

Elektrostatika. Elektrický proud.

Potenciál a intenzita elektrického pole, elektrické síly, kapacita, energie nabitého kondenzátoru.

Vedení proudu v kapalinách a plynech, elektrolýza, Faradayovy zákony elektrolýzy.

Elektrostatika

Elektrický náboj

- Elektrické síly, elektrické pole
- Vedení elektrického proudu

Vlastnost vázaná na materiální částice –
elektrony, protony atd.

Nevzniká ani nezaniká, pouze se přerozděluje

Elektrický náboj

- Volný – např. elektrony
- Vázaný – např. dipóly

Elementární náboj $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Hustota náboje – plošná, objemová

Faradayova klec – odstínění elektrického pole

Vznik elektrických nábojů

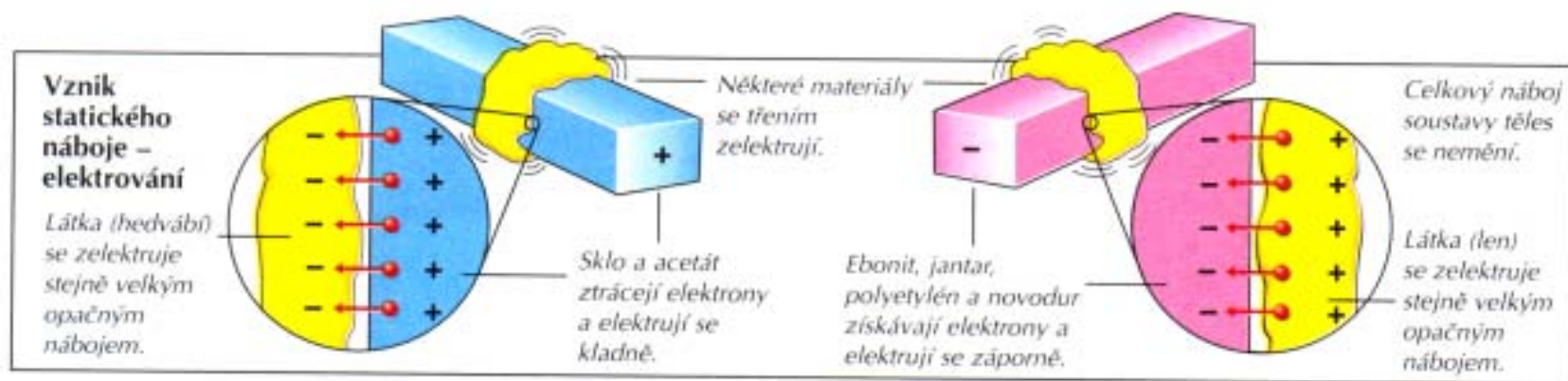
- Třením
- Změnou teploty – pyroelektrina
- Tlakem – piezoelektrina
- Světlem – fotovoltaický jev
- Elektromagnetická indukce
- Elektrostatická indukce
-

Vznik náboje na textiliích třením

Vytvoření polární chemické vazby – disociace vazeb - COO^- , - NH_3^+

Jedna látka se nabíjí kladně, druhá záporně

Množství náboje závisí na dvojici látek



Řada materiálů pro elektrizaci třením

Vlna

Polyamidová vlákna (Nylon)

Viskozová vlákna

Bavlna

Přírodní hedvábí

Acetátová vlákna

Polyvinylalkoholová vlákna

Polyester (Dacron)

Polyacrylonitrilová vlákna (Orlon)

Polyvinylchloridová vlákna

Polyetylenová vlákna

Polytetrafluorová vlákna (Teflon)

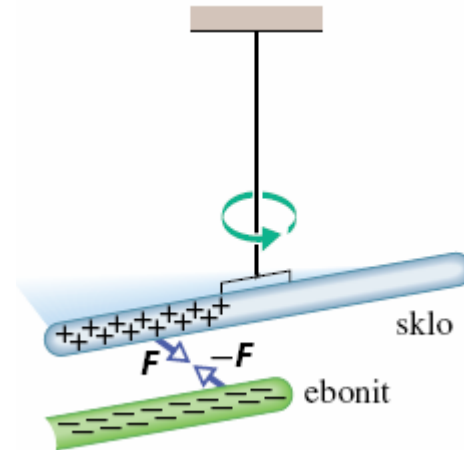
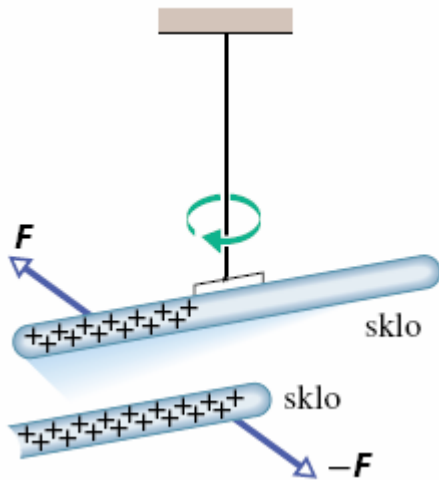
+

Vlákno výše se nabíjí
ve vzájemném
kontaktu kladně

-

Elektrické náboje

- Kladné
- Záporné

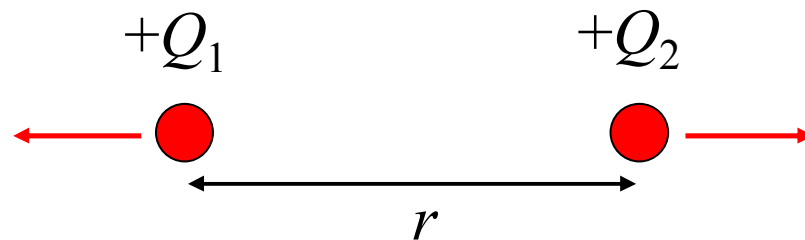
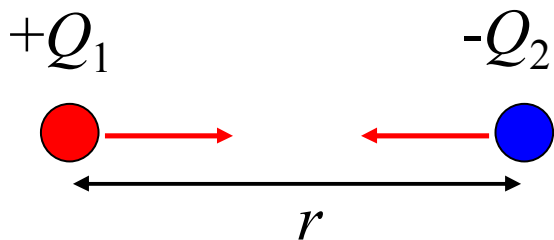


