

# Zvuk

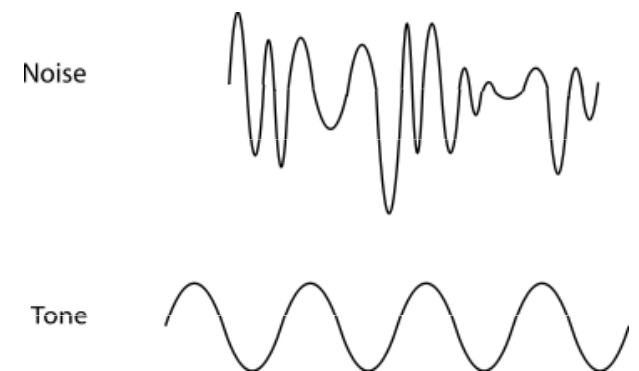
**Zvuk** je mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem.

**Zdrojem zvuku** může být každé chvějící se těleso. O vlnění v okolí zdroje zvuku však nerozhoduje jen jeho chvění, ale i okolnost, jestli je tento předmět dobrým nebo špatným **zářičem zvuku**. Tato jeho vlastnost závisí hlavně na jeho geometrickém tvaru.

Zvuky lze rozdělit na tóny a hluky.

**Hluky** bývají označovány jako zvuky nehudební. Jde o nepravidelné vlnění vznikající jako složité nepravidelné kmitání těles nebo krátké nepravidelné rozruchy (srážka dvou těles, výstřel, přeskočení elektrické jiskry apod.) i zvuky mnoha hudebních nástrojů, především bicích.

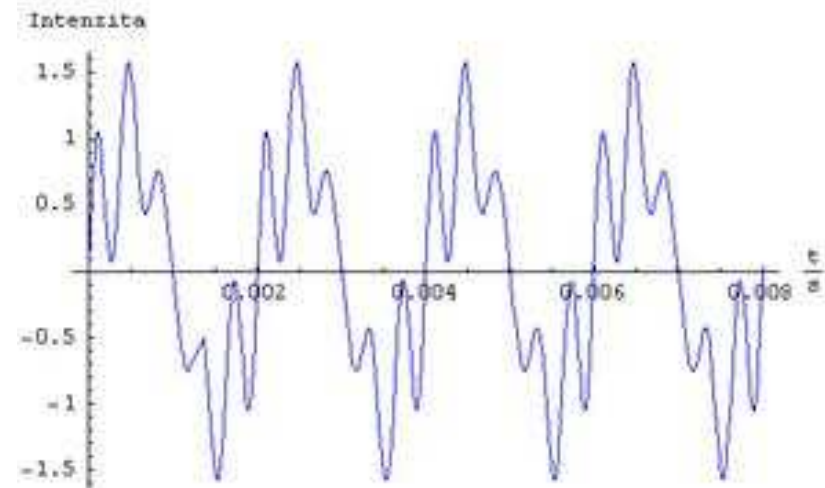
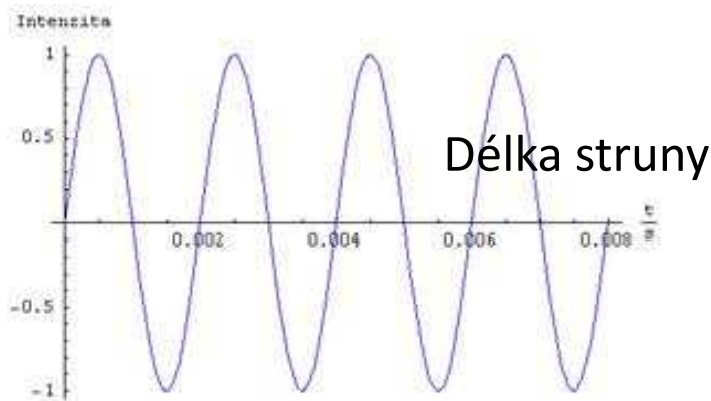
**Tóny** bývají označovány jako zvuky hudební, vznikají při pravidelném, v čase přibližně periodicky probíhajícím pohybu – kmitání. Při jejich poslechu vzniká v uchu vjem zvuku určité výšky, proto se tónů využívá v hudbě. Jejich zdrojem mohou být například lidské hlasivky nebo různé hudební nástroje.



Tóny se pak dále ještě dělí na:

1. **tóny jednoduché** - mají harmonický průběh, tj. grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase je funkce sinus.

2. **tóny složené** - jejich průběh je periodický, ale už se nejedná o sinusoidu. Zvuky obsahují kromě **základní frekvence** ještě i tzv. **vyšší harmonické frekvence** (aliquotní tóny), které jsou tvořeny složkami jejichž frekvence jsou celistvé násobky frekvence základního tónu. Má-li harmonická frekvence dvojnásobný počet kmitů proti kmitu základnímu, jde o druhou harmonickou atd.



## Délka struny

Délka struny je rovna celočíselným násobkům poloviny vlnové délky stojaté vlny.

$$l = k \frac{\lambda}{2}, \text{ kde } k = 1, 2, 3, \dots$$

*Základní frekvence kmitání*

$$f_z = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$$

*Vyšší harmonické frekvence*

$$f_k = k f_z, \text{ kde } k = 1, 2, 3, \dots$$

**Výška zvuku** je dána jeho frekvencí, čím vyšší je frekvence, tím je vyšší výška. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje jejich frekvence absolutní výšku tónu. **Absolutní výška tónu** se měří přístroji pro měření zvukových frekvencí, za obvyklých podmínek ji nelze určit sluchem. Pro subjektivní hodnocení zvuku je důležitější **relativní výška tónu**, což je podíl frekvence daného tónu vůči frekvenci referenčního tónu.

Zvuky se i při stejné výšce tónu mohou lišit odlišným zabarvením. **Barva zvuku** je určena jeho spektrem - frekvencemi vyšších harmonických tónů ve složeném tónu a jejich amplitudami a fázemi. Sluchem podle barvy zvuku rozeznáváme hudební nástroje a hlasy lidí.

## Příklad

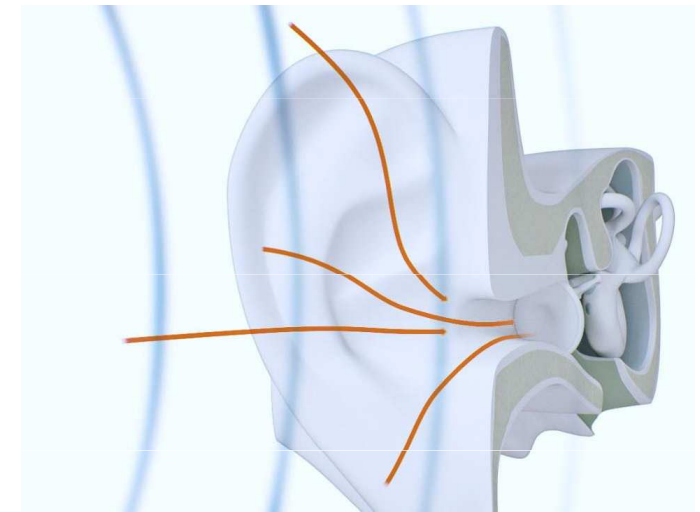
Na jednom člunu měřili hloubku moře ultrazvukem. Jaká je tam hloubka moře jestli se odražený ultrazvukový signál vrátil na člun za 0,8 s?

$$h = v \cdot \frac{t}{2}$$

$$h = 1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \frac{0,8 \text{ s}}{2} = 580 \text{ m}$$

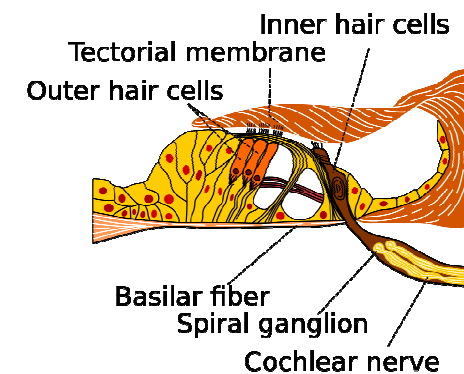
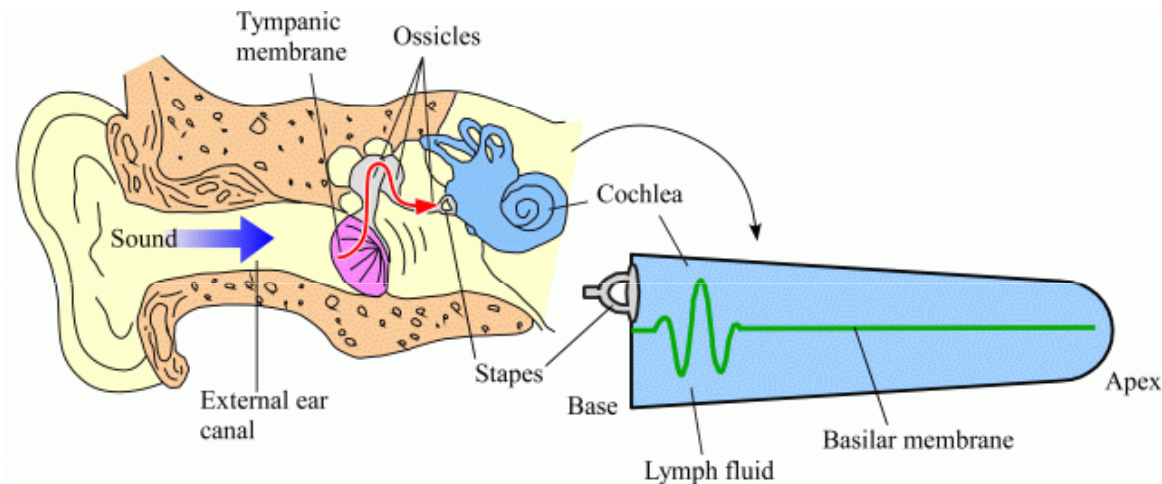
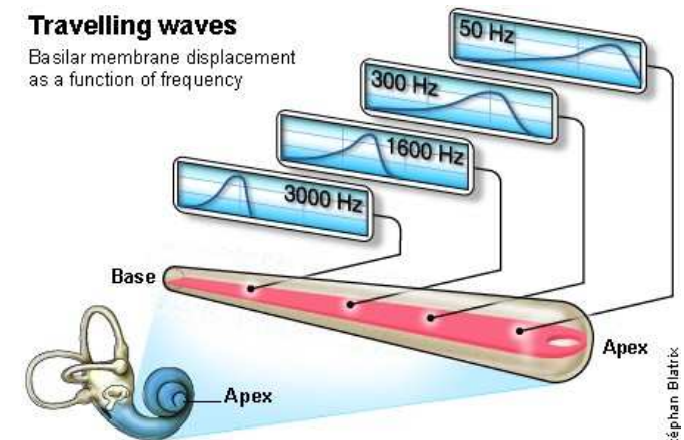
# Sluch

**Sluch** je schopnost vnímat zvuk. Ucho je sluchový párový orgán obratlovců. Jeho základními částmi jsou vnější, střední a vnitřní ucho. Zvuk, který prochází zvukovodem naráží do bubínku, ten se rozechvěje a vibrace přenáší přes kladívko, kovadlinku a třmínek do hlemýždě. Tam na vibrace reagují smyslové buňky, které informace o zachyceném zvuku vedou pomocí sluchového nervu k dalšímu zpracování do mozku.



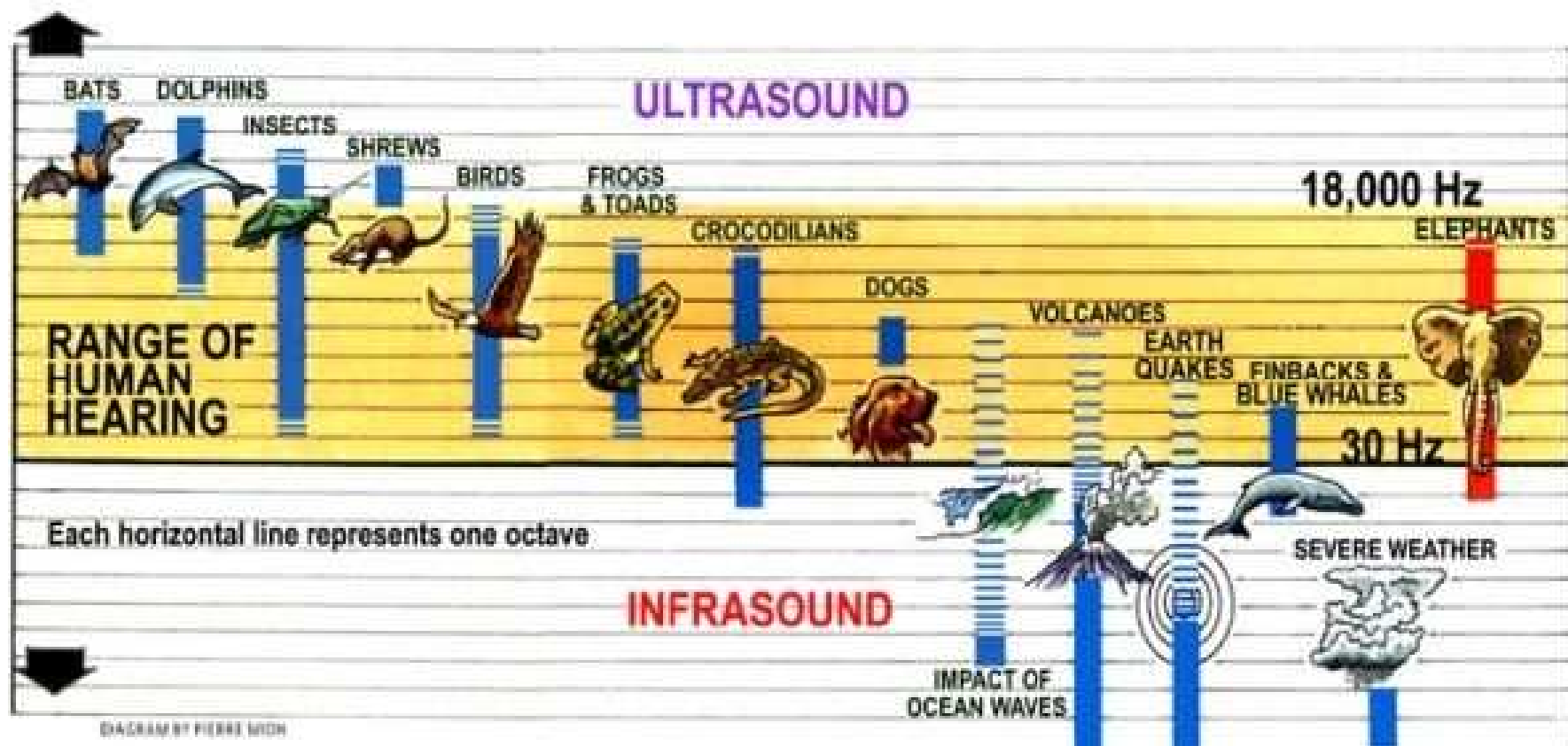
## Travelling waves

Basilar membrane displacement as a function of frequency



# Frekvence zvuku

**Frekvence** zvukového vlnění, které je člověk schopen vnímat, jsou značně individuální a leží v intervalu přibližně 16 Hz až 20 000 Hz. Mechanické vlnění mimo tento frekvenční rozsah sluchový vjem nevyvolává, přesto se někdy také označuje jako zvuk. Frekvenci nižší než 16 Hz má **infrazvuk**, frekvenci vyšší než 20 kHz má **ultrazvuk**.

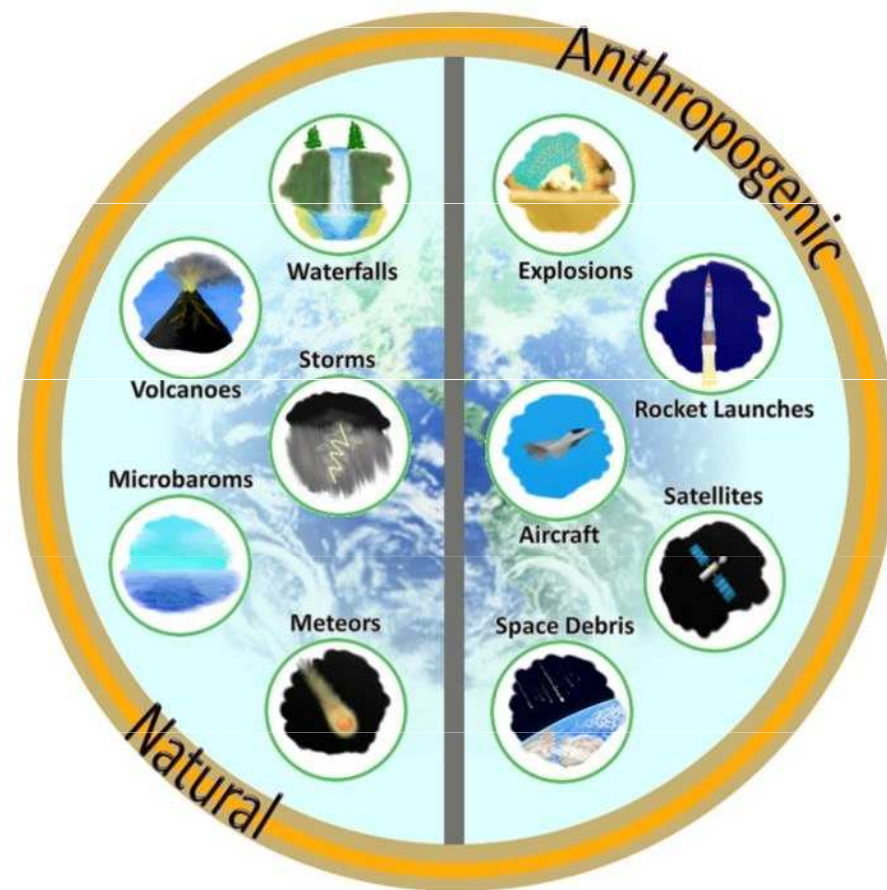




# Infrazvuk

**Infrazvuk** je akustické vlnění, jehož frekvence je tak nízká, že ho lidské ucho není schopné zaznamenat. Přesná hranice mezi slyšitelným zvukem a infrazvukem neexistuje, ale udává se mezi 16 až 20 Hz. Spodní hranice se udává mezi 0,001 a 0,2 Hz.

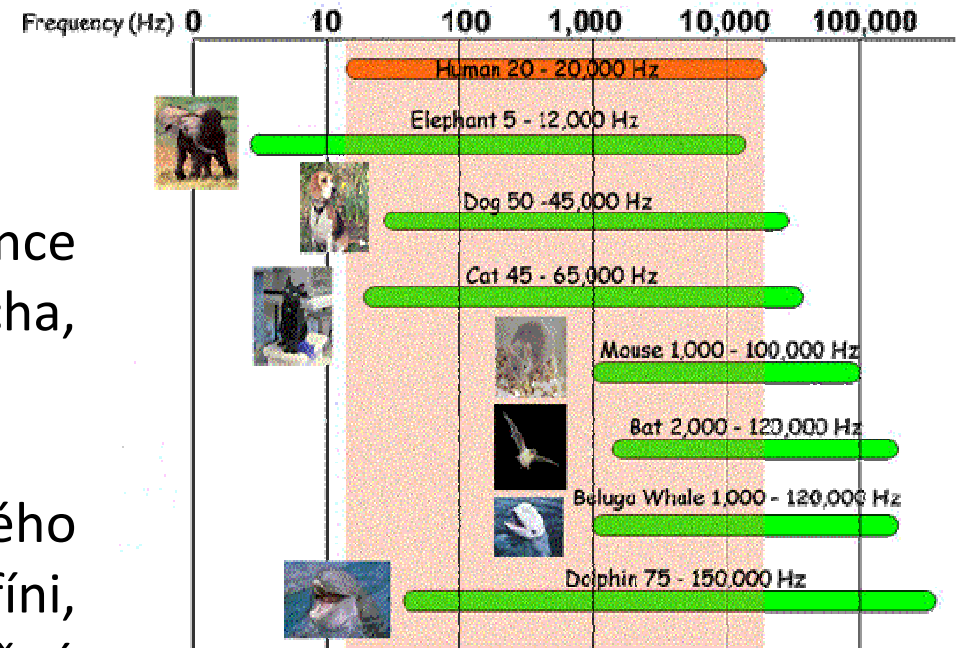
Velryby, sloni, hroši, nosorožci, okapi a aligátoři používají infrazvuk k dorozumívání.



# Ultrazvuk

**Ultrazvuk** je akustické vlnění, jehož frekvence leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha, slyšitelného zvuku, která je cca 20 kHz.

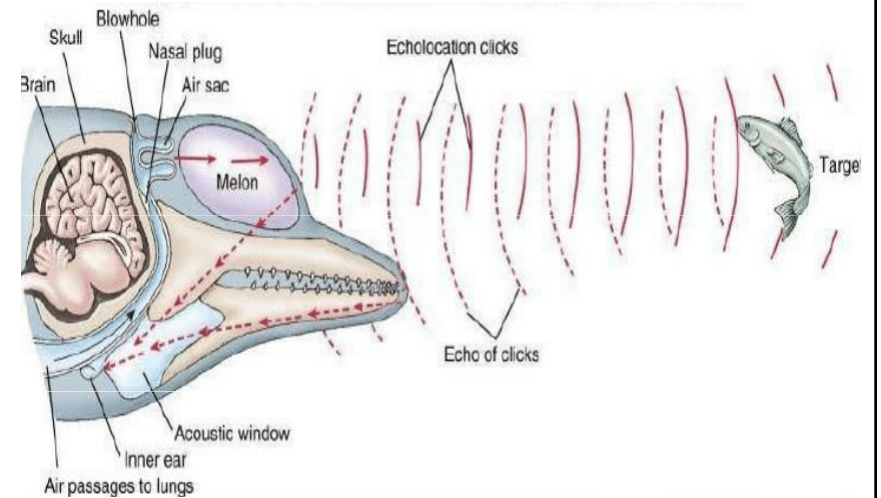
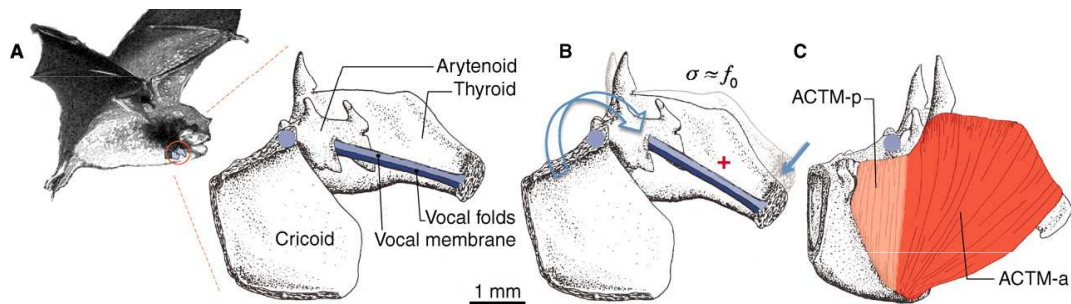
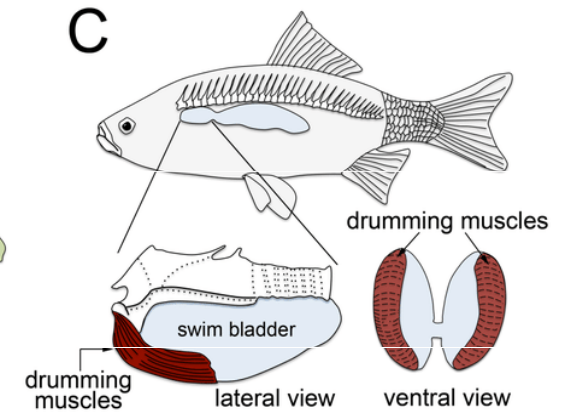
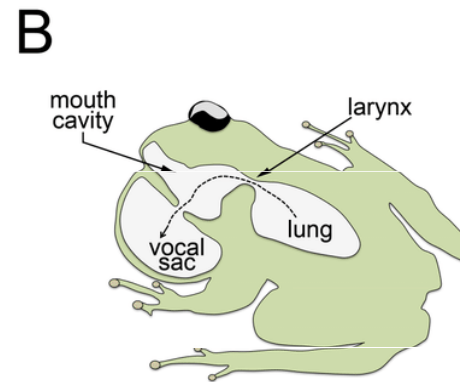
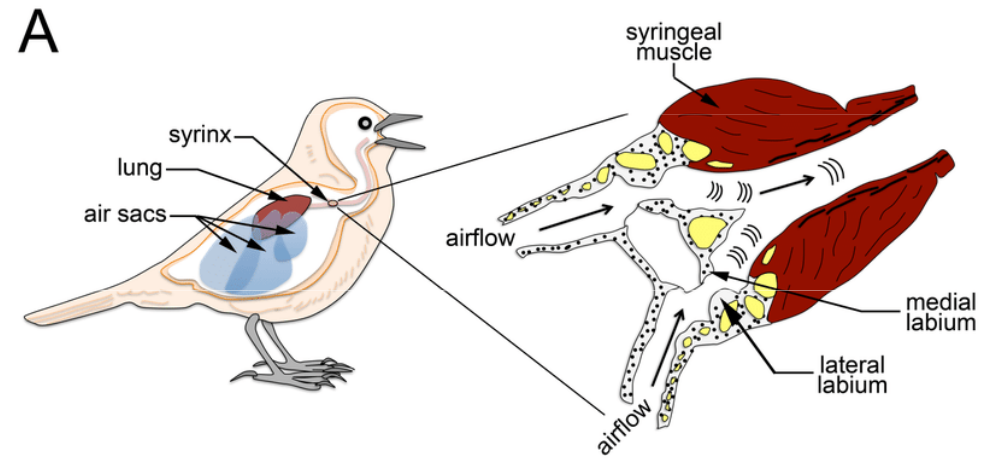
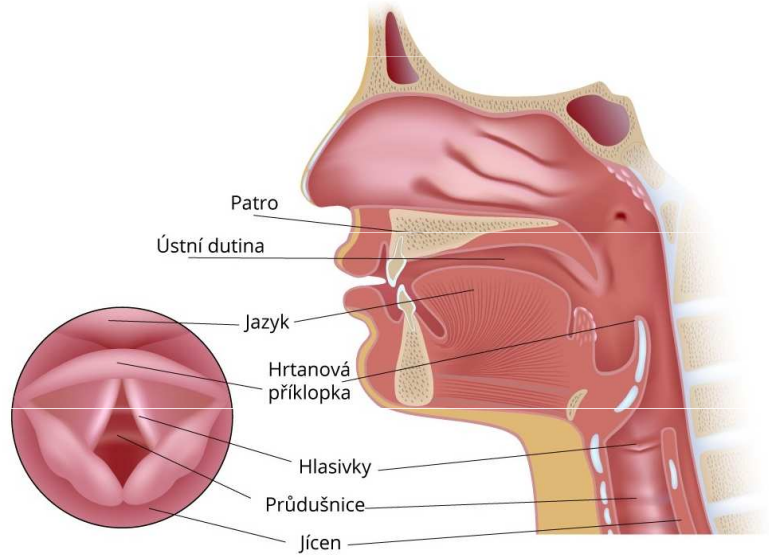
Někteří živočichové část ultrazvukového spektra vnímají, případně i vydávají (delfíni, netopýři, aj.) a využívají jej jak k běžné komunikaci, tak zejména k echolokaci.



