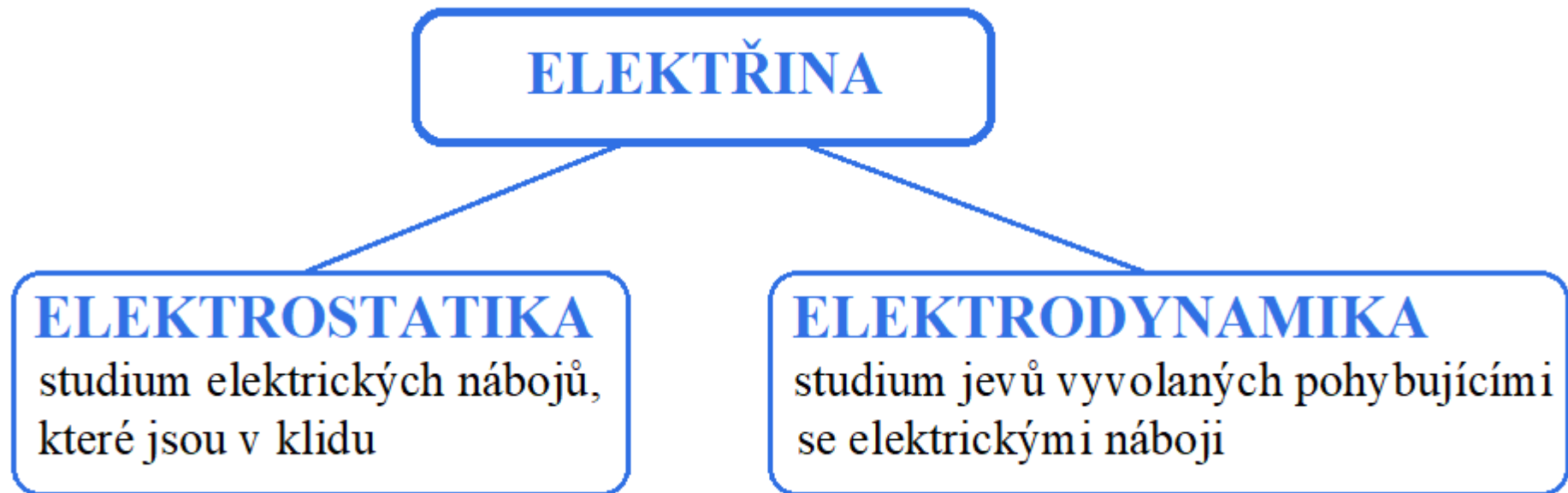


ELEKTŘINA

1. Elektřina

Název elektřina vznikl již ve starověku ze slova jantar (v řeckém překladu elektron), protože na něm byla poprvé objevena. V Řecku se tenkrát používaly jantarové cívky k předení a stávalo se, že při navinování příze se její vlákna ježila. Řekové také pozorovali, že některé přírodní „kameny“, např. minerál magnetovec, přitahují železo.

Elektřina a magnetismus jako věda vznikla na přelomu 18. a 19. století. O jejich rozvoj se zasloužili například Galvani, Volta, Ampér, Coulomb, Faraday, Maxwell a celá řada jiných významných fyziků tehdejší doby.

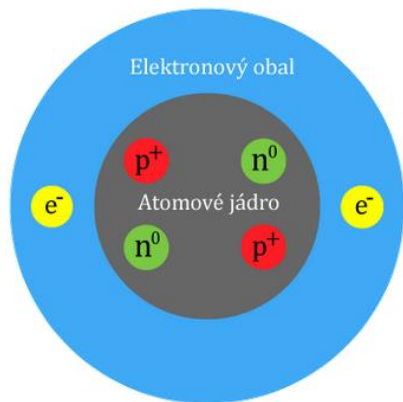


1.1 Elektrický náboj

Základní elektrickou vlastností těles je **elektrický náboj**. Elektrický náboj označujeme Q , jeho jednotkou je coulomb $[Q] = C$.

Nejmenším elektrickým nábojem je elementární náboj $e = -1,602 \cdot 10^{-19} C$. Experimentálně bylo zjištěno, že existují 2 druhy náboje: **kladný** a **záporný**.

Elektrický náboj nemůže existovat samostatně a vždy má svůj nosič. Těleso s elektrickým nábojem se nazývá elektricky nabitě.



Elektrické vlastnosti látek souvisejí se stavbou atomů, které jsou složeny z atomových jader a elektronů. Jádra jsou tvořena neutrony a protony. Neutrony jsou bez elektrického náboje.

Protony a elektrony jsou nosiči elektrického náboje. Elektron je částice, která je nosičem záporného elementárního náboje $-e$. Proton je nosič kladného elementárního náboje e .

Za normálních podmínek se v látce počet protonů s kladným nábojem rovná počtu elektronů se záporným nábojem. Vnější působením se tato rovnováha může porušit a vzniká tak elektricky nabitě těleso, které je

- nabitě záporně, pokud převažují elektrony,
- nabitě kladně, pokud převažují protony.

1.2 Zákony pro elektrický náboj

Pro elektrický náboj platí následující zákony.

- **Zákon zachování elektrického náboje** – hodnota celkového elektrického náboje v elektricky izolované soustavě je rovna algebraickému součtu všech nábojů v soustavě a je neměnná.

Elektrické náboje nevznikají ani nezanikají, jen se přemísťují z jednoho tělesa na druhé (náboje se třením nevytvářejí, jen přemísťují).

- **Zákon kvantování elektrického náboje** – všechny náboje jsou násobkem elementárního náboje.

Libovolný náboj $Q = n \cdot e$, kde n je přirozené číslo, e je elementární náboj.

- **Zákon invariantnosti elektrického náboje** – hodnota elektrického náboje se při pohybu nemění. Velikost náboje je nezávislá (invariantní) na rychlosti, jíž se pohybuje nosič náboje.

1.3 Elektrické náboje v látkách

- **Vodiče** – část nábojů se pohybuje značně volně (kov, pitná voda, živý organismus).
- **Nevodiče** – volně se nepohybuje prakticky žádný náboj (sklo, ebonit, destilovaná voda, dielektrika).
- **Polovodiče** – mezi vodiči a izolanty – liší se schopností uvolnit elektrony z atomů, (křemík, germanium).
- **Supravodiče** – nulový odpor.

Volný elektrický náboj lze přenášet z jednoho tělesa na jiné a může se přemísťovat i v jednom tělese na makroskopické vzdálenosti. Volný náboj nesou elektrony v kovech a polovodičích, ionty v plynech a kapalinách.

Vodiče jsou látky obsahující volný elektrický náboj. Vodiče vedou elektrický proud.

Izolanty (dielektrika) jsou látky, které neobsahují volný elektrický náboj a nevedou elektrický proud.

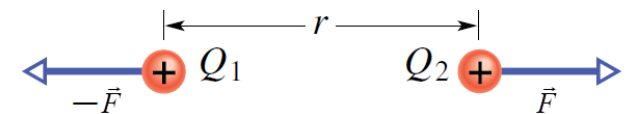
1.4 Elektrické pole

Elektrické pole je silové pole, v němž na tělesa nebo částice s elektrickým nábojem působí elektrická síla. Elektrické pole existuje kolem každého elektricky nabitého tělesa nebo částice s elektrickým nábojem.

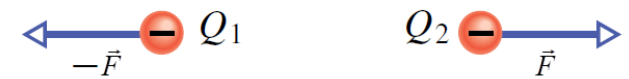
Pole se nazývá **elektrostatickým**, pokud částice, které ho vytváří, jsou v klidu vzhledem k pozorovací soustavě a **elektrodynamickým**, pokud se částice pohybují vzhledem k pozorovací soustavě. Elektrodynamické pole obecně má dvě složky: elektrickou a magnetickou.

Elektrické náboje na sebe působí elektrickou silou \vec{F}

- souhlasné náboje, resp. souhlasně nabitá tělesa se odpuzují,
- opačné náboje, resp. nesouhlasně nabitá tělesa se přitahují.



a) odpuzování



b) odpuzování



c) přitahování

Bodové náboje jsou elektrické náboje těles nebo částic, jejichž rozměry jsou značně menší než vzdálenosti mezi nimi, tj. jejich rozměry můžeme zanedbat.

1.5 Coulombův zákon

Elektrostatické silové působení mezi dvěma bodovými náboji lze popsat pomocí Coulombova zákona.

