se v dalším soustředíme. Brčko zelektrujeme třením vhodnou látkou, materiál je třeba vyzkoušet. Velmi vhodným materiálem pro tření jsou papírové kapesníky. Brčko není třeba třít mnohokrát, spíš kapesník na brčko pořádně přitlačit.

## Základní pozorování a pokusy

Asi nejjednodušším úvodním pokusem je ukázat, že elektrované brčko **drží na tabuli**, na zdi a na dalších předmětech. (Z hladkých předmětů samozřejmě někdy klouže dolů, vhodné předměty ve vaší třídě je opět třeba předem vyzkoušet.) Vysvětlit, proč se brčko na předmětech „drží“, je asi věcí spíše pozdějšího výkladu – mluvit hned u prvního pokusu o tom, že zeď či tabule se polarizují či vykládat dokonce o natočení molekul apod. by žáky asi spíš zmátlo. Jde o jeden z příkladů, kdy i velmi jednoduché pokusy nemají úplně jednoduché vysvětlení.

Prý i vzdělání lidé někdy tvrdí, že brčko se udrží jen na izolantech. Jednoduchý pokus nás ale přesvědčí, že brčko se udrží i na kovech: na rouře ústředního topení, na plechovce, atd. A třeba i na naší ruce, která je také vodivá. Není těžké to pochopit: záporně nabitá brčka k sobě ve vodiči přitáhne kladné náboje (resp. odpudí volné elektrony, což je totéž, jako by přitáhlo kladné náboje), ty jsou tedy ve vodiči poblíž brčka a brčko přitahuje. Možná by někdo namítl, že dotyk s vodičem brčko vybije. To ale platí jen pro ty části brčka, které se bezprostředně dotýkají vodiče. Značná část brčka ale není s vodičem v přímém kontaktu a náboje na této části nikam neodcházejí, protože brčko je výborný izolant.

Jak dlouho brčko drží na tabuli či dalších materiálech, záleží na řadě okolností. Někdy vydrží i řadu hodin.

Že se dvě stejně nabitá brčka **odpuzují**, víme všichni. Pro někoho je však překvapivé, že sílu, kterou se odpuzují, můžeme cítit vlastníma rukama. Zelektrujte dvě brčka a držte je v prstech za konce, každé jednou rukou tak, aby byly rovnoběžně ve vzdálenosti zhruba jeden až dva centimetry. To, že se odpuzují, je pak v prstech jasně cítit.

Samozřejmě, jako učitelé fyziky si uvědomujeme, že nám zde „nahrává“ fakt, že brčka držíme v prstech na konci a síla, kterou se brčka odpuzují, působí po celé délce brček, i na druhém konci, tedy vlastně „na velké páce“ (řečeno nefyzikálně, ale snad názorně). To, co v prstech cítíme, je vlastně moment síly, a protože brčko je dlouhé přes patnáct centimetrů, projeví se i malá síla dosti výrazně. To ale nic nemění na tom, že je to možná nejjednodušší pokus, kdy žáci mohou cítit odpuzování nábojů „na vlastní kůži“.

## Jednoduché indikátory

Z brčka, jehož jeden konec nabijeme třením, můžeme udělat řadu jednoduchých pomůcek, které budou indikovat elektrostatické pole resp. blízkost jiných nábojů.

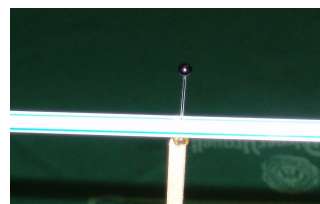
Snad nejjednodušší jsou „**torzní váhy**“. Brčko provlékneme očkem kancelářské sponky, kterou jsme předem navázali na tenkou nit. Nit držíme v ruce nebo přivážeme na vhodný závěs, vodorovné brčko se může relativně volně otáčet. (Nit, poté co se trochu rozkroučí, brčko vrací do rovnovážné polohy, ale poměrně malým momentem. Brčko se snadno natáčí i při velmi malé síle působící na jeho konec.) Jeden konec brčka ze-



volně otáčet. Jeden konec brčka třením zelektrujeme a opět máme citlivý indikátor.