Elektrická síla

Coulombův zákon

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

Síla přitažlivá nebo odpudivá



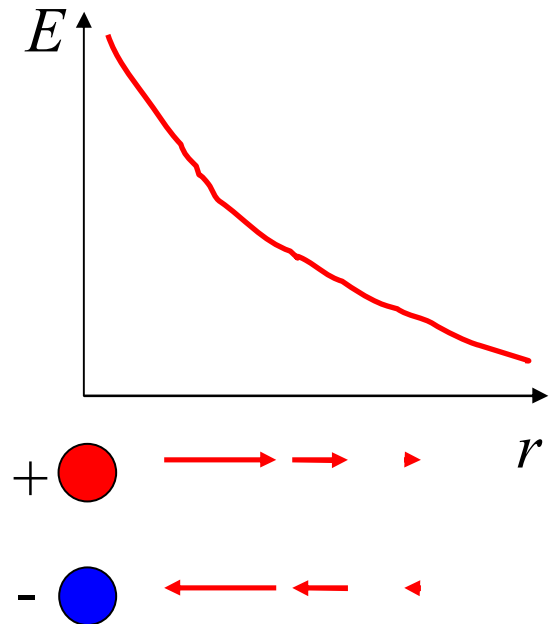
Elektrické pole

Intenzita elektrického pole

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'} \quad [V / m]$$

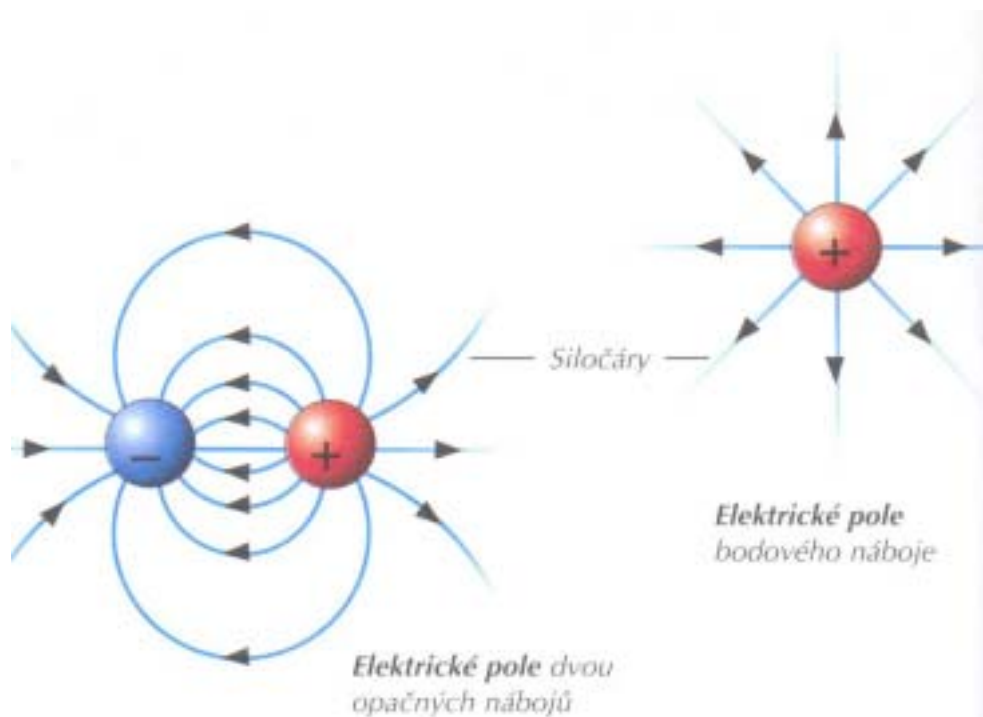
Pro bodový náboj

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$



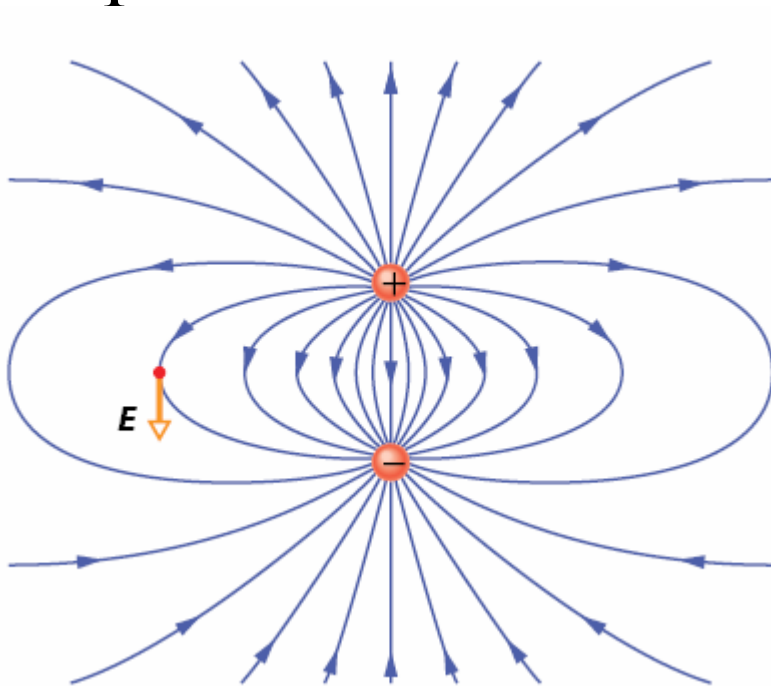
Siločáry

Orientované čáry, jejichž tečnou je vektor síly
Vstupují kolmo do vodiče – sršení v blízkosti hrotů

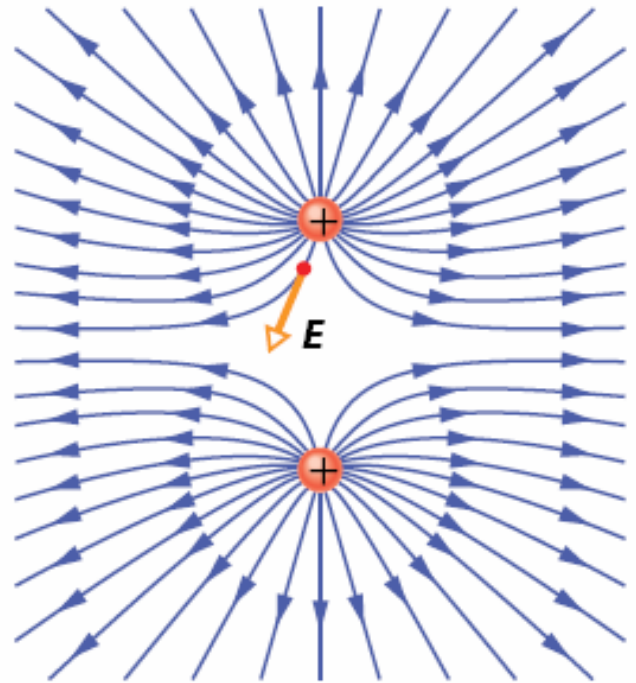


Siločáry dipólu

Dipól



srovnej dva stejné náboje!



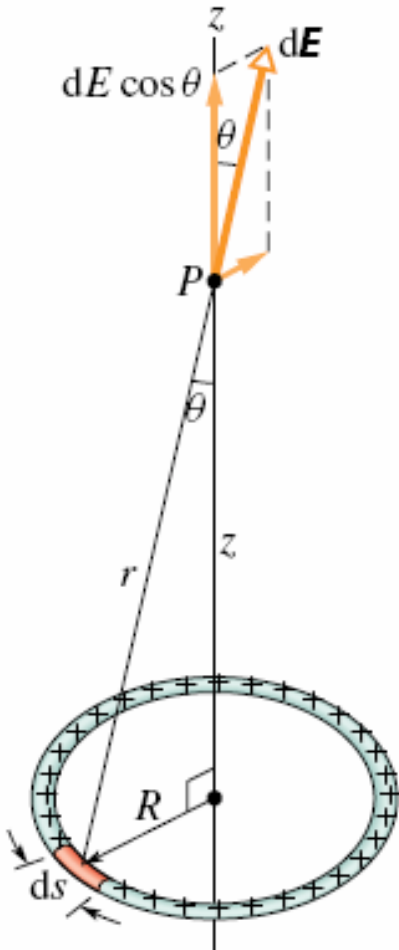
Princip superpozice

Pro elektrické síly, intenzitu pole i potenciál

Působící síla od několika nábojů se určí jako vektorový součet sil od jednotlivých nábojů.

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots + \mathbf{F}_{1n}$$

Intenzita elektrického pole prstence



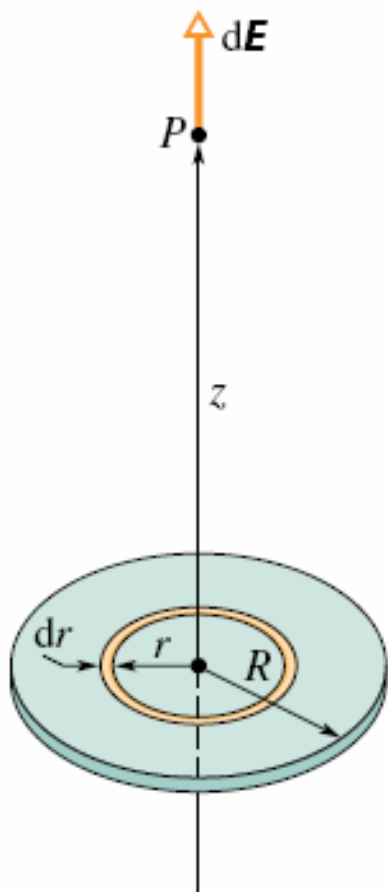
Intenzita pole – integrací

$Q = \tau(2\pi R)$, τ ...lineární hustota náboje

$$E = \int dE \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z\tau}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} ds =$$
$$= \frac{z\tau(2\pi R)}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

$$E = \frac{Qz}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

Intenzita elektrického pole disku



Intenzita pole disku

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right)$$

daleko od disku

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Gaussova věta elektrostatiky

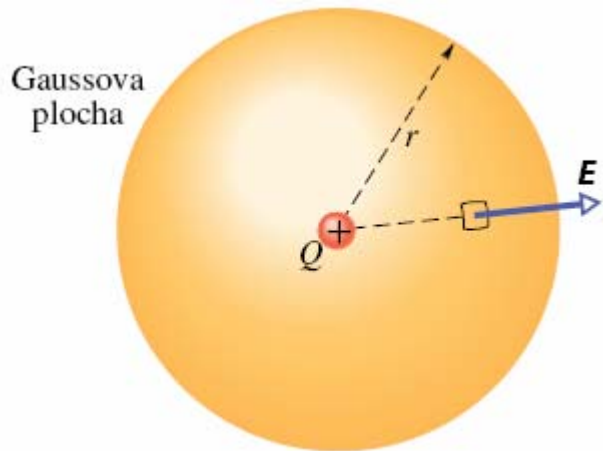
Tok intenzity elektrického pole

$$\Phi_E = \oint_{\mathcal{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

Gaussova věta – tok vektoru intenzity elektrického pole uzavřenou plochou je roven náboji uvnitř plochy dělenému ε_0

$$\varepsilon_0 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = Q$$

Coulombův zákon a Gaussova věta



$$\varepsilon_0 E \oint dS = Q$$

$$\varepsilon_0 E (4\pi r^2) = Q$$

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Nabitý izolovaný vodič

Důkaz sporem z Gaussovy věty

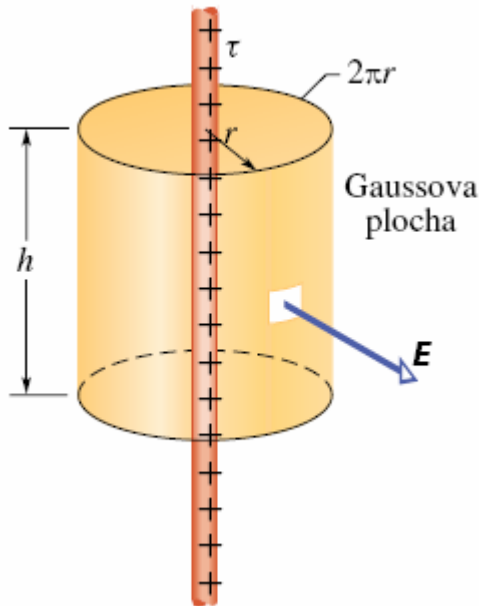
Jestliže na izolovaný vodič přivedeme z vnějšku náboj, pak se všechno rozmístí na vnějším povrchu vodiče. Uvnitř vodiče nezůstane žádný volný náboj.

