

Metodické materiály pro výuku elektrostatiky

Rozložení náboje na vodiči a izolantu – metodický text

Studenti v první části hodiny porovnají rozložení náboje na vodiči a izolantu podobných tvarů. Druhá část hodiny je věnována propojení informací o rozložení náboje na nepravidelných vodivých tělesech s vlastní zkušeností studentů týkající se sršení náboje a Faradayovy klece.

Téma je koncipováno na 1-2 vyučovací hodiny, dle zájmu studentů.

Cíle hodiny:

- Student porovná rozložení náboje na vodiči a izolantu.
- Student na příkladech z praxe popíše rozložení náboje na vodičích různých tvarů a důsledky tohoto rozložení pro dané praktické aplikace.

Předpokládám, že studenti znají základní vlastnosti elektrického náboje a viděli několik pokusů, ve kterých byla použita nabitá plechovka a alobalový lístek.

1) Rozložení náboje na vodiči a izolantu

Pomůcky: Plechovka na izolační podložce, kanalizační trubka, flanel a tyč, několik alobalových lístků (včetně jednoho na držátku)

U: Během dnešní hodiny se podíváme na to, jak se rozloží náboj na vodiči a srovnáme to s tím, jak se rozloží na izolantu. Začneme tím, co už znáte.

Učitel postaví na stůl plechovku na izolační podložce.

U: Jak se rozloží náboj na této plechovce?

S: Všude na vnější straně.

Učitel nechá někoho ze studentů předvést experiment, kterým toto rozložení ukáže (student pověsí několik lístků na vnější i vnitřní stranu plechovky a ukáže, že se po nabití plechovky zvednou jen lístky z vnější strany).

Pokud studenti experiment ještě neviděli, s velkou pravděpodobností odpoví, že se náboj rozloží „všude“. V tom případě je učitel nechá vymyslet experiment, kterým by tuto hypotézu potvrdili nebo vyvrátili. Studenti snadno přijdou na to, že je na plechovku potřeba umístit

několik lístků z vnější i vnitřní strany. Poté někdo ze studentů experiment provede. To, proč se náboj rozloží pouze na vnější straně plechovky, není potřeba zatím komentovat.

Učitel postaví na stůl plastovou kanalizační trubku.¹

U: A teď to srovnáme s tím, když nabiju tuto „plastovou plechovku“. Sice to není úplně plechovka, ale pro srovnání nám postačí. Zkuste každý nejdřív odhadnout, jak se chování náboje na plechovce a na plastové trubce liší. Tj. odpovězte si každý sám na následující otázky (pro plechovku i plastovou trubku):

- Když ji na jednom místě nabiju, tak...
- Když ji nabiju na víc místech, tak...
- Když chvíli počkám a pak budu zjišťovat, jestli tam náboj je, tak...

Učitel nechá žákům čas na rozmyšlení a napsání odpovědí, poté je vyzve, aby udělali skupiny po cca 4 a v nich probrali své odpovědi a zkusili je zdůvodnit.

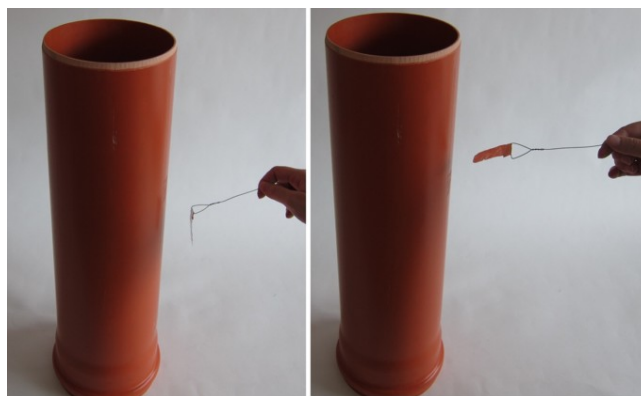
Učitel vyzve jednotlivé skupiny, aby prezentovaly své závěry (vždy po jednotlivých otázkách) a zdůvodnění.

Pozn. Lze očekávat, že odpovědi týkající se plechovky nebudou studentům dělat problémy (mají s ní zkušenost), odpovědi týkající se „plastové plechovky“ bývají pro studenty náročnější. Studenti si musí uvědomit, že náboj se na izolantu nemůže volně pohybovat.

Pokud vznikne ve třídě diskuze nad jednotlivými odpověďmi, může ji učitel nechat chvíli běžet. V každém případě je ale potřeba, aby učitel nebo někdo ze studentů provedl experiment, kterým odpověď na každou ze tří otázek ověří. Závěry je vhodné psát na tabuli. K ověření rozložení náboje na plastové plechovce je vhodné použít alobalový lístek na držátku (viz obr. B1.1.). Pokud má učitel zatemnění, může ukázat i to, že v nabitém místě blikne doutnavka (bliknutí je ale velmi slabé).

Pozn. Kanalizační trubku je potřeba před experimentem vybit. Jako vhodný způsob se ukázalo ji otřít vlhkým kapesníkem a nechat uschnout.

¹ Plastová kanalizační trubka byla zvolena jako vhodný izolant ze dvou důvodů: jednak je tvarem podobná plechovce a jednak není na rozdíl od většiny plastových nádob využívaných v domácnosti antistatická a lze ji proto dobře nabít.



Obr. B1.1. Alobalový lístek poblíž nenabitého (vlevo) a nabitého (vpravo) místa na kanalizační trubce

Na tabuli postupně vzniká tato tabulka:

	plechovka	kanalizační trubka
Když ji na jednom místě nabiju, tak...	náboj se rozloží po celém vnějším povrchu.	náboj zůstane v místě nabití.
Když ji nabiju na více místech, tak...	náboj se rozloží po celém vnějším povrchu, je jedno, na kolika místech ji nabívám.	náboj zůstane pouze na místech nabití.
Když chvíli počkám a pak budu zjišťovat, jestli tam náboj je, tak...	náboj bude stále na celém vnějším povrchu.	náboj bude pořád pouze v místech nabití, nikam dál se nerozloží.

Po provedení experimentů není pro studenty problém formulovat závěr, že na plechovce se náboj rozloží všude po vnějším povrchu (bez ohledu na to, kolikrát a na kterých místech plechovku nabijeme). Naopak na „plastové plechovce“ zůstane náboj vždy pouze v místě nabití. Je vhodné, aby se ve zdůvodnění experimentů objevilo, že náboj se na izolantu nemůže pohybovat – zůstane pouze tam, kde je izolant nabit. Studenti by si měli uvědomit i jiné případy, odkud znají nabití izolantu – nabití plastové tyče, brčka apod. Měli by si propojit, že i v těchto případech náboj na tyči zůstane a „nikam se nevypaří“.

Poté učitel nechá žáky, aby se vrátili ke svým odhadům a zamysleli se nad tím, které odpovědi měli dobře, a případně, jak během hledání odpovědi uvažovali.

2) Rozložení náboje na vodičích různých tvarů

Pomůcky: pracovní list (seznam výroků), elektrostatický větrník, zdroj vysokého napětí, případně ukázka Faradayovy klece.

Učitel rozdává studentům pracovní list se seznamem výroků (viz příloha k metodice) a nechá jim čas se nad jednotlivými výroky zamyslet. Studenti by v každé popsané situaci měli najít vodivé těleso a podle jejich tvaru je rozdělit na dvě skupiny – „dutiny“ a „hroty“.