Velikost síly, kterou na sebe působí dva bodové náboje, je přímo úměrná součinu obou nábojů a nepřímo úměrná čtverci jejich vzdálenosti.

$$F = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}, \text{ kde } k = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}^{-2}.$$

Q_1 a Q_2 jsou velikosti bodových nábojů, r je vzdálenost, ε je **permitivita prostředí**, kterou lze vyjádřit vztahem

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r,$$

kde $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ je **permitivita vakua**, ε_r je **relativní permitivita**.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty relativní permitivity pro různá prostředí.

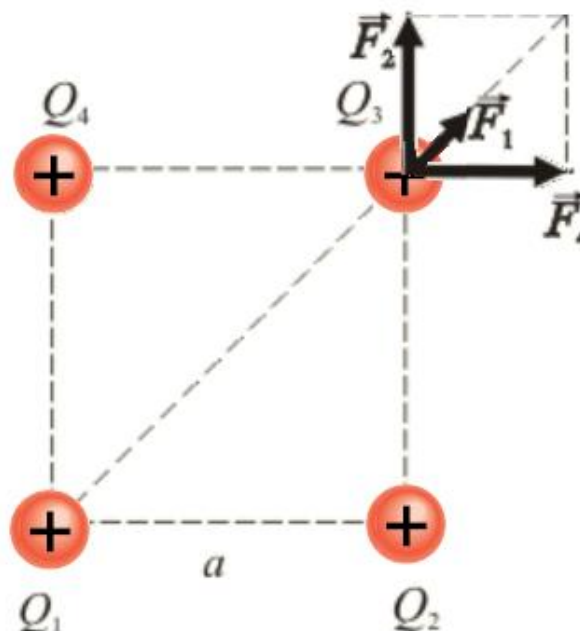
Vakuum	1	Olej silikonový	2,7
Vzduch	1,000 54	Plexisklo	3,7
Slída	5,4	Parafin	1,7-2,3
Voda (20 °C)	80,4	Papír kondenzátorový	3,5

Pro n bodových nábojů platí princip superpozice – silové účinky všech nábojů se **vektorově sčítají**.

Je-li v soustavě n nabitých částic, síla působící na libovolnou z nich je součtem všech sil působících od ostatních částic.

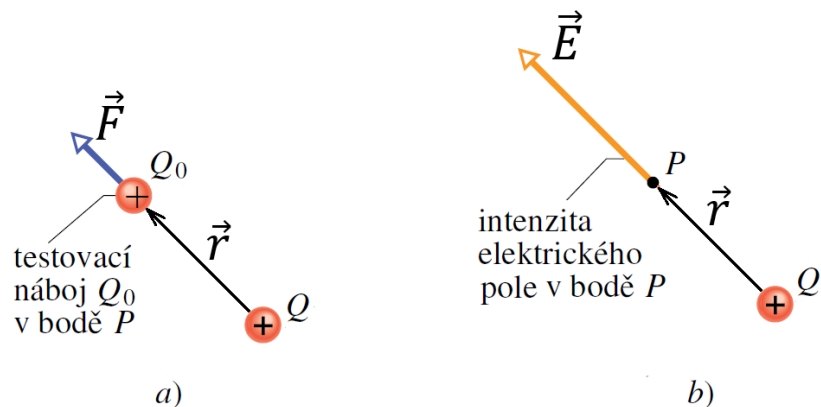
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Například



1.6 Intenzita elektrického pole

Vzájemné působení nábojů na dálku se realizuje prostřednictvím elektrického pole.

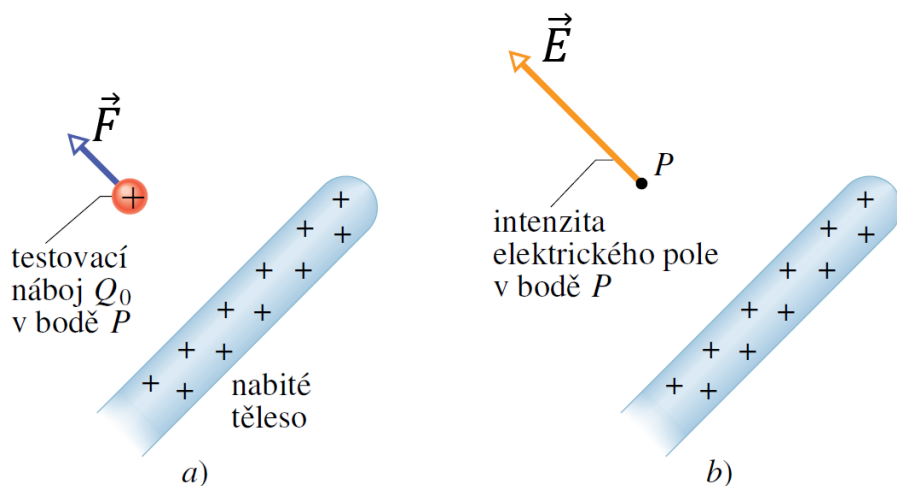


Elektrostatické pole charakterizujeme pomocí **intenzity elektrického pole**, která je definována vztahem

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0},$$

kde \vec{F} je síla, kterou působí elektrické pole v daném místě na kladný bodový testovací náboj Q_0 .

Intenzita elektrického pole (elektrická intenzita) je vektorová veličina a její jednotkou je $[E] = \text{N} \cdot \text{C}^{-1} = \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$.



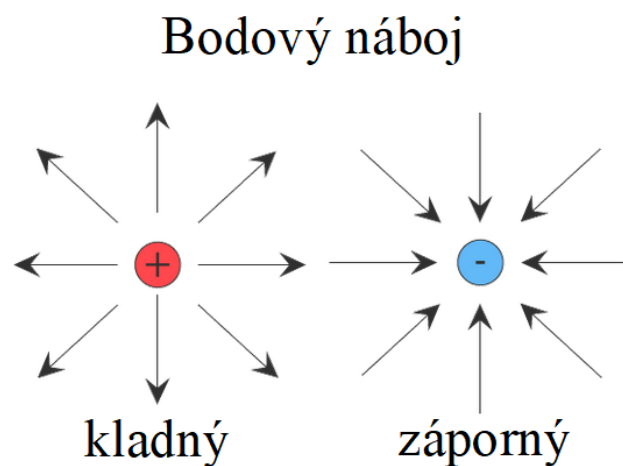
Je-li pole vybuzeno více náboji, určíme výslednou intenzitu pomocí principu superpozice

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

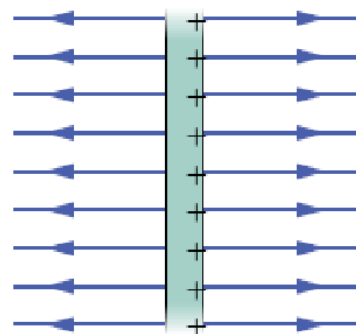
Elektrostatické pole můžeme graficky znázornit pomocí **elektrických siločar**.

Elektrické siločáry jsou myšlené orientované křivky, které mají následující vlastnosti:

- každým místem (bodem) prostoru (mimo vlastní bodový náboj) prochází jediná siločára – siločáry se tedy nemohou protínat,
- orientovaná tečna každého bodu siločáry je určena směrem intenzity elektrického pole,
- siločáry vycházejí z kladných nábojů a vstupují do nábojů záporných,
- siločáry mohou také začínat a končit v nekonečnu,
- hustota siločar je úměrná velikosti intenzity elektrického pole \vec{E} .