Pole na povrchu vodiče je kolmé k vodiči a má velikost

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Intenzita pole v okolí nabitého vlákna

Zvolíme Gaussovou plochu a užitíme Gaussovou větu

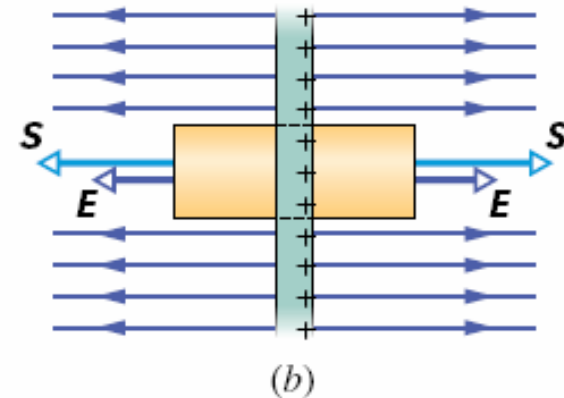
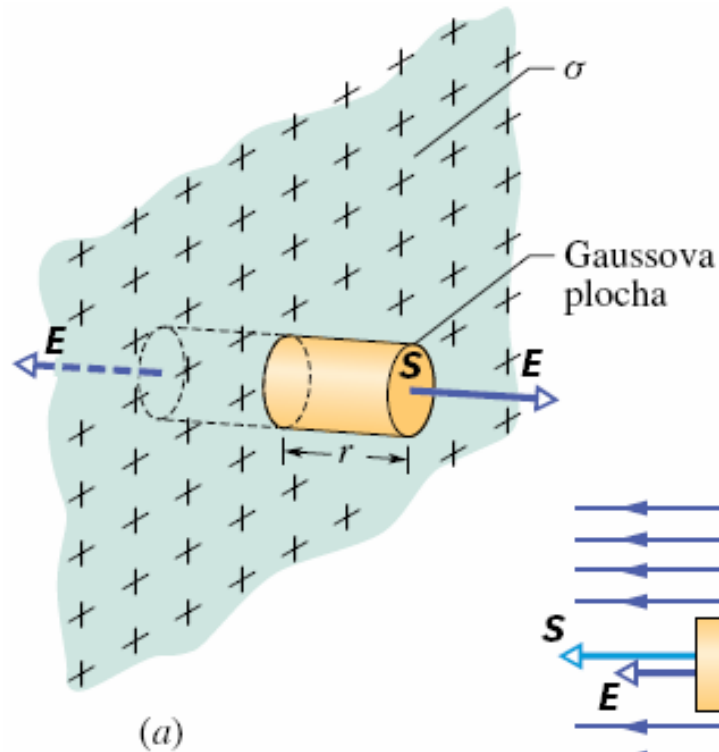


$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}$$

Nabitá rovina

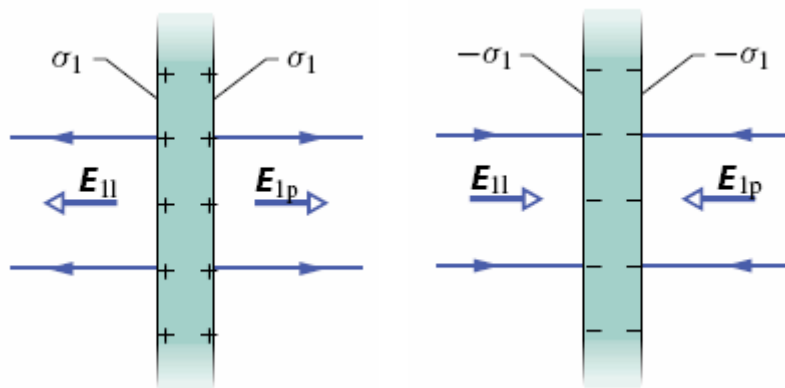
Gaussova věta

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

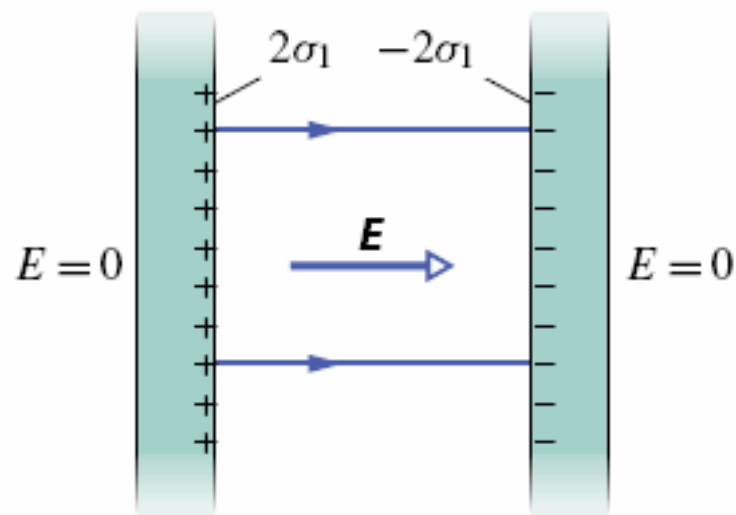


Nabitý deskový kondenzátor

Dvě rovinné plochy nabité opačnými náboji



$$E = \frac{2\sigma_1}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



Elektrický potenciál, napětí

Potenciál = práce na přenesení náboje do daného místa v elektrickém poli

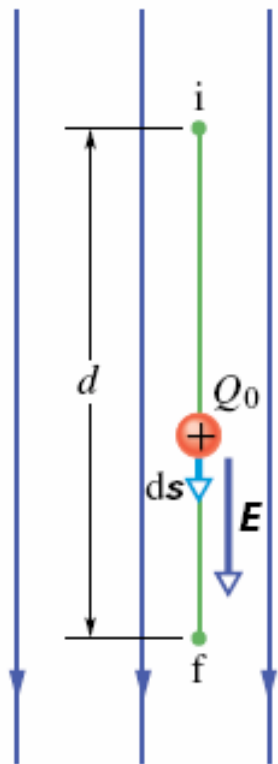
$$\varphi = \frac{A}{Q'} \quad [V]$$

Napětí $U = \varphi_2 - \varphi_1$

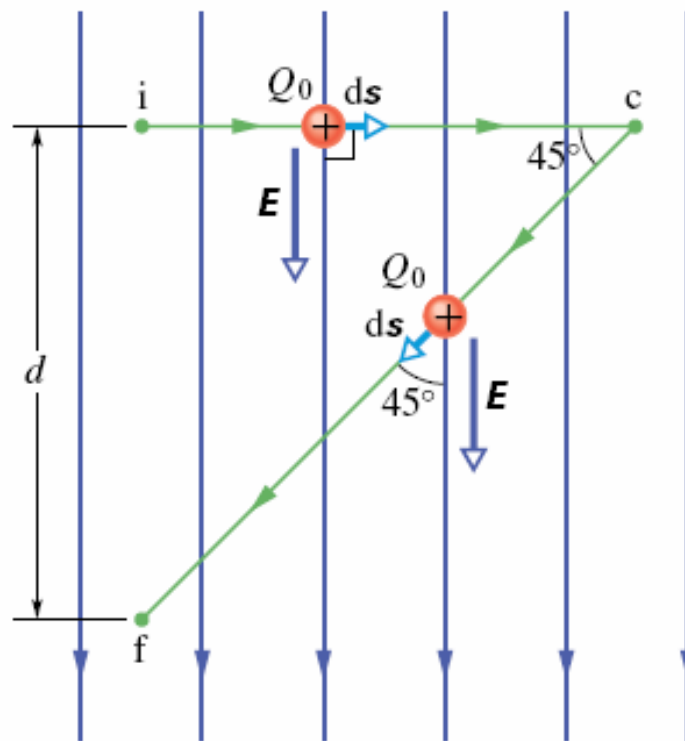
Ekvipotenciální plochy – pro bodový náboj soustředné koule, kolmé na siločáry

Práce elektrických sil

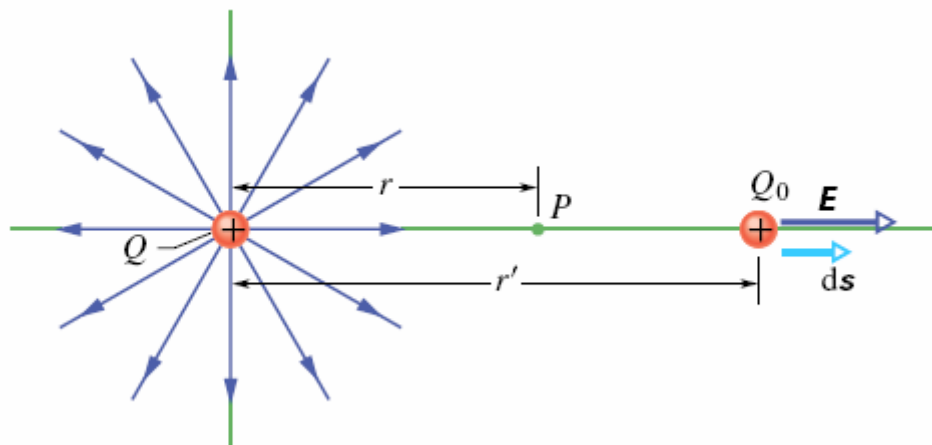
Konzervativní síly = práce nezávisí na dráze, ale jen na počáteční a koncové poloze náboje



stejná
práce!