Seznam výroků:

- a) Ve výtahu má mobilní telefon špatný signál.
- b) Za vlhka je od vedení vysokého napětí slyšet „sršení“.
- c) Blesk udeří spíše do hromosvodu než do střechy, protože hromosvod je tenký drát a končí výš než střecha.
- d) Řidiči ve stojícím autě se za bouřky nic nestane, ani když do auta udeří blesk.
- e) Za bouřky je větší pravděpodobnost, že blesk udeří do osamělého stromu na poli než do stromu uprostřed lesa.
- f) Z mikrovlnné trouby se nedostane ven mikrovlnné záření, protože je kovová a v okénku má kovovou síť.

Učitel nechá studentům čas na samostatnou práci (úkoly 1 a 2 v pracovním listu), poté se studenti rozdělí do skupin po cca 4 a své závěry diskutují se spolužáky (úkoly 3, 4 a 5).

Jednotlivé skupiny poté popíší, jak výroky rozdělily a jak jednotlivé skupiny nazvaly. Studenti by měli dospět k tomu, že do skupiny „dutiny“ (je samozřejmě možné, že ji nazvou jinak) patří výroky a, d, f. Naopak do skupiny „hroty“ patří výroky b, c, e.

Studenti mohou jmenovat vlastní zkušenosti, kdy se s popsányými nebo dalšími podobnými situacemi setkali.

Učitel poté se studenty diskutuje rozložení náboje na vodičích různých tvarů:

Na pravidelném kulovém dutém vodiči (náboj se rozloží pravidelně po vnějším povrchu)

Studenti by měli vlastními slovy vysvětlit, proč se náboj nerozloží i vevnitř dutiny. Pokud mají o náboji a jeho vlastnostech dostatečnou představu, mohou situaci popsat slovy ve smyslu

„náboje se odpuzují, proto se budou snažit se od sebe dostat, co nejdál to jde – uvnitř by byly zbytečně blízko“. Učitel může tuto představu poté zpřesnit.

Učitel poté představu zobecní i pro libovolnou nepravidelnou dutinu a sdělí studentům, že se taková dutina označuje jako Faradayova klec a spolu se studenty uvede další příklady, kdy se s tím, že v dutině není elektrické pole, mohou setkat. Mezi příklady může být například plechovka (uvnitř plechovky se také nerozloží náboj)², špatný mobilní signál v některých moderních kancelářských budovách apod. (dle zkušeností studentů). Má-li učitel Van de Graffův generátor, je vhodné se studenty diskutovat jeho princip – náboj se z pásu přesouvá do dutiny, odkud se přemisťuje na vnější stranu koule; do dutiny lze tak přenášet stále další náboj, aniž by se vyrovnal potenciál.

Učitel může studentům také ukázat video s člověkem zavřeným uvnitř auta, do kterého udeří výboj z Teslova transformátoru (vhodná videa lze najít např. na stránkách laboratoře vysokého napětí EGU HV laboratory [B1.1]).

Pozn. Je pravda, že slabý signál ve výtazích a železobetonových kancelářských budovách a záření, které nevychází z mikrovlnné trouby kvůli kovovým stěnám (a kovové mřížce zepředu), se zdaleka netýká jen elektrostatiky. Stále se ale jedná o princip Faradayovy klece a ten je vhodné studentům ilustrovat na příkladech, se kterými se setkávají. Pokud se na to studenti zeptají, učitel by jim samozřejmě měl použití těchto příkladů zdůvodnit, jinak není na této úrovni potřeba to, že se jedná o elektromagnetické pole resp. o elektromagnetické záření, zpřesňovat. Učitel se k tomu může vrátit při výuce elektromagnetismu případně elektromagnetického vlnění.

Na hrotech

Učitel zavede pojem „plošná hustota náboje“ jako podíl náboje a plochy. Poté pomocí obrázku studentům vysvětlí, že na hrotech je větší plošná hustota náboje, protože hrot je „v průměru nejdál“ od všech ostatních nábojů rozložených na povrchu tělesa. Vzhledem k tomu je na hrotech také největší elektrická intenzita. Učitel studentům sdělí označení „sršení náboje z hrotu“ a ukáže některé experimenty, kde k sršení dochází – elektrický větrníček, sršení náboje k plamenu svíčky apod., sršení z hrotu van de Graaffova generátoru apod.

² Je vhodné, aby učitel upřesnil, že vzhledem k tomu, že plechovka je z jedné strany otevřená, část náboje bude i na její vnitřní straně.

Nemá-li učitel k dispozici pomůcky k provedení experimentů naživo, může žákům sršení náboje z hrotu ukázat alespoň ve formě videa (viz [B1.2]).

Studenti mohou diskutovat vlastní zkušenosti se sršením z hrotu, učitel může případně připomenout známou poučku týkající se chování v otevřeném prostoru za bouřky – je lepší si lehnout a „nevyčuhovat“ nad okolní terén.

[B1.1] EGU – HV Laboratory, a.s. [online]. Dostupné na: <http://www.egu-vvn.cz/cs/>

[B1.2] Sršení v okolí hrotu. [online]. Dostupné na: <http://fyzikalnipokusy.cz/759/srseni-v-okoli-hrotu>

Rozložení náboje na vodičích různých tvarů

pracovní list

1) Zamyslete se nad následujícími výroky. Máte s některým z nich vlastní zkušenost?

- Ve výtahu má mobilní telefon špatný signál.
- Za vlhka je od sloupů vysokého napětí slyšet „sršení“.
- Blesk udeří spíš do hromosvodu než do střechy, protože hromosvod je tenký drát a končí výš než střecha.
- Řidiči ve stojícím autě se za bouřky nic nestane, ani když do auta udeří blesk.
- Za bouřky je větší pravděpodobnost, že blesk udeří do osamělého stromu na poli, než do stromu uprostřed lesa.
- Z mikrovlnné trouby se nedostane ven mikrovlnné záření, protože je kovová a v okénku má kovovou síť.

2) Rozdělte výroky do dvou skupin tak, jak si myslíte, že k sobě patří z hlediska tvaru příslušného vodivého tělesa.

skupina 1:

skupina 2:

3) Se spolužáky ve skupině si porovnejte, jak jste příklady rozdělili. Pokud jste se na nějakém rozdělení výroků shodli, napište si ho.

skupina 1:

skupina 2:

Zkuste typický tvar vodiče v každé skupině nějak pojmenovat.

4) Pokud vás napadají nějaké další příklady, které by se vám hodily do jedné nebo druhé skupiny, dopište si je jinou barvou.

5) Napadají vás nějaké související otázky? Napište si je.

Intenzita a potenciál – metodický text

Tématický celek je koncipován na 3-4 vyučovací hodiny. Studenti v první hodině zkoumají analogii mezi gravitačním a elektrickým polem, v 2. a 3. hodině je odvozen a procvičen vztah pro intenzitu elektrického pole v okolí bodového náboje a pro potenciál v okolí bodového náboje. Součástí 3. hodiny je i diskuze týkající se limitů analogie. 4. hodinu lze věnovat procvičování výpočtů případně dalším navazujícím aktivitám.

Tématický celek navazuje na téma Coulombův zákon, který už by studenti měli znát.

Cíle tematického bloku:

- Student porovná gravitační a elektrické pole z hlediska jejich grafického zobrazení
- Student vysvětlí pojmy intenzita a potenciál elektrického pole pomocí analogie s gravitačním polem
- Student samostatně nakreslí siločáry a ekvipotenciální čáry elektrického pole v okolí bodového náboje a homogenního pole
- Student počítá typové úlohy týkající se intenzity a potenciálu v okolí bodového náboje případně několika bodových nábojů

Pomůcky:

úvodní pracovní list (viz závěr metodiky), obrázky elektrického pole, počítač s připraveným apletem (viz <http://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/elmag/html/aplety/elmag1.html>), kulička (případně model kopce, má-li ho učitel k dispozici), případně pracovní list na navazující aktivitu „Mravenec v elektrickém poli“

1. hodina

U: V rámci dnešní hodiny byste měli pochopit dva pojmy, pomocí kterých se popisuje elektrické pole okolo nábojů. K tomu, abyste tomu snáz porozuměli, začneme od toho, co znáte – od mapy. Udělejte si skupiny po přibližně čtyřech, vezměte si pracovní listy a splňte úkoly, které jsou napsané na první straně. Na druhou stranu zatím papír neatáčejte.