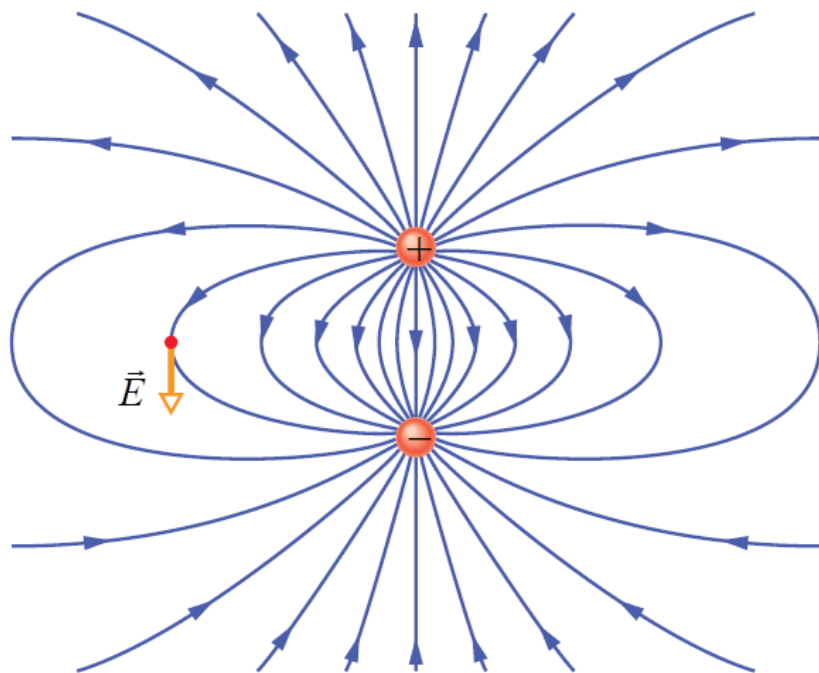


Homogenní pole

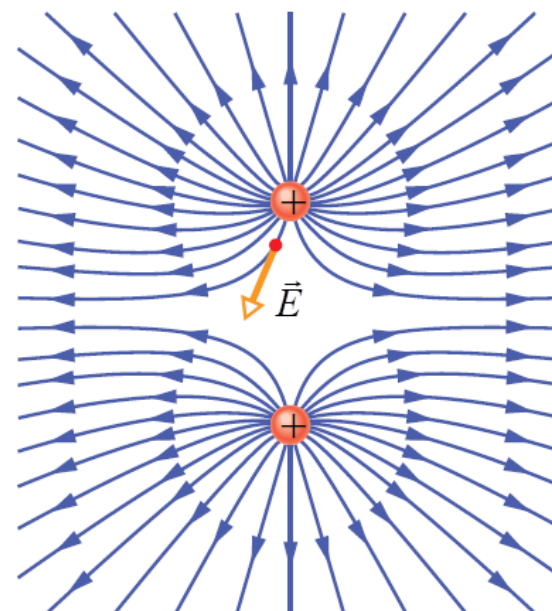


Jsou-li siločáry elektrostatického pole navzájem rovnoběžné přímky a intenzita má ve všech bodech pole stejnou velikost, nazývá se pole **homogenním**.

2 stejně velké bodové náboje



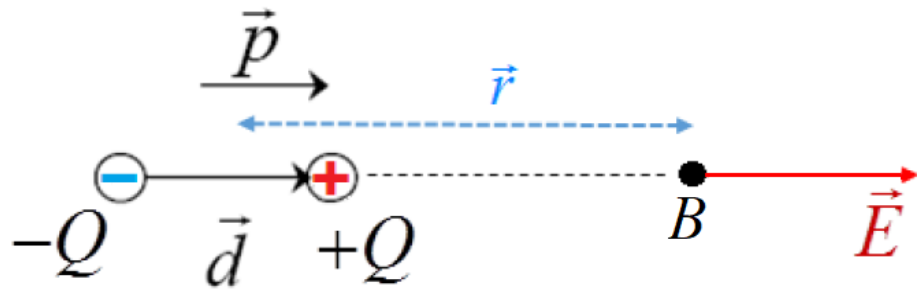
opačného znaménka



stejného znaménka

Nejjednodušším, ale důležitým případem soustavy bodových nábojů je dvojice stejně velikých nábojů opačného znaménka, jejichž vzdálenost d je malá ve srovnání se vzdáleností nábojů od bodů, v nichž určíme intenzitu pole.

1.7 Elektrické pole dipólu



Elektrický dipól je soustava dvou stejně velkých bodových nábojů opačného znaménka, tj. $Q_1 = -Q$, $Q_2 = Q$.

Přímka procházející oběma náboji se nazývá **osa symetrie dipólu**.

Elektrický dipól je charakterizován elektrickým dipólovým momentem.

Elektrický dipólový moment \vec{p} je součin kladného náboje dipólu a polohového vektoru \vec{d} kladného náboje vzhledem k náboji zápornému.

$$\vec{p} = Q \vec{d}.$$

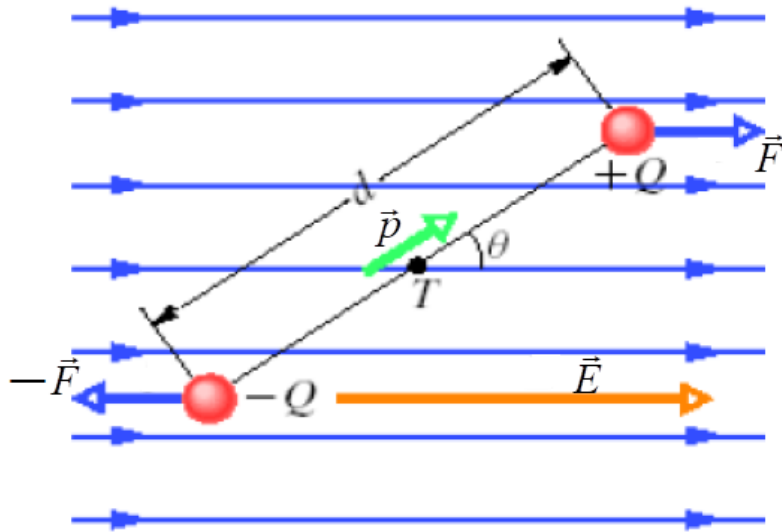
Ve velké vzdálenosti na ose dipólu má intenzita elektrického pole velikost

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

kde r je vzdálenost bodu B od středu dipólu.

Intenzita elektrického pole dipólu klesá se vzdáleností rychleji, než intenzita elektrického pole bodového náboje.

1.8 Dipól ve vnějším homogenním poli



Na oba póly dipólu působí síly stejně velké, ale opačného směru, takže výsledná síla je nulová. Translační pohyb nenastává.

Síly však tvoří dvojici sil, která působí na dipól otáčivými momenty sil a natáčí osu dipólu do směru vnějšího elektrického pole.

1.9 Elektrická potenciální energie

Pro elektrostatickou sílu platí řada stejných obecných závěrů jako pro sílu gravitační.

- Elektrostatická síla je síla konzervativní. Tedy práce sil elektrostatického pole při přemístění bodového náboje po libovolné uzavřené křivce je rovna nule.
- Systému složenému ze dvou nebo více nabitých částic lze přiřadit potenciální energii E_p , kterou nazýváme elektrostatickou nebo též elektrickou.

Změní-li se poloha nabitě částice, vykoná na ní elektrostatická síla práci. Změně potenciální energie pak odpovídá

$$\Delta E_p = E_{p,f} - E_{p,i} = -W.$$

Pro elektrostatickou sílu platí stejně jako pro jiné konzervativní síly, že práce touto silou vykonaná nezávisí na trajektorii.

Pro jednoznačné určení potenciální energie je nutno zvolit konfiguraci, pro niž pokládáme potenciální energii za nulovou. Elektrostatickou potenciální energii nabitě částice pokládáme za nulovou, je-li částice od systému nekonečně vzdálená.

Práci, kterou vykonají elektrostatické síly při přesunu nabitě částice z nekonečna do místa, kde zjišťujeme potenciální energii, označíme symbolem W_∞ . Pak je potenciální energie

$$E_p = -W_\infty.$$

1.10 Elektrický potenciál

Elektrický potenciál nebo potenciál elektrického pole je skalární veličina definovaná vztahem

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{E_p}{Q_0},$$

kde E_p je potenciální energie testovacího náboje Q_0 umístěného do vnějšího elektrického pole v bodě daném polohovým vektorem \vec{r} .

Jednotkou potenciálu je volt $[\varphi] = V = J.C^{-1}$.

Potenciál charakterizuje elektrické pole v místě s polohovým vektorem \vec{r} , je tedy funkcí prostorových proměnných (x, y, z) a nezávisí na náboji testovací částice.

Volíme-li v nekonečnu $E_{p,i} = 0$, pak také potenciál v nekonečnu $\varphi_i = 0$.

Protože $E_p = -W_\infty$ platí v libovolném místě elektrického pole, dostaneme

$\Delta E_p = E_{p,f} - E_{p,i} = E_{p,f} = -W_\infty$, tedy

$$\varphi_f = \frac{E_{p,f}}{Q_0} = -\frac{W_\infty}{Q_0}.$$

Je-li elektrostatické pole tvořeno soustavou n bodových nábojů, výsledný potenciál lze určit podle principu superpozice.