Potenciál pole bodového náboje



Potenciál

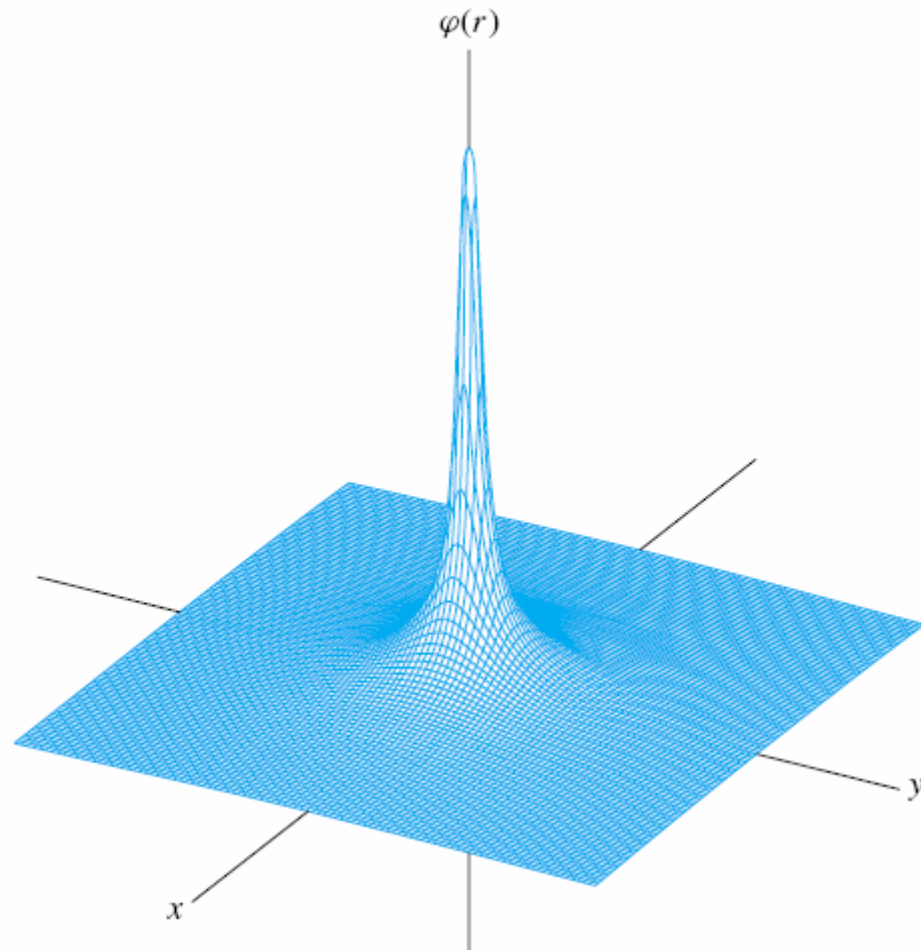
- kladný náboj

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

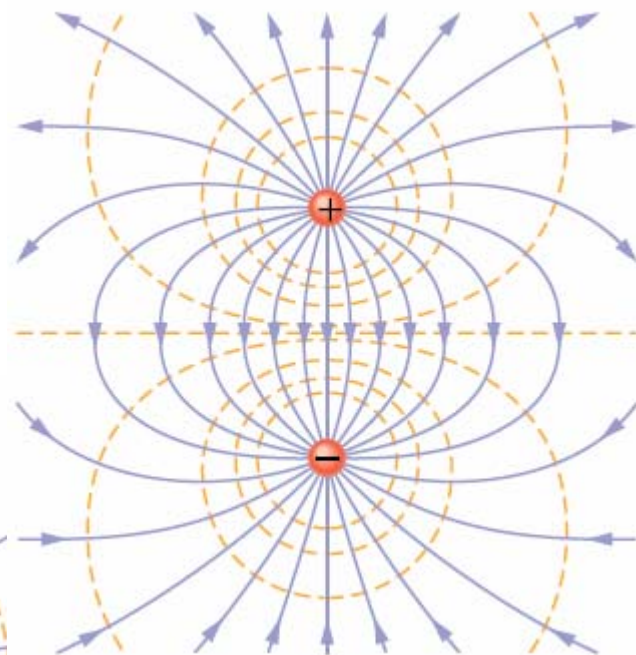
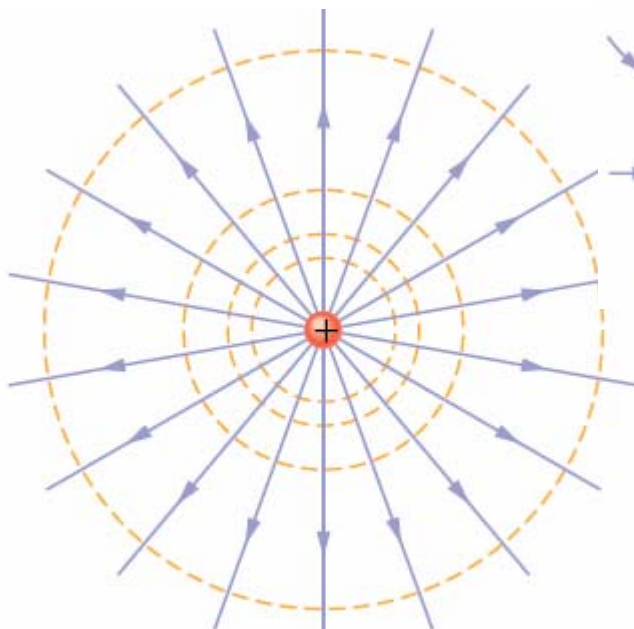
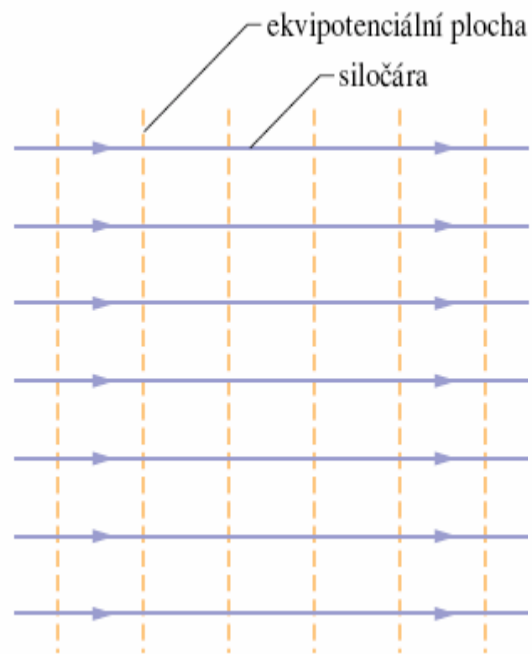
- záporný náboj

$$\varphi(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Kladný bodový náboj - potenciál

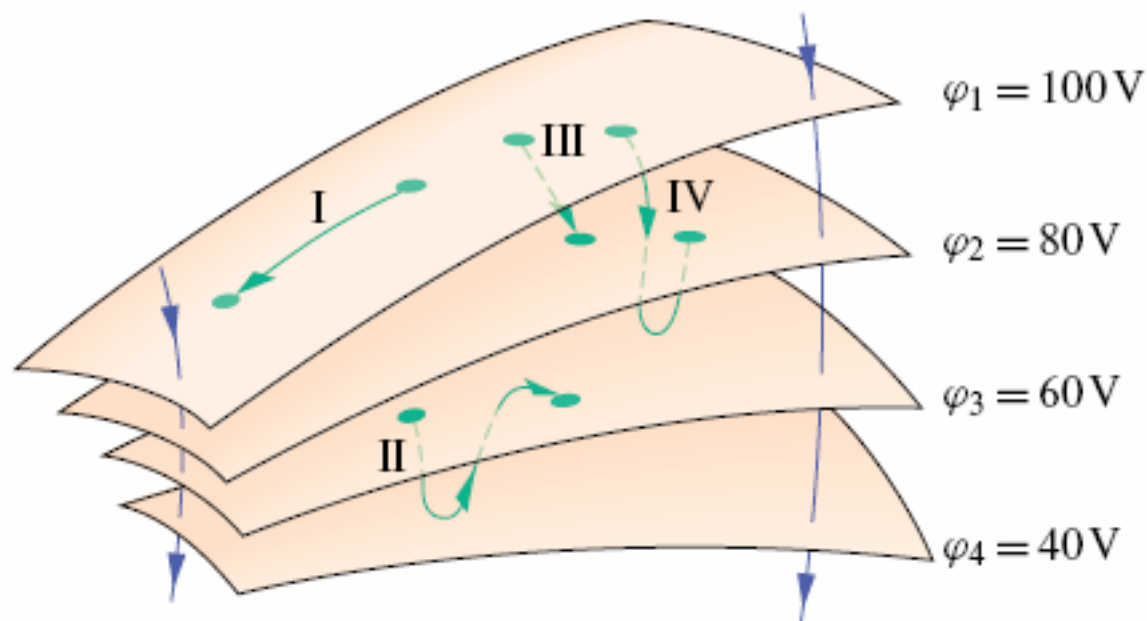


Ekvipotenciální plochy



Práce a ekvipotenciální plochy

Ekvipotenciální plochy = stejný potenciál!



Vztah mezi intenzitou pole a potenciálem

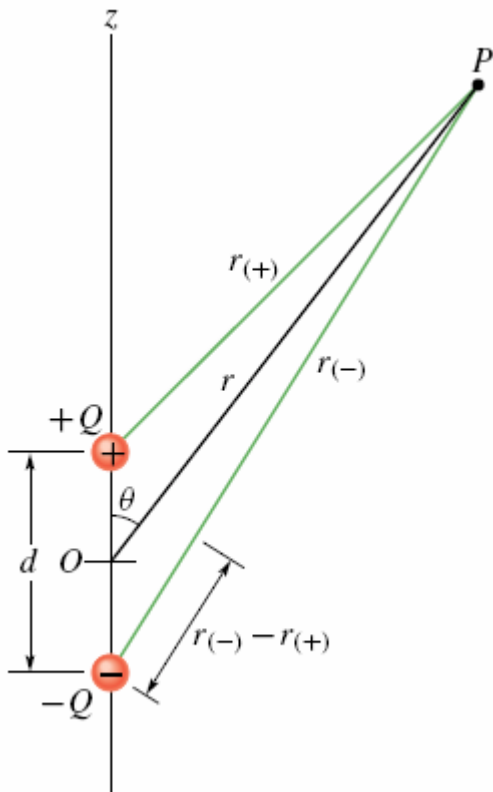
Intenzita pole

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial\varphi}{\partial x} & \frac{\partial\varphi}{\partial y} & \frac{\partial\varphi}{\partial z} \end{array}\right)$$