Učitel rozdá studentům pracovní listy (viz závěr metodiky) a nechá jim čas na vyplnění. Poté společně se žáky shrne správné odpovědi. Ve shrnutí by se mělo objevit (tyto závěry může učitel psát na tabuli):

- vrstevnice je čára, která spojuje místa se stejnou nadmořskou výškou

- výška kopce je rozdíl mezi nadmořskou výškou vrcholu a nadmořskou výškou pod kopcem
- strmost kopce lze poznat podle hustoty vrstevnic
- vrstevnice a spádnice jsou na sebe kolmé

Poté učitel studenty požádá, aby vyplnili druhou stranu pracovního listu (část B). Studenti snadno dojdou k tomu, že je „vrstevnice“ a spádnice“ jsou na sebe kolmé, že lze stejně jako u mapy určit „strmost“, ale nelze poznat, zda se jedná o „kopec“ nebo „údolí“.

Učitel jim po společném shrnutí odpovědí ukáže reálný obrázek na apletu a sdělí jim, že tentokrát nešlo o mapu, ale o elektrické pole.

Poté spolu se studenty vyplní tabulku na konci pracovního listu – sdělí jim, jak se veličinám, které znají z gravitačního pole, říká při popisu elektrického pole.

Tab. B2.1: Analogie mezi gravitačním a elektrickým polem

A) mapa – gravitační pole	B) obrázek – elektrické pole
nadmořská výška ³	potenciál
vrstevnice	ekvipotenciální čára (hladina)
rozdíl nadmořských výšek = výška kopce	rozdíl potenciálů = napětí
strmost kopce	intenzita elektrického pole
spádnice	elektrická siločára

Učitel studentům sdělí, že dohodou míří elektrické intenzita od kladného náboje k zápornému, tj. že v této analogii je kladný náboj „kopec“.

Učitel studentům sdělí značky a jednotky intenzity a potenciálu: studenti znají jednotku napětí, z toho snadno přijdou na to, že potenciál má stejnou jednotku. Pokud studenti definovali strmost kopce ve smyslu „kolik vrstevnic musím projít, než ujdou metr“⁴, nemají

³ Fyzikálně přesnější analogií potenciálu je v tíhovém poli nadmořská výška násobená tíhovým zrychlením. Vzhledem k tomu, že v popisované analogii jde o kvalitativní budování nového konceptu, je pro větší srozumitelnost pro studenty tíhové zrychlení vynecháno.

⁴ Přesnější formulace by měla znít „Kolik metrů nastoupám, než ujdou metr ve vodorovném směru“, ale pro jednoduchost a větší názornost je vhodné nechat takovou formulaci, kterou formulují žáci a to i přesto, že není do všech detailů přesná.

problém s pochopením intenzity elektrického pole ve smyslu „kolik ekvipotenciálních čar musím projít na metru vzdálenosti“ a nedělá jim tak problém ani jednotka intenzity V/m.

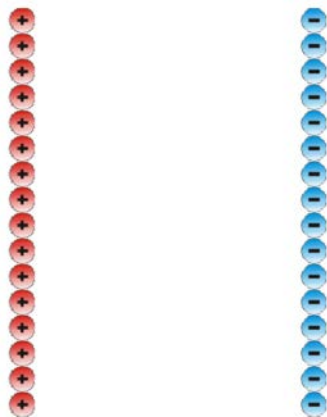
2. hodina

Učitel se studenty na začátku hodiny zopakuje závěry z předchozí hodiny – studenti by si měli připomenout, že elektrické pole lze popsat dvěma veličinami, z nich jedna odpovídá „strmosti kopce“, druhá „nadmořské výšce“.

Poté učitel studentům ukáže několik obrázků se zobrazením elektrického pole pomocí vektorů intenzity nebo ekvipotenciálních čar. Studenti samostatně určují, kde jsou umístěny náboje a jaké mají znaménko (u zobrazení ekvipotenciálních čar samozřejmě nelze poznat polaritu náboje, v tom případě učitel náboj jednoho znaménka studentům sdělí). Příklady obrázků jsou na konci této metodiky, ale učitel si může snadno vytvořit vlastní.

U: A teď to zkuste obráceně – nakreslete každý sám, jak bude vypadat pole:

- okolo jednoho kladného náboje
- okolo jednoho záporného náboje
- okolo dvou řádků opačných nábojů (učitel nakreslí zadání na tabuli nebo ho promítne z apletu, viz obr. B2.1). Kdo bude mít nakresleno, může si zkontrolovat své řešení se sousedem.



Obr. B2.1. Pole mezi dvěma řadami opačných nábojů (homogenní pole)

Pole okolo jednoho náboje by mělo být pro studenty velmi jednoduché, pokud porozuměli analogii s gravitačním polem, zvládnou samostatně i poslední obrázek. Učitel jim poté sdělí, že se tomuto poli říká homogenní a poli okolo jednoho náboje se říká radiální. Může jim připomenout i téma Pohyby v homogenním a centrálním gravitačním poli z mechaniky.

U: A teď pojdme odvodit, jak intenzitu a potenciál okolo jednoho náboje spočítat i kvantitativně. Začneme tou intenzitou. Představte si, že stojíte na kopci a chcete porovnat, jak je strmý na dvou různých místech.

Ž: Tak se podívám a vidím...

U: Souhlasím a je pravda, že to je na kopci nejjednodušší. Ale vzhledem k tomu, že nemáme „oko“ pro elektrické pole, zamyslete se nad nějakou jinou metodou, jak určit strmost kopce, tak, aby to šlo potom převést do elektrického pole. Napište si každý, co vás napadá.

Učitel nechá žákům čas na rozmyšlení, poté je vyzve, aby své nápady říkali. Mezi nápady se mimo jiné může objevit např.:

- zapíchnu tyč a změřím úhel mezi tyčí a kopcem
- pustím kuličku a zjistím, jak rychle se kutálí
- ...

Učitel všechny nápady pochválí, a sdělí studentům, že běžně se používá metoda pomocí kuličky, jen je potřeba ji zpřesnit. Učitel poté dovede studenty k tomu, že kulička se pohybuje zrychleně a tedy není vhodné měřit její rychlost (ta se mění), ale spíše zrychlení. Poté jim sdělí, že se v praxi používá měření síly, protože se v elektrickém poli měří snáz než zrychlení. Potom učitel studenty nechá popsat, jak bude experiment vypadat v elektrickém poli – místo kuličky bude malý náboj a budeme měřit, jak velkou silou na něj působí ten náboj, který je „na vrcholu kopce“. Z této analogie studenti snadno uvidí definici elektrické intenzity jako síly, která působí na malý testovací náboj. Lze tedy pomocí Coulombova zákona odvodit definiční vztah:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2}$$

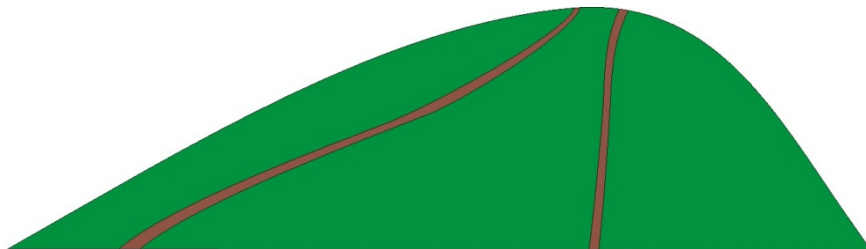
Současně lze studentům z tohoto definičního vztahu ukázat i druhou jednotku intenzity N/C. Následně by studenti měli s tímto vztahem pracovat – jednak by měli vyřešit několik úloh, na kterých by jim měl učitel mimo jiné ukázat i princip superpozice; jednak by ale vztahu měli porozumět i kvalitativně – měli by si uvědomit, že intenzita klesá s druhou mocnou vzdálenosti, jak se výpočet změní, pokud se zvětší/zmenší náboj, jaký bude směr vektoru intenzity v daném místě v elektrickém poli tvořeném jedním i dvěma náboji (jak se vektory v daném místě sčítají).