1.11 Elektrické napětí

Rozdíl potenciálů mezi dvěma libovolnými body elektrického pole nazýváme **elektrické napětí** mezi těmito body

$$U = \Delta\varphi = \varphi_f - \varphi_i = -\frac{W}{Q_0}.$$

Napětí mezi dvěma body elektrického pole je tedy rovno záporně vzaté práci vykonané elektrostatickou silou při přemístění náboje jednotkové velikosti mezi těmito body.

Elektrické napětí může být kladné, záporné, nebo nulové (záleží na znaménkách náboje Q a práce W).

Jednotkou elektrického napětí je volt $[U] = \text{V}$.

Mezi dvěma body elektrostatického pole je napětí 1 V, jestliže při přemístění náboje 1 C z jednoho bodu do druhého vykonají síly pole práci 1 J.

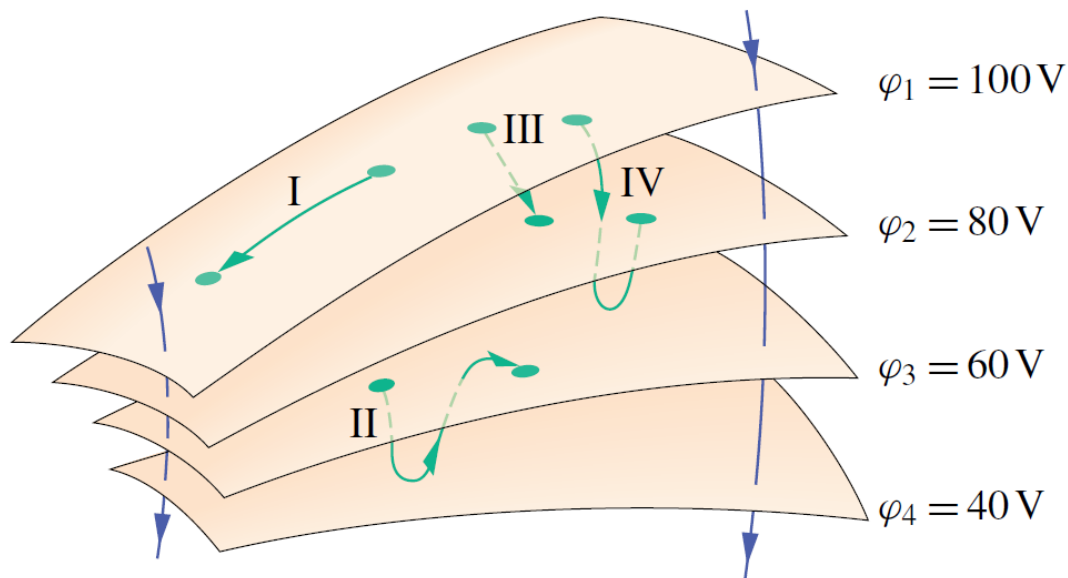
Často užívaná jednotka pro energii elektronů, děr, elementárních částic je **elektronvolt**

$$1 \text{ eV} = e (1 \text{ V}) = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

1.12 Ekvipotenciální plochy

Body, ve kterých má elektrický potenciál stejnou hodnotu, tvoří **ekvipotenciální plochu**. Ta může být reálná – fyzická (např. povrch nějakého tělesa) nebo jen myšlená (např. jeho rovina symetrie).

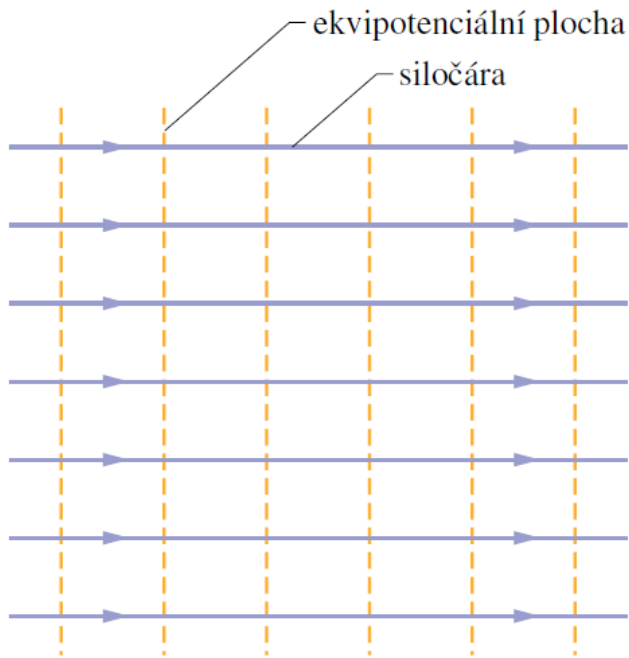
Přemístí-li se po libovolné dráze náboj mezi dvěma body téže ekvipotenciální plochy, nevykoná elektrické pole žádnou práci.



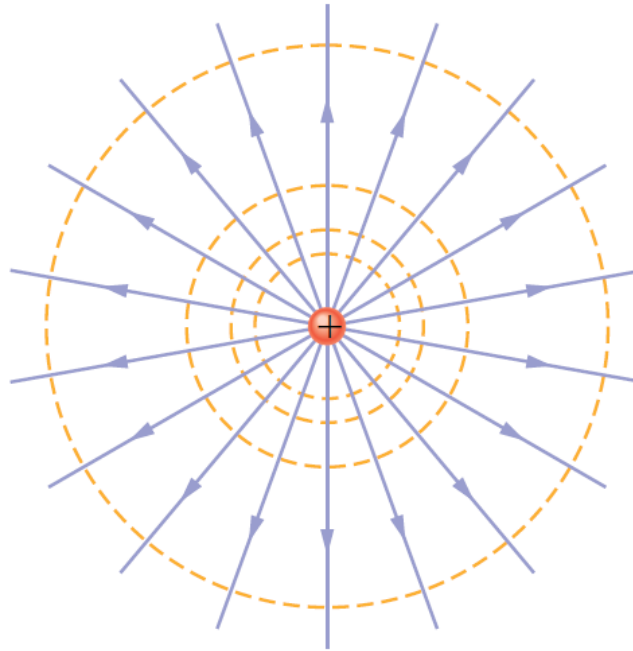
Z definice ekvipotenciální plochy $\varphi_i = \varphi_f$ a definičního vztahu pro napětí $U = \Delta\varphi = \varphi_f - \varphi_i = -\frac{W}{Q_0}$ vyplývá, že $W = 0$.

Protože práce elektrostatické síly je nezávislá na trajektorii, je vykonaná práce nulová, a to pro libovolnou trajektorii spojující body (i) a (f), bez ohledu na to, zda celá trajektorie leží, či neleží na ekvipotenciální ploše.

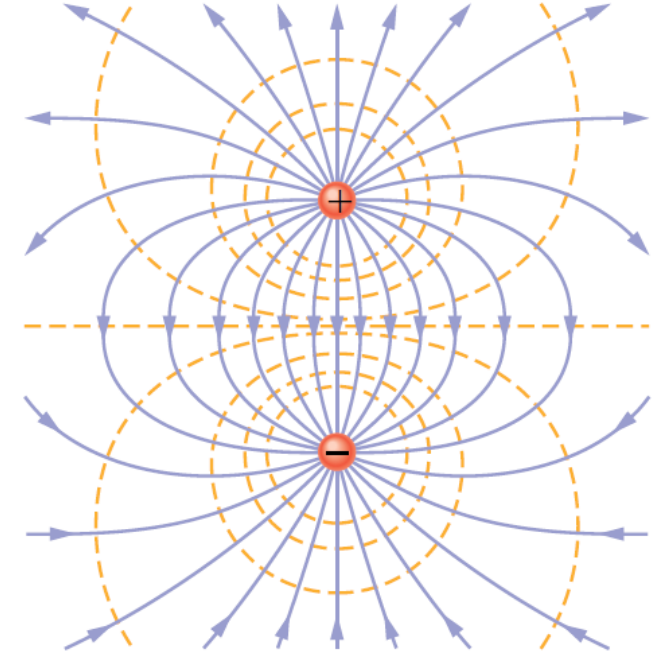
Elektrické siločáry (fialově) a příčné řezy ekvipotenciálních ploch (zlatě)