Potenciál pole

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Intenzita elektrického pole dipólu



potenciály od jednotlivých nábojů

$$\varphi = \sum_{i=1}^2 \varphi_i = \varphi_{(+)} + \varphi_{(-)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{r_{(+)}} + \frac{-Q}{r_{(-)}} \right)$$

pro $d \ll r$ je

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{d \cos \theta}{r^2}$$

na ose dipólu $p = Qd$

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

Potenciál spojitě rozloženého náboje

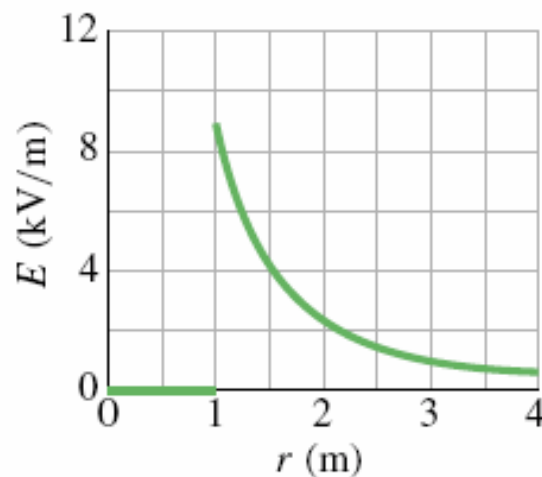
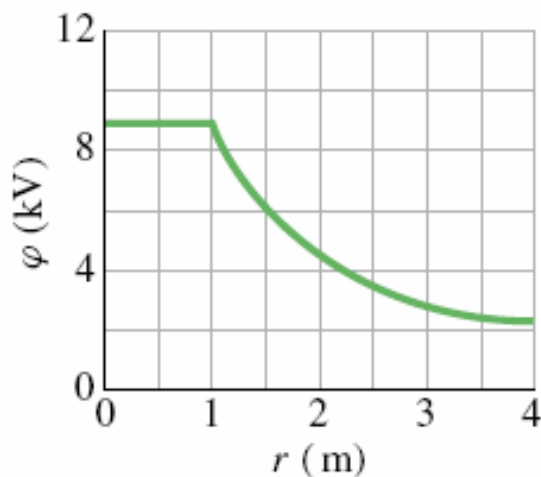
Integrací příspěvků malých nábojů

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{r}$$

$$\varphi = \int d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dQ}{r}$$

Potenciál nabitého vodiče

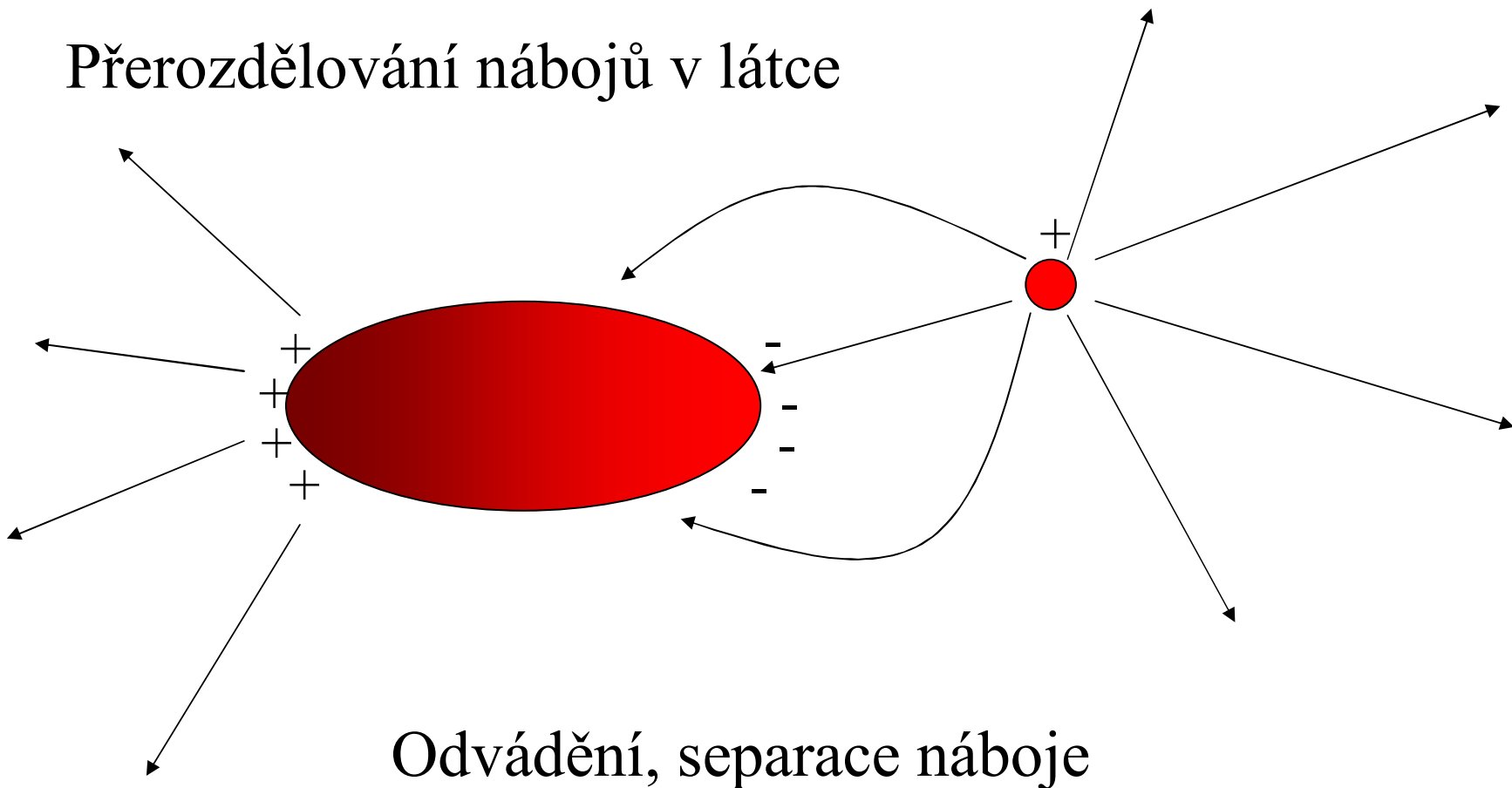
$E=0$ V uvnitř vodiče (Faradayova klec)



Volný náboj na izolovaném vodiči se samovolně rozprostře po vnějším povrchu vodiče tak, že všechny body vodiče — a je jedno zda na povrchu nebo uvnitř — mají stejný potenciál. To platí bez ohledu na to, zda vodič má či nemá dutinu.

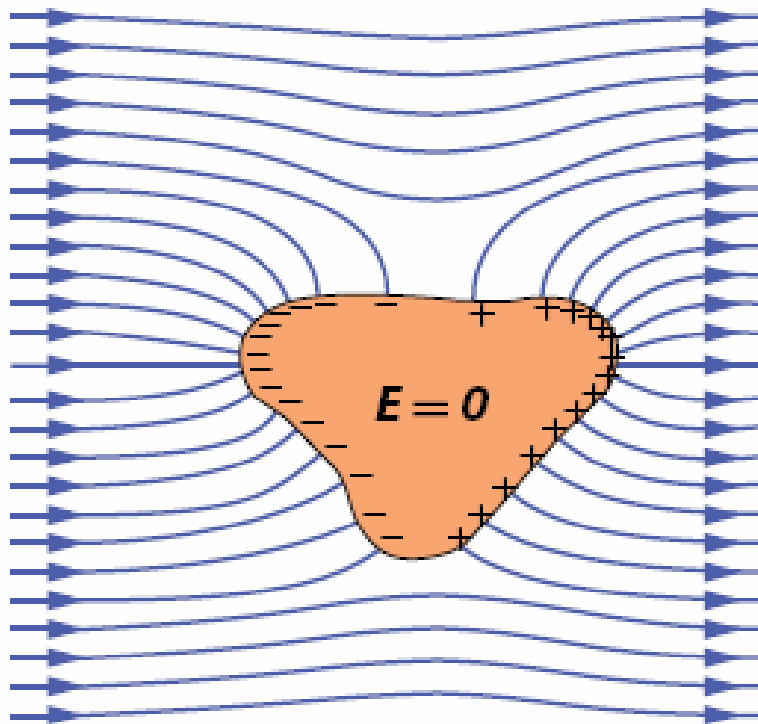
Elektrostatická indukce

Prerozdělování nábojů v látce



Nenabitý vodič ve vnějším poli

Nulové pole uvnitř, náboje se na povrchu přerozdělí a jejich pole ruší pole uvnitř



Kapacita vodiče

Napětí a náboj na vodiči jsou úměrné

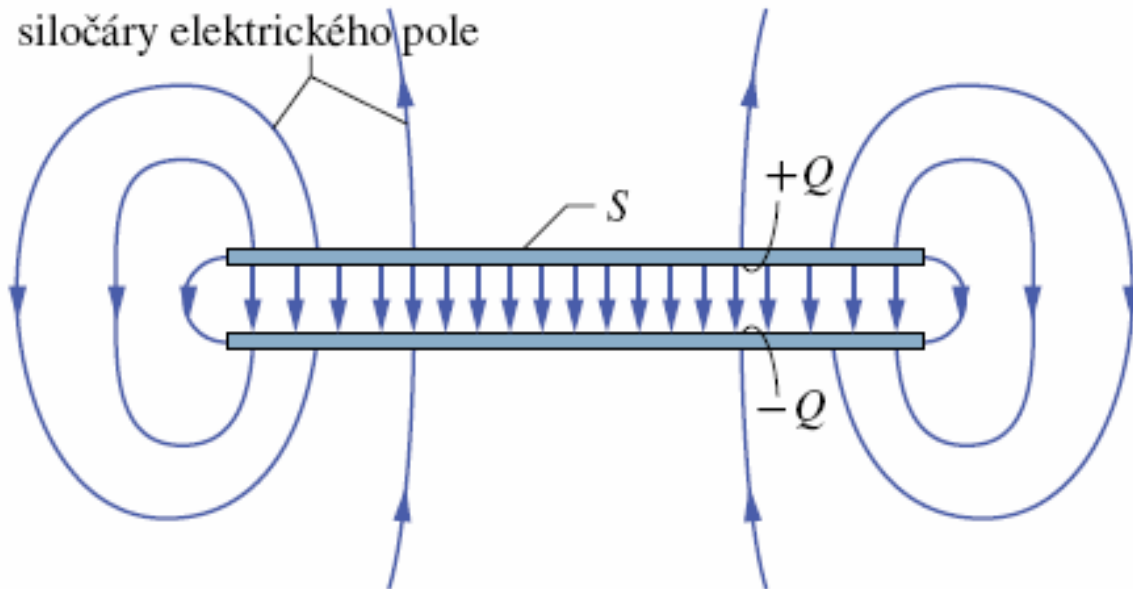
$$Q = CU$$

Kapacita vodiče (tělesa) [C]=F (Farad)

$$C = \frac{Q}{U}$$

Kapacita deskového kondenzátoru

Závisí na jeho rozměrech a výplni, ne na náboji a napětí na něm!