3. hodina

U: V dnešní hodině budeme mluvit o tom, jak určit potenciál elektrického pole i kvantitativně. Připomeňte si nejdřív, čemu odpovídá potenciál a intenzita v gravitačním poli.

Ž: Potenciál je nadmožská výška, intenzita je strmost toho kopce.

U: Souhlasím. Představte si tedy například takovýto kopec (učitel kreslí na tabuli, viz např. obr. B2.2). Pro jednoduchost si představme, že kopec začíná na hladině moře a můžeme tedy nadmožskou výšku brát rovnu výšce kopce. Na vrchol tohoto kopce se lze dostat různými cestami – lze si vybrat krátkou cestu, která je ale velmi strmá, nebo pozvolnou cestu, která je ale mnohem delší. Zdá se tedy, že strmost kopce a nadmožská výška spolu souvisí. Souvislost je ale bohužel složitější, než jsme schopni matematicky odvodit.



Obr. B2.2. Ke vztahu mezi potenciálem a intenzitou – kopec se dvěma různě strmými cestami

Poté učitel žákům sdělí vztah pro potenciál bodového náboje.

$$\varphi = k \frac{Q}{r}$$

Jako spíše mnemotechnickou pomůcku může učitel žákům sdělit i to, že to vypadá, jako by potenciál byl součinem intenzity a vzdálenosti, že fyzikálně je to o něco složitější.

Poznámka: Výše popsaná analogie není matematicky zdaleka přesná – „vzdálenost“ by měla být vodorovná vzdálenost, „strmost“ je definována velmi vágně. Analogie je tak vhodná spíše pro představu a pro uvědomění si toho, že mezi potenciálem a intenzitou je nějaký vztah. Nelze ji chápat jako matematicky přesnou. Na druhou stranu, pokud si je učitel vědom jejích omezení, může studentům analogie pomoci k porozumění a zapamatování vztahu pro potenciál. Učitel může studentům popsat i obvyklejší odvození potenciálu z potenciální energie, ale podle mé zkušenosti je pro studenty pojem potenciální energie v elektrickém poli velmi špatně pochopitelný.

Poté by studenti opět měli s tímto vztahem pracovat – měli by si jednak kvalitativně uvědomit, že potenciál klesá se vzdáleností nepřímo úměrně, ale i spočítat několik úloh týkajících se potenciálu v okolí jednoho i více bodových nábojů (ve kterých by si měli mimo jiné uvědomit, že potenciál je na rozdíl od elektrické intenzity skalární veličina).

Učitel může současně okomentovat i to, proč lze postavit v analogii kopec na hladinu moře – nulovou hladinu potenciálu lze zvolit dle potřeby. Měl by ale i studentům sdělit, že obvykle se volí v nekonečnu.

U: V předchozích hodinách jsme definovali dvě veličiny na základě analogie s gravitačním polem. Jako každá analogie i tato má své meze a je v některých věcech nepřesná. Zkuste se teď každý sám zamyslet, v čem tato analogie neodpovídá.

Učitel poté nechá studentům čas, případně je může nechat o problému diskutovat ve dvojici. Mezi věcmi, ve kterých analogie neseďí, by se mělo určitě objevit (pokud na to studenti nepřijdou sami, učitel jejich nápady doplní):

- v elektrickém poli jsou dva druhy náboje – kladné a záporné
- nulový potenciál se obvykle stanovuje v nekonečnu, na rozdíl od nadmořské výšky
- „strmost“ nebyla v analogii nijak přesně definovaná

Na závěr by studenti měli udělat reflexi, např. tím, že si odpoví na následující otázky:

- Jaké tři nejdůležitější informace jsem si z toho odnesl(a)?
- Čemu z toho ještě úplně nerozumím?
- Jaké otázky mi k tomuto tématu ještě běží hlavou, co bych se ještě chtěl(a) dozvědět?

Je vhodné, aby si studenti na dané otázky odpověděli nejdřív samostatně, poté o nic mohou diskutovat ve dvojicích. Pokud z reflexe vyplyne nějaký problém, kterému student nerozumí, měl by učitel nechat dostatek prostoru na jeho vyřešení – buď mezi studenty samotnými, nebo ve spolupráci s učitelem.

Navazující aktivita „Mravenec v elektrickém poli“

Lze ji zařadit do některé z následujících hodin, případně zadat studentům její vyřešení jako dobrovolný domácí úkol (hlavně pro ty, kteří mají pocit, že pojmům potenciál a intenzita ještě zcela nerozumí). Pracovní list k této aktivitě je zařazen na konec metodiky.

Učitel studentům rozdá několik obrázků elektrického pole zobrazeného pomocí intenzity a potenciálu a texty, které pole popisují z pohledu „elektrického mravence“ stojícího uvnitř pole v daném místě. Studenti mají za úkol:

- přiřadit k jednotlivým textům pole, které mravenec popisuje (k jednomu obrázku mohou patřit dvě pole);
- přiřadit, ve kterých textech „mravenec“ popisuje pole z pohledu potenciálu a ve kterých z pohledu intenzity elektrického pole.

Aktivitu lze rozšířit, např.:

- Studenti mohou stejným způsobem pospat další obrázky (ať už některé z připravených nebo vlastní vyrobené na apletu), případně jiné místo na některém popsaném obrázku.
- Studenti mohou podle textu nakreslit vlastní odpovídající obrázek.

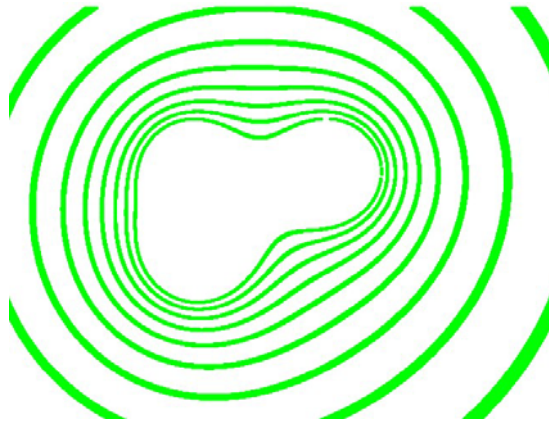
Pracovní list k aktivitě je k dispozici na konci metodického materiálu.

Technické poznámky k využívanému apletu

Aplet, který je použit pro zobrazení elektrické intenzity a potenciálu okolo bodových nábojů, je umístěn na adrese <http://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/elmag/html/aplety/elmag1.html>. Jeho autorem je Mgr. Pavel Böhm. Intenzitu i potenciál aplet počítá (z tohoto důvodu může vykreslení ekvipotenciálních hladin trvat několik sekund). Náboje lze samozřejmě volit kladné i záporné, lze také měnit jejich velikost (odkaz „nastavení náboje“ po kliknutí pravým tlačítkem na náboj). V metodice popsané výše se velmi osvědčila možnost uložení a zpětné načtení dané konfigurace – učitel si tak může obrázky předem připravit, uložit si příslušné konfigurace do souboru a v hodině je jen postupně načíst (to je obzvláště vhodné u zobrazení homogenního elektrického pole, jehož skládání z jednotlivých nábojů pochopitelně chvíli trvá). U následujících ukázek použitých obrázků jsou tak přímo vloženy i příslušné konfigurace.

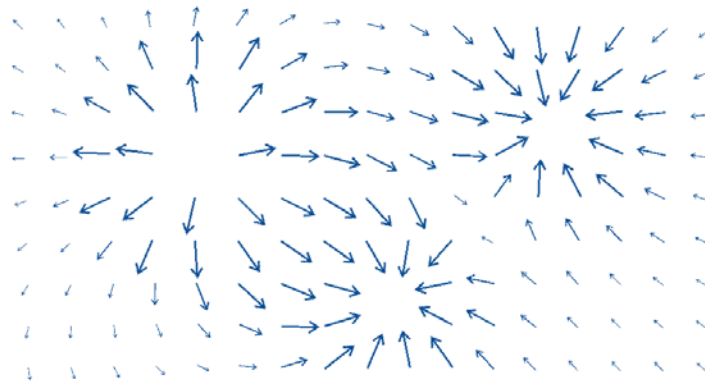
Obrázky z apletu použité v metodice

1) Elektrické pole v úvodním pracovním listu, který se týká analogie mezi gravitačním a elektrickým polem (obrázek je oproti originálu zmenšený)



(Konfigurace: 464.85|175.3|70|308.15|170.7|50|316.05|259.95|70|)

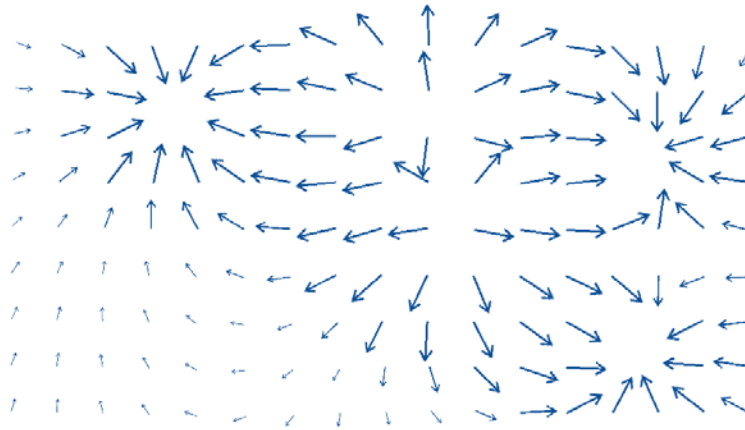
2) Zobrazení elektrické intenzity a ekvipotenciálních hladin použité v úvodu 2. hodiny. Studenti určují, kde jsou umístěné náboje a jaké mají znaménko:



(konfigurace: 211.3|208.7|100|426.95|369.2|-100|614.35|157.9|-100|)

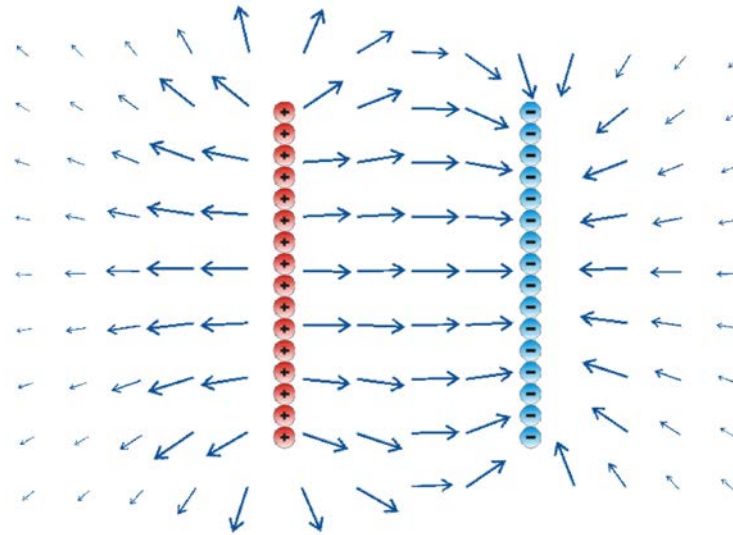


(konfigurace: 368.55|277.8|100|402.45|111.85|-100|672.45|336.85|-
100|150.4|413.7|100|)



(konfigurace: 482.4|247.05|100|176.95|114.55|-100|694.3|163.8|-
100|453|120|100|675|398|-100|)

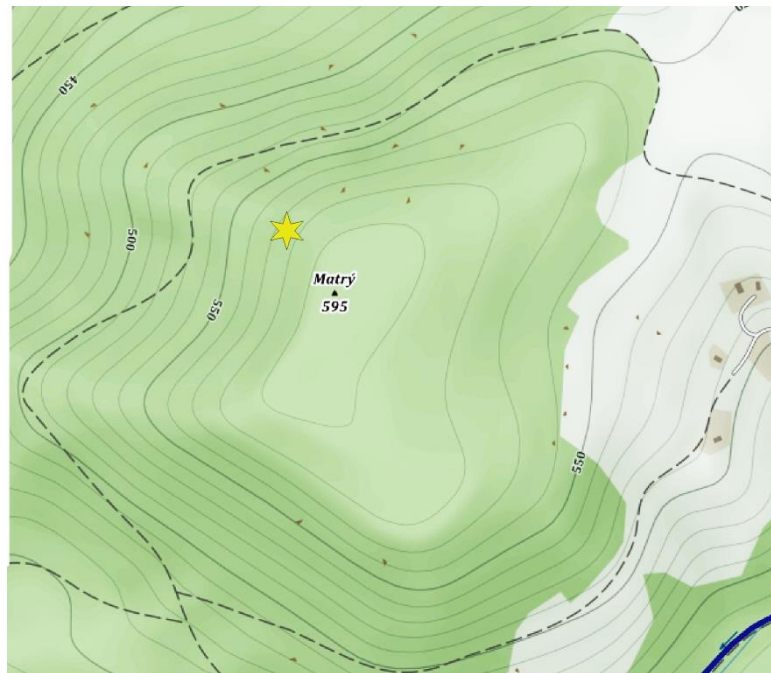
3) Homogenní elektrické pole:



(konfigurace:
283|385|10|283|365|10|283|345|10|283|285|10|283|305|10|283|325|10|283|265|10
|283|245|10|283|225|10|283|165|10|283|185|10|283|205|10|283|145|10|283|125|1
0|283|105|10|283|405|10|510|385|-10|510|365|-10|510|345|-10|510|285|-
10|510|305|-10|510|325|-10|510|265|-10|510|245|-10|510|225|-10|510|165|-
10|510|185|-10|510|205|-10|510|145|-10|510|125|-10|510|105|-10|510|405|-10|)

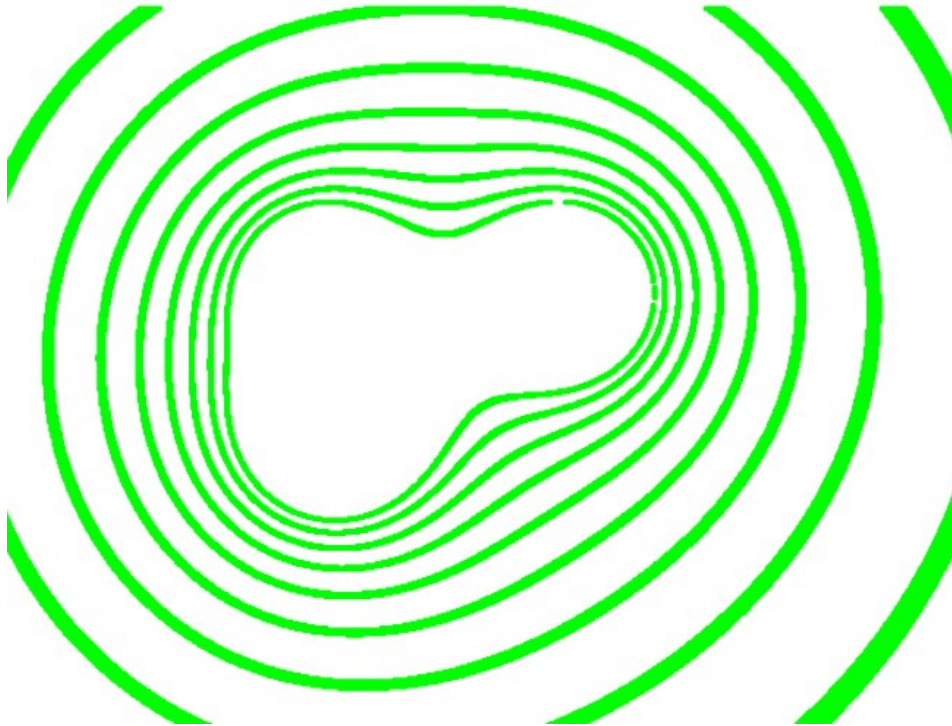
Pracovní list – analogie elektrického a gravitačního pole

A) Pracujte s mapou kopce v Českém středohoří:



- 1) Vyznačte na mapě jednu z vrstevnic. Zformulujte, co to je vrstevnice – jaká místa spojuje?
- 2) Jaká je výška kopce? Jak se to dá z mapy určit?
- 3) Najděte a vyznačte místa, kde je kopec hodně strmý a naopak místa, kde je spíše pozvolný. Jak se takové místo na mapě pozná?
- 4) V místě označeném žlutou hvězdičkou vyznačte nejstrmější směr (tzv. spádnici). Jaký je vztah mezi vrstevnicemi a touto spádnicí?

B) Pracujte s následujícím obrázkem:



- 1) Vyznačte na obrázku jednu z „vrstevnic“ a nějakou spádnicí. Jaký je mezi nimi vztah?
- 2) Vyznačte na obrázku místo, kde je velká strmost, a naopak místo, kde je strmost poměrně malá.
- 3) Pozná se z obrázku, zda se jedná o „kopec“ nebo o „údolí“? Jak?

Závěr:

A) mapa – gravitační pole	B) obrázek – elektrické pole
nadmořská výška	
vrstevnice	
rozdíl nadmořských výšek – výška kopce	
strmost kopce	
spádnic	

„Mravenec v elektrickém poli“

Představ si „elektrického mravence“, který stojí v elektrickém poli a popisuje, co vidí. Z následujících textů urči:

- které pole daný text popisuje (jeden obrázek mohou popisovat i dva texty)
- ve kterých textech mravenec mluví o intenzitě elektrického pole a ve kterých o potenciálu

Text 1:

Vlevo před sebou vidím vysoký kopec, vpravo podlouhlé hluboké údolí. Stojím přibližně v polovině výšky mezi nimi. Kdybych šel rovně, půjdu skoro po rovině. Kdybych šel doprava dozadu a včas zatočil, obešel bych to údolí napravo a přitom šel v podstatě po rovině.

Text 2:

Stojím na planině v nejnižším místě pole. Okolo mě jsou všude kopce, všechny vypadají přibližně stejně vysoké.

Text 3:

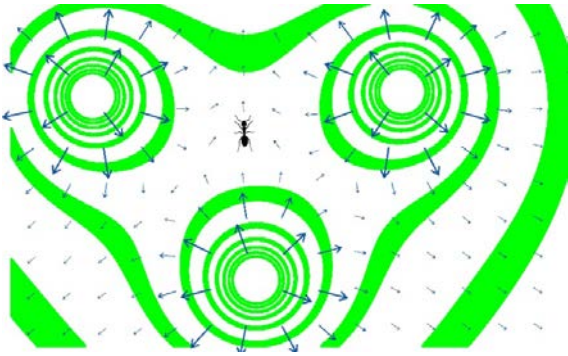
Přijdu si, jako kdybych se díval do čím dál strmějšího trychtýře – napravo přede mnou svah strmě padá dolů. Za mnou je svah poměrně pozvolný.

Text 4:

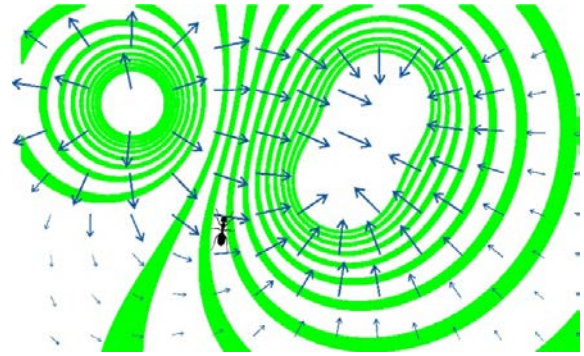
Stojím ve svahu, ten nalevo ode mě stoupá pozvolně nahoru, ale o kousek dál vidím, že začne stoupat mnohem strměji. Vpravo přede mnou svah naopak klesá poměrně strmě dolů. Kdybych šel kousek rovně, dostanu se do místa, kde nalevo ode mě svah velmi strmě stoupá a naopak napravo padá velmi strmě dolů.

Text 5:

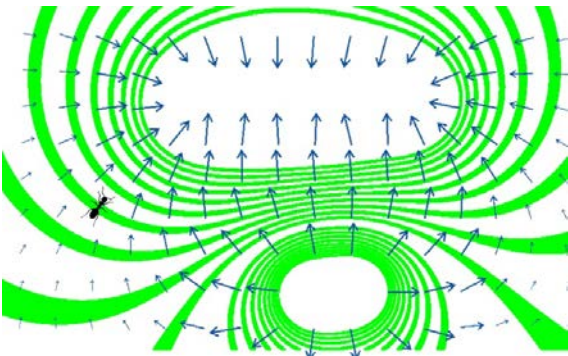
Stojím na nejvyšším místě pole, na podlouhlé náhorní planině. Nalevo i napravo ode mě je údolí. Pokud půjdu rovně dopředu nebo dozadu, půjdu kousek rovně a potom přede mnou bude nízký kopec.



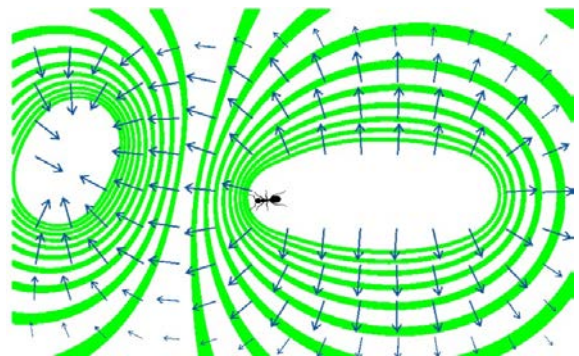
A)



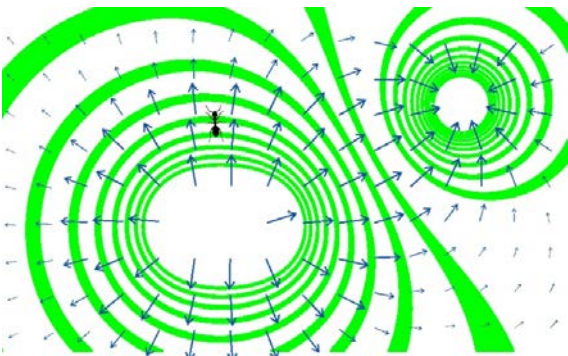
B)



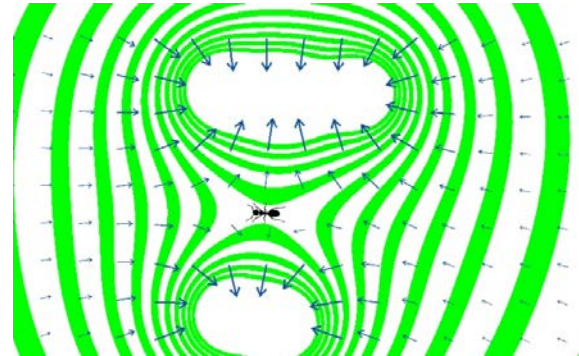
C)



D)



E)



F)

Kapacita, kondenzátor – metodický text

Téma je koncipováno na 1-2 vyučovací hodiny – výukový celek lze buď zařadit na jednu vyučovací hodinu s demonstračními experimenty učitele, nebo je možné nechat studenty experimenty provádět skupinově. V tom případě je potřeba počítat dvě hodiny. Další možností je zařadit za výukový celek laboratorní práce, ve kterých si studenti experimenty vyzkouší. Námět na možnou laboratorní práci je k dispozici v příloze C2.

Studenti mají během výuky možnost porozumět pojmu kapacita vodiče a tomu, jak je obecně uspořádán kondenzátor. Současně mají možnost si ověřit, že kondenzátor je součástka určena k uskladnění náboje a sami si některé typy kondenzátoru sestaví.

Předpokládám, že studenti znají pojem potenciál elektrického pole a viděli několik experimentů s nabitou plechovkou.

Cíle hodiny:

- Student má možnost získat představu a vlastními slovy vyjádřit, co je kapacita vodiče (plechovky).
- Student porovná velikost náboje na samotném vodiči (plechovce) a v kondenzátoru.
- Student formuluje hypotézy, na čem závisí kapacita kondenzátoru, tyto hypotézy ověří (ve skupině nebo ve spolupráci s učitelem).
- Student srovná konstrukci reálného kondenzátoru (svitkového, Leydenských lahví) s konstrukcí modelového kondenzátoru vyrobeného učitelem.

Poznámka: Autorem experimentu s kapacitou různě velkých plechovek a s kondenzátorem z kelímků je L. Dvořák, experiment je publikován v [1]. Podrobné měření kapacity deskového kondenzátoru je publikováno v [1].

Pomůcky:

dvě různě velké plechovky na izolační podložce, vodiče, měřič kapacity (pro skupinovou práci lépe několik), vysokonapěťový zdroj, plastové kelímky o objemu cca 0,3 l, alobal, svitkový kondenzátor, větší kniha

1) Zavedení pojmu kapacita vodiče

U: Během dnešní hodiny zavedeme novou veličinu a podíváme se na jednu součástku, kterou máte určitě všichni například ve svých mobilních telefonech.

Učitel na katedru postaví na polystyrenovou desku dvě různě velké plechovky spojené vodičem (tak, aby šel vodič snadno odstranit bez vybití plechovek). Jednu z plechovek nabije z indukční elektriky nebo jiného vysokonapěťového zdroje.

U: Vidíte tu dvě plechovky, které jsou vodivě spojené. Co můžeme určitě říct o tom, jak to na nich bude vypadat s elektrickým polem, až je nabijí?

S: Bude na nich stejný potenciál.

U: Máš pravdu, ale zkus to zdůvodnit.

S: Tak jsou spojené, takže kdyby tam stejný potenciál nebyl, tak se vyrovná...

Pokud studentům není vysvětlení jasné nebo je nenapadne, že je na obou plechovkách stejný potenciál, učitel je k tomu dovede pomocí návodných otázek. Může případně připomenout analogii s tíhovým polem (viz metodický materiál Intenzita a potenciál).

Učitel poté obě plechovky nabije vysokonapěťovým zdrojem⁵, odstraní vodivé spojení a nechá někoho ze studentů porovnat, která plechovka mu dala „větší ránu“. Student snadno popíše, že větší plechovka ho „kopla víc“ a zdůvodní, že je na ní víc náboje. Mají-li studenti představu o pravidelném rozložení náboje na plechovce, nedělá jim tato představa problém.

Poznámka: Experiment nesmí provádět student se srdeční vadou!

Učitel poté zopakuje závěr: Na větší plechovce je při stejném potenciálu víc náboje. (Je vhodné, aby učitel ve formulaci závěru připomenul nutnost stejného potenciálu, aby ve studentech nebudoval představu kapacity jako „kolik se tam toho vejde“, která je nepřesná a může mít za následek některé miskoncepce)

Poté učitel nechá studenty vymýšlet, jak by se tato vlastnost plechovky mohla nazývat. Mezi častými názvy se objevuje např. velikost, povrch,... Pokud se mezi návrhy neobjeví slovo kapacita, učitel ji studentům nabídne sám a nechá je zhodnotit, jestli je pro popis vlastnosti vhodná.

⁵ Jako vysokonapěťový zdroj lze použít i indukční elektriku případně „magickou hůlku“ Fun Fly Stick, která má stejný princip jako Van de Graaffův generátor a lze ji koupit v běžných obchodech. V nouzi lze použít i plastovou tyč třenou hadrem.

Učitel poté zavede kapacitu jako veličinu – sdělí studentům její značku, jednotku a nechá je zformulovat její definici: množství náboje, které se do plechovky vejde, když je nabita na daný potenciál. Je vhodné, aby učitel studentům sdělil i definiční vzorec kapacity (plyne přímo ze slovní definice, takže studentům jeho porozumění nedělá problém):

$$C = \frac{Q}{\varphi}. \quad (1)$$

Učitel by měl studentům uvést vztah i v obvyklejší podobě $Q = C \cdot \varphi$ a zdůraznit jim, že C je parametr úměrnosti a není funkcí náboje ani potenciálu. Na druhou stranu, vztah (1) plyne přímo ze slovní definice a je tak pro studenty srozumitelnější.

Jsou-li na to studenti zvyklí, je vhodné, aby jim učitel sdělil i typické hodnoty, které lze u kapacity očekávat.

2) Kapacita plechovky

U: Pojdme teď odhadnout kapacitu větší z těchto dvou plechovek. Pro jednoduchost si představme, že plechovka má přibližně tvar koule a je umístěná ve vakuu (relativní permitivita vzduchu se jen velmi málo liší od jedné). To, co ještě potřebujete vědět, je, že potenciál na povrchu koule se počítá stejně jako potenciál bodového náboje s tím, že r není vzdálenost od bodového náboje, ale poloměr koule.

Studenti poté dosadí do definičního vztahu pro kapacitu:

$$C = \frac{Q}{\varphi} = \frac{Q}{\frac{kQ}{r}} = \frac{r}{k} = 4\pi\epsilon_0 r,$$

kde $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ a ϵ_0 je permitivita vakua.

Po číselném dosazení studenti zjistí, že kapacita plechovky je velmi malá (pro větší plechovku o poloměru přibližně 10 cm vychází kapacita $10 \cdot 10^{-12}$ F). Učitel potom může studentům sdělit přibližný odhad – na každý 1 cm poloměru koule připadá přibližně 1 pF kapacity.

Pokud učitel studentům sdělil typické hodnoty, je pravděpodobné, že se někdo ze studentů zeptá, jak se to tedy dělá v praxi. Pokud otázka nepadne, položí ji učitel studentům sám a případně je nechá dopočítat velikost koule o kapacitách typických pro praktické aplikace (studenti triviálně přijdou na to, že koule o poloměru 10 km odpovídající kapacitě 1 μ F není praktická...).

Poté učitel studentům rozdá kondenzátory (otevřené tak, aby šel z kovového pouzdra vyndat samotný vnitřek) a nechá je ve skupinách prozkoumat, jak jsou uspořádané vevnitř. Studenti snadno popíší, že uvnitř jsou kovové plíšky a mezi nimi nějaký mastný papír (viz obr. B3.1).



Obr. B3.1. Původní svitkový kondenzátor (vlevo), po sundání kovového obalu (uprostřed) a po rozbalení (vpravo) – jsou vidět dvě vodivé vrstvy oddělené papírem.

Učitel poté upřesní, že se součástka nazývá kondenzátor a že se vždy skládá ze dvou vodičů (kterým se říká desky) a z izolantu (dielektrika) mezi nimi.

U: Jako vhodný vodič lze použít například alobal, jako izolant je v tomto případě použit papír. Ve zvětšené podobě je tak kondenzátor, který jste viděli, vyroben přibližně takto... Takovému typu kondenzátoru se obvykle říká svitkový. (Učitel vytvoří kondenzátor ze dvou listů alobalu s papírem mezi nimi a celý kondenzátor smotá.)

U: Protože tento model kondenzátoru moc nedrží pohromadě, vytvořím pro další práci jiný – jako izolant tentokrát použiji plastové kelímky.

Učitel sestaví kondenzátor ze dvou listů alobalu, z nichž jeden je obalen okolo plastového kelímku a druhý je uvnitř kelímku (podrobněji viz [B3.1] nebo obr. B3.2, je vhodné vložit ještě jeden kelímeček dovnitř a jeden zvenku tak, aby alobal držel na místě).



Obr. B3.2. Kondenzátor z kelímků a listů alobalu

Poznámka: Je vhodné použít kelímky o maximálním objemu do 0,3 l. Kondenzátor z kelímků o větším objemu už by mohl mít tak velkou kapacitu, že by rána při jeho vybití mohla být pro studenty bolestivá.

Učitel poté zopakuje úvodní pokus s tím, že teď místo malé plechovky použije vyrobený kondenzátor (jednu desku uzemní, druhou vodivě spojí s plechovkou). Stejný dobrovolník ověří, že má kondenzátor větší kapacitu – při stejném potenciálu je v něm mnohem víc náboje než na plechovce a zřetelně víc „kopne“.

Poznámka: Z důvodu bezpečnosti je vhodné, aby dobrovolník spojoval obě desky kondenzátoru dvěma prsty jedné ruky – tak, aby proud neprošel přes srdce.

Učitel poté rozkreslí princip skladování náboje na kondenzátoru. Podle zájmu studentů lze buď podrobně vysvětlit elektrické pole uvnitř dielektrika a jeho vliv na kapacitu kondenzátoru, nebo pouze konstatovat, že dielektrikum snižuje elektrické pole uvnitř kondenzátoru a na jeho desky se tak při stejném napětí vejde víc náboje. V každém případě by ale měl studentům popsat, že na každé z desek je opačný (ale stejně velký) náboj.

U: Pojdme teď změřit, jakou kapacitu tento kelímkový kondenzátor má.

Učitel studentům ukáže měřič kapacity a změří kapacitu kelímkového kondenzátoru. Studenti ji poté srovnají s vypočtenou kapacitou plechovky.

3) Na čem závisí kapacita kondenzátoru

Má-li učitel možnost, nechá následující ověření parametrů deskového kondenzátoru na laboratorní práci. Pokud tuto možnost nemá, provede spolu se studenty ověření v hodině – buď demonstračně, nebo lépe jako skupinovou práci studentů (má-li učitel dostatek měřáků kapacity).

Učitel nechá studenty ve skupinách navrhnout různé parametry, na čem by mohla záviset kapacita kondenzátoru. Mezi parametry se obvykle objevuje velikost kelímků, materiál mezi kelímkami apod. Pokud se neobjeví tloušťka kelímků mezi jednotlivými listy alobalu, učitel jí nabídne studentům sám. Studenti si poté napíší hypotézu, zda je závislost na každém parametru přímo nebo nepřímo úměrná. Samotné ověření lze provést buď s různě velkými kelímkami, nebo jednodušeji s deskovým kondenzátorem vyrobeným z listů alobalu vložených

mezi listy větší knihy. Studenti se tak setkají s větší škálou různých kondenzátorů (čímž si upevní myšlenku, že izolantem může být různý materiál a na tvaru desek kondenzátoru nezáleží) a ověření parametrů lze provést i kvantitativně.

Má-li učitel dostatek měřičů kapacity, je vhodné, když ověření provádějí studenti ve skupinách – každá skupina studentů dostane za úkol ověřit jeden z parametrů. Ověření závislosti kapacity na materiálu lze provést se stejnou tloušťkou papíru a např. plastových desek, skla apod.

Jednotlivé skupiny poté sdělí ostatním zjištěné závěry. Kapacita kondenzátoru:

- roste s velikostí desek (kvantitativní ověření lze provést zmenšováním jedné z desek na polovinu, čtvrtinu,...);
- klesá se vzdáleností desek od sebe;
- záleží na materiálu izolantu.

Pro studenty je překvapivé, že závislost na vzdálenosti desek je nepřímo úměrná, je vhodné jim tento fakt zdůraznit a demonstračně ukázat tuto nepřímo úměrnost všem. Pro zvětšení kapacity deskového kondenzátoru stačí knihu mírně stlačit, tím se listy alobalu dostanou blíže k sobě.

Pokud učitel nemá možnost použít různé izolanty, poslední parametr studentům sdělí. Parametr popisující vlastnosti izolantu učitel pojmenuje jako relativní permitivitu daného materiálu (pokud ji už zavedl dříve u Coulombova zákona, jen na toto zavedení odkáže).

Podrobný popis měření včetně příkladů naměřených hodnot je uveden v [B3.1], kap. 3.5.1.

Učitel poté spolu se studenty formuluje vztah pro kapacitu deskového kondenzátoru:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d},$$

kde S je velikost plochy desek a d je vzdálenost mezi deskami.

Na závěr je vhodné, když učitel nechá studenty jejich znalosti upevnit – může jim např. ukázat svitkový kondenzátor z alobalu a eurofolie a nechat je vymýšlet různé způsoby, jak zvětšit kapacitu tohoto kondenzátoru⁶. Jeden list alobalu je vložen do eurofolie tak, aby kousek vyčníval ven, druhý list je položen na eurofolii tak, aby vyčníval na druhou stranu, a celý kondenzátor je poté smotán do ruličky – viz obr. B3.3.

⁶ Idea tohoto kondenzátoru pochází od S. Gottwalda, kterému tímto za námět děkuji.



Obr. B3.3. Zčásti smotaný kondenzátor vyrobený ze dvou listů alobalu a eurofolie

Studenti by měli přijít na to, že stačí buď zvětšit plochu celého kondenzátoru, nebo stlačit desky blíž k sobě. Tyto způsoby by měli ověřit buď sami studenti, nebo učitel demonstračně. V praxi se ukazuje jako nejefektivnější způsob zvětšení kapacity tohoto kondenzátoru ho zmačkat.

[B3.1] Dvořák, L., Šabatka, Z., Koudelková, V., Dvořáková, I.: Náboje, proudy a elektrické obvody. Vzdělávací a metodický text. Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi – projekt OPPA. Praha 2012. Dostupné z: <http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/>