Homogenní elektrické pole

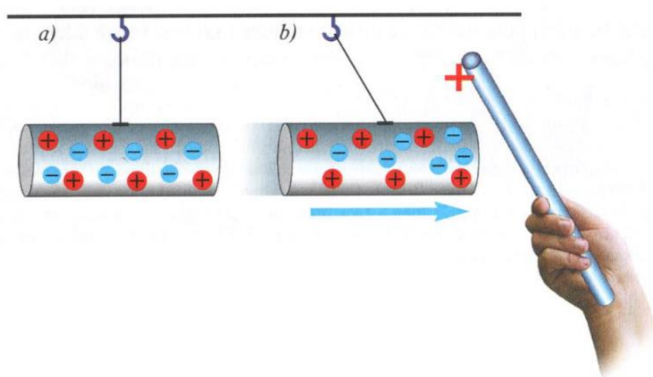


Elektrické pole bodového náboje



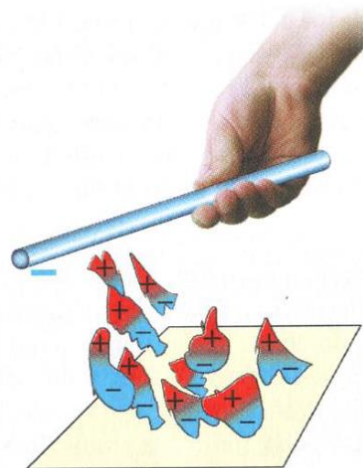
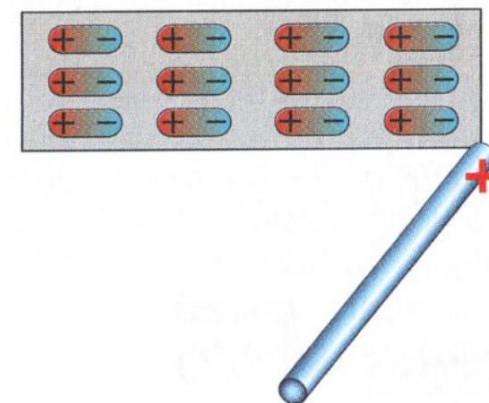
Pole elektrického dipólu

2. Vodič v elektrostatickém poli



Vložíme-li do elektrického pole vodič, začnou v něm na volné elektrony působit síly vyvolané elektrickým polem. Volné elektrony se přesunou ve vodiči tak, že na jednom konci bude převládat záporný náboj a na druhém konci kladný náboj. Tento jev se nazývá **elektrostatická indukce**.

Vložíme-li těleso z izolantu do elektrického pole, přesunou se elektricky nabitě částice uvnitř atomů tak, že na jednom konci tělesa se projeví kladný náboj (pól) a na protilehlém konci záporný náboj (pól). Tento jev se nazývá **polarizace izolantu**.



Při obou těchto jevech se na straně tělesa, které je blíže k elektricky nabitému tělesu, projeví nesouhlasný náboj.

V důsledku těchto jevů může elektricky nabitě těleso přitahovat i elektricky nenabitá tělesa.

3. Kondenzátor

Napnutím tětiny luku, natažením pružiny, stlačením plynu, zvednutím knihy a jinými podobnými úkony lze mechanickou energii akumulovat ve formě energie potenciální.

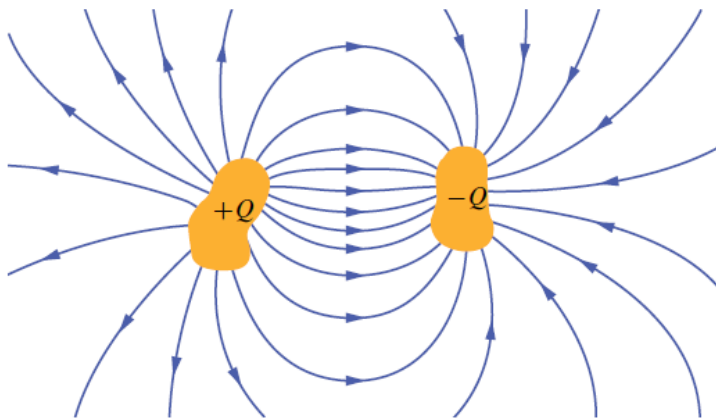
Také energii elektrického pole lze takto uchovat v kondenzátorech.



Kondenzátor lze obecně popsat jako dva vodiče, zvané **elektrody**, které jsou blízko u sebe, ale přitom jsou od sebe elektricky izolovány (odděleny). Někdy se jim říká „desky“, a to bez ohledu na jejich skutečný tvar.

Je-li kondenzátor nabitý, mají jeho elektrody stejně velké náboje, ale opačných znamének $+Q$ a $-Q$.

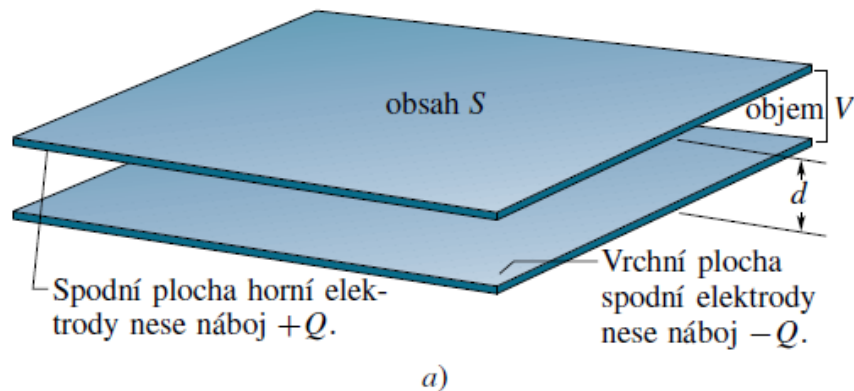
Mluvíme-li tedy o náboji Q kondenzátoru, rozumíme tím absolutní hodnotu náboje jedné z jeho elektrod, tedy $|Q|$, a nikoli celkový náboj, který je roven nule: $(+Q) + (-Q) = 0$.



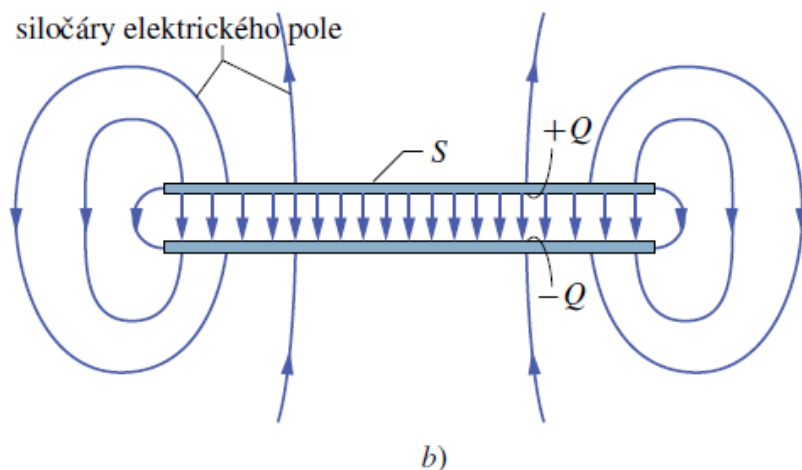
3.1 Deskový kondenzátor

Deskový kondenzátor tvoří dva rovnoběžné rovinné vodiče ve vzdálenosti d , každý o obsahu S .

—||— Znak, kterým znázorňujeme kondenzátor ve schématech, je odvozen právě od tvaru deskového kondenzátoru (užívá se však pro kondenzátory všech geometrických tvarů).



Protože elektrody kondenzátoru jsou vodivé, jsou tudíž i ekvipotenciálními plochami. Všechny body na téže elektrodě mají tedy stejnou hodnotu elektrického potenciálu.



Mezi oběma elektrodami nabitého kondenzátoru existuje potenciálový rozdíl neboli napětí. Neznáme-li pořadí elektrod, je přirozené brát tento rozdíl (napětí) kladný.

3.2 Kapacita kondenzátoru

Náboj Q a napětí U libovolného kondenzátoru jsou navzájem přímo úměrné. Platí tedy

$$Q = CU,$$

kde C je součinitel úměrnosti, který se nazývá **kapacita kondenzátoru**

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

Kapacita je číselně rovna náboji kondenzátoru při napětí 1 V mezi jeho elektrodami.

Pro libovolný kondenzátor je kapacita konstantní a závisí pouze na geometrii obou elektrod kondenzátoru (velikost, tvar, vzájemná vzdálenost) a jeho dielektriku.

Kapacita deskového vakuového kondenzátoru je $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$.

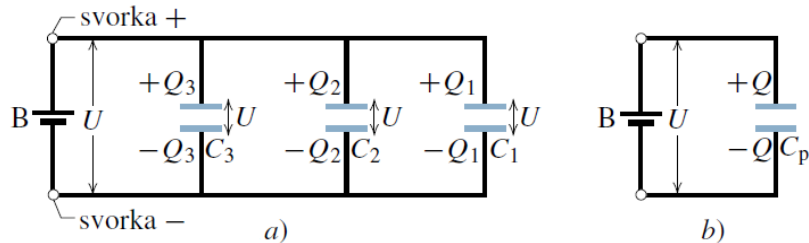
Pro deskový kondenzátor s dielektrikem je kapacita $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}$.

Kapacita je vždy kladná a její jednotkou je farad $[C] = F = C \cdot V^{-1}$.

Farad je jednotka pro praxi příliš velká. Častěji proto používáme jednotky menší, zvláště mikrofarad ($1 \mu F = 10^{-6} F$), nanofarad ($1 nF = 10^{-9} F$) a pikofarad ($1 pF = 10^{-12} F$).

3.3 Zapojení kondenzátorů

Paralelní spojení (vedle sebe)

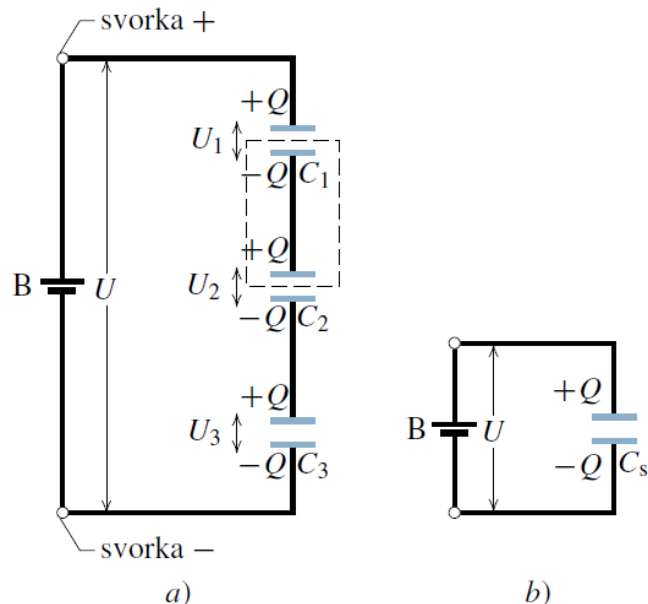


Při spojení kondenzátorů paralelně (vedle sebe) je napětí na celé skupině kondenzátorů stejné jako napětí na každém z nich.

Kapacita soustavy je $C_p = \frac{Q}{U}$,

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

Sériové spojení (za sebou)



Při spojení kondenzátorů do série (za sebou) je napětí na celé skupině kondenzátorů rovno součtu napětí na jednotlivých kondenzátorech.

Na každém kondenzátoru je stejný náboj Q .

Kapacita soustavy je $C_s = \frac{Q}{U}$,

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

3.4 Elektrická energie nabitého kondenzátoru

Energie nabitého kondenzátoru je soustředěna v elektrickém poli mezi jeho elektrodami.

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

Vztah platí nezávisle na geometrickém tvaru kondenzátoru.

Poznámka. Elektrická intenzita \vec{E} je vektor a má velikost E (obojí je bez indexů), energie je skalár a má zde vždy nějaký index: E_p , $E_{p,i}$, $E_{p,f}$, E_{el} , $E_{\text{el},i}$, $E_{\text{el},f}$ atd.

4. Dielektrika

4.1 Kondenzátor s dielektrikem

Vložíme-li mezi desky kondenzátoru dielektrikum, kapacita vzroste ε_r -krát, tedy platí

$$C = \varepsilon_r C_0,$$

kde ε_r je relativní permitivita, která charakterizuje dané dielektrikum a $\varepsilon_r \geq 1$.

V prostoru vyplněném dielektrikem platí všechny zákony a vztahy elektrostatiky pokud ε_0 nahradíme $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ (ε je permitivita nebo absolutní permitivita).

Intenzita pole bodového náboje je $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \frac{Q}{r^2}$.

Intenzita elektrického pole nabitě desky je $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}$.

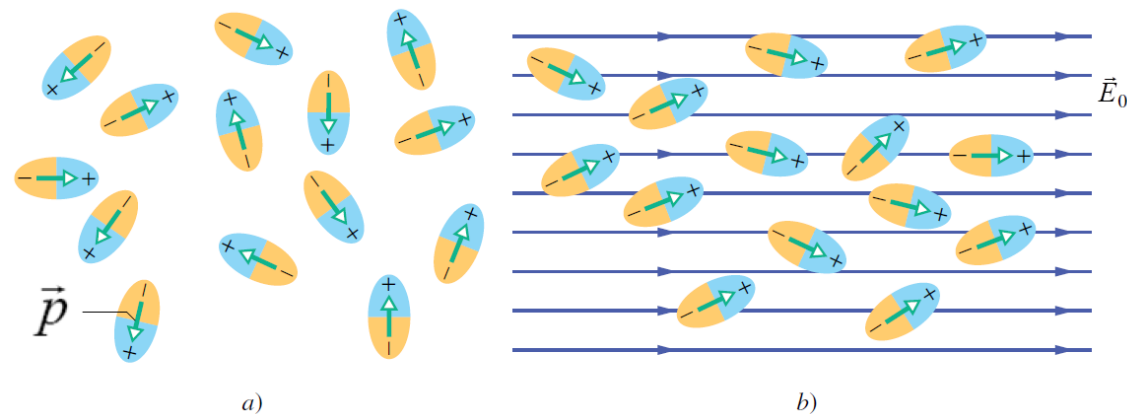
Důsledek. Intenzita elektrického pole uvnitř dielektrika je ε_r -krát menší než ve vakuu, tedy dielektrikum zeslabuje vnější pole $E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$.

4.2 Polární dielektrikum

Molekuly některých dielektrik mají stálé (permanentní) elektrické dipólové momenty (např. H₂O). Takové materiály se nazývají **polární dielektrika**.

V polárních dielektrikách se elektrické dipóly natačejí do směru vnějšího elektrického pole. Přitom je orientace dipólů tím úplnější, čím větší je elektrická intenzita působícího pole a čím nižší je teplota dielektrika.

Uspořádáním elektrických dipólů se vytváří elektrické pole, které má opačnou orientaci než přiložené vnější pole, a má menší intenzitu než pole vnější.



a) Molekuly se stálým elektrickým dipólovým momentem mají náhodnou orientaci elektrických dipólů, nenachází-li se dielektrikum ve vnějším elektrickém poli.

b) Nacházejí-li se molekuly v elektrickém poli, dochází k částečnému uspořádání dipólů.

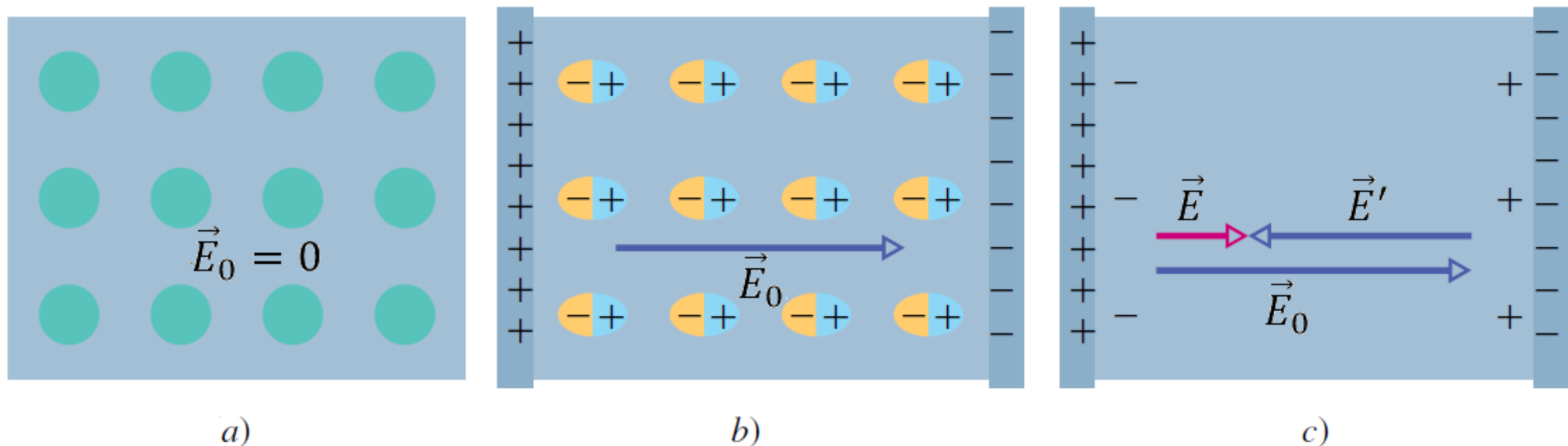
Neuspořádaný (tepelný) pohyb brání úplnému uspořádání.