Druhou možností je přístroj, kterému bychom mohli říkat „**elektrický kompas**“. Brčko v polovině propíchneme silnějším špendlíkem, např. zavíracím. Otvorem prostrčíme tenčí špendlík, který zapíchneme do konce silnější špejle (nebo jej ke konci špejle přilepíme izolepou). Mezi konec špejle a brčko je ještě vhodné dát na špendlík malý korálek, abychom zmenšili tření. Špejli postavíme svisle, např. spodní konec zapíchneme do kusu polystyrénu. Brčko se kolem svislé osy tvořené špendlíkem může



Variantou zajímavou možná spíše pro mladší žáky je **brčko na lodičce** například z plastového kelímku nebo dna PET láhve. Kelímek i PET láhev je vhodné uštíhnout tak, aby lodička nebyla příliš vysoká a nekácela se. Pro brčko na horní straně lodičky vystříháme dva zářezy, do nichž zapadne, aby z lodičky snadno nespadlo. Konec brčka zelektrujeme – a druhým nabitým brčkem můžeme lodičku na vodě snadno otáčet i pohánět po hladině.

Pokud nám takto malé indikátory nestačí, můžeme brčko nasadit na delší tyčinku uvázanou na niti. Náš indikátor pak může mít délku mnoho desítek centimetrů. Je ale

jasné, že je vhodné mít co nejtenčí tyčinku, aby neměla příliš velký moment setrvačnosti. Ve vymýšlení variant ještě větších indikátorů se meze nekladou.

## Pokusy s vyrobenými indikátory

Co můžeme s vyrobenými indikátory demonstrovat?

Nejjednodušší pokus je jasný: Druhé plastové **brčko**, rovněž záporně nabitě, **odpuje** zelektrovaný konec našeho indikátoru. Kvalitativně lze ukázat i to, že při větší vzdálenosti je působení slabší, při menší vzdálenosti je síla větší. (Poznámka: Netvrďme přitom raději, že síla klesá jako  $1/r^2$ . To platí pro bodové náboje nebo nabitě kuličky. Pro rovnoběžná brčka síla klesá spíše jako  $1/r$ ; přesně to platí pro nabitě rovnoběžné přímky. Máme-li brčka kolmo, je to ještě trochu jinak, ale tím zde náš popis nebudeme komplikovat.)

Naopak **sklo** zelektrované třením **přitahuje** zelektrovaný konec indikátoru. Nemáme-li skleněnou tyč, můžeme použít zkumavku. Velikost náboje na skleněné tyči bývá menší než na tyči plastové, takže kladný náboj na skle bývá obtížnější demonstrovat. Náš indikátor, zejména ten s brčkem otočným kolem špendlíku, je však dostatečně citlivý, takže umožňuje přitahování ukázat.

Upozorníme ještě, že zelektrovaný konec brčka se **přitahuje i k našemu prstu** či ruce, i když nejsme nabití. Jde o stejný jev, jakým je přitahování brčka k vodičům popsané výše. (Záporně nabitě brčko přitáhne do našeho prstu kladné náboje resp. odpudí z něj záporné.) S tímto jevem je však nutno počítat a žákům ho vysvětlit.

Zajímavé je vyzkoušet, **jak je nabitá izolepa**, kterou odlepíme z podkladu, například při odvíjení izolepy z ruličky. Indikátor ukáže, že proužek izolepy je nabit kladně.

V této souvislosti je vhodné připomenout, že díky tomu, že se většinou mluví o nabíjení tyčí třením, by mohla v žácích vzniknout představa, že je nutno materiál pro zelektrování opravdu třít. Ve skutečnosti pro nabíjení stačí **oddělit různé materiály**, které byly předtím v kontaktu. Je to vidět už ve zmíněném pokusu s izolepou. Lze to demonstrovat také s některými typy průhledných plastových desek formátu A4 (vhodné jsou desky tuhé a zcela hladké, já používám desky značky Eselte). Přitiskneme-li na tyto desky kancelářský papír a dobře uhladíme, lze ukázat, že desky s papírem (který se jich stále dotýká) jsou prakticky nenabitě. Oddělíme-li však papír, je na deskách velký záporný náboj. (Na papíře by zbyl kladný náboj, držíme-li však papír v rukou, vybije se přes naše tělo, protože není dobrý izolant.)

A proč elektrujeme brčka a tyče třením? Zkuste tento problém zadat žákům, snad se najde někdo, kdo vymyslí, že jde právě o to, dostat materiál tyče a látku nebo papír co nejvíce do kontaktu.