$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

Různé tvary kondenzátorů

Kapacity

Samostatné nabité koule

$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

Kulový kondenzátor

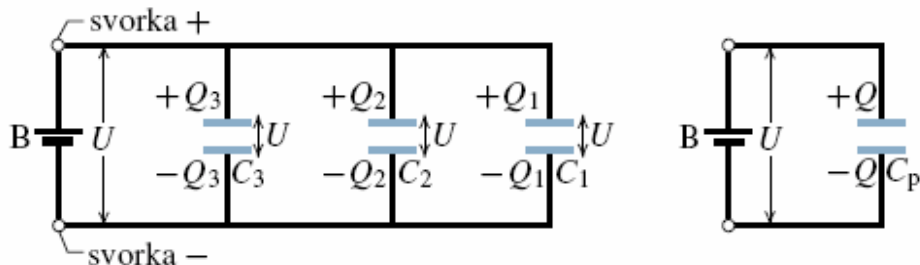
$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{b-a} \quad b > a$$

Válcový kondenzátor

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(b/a)} \quad b > a, L \gg b.$$

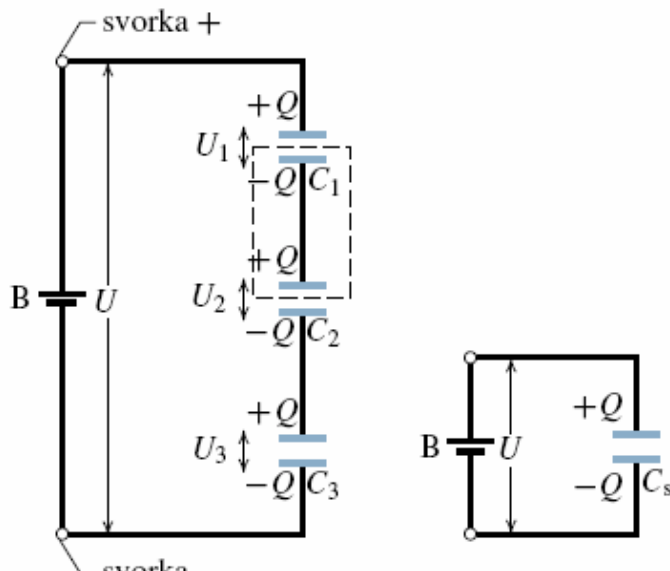
Spojování kondenzátorů

- Paralelně



$$C_p = \sum_{j=1}^n C_j$$

- Seriově



$$\frac{1}{C_s} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}$$

Energie elektrického pole nabitého kondenzátoru

Při nabíjení kondenzátoru je třeba přemáhat elektrické síly – v kondenzátoru je tato energie uložena

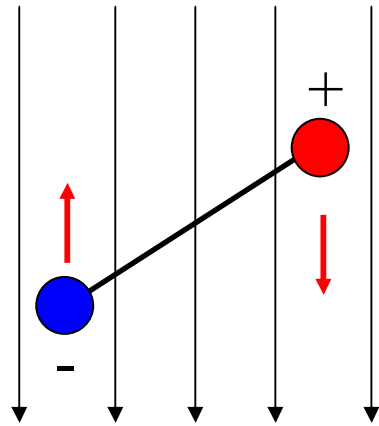
$$E_{\text{el}} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CU^2.$$

Objemová hustota energie $w_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2.$

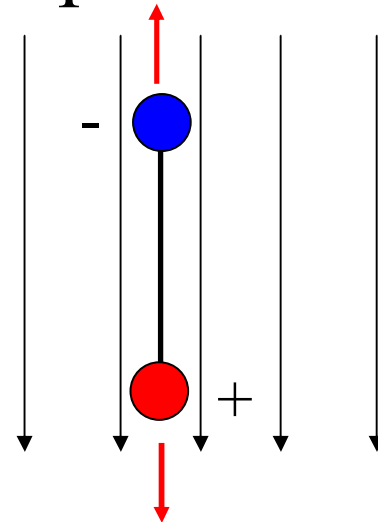
Elektrický dipól

Dvojice opačných nábojů – např. vazby
v molekulách

Dipól ve vnějším elektrickém poli



labilní poloha



stabilní poloha

Vodiče a dielektrika

- Vodiče – volné náboje, pohyblivost po celé látce, snadné vedení proudu
- Dielektrika – vázané náboje, malá pohyblivost, vedení proudu pouze skrze malé posuvy nábojů

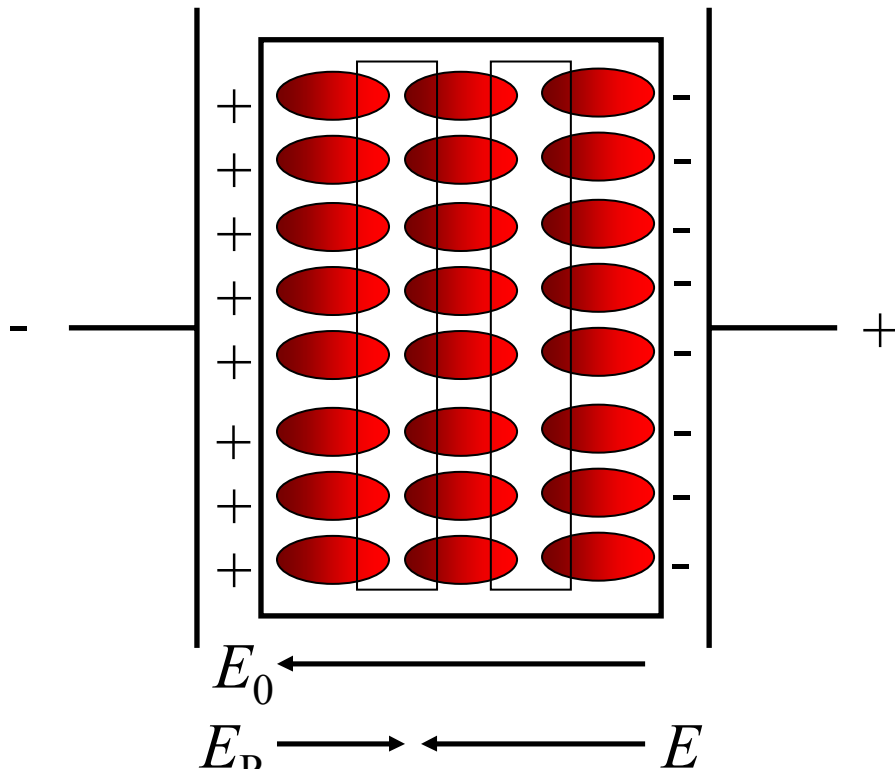
Dielektrika lze polarizovat přerozdělením, srovnáním dipólů do jednoho směru

Polární a nepolární dielektrika

- Polární dielektrika – molekuly jsou dipóly, orientují se ve vnějším poli (např. voda)
- Nepolární dielektrika – molekuly neutrální, dipólový moment vytváří vnější elektrické pole (krystaly)

Polarizace dielektrik

Vznik elektrického pole v látce, opačně orientovaného vzhledem k přiloženému



Výsledné pole

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_P$$

Elektrická indukce

Hustota dipólových momentů

$$\vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{E}$$

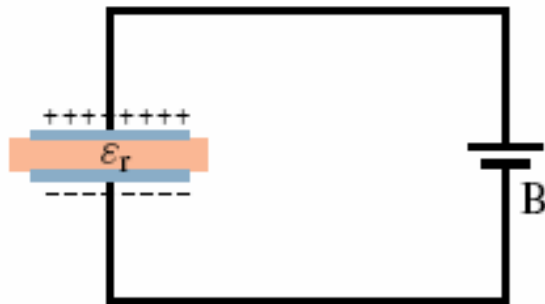
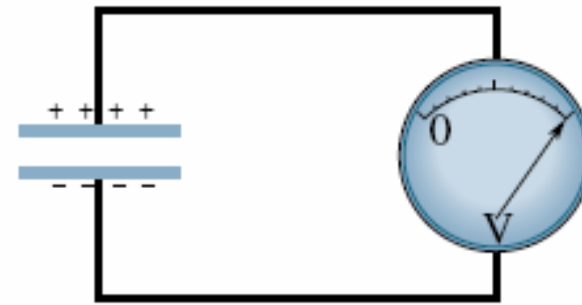
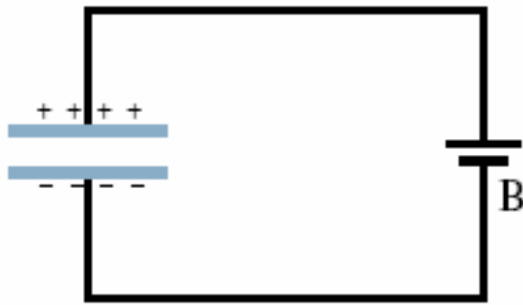
Relativní permitivita $\varepsilon_r \geq 1$