4.3 Nepochární dielektrikum

Bez vnějšího pole jsou molekuly nepochárního dielektrika neutrální.

Ve vnějším poli dochází k polarizaci molekul a v dielektriku vzniká indukovaný povrchový náboj, který vytváří elektrické pole orientované opačně než přiložené vnější pole.

Pole povrchového náboje tedy zeslabuje vnější pole.



Důsledek. Jak polární, tak i nepochární dielektrika po vložení do vnějšího elektrického pole, které dielektrikem proniká, toto pole v sobě zeslabují.

5. Elektrický proud

5.1 Základní pojmy

Elektrické pole působí na nabitou částici elektrickou silou. Je-li částice volná, uvede ji síla do pohybu. Pohyb částic s elektrickým nábojem nazýváme **elektrickým proudem**.

Elektrické proudy se vyskytují všude kolem nás, od obrovských proudů při úderu blesku až k nepatrným proudům v nervových vláknech, které řídí pohyby našich svalů.

Další příklady: proud vodivostních elektronů v kovech, pohyb nabitých částic obou znamének v ionizovaném plynu nebo v elektrolytech, pohyb elektronů a děr v polovodičích.

Směr proudu je podle dohody stanoven jako směr pohybu **nosičů kladného náboje**. Ve skutečnosti jsou nosiči náboje elektrony.

Elektrický proud je charakterizován skalární fyzikální veličinou stejného názvu, kterou označujeme I .

Je-li dQ náboj protékající průřezem vodiče za dobu dt , pak je proud definován vztahem

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Elektrický proud je číselně roven množství náboje, který proteče průřezem vodiče za 1 s. Jednotkou proudu je základní jednotka SI – ampér $[I] = A = C \cdot s^{-1}$.

Z předchozího vztahu lze element náboje vyjádřit jako $dQ = I dt$.

Náboj, který proteče průřezem vodiče během časového intervalu od 0 do t , určíme integrací

$$Q = \int dQ = \int_0^t I dt.$$

Obecně je proud funkcí času $I = I(t)$.

Je-li proud konstantní, jde o stacionární (ustálený) proud a můžeme vztah zjednodušit.

Rozložení elektrického proudu na ploše průřezu vodiče, kterým protéká proud, nemusí být ve všech částech stejné. Toto rozložení lze popsat pomocí hustoty proudu.

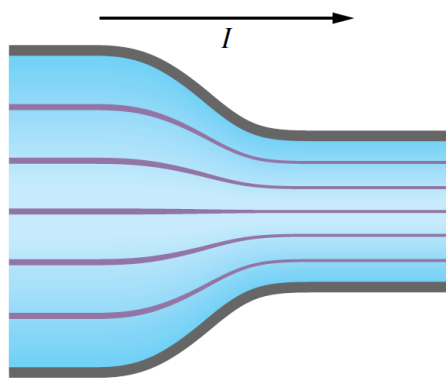
5.2 Hustota elektrického proudu

Hustota proudu (neboli **proudová hustota**) je vektorová veličina, která má stejný směr jako intenzita elektrického pole v daném bodě průřezu vodiče. Její velikost je rovna proudu procházejícímu elementární ploškou průřezu vodiče kolmou ke směru proudu, dělenému velikostí této plošky. Platí tedy

$$|\vec{J}| = \frac{dI}{dS}.$$

Jednotkou hustoty proudu je $[J] = \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Proudové čáry znázorňují průběh vektoru hustoty proudu. Větší hustota proudových čar znamená větší hustotu proudu.



Proud, který teče směrem doprava, přechází z vodiče o větším průřezu do vodiče o menším průřezu.

Protože se elektrický náboj zachovává, tak náboj, který prochází libovolným průřezem, a tedy ani celkový proud jím procházející se nemění. Změní se však hustota proudu, a to tak, že ve vodiči o menším průřezu je větší.

Vzdálenost mezi proudovými čarami odpovídá hustotě proudu. Jsou-li proudové čáry těsněji u sebe, je hustota proudu větší.

5.3 Mechanizmy vzniku elektrického proudu

- **Kondukční (vodivý) proud**

Vzniká při pohybu volných nosičů nábojů (kladných i záporných) ve vodivém prostředí vyvolaném vnějším elektrickým polem.

Pokud je v látce vytvořeno elektrické pole, nosiče náboje se začnou pohybovat s nenulovou střední hodnotou vektoru rychlosti. Tato rychlost se nazývá driftová rychlost v_d a její směr závisí na znaménku pohybujícího se náboje.

Celková hustota proudu je pak rovna součtu hustoty proudu kladných a záporných nábojů.

- **Konvekční proud**

Vzniká při makroskopickém pohybu nabitého tělesa v nevodivém prostředí.

- **Maxwellův (posuvný) proud**

Vzniká při pohybu elektrických nábojů během polarizace dielektrika.

Maxwellův proud však není nutně spojen s přítomností dielektrika, vzniká vždy při časové změně elektrického pole.

Výsledná hustota proudu je rovna součtu všech tří proudů: vodivého, konvekčního a Maxwellova

$$\vec{J} = \vec{J}_V + \vec{J}_K + \vec{J}_M.$$

6. Elektrický odpor

Odpor (rezistance) je veličina, která charakterizuje možnost průchodu proudu určitou látkou mezi dvěma jejími body, na něž je přiloženo napětí

$$R = \frac{U}{I}.$$

Odkud platí vztahy $I = \frac{U}{R}$, $U = RI$.

Jednotkou elektrického odporu je ohm $[R] = \Omega = \text{V} \cdot \text{A}^{-1}$.

Součástka, jejíž funkcí je vytvářet v elektrickém obvodu určitý odpor, se nazývá **rezistor** a podle normy ISO se značí 

Veličina „odpor“ je integrální, tj. udává se pro konkrétní součástku nebo pro konkrétní uspořádání materiálu. Nemá tedy smysl mluvit o tom, že daný materiál má někde odpor R_1 a jinde odpor R_2 .

Vodivost (konduktance) je převrácená hodnota odporu $G = \frac{1}{R}$.

Jednotkou je siemens $[G] = \text{S} = \Omega^{-1}$.

7. Rezistivita

Rezistivita (pro izotropní materiály) charakterizuje látku z hlediska její schopnosti klást proudu odpor.

Je to veličina lokální, v neizotropních materiálech může být v různých částech daného materiálu obecně rozdílná.

V definici odporu nahradíme $R \rightarrow \rho$, $U \rightarrow E$, $I \rightarrow J$ a dostaneme $\rho = \frac{E}{J}$.

Vektorový tvar je $\vec{E} = \rho \vec{J}$.

Jednotkou je $[\rho] = \text{V} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m} = \Omega \cdot \text{m}$.

Konduktivita je definována jako převrácená hodnota rezistivity $\sigma = \frac{1}{\rho}$.

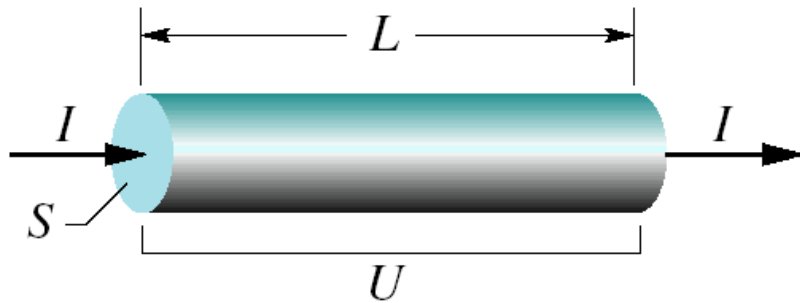
Vektorový tvar je pak $\vec{J} = \sigma \vec{E}$.

Jednotkou je $[\sigma] = (\Omega \cdot \text{m})^{-1} = \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

8. Výpočet odporu pomocí rezistivity

Odpor (neboli rezistence) je vlastnost objektu (vodiče, rezistoru).

Rezistivita je vlastnost materiálu.



Napětí U přiložené mezi konce vodiče o délce L a průřezu S způsobí, že vodičem prochází proud I .

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Vztah lze používat pouze pro homogenní izotropní vodič konstantního průřezu.

9. Ohmův zákon

Dnes je název zákon příliš silný. V době kdy byl formulován, však povahu zákona měl (pouze homogenní vodivé materiály, nejčastěji kovové).

Odpor je vlastností součástky. Pro danou součástku je odpor konstantní a nezávisí na velikosti ani polaritě přiloženého napětí. Proud protékající součástkou je přiloženému napětí přímo úměrný.

Pro popis situace lze použít vztahy

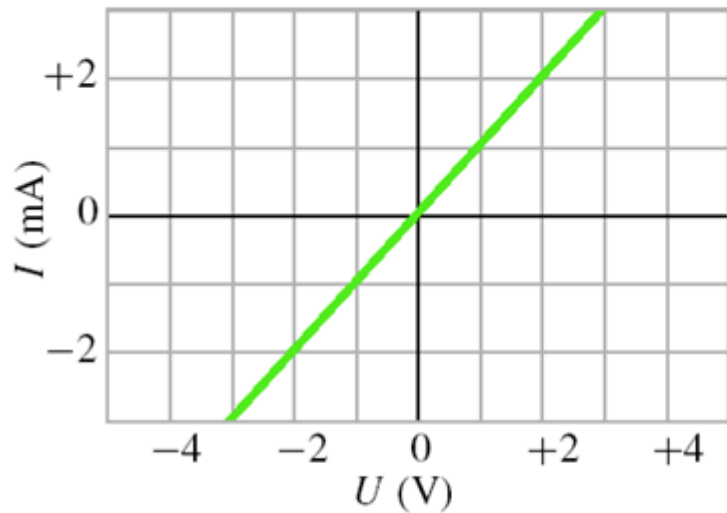
$$R = \frac{U}{I}, \quad I = \frac{U}{R}, \quad U = RI,$$

pokud je splněna podmínka, že $R = \text{konst.}$

Ohmův „zákon“ je splněn pouze pro součástky vyrobené z homogenních materiálů (vodivých i polovodivých) a navíc jen v určitých rozmezích přiložených napětí či protékajících proudů.

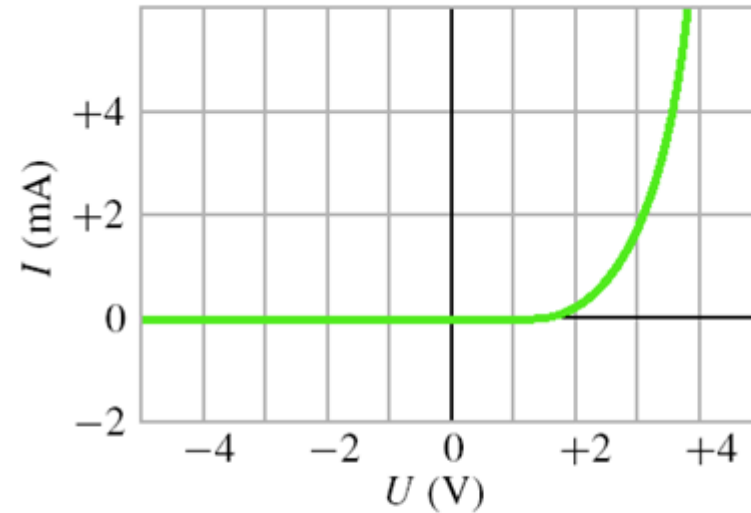
Například: součástka se protékajícím proudem zahřeje a odpor se začne měnit v závislosti na teplotě.

Lineární součástka



Součástka z homogenního materiálu – vodič i polovodič

Nelineární součástka

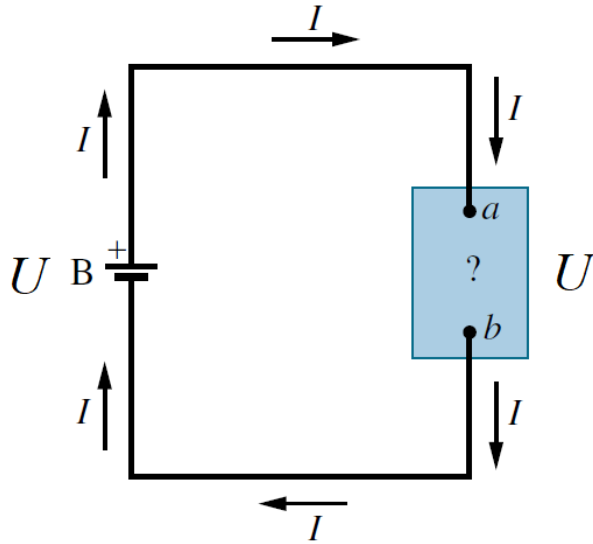


Součástka z nehomogenního materiálu – polovodičová dioda s p - n přechodem

Pro součástky s proměnným odporem se zavádí diferenciální odpor $R_d = \frac{dU}{dI}$.

Pouze u součástky, která se řídí Ohmovým zákonem, je $R_d = R = \frac{U}{I}$.

10. Práce a výkon elektrického proudu



Napětí U na svorkách baterie je stejné jako napětí na svorkách součástky (spotřebiče).

Svorka a má vyšší potenciál než svorka b .

Napětí mezi body a, b je U .

Práce, kterou vykonají síly elektrického pole při přenesení náboje dQ spotřebičem, je rovna poklesu elektrické potenciální energie

$$dW = dE_p = U dQ = U I dt.$$

Výkon elektrického proudu se definuje jako rychlost přenosu elektrické energie

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dE_p}{dt} = U I.$$

Jednotkou je watt $[P] = W = V \cdot A$.

Je-li spotřebičem rezistor o odporu R , přemění se práce dW v **Jouleovo teplo** dQ_J

$$dQ_J = dW = U I dt = R I^2 dt = \frac{U^2}{R} dt.$$

Rezistor zvyšuje teplotu a stává se tak zdrojem tepelného toku. Tento nevratný proces se nazývá **disipace energie**.

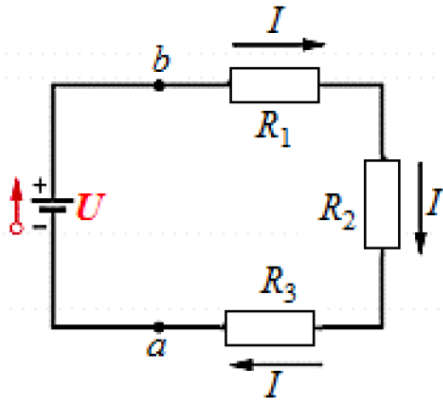
Poznámka. Q_J zde znamená fyzikální veličinu teplo, nikoli elektrický náboj.

Disipovaný výkon je tedy rychlost disipace energie rezistorem

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

11. Zapojení rezistorů

Sériové (za sebou)

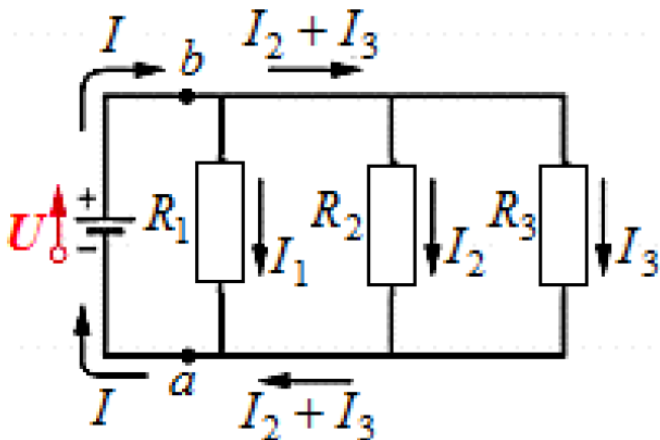


Rezistory teče **stejný proud**. Celkové napětí je rovno součtu napětí na jednotlivých rezistorech.

$$U = I R_1 + I R_2 + I R_3,$$

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U}{R_s}, \text{ tedy } R_s = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Paralelní (vedle sebe)



Na rezistorech je **stejné napětí**. Celkový proud je roven součtu proudů jednotlivými rezistory.

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R_p}, \text{ tedy}$$

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$