## Jak velké náboje máme na brčkách a tyčích?

Pokusů s brčky, nabitými tyčemi a dalšími objekty děláme či můžeme dělat spoustu. Ale máme představu o tom, o jak velké náboje se v daných pokusech jedná? Tato otázka už jde samozřejmě nad rámec ZŠ – ale pro náš určitý nadhled by nemuselo být špatné mít alespoň řádový odhad velikostí nábojů. Coulomby to asi nebudou, o takových nábojích víme, že jsou příliš velké. Jsou to tedy tisíce coulombů? Nebo ještě méně?

Kupodivu hrubý odhad můžeme udělat i na základě velmi jednoduchých pokusů. Zde nebudeme prezentovat příslušné podrobnější výpočty (pro zájemce budou k dispo-

zici v [1]), ale alespoň naznačíme, jak bychom k velikosti nábojů došli a uvedeme příslušné výsledky.

### **Odhadujeme náboj na zelektrovaném brčku**

Zelektrujte dvě brčka a držte je vodorovně tak, aby jedno bylo nad druhým. Horní brčko držte v prstech hodně volně. Všimněte si, že je-li vzdálenost brček asi 1-3 cm, horní brčko prakticky nemusíte zvedat, jen mu prsty bráníte, aby nesklouzlo stranou. Horní brčko „plave“ ve vzduchu, nadnášeno silou, kterou na něj působí elektrické pole vytvářené spodním brčkem. Hmotnost brčka je asi 0,4 g, takže spodní brčko působí na horní silou asi 4 mN.

Velmi hrubě bychom mohli velikost náboje určit z Coulombova zákona: prostě vypočítat, jak velké bodové náboje ve vzdálenosti 2 cm by na sebe působily silou 4 mN. Dostali bychom výsledek něco přes 10 nanocoulombů. Ve skutečnosti samozřejmě nejde o bodové náboje a výpočet je složitější. V přiblížení dlouhých nabitých úseček vychází pro danou vzdálenost a brčko dlouhé 15 cm náboj asi 26 nC. Měřičem náboje skutečně naměříme náboj brčka zhruba 20 až téměř 40 nC, podle toho, jak se nám podaří brčko zelektrovat.

### **Náboj na větších tyčích atd.**

Na větších tyčích dosáhneme třením větší náboj. Na plastové tyči typu „od luxu“ to bývá 100 až 200 nC, na skleněné tyči obvykle necelých sto nC. Zcela nedávno jsem objevil v jedné velké prodejně pro kutily a řemeslníky plastové tyče (určené pro vodovodní odpady), na nichž se třením dá na délce asi 25 cm dosáhnout náboj až 300-400 nC.

Na konferenci „Dílny Heuréky 2009“ (viz [1]) jsme měřičem náboje měřili i náboje lidí. Ty jsou dány třením obuvi o podlahu. Byly většinou necelých sto nC, v jednom případě výjimečně přes 200 nC. Zkusili jsme též nabít člověka stojícího na izolační podložce pomocí indukční elektriky. V tom případě byl náboj asi 1200 nC, tedy 1,2  $\mu\text{C}$ .

### **Elektrostatická indukce a jak se projevuje**

Elektrostatickou indukci zde nemusíme blíže popisovat. Ostatně jsme se s jejími projevy setkali už v některých výše popisovaných pokusech. Pojdme si všimnout některých pokusů dalších.

### **Přitahujeme nenabitě vodiče**

Že nabitě brčko přitahuje prst, a prst zase naopak brčko, už jsme viděli. Brčko se však může přitahovat třeba i se dnem plechovky – a přiblížíme-li plechovku k nabitému brčku shora, brčko se vznese a přiskočí k plechovce. Ze vzdálenosti, z níž brčko přiskočí, opět můžeme odhadnout náboj brčka. (Brčko obvykle přiskočí ze vzdálenosti asi 1 cm, náboj vychází stejně velký, jak jsme ho uvedli výše.)

Hezkým pokusem, propagovaným i videoklipy na YouTube, je přitahování lehké plechovky od coly či podobného náboje nabitou tyčí. Plechovku můžeme bez dotyku kutálet po stole či po podlaze a zase brzdit. Nevystačíme na to s brčkem, ale větší nabitá tyč rozkutálí plechovku na hladkém povrchu spolehlivě.



Problém přitahování tyče a plechovky lze řešit i kvantitativně (viz [3]), jak přibližným teoretickým odhadem, tak jednoduchým pokusem, který by se mohl provést i jako projekt, ovšem až pro pokročilejší zájemce na úrovni střední školy.

### **Nabíjíme plechovku indukci**

Způsob, jak nabít plechovku elektrostatickou indukci, je dostatečně známý a netřeba ho zde blíže popisovat. S větší plechovkou (od okurek, od ananasu apod.) stojící na dostatečně silném kusu polystyrénu a dvěma tlustšími plastovými tyčemi můžeme plechovku nabít až na zhruba 700 nC. To již dá při dotyku citelnou ránu a výboj je zblízka dostatečně slyšet.

### **Od elektrostatiky k elektrickému proudu**

Od nabití plechovky můžeme lehce přejít k představě elektrického proudu jako toku náboje. Náboj na plechovce budeme indikovat známým způsobem: proužkem alobalu zavěšeným vně plechovky na závěsu například z kancelářské sponky. (Také můžeme říci, že výchylka proužku ukazuje, že plechovka je nabitá na určitý potenciál či „napětí vůči zemi“. Tyto detaily zde rozebírat nebudeme.)

Na plechovce postavené na izolační podložce může náboj vydržet poměrně dlouho, proužek alobalu pozorovatelně neklesá po dobu sekund až desítek sekund. Pokud proužek klesá velmi rychle „sám od sebe“, zkontrolujeme, jestli se plechovka nedotýká něčeho vodivého nebo zda někde nemáme ostrý hrot, kterým by náboj „vysršel“ do vzduchu. Pokud je vše v pořádku a náboj se stejně na plechovce neudrží, je možná vlhkost vzduchu tak velká nebo je ve vzduchu tolik nabitých či vodivých částic, že prostě máme smůlu a musíme konstatovat, že pro pokusy z elektrostatiky jsou natolik nevhodné podmínky, že je nemůžeme spolehlivě demonstrovat. Případně si můžeme, jak vědí staří praktici, pomoci nahřátím všech pomůcek infralampou nebo silnou žárovkou. Povrch pomůcek je pak teplejší než okolní vzduch a nesráží se na něm vlhkost, takže různé „svodové proudy“ jsou menší. Nahřátí většinou pomůže alespoň na chvíli.

Pokud náboj z plechovky samovolně „neutíká“, můžeme ukázat, že jej lze odvést vodičem. Ať už kovovým – pak se plechovka vybije prakticky okamžitě – nebo i tak špatným vodičem, jakým je obyčejná špejle. Dotkneme-li se plechovky kouskem špejle, jejíž druhý konec držíme v ruce, proužek alobalu pomalu klesá. Špejlí z plechovky teče (velmi malý) proud.

Poznámka k případným kvantitativním měřením: proud tekoucí špejlí lze měřit i kvantitativně, viz [2], to však již zřejmě nebude pokus na ZŠ. V [2] je popsána i metoda, jak pro špejli ověřovat Ohmův zákon. Je ovšem třeba uvědomit si, že odpor dřeva velice silně závisí na vlhkosti. Zjistíme-li tedy například, že odpor špejle je řádově terraohm, můžeme při měření při jiné vlhkosti vzduchu dostat i řádově odlišné výsledky.

Někdy je špejle tak suchá, že proužek alobalu při pokusu prakticky neklesá. Můžeme samozřejmě zvolit kratší kus špejle, dát dva tři kousky špejle paralelně apod. Nebo můžeme vzít o něco málo lepší vodič. Jako netradiční, ale zajímavý vodič se nám v praxi osvědčily slané tyčinky.

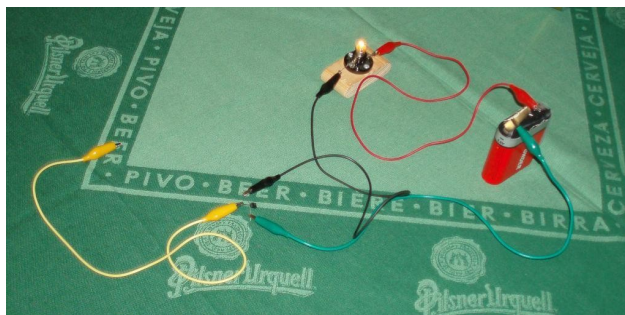
## „Bonus“: Velmi citlivý indikátor

Velice citlivě mohou reagovat na elektrostatické pole, tedy na blízkost nábojů, tranzistory řízené polem (FET). Snad nejjednodušší konstrukci indikátoru ukazuje obrázek. (Jde o novinku speciálně pro vlachovický seminář). Zdrojem je plochá baterie (4,5 V), žárovka je na napětí 3,5 V, s proudem 0,2 nebo 0,3 A.

K elektrodě G (gate) tranzistoru připojíme kratší vodič (10-20 cm), který necháme „viset ve vzduchu“. Můžeme jej také připojit k menší plechovce stojící na izolované podložce, třeba na polystyrénu. Jestliže danou elektrodu krátce spojíme, třeba prstem, s kladným pólem baterie, žárovka se rozsvítí. Pak je přístroj citlivý na přiblížení záporného náboje (po přiblížení záporného náboje žárovka zhasne).

Spojíme-li elektrodu krátce se záporným pólem baterie, žárovka zhasne. Pak je přístroj citlivý na přiblížení kladného náboje, to žárovku rozsvítí.

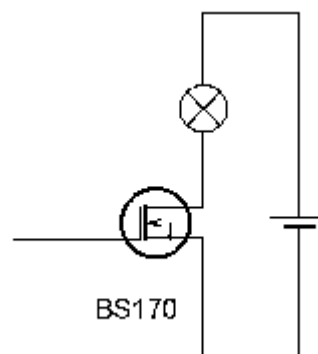
Jak ukazuje fotografie, celou konstrukci můžeme realizovat doslova „na stole“ pomocí kablíčků s malými krokodýlky. (Ubrus by ovšem mohl propagovat i jiné nápoje; fotografie zachycuje autentickou konstrukci na stole v hotelu Pavla, kde se seminář odehrával.)



Přístroj je možná až příliš citlivý, zejména když je elektroda připevněna k většímu vodiči (například k plechovce). Indikátor reaguje i na přiblížení a oddálení ruky a na přiblížení či vzdálení člověka. Záleží na tom, jaké máme podrážky, jaká je podlaha, zkrátka, jak moc jsme či nejsme nabití. Při troše trpělivosti však můžeme ukazovat docela efektní pokusy. Přístroj reaguje na pohyb nabitěho brčka ve vzdálenosti i kolem dvaceti centimetrů, na pohyb velké nabitě tyče i ze vzdálenosti okolo dvou metrů.

Nevýhodou – a to dost zásadní – je skutečnost, že tranzistor FET se vyšším nábojem velmi snadno zničí. A nemusíte ani vybijet do elektrody velkou nabitou tyč. Proto pozor: ani nabitá brčka raději nepřibližujte k vodiči spojenému s elektrodou blíže než na pár centimetrů. A počítejte s tím, že tranzistor dříve či později nevydrží. Naštěstí je tranzistor BS170 v zapojení tou nejlevnější součástí: stojí jen 2,50 Kč (cena v prodejnách GM Electronic). Proto ho můžeme, a v našem jednoduchém zapojení vlastně musíme, brát spíše jako „spotřební materiál“.

Pro zájemce uvádím, že informace o vlastnostech použitého tranzistoru lze najít na stránce [4].



## Závěr

Možnosti hravých i vážnějších pokusů a jednoduchých přístrojů a pomůcek z oblasti elektrostatiky jsme ani zdaleka nevyčerpali. Nezmínili jsme například elektroskop, elektrofor, využití doutnavky či zářivky jako indikátoru náboje, atd. Něco o těchto věcech již bylo publikováno třeba ve sbornících z Veletrhů nápadů učitelů fyziky, určitě je tady ale prostor pro spoustu dalších nápadů, inovací a metodických poznámek.

Takže tento příspěvek zakončím osobní poznámkou, že už se těším, až se na dalších konferencích a setkáních seznámím zase s vašimi náměty a zkušenostmi!

## Literatura a další zdroje

- [1] DVOŘÁK L.: *Náboje, kam se podíváš*. Dílna na konferenci Dílny Heuréky 2009. Náchod, 2.-4. 10. 2009. Bude publikováno v elektronickém sborníku konference.
- [2] DVOŘÁK L.: *Netradiční měřicí přístroje 4*. Příspěvek na konferenci Veletrh nápadů učitelů fyziky 14. Brno, 25.-27. 8. 2009. Bude publikováno ve sborníku konference.
- [3] KOUDELKOVÁ V., DVOŘÁK L., DVOŘÁKOVÁ I.: *Electrostatics step by step: some experiments for future physics teachers*. Poster na konferenci GI-REP-EPEC 2009, Leicester, 17.-21. 8. 2009. Bude publikováno na CD s materiály konference.
- [4] National Semiconductors: *BS170/MMBF170 N-Channel Enhancement Mode Field Effect Transistor*. Dostupné online [Cit. 14. 10. 2009]: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS011379.PDF>