Elektrická indukce = plošná hustota náboje

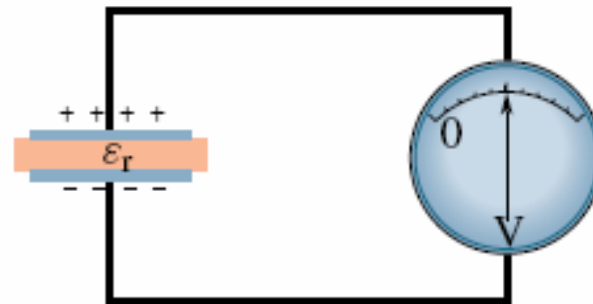
$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

Nabitý kondenzátor s dielektrikem

Po vložení dielektrika vzrůstá náboj (připojený ke zdroji, $U = \text{konst.}$) nebo klesá napětí (odpojený od zdroje, $Q = \text{konst.}$)



$U = \text{konst.}$



$Q = \text{konst.}$

Kapacita kondenzátoru s dielektrikem

Kapacita tělesa = náboj na zvýšení potenciálu
tělesa o 1V

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad [F]$$

Kapacita deskového kondenzátoru $C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d}$

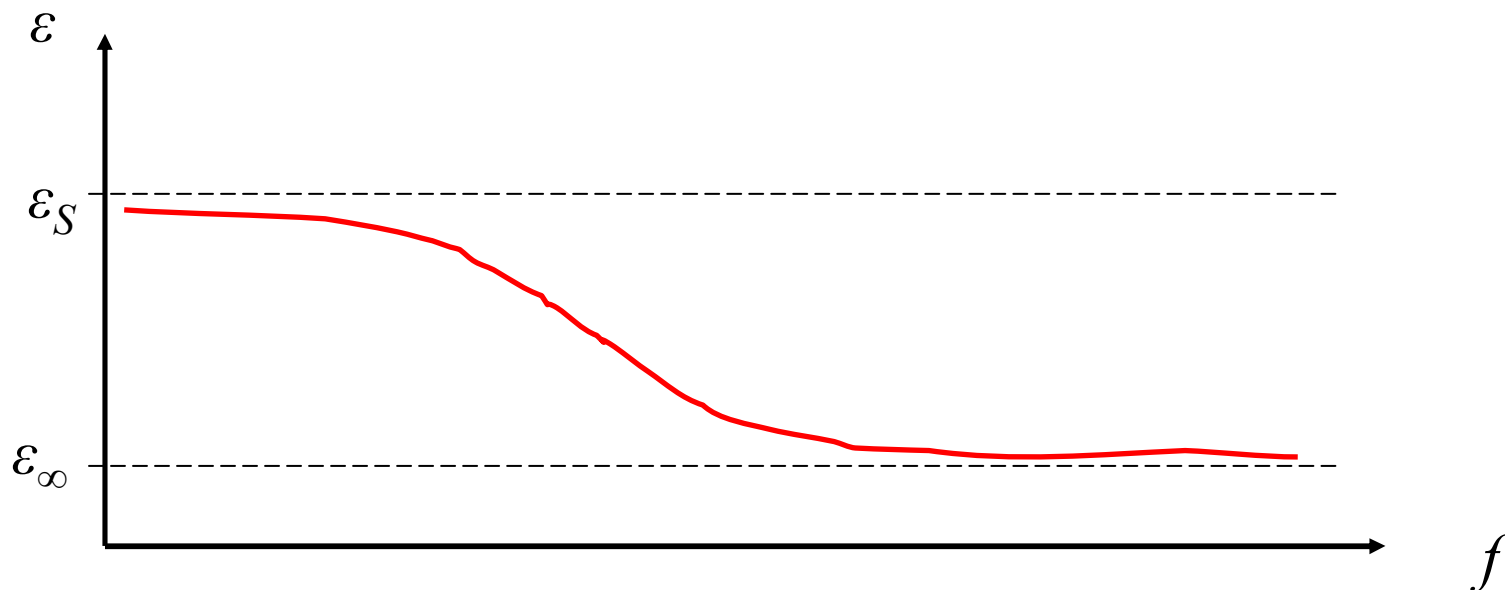
Energie deskového kondenzátoru

$$\frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Frekvenční závislost permitivity

Statická a dynamická permitivita

Dynamika orientace dipólů



Elektrický proud

Tok nábojů vodičem

Elektrický proud

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \rightarrow \frac{dQ}{dt} \quad [A]$$

Elektrický proud je stejný v libovolném průřezu vodiče, závisí na vlastnostech vodiče a napětí

Ohmův zákon

Lineární vztah mezi napětím a proudem

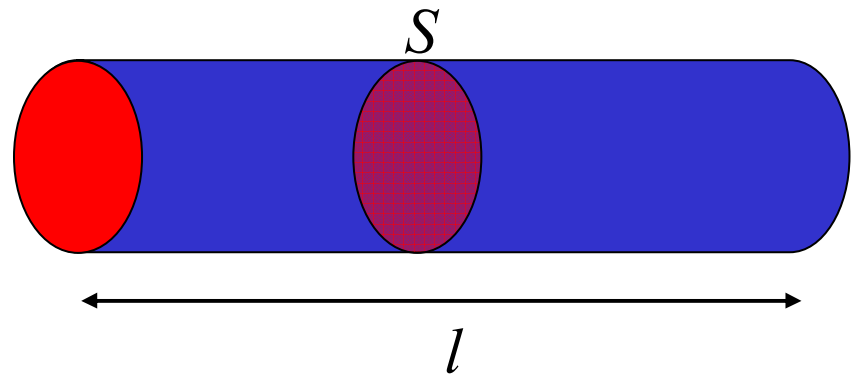
$$U = RI$$

Elektrický odpor

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega]$$

Měrný odpor

$$\rho \quad [\Omega m]$$



Měrný odpor látek

Izolanty [$10^8\Omega\text{m}$]		Kovy [$10^{-8}\Omega\text{m}$]		Textilní vlákna [$10^8\Omega\text{m}$]	
Celuloid	2	Fe	8.81	Bavlna	10^6
Kaučuk	10^6	Cu	1.555	Viskozové hedvábí	10^7
Papír	10^2	Al	2.45	Acetátové hedvábí	10^{11}
Polystyren	10^7			Vlna	10^8
PVC	10^5			Nylon	$10^9 - 10^{12}$

Elektrický odpor v závislosti na teplotě

Pro kovy závisí lineárně na teplotě

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

Teplotní součinitel odporu α [$10^{-3} K^{-1}$]

Pro polovodiče exponenciálně klesá s teplotou

Výkon elektrického proudu v obvodech

- Při přenosu v obvodu

$$P = UI$$

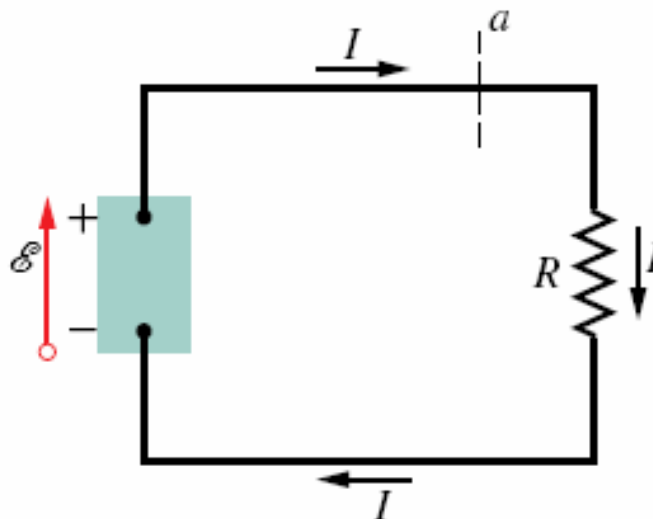
- Výkon ztrácející se ve formě Jouleova tepla na rezistoru

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Obvody elektrického proudu

- Uzly obvodu
- Větve obvodu
- Smyčky obvodu

- Rezistory
- Kondenzátory
- Zdroje EMN



Kirchhoffovy zákony

- První zákon (uzlový)

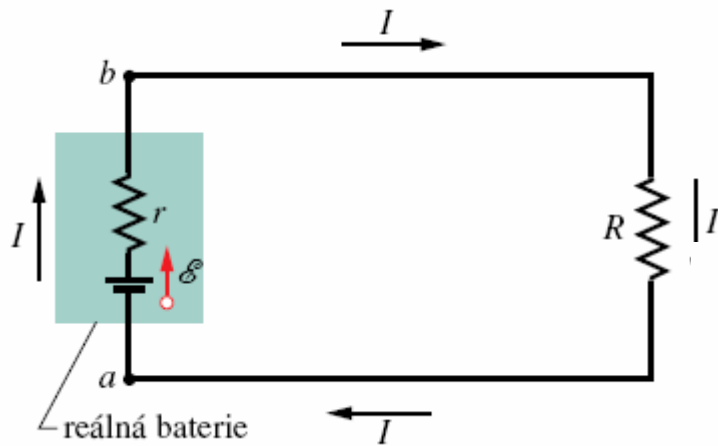
Uzlové pravidlo: Součet proudů vstupujících do uzlu se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.

- Druhý zákon (smyčkový)

Smyčkové pravidlo: Algebraický součet úbytků napětí při průchodu libovolnou uzavřenou smyčkou je nulový.

+ znaménková konvence

Jednoduchý elektrický obvod – zdroj + rezistor

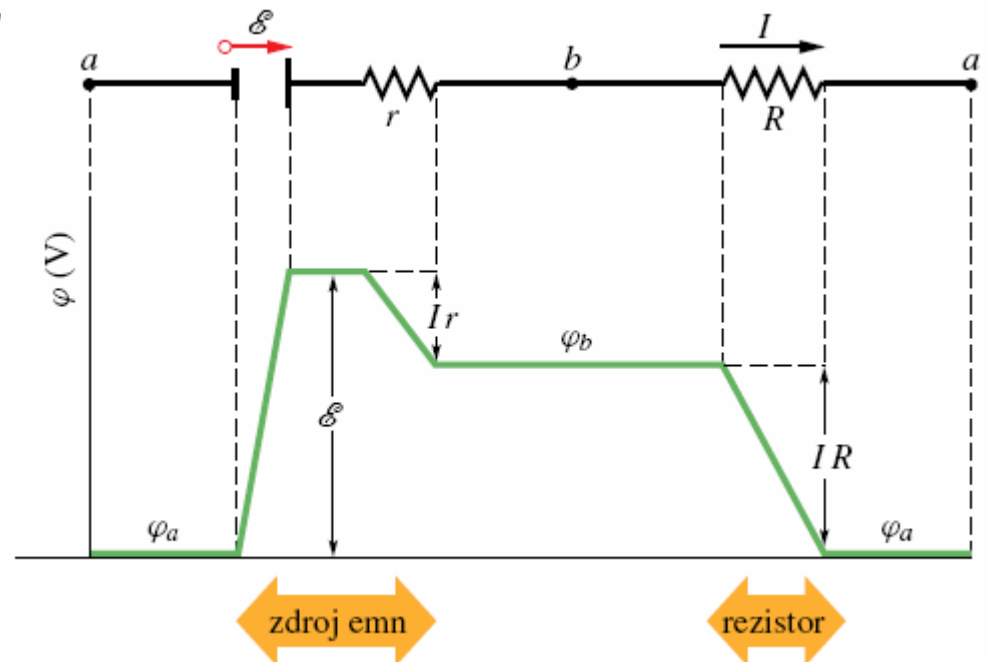


$$\mathcal{E} - Ir - IR = 0$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Svorkové napětí

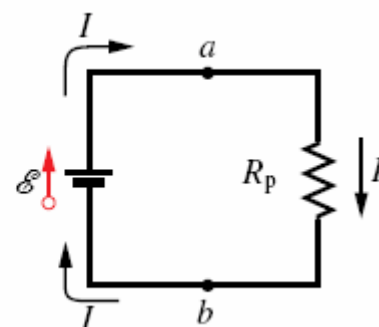
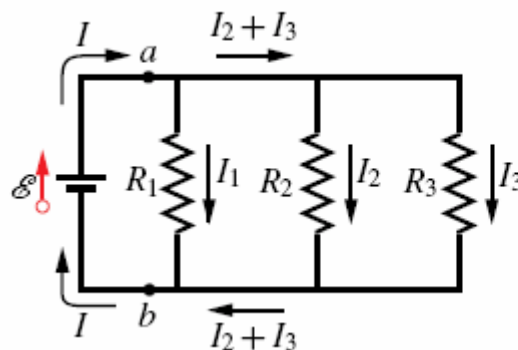
$$U = \mathcal{E} - Ir \quad U = \mathcal{E} \frac{R}{R + r}$$



Spojování rezistorů

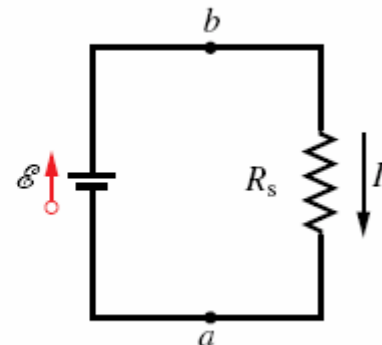
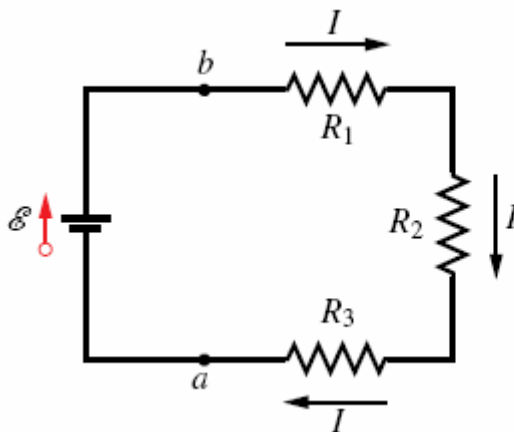
- Paralelně

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}$$



- Seriově

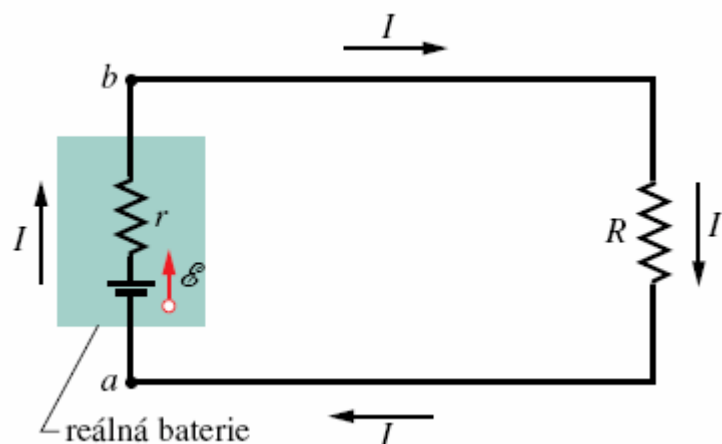
$$R_s = \sum_{j=1}^n R_j$$



Zdroj naprázdno a nakrátko

- Naprázdno – připojen k rezistoru $R \rightarrow \infty \Omega$
- Nakrátko – zkratován $R \rightarrow 0 \Omega$

Zkratovací proud zdroje $I_z = U_e / r$



Svorkové napětí

$$U = \mathcal{E} - Ir.$$

Maximální výkon

$$R = r$$

Měření napětí a proudu

- Napětí – voltmetr, základní rozsah a bočníky (paralelně připojit)
- Proud – ampérmetr, základní rozsah a předřadné odpory (seriově připojit)

Vedení proudu v kovech

Dostatek nosičů náboje volně pohyblivých

Nosiče náboje se pohybují driftovou rychlostí

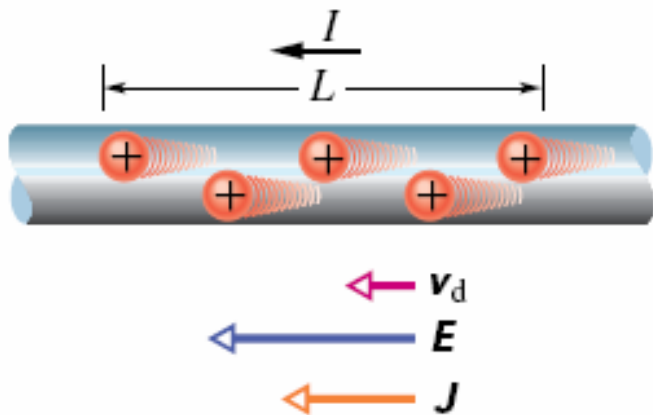
Malý elektrický odpor

Hustota proudu

$$I = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$

Vztah mezi hustotou proudu a driftovou rychlostí

Proud daný posuvem nosičů náboje



$$\mathbf{J} = (ne)\mathbf{v}_d$$

$$Q = (nSL)e$$

$$t = \frac{L}{v_d}$$

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{nSLe}{L/v_d} = nSev_d$$

$$v_d = \frac{I}{nSe} = \frac{J}{ne}$$

Vedení proudu v kapalinách

Molekuly disociovány v ionty – elektrolyt

Elektrolýza – rozklad elektrolytu na ionty elektrickým proudem

Kladné ionty jsou vedeny k záporné elektrodě (katoda), záporné ionty ke kladné elektrodě (anoda)

Dynamická rovnováha mezi EMN a vnějším napětím

Faradayovy zákony elektrolýzy

1. Zákon – Hmotnost látky vyloučené na elektrodě je úměrná elektrickému náboji, který prošel elektrolytem.

$$m = kQ$$

2. Zákon – elektrochemický ekvivalent látky je úměrný poměru molární hmotnosti a mocenství.

$$k = \frac{1}{F} \frac{M_m}{\nu} \quad F = N_A e = 9.648 \cdot 10^4 \text{ C mol}^{-1}$$

Vedení proudu v plynech

Plyny neobsahují volné nosiče náboje.

Vytváření iontů (ionizace):

- Ohřev
- Záření (UV, RTG, světlo, ...)
- Radioaktivita
- Bombardování elektrony a ionty
- Elektrické, magnetické pole

Výboj v plynech

Lavinovitý nárůst proudu během výboje v plynu.

Ionizační práce = energie potřebná k vytváření volných nosičů náboje (nejmenší pro valenční elektrony)

Další ionizace nárazy elektronů na ionty – zápalné napětí, výboj dál probíhá samostatně

Typy výbojů

- Doutnavý (při nízkém tlaku)
- Koronový výboj (za normálního tlaku)
- Jiskrový vývoj (malé proudové hustoty, velká napětí)
- Obloukový výboj (velké proudové hustoty, malá napětí)

Vedení proudu ve vakuu

- Fotoemise – vznik nosičů náboje dopadem fotonů záření na povrch kovů (např. fotoelektrický jev pro UV záření)
- Termoemise – vyražení elektronů z povrchu žhavené elektrody (katody) vysokou teplotou

Literatura

V prezentaci byly použity obrázky z knihy:

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: Fyzika (část 3 – Elektřina a magnetismus), Vutium, Brno 2000

Velká ilustrovaná encyklopedie, Fyzika, Chemie, Biologie, Fragment, Havlíčkův Brod 2000

a materiálová data z matematicko-fyzikálních tabulek:

BROŽ, J., ROSKOVEC, V., VALOUCH, M.: Fyzikální a matematické tabulky, SNTL Praha 1980