Pes vnímá ultrazvuk až do frekvence 100 kHz, což se využívá pro cvičení a ovládání psů pomocí **ultrazvukových píšťalek**.

K plašení zvířat se používají také **ultrazvukové odpuzovače**.

# Hlasové (vokální) ústrojí







**Netopýr rybožravý** (*Noctilio leporinus*) dokáže vyvinout ultrazvuk o intenzitě až 140 dB.



**Plejtváček obrovský** (*Balaenoptera musculus*), který dokáže vyvinout zvuk o intenzitě až 188 dB.



**Pistolová kreveta** (*Alpheus bellulus*) vystřeluje proud vody takovou rychlostí, že je doprovázen zvukem podobným výstřelu s intenzitou až 200 dB.

Samci některých druhů **cikád** vydávají zvuky o intenzitě až 120 dB a jsou slyšet na kilometr daleko.



# Rychlost šíření zvuku

K šíření zvuku je potřeba nějakého látkového prostředí. Proto se zvuk nešíří ve vakuu, které v ideálním případě neobsahuje žádné částice.

Rychlost zvuku závisí na prostředí, ve kterém se zvukové vlny šíří. Pro rychlost zvuku v **ideálním plynu** platí

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} \left( 1 + \frac{1}{2} \gamma t \right)$$

kde  $p_0$  je tlak plynu při teplotě 0 °C,  $\rho_0$  je příslušná hustota a  $\gamma$  teplotní rozpínavost pro daný plyn,  $t$  je teplota v °C

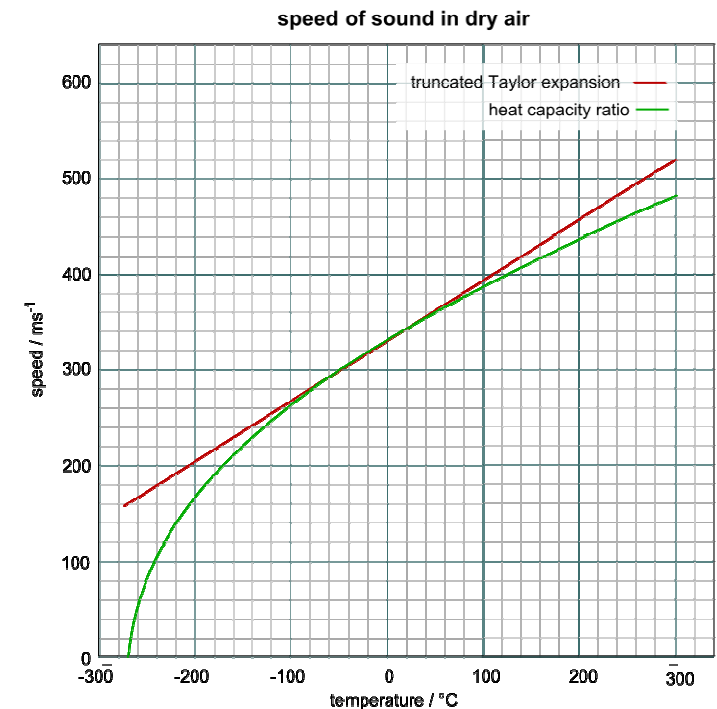
Pro rychlost zvuku v **suchém vzduchu** platí

$$c_{\text{air}} = 331.3 + (0.606 \cdot \vartheta) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde  $\vartheta$  je teplota v °C

V suchém vzduchu o teplotě 0 °C je rychlost zvuku 331,4 m/s.

V suchém vzduchu o teplotě 25 °C je však tato rychlost již 346,3 m/s.



$$c_{\text{solids}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

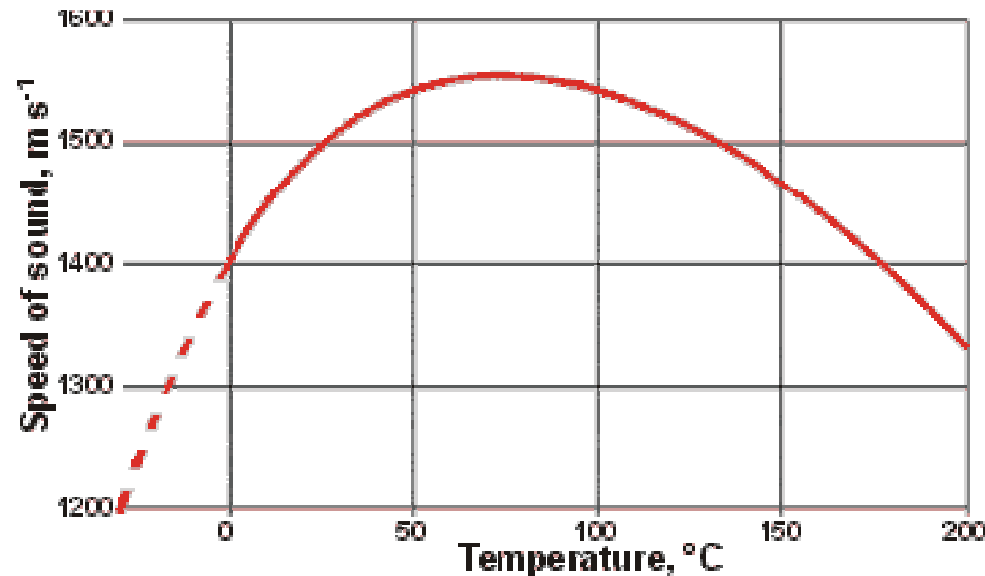
E = Youngův modul pružnosti

$$c_{\text{fluid}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

K = modul objemové pružnosti

Material	Density (g/cm)	Speed (m/s)
Copper	8.90	6420
Steel	7.86	5940
Beryllium	1.93	12890
Aluminium	2.58	6420
Water	1.00	1496
Ethanol	0.79	1207
Air	0.00139	331.45
Helium	0.000178	965
Fat	0.95	1450
Muscle	1.07	1580
Skull bone	1.91	4080

## Rychlost zvuku ve vodě



Temperature (°C)	Density (kg per cubic meter)	Velocity (m/s)
0	999.8395	1,402.39
10	999.7026	1,447.28
20	998.2071	1,482.36
30	995.6502	1,509.14
40	992.2	1,528.88
50	988.04	1,542.57
60	983.2	1,552.00
80	971.8	1,555.00
100	958.37	1,543.05

## Příklad

Vypočítejte rychlost zvuku ve vzduchu a) při teplotě 20 °C a b) při teplotě 27 °C.

$$t_1 = 20 \text{ °C}$$

$$v_1 = 331,82 + 0,61 \cdot t_1 = 331,82 + 0,61 \cdot 20 = \underline{344,02 \text{ m.s}^{-1}}$$

$$t_2 = 27 \text{ °C}$$

$$v_2 = 331,82 + 0,61 \cdot t_2 = 331,82 + 0,61 \cdot 27 = \underline{348,29 \text{ m.s}^{-1}}$$



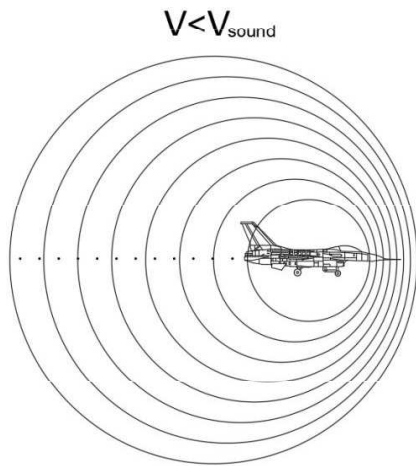
# Machovo číslo

Překonání rychlosti zvuku se měří **Machovým číslem** (poměr rychlosti pohybu tělesa určitým prostředím k rychlosti šíření zvuku v témže prostředí). Protože rychlost zvuku je funkcí hustoty vzduchu, která se mění s výškou letu, je konkrétní hodnota rychlosti zvuku proměnná a platná právě pro konkrétní stav atmosféry a danou výšku letu.

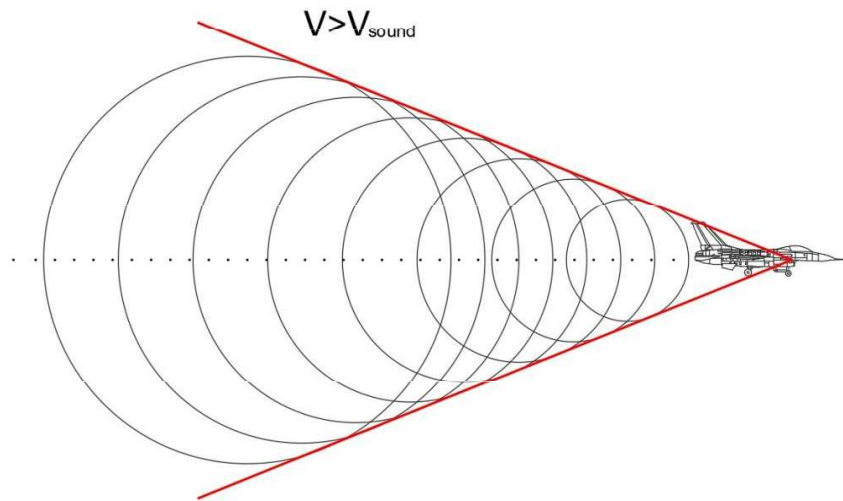
<u>Mach Number</u>	<u>Regime</u>
< 1	Subsonic
= 1	Sonic
0.8 - 1.2	Transonic
1.2 – 5	Supersonic
5 - 10	Hypersonic
> 10	High - Hypersonic



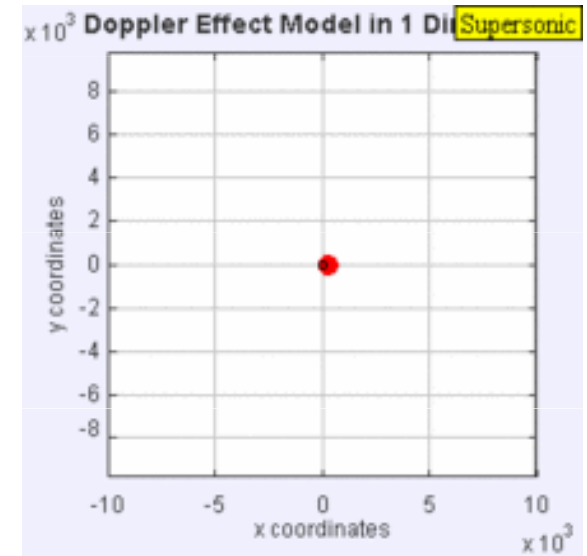
Při pohybu letadla nad hranicí rychlosti zvuku je možné pozorovat tzv. **Machův kužel**, který je možné pozorovat díky zhuštění vodních par okolo letadla.



$$V < V_{\text{sound}}$$

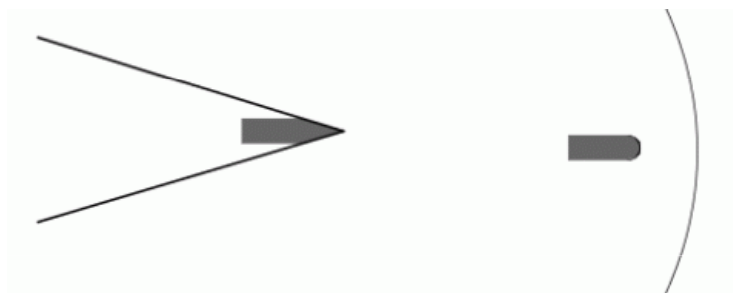
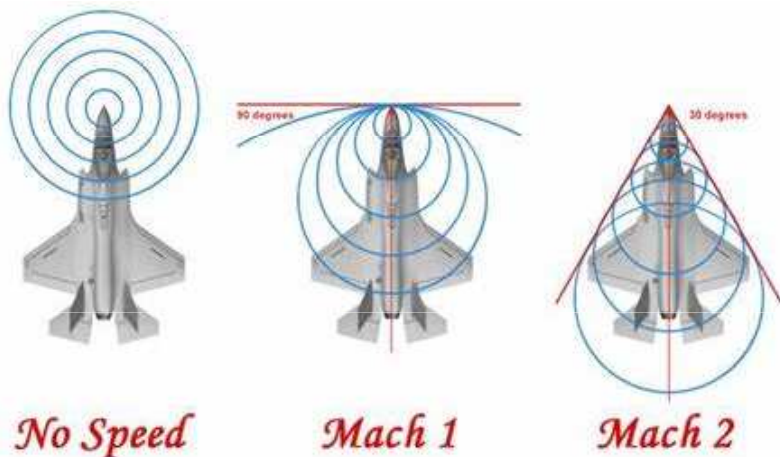


$$V > V_{\text{sound}}$$

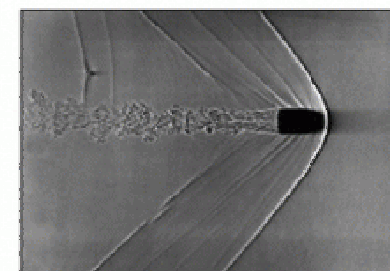


Při pohybu tělesa rychlostí větší než jakou se šíří vlny vzniká **rázová vlna**, jejíž tvar závisí na tvaru pohybujícího se tělesa. Při překonávání tlakové bariéry dochází k vyrovnání velmi rozdílných tlaků před a za tělesem, provázeném **zvukovými efekty** značné intenzity.

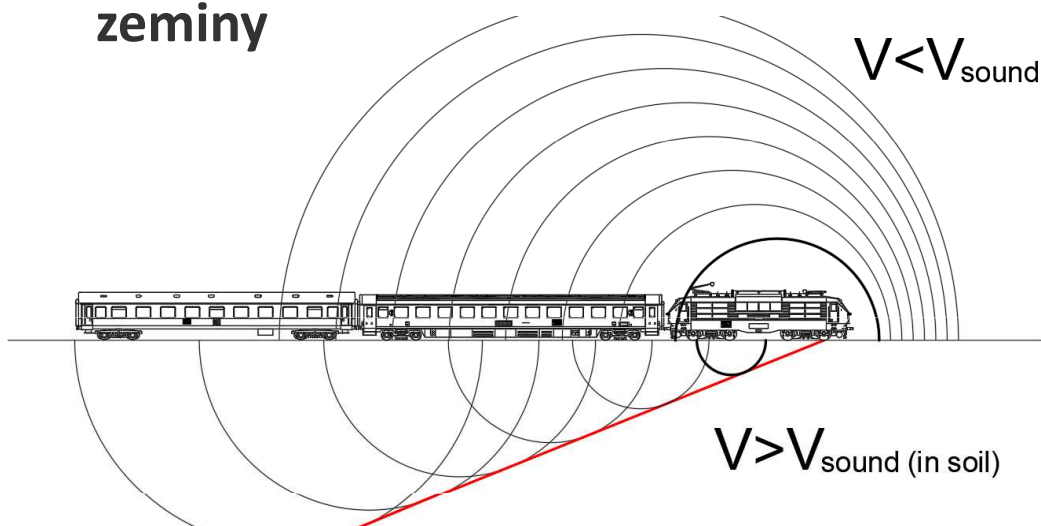
Značná část energie pohybu se spotřebuje na vznik zvukových a rázových vln. Když rázová vlna dosáhne k zemskému povrchu, vnímáme ji sluchem jako silnou ránu podobající se výstřelu. Tento zvuk označujeme jako **aerodynamický (sonický či akustický) třesk**. Vznik akustického třesku je jedním z důvodů, proč se letadla mohou pohybovat nadzvukovou rychlostí jen ve velkých výškách.



*Letadlo* pohybující se *nadzvukovou* rychlostí  
a *střela* pohybující se *podzvukovou* rychlostí.



### “ztekucení” zeminy

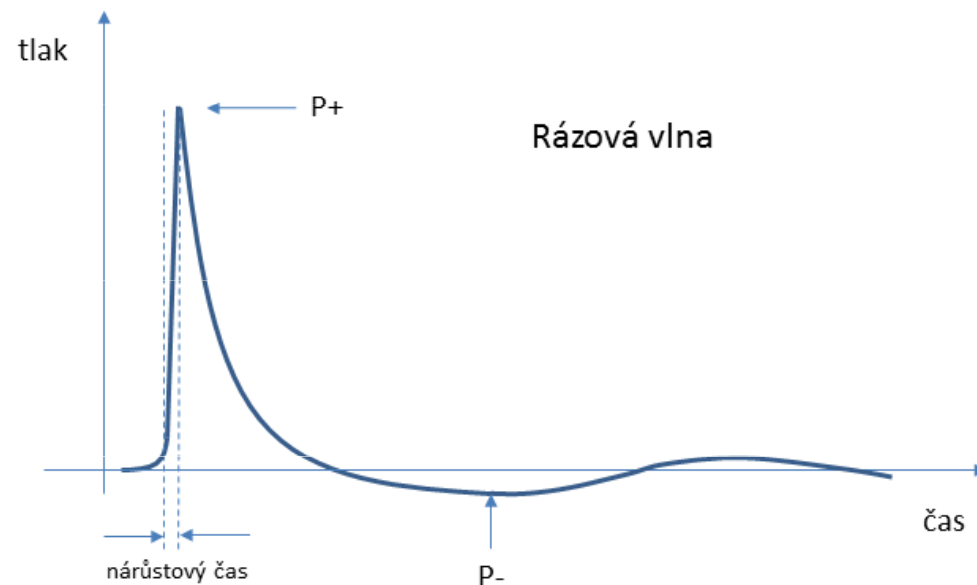


Pokud je těleso podpražcového podloží tvořeno materiálem s nízkou rychlostí šíření vln, může nastat situace, kdy se vlak bude pohybovat stejnou (nebo vyšší) rychlostí, než je šíření vln v podpražcovém podloží. To může být doprovázeno “ztekucením” zeminy a nadměrnými deformacemi kolejové jízdní dráhy (obdoba *sonického třesku* a *rázové vlny* ve vzduchu).

U rázové vlny dochází k velkému ohřevu především stykových ploch tělesa a prostředí. Špička nadzvukového letadla se při podzvukových rychlostech zahřívá na cca 60 °C, ale při nadzvukových rychlostech 240 °C, při trojnásobné rychlosti zvuku až 820 °C. Při rychlostech nad 10 km/s už se každé těleso vypaří (meteor). Teplota roste přibližně se čtvercem rychlosti.

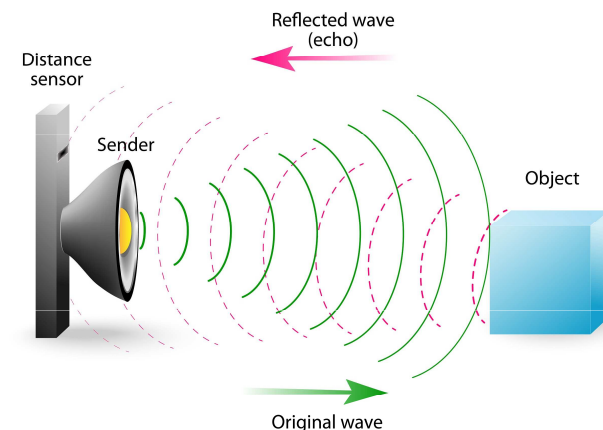
Ke vzniku **rázové vlny** dochází například při výbuších, jiskrových výbojích nebo při letu střely, letadla či rakety nadzvukovou rychlostí ve vzduchu, při termonukleárních reakcích v přehřáté plazmě.

**Výbuch (exploze)** je fyzikální jev, při kterém dochází k náhlému, velmi prudkému uvolnění energie, a prudkému lokálnímu zvýšení teploty a tlaku (obecně entropie). Tato prudká změna tlaku se může šířit do okolí jako **rázová vlna**.



# Odraz zvuku, ozvěna

K **odrazu zvuku** dochází při dopadu zvuku na rozhraní dvou prostředí.



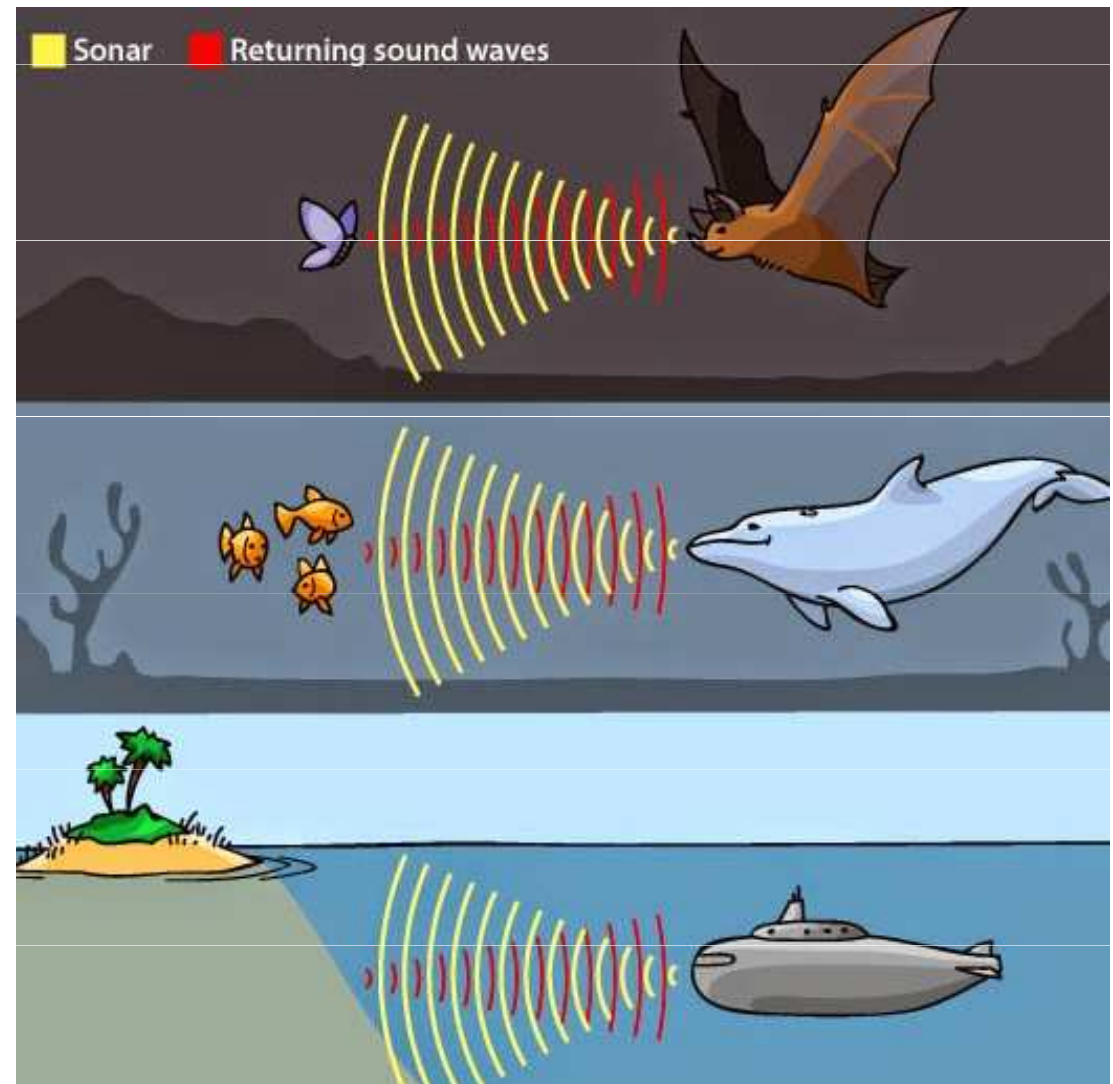
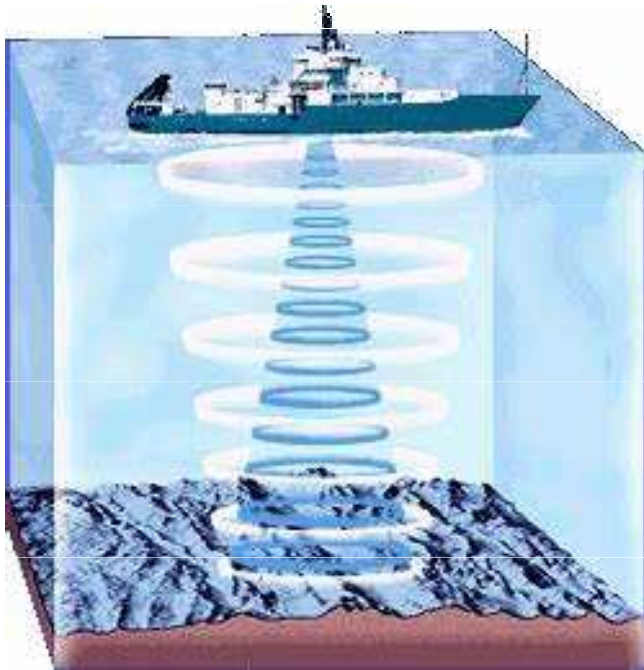
**Ozvěna** (echo) vzniká odrazem zvuku od rozlehlé překážky. Odražený zvuk poté posluchač vnímá zpožděně. Vhodnou překážkou pro vznik ozvěny je například skála, dno studny, jeskyně, dno propasti nebo rozlehlá budova. Člověk dokáže rozlišit zvuk vydaný zdrojem od zvuku, který se odrazil. Aby však došlo ke správnému rozlišení, musí být překážka vzdálena od zdroje nejméně 17 metrů. V tom případě zvuk urazí vzdálenost 34 metrů (tam a zpět), což mu zabere zhruba 0,1 sekundy a naše ucho tuto prodlevu zaznamená. Pokud by byla překážka blíže, zvuky by splývaly – v tomto případě nemluvíme o ozvěně, ale o **dozvuku**.





# Echolokace

Při **echolokaci** zjišťuje sonar polohu a vzdálenost různých těles s pomocí zvuku anebo ultrazvuku na základě rychlosti šíření zvuku. Užívají ji kromě lidí pomocí techniky i živočichové, např. netopýři či kytovci.



# Pohlcování (absorpce) zvuku

Podle zákona odrazu, je intenzita odraženého (reflektovaného) vlnění  $I_r$  vždy menší než intenzita  $I_0$  vlnění dopadajícího na stěnu. Část zvukové energie, která pronikla do překážky je z hlediska místnosti ztracená (**pohlčená**). Platí jednoduchý vztah:

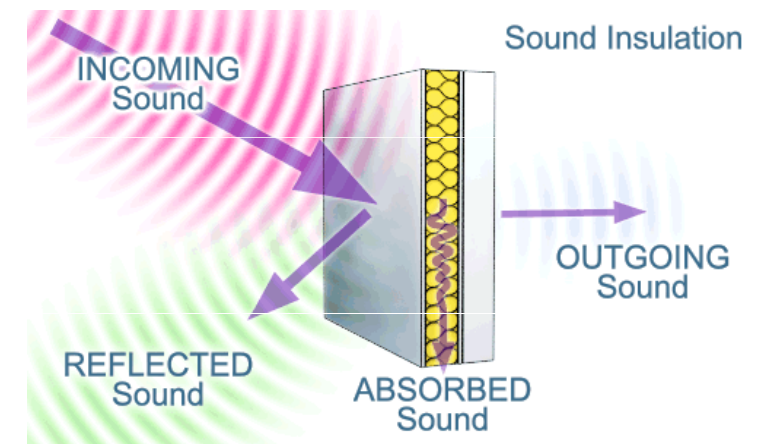
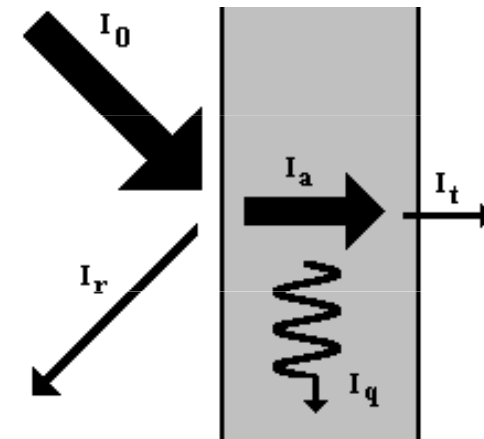
$$I_0 = I_r + I_a$$

kde  $I_a$  je intenzita pohlčeného (absorbovaného) vlnění.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0}$$

## Koeficient pohltivosti

Při dopadu zvukového vlnění na překážku (např. stěna, dveře, ...) část zvukové energie proniká do druhého prostředí a zbytek se od překážky odráží Koeficient pohltivosti závisí především na materiálu a charakteru jeho povrchu, ale mění se i s výškou zvukového vlnění - pro nižší tóny je koeficient absorpce tónu menší a pro vyšší tóny je naopak o něco vyšší. Tento koeficient je větší u látek pórovitých (koberec, závěsy, děrované panely, ...), velmi malý je tento koeficient u materiálů kompaktních a hladkých (kovy, dlaždice, sklo, ...).



Metoda **ultrazvukové defektoskopie** využívá ultrazvuku pro kontrolu homogenity a poruch materiálu je založená na změnách prostupnosti a odrazivosti ultrazvukové vlny vlivem necelistvosti v materiálu.

Ultrazvuk se dá použít třeba při lékařském vyšetření v lékařské **ultrasonografii** nebo **echokardiografii**.

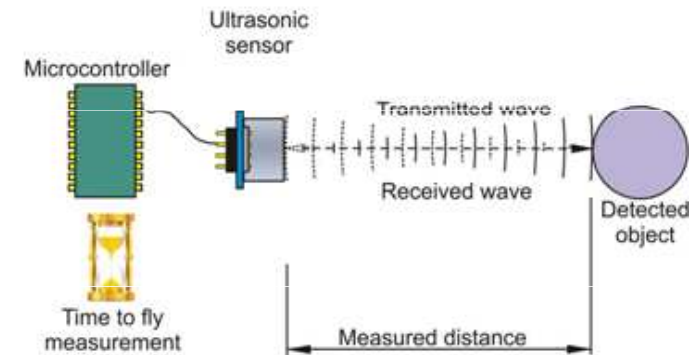
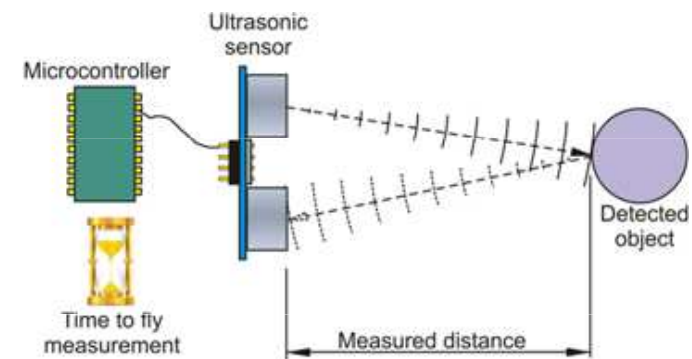
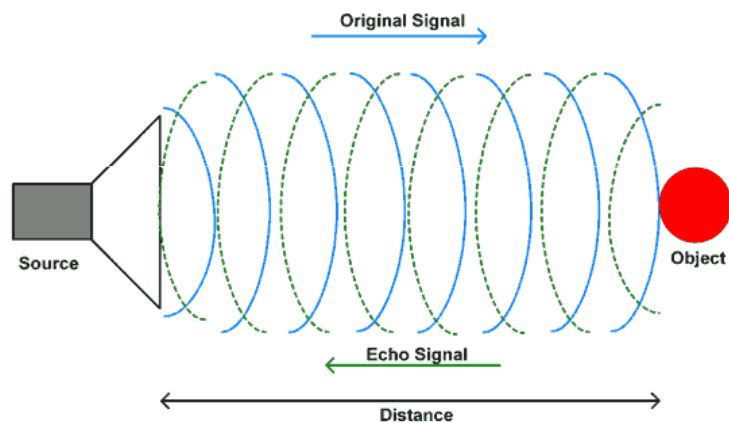
Ultrazvukový **zmlžovač** (resp. zvlhčovač vzduchu) díky rychlým vibracím destičky ponořené ve vodě generuje aerosol (mlhu). Frekvence jednotek MHz vytváří vodní kapky velikosti řádově jednotek  $\mu\text{m}$ .

Dále se ultrazvuk používá k **měření tloušťky materiálu**, **desinfekci vody, mléka a jiných roztoků**, **promíchávání** galvanické lázně či **vytváření suspenzí**.

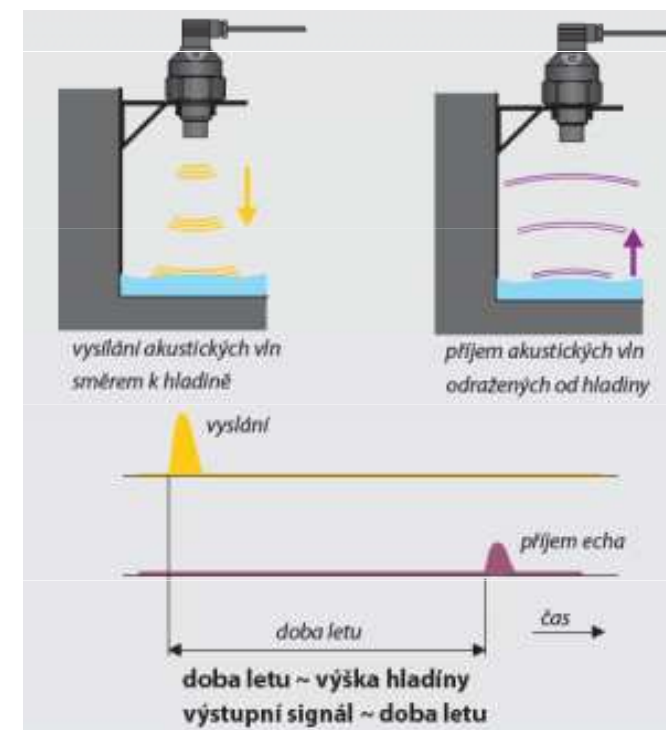
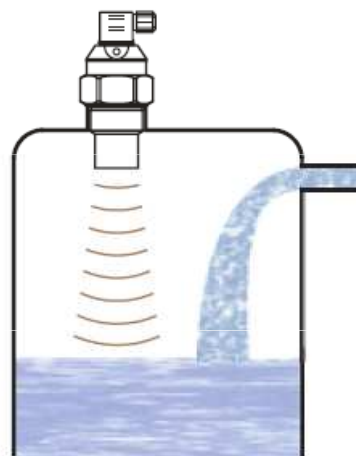
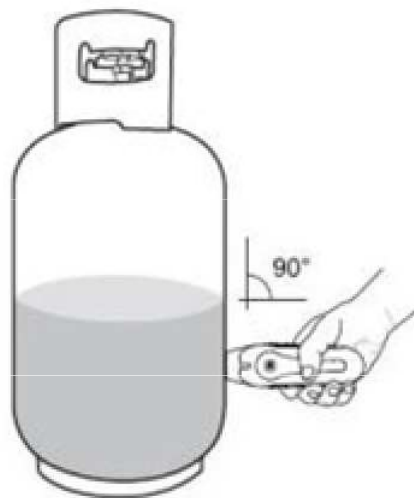


# Ultrazvukové dálkoměry

Ultrazvukové vlny se odráží od měřené plochy a vrací do měřicího přístroje.



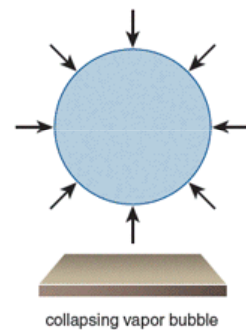
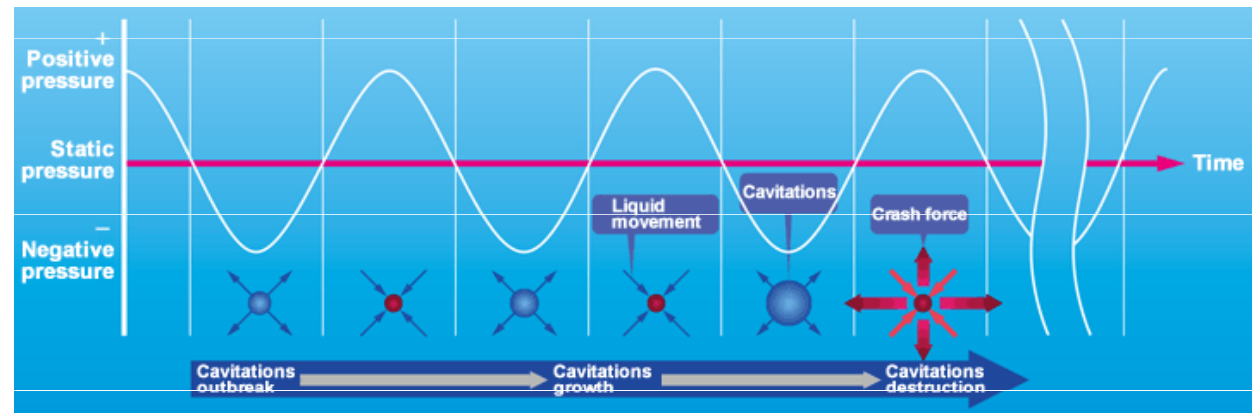
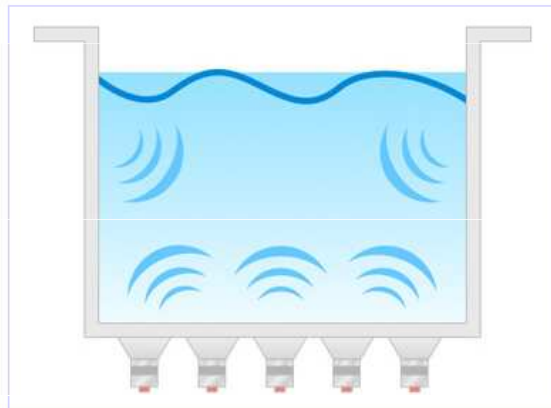
# Ultrazvukové měřiče výšky hladiny



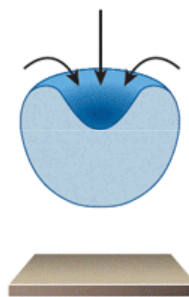


# Ultrazvuková lázeň

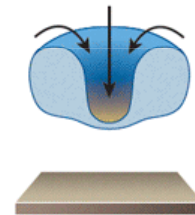
Pokles tlaku může být důsledkem průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (**akustická kavítace**). Také fokusované rázové vlny šířící se v kapalině bývají doprovázeny vznikem kavítací. Jev může být doprovázen světelným efektem (**sonoluminiscence**).



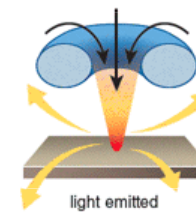
collapsing vapor bubble



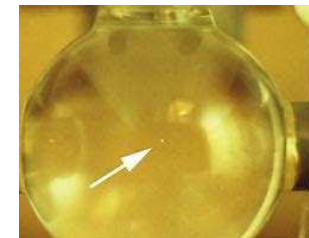
imploding shock wave



heat building



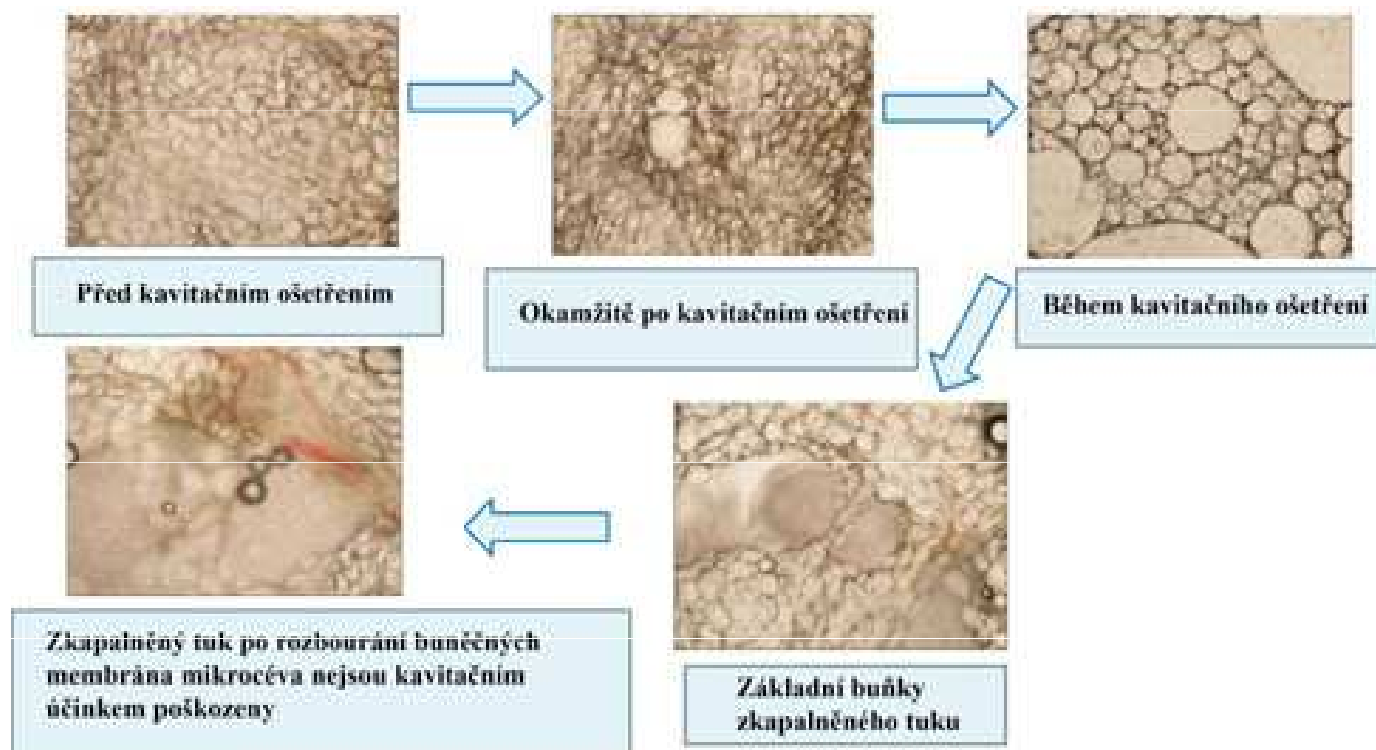
light emitted



Běžně se efektů kavítace využívá k čištění špatně dostupných míst na malých předmětech (např. u šperků). Předmět je umístěn do vodní lázně a zdroj ultrazvuku v lázni vyvolává akustickou kavítaci, která narušuje nečistoty na povrchu.



Kavitace se využívá při **ultrazvukové liposukci** sloužící k odbourávání podkožního tuku.

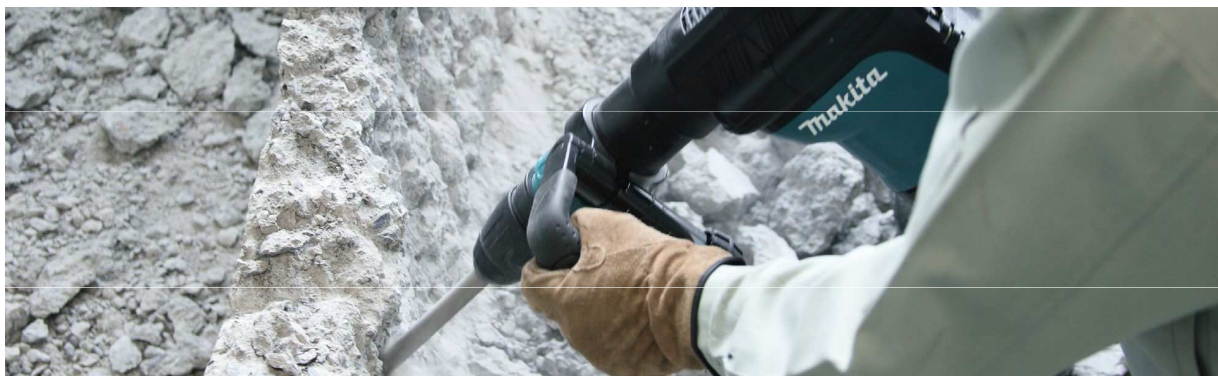


Ultrazvuková kavitace se také využívá například ve stomatologii na **odstraňování zubního kamene** a jako vedlejší efekt i při **rozrušování ledvinových kamenů** pomocí rázových vln – litotripsii.

# Vibrace

**Vibrace** vzniká pohybem pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Např. chodem strojů a přístrojů, motorů dopravních či jiných prostředků, vlivem mořských vln. Z těchto zdrojů se přenášejí vibrace na člověka přímo nebo prostřednictvím dalších materiálů, médií a zařízení (sedadlem traktoru, palubou lodi, plošinou vrtné soupravy, podlahou v blízkosti zdrojů vibrací, apod.).

Odezva organismu na účinek vibrací závisí na intenzitě vibrací a na délce působení vibrací na organismus, kritické jsou frekvence především od 4 do 8 Hz. I krátkodobá expozice může vyvolat nepříznivou odezvu. Systémové účinky mohou být nebezpečné, protože uvnitř organismu působí velké dynamické síly. Expozice vibracím je spojena s nepříjemnými subjektivními pocity. Obecně se jedná o únavu, snížení pozornosti, zhoršené vnímání, snížení pracovní výkonnosti.



# **Elektrina a magnetismus**

**Elektromagnetická interakce** se uskutečňuje mezi elektricky nabitými tělesy nebo částicemi prostřednictvím **elektromagnetického pole** (jeho součástmi jsou pole elektrické a magnetické).

Jsou-li elektricky nabitá tělesa vzhledem ke vztažné soustavě v klidu, interakce se uskutečňuje prostřednictvím **elektrostatického pole**.

**Elektrostatika** je část fyziky, která studuje elektrické jevy, které souvisejí s (časově) ustáleným (neměnným) vzájemným silovým působením elektricky nabitých částic a těles. V širším slova smyslu se do elektrostatiky řadí i jevy elektrizace těles a (i nestatické) projevy tzv. statické elektřiny.

Jevy souvisejícími s proměnným elektrickým polem (jakož i elektromagneticky indukovaným statickým elektrickým polem) se zabývá **elektrodynamika**.

Elektrické pole se dělí na **elektrostatické**, které je vytvářeno nepohyblivým el. nábojem a na **elektrodynamické**, které vytváří pohybující se el. náboj, jak přímo, tak prostřednictvím proměnlivého magnetického pole.

**Elektrický náboj** (Q, Coulomb, C) charakterizuje vlastnost objektů vstupovat do elektromagnetické interakce.

**Kladný náboj:** protony

**Záporný náboj:** elektrony

Elektrický náboj jakéhokoliv tělesa je roven celistvému násobku elementárního náboje. Elementární náboj je nejmenší, dále nedělitelný elektrický náboj (= kvantování elektrického náboje).

**Elementární náboj**  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

V izolované soustavě platí **zákon zachování elektrického náboje**: Algebraický součet elektrických nábojů se v izolované soustavě nemění.

**Volný elektrický náboj** lze přenášet z jednoho tělesa na jiné a může se přemísťovat i v jednom tělese. Nosiči volného náboje jsou elektrony (kovy, polovodiče) nebo ionty (plyny, kapaliny).

**Vázaný elektrický náboj** je držen v tělese jiným nábojem prostřednictvím elektrostatické síly a nemůže být odveden.

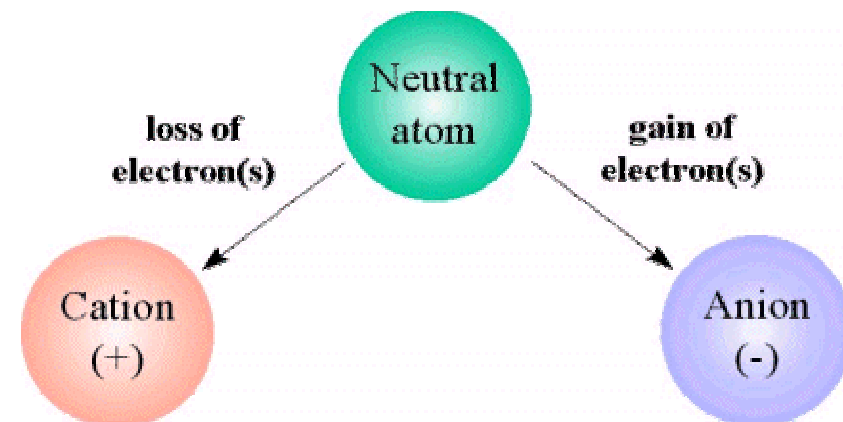
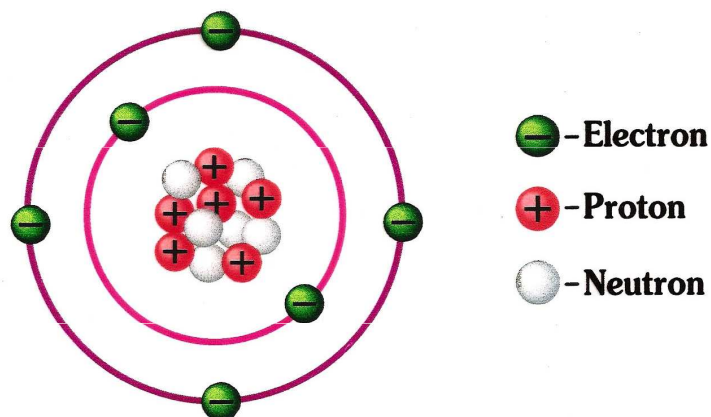
**Elektrický náboj je vždy vázán na částice látky, sám o sobě neexistuje.**



**Bodové náboje** jsou náboje částic nebo těles jejichž rozměry jsou mnohem menší než vzdálenosti mezi nimi, tj. jejichž rozměry lze zanedbat.

**Elektrizace tělesa** je fyzikální proces, při kterém v některém místě tělesa vzniká volný elektrický náboj. Tělesu s volným elektrickým nábojem se pak říká **elektricky nabitě těleso**. U běžných zeлектроvaných těles se kvantování elektrického náboje neprojeví kvůli velkému množství částic, což nás opravňuje přiřazovat celkovému náboji makroskopického tělesa i hodnoty, které nemusí být celočíselným násobky elementárního náboje.

Každý atom obsahuje kladné i záporné částice – v klidovém stavu je jejich součet roven nule. Při ztrátě některé z částic se atom stává **iontem** – má kladný nebo záporný náboj. **Ionty s opačnými náboji se navzájem přitahují, ionty se stejnými náboji se odpuzují.** Opačným dějem k ionizaci je **rekombinace**.



## Způsoby elektrování (elektrizace) těles

**Přestup přímým dotykem** – k přesunutí elektrického náboje z nabitého tělesa dojde, překonají-li elektrony přestupní práci.

**Elektrostatická indukce** – těleso se zelektruje přiblížením jiného tělesa s elektrickým nábojem.

**Elektromagnetická indukce** – těleso se zelektruje vzhledem k indukovanému příčnému elektrickému poli při pohybu v magnetickém poli. Stejně lze vysvětlit i příčnou elektrizaci při tzv. Hallově jevu.

**Tření** – mechanický způsob. Zvýšený tepelný pohyb částic díky tření umožní uvolnění některých elektronů z atomů a jejich přemístění mezi tělesy.

**Pyroelektrický jev** – působením tepla se nabíjí povrch tělesa se spontánní polarizací.

**Termoelektrický jev** – podle druhu termoelektrického jevu může dojít k elektrizaci tak, že působením tepla se zvýší schopnost přestupu elektronů přes materiálové rozhraní (schopnost překonat výstupní práci) nebo působení usměrněného toku tepla ovlivní neuspořádaný pohyb elektronů.

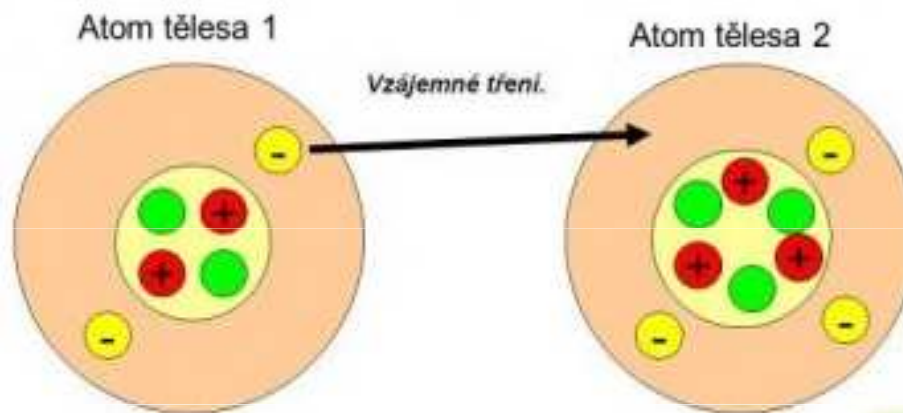
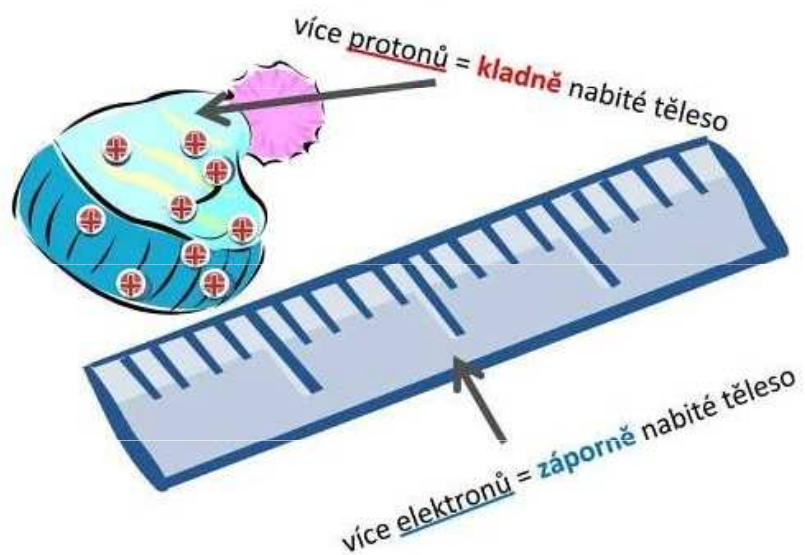
**Ionizace** – působením záření (rentgenové záření, mikrovlnné záření, aj.) vhodné vlnové délky na látku se z některých atomů může uvolnit elektron.

**Fotoelektrický jev** – absorpcí fotonů s dostatečnou energií se může elektron uvolnit z atomu, nastává fotoemise.

**Piezoelektrický jev** – stlačením krystalů některých látek vzniká na jejich povrchu elektrický náboj. Používá se u piezoelektrických zapalovačů.

**Chemický** – vzájemnými reakcemi mezi látkami může docházet k přemísťování elektronů mezi tělesy, nebo k disociaci molekul na kladné a záporné ionty při rozpuštění nějaké látky v kapalině.

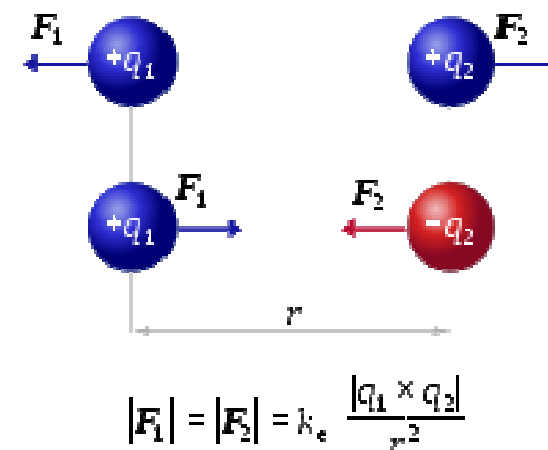
Při tření dochází k přeskokování elektronů.



# Coulombův zákon

**Coulombův zákon** je fyzikální zákon popisující síly, které působí mezi elektricky nabitými částicemi (bodovými náboji).

Dva bodové elektrické náboje v klidu se navzájem přitahují nebo odpuzují stejně velkými elektrickými silami  $F_e$ ,  $-F_e$  opačného směru. Velikost elektrické síly  $F_e$  je přímo úměrná součinu nábojů  $Q_1$ ,  $Q_2$  a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdáleností  $r$ .



$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2}$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}$$

$\vec{r} = r/r$  vyjadřuje **jednotkový vektor**

$\epsilon_0$  je permitivita vakua ( $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{N}^{-1}$ ) a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita prostředí.

Coulombův zákon je základním zákonem elektrostatiky, ze kterého lze odvodit další zákony a věty elektrostatiky.

## Analogie mezi elektrostatickou a gravitační silou

	Electric Field	Gravitational Field
Force (N)	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$	$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$
Field strength	$E = \frac{F}{Q} \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$	$g = \frac{F}{m} \quad g = G \frac{M}{r^2}$
Potential	$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$	$V = -G \frac{M}{r}$
Potential difference	$\Delta V = \frac{\Delta W}{Q}$	$\Delta V = \frac{\Delta W}{M}$
Potential energy or Work done (J)	$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}$	$W = -G \frac{Mm}{r}$



# Elektrické pole

**Statické elektrické pole** je projevem vzájemného silového působení elektricky nabitých těles (částic), která jsou vzhledem ke zvolené vztažné soustavě v klidu. Jeho zdrojem jsou tělesa s nevykompenzovaným elektrickým nábojem (elektricky nabitá tělesa) nebo časově proměnné magnetické pole, která se v dané části prostoru projevují působením elektrické síly na nabité částice. Lze ho popsat pomocí vektorového pole **intenzity elektrického pole** nebo pomocí skalárního elektrického **potenciálu**.

Elektrické pole je dílčím projevem elektromagnetického pole. Nezávislé na magnetickém poli je pouze ve stacionárním případě.

## Intenzita elektrického pole

**Intenzita elektrického pole  $E$**  je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující velikost a směr elektrického pole. Je definována jako elektrická síla  $F$  působící v daném místě na těleso s kladným jednotkovým elektrickým nábojem  $q$ .

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad [E] = \text{N.C}^{-1}$$

Hodnota vektoru intenzity elektrického pole obecně závisí na poloze v prostoru (je funkcí polohového vektoru), proto je tato veličina vektorové pole.

Tvar elektrického pole (případně i jeho směr) bývá graficky prezentován pomocí (orientovaných) **siločar** nebo (je-li pole potenciálové) **ekvipotenciálních ploch**.

**Siločáry elektrického pole** v každém bodě vyznačují směr vektoru intenzity elektrického pole v daném místě, přičemž hustota siločar je přímo úměrná velikosti této intenzity. Siločáry vycházejí z kladných elektrických nábojů a směřují k záporným elektrickým nábojům, přičemž mohou začínat nebo končit také v nekonečnu. Siločáry se vzájemně neprotínají. Hustotu siločar lze využít k určení velikosti intenzity pole v určité části prostoru.

Tvar elektrického pole závisí na rozmístění náboje na tělesech, která jsou jeho zdrojem, na okolních proměnných magnetických polích a na lokálních elektrických vlastnostech prostředí. Existují dva základní jednoduché tvary

- *radiální pole* – všechny siločáry jsou přímkami procházejícími jedním bodem – generované bodovým nábojem nebo homogenně nabitou koulí.
- *homogenní pole* – všechny siločáry jsou vzájemně rovnoběžnými přímkami – takovéto pole je generované například nekonečnou homogenně nabitou rovinou

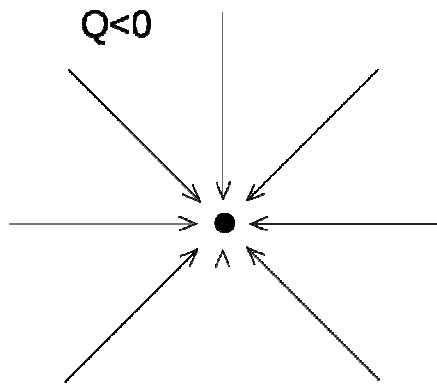
# Radiální elektrické pole

**Radiální elektrické pole** se vytváří v okolí bodového náboje, intenzita má směr paprsků z náboje vystupujících (pro kladný náboj) nebo do něho vstupujících (pro záporný náboj).

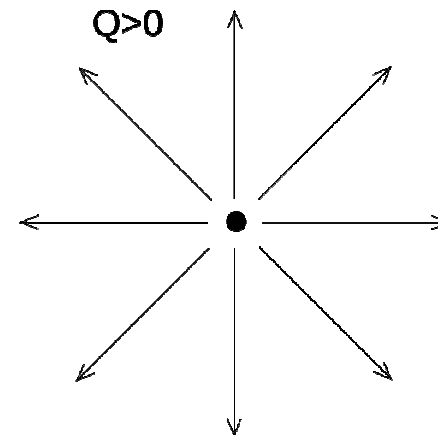
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

$\mathbf{r}/r$  vyjadřuje **jednotkový vektor**

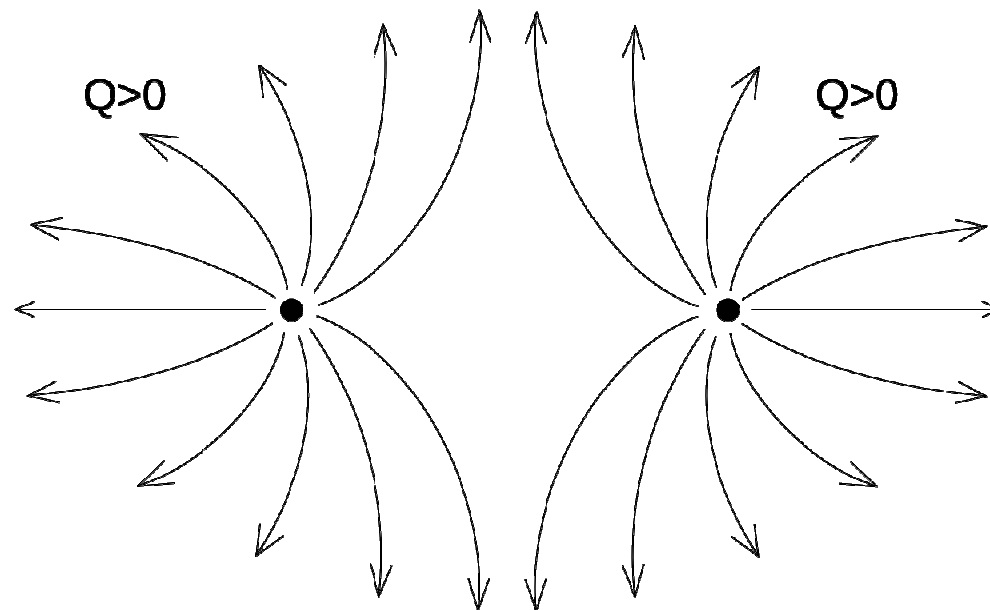


Siločáry záporného elektrického náboje.

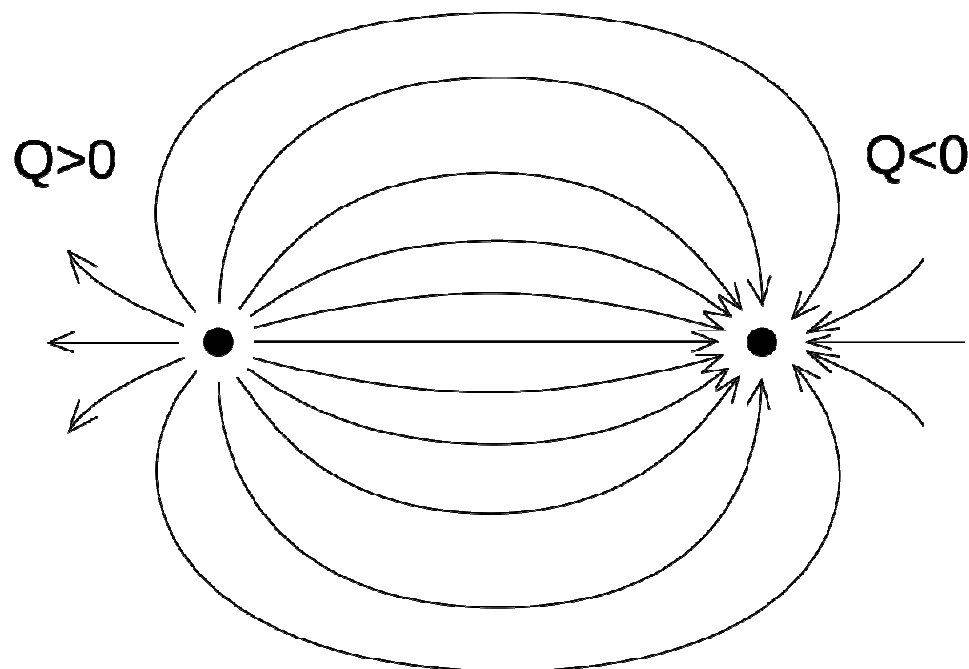


Siločáry kladného elektrického náboje.

Siločáry dvou stejných (kladných) elektrických nábojů.



Siločáry dvou různých elektrických nábojů.



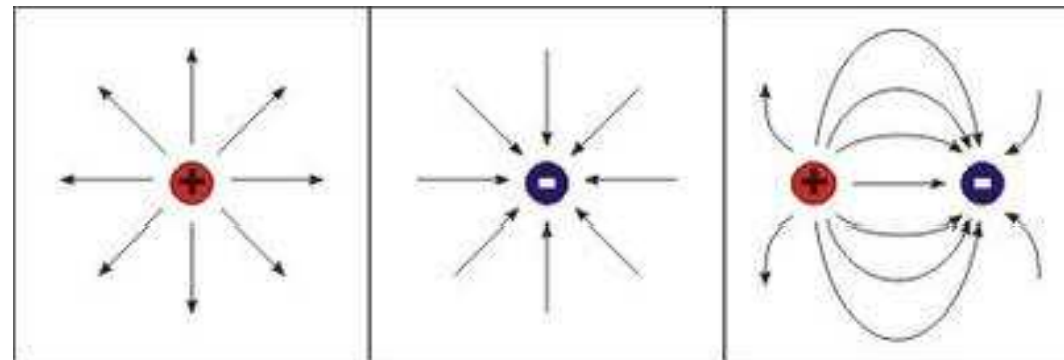
# Homogenní elektrické pole

V homogenním elektrickém poli (mezi 2 deskami) má vektor intenzity elektrického pole stejný směr i velikost.

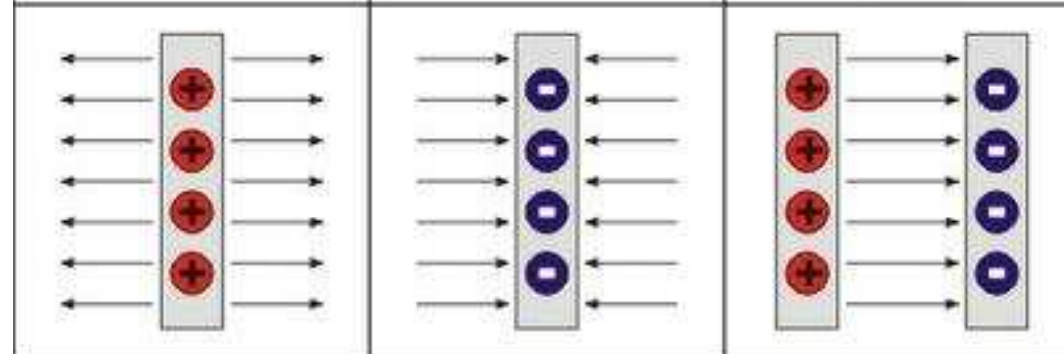


Siločáry homogenního elektrického pole.

*radiální elektrické pole*



*homogenní elektrické pole*





# Gaussův zákon elektrostatiky

**Gaussův zákon elektrostatiky** vyjadřuje vztah mezi tokem intenzity elektrického pole a elektrickým nábojem.

**Tok intenzity intenzity elektrického pole**  $\Phi_E$  libovolnou uzavřenou plochou (Gaussovou plochou) je přímo úměrný elektrickému náboji  $Q$  nacházejícímu se uvnitř této plochy. Konstantou úměrnosti je převrácená hodnota permitivity vakua

$$\epsilon_0. \quad \Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \Phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Celkový počet siločar procházejících uzavřenou plochou libovolného tvaru, která v elektrostatickém poli uzavírá elektrický náboj  $Q$ , je roven podílu velikosti náboje  $Q$  uvnitř této plochy a permitivity vakua  $\epsilon_0$ , přičemž nezáleží na rozložení elektrického náboje.

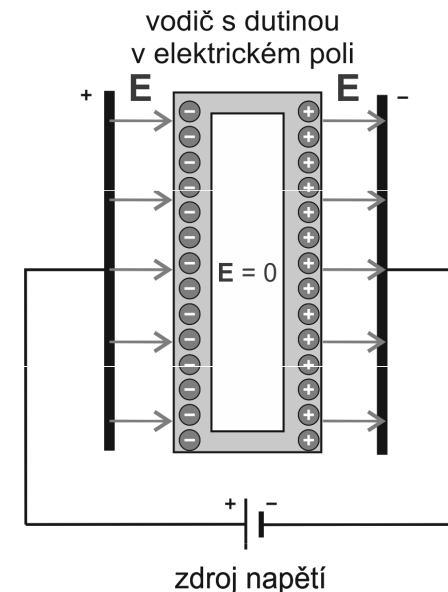
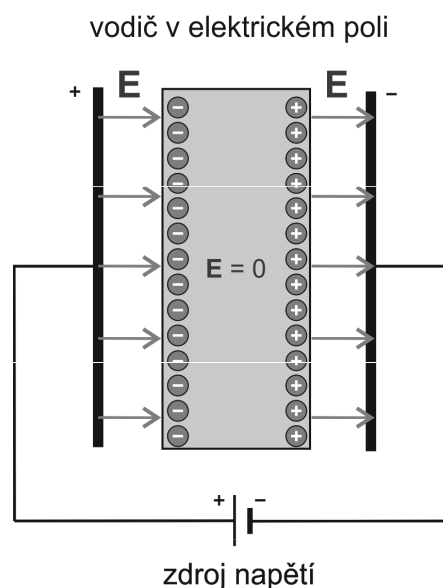
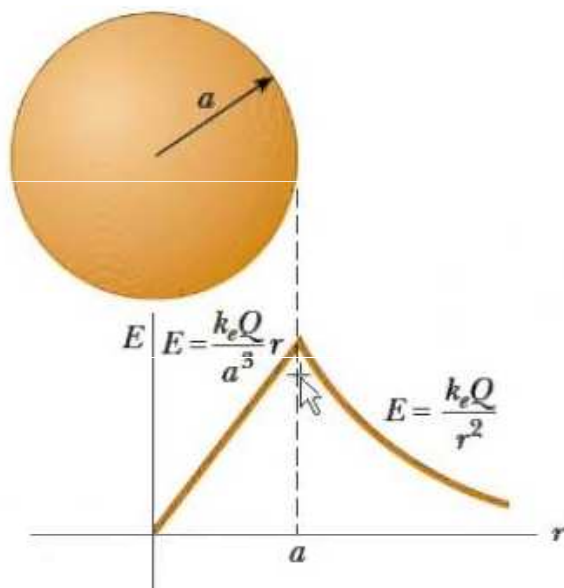
$$N = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad N = \Phi \quad \text{kde } N \text{ označuje počet siločar.}$$

Jestliže má plocha kulový tvar poloměru  $r$  a v jejím středu se nachází bodový elektrický náboj  $Q$ , pak intenzita elektrického pole v libovolném bodě na ploše má velikost

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

Jestliže uvnitř plochy není uzavřeno žádné těleso s elektrickým nábojem, pak je celkový tok elektrické intenzity touto plochou nulový.

Uvnitř nabitého vodivého tělesa je nulová elektrická intenzita. Protože elektrický náboj se u vodiče v ustáleném stavu rozmístí vždy na povrchu tělesa, pak podle Gaussova zákona musí být tok intenzity libovolnou plochou uvnitř tělesa nulový, a tím musí být v libovolném bodě uvnitř tělesa také nulová elektrická intenzita.



S ohledem na rozmístění el. náboje na povrchu vodiče se zavádí veličina **plošná hustota elektrického náboje  $\sigma$**

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

$$[\sigma] = \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$$

## Pro povrch koule

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

$$E = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q}{S}$$

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

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi R^2} \quad (R \dots \text{poloměr koule})$$

$$E = \frac{F_e}{Q} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R^2}$$

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$$

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

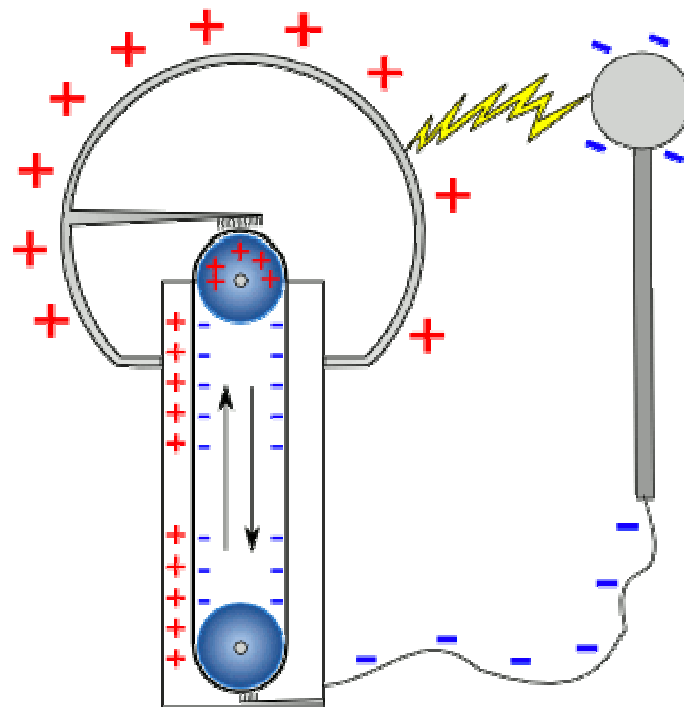
Tento vztah platí i pro intenzitu el. pole u povrchu nabitého vodiče jiného než kulového tvaru ve vakuu. Je-li vodič v prostředí o permitivitě  $\epsilon$ , platí

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

Ze vztahu vyplývá, že el. pole je nejsilnější tam, kde je největší hustota náboje, tedy u hrotů a hran.

**Statická elektřina** je označení pro jevy, způsobené nashromážděním elektrického náboje na povrchu různých těles a předmětů a jejich výměnou při vzájemném kontaktu. **Statický náboj** vzniká, když dva materiály přicházejí spolu do styku a opětovně se oddělují, nebo jejich třením (triboelektrické nabíjení). To způsobuje rozdělení nebo převod negativních elektronů z jednoho atomu na druhý. Velikost náboje je závislá na řadě faktorů, jako jsou elektrické a fyzikální vlastnosti materiálů, teplota, vlhkost, tlak a rychlost oddělování materiálů. Čím větší je tlak nebo rychlost oddělení, tím větší je náboj.

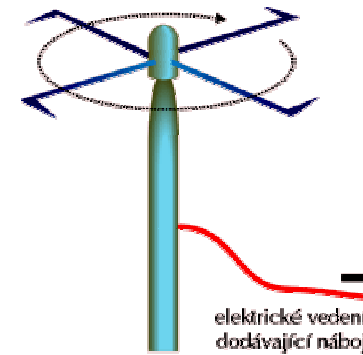
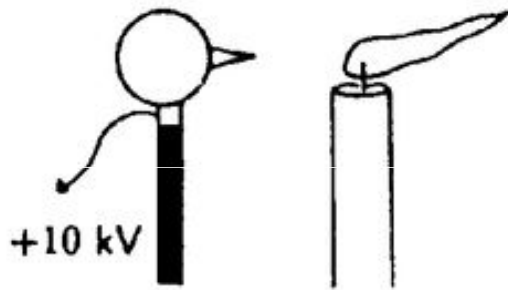
van de Graaffův  
generátor



Vodiče jsou zbavovány statického náboje **uzemněním**. Neutralizace statického náboje na izolantech je realizována ionizátory (ionizéry).

# Elektrický vítr, sršení náboje

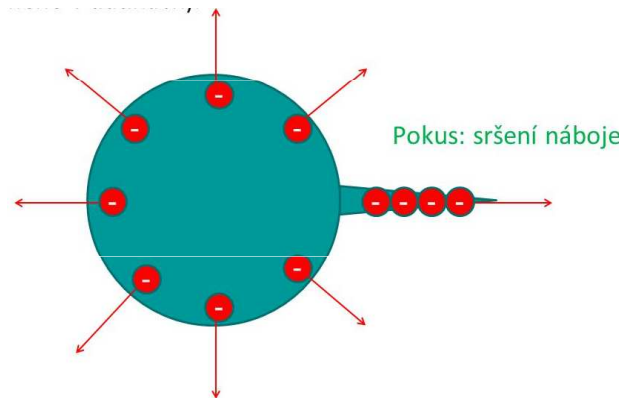
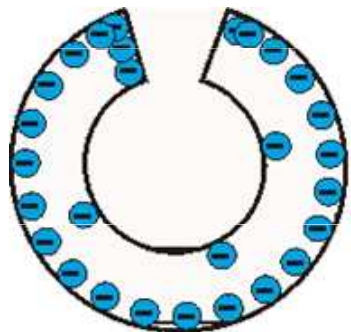
Má-li těleso dostatečně ostrý hrot, je i při malých hodnotách potenciálu elektrické pole v blízkosti hrotu tak silné, že ionizuje molekuly vzduchu. Ionty, které mají náboj stejné polaroty jako je náboj hrotu, jsou od hrotu odpuzovány. Přitom s sebou strhují i okolní molekuly vzduchu a vzniká "**elektrický vítr**".



Elektrický větrník



Opačně nabité ionty se k hrotu přibližují a neutralizují ho. Tento jev (zde nazývaný **sršení náboje**) také způsobuje ztráty ve vedení vysokého napětí



**Eliášův oheň** (oheň sv. Eliáše) je meteorologický jev, který se projevuje na vyvýšených místech, hrotech stožárů, vrcholcích stromů apod. jako namodralý nebo nafialovělý výboj. Někdy je doprovázen tichým sršivým nebo praskavým zvukem. Je způsoben vybíjením silného statického náboje, který je vytvářen mezi atmosférou a zemským povrchem (často v blízkosti bouře), a který se shromažďuje na hrotech a vyvýšených místech. Eliášův oheň lze pozorovat, např. pokud letadlo prolétá sopečným prachem, kde se velmi jemná zrnka popela třou ve vysoké rychlosti o povrch letadla a vyrábí tak náboj statické elektřiny.



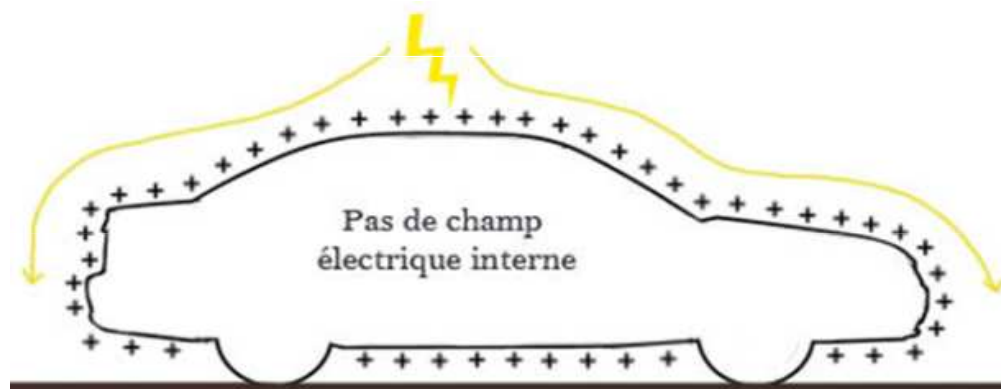
**Koróna** je samovolný doutnavý výboj, vznikající na hrotech a silně zakřivených elektrodách (vodičích). Počáteční napětí závisí na hladkosti povrchu a poloměru zakřivení vodiče a na atmosférických podmínkách (tlak a vlhkost vzduchu aj.). Projevuje se praskáním, syčením a viditelným výbojem - modrofialově slabě svítící vrstvou. Využívá se v ozonačních přístrojích, elektrofiltrech, v laserových tiskárnách a kopírkách a pod. Způsobuje ztráty energie na vysokonapěťových vedeních a rušení vysokofrekvenčního přenosu. Ztráty korónou jsou úměrné čtverci rozdílu provozního napětí a počátečního napětí koróny.



# Faradayova klec

Faradayova klec je založena na tom, že elektrický náboj je soustředěn pouze na povrchu vodiče, nikoli v jeho objemu. Tudíž uvnitř (dokonalého) vodiče nepůsobí žádné elektrické pole.

Faradayovy klece se využívá zejména tam, kde je třeba chránit zařízení či osoby před škodlivým elektromagnetickým polem, rádiovými vlnami apod. Faradayovou klecí bývá také kovová skříň elektroakustických přístrojů nebo stínění kabelů.



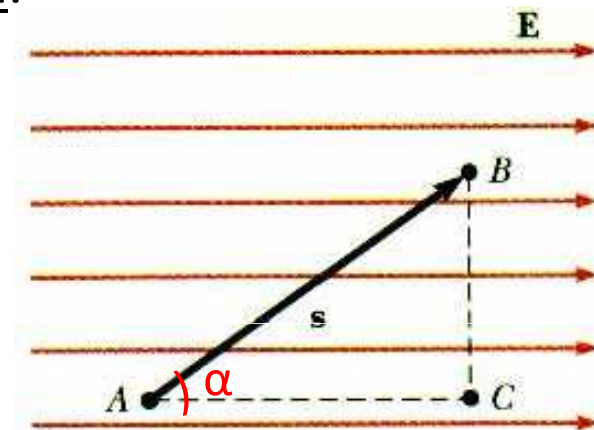
Pokud by uhodil do auta blesk, výboj sjede po vnější straně a cestujícím se nic nestane, pokud se něčím vodivým nedotýkají auta nebo nesahají rukou na nějakou jeho kovovou část. Podobně, pokud dopravní letadlo zasáhne blesk, výboj sjede po vnějším kovovém plášti letadla, cestující si ničeho nevšimnou.

# Práce v elektrickém poli, elektrický potenciál

Práce  $W$  vykonaná elektrickou silou při přemístění náboje z bodu A do bodu B závisí pouze na poloze obou bodů, nikoliv na trajektorii.

$$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha = E \cdot Q \cdot s \cdot \cos\alpha$$

Při pohybu náboje ve směru působení síly ( $W > 0$ ) se  $E_p$  zmenšuje, při pohybu náboje proti směru působení síly ( $W < 0$ ) se  $E_p$  zvětšuje.

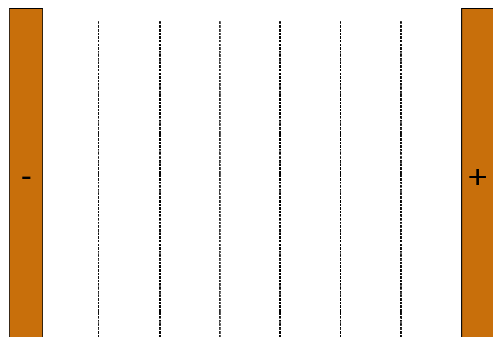


**Elektrický potenciál**  $\varphi$  je skalární fyzikální veličina, která popisuje potenciální energii jednotkového elektrického náboje v neměnném elektrickém poli (potenciál elektrického pole). Je roven práci  $W$  potřebné pro přenesení jednotkového elektrického náboje  $q$  ze vztažného bodu s nulovým potenciálem  $\varphi_0$ , do daného místa. Za místo s nulovým potenciálem (tzn. vztažný bod) se obvykle bere povrch Země nebo uzemněný vodič.

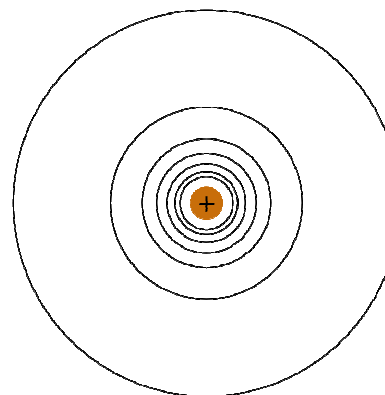
$$\varphi = \frac{W}{Q} \quad \varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r} + \varphi_0 \quad [\varphi] = \text{V (volt)}$$

# Elektrický potenciál

Množina všech bodů potenciálového pole, které se vyznačují stejným potenciálem, tvoří tzv. **ekvipotenciální plochu** (potenciálovou hladinu). Siločára je křivka, jejíž tečna v daném bodě představuje normálu ekvipotenciální plochy v tomto bodě.



Ekvipotenciální plochy homogenního elektrického pole.



Ekvipotenciální plochy kladného elektrického náboje.

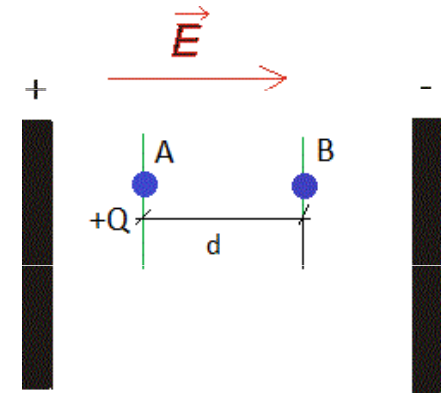
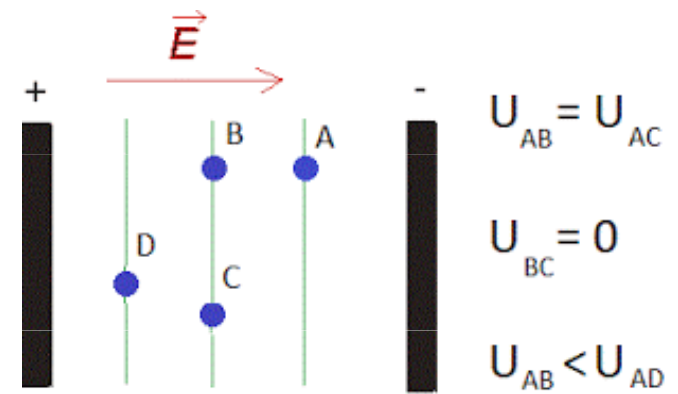
# Elektrické napětí

Elektrické napětí  $U$  je definováno jako rozdíl elektrických potenciálů mezi dvěma body elektrického pole

$$U = |\varphi_2 - \varphi_1|$$

resp. jako práce  $W$ , potřebná k přenesení jednotkového náboje  $Q$  mezi těmito body.

$$U = W/Q$$



## Elektrické napětí mezi 2 vodivými izolovanými deskami:

Z hodnoty elektrického napětí lze určit velikost intenzity elektrického pole

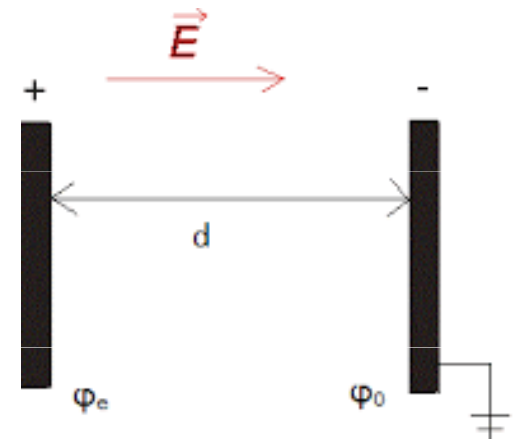
$$U = |\varphi_2 - \varphi_1|$$

$$\varphi_e = E_p / Q$$

$$E_p = W = E \cdot Q \cdot d$$

$$\varphi_0 = 0$$

$$U = W/Q = E \cdot Q \cdot d / Q = E \cdot d$$



## Příklad

Dva náboje  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{C}$  a  $0,2 \cdot 10^{-6} \text{C}$  jsou od sebe vzdáleny 20 cm. Jaká je intenzita elektrického pole ve středu mezi nimi?

$$Q_1 = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{C}, Q_2 = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{C}, r_1 = r_2 = r = 0,1 \text{m}, k = 9 \cdot 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \text{C}^{-2}$$

$$E_1 = \frac{k \cdot Q_1}{r^2}$$

$$E_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \text{C}^{-2} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \text{C}}{(0,1 \text{m})^2} = 90 \cdot 10^3 \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\underline{E_1 = 9 \cdot 10^4 \text{V} \cdot \text{m}^{-1}}$$

$$E_2 = \frac{k \cdot Q_2}{r^2}$$

$$E_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \text{C}^{-2} \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \text{C}}{(0,1 \text{m})^2} = 180 \cdot 10^3 \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\underline{E_2 = 18 \cdot 10^4 \text{V} \cdot \text{m}^{-1}}$$

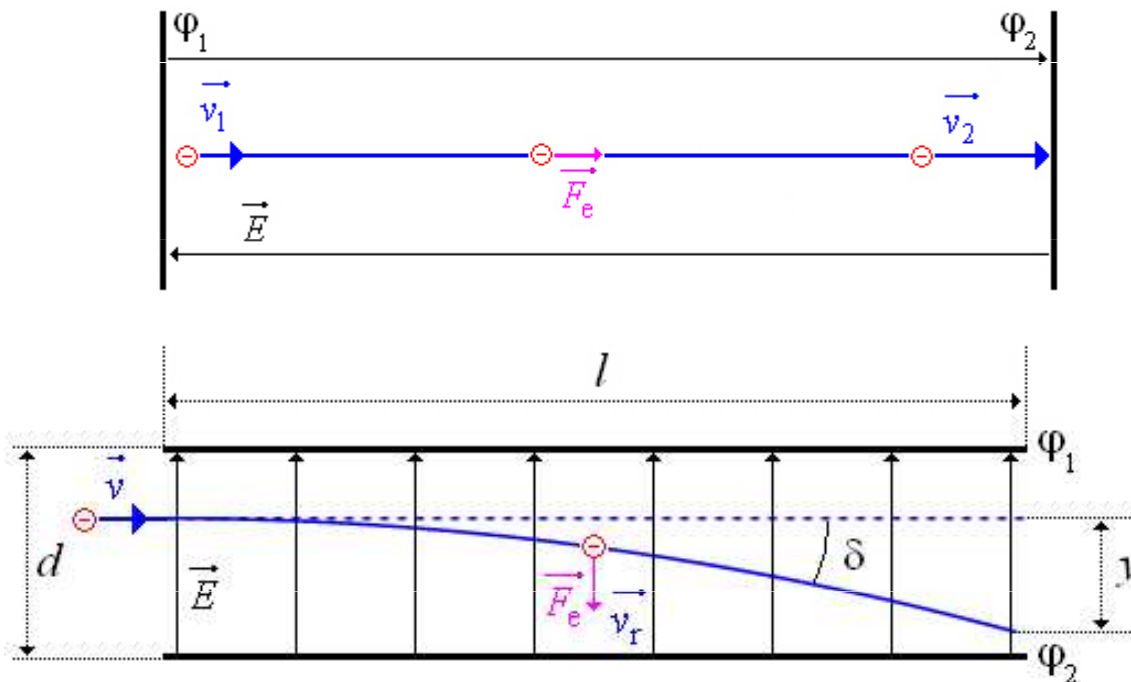
$$E = E_2 - E_1 = 18 \cdot 10^4 \text{V} \cdot \text{m}^{-1} - 9 \cdot 10^4 \text{V} \cdot \text{m}^{-1} = 9 \cdot 10^4 \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\underline{E = 9 \cdot 10^4 \text{V} \cdot \text{m}^{-1}}$$

# Pohyb nabité částice v elektrickém poli

Na volnou částici s nábojem  $Q$  působí v elektrickém poli o intenzitě  $E$  síla  $F_e = E \cdot Q$ . Tato síla uděluje částici zrychlení  $a$  (dle 2. Newtonova zákona). Částice je tedy v elektrickém poli urychlována – roste její hybnost i kinetická energie. Toho se využívá v **urychlovačích částic**.

Pokud částice vlétne do homogenního elektrického pole ve směru kolmém na siločáry pole rychlostí  $v_0$ , pohybuje se po parabolické trajektorii (analogie s vrhem vodorovným v homogenním tíhovém poli).



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{y}{l} = \frac{0,5 a t^2}{v t} = \frac{0,5 v_r t}{v t} = \frac{e l (\varphi_2 - \varphi_1)}{2 m d v^2}$$



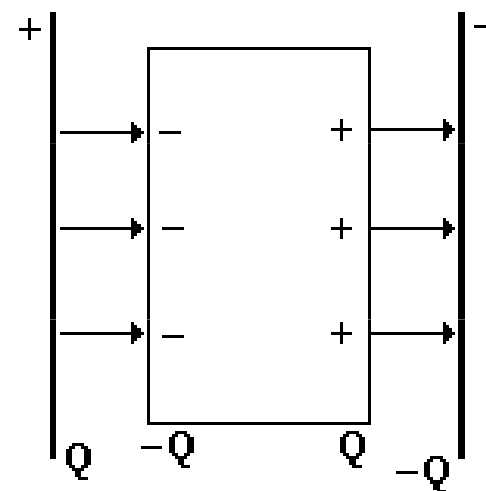
## Vodiče v elektrickém poli

Elektrický **vodič** je látka schopná vedení elektrického proudu. Elektrický vodič musí obsahovat volné částice s elektrickým nábojem, nejčastěji elektrony, příp. kladné nebo záporné ionty.

**Vodiče 1. řádu** (kovy a uhlík ve formě grafitu): el. proud přenáší volné elektrony. Vodiče se při průchodu el. proudu chemicky nemění.

**Vodiče 2. řádu** (roztoky a taveniny iontových solí = elektrolyty): el. proud přenášejí ionty. Jsou proti elektronům větší, jejich pohyblivost je menší, takže i vodivost je nižší. Jejich pohybem dochází k přenosu hmoty a chemickým změnám.

Umístíme-li vodič do elektrostatického pole, vznikne dočasně elektrostatické pole i v něm a způsobí pohyb volných elektronů, které se hromadí na jeho povrchu v místech, kde siločáry vstupují do vodiče. Tato strana vodiče se nabije záporně, na opačné straně, kde siločáry z vodiče vystupují, vzniká stejně velký kladný náboj. Děj pokračuje tak dlouho, až pole indukovaných nábojů zruší vnější pole a intenzita pole všude uvnitř vodiče je nulová.

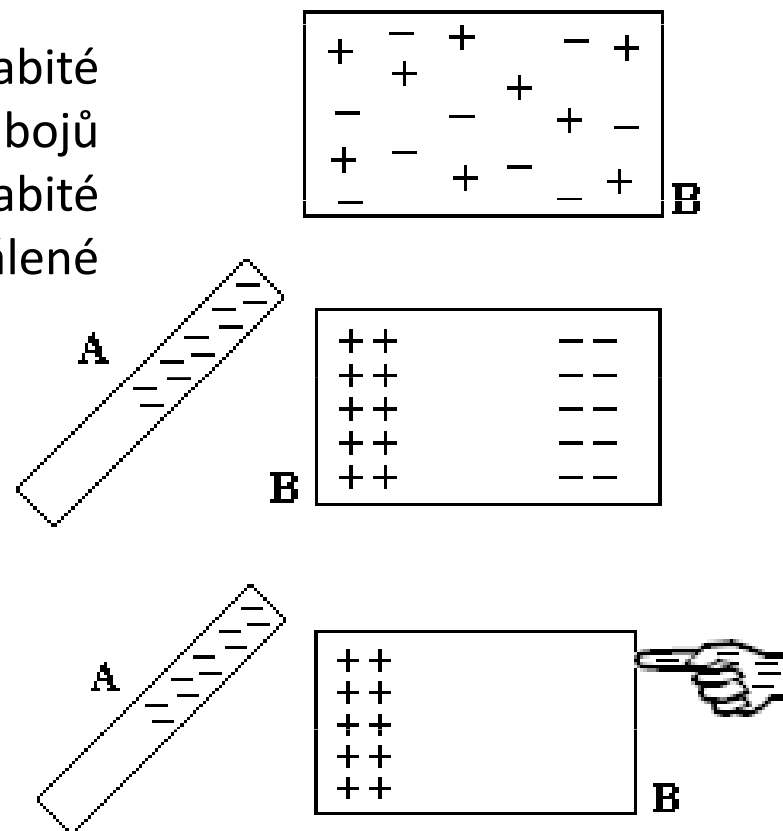


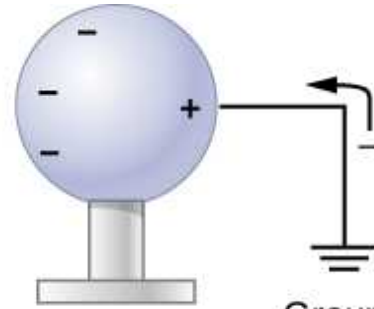
Náboje tímto způsobem indukované ve vodiči je možné od sebe oddělit rozdělením vodiče na dvě části. Tento jev se nazývá **elektrostatická indukce**.

**Elektrostatická indukce** je elektrický jev, při kterém se na povrchu tělesa indukuje (vytváří) elektrický náboj přiblížením jiného elektricky nabitého tělesa, proto se označuje jako indukovaný náboj. **Indukovaný náboj** má opačnou polaritu než náboj, který tuto indukci vyvolal. U vodičů lze indukovaný náboj z tělesa odvést, u izolantů zůstává indukovaný náboj v tělese.

Přiblížíme-li k elektricky neutrálnímu vodiči *B* jiné nabitě těleso *A* (např. záporně nabitou tyč), změní se rozložení nábojů v tělese *B*. Volné elektrony v tělese *B* budou od záporně nabitě tyče *A* odpuzovány, a proto se soustředí v části tělesa vzdálené od záporně nabitě tyče *A*.

Pokud se nyní dotkneme vodiče *B* v místě, kde je nadbytek elektronů, odvedeme elektrony z vodiče *B* do země. Po oddálení tyče *A* zjistíme, že těleso *B* zůstalo kladně nabitě. Nedostatek záporného náboje v dané části tělesa *B* byl vykompenzován elektrony, které na těleso při dotyku přešly z ruky (ze země).





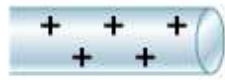
1. Separation of charge

2. Sphere is connected to ground.

Ground

(a)

(b)



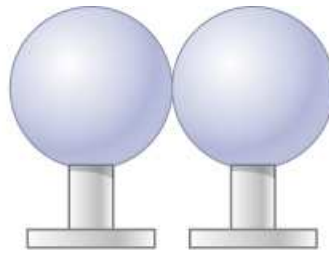
3. Sphere is disconnected from ground.

4. Sphere has an induced charge.

(c)

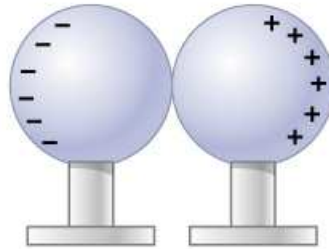
(d)





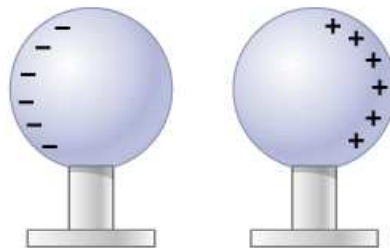
(a)

A charged rod...



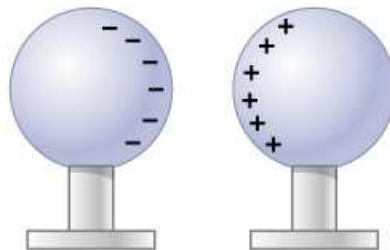
... causes separation of charge

(b)



The spheres are separated.

(c)

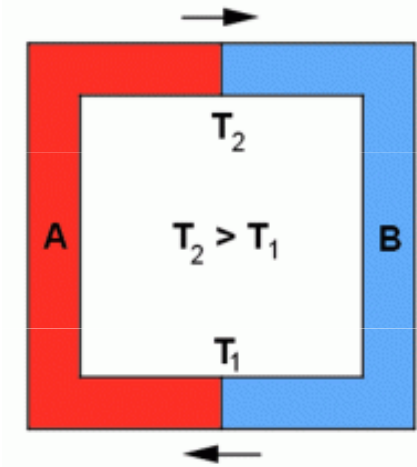


Each sphere is now charged:  
one positive, one negative

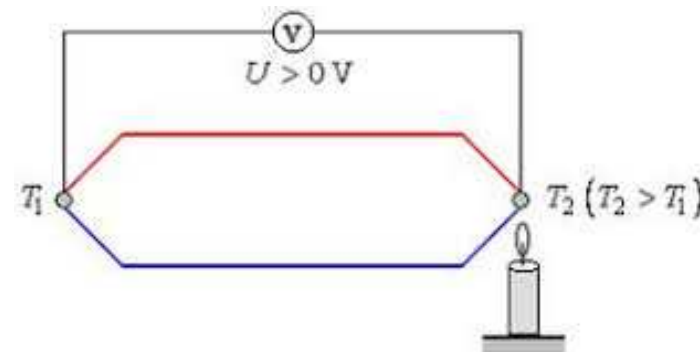
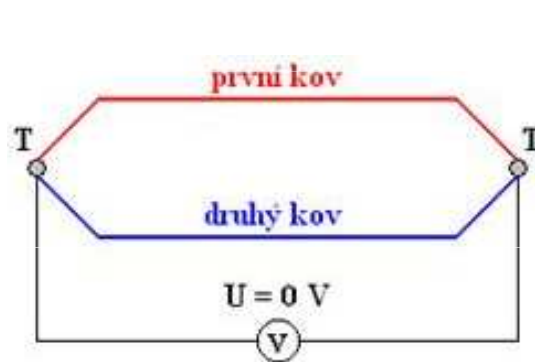
(d)

# Thermoelektrické jevy

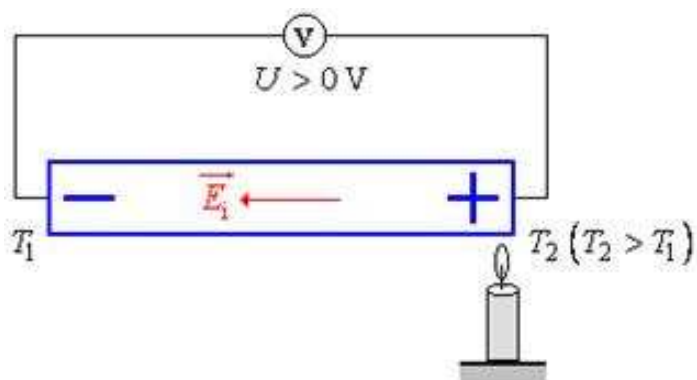
**Seebeckův jev** je vznik napětí, který nastává při teplotních rozdílech mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. To způsobuje nepřetržité proudění elektronů, pokud vodiče vytvoří uzavřený obvod. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.



Každý prvek v řadě + Sb, Fe, Zn, Ag, Au, Sn, Pb, Hg, Cu, Pt, Bi –  
při dotyku s libovolným následujícím prvkem se nabíjí kladně. Kontaktní rozdíl potenciálů je tím větší, čím je větší vzdálenost v této řadě mezi dotýkajícími se materiály. Při sestavení uzavřeného obvodu ze dvou materiálů s konstantní teplotou je kontaktní napětí rovno nule. Obvodem tedy neprochází elektrický proud. Při zahřátí na spoji obou materiálů jde proud směrem od materiálu ze zadní části řady k materiálu z přední části řady. Vzniklé napětí je tím větší, čím jsou materiály v řadě dál od sebe. Tato řada platí jen přibližně a v omezeném rozsahu teplot.

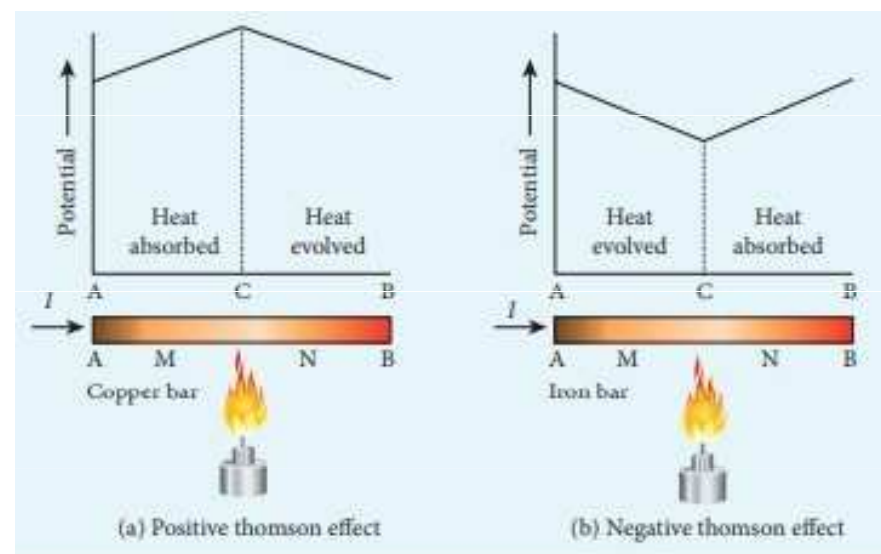


**Thomsonův jev** je vratný, nevýrazný a těžko měřitelný jev, spočívá v tom, že zahříváním vodiče se na jednom konci zvýší kinetická energie elektronů, které se budou snažit přemístit k chladnějšimu konci. Tím bude jeden konec nabit kladně a druhý záporně a bude ve vodiči vznikat velmi slabé elektrické pole. Tento jev je tedy podobný Seebeckovu jevu, rozdíl je v tom, že Thomsonův jev vzniká při ohřátí pouze jednoho vodiče (u Seebeckova jevu jsou nutné vodiče dva). I proto je měřené termoelektrické napětí u Thomsonova jevu velmi malé.



*Positivní Thomsonův jev* - Cu, Ag, Zn, Cd.

*Negativní Thomsonův jev* - Fe, Pt, Ni, Co, Hg.



**Figure 2.37** (a) Positive Thomson effect  
(b) Negative Thomson effect

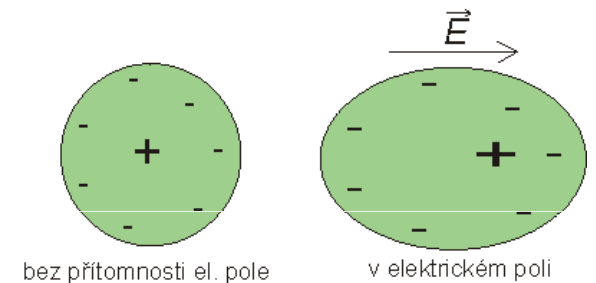
**Termodielektrický jev** označuje vznik elektrického napětí a separaci náboje během fázového přechodu (tání nebo tuhnutí) některých dielektrik. Jev byl prokázán u karnaubského vosku, naftalenu a parafinu a také při tuhnutí vody.

# Izolanty (dielektrika) v elektrickém poli

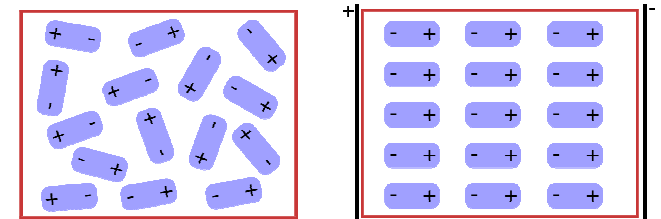
**Elektrický izolant** (nevodič) je látka, která nevede elektrický proud. Neobsahuje volné částice s elektrickým nábojem, nebo je obsahuje v zanedbatelném množství. Zamezuje průtoku elektrického proudu mezi vodiči, které mají rozdílný elektrický potenciál. Dobrymi izolanty jsou porcelán, sklo, většina plastů, suché dřevo, suchý papír, za normálních podmínek i vzduch nebo jiné plyny.

**Dielektrikum** je materiál, který má schopnost polarizace. Každý izolant je dielektrikem, ne každé dielektrikum je izolantem.

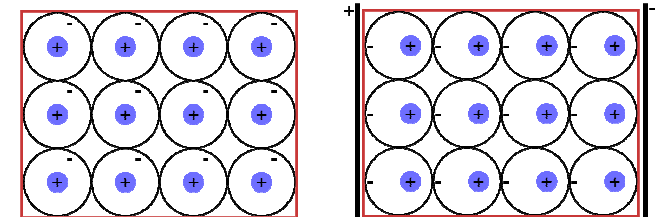
Izolanty (dielektrika) nemají volné elektrony, které se mohly přemísťovat z jednoho místa na druhé. Atomy izolantu, který není umístěn v elektrostatickém poli, jsou symetricky uspořádané a nejsou proto zdrojem vlastního elektrostatického pole. Vlivem vnějšího elektrostatického pole se z původně neutrálních atomů vytvoří elektrické dipóly ve směru elektrické intenzity vnějšího pole. Uvnitř dielektrika se jejich silové působení vzájemně vykompenzuje, ale na okraji dielektrika ne.



polární dielektrikum v elektrickém poli



nepolární dielektrikum v elektrickém poli





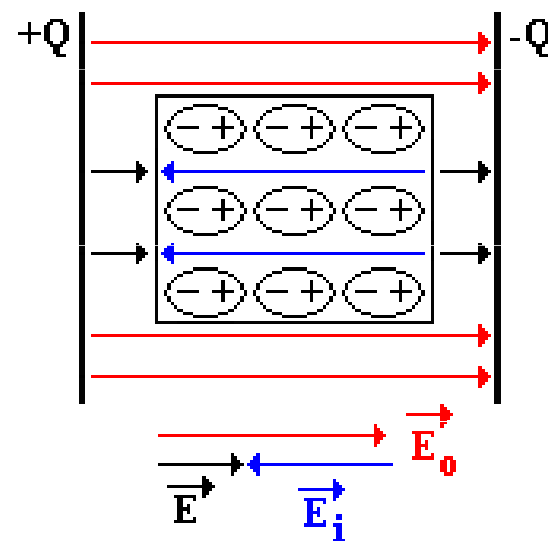
Vznikají indukované náboje vázané na dielektrikum: v místě, kde do dielektrika proniká intenzita je záporný náboj, v místě kde tato intenzita z dielektrika vychází, je náboj kladný. Indukované náboje jsou vázány na dipóly a nelze je z dielektrika odvést. Dielektrikum tedy nelze rozdělit na dvě opačně nabitě části. Rozdělením získáme dva kusy zase jen elektricky neutrálních dielektrik.

Náboje vzniklé v důsledku polarizace dielektrika vytvářejí vnitřní elektrostatické pole s intenzitou  $\mathbf{E}_i$ , která míří proti intenzitě  $\mathbf{E}_0$  vnějšího pole, které polarizaci vyvolalo. Velikost výsledné intenzity je  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_i$  a má směr původní intenzity  $\mathbf{E}_0$  (vždy totiž je  $\mathbf{E}_0 \geq \mathbf{E}$ ).

**Relativní permitivita dielektrika  $\epsilon_r$**  je dána vztahem:

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E} \quad \epsilon_r \geq 1$$

Kolem nabitého vodivého tělesa v dielektrickém prostředí vznikají vázané náboje opačného znaménka a intenzita okolo tělesa klesne oproti vakuu  $\epsilon_r$  krát.

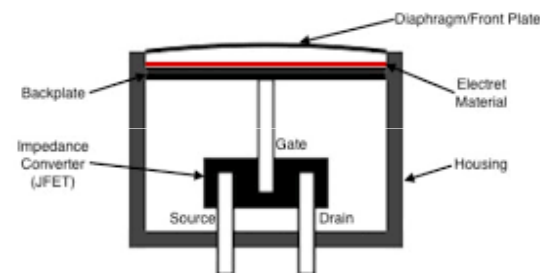


# Elektret

**Elektret** je dielektrický materiál, který má kvazi-trvalý elektrický náboj nebo dipólovou polarizaci. Elektrety se skutečným nábojem obsahují buď kladné nebo záporné přebytké náboje nebo obojí, zatímco elektrety s orientovaným dipólem obsahují orientované dipóly. Elektretové materiály se vyskytují v přírodě (křemen a další formy oxidu křemičitého), nebo jsou vyrobeny ze syntetických polymerů (např. fluoropolymerů, polypropylenu, polyethylentereftalátu atd.).

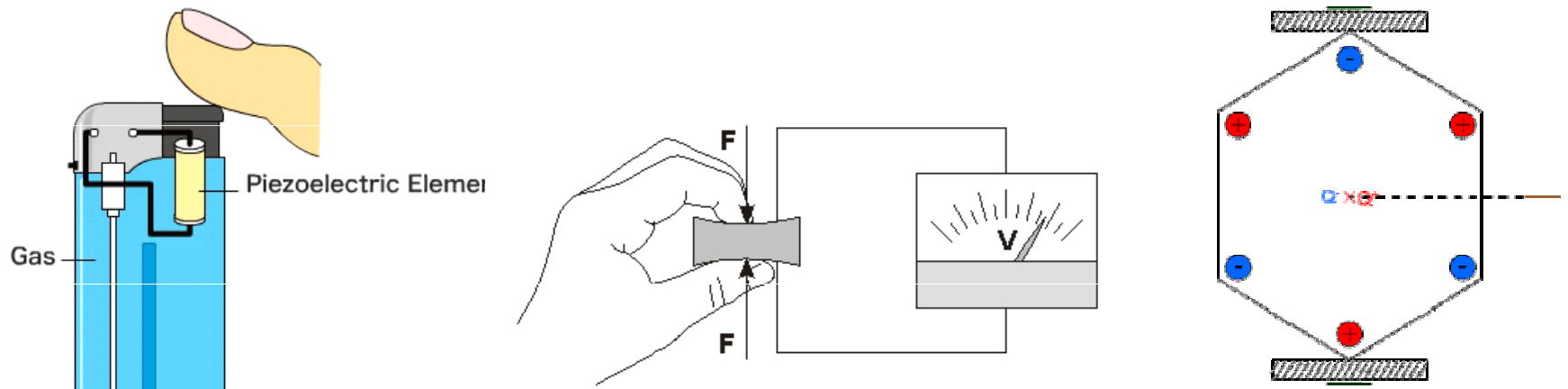
Elektretové materiály se používají např. v elektretových mikrofonech, kopírovacích strojích, některých typech vzduchových filtrů, pro elektrostatické odlučování prachových částic, v elektretových iontových komorách pro měření ionizujícího záření nebo radonu a při získávání vibrační energie .

**Elektretový mikrofon** je typ kondenzátorového mikrofону, který mezi deskami obsahuje trvale elektricky nabitou hmotu (elektret). Díky tomu samotný mikrofon nepotřebuje externí napájení, avšak v jeho zapojení musí být aktivní napájený předzesilovač. Tlak vzduchu změní vzdálenost mezi deskami kondenzátorového mikrofónu, generuje se napětí, které je úměrné hlasu nebo zvuku na mikrofónu.



# Piezelektrický jev

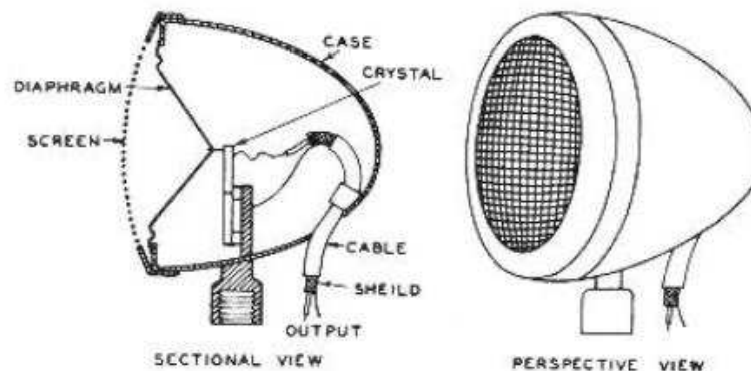
**Piezelektrický jev** je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Může se vyskytovat pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezelektrickou látkou je monokrystalický křemen, křišťál. Poprvé byl piezelektrický jev pozorován u Seignettovy soli (tetrahydrát vinanu draselno-sodného).



Stlačením krystalu v **piezelektrickém zapalovači** vznikne elektrické napětí, jenž vytvoří malý elektrický výboj v jiskřišti, jiskra výboje pak podpálí plyn v zapalovači, ve sporáku či v plynových kamnech.

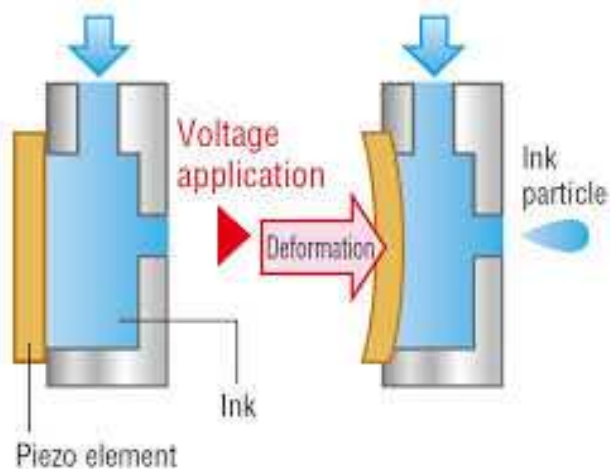


**Piezelektrické mikrofony** se používaly převážně v 50. letech 20. století, nebyly příliš kvalitní a používaly se převážně v systémech veřejného ozvučení, i tam se od jejich užívání záhy upustilo.

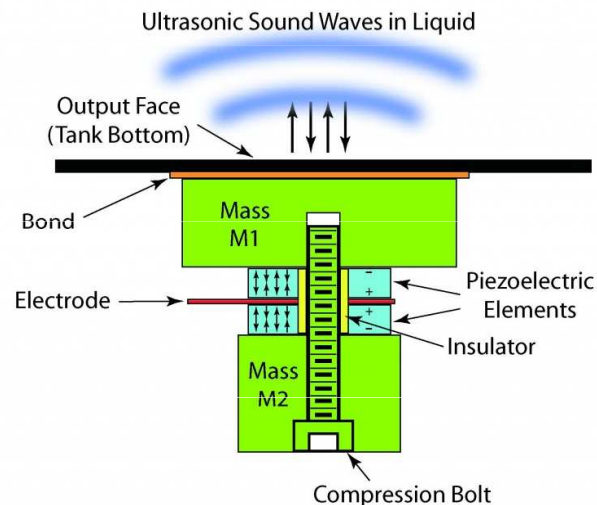


Piezelektrického jevu se také využívalo v **gramofonové přenosce**, v některých typech snímačů hudebních nástrojů nebo kontaktních snímačů chvění.

### v inkoustových tiskárnách

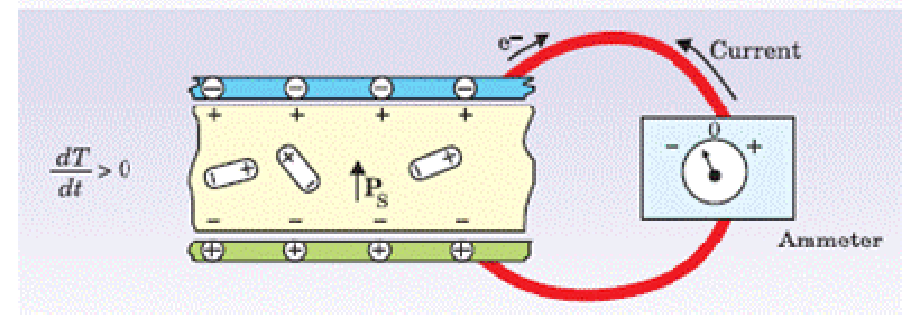
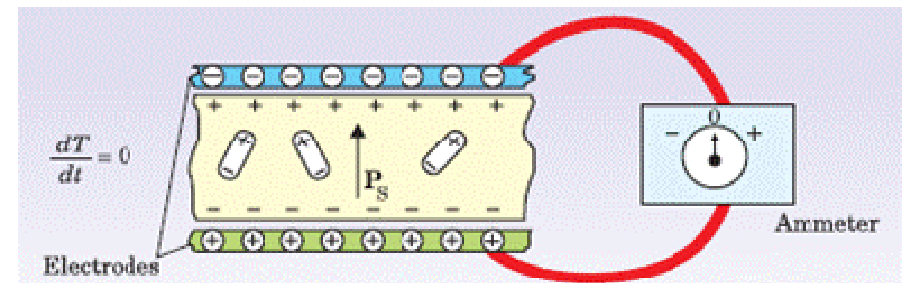
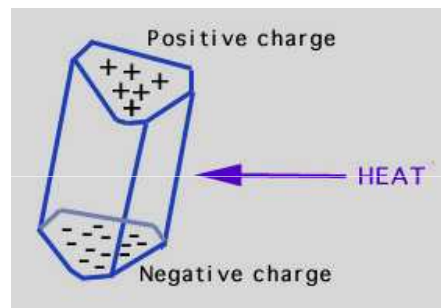
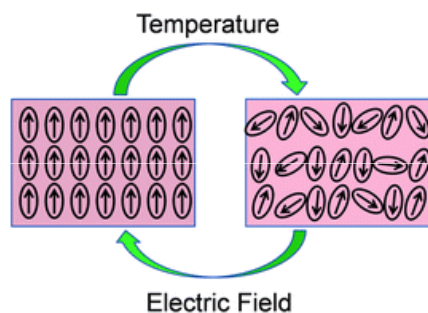
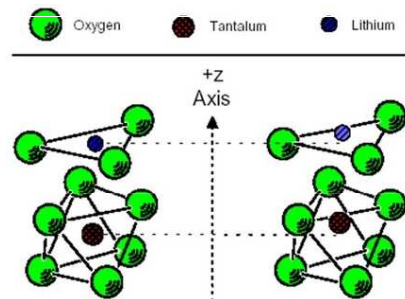
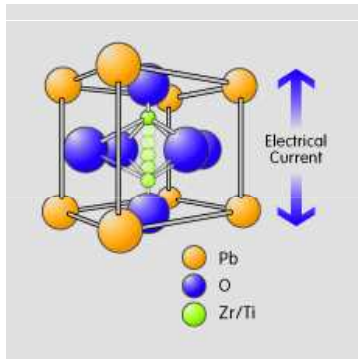


### v ultrazvukových převodnících



**Pyroelektrický jev** je schopnost některých krystalů generovat elektrický náboj při změně teploty.

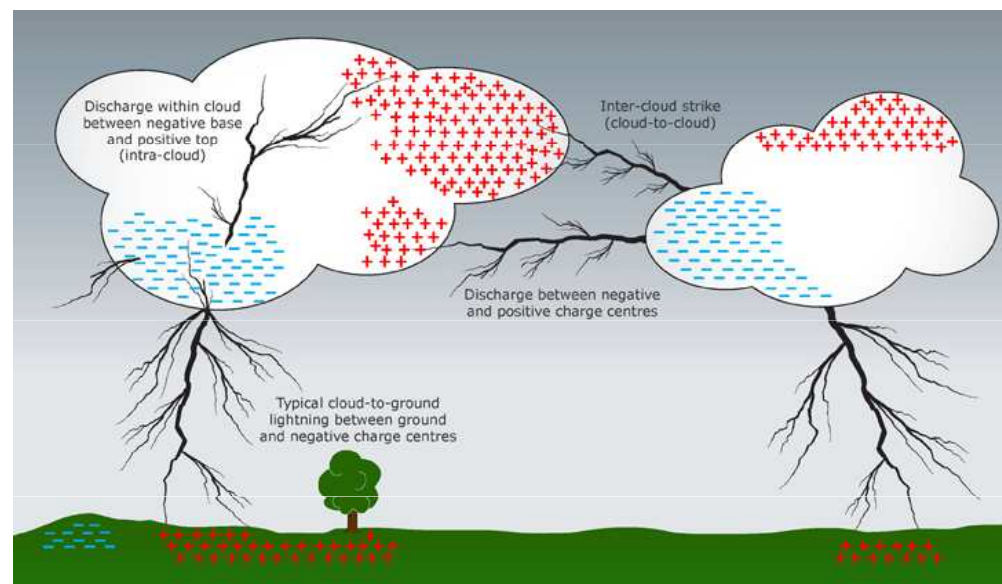
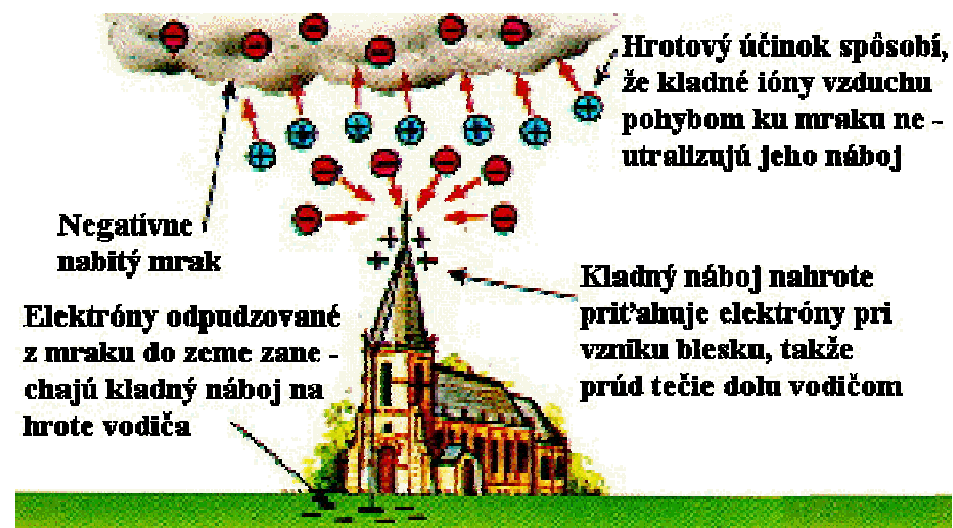
V nevodivých pevných krystalických látkách způsobuje změna teploty deformaci krystalové mřížky. U látek s vhodnými vlastnostmi vzniká elektrický náboj mezi chladnější a teplejší částí krystalu. U látek s jedinou polární osou symetrie se změnou teploty vytvoří dipólový moment, který je zodpovědný za vznik elektrického napětí. Všechny pyroelektrické materiály mají též piezoelektrické vlastnosti, avšak jen některé materiály s piezoelektrickými vlastnostmi vykazují též vlastnosti pyroelektrické, neboť pyroelektrina má vyšší nároky na asymetrii krystalu. Jevo byl pozorován na krystalu turmalínu (při vhození do horkého popela nejprve jeho částičky přitahuje a později, po ohřátí, naopak odpuzuje).





**Pyroelektrický jev** na krystalech ledu v kumulonimbech je též podstatou vzniku elektrických výbojů (blesků) při bouři.

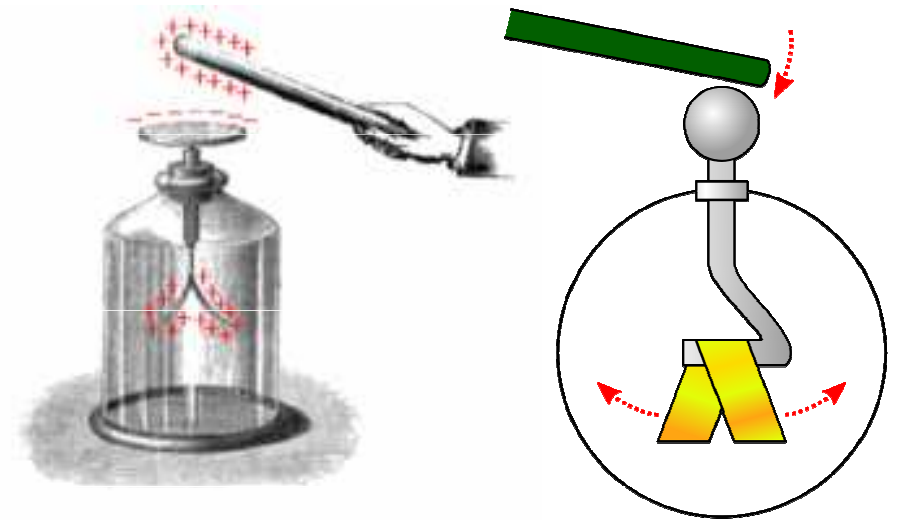
**Blesk** je silný přírodní elektrostatický výboj produkovaný během bouřky. Bleskový elektrický výboj je provázen emisí světla. Elektřina procházející kanály výboje rychle zahřívá okolní vzduch, který díky expanzi (rázová vlna) produkuje charakteristický **zvuk** hromu.



# Elektroskop

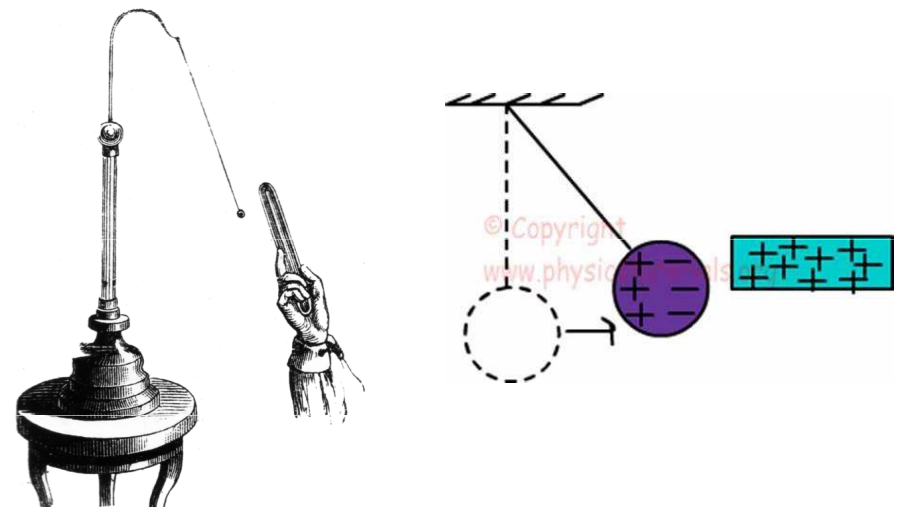
## Elektroskop se zlatými lístky

Princip spočívá v tom, že na kovovou destičku, která je spojena s plátkou kovu (zlata), přivedeme elektrický náboj. Podle jeho velikosti jsou plátky kovu od sebe odtlačovány odpudivou silou stejných elektrických nábojů. Z velikosti výchylky od svislé roviny lze určit velikost náboje.



## Kuličkový elektroskop

Kulička z bezové dřevě nebo z plastu je přitahována k elektrickému náboji v důsledku indukované polarizace.





# Kopírka

**Fotokopírka** (kopírka) je přístroj, který vytváří kopie dokumentů. Většina nynějších fotokopírek používají technologii xerografie, což je proces, který využívá elektrostatické náboje a působení světla. Teplo, tlak nebo jejich kombinace se používá pro přenos toneru na papír.



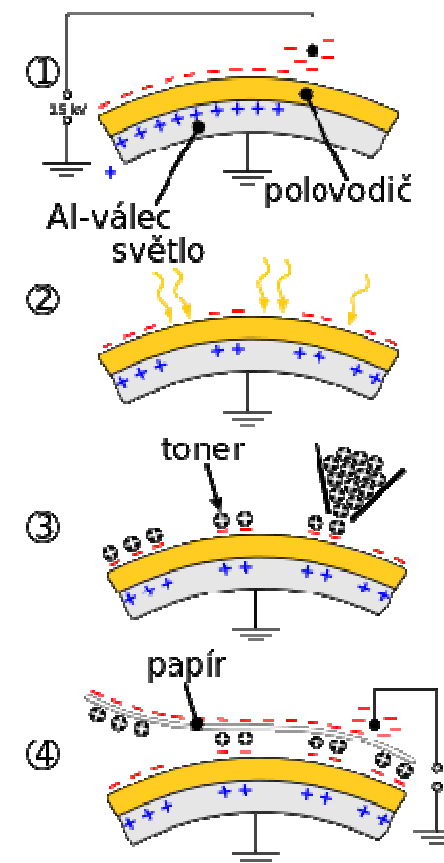
1. *Nabíjení*: válcovitý bubínek je elektrostaticky nabitý drátem nebo nábojovým válcem. Buben je potažen fotovodivým materiálem. Fotovodič je polovodič, který se stává vodivým, když je vystaven světlu

2. *Vystavení*: Silná lampa osvítlí původní dokument a bílé oblasti se odrazí pomocí světla na povrch fotovodivého bubnu. Oblasti bubnu, které nejsou vystaveny světlu, se stanou vodivými a nabije se záporným nábojem.

3. *Vyvíjení*: Toner je kladně nabitý. Poté, co je použit na buben, aby vytvořil obraz, přilne k oblastem, které jsou záporně nabity (černé oblasti), stejně tak jako papír přilne k staticky nabitému balónku.

4. *Převod*: Vzniklý obraz na povrchu bubnu je převeden na papír s větším záporným napětím, než který má buben.

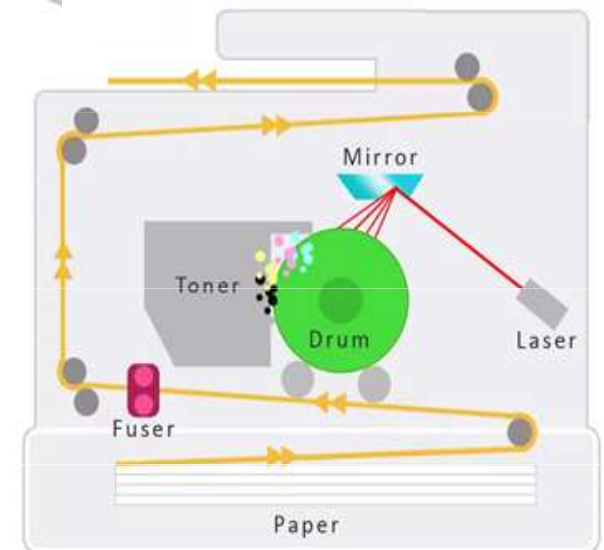
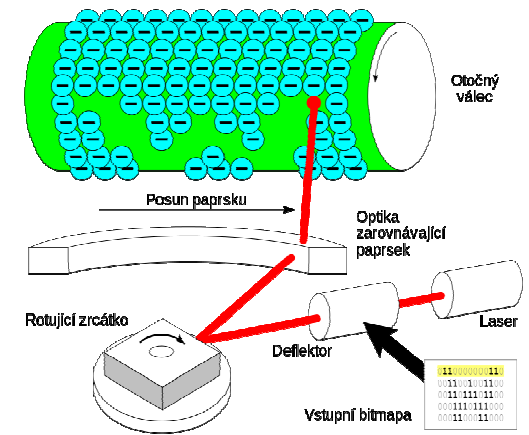
+ *Sloučení*: Toner se roztaví a přilepí na papír pomocí tepla a tlakovým válcům.



# Laserová tiskárna

**Laserová tiskárna** je druh počítačové tiskárny, pracující na podobném principu jako kopírka.

Uvnitř tiskárny je elektricky vodivý válec pokrytý polovodivou vrstvou ze selenu, který se ve tmě chová jako izolant, po osvětlení se stane vodivým. Tato vrstva se před tiskem nabije elektrickým nábojem. V bodech, které se mají tisknout, je válec osvícen laserem, tím je odpor polovodiče v bodě snížen a náboj z povrchu se vybije do středu válce. Práškový toner je vlivem otáčení válce nabit na stejnou polaritu jako povrch válce a přilne k válci pouze na místech, kde byl odstraněn náboj. V ostatních místech je toner od válce odpuzován, protože má stejnou polaritu. Následně se toner přenesse z válce na papír, který je nabit na opačnou hodnotu než povrch válce. Toner se z míst na válci s neutrálním nábojem přenesse na papír, který je nabit nábojem opačným (než toner). Dále je toner pomocí vysoké teploty (od 180 °C a více) a tlaku roztaven a zapečen do papíru a následně je z papíru sejmuto náboj a papír je uložen do výstupního zásobníku.

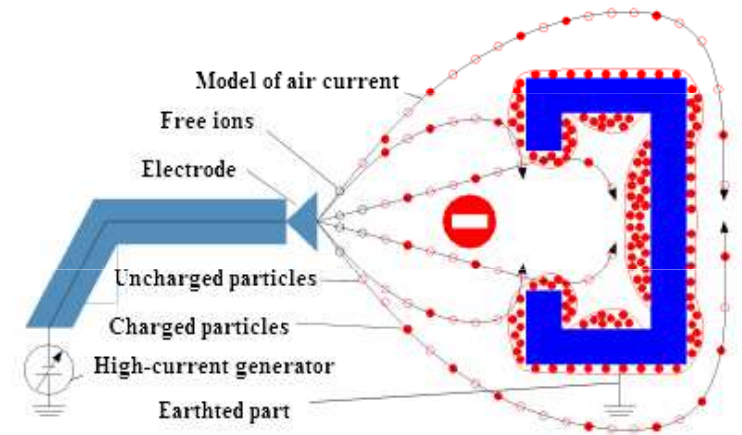


# Práškové nanášení vrstev

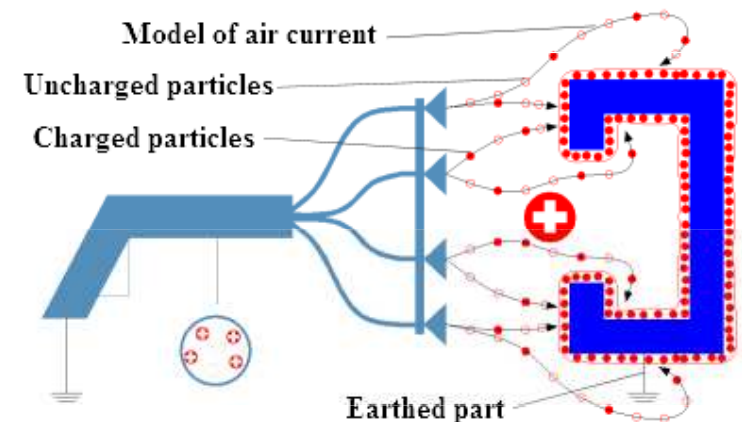
Barva ve stříkací pistoli prochází silným elektrickým polem. Všechny částice barvy se v něm nabijí el. nábojem, vzájemně se odpuzují a vytvářejí kužel kapiček stříkané barvy. Kladným protějškem je uzemněný díl, na který se má nanést barva. Nabité částice se pohybují ve směru siločar elektrostatičkého pole a s minimálními ztrátami se zachycují na povrchu stříkaného předmětu. To znamená, že při jednodušším tvaru předmětu stačí často stříkat barvu jen v jednom směru a předmět je nalakován ze všech stran. Elektrostatičkým nanášením barev se dosáhne vysoké kvality nátěru.



Kuchyňské nádobí a přístroje, světla, radiátory, automobilové díly, kovový nábytek, sportovní náčiní, ...



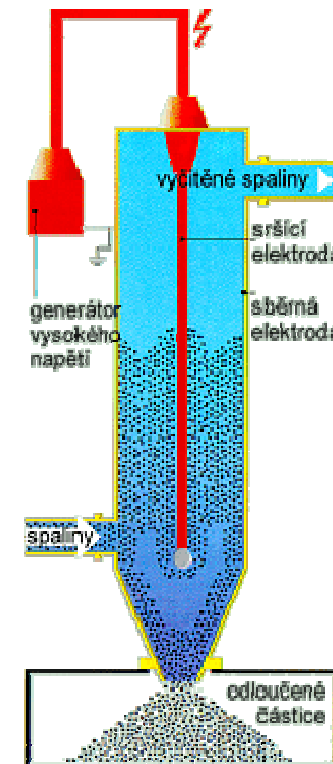
*Elektrostatičké nabíjení:* ionizace pomocí korony, rychlé, efektivní, nevhodné pro duté předměty.



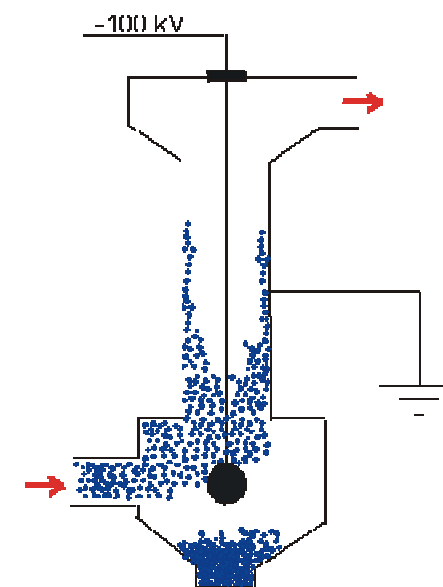
*Elektrokinetické nabíjení:* ionizace pomocí tření, méně efektivní, vhodné pro duté předměty, zejm. pro aplikaci teflonu.

# Elektrostatický odlučovač (filtr)

Elektrostatické odlučovače se používají např. v elektrárnách na zachycování popílku vyletujícího z komína. Jde v podstatě o uzemněnou kovovou trubku, kterou prochází čistěný plyn. V ose je izolovaně upevněn napnutý ocelový drát připojený ke zdroji napětí až -100 kV (= vybíjecí, resp. sršící elektroda), kde vzniká korona. Částice popílku se dotykem s korunou souhlasně záporně nabijí a jsou jím následně odpuzovány a přitahovány ke kladně nabitým (uzemněným) stěnám odlučovače (= sběrná elektroda), kde se usadí a následně se vlastní vahou sesouvají do jeho spodní části, odkud jsou odstraňovány.



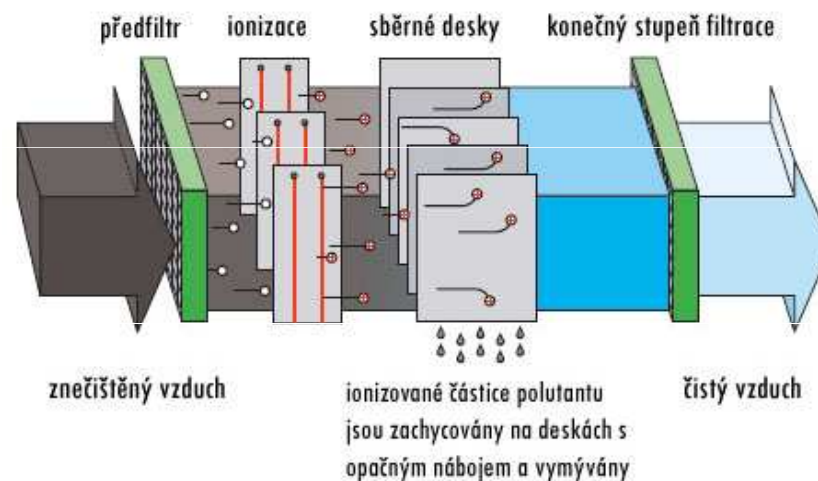
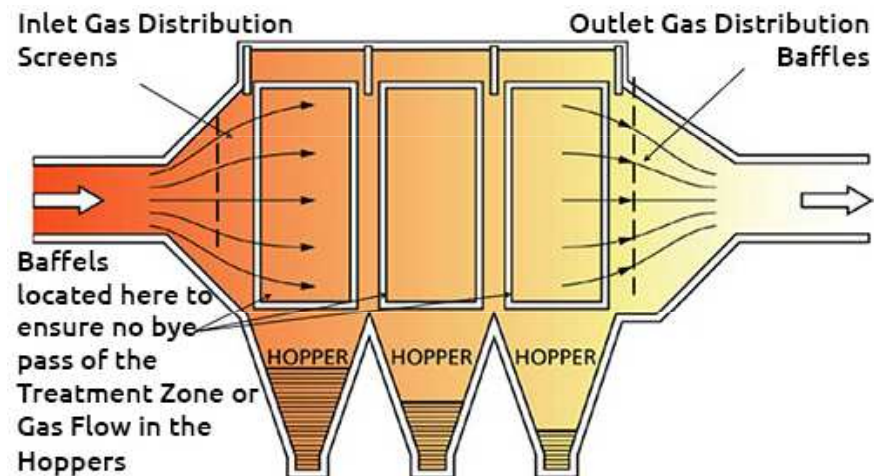
Elektrostatické filtry, zachycují přes 99 % popílku.





# Elektrostatické filtry

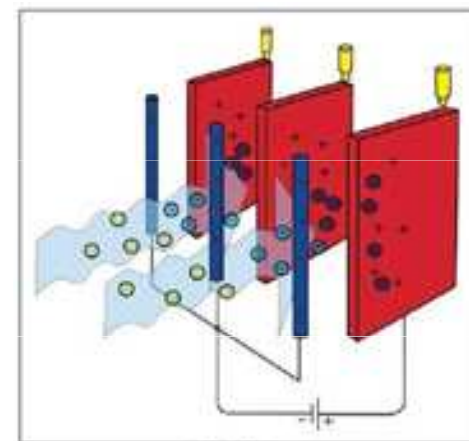
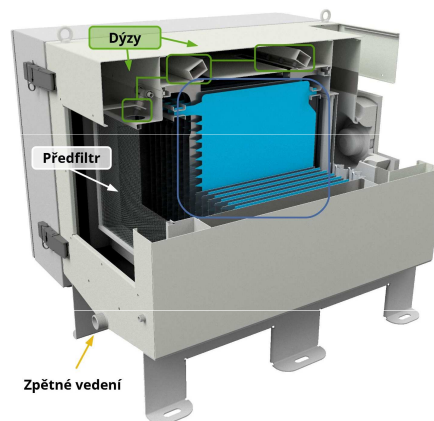
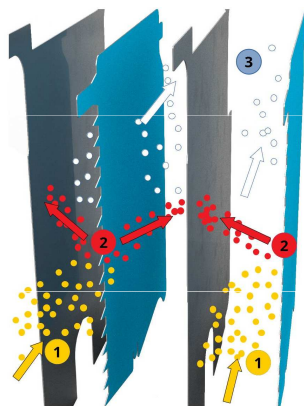
Jiný typ odlučovače má uvnitř drátové elektrody a uzemněné kovové desky, na kterých se usazují prachové částice.



Na stejném principu jsou založeny domácí čističky vzduchu.

## Filtrační princip

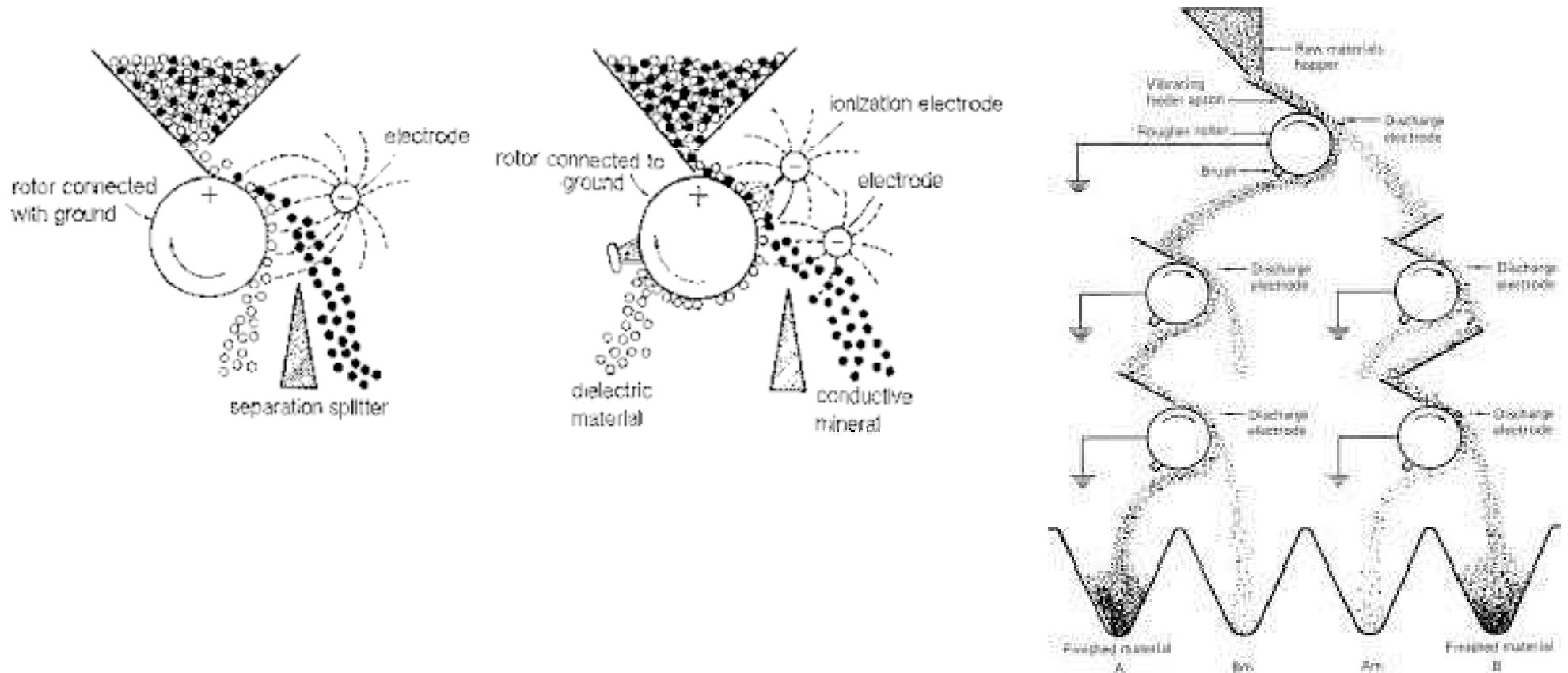
- 1 **Sání**  
emulzní mlha, aerosol
- 2 **Separace**  
koronární výboj,
- 3 **Výstup**  
vyčištěný vzduch



Obr. 2 Princip elektrostatického filtru [WikiComm]

# Elektrostatické třídění rud

Elektrostatické třídění rud je založeno na různé elektrické vodivosti rudy a hlušiny. Drobně roztlučený materiál se sype na otáčející se kladně nabitý válec. Zrnka hlušiny jsou málo vodivá a dotykem s válcem se nabijí a ulpí na otáčejícím se válci. Když jejich hmotnost převýší přitažlivou elektrostatickou sílu, zrnka hlušiny od válce odpadnou do zásobníku hlušiny. Zrnka rudy jsou vodivější, dotykem s válcem se nabijí kladně a jsou proto válcem odpuzována. Pomocná záporně nabitá elektroda poblíž válce je přitahuje tak, aby padala do druhého zásobníku.



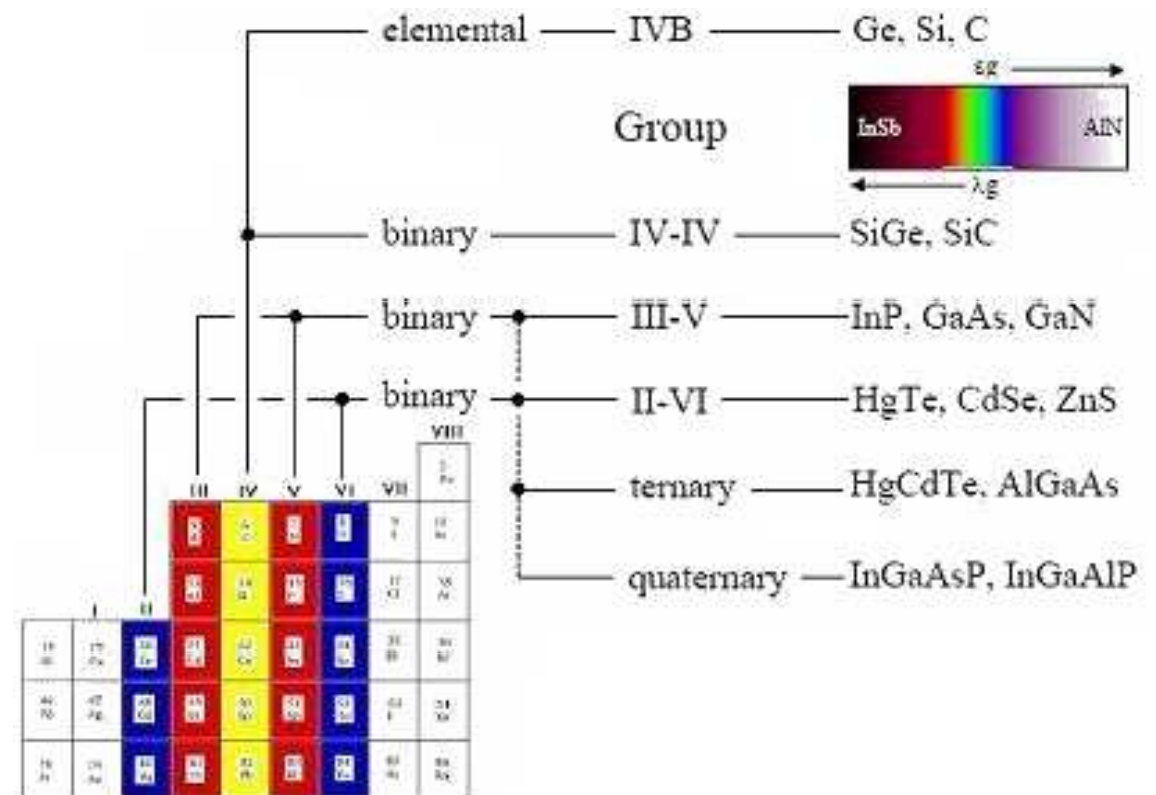
# Polovodiče

**Polovodič** je pevná látka, jejíž elektrická vodivost závisí na vnějších nebo vnitřních podmínkách, a dá se změnou těchto podmínek snadno ovlivnit. Změna vnějších podmínek znamená dodání některého z druhů energie – nejčastěji tepelné, elektrické nebo světelné, změnu vnitřních podmínek představuje příměs jiného prvku v polovodiči.

Mezi polovodiče patří prvky křemík, germanium, selen, sloučeniny arsenid galia GaAs, sulfid olovnatý PbS aj. Většina polovodičů jsou krystalické látky, existují však také polovodiče amorfní (některá skla). Polovodiče se využívají u elektronických součástek.

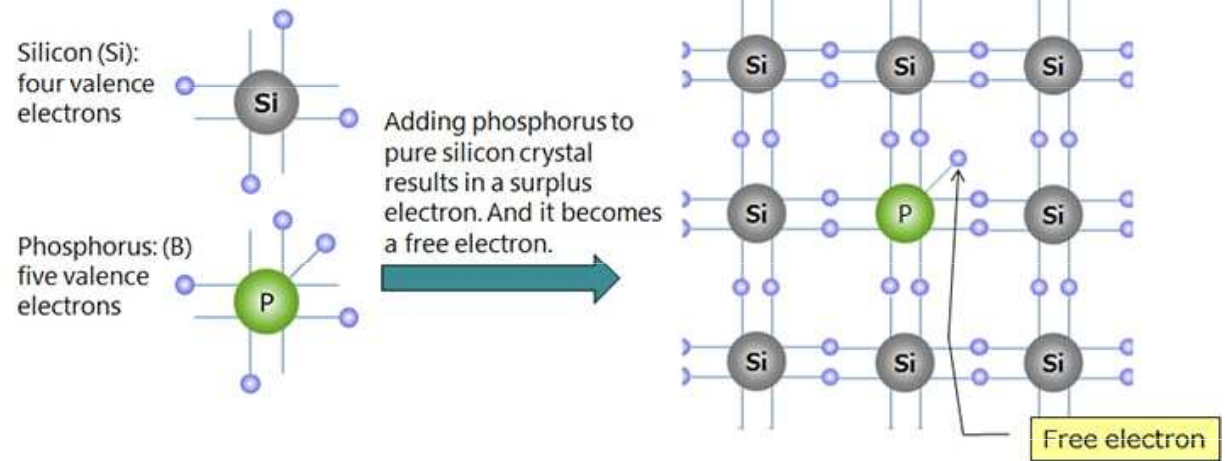
- **polovodiče typu N** – majoritními nositeli náboje jsou *volné elektrony* ( $e^-$ )

- **polovodiče typu P** – majoritními nositeli náboje jsou elektronové vakance, tzv. *díry* ( $h^+$ )

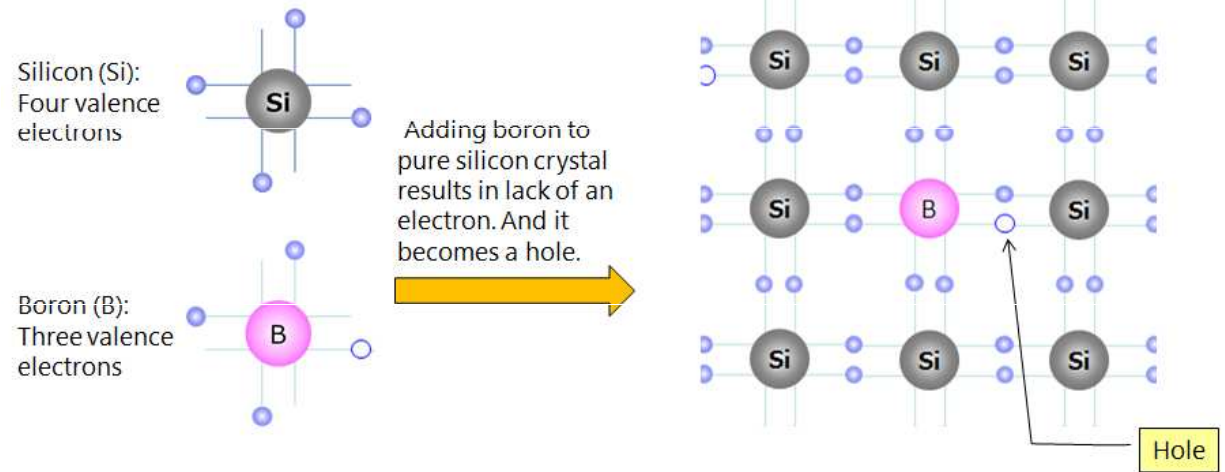




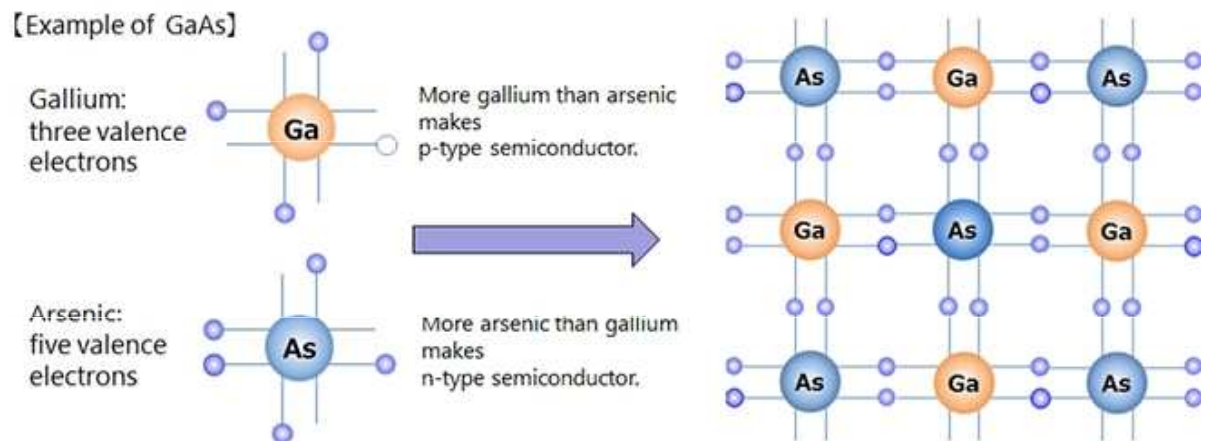
## polovodič typu N



## polovodič typu P

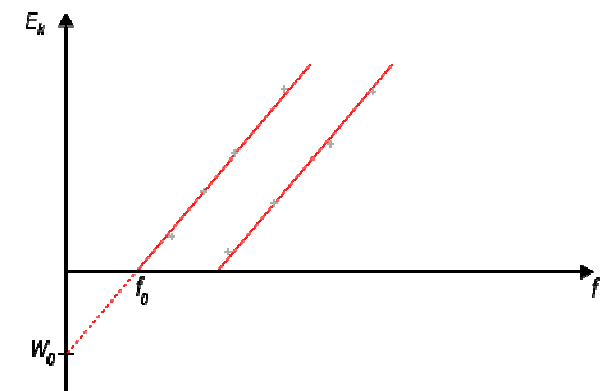
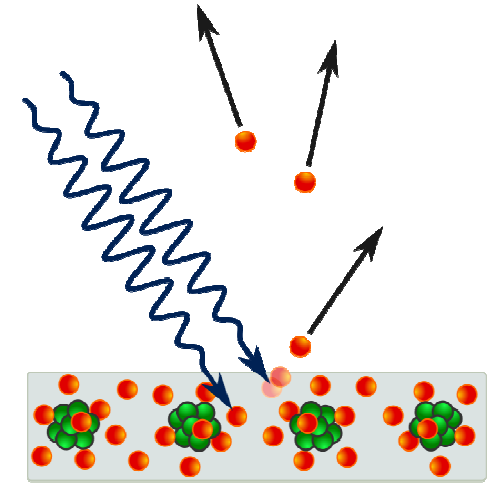


## polovodiče typu P nebo polovodič typu N



# Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev (fotoefekt) je fyzikální jev, při němž jsou elektrony emitovány (vyzařovány) z látky (nejčastěji z kovu) v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelného světla) látkou. Pokud jev probíhá na povrchu látky (tzn. působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky), jde o **vnější fotoelektrický jev**. Fotoelektrický jev může probíhat i uvnitř látky, kdy uvolněné elektrony zůstávají v materiálu jako vodivostní elektrony. V tomto případě jde o **vnitřní fotoelektrický jev** (viz fotodioda, fototranzistor).



## Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu

$$h\nu = h\nu_0 + E_{\max}$$

kde  $h\nu$  je energie dopadajícího fotonu,  $h\nu_0$  je minimální energie potřebná k uvolnění elektronu (výstupní práce) a  $E_{\max}$  je maximální možná (kinetická) energie uvolněného elektronu.

# Kapacita vodiče

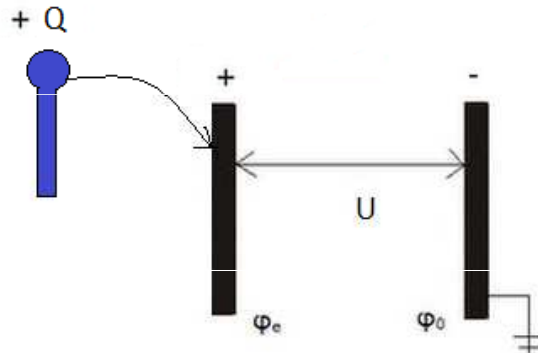
**Elektrická kapacita**  $C$  vyjadřuje schopnost vodiče při určité pevné hodnotě potenciálu hromadit v sobě či uchovat elektrický náboj. Čím větší kapacita, tím větší množství náboje může být na vodiči.

kde  $\varphi$  je potenciál na povrchu vodiče.

$$C = \frac{Q}{\varphi_0}$$

$$[C] = \text{F (farad)}$$

$$[F] = [m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2]$$



$$Q \sim U$$

$$Q = k \cdot U \quad k = C \text{ (kapacita)}$$

---

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

Tato vlastnost závisí na velikosti a tvaru vodiče, na vzdálenosti od okolních vodičů a na prostředí, kterým jsou vodivá tělesa obklopena. Těleso s menší kapacitou bude daným nábojem přivedeno na vyšší potenciál než těleso s větší kapacitou.

Kapacita osamocených vodičů je velmi malá – větší kapacitu mají různé soustavy navzájem izolovaný vodičů.

Např. soustava dvou plochých vodičů oddělených od sebe vrstvou dielektrika - **kondenzátor**.

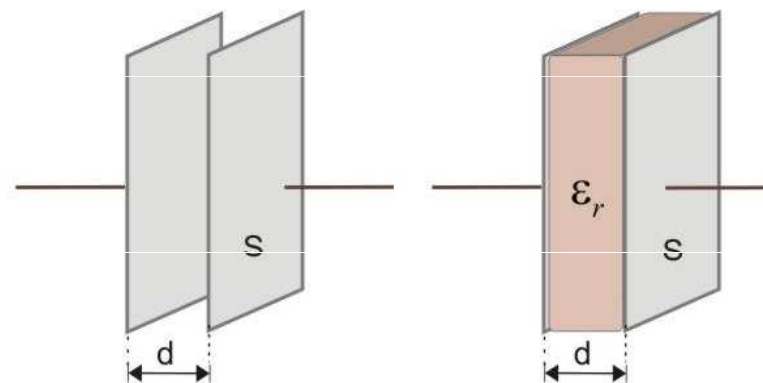
# Kondenzátor

**Kondenzátor** se skládá ze dvou vodivých desek (elektrod) oddělených dielektrikem. Na každou z desek se přivádí elektrické náboje opačné polarity, dielektrikum mezi deskami nedovolí, aby se částice s nábojem dostaly do kontaktu, a tím došlo k neutralizaci (vybití) elektrických nábojů a svojí polarizací zmenšuje sílu elektrického pole nábojů na deskách a umožňuje tak umístění většího množství náboje. Vzhledem k elektrostatické indukci je velikost náboje na obou deskách stejná.

## Kapacita kondenzátoru

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

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{l}$$



$S$  plocha desek,  $l$  vzájemná vzdálenost desek,  $\epsilon$  permitivita dielektrika mezi deskami

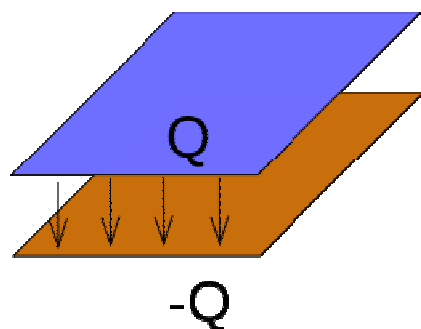
## Napětí na kondenzátoru

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

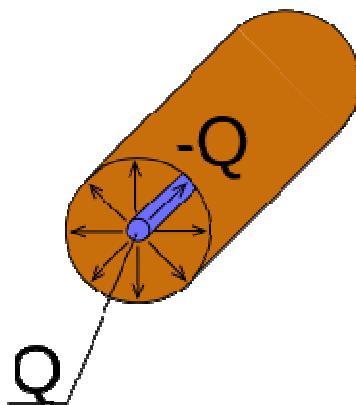
## Energie nabitého kondenzátoru

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

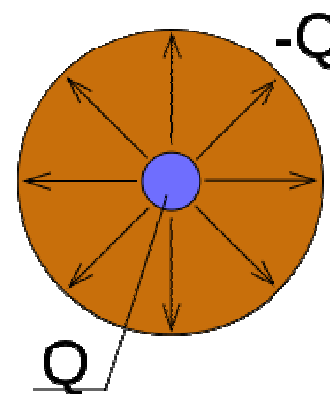
## Tvar kondenzátoru



*Deskový kondenzátor*

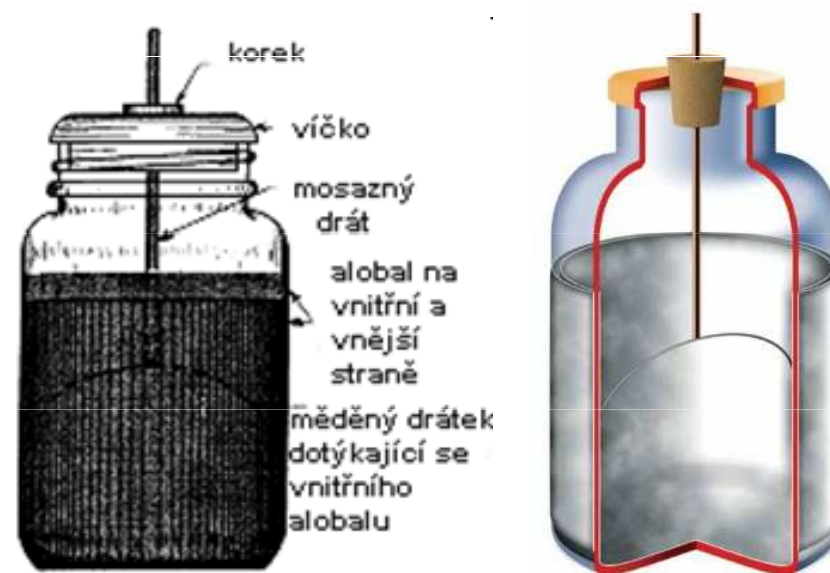


*Válcový kondenzátor*



*Kulový kondenzátor*

**Leydenská láhev** je nejstarší kondenzátor. Skleněná nádoba, jejíž vnější i vnitřní povrch je polepen vodivým materiálem. Sklo nádoby slouží jako dielektrikum, které obě vrstvy vodivého materiálu odděluje. Z vnitřního polepu vede hrdlem láhve ven vodič, zakončený kovovou koulí. Leydenské láhve se obvykle nabíjely nejčastěji indukční elektřinou z Wimshurstova přístroje.

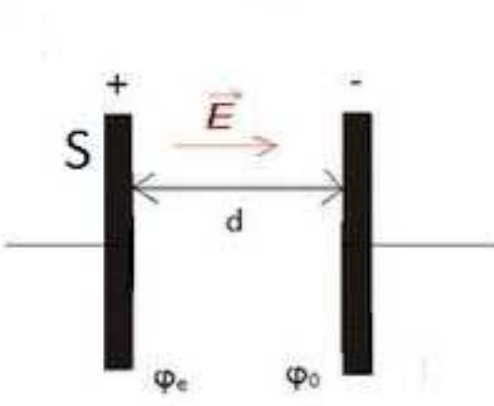


## Kapacita deskového kondenzátoru

Kapacita deskového kondenzátoru je přímo úměrná obsahu účinné plochy desek a nepřímo úměrná vzdálenosti desek.

Je-li deska kondenzátoru uzemněna platí

$$C = Q / \varphi$$



a)  $E = \frac{U}{d}$   
b)  $\sigma = \frac{Q}{S}$   
c)  $\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r E$

---

$$\frac{Q}{S} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U}{d} \Rightarrow \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \frac{\epsilon S}{d}$$

## Příklad

Na jaký potenciál se nabije vodič o kapacitě 20 pF nábojem 1 mC?

$$C_1 = 20 \text{ pF} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ F}, \quad Q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ C}, \quad \varphi = ?$$

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

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

$$\varphi = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{20 \cdot 10^{-12} \text{ F}} = 0,05 \cdot 10^6 \frac{\text{C}}{\text{F}} = 50 \text{ 000 V}$$

$$\underline{\varphi = 50 \text{ 000 V}}$$

## Příklad

Určete relativní permitivitu dielektrika v rovinném deskovém kondenzátoru, jehož desky o ploše  $1000 \text{ cm}^2$  jsou od sebe vzdáleny  $0,1 \text{ mm}$  a kondenzátor se nábojem  $17,7 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  nabije na  $100 \text{ V}$ .

$$S = 0,1 \text{ m}^2, \quad l = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad Q = 17,7 \cdot 10^{-6} \text{ C}, \quad U = 100 \text{ V},$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$C = \frac{Q}{U} \quad \wedge \quad C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{l}$$

$$\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{l} = \frac{Q}{U}$$

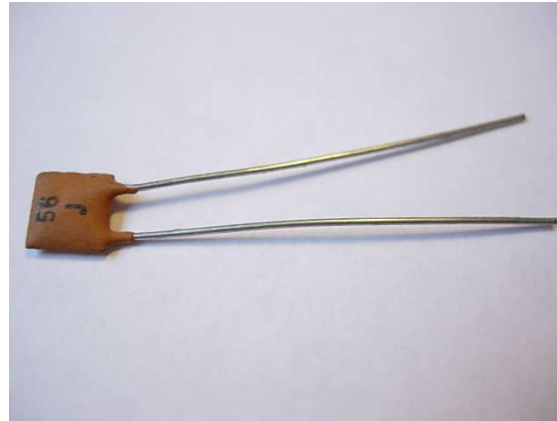
$$\epsilon_r = \frac{Ql}{U \cdot S \cdot \epsilon_0}$$

$$\epsilon_r = \frac{17,7 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{100 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ m}^2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}} = 0,02 \cdot 10^3 = 20$$

$$\underline{\epsilon_r = 20}$$

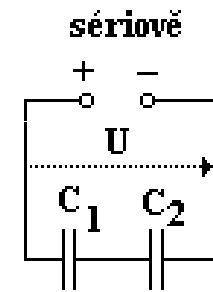
$$[\epsilon_r] = \frac{\text{C} \cdot \text{m}}{\text{V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^2 \text{ N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}} = \frac{\text{m}}{\text{V} \cdot \text{C} \cdot \text{N}^{-1}} = \frac{\text{m} \cdot \text{N}}{\text{V} \cdot \text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{J} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{J}} = 1$$





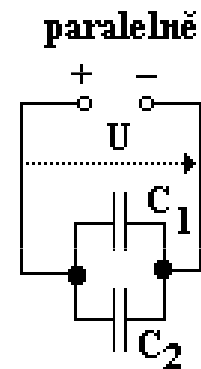
**Sériovým zapojením** dvou a více kondenzátorů se celková kapacita snižuje. Převrácenou hodnotu výsledné kapacity lze vypočítat jako součet převrácených hodnot jednotlivých kapacit:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$



**Paralelním zapojením** kondenzátoru se celková kapacita zvyšuje. Výsledná kapacita se vypočte součtem jednotlivých kapacit:

$$C = C_1 + C_2 + \dots$$



# Pohyb volných elektronů ve vodiči

1. **Neuspořádaný pohyb** (chaotický) - pohyb trvající neustále.
2. **Usměrněný pohyb** – působením vloženého napětí (od pólu – k pólu + zdroje)

## Elektrický proud

**Elektrický proud** je uspořádaný pohyb nosičů elektrického náboje. Stejnojmenná skalární fyzikální veličina ( $I$ ,  $[I] = \text{A (ampér)}$ ) označuje celkové množství elektrického náboje, které projde průřezem vodiče za jednotku času.

**Stejnoseměrný proud** je proud, který v čase nemění směr svého toku. Velikost proudu se měnit může.

**Střídavý proud** je proud, jehož velikost a směr se v čase mění s určitou periodou, přičemž jeho střední hodnota je nulová.

**Stacionární elektrický proud** je konstantní, tj. má časově neměnnou velikost i směr toku. Stacionárním proudem je generováno **stacionární magnetické pole**.

**Nestacionární elektrický proud** zahrnuje všechny případy, kdy proud mění v čase buď svou velikost nebo směr svého toku.

**Okamžitý elektrický proud** je množství náboje, které projde průřezem vodiče za nekonečně krátký čas

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Prochází-li elektrický náboj průřezem vodiče rovnoměrně, definuje se **průměrný proud**:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

**Konstantní stejnosměrný proud** = proud, jehož velikost ani směr se s časem nemění:

$$I = Q/t$$

Podmínky pro stejnosměrný konstantní proud jsou:

1. uzavřený elektrický obvod
2. elektrický zdroj v obvodu

# Elektrický obvod

Běžný **elektrický obvod** lze obvykle rozdělit na následující části:

*elektrický zdroj* (též zdroj elektrického proudu, zdroj elektrického napětí nebo zdroj elektrické energie)

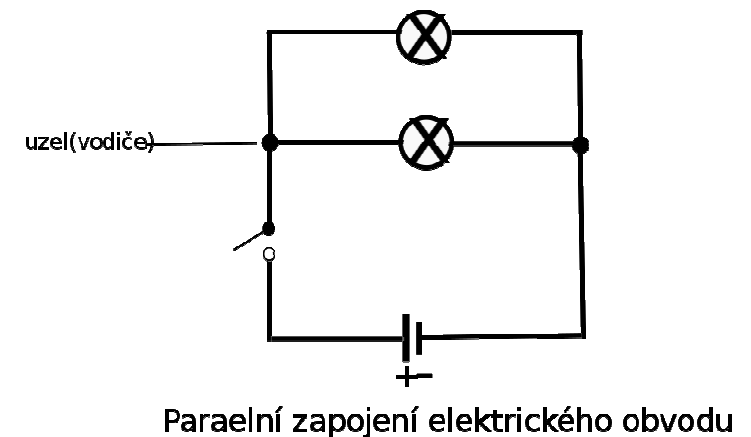
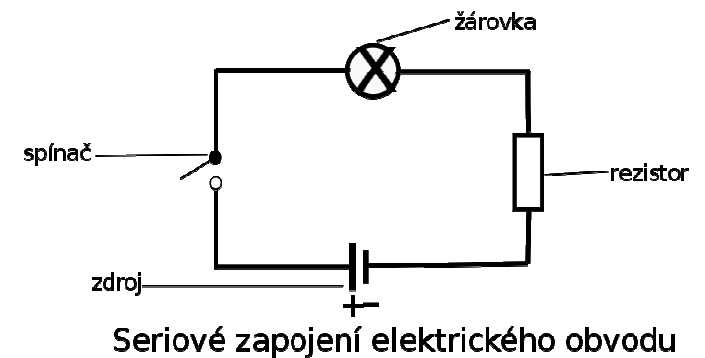
*vypínač*

*elektrický spotřebič*

Jednotlivé součásti ze kterých se skládá elektrický obvod bývají propojeny pomocí *vodičů*.

Pokud je vodivá dráha tvořená elektrickým obvodem uzavřená, pak se hovoří o **uzavřeném elektrickém obvodu**. Je-li vodivá dráha obvodu přerušena, např. otevřeným spínačem, pak se mluví o **otevřeném elektrickém obvodu**.

**Dohodnutý směr toku proudu** je od kladného pólu zdroje přes spotřebič k zápornému pólu zdroje. Tento dohodnutý směr je opačný než skutečný směr toku elektronů ve vodiči.



# Základní zákony pro elektrický obvod

## Kirchhoffovy zákony:

1. Součet všech proudů vstupujících do uzlu nebo součástky je roven součtu všech proudů vystupujících z uzlu nebo součástky (tj. proud se nikde nehromadí). Orientovaný součet proudů kolem uzlu je nulový.
2. Orientovaný součet všech napětí ve smyčce je nulový.

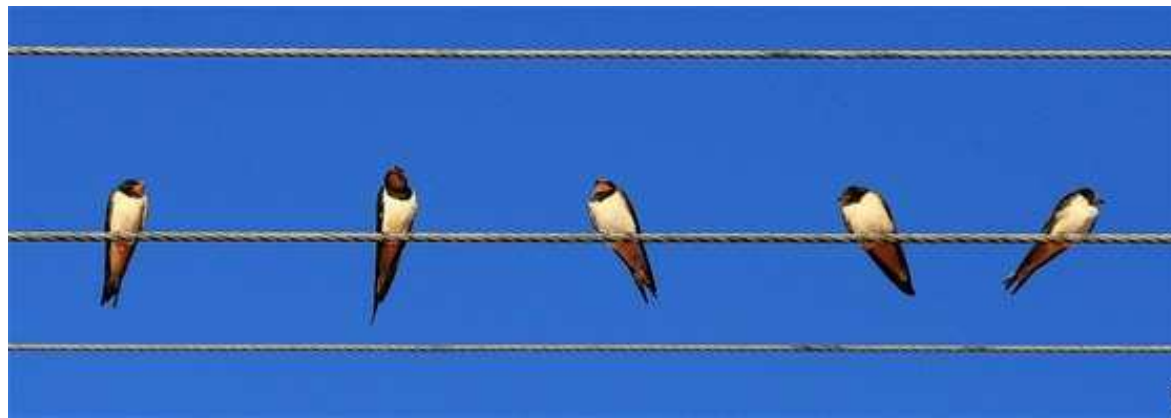
**Ohmův zