

# Náboje kam se podíváš

Leoš Dvořák

KDF MFF K Praha

Abstrakt

*Příspěvek popisuje vybrané pokusy z oblasti elektrostatiky, od jednoduchých kvalitativních experimentů přes odhady některých veličin až po vybraná kvantitativní měření.*

## Obsah

<a href="#">Úvod</a> .....	12
<a href="#">Co dělat, když vzduch je vlhký...</a> .....	12
<a href="#">1. Nejjednodušší kvalitativní pokusy</a> .....	13
<a href="#">Začínáme s plastovými brčky</a> .....	13
<a href="#">Jednoduché indikátory ukazující působení nábojů</a> .....	14
<a href="#">K čemu lze indikátory využít</a> .....	16
<a href="#">Několik efektních pokusů</a> .....	18
<a href="#">2. Odhadujeme velikost náboje z měření síly</a> .....	20
<a href="#">Jaký náboj je na zelektrovaném brčku či jiných předmětech?</a> .....	20
<a href="#">Trocha teorie nikoho nezabije</a> .....	21
<a href="#">Jak se odpuzují dvě brčka</a> .....	21
<a href="#">Trocha teorie nikoho nezabije II</a> .....	22
<a href="#">Brčko a vodivá deska</a> .....	23
<a href="#">3. Měříme velikost nábojů</a> .....	24
<a href="#">Co lze měřit měřiči náboje</a> .....	24
<a href="#">„Bezdotykové měření“ aneb chvála Gaussovy věty</a> .....	24
<a href="#">Jak vlastně fungují měřiče náboje?</a> .....	25
<a href="#">4. Další náměty</a> .....	26
<a href="#">Jaká je kapacita člověka?</a> .....	26
<a href="#">Jaký proud teče špejlí, když jí vybíjíme plechovku?</a> .....	27
<a href="#">Indikátor náboje s bipolárními transistory...</a> (a jak rozlišit znaménko náboje) .....	29
<a href="#">... a indikátor s transistorem FET</a> .....	30
<a href="#">Závěr</a> .....	31
<a href="#">Literatura a odkazy</a> .....	31

## Úvod

Elektrostatika je pro fyzikální vzdělávání vděčnou i nevděčnou oblastí. Vděčnou proto, že s ní každý máme nějaké zkušenosti – dostali jsme „ránu“ třeba od kovového rámu dveří, slyšeli jsme praskání, když jsme si svlékali svetr, a ve tmě jsme viděli i jiskřičky. V science centrech můžeme vidět efektní pokusy s využitím van de Graaffova generátoru, spousta zajímavých klipů je k vidění na YouTube.

Nevděčnou je elektrostatika proto, že často ilustruje známý výrok (já ho poprvé slyšel od svého fyzikáře na střední škole) „pomůcky jsou zastaralé, vzduch je vlhký, pokusy se nedaří“. Opravdu: často je ve třídě „zadýcháno“ a z toho, co jsme si předem pečlivě nazkoušeli, nefunguje skoro nic. Navíc mohou být školní pomůcky opravdu ve špatném stavu: školní van de Graaffovy generátory sotva zvednou nitku, indukční elektrika má potrhane polepy... Až se zdá, že je lepší pokusy z elektrostatiky raději vypustit. Ale to byla škoda – experimenty přece jen mají větší šanci zaujmout žáky, než když budeme o silách mezi náboji jen teoretizovat.

Z Heuréky známe z oblasti elektrostatiky spoustu krásných pokusů s plechovkami, proužky alobalu na jejich horních hranách, nabíjení elektrostatickou indukcí, atd. Tyto pokusy a jejich metodiku zde nebudu znovu popisovat, i když občas se tu příslušné pomůcky objeví. Co zde chci nabídnout, jsou náměty na několik dalších pokusů. Často půjde o pokusy známé, někdy ale v novější variantě, s jinými pomůckami či s upozorněním na to, jak je lze jinak využít. Občas se také pokusíme alespoň o přibližné odhady velikosti náboje, který se v našich experimentech bude vyskytovat.

### Co dělat, když je vzduch vlhký...

Na začátek je dobré připomenout radu, kterou dávají staří praktici: Když se pokusy nedaří, je vhodné pomůcky, zejména izolační podložky či stojánky, zahřát například infralampou nebo obyčejnou stolní lampou se silnější žárovkou. Pokusy se totiž většinou nedaří ne proto, že by náboj odváděl vlhký vzduch. (Podle některých pramenů má vlhký vzduch dokonce vyšší elektrickou pevnost než vzduch suchý.) Problémem může být povrch izolačních podložek. I velmi malé množství vody, které na povrchu kondenzuje z vlhkého vzduchu, i když jde o mikroskopickou vrstvičku, totiž působí jako vodič odvádějící náboj například do stolu a přes něj „do země“, tedy pryč. Na nahřátém povrchu voda nekondenzuje a náboj tedy vydrží déle.

Další podmínkou pro to aby náboj neutíkal, je vzduch neznečištěný například kouřem. A samozřejmě, pokusy se nemusí dařit ani v případě, že náboj „vysrší“ na nějakém hrotu nebo na ostré hraně. Těch je proto třeba se vyvarovat. Nemusí samozřejmě vadit hrany či hroty *dovnitř* plechovky, kde je elektrické pole nulové nebo slabé. Problémem jsou hroty mířící ven.

## 1. Nejjednodušší kvalitativní pokusy

Než přejdeme ke složitějším pokusům a kvantitativním měřením, podívejme se na pokusy co nejjednodušší. Vystačíme při nich s obyčejnými plastovými brčky.

### Začínáme s plastovými brčky

Brčko zelektrujeme třením. Velmi dobrým materiálem, kterým brčko třít, jsou obyčejné papírové kapesníky. Není nutno brčko přetírat mnohokrát, stačí jednou až dvakrát, ale zato silně přitlačit, aby se kapesník co nejvíce dotýkal brčka.

A začneme hned prvním experimentem:

► Zelektrované brčko přiložte k tabuli či ke stěně. Brčko se k dané ploše přitáhne a není-li plocha příliš hladká, bude na ní držet. Většinou se udrží několik minut až desítek minut. (Na semináři ve Vlachovicích v říjnu 2009 drželo na dřevěném obložení stěny přes dvacet čtyři hodin, i když místnost byla občas docela zadýchána.)

Vysvětlete, proč brčko na zdi či tabuli drží. (Jistě, při jednom z prvních experimentů na úrovni základní školy nebudeme hned mluvit o polarizaci, ale sami bychom v tom měli mít jasno.)



Obr. 1. Zelektrovaná brčka drží na izolantu

Že brčko drží na izolantu, už tedy víme.

Související experiment však prý občas překvapí i odborníky:

► Zelektrované brčko drží i na vodivé ploše, například na kovovém rámu dveří, trubce ústředního topení apod.

I v tomto případě vysvětlete, proč je brčko přitahováno k vodivé ploše. (Samozřejmě, vodičem přiteče do blízkosti brčka opačný náboj a ten jej přitahuje.)

Možná by nás napadlo, že brčko nemůže držet na vodiči déle než pár okamžiků, protože se vybije. Ovšem vodič odvede náboj jen z části brčka, která se ho bezprostředně dotýká. A možná ještě té, kde vzdálenost je tak nepatrná, že z brčka na vodič může přeskočit výboj. Ostatní části jsou samotným brčkem od vodiče izolovány – a brčko je velmi dobrý izolant.



Obr. 2. Zelektrované brčko na kovu

Poznamenejme ještě, že oba experimenty se ve skutečnosti nemusí zásadně lišit. Pokud brčko drží například na dřevěné ploše, určitě se projeví to, že dřevo je sice velmi špatný, ale přece jen vodič.

Zatím jsme demonstrovali *přitahování* nábojů. Následující experiment umožní vám i vašim žákům a studentům pocítit *odpuzování* stejných nábojů doslova „vlastními rukama“.

► Zelektrujte dvě brčka třením jejich delších částí papírovým kapesníkem. Vezměte každé brčko do jedné ruky (palcem a ukazováčkem) za kratší kousek. Držte brčka rovnoběžně vedle sebe tak, aby byla vzdálena asi centimetr. (Viz obrázek 3 na následující stránce.) Cítíte v prstech, jak se brčka odpuzují?

Pro toho, kdo pokus dělá poprvé, je často překvapující, že sílu odpuzování opravdu jasně cítíme. Efekt je nejmarkantnější, když brčka zelektrujete co nejvíce a přiblížíte je blízko k sobě.

Rozmyslíme-li si pokus důkladněji, přijdeme na to, že je v něm, ne snad „podfuk“, ale přece jen určitý trik, který způsobuje, že silové působení mezi náboji cítíme dostatečně silně. Jde o to, že v prstech svíráme jen krátkou část brčka, zatímco síla působí na podstatně delší „páče“. Také bychom mohli říci, že v prstech vlastně cítíme spíš moment síly, než samotnou sílu. A moment odpudivé síly je dostatečně velký, protože síla působí na dostatečně dlouhém rameni. Sčítání příspěvků odpudivých sil resp. příslušná integrace by nás přesvědčily, že za rameno můžeme brát vzdálenost do středu nabitě části brček, což může být přes deset centimetrů. V prstech držíme část délky dejme tomu dva centimetry. Síla, kterou cítíme v prstech, je tedy několikanásobně větší, než síla, kterou se brčka odpuzují.

Při našich pokusech s brčky bychom samozřejmě neměli zapomenout ani na známé a běžně užívané jednoduché experimenty:

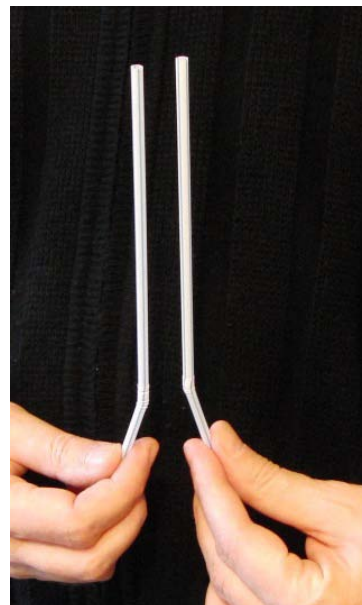
► Zelektrované brčko přitahuje malé kousky papíru (třeba natrhané z papírového kapesníku) i další drobné předměty, včetně vodivých (kousků alobalu apod.) Vyzkoušejte a vysvětlíte tyto pokusy – včetně toho, že po přitažení občas papírek či kousek alobalu zase odletí.

Místo zelektrovaného brčka můžete použít zelektrované plastové pravítko či větší plastovou tyč. V prodejnách pro kutily a řemeslníky můžete vyzkoušet, které z plastových trubek prodávaných jako odpadní se dají dobře zelektrovat. Stačí si s sebou vzít pár papírových kapesníků a poslouchat, zda při tření praskají dostatečně hlasitě jiskřičky...

### Jednoduché indikátory ukazující působení nábojů

Zkusme si vyrobit několik jednoduchých pomůcek indikujících elektrické pole resp. vzájemné působení nábojů. V silném elektrickém poli by nám vlastně stačilo už nabitě brčko držené v ruce: cítili bychom sílu, kterou pole působí na brčko. Krom toho, že by to s sebou neslo další komplikace, by taková pomůcka nebyla příliš citlivá. Jednoduše si můžeme udělat indikátory podstatně citlivější. Uvedme si některé možnosti.

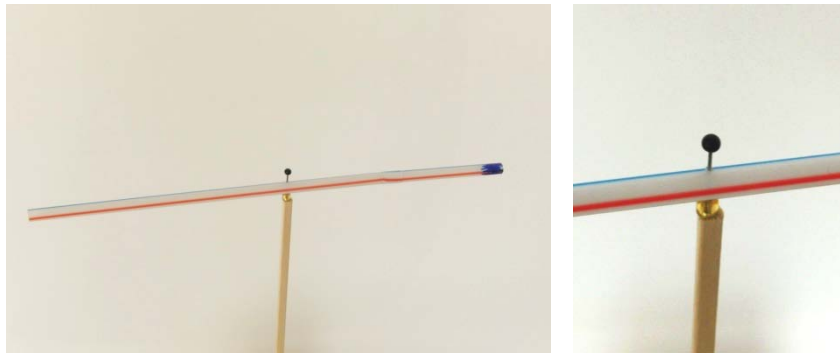
► „*Elektretka*“. Tak bychom na základě analogie s magnetkou kompasu mohli nazvat indikátor, v němž se otáčí brčko kolem svislé osičky. Osičku tvoří špendlík zapíchnutý do silnější špejle (nebo připevněný k tenčí špejli třeba izolepou) – viz obrázky 4a a 4b.



Obr. 3. Odpuzování brček můžeme cítit vlastníma rukama



Obr. 4a. „Elektretka“

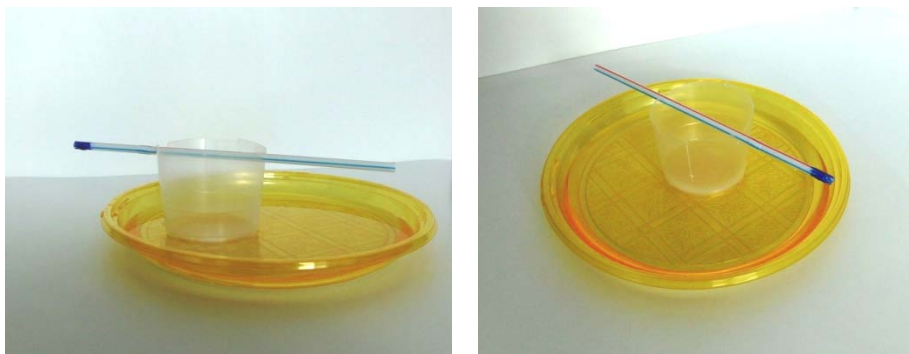


Obr. 4b. Detail jednoduchého indikátoru elektrostatického pole  
(Nezabarvený konec brčka je třeba zelectrovat třením.)

Brčko předem propíchneme silnějším špendlíkem, aby se mohlo kolem tenčího špendlíku volně otáčet. Aby při otáčení příliš nedrhlo, mělo by být pokud možno vyvážené. Tření navíc zmenšíme tím, že pod brčko dáme na špendlík malý korálek. Nemáme-li korálek, vyhoví i malá maticka, například M3. Špejli pak zapíchneme do vhodného podkladu, například od kusu polystyrénu.

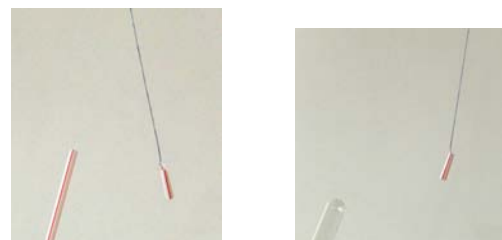
Než indikátor použijeme, zelectrujeme jeden konec brčka třením papírovým kapesníkem. (Můžeme třít skoro celou jednu polovinu brčka, samozřejmě ale ne obě poloviny.) Brčko se pak otáčí tak, že elektrovaná část, která má záporný náboj, směřuje od záporných nábojů resp. směrem ke kladným nábojům.

► *Lodička – plovoucí elektretka.* Z plastového pohárku ustříháme okraj tak, že zbude nízká lodička. Do jejího okraje vystříháme dva zářezy, aby se do nich dalo posadit brčko. Lodičku dáme do misky s vodou a na ni položíme brčko, jehož jeden konec jsme zelectrovali třením. (Aby bylo jasné, který konec je který, můžeme druhý konec například nabarvit fixem.) Lodička se může na hladině volně otáčet, takže brčko se opět natočí elektrovaným koncem směrem ke kladným nábojům.



Obr. 5. Lodička s brčkem (Jeden konec brčka je zelectrovaný.)

► *Testovací náboj.* Kousek brčka na niti se bude po zelectrování odpuzovat od záporných nábojů (nabitých brček, plastových tyčí apod.) a přitahovat ke kladným nábojům (například elektrovaným skleněným tyčím). Viz obr 6.



Obr. 6. Kousek brčka na niti jako indikátor elektrostatického pole



► *Torzní váhy.* Brčko provlékneme kancelářskou sponkou přivázanou na kousku niti (viz obrázek 7). Jeden konec brčka opět zeledrujeme třením.



Obr. 7. Torzní vážky z brčka pro indikaci elektrostatického pole

### K čemu lze indikátory využít

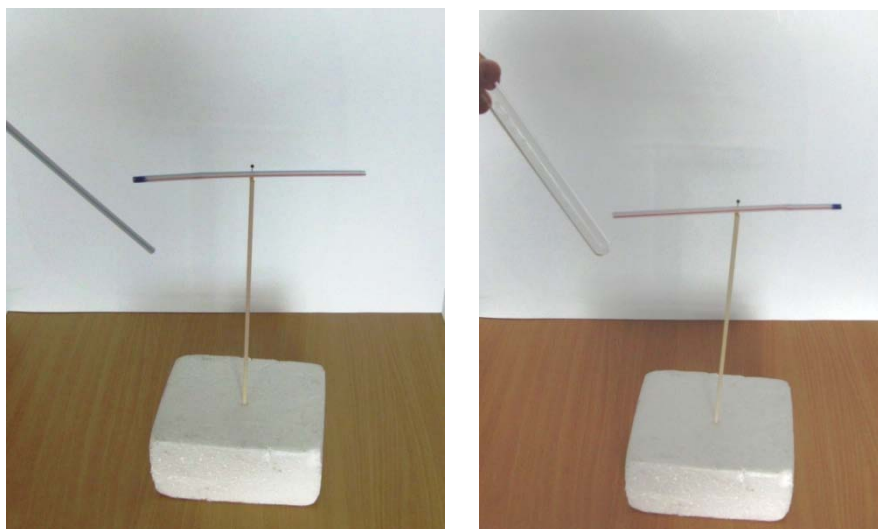
Indikátory mohou sloužit například k rozlišení polaritý nábojů a k demonstraci, které náboje se přitahují a které odpuzují:

► Zeledruvaný brčko odpuzuje nabitý konec indikátoru. Stejně tak většina třením zeledruvaných plastových pravítek, plastových tyčí apod.

► Skleněná tyč zeledruvaná třením *přitahuje* nabitý konec indikátoru. Je tedy jasné, že skleněná tyč má opačný náboj, než brčko. Podle zavedeného značení je brčko záporné, skleněná tyč je nabita kladně.

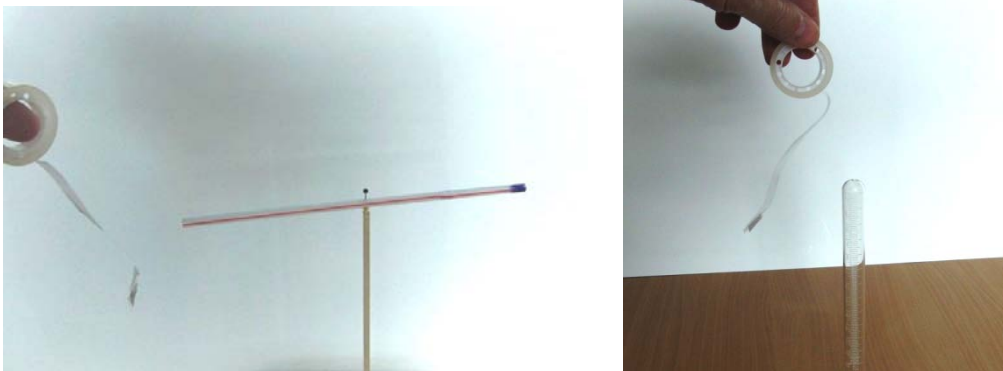
Nemáme-li skleněnou tyč, často poslouží i sklenička. Ale pozor, je to nutno předem vyzkoušet, některé druhy skla se dají zeledruvat jen velmi špatně. Místo skleněné tyče též můžeme použít skleněnou zkumavku. Sklo nemusíme nutně třít kůží, jak se v knihách doporučuje; papírový kapesník většinou vyhoví velmi dobře.

Poznamenejme, že někdy se stane, že i plastové pravítko se nabije kladně, třeme-li ho například o košili z umělých vláken.



Obr. 8. Zeledruvaný brčko odpuzuje nabitý konec indikátoru, zeledruvané sklo ho přitahuje

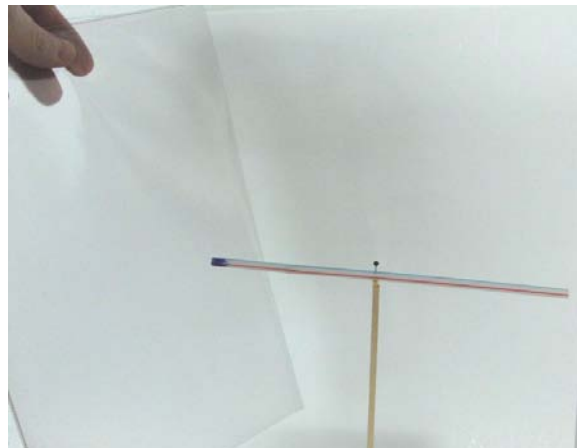
- ▶ Zjistěte, jaké znaménko náboje má proužek izolopy odtržený od podkladu – od spodní vrstvy izolopy, od níž ji odtrháváme při odvíjení z cívky. Znaménko můžeme ověřit i tak, že zjistíme, k jak nabitým předmětům se proužek izolopy přitahuje a od nichž se naopak odpuzuje – viz obr. 9.



Obr. 9. Indikátor reaguje na proužek izolopy odtržený od spodních vrstev na cívce. Proužek izolopy také reaguje na nabité předměty - například se odpuzuje od zeledrované zkumavky.

- ▶ Přilepte si proužek izolopy třeba na kalhoty a nalepte na jeho horní stranu ještě jeden proužek izolopy. Když oba proužky odtrhnete od látky, většinou nebudou mít skoro žádný náboj. Pak oba proužky odtrhněte od sebe. Který bude jak nabitý?

- ▶ Položte na stůl obyčejný kancelářský papír a na něj přiložte hladké tenké plastové desky. Uhladte, aby se papír a desky k sobě co nejvíce přitiskly. Když papír s deskami sundáte se stolu, většinou nebude mít skoro žádný náboj. Můžete ještě po papíru jemně přejet rukou, abyste papír s deskami „vybili“ na skoro nulový náboj. Papír ale drží na deskách. Pak papír odtrhněte od desek. Slyšíte přitom praskot elektrických výbojů? Zjistěte, jaký náboj mají nyní desky. (Většinou jsou nabity docela silně a indikátor reaguje i na vzdálenost přes půl metru.)



Obr. 10. Indikátor reaguje na plastové desky, od nichž jsme odtrhli papír

Poznámka: Je třeba vyzkoušet vhodný typ desek. Některé typy desek a fólií

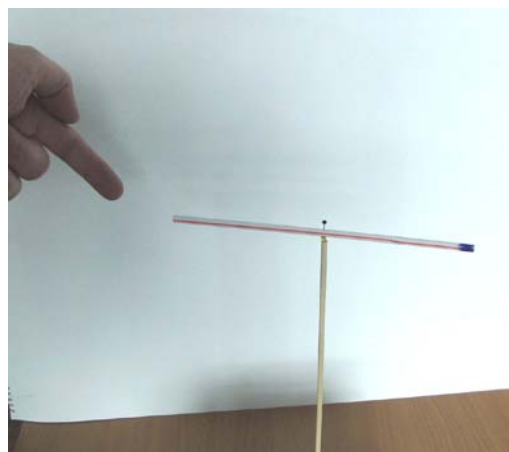
mají zřejmě antistatickou úpravu a téměř se při odtrhávání papíru nenabíjejí. Ostatně to poznáme i tak, že na nich papír prakticky nedrží.

Poznámka 2: Jestliže byla kombinace papír+desky prakticky neutrální, měl by být po odtržení papír nabit opačným nábojem, než desky. Když ale držíme papír rukou, projeví se vodivost papíru a ten se přes naši ruku vybije.

Připomeňme ještě, že pokusy s odtrháváním proužků izolopy a papíru od plastových desek dokazují, že při elektrování těles vlastně není třeba *třít* povrch. Podstatné je, aby povrchy byly v co nejlepším kontaktu a oddělily se od sebe. Díky rozdílným vlastnostem obou materiálů zůstávají elektrony na jednom z nich – ten se při odtržení nabíjí záporně.

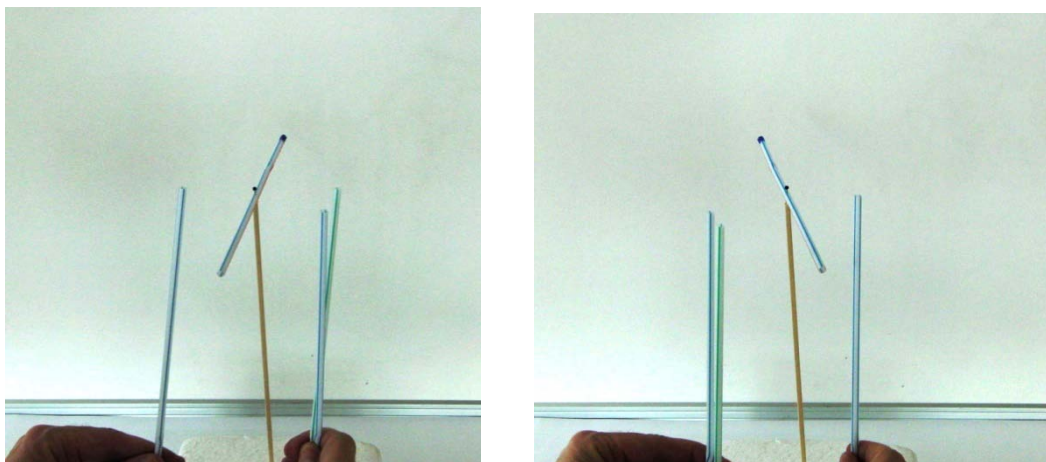
Při demonstraci pokusů s indikátory musíme dát pozor na další efekt:

► Zelektrovaný konec brčka se přitahuje i k *nenabitým* vodivým předmětům, například k našemu prstu. Tohoto efektu si snadno mohou všimnout i žáci, a je tedy vhodné na něj upozornit a vysvětlit ho. Není to složité: Stačí se zeptat, které náboje přitahuje a které odpuzuje záporně nabitý konec brčka. Žáci sami mohou doříct, že přitahuje kladné náboje ve vodiči a odpuzuje záporné. Poblíž brčka je tedy ve vodiči víc kladných nábojů a ty záporně nabitý konec brčka přitahují. (Při „méně fenomenologickém“ vysvětlení můžeme upřesnit, že v kovu se samozřejmě kladné náboje nepohybují, ale když jsou elektrony odpuzeny pryč, zůstanou poblíž brčka kladné náboje iontů.) Toto chování nábojů ve vodičích ostatně využijeme i při vysvětlení elektrostatische indukce.



Obr. 11. Zelektrovaný konec brčka se přitahuje i k prstu

► V rámci pokusů s indikátory můžeme alespoň kvalitativně prozkoumat, jak síla závisí na vzdálenosti a na velikosti náboje. Je-li nabitě brčko dál, indikátor sotva reaguje; přiblížíme-li brčko, otočí se mnohem rychleji. Je vidět, že s klesající vzdáleností síla roste. Pokud z jedné strany přiblížíme jedno a z druhé strany dvě zelektrovaná brčka, je zelektrovaný konec indikátoru dál od dvojice brček. Je jimi tedy více odpuzován, to znamená, že síla roste s velikostí náboje.



Obr. 12. Porovnání síly od jednoho a od dvou brček

### Několik efektních pokusů

Pěkným pokusem, který je k vidění i na YouTube, je:

► Přitahování plechovky nabitou tyčí.

Plechovka musí být co nejlehčí, pokus dobře funguje s tenkou hliníkovou plechovkou od nápojů (Coca-Cola či jiné koly nebo od piva). Plechovku položíme na hladkou vodorovnou plochu, například na stůl. Z boku k ní přiblížíme co nejvíce nabitou tyč. Brčko často nestačí, buď použijeme více brček, nebo větší plastovou tyč. Tyč musíme přiblížit poměrně blízko k plechovce (viz obrázek 13). Za tyčí se pak koule docela ochotně; přendáme-li tyč za plechovku, budeme ji zase brzdit.



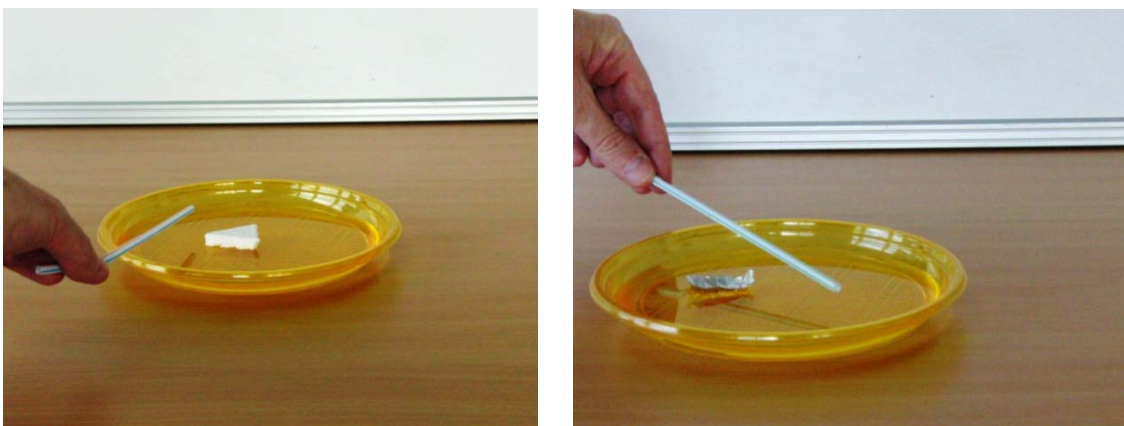


Obr. 13. Nabitá tyč přitahuje plechovku

Vysvětlení opět není složité: Blíž k záporně nabitě tyči se v plechovce přeskupí kladné náboje, dál odejdou záporné náboje. Síla, kterou jsou přitahovány bližší kladné náboje, převládne.

Sílu jde dokonce přibližně spočítat teoreticky a porovnat výsledek s kvantitativním měřením [1-2]. To už je ale výpočet na úrovni vysokoškolské fyziky, kterým žáky trápit nebudeme. Kvalitativní vysvětlení s nimi ale stojí za to probrat.

► Malá lodička na povrchu vody je přitahována k nabitému brčku či nabitě tyči. Může jít jak o lodičku z izolantu, třeba z polystyrénu, tak o lodičku z vodivého materiálu, například kousku alobalu. Opět jde o přerozdělení nábojů na lodičce. V případě lodičky z izolantu se izolant polarizuje a je vtahován do silnějšího elektrického pole, tedy blíže k nabitě tyčce. V případě vodivé lodičky se blíže k tyčce přitáhnou opačné náboje. Náboje stejného znaménka, jako má tyčka, navíc odejdou do vody. Lodička má tedy opačný náboj, než tyčka, a je k tyčce přitahována.



Obr. 14. Přitahování lodičky z izolantu a vodivé lodičky k nabitěmu brčku

► Nabité brčko či nabitá tyčka přiblížené k hladině vody její povrch nepatrně zvedají. Je to vidět zejména při šikmém pohledu a sledování odrazu okolních předmětů na vodní hladině. Jinou možností je dát na dno nádoby například čtverečkovaný papír a dívat se na něj shora skrz hladinu vody. Vyklenutí hladiny působí jako čočka a deformaci povrchu oproti rovné hladině můžeme jasně postřehnout. Brčko či nabitá tyč musí být velmi blízko hladiny – ovšem ne tak blízko, aby došlo k výbojům. Vzdálenost je nutno vyzkoušet. Brčkem se podaří zvednout hladinu o zlomek milimetru.

Vysvětlení efektu je podobné jako v předchozích případech. Ve vodě se k nabitě tyčce přitáhnou opačné náboje, náboje stejného znaménka jako tyčka odejdou do větší vzdálenosti. Náboje opačného znaménka (při záporně nabitě tyčce tedy kladné náboje) jsou těsně u hladiny v blízkosti tyčky. Přitažlivé síly tedy hladinu u tyčky nadzvedávají. Efekt je opět možno odhadnout i kvantitativně, to zde ale nebudeme prezentovat.

► Známým pokusem je *elektrostatické kyvadlo*. Vodivá kulička zavěšená na izolačním závěsu mezi dvěma elektrodami připojenými ke zdroji vysokého napětí kývá sem a tam poháněna elektrickým polem. Když se dotkne jedné elektrody, získá náboj stejného znaménka a je od této elektrody odpuzována a přitahována k druhé. Když se jí dotkne, děj se opakuje, jen s opačnými znaménky nábojů.

Efektívou variantou pokusu je uspořádání, kdy elektrodami jsou čela dvou lidí stojících na izolačních podložkách (např. kusech pěnového polystyrenu) a držících se elektrod indukční elektriky. Kuličkou může být třeba pingpongový míček obalený alobalem, závěsem silonová nit. Je lépe, když mají zúčastněné osoby krátké vlasy (nebo pleš ☺). Poznámka: Osoby se samozřejmě nesmějí dotknout, dokud se drží vývodů indukční elektriky. (I poté, co se indukční elektriky pustí, dá vzájemný dotek citelnou ránu.) V zájmu bezpečnosti je jistě dobré dbát, aby se tohoto či podobných pokusů účastnily jen osoby, které netrpí žádnými srdečními problémy; samozřejmostí je vyloučit osoby, které mají kardiostimulátor.

## **2. Odhadujeme velikost náboje z měření síly**

Dosavadní pokusy byly pouze kvalitativní. I jednoduchými prostředky však můžeme realizovat alespoň přibližná měření. Proč? Třeba abychom odhadli velikost náboje. No schválně – položili jste si někdy otázku:

### **Jaký náboj je na zelektrovaném brčku či jiných předmětech?**

Jaký náboj asi tak má ebonitová tyč poté, co jsme ji třeli liščíím ohonem? Jak velký náboj má plechovka na kusu polystyrenu, když jsme ji nabili tyčí nebo elektrostatickou indukci? Jak velký máme náboj, když jsme si svlékli svetr z umělých vláken a máme boty s dostatečně izolující podrážkou? Někdy stačí už tření bot o podlahu a nabijeme se tak, že dostaneme ránu, když se dotkneme třeba kovového rámu dveří – jaký byl náš náboj? Jak velký je náboj v leydenských lahvích indukční elektriky? Nebo na kouli školního Van de Graaffova generátoru?

Zkuste si odhadnout velikosti nábojů ve výše uvedených příkladech. Pokud jste nikdy podobné náboje neměřili ani o jejich velikostech nepřemýšleli, je to asi těžké a není divu, že se možná příliš nestrefíme. Je to zkrátka oblast, ve které nemáme skoro žádnou zkušenost a tím pádem asi ani příliš velký „fyzikální cit“ či intuici. A přitom náboj je pojem, s nímž se operuje hned v úvodu elektrostatiky. Tak se na to zkusme podívat.

### Trocha teorie nikoho nezabije...

Aby nás teorie nezabila, začneme tím nejjednodušším, Coulombovým zákonem. Síla, kterou na sebe působí dva náboje  $Q_1$  a  $Q_2$  ve vzdálenosti  $r$  je rovna

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (1)$$

kde 
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \doteq 9 \cdot 10^9 \text{ NC}^{-2} \text{ m}^2 \doteq 10^{10} \text{ NC}^{-2} \text{ m}^2. \quad (2)$$

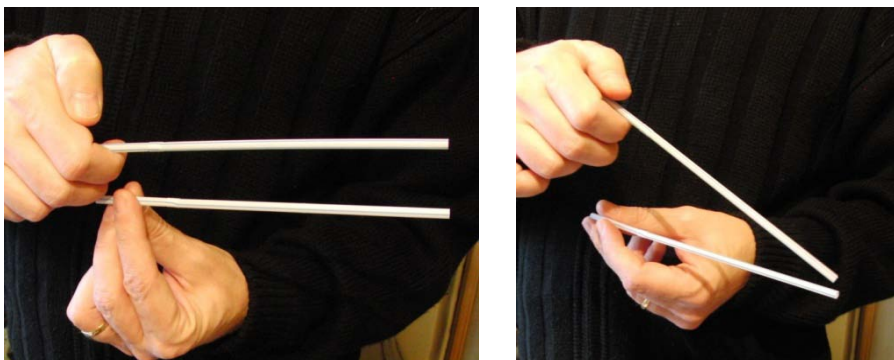
$\epsilon_0$  je permitivita vakua. Správně bychom měli ještě upřesnit, že  $F$  je *velikost síly* a že jde o bodové náboje, ale tyhle věci jsou snad jasné. A navíc, stejnou silou se přitahují i dvě nabitě kuličky, pokud je na nich rozložení náboje sféricky symetrické. (Pozor, to nebude platit u vodivých kuliček, kde se rozložení nábojů vzájemným působením změní!)

Poznamenejme, že k hrubým odhadům můžeme Coulombův zákon použít, i když nejde o bodové náboje nebo o sféricky symetricky nabitě kuličky.

Již na základě Coulombova zákona můžeme tedy lehce odhadnout, že náboje na brčku či na dalších věcech kolem nás nemohou být řádu coulombů – to by se věci vzdálené metr přitahovaly nebo odpuzovaly silou řádu deset miliard newtonů, a to opravdu nepozorujeme. Velikosti nábojů tedy musí být mnohem menší. Ale kolikrát menší? Miliónkrát? Nebo víc? Či snad méně? Pokusme se to určit pomocí nabitých brček.

### Jak se odpuzují dvě brčka

► Zelektrujte třením dvě brčka a držte je za konce tak, aby byla vodorovně, jedno nad druhým. Spodní brčko držte pevně, druhé jen volně, aby se mohlo pohybovat nahoru a dolů, jak to ukazuje obr. 15.



Obr. 15. Odpuzování nabitých brček: na fotografii vlevo je horní brčko drženo volně, takže se „vznáší“ nad spodním. Fotografie vpravo ukazuje případ, kdy brčka *nejsou* elektrována; horní brčko nic nenadnáší a musíme jej přidržovat, aby neupadlo.

Při vzdálenosti brček asi 1 až 3 cm uvidíte, že horní brčko v podstatě „plave“, jeho váha je prakticky vyvažována elektrostatickým odpuzováním. Nešel by z tohoto pozorování odhadnout náboj brčka?

Hmotnost brčka zjistíme vážením, je asi 0,4 g. Tíha brčka je tedy  $F_g = m \cdot g \doteq 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 10 \text{ ms}^{-2} = 4 \text{ mN}$ . Stejná je i síla elektrostatického odpuzování. Obě brčka

jsou nabitá zhruba stejně,  $Q_1 \doteq Q_2 \stackrel{\text{ozn.}}{=} Q$ . Kdyby šlo o bodové náboje ve vzdálenosti  $r$ , odpuzovaly by se silou  $F = k Q^2 / r^2$ . Používat Coulombův zákon v situaci, kdy délka brček je mnohem větší, než jejich vzdálenost, je sice věc, která vypadá, že by za ni měl autor těchto řádek vrátit diplom, ale zkusme to – alespoň pro hrubý odhad. Pro vzdálenost brček 1 cm dostaneme

$$Q = r \sqrt{\frac{F}{k}} = 10^{-2} \text{ m} \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{10^{10} \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}}} = 10^{-2} \sqrt{40 \cdot 10^{-14}} \text{ C} \doteq 6 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 6 \text{ nC}. \quad (3)$$

Velmi zhruba tedy můžeme odhadnout, že náboj brčka je jednotky až desítky nanocoulombů.

Brčko ovšem není bodový náboj. Aby opravdu nedošlo na to vracení diplomu, měli bychom naše teoretické odhady trochu zpřesnit.

### **Trocha teorie nikoho nezabije II**

Přesný výpočet zde nebudeme uvádět. Místo toho využijeme jinou idealizaci, než je bodový náboj. Protože brčko je výrazně delší, než je vzdálenost brček, vypočteme sílu pro případ dvou rovnoběžných homogenně nabitých přímek. Přesněji řečeno, spočteme délkovou hustotu síly, tedy sílu na jednotku délky nabitě přímky.

Intenzita elektrického pole nabitě přímky se nejjednodušeji určí z Gaussovy věty. Zde příslušný výpočet opakovat nebudeme. Uvedeme jen výsledný vzorec:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau}{R}, \quad (4)$$

kde  $\tau$  je délková hustota náboje a  $R$  vzdálenost místa, v němž určujeme intenzitu, od nabitě přímky. Síla je dána součinem  $Q \cdot E$ . Pokud tedy máme dvě rovnoběžné přímky ve vzdálenosti  $R$ , které jsou nabity se stejnou délkovou hustotou náboje  $\tau$ , odpuzují se na jednotku délky silou

$$f = \frac{F}{L} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau^2}{R} \quad (5)$$

Využijeme-li vztahu (2), pak sílu, kterou se odpuzují rovnoběžná brčka délky  $L$ , můžeme napsat

$$F = f \cdot L = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau^2 L}{R} = 2k \frac{\tau^2 L}{R} = 2k \frac{(\tau L)^2}{RL} = 2k \frac{Q^2}{RL}$$

Odtud pro náboj brčka  $Q$  vychází

$$Q = \sqrt{RL \frac{F}{2k}} \quad (6)$$

Pro brčka délky  $L = 20$  cm, která jsou při odpuzování vyrovnávajícím tíhu brčka vzdálena  $R = 1$  cm vychází

$$Q = \sqrt{10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-1} \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{10}}} \text{ C} = \sqrt{4 \cdot 10^{-16}} \text{ C} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ C} = 20 \text{ nC}. \quad (7)$$

Délková hustota náboje tedy vychází asi 1 nC na centimetr (tedy  $10^{-7}$  C/m); pokud se horní brčko vznáší ve větší vzdálenosti, je to o něco více.

Měření měřičem náboje potvrdí, že náboj zelektrovaného brčka bývá 20 až 30 nC, maximálně asi 40 nC. Náš výpočet z velikosti síly tedy dává velmi dobrý výsledek, i když pro přesnější určení náboje bychom měli přesněji měřit vzdálenost brček, uvažovat okrajové efekty, tedy počítat, jak se odpuzují dvě nabitě úsečky konečné délky atd.

Ptáte se, jak je možné, že řádově jsme podobný odhad dostali i z naprosto „nesmyslného“ použití Coulombova zákona? Porovnání vztahů (6) a (3) nám dá alespoň zčásti odpověď. Vztah (6) lze upravit na

$$Q = \sqrt{RL \frac{F}{2k}} = R \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt{\frac{L}{2R}}.$$

Přesnější odhad velikosti náboje (6) a velmi hrubý odhad (3) z Coulombova zákona jsou tedy v poměru  $\sqrt{L/(2R)}$ . I když je délka brček dvacetkrát delší než jejich vzdálenost, díky tomu, že ve vztahu pro náboj je odmocnina, liší se oba odhady jen asi třikrát. Je vidět, že s trochou opatrnosti, velkou mírou drзости a s vědomím, že se můžeme mýlit i o více než půl řádu, můžeme při velmi hrubých odhadech Coulombův zákon občas využít.

### Brčko a vodivá deska

Již výše jsme ukazovali, jak nabitá tyč přitahuje vodivý předmět, konkrétně plechovku. Tentýž efekt můžeme využít pro určení velikosti náboje brčka.

► Umístíme-li nabitě brčko na podpěry a shora k němu pomalu přibližujeme vodivou desku (nebo například větší plechovku, jak to ukazuje obrázek 16), přitahuje se brčko vzhůru a je-li vzdálenost dostatečně malá, k vodivé desce či plechovce přiskočí. Ze vzdálenosti, v níž se tak stane, můžeme určit resp. odhadnout náboj brčka.



Obr. 16. Nabitě brčko se přitahuje k vodiči nad ním

Jak to udělat? Teoreticky lze odvodit, že bodový náboj je k uzemněné vodivé rovině přitahován stejnou silou, jakou by byl přitahován k náboji stejné velikosti (ale opačného znaménka), umístěnému zrcadlově za rovinou vodiče. Stejně je tomu pro nabitou přímku rovnoběžnou s rovinou vodiče.



Pokud tedy nabitě brčko přiskočí k vodiči vzdálenému 1 cm, můžeme jeho náboj vypočítat z výše uvedeného vztahu (6), do něhož dosadíme dvojnásobnou vzdálenost, tedy  $R = 2$  cm.

### **3. Měříme velikost nábojů**

Dosud jsme náboj například zelektrovaného brčka jen odhadovali. Pomocí vhodného měřiče náboje (například ze sond systému firmy Vernier nebo jiných měřicích systémů) můžeme náboj skutečně změřit.

#### **Co lze měřit měřiči náboje**

► Máte-li jakýkoli více či méně „profesionální“ nebo třeba i amatérsky zhotovený měřič náboje, zkuste změřit náboj:

- Zelektrovaného brčka, dvou brček, tří brček, ...
- Plastové tyče zelektrované třením. Třeba pověstné ebonitové tyče třené liščíím ohonem.
- Skleněné tyče třené at' už kůží nebo papírovým kapesníkem.
- Izolepy odtržené od podkladu.
- Plechovky, kterou nabijete otřením náboje z tyče nebo elektrostatickou indukci.

O velikosti náboje brček už jsme mluvili. Při našich měřeních měla velká plastová tyč záporný náboj sto až tři sta nC, skleněná tyč kladný náboj kolem sta nC. Náboj plechovky bývá typicky desítky nC, pro větší plechovky i více.

Nemusíme ovšem nabíjet jen plechovku. Následující pokus může být dostatečně motivační:

► Změřte náboj člověka, který stojí na izolační podložce (např. kusu polystyrénu) a kterého jste nabili indukční elektrickou.

Na workshopu v Náchodě jsme konkrétně změřili, že náboj takto nabitého člověka může být přes tisíc nanocoulombů, tedy přes jeden microcoulomb. (V našem případě to bylo 1,2  $\mu\text{C}$ .)

Změřit takto velké náboje může být problém, používáme-li např. sondu pro měření náboje k počítačovým měřicím systémům; ty mohou mít rozsah jen do 100 až 200 nC. Níže si ukážeme, jak lze změřit i vyšší náboje, dokonce bez speciálních měřicích přístrojů.

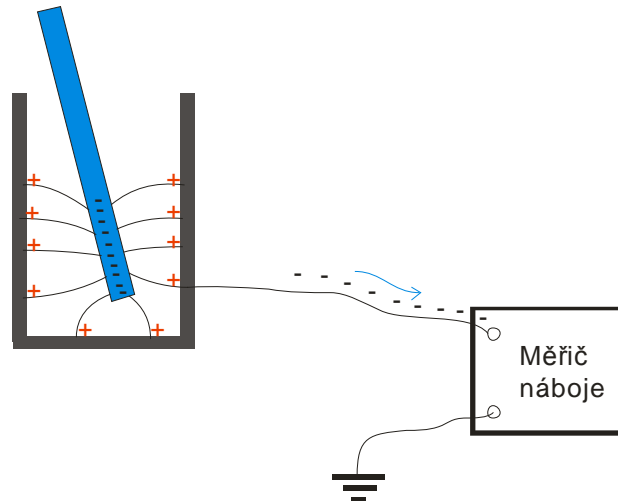
K měření měřiči náboje připojme ještě jednu technickou poznámku. Nezapomeňte druhý vývod měřiče či měřicí sondy uzemnit. Třeba na vodovod, na trubku ústředního topení nebo, není-li jiná možnost, na zemnicí kolík elektrické zásuvky. (Ale to možná není dobré učit žáky; navíc je vhodné před využitím kolíku zásuvky zkusit doutnavkovou zkoušečkou jestli, probůh, není nějakou chybou na kolíku „živé“ napětí fáze.)

#### **„Bezdotykové měření“ aneb chvála Gaussovy věty**

Při měření náboje izolantů, například zmíněného brčka nebo plastové tyče, se právem můžete zeptat, jak z něj odvést veškerý náboj do měřiče. Jistě, můžeme tyč co nejvíce otírat o vývod sondy, ale jak si můžeme být jisti, že jsme skutečně odvedli veškerý náboj? Navíc – někdy bychom rádi změřili náboj na tyči a pak s tímto nábojem dále pracovali – a ne ho celý „vybili“ do měřiče náboje.

Řešení existuje a je velice jednoduché – viz obrázek 17. Svoruku měřiče náboje spojíme plechovkou stojící na izolované podložce. Plechovku předem vybijeme a měřič náboje vynulujeme. Tyč, jejíž náboj chceme měřit, vložíme do plechovky tak, aby se nedotýkala

stěn. Na vnitřní stranu plechovky se přitáhne stejně velký náboj opačného znaménka (v případě záporně nabité plastové tyče tedy kladný náboj), zbylý náboj z plechovky (záporný, stejně velký jako má tyč) odejde do měřiče náboje. A máme změřeno!



Obr. 17. Princip bezdotykového měření náboje

Proč je náboj na vnitřní straně plechovky stejně velký (až na znaménko) jako náboj na tyči? Můžeme to vysvětlit trochu nepřesně ale názorně pomocí siločar. Z každého náboje na tyči vychází siločára. Ta musí končit na vnitřní stěně plechovky; tam je odpovídající opačný náboj. (Zanedbáváme přitom skutečnost, že plechovka je nahoře otevřená, takže ve skutečnosti by některé siločáry mohly vyjít ven. Naše zdůvodnění by platilo pro uzavřenou vodivou nádobu, vlastně pro Faradayovu klec. Je-li ale plechovka dostatečně hluboká, můžeme předpokládat, že otvor nahoře nezpůsobí příliš velkou chybu.)

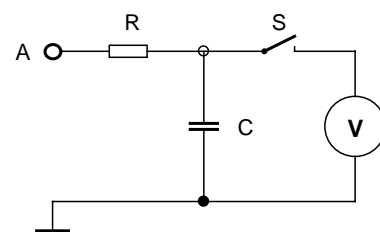
Přesnější vysvětlení se může opírat o Gaussovu větu elektrostatiky. Celkový tok elektrické indukce plochou obepínající tyč se musí rovnat celkovému náboji tyče. Pokud všechen tok elektrické indukce končí na vnitřní straně plechovky (opět zanedbáváme otvor), musí náboj na vnitřní straně plechovky přesně kompenzovat náboj tyče.

Do detailů ani do odhadů chyby dané tím, že plechovka je otevřená, zde nepůjdeme. Podstatné je, že vlastně díky Gaussově větě umíme změřit náboj bezdotykově a aniž bychom o něj přišli.

### Jak vlastně fungují měřiče náboje?

Na první pohled je měřič náboje vlastně trochu záhadná „černá skříňka“. Jak vlastně dokáže náboj změřit? Princip je ale jednoduchý a můžeme si ho demonstrovat pomocí kondenzátoru a obyčejného multimetru. Navíc dále popsanou metodu můžeme využít ke skutečnému (alespoň přibližnému) měření nábojů, pokud nevlastníme měřič náboje. Případně nám tato metoda umožní měřit větší náboje, než náš měřič zvládne.

Schéma na obr. 18 ukazuje princip měření. Svorku A krátce připojíme k předmětu, jehož náboj chceme měřit. Náboj  $Q$  se přes rezistor vybije do kondenzátoru. Kapacita kondenzátoru  $C$  je mnohem větší, než kapacita například plechovky, jejíž náboj měříme. (Ta může být desítky pF, v našem měřiči máme  $C = 1 \mu\text{F}$ .) To znamená, že na kondenzátoru bude napětí  $U$  řádu



Obr. 18. Princip měření náboje

zlomků voltu. Přitom platí  $Q = C \cdot U$ . Pro  $C = 1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{F}$  pak napětí jednoho voltu odpovídá náboj  $1 \mu\text{C}$ , napětí  $1 \text{ mV}$  náboj  $1 \text{ nC}$ .

Velikost rezistoru není kritická. Jeho úkolem je jen omezit proud tekoucí do kondenzátoru. Vyhoví např.  $R = 1 \text{ M}\Omega$ .

Trochu problém je s odporem voltmetru, jímž měříme napětí na kondenzátoru. Protože vnitřní odpor reálného voltmetru není nekonečný, kondenzátor se přes něj vybíjí. Vnitřní odpor i „trochu lepších“ multimetrů je  $R_V = 10 \text{ M}\Omega$ ; pro  $C = 1 \mu\text{F}$  vychází časová konstanta  $R_V \cdot C = 10 \text{ s}$ , což je trochu málo. (Údaj na multimetru se ustaluje několik sekund, v našem případě ale každou sekundu klesne napětí na kondenzátoru zhruba o deset procent.) Řešením je užít buď kondenzátor o desetkrát větší kapacitě (tedy  $10 \mu\text{F}$ ), nebo do série s voltmetrem zapojit rezistor o odporu  $90 \text{ M}\Omega$ . V obou případech se časová konstanta prodlouží desetkrát, tedy na  $100 \text{ s}$ , a napětí na kondenzátoru lze už rozumně odečíst. Náboj  $1 \text{ nC}$  pak ovšem odpovídá napětí  $0,1 \text{ mV}$ .

Upozorníme ještě, že kondenzátor použitý v našem zapojení nesmí být elektrolytický. (Na něm by se projevovaly určité nevhodné efekty související s polarizací jeho dielektrika. Například poté, co nabitý elektrolytický kondenzátor krátce vybijeme, začne se na něm opět objevovat napětí.) Naším potřebám vyhoví kondenzátor fóliový. Fóliové kondenzátory s kapacitou  $1 \mu\text{F}$  (s tolerancí 5%, např. typ CF1-1M0/J z katalogu GME) lze dnes koupit v ceně asi 5,- Kč. Fóliové kondenzátory s vyšší kapacitou nejsou běžně k dostání; potřebujeme-li tedy kapacitu  $10 \mu\text{F}$ , spojíme deset kondenzátorů  $1 \mu\text{F}$  paralelně.

S uvedeným zapojením můžeme změřit třeba náboj člověka nabitého indukční elektrickou.

#### 4. Další náměty

Námětů na další pokusy z oblasti elektrostatiky bychom mohli najít ještě řadu: vlastní konstrukce elektroskopů, závislost mezi výchylkou lístku alobalu na plechovce a napětím, výrobu různých kondenzátorů a leydenských lahví, elektroforů atd. Na vše se však ani na dílně zdaleka nedostalo. Pojdme se tedy podívat už jen na tři další náměty.

##### Jaká je kapacita člověka?

Když už jsme měřili náboj, který má člověk, ať už jej získá třením o podlahu nebo nabitím indukční elektrickou, může se objevit otázka, jaké napětí (vůči zemi) člověk v těchto případech má.

Napětí  $U$  souvisí s nábojem  $Q$  podle známého a už výše použitého vztahu

$$Q = C \cdot U \tag{8}$$

V případě osamocené tělesa bychom měli místo napětí mluvit o potenciálu a užívat vztah  $Q = C \cdot \varphi$ . Ovšem v našem případě, kdy tělesem je člověk, těžko budeme mít člověka vznášejícího se velmi daleko od všech ostatních předmětů – leda byste chtěli nabít kosmonauta, který se utrhl od kosmické stanice... Takže klidně budeme mluvit o napětí vůči zemi. A zemí budeme myslet jak samotný povrch Země (a vodiče s ním spojené, například přívod bleskosvodu), tak velké, alespoň částečně vodivé plochy v našem okolí, například podlahu, stěny, apod.

Takže když už známe, na jak velký náboj může být člověk nabit, k určení napětí stačí znát kapacitu člověka (vůči zemi). Jak velká je ale kapacita člověka?

Zřejmě nemůžeme očekávat nějakou přesnou hodnotu. Stačí se pohnout, přiblížit ke stěně apod. a naše kapacita se určitě změní. Tak zkusme alespoň řádový odhad.

Pro hrubou představu nám může pomoci vztah pro kapacitu izolované vodivé koule o poloměru  $R$  v prázdném prostoru:

$$C = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (9)$$

S využitím vztahu (2) můžeme (9) přepsat na

$$C = \frac{R}{k} \doteq 10^{-10} \text{F} \cdot \frac{R}{1 \text{m}} = 10^{-12} \text{F} \cdot \frac{R}{1 \text{cm}} = 1 \text{pF} \cdot \frac{R}{1 \text{cm}}. \quad (10)$$

Koule o poloměru 1 cm má tedy kapacitu asi 1 pF (přesněji asi 1,1 pF) a kapacita koule je přímo úměrná jejímu poloměru. Koule o poloměru jeden metr má kapacitu asi 100 pF.

(Poznámka: Ve starých učebnicích fyziky se lze setkat s tím, že se kapacita vyjadřovala v centimetrech. Přitom 1 pF odpovídal 0,9 cm. Z výše uvedeného odvození vidíme proč.)

Člověk má, alespoň co se nejdelšího rozměru týče, „poloměr“ necelý jeden metr. Není sice koule (ani když má dost velký apetit), takže můžeme odhadnout, že jeho kapacita je nižší než sto pikofaradů. Ale zato se osamoceně nevznáší v prázdném prostoru, a přítomnost blízkých ploch spojených (více či méně vodivě) se zemí jeho kapacitu naopak zvýší. Celkově tedy můžeme odhadnout, že kapacita člověka je desítky pikofaradů, snad někde v rozmezí 50 až 100 pF.

Z tohoto odhadu vychází, že je-li náboj člověka získaný třením bot o podlahu v rozmezí 100 až 200 nC, jak jsme uvedli výše, má oproti zemi napětí několik kilovoltů. A pokud byl člověk nabit indukční elektrickou a měl náboj přes jeden mikrocoulomb, byl nabit na napětí zhruba deset až dvacet kilovoltů.

A jak ověřit náš odhad kapacity člověka? Máme-li zdroj vysokého napětí a měřič náboje, stačí využít vztahu (8). Připojíme člověka na napětí třeba 1 kV nebo 10 kV proti zemi, pak jej odpojíme od zdroje vysokého napětí (!) a necháme vybit do měřiče náboje, třeba přes rezistor o odporu řádu megaohmů (resp. raději několik rezistorů spojených do série, aby se napětí rozdělilo). Z poměru náboje a napětí určíme kapacitu.

### Jaký proud teče špejlí, když jí vybíjíme plechovku?

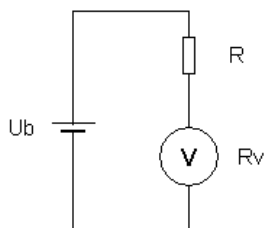
Pokud v elektrickém obvodu s baterií a žárovčkou nahradíme kus drátu špejlí, žárovka se nerozsvítí. Na základě tohoto pokusu bychom dřevo zařadili k izolantům. Ovšem prakticky žádný materiál není dokonalý izolant. Dotkneme-li se nabitě plechovky špejlí, kterou držíme v ruce, obvykle zjistíme, že výchylka lístku, který indikuje nabití plechovky, klesá. Plechovka se přes špejli vybíjí do naší ruky, špejlí prochází proud.

Poznamenejme, že někdy je špejle tak suchá, že proud je velmi malý a prakticky žádné vybíjení nepozorujeme. V těch případech se osvědčilo využít místo špejle tenkou slanou tyčku, ta nebývá tak suchá a plechovku vybíjí rozumnou rychlostí.

Jaký proud ale teče špejlí? A jak ho změřit? Kupodivu na to stačí obyčejný multimetr. Ne ovšem na proudových rozsazích, proudy řádu mikroampér špejlí opravdu netečou. Kupodivu nám však pomůže napět'ový rozsah.

Vnitřní odpor „trochu lepších“ multimetrů (tj. multimetrů v ceně od tří až čtyř set korun výše) bývá  $R_v = 10 \text{M}\Omega$ . Ani vnitřní odpor nejlevnějších multimetrů nebývá nižší než  $1 \text{M}\Omega$ . Velikost vnitřního odporu voltmetru jednoduše ověříme v zapojení podle obrázku.

Je-li odpor rezistoru  $R$  roven vnitřnímu odporu voltmetru  $R_V$ , rozdělí se napětí v poměru 1:2 a voltmetr ukáže poloviční napětí, než je napětí baterie. K ověření, že vnitřní odpor voltmetru je  $10\text{ M}\Omega$  nám tedy stačí rezistor o odporu téže velikosti a například plochá baterie.

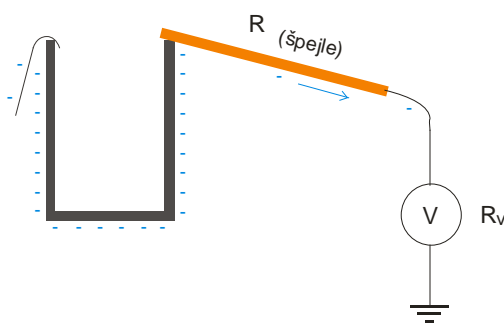


Obr. 19. Kontrola vnitřního odporu voltmetru

Je-li vnitřní odpor voltmetru  $R_V = 10\text{ M}\Omega$ , znamená to, že když ukazuje napětí  $1\text{ V}$ , prochází jím proud  $1\text{ V}/10^7\text{ }\Omega = 10^{-7}\text{ A} = 100\text{ nA}$ . Napětí  $1\text{ mV}$  odpovídá proud  $0,1\text{ nA}$ , tedy  $100\text{ pA}$ . Na nejnižším rozsahu multimetry ukazují s rozlišením  $0,1\text{ mV}$ ; nejmenší proud, který mohou změřit, je tedy  $10\text{ pA}$ . Že si běžně neuvědomujete, že jsou multimetry tak citlivé?

Pro nejlevnější multimetry s vnitřním odporem  $1\text{ M}\Omega$  vycházejí proudy desetkrát vyšší; i tak můžeme měřit proudy od desetin nanoampéru.

Měřit proud špejlí, která vybíjí plechovku, je tedy vlastně snadné. Stačí zapojit multimetr podle obr. 20.



Obr. 20. Měření proudu špejlí, kterým se vybíjí nabitá plechovka

V uvedeném uspořádání můžete ověřit, třeba to, že

► Proud při vybíjení plechovky klesá exponenciálně. (Jde o tentýž proces jako vybíjení kondenzátoru přes rezistor.)

Pokud místo nabitá plechovky použijeme regulovatelný zdroj vysokého napětí, můžeme ověřovat i další zákony, týkající se proudu, napětí a odporu:

► Proud špejlí je úměrný napětí, tj. platí pro něj Ohmův zákon.

► Odpor špejle je úměrný její délce.

Poznamenejme, že při tomto měření je nutno dbát o dobrý kontakt přívodních vodičů se špejlí. Vyřešit přívody pouhým „přicvaknutím“ krokodýlků nestačí; odpor pak příliš záleží na tom, jak dřevo krokodýlkem stiskneme. Osvědčilo se obalit konec špejle alobalem, dobře jej utahovat, a teprve přes alobal připevnit krokodýlek.

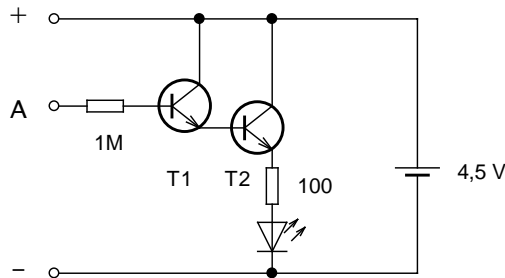
Některé z těchto experimentů a příslušné výsledky byly krátce popsány v [3]



## Indikátor náboje s bipolárními tranzistory... (a jak rozlišit znaménko náboje)

Jednoduchý indikátor reagující na změny elektrického pole, tedy na přibližování a vzdalování nábojů, si lze postavit s obyčejnými (bipolárními) tranzistory. Indikátor byl již v minulosti prezentován na Veletrhu nápadů, viz [4]. Využíval tři tranzistory a žárovičku.

Podobný indikátor využívající LED diodu, který vystačí jen se dvěma tranzistory, jsme si stavěli i na některých seminářích Heuréky. Zapojení ukazuje schéma na obrázku 21.



Obr. 21. Jedno z možných zapojení indikátoru s bipolárními tranzistory

Obvod je možno zapojit ve více variantách, například s LED diodou v kolektorovém obvodu tranzistoru T2. Oba tranzistory mohou být typu BC547. (Jde o běžné křemíkové tranzistory typu NPN pro univerzální použití, které stojí zhruba jednu korunu za kus.) Je vhodné, když je na konci za číselným kódem písmeno C (tedy tranzistor je označen BC547C), pak mají tranzistory vysoký proudový zesilovací činitel (typicky 500 i více), takže indikátor je dostatečně citlivý.

Indikátor bude citlivější, pokud ke svorce A připojíme kousek drátu, třeba kablík s krokodýlkem. Citlivost ještě zvýšíme, pokud přístroj „uzemníme“, tedy spojíme například minus pól baterie se zemí (rourou ústředního topení, kolíkem zásuvky apod.)

Některé pokusy s indikátorem byly už popsány v [4]. Připomeňme možná jeden z nejužitečnějších:

- Indikátor umožňuje zjistit znaménko náboje nabitých předmětů:

Pokud LED svítí při *přibližování* předmětu ke vstupní svorce A, je předmět nabit kladně. Při *vzdalování* takového předmětu LED nesvítí.

Pokud LED nesvítí při *přibližování*, ale naopak při *vzdalování* nabitého předmětu od svorky A, je předmět nabit záporně.

Vysvětlení není složité. LED svítí, pokud *do* báze tranzistoru T1 prochází proud, například pokud svorku A spojíme se kladným pólem baterie (tj. se svorkou +). Pokud ke svorce A přiblížíme kladně nabitý předmět, přitáhne k sobě záporné náboje; ty kladné odpudí, takže jdou do báze tranzistoru T1. Do báze tedy teče proud, tranzistor vede a LED svítí.

Pokud přibližujeme záporně nabitý předmět, přitahuje k sobě do svorky A resp. do drátu, který je k němu připojen, kladné náboje. Záporné odcházejí do báze tranzistoru, ale ty tranzistor neotevřou, LED nesvítí. Teprve když předmět vzdalujeme, kladné náboje, které předtím přitáhl, jdou do báze a po zesílení proudem LED svítí.

Samozřejmě, pro úplnost zde můžeme přidat dvě poznámky:

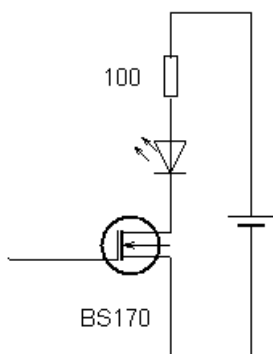
I když jsme mluvili o tom, že někam teče kladný náboj apod., je jasné, že ve vodičích se hýbou elektrony. Ale celý děj určitě umíme „převyprávět“ tak, aby to odpovídalo tomu, že kladné náboje, tedy ionty, se v kovu nepohybují.

Za druhé, co je kladný a záporný náboj, je samozřejmě věcí konvence. To, co našimi pokusy můžeme ověřit je skutečnost, že zealktrovaná skleněná tyč má náboje stejného znaménka, jako jsou na + pólu baterie, zealktrovaná plastová tyč náboje opačného znaménka.

### ... a indikátor s tranzistorem FET

Ještě citlivější indikátor můžeme postavit s unipolárními tranzistory, tedy s tranzistory typu FET. Stačí k tomu i jediný tranzistor, například typu BS170 (v ceně necelých pět korun). Na dílně v Náchodě jsme užívali indikátor s tímto tranzistorem a LED diodou podle schématu na obrázku. (Rezistor 100 až 120  $\Omega$  pouze omezuje proud tekoúčLED, je -li tranzistor plně otevřen.)

Indikátor je velice, až extrémně citlivý. Spojíme-li řídicí elektrodu (elektrodu G, tedy „gate“) s + pólem baterie (třeba pomocí prstů), tranzistor se plně otevře a LED svítí. Vydrží svítit, i když pak elektroda G není k ničemu připojena. (Napětí na elektrodě G se udrží kladné, protože jsme vlastně nabili kondenzátor, který elektroda tvoří s ostatními elektrodami.) Při přiblížení záporně nabitého předmětu se tranzistor uzavírá a LED pohasíná. Naopak pokud elektrodu G spojíme se záporným pólem baterie, tranzistor se zavře, LED nesvítí, a to ani, když je pak elektroda „volná“. Až přiblížení kladně nabitého předmětu tranzistor zase otevře a LED se rozsvítí.



Obr. 22. Jednoduchý indikátor s tranzistorem FET

Uvedené zapojení je nutno pokládat jen za „pilotní“, pro ověření, jaké možnosti by FET tranzistor pro konstrukci jednoduchého indikátoru přinášel. Jak již bylo řečeno, citlivost indikátoru je až zbytečně velká a nastavit přístroj zkusmým „poklepáváním“ prstů spojených s pólu baterie na elektrodu G, aby indikátor rozumně reagoval na to, co chceme, není úplně jednoduché. Navíc reálně hrozí nebezpečí zničení FET tranzistoru velkým napětím na elektrodě G. Maximální napětí, které podle katalogu daný tranzistor na elektrodě G oproti ostatním elektrodám vydrží, je 20 V, a to lehce překročíme, například jen pokud se elektrody G dotkneme nabitým brčkem, a někdy i bez dotyku. I na dílně v Náchodě jsme tak jeden tranzistor BS170 „úspěšně“ zničili. (Sám jsem již předtím zničil asi tři kusy.) Přesto citlivost a další vlastnosti tranzistoru FET stojí za zkoumání dalších možností, jak jej využít v podobných jednoduchých indikátorech. Jednou z možností je například použití žárovčky místo diody LED, viz [5]. Vývoji těchto a podobných jednoduchých konstrukcí a pokusů s nimi, využitelných ve výuce, bych se chtěl ještě v budoucnu dále věnovat.

## Závěr

Jak už bylo řečeno, pokusů z oblasti elektrostatiky by se našlo ještě dost a dost. Jedna dílna však nemůže obsáhnout všechno. Takže se možná ještě někdy na Heuréce, ať už v Náchodě či jinde, s elektrostatikou znovu setkáme. Vždyť náboje kolem nás jsou všude, kam se podíváš...

## Literatura a odkazy

[1] Koudelková V.: *Hands- and Minds-on Electricity and Magnetism II.*, In: WDS'09 Proceedings of Contributed Papers: Part III – Physics, Matfyzpress, Prague, 2009.

[2] Koudelková V., Dvořák L., Dvořáková I.: *Několik experimentů ze semináře „Elektřina a magnetismus krok za krokem“*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 14, Brno, 25.-27. 8. 2009. Ed.: Z. Bochníček, Z. Navrátil, Masarykova Univerzita, Brno 2009. ISBN 978-80-210-5022, s.128-132.

[3] Dvořák L.: *Netradiční měřicí přístroje 4*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 14, Brno, 25.-27. 8. 2009. Ed.: Z. Bochníček, Z. Navrátil, Masarykova Univerzita, Brno 2009. ISBN 978-80-210-5022, s.82-86.

[4] Dvořák L.: *Netradiční měřicí přístroje 2: Indikátor malých proudů*. In: Sborník z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 7, Praha, 28.-30.8.2002, Ed.: Svoboda E., Dvořák L., Prometheus, Praha, 2002, ISBN 80-7196-254-6, s.143-148.

[5] Dvořák L.: *Hrátky s elektrickým nábojem*. In: „Jak učím fyziku?“ Sborník příspěvků semináře JČMF. Vlachovice, 14. – 17. 10. 2009. Ed. R. Seifert, PF UJEP Ústí n.L., 2009. ISBN 978-80-7015-005-4., s. 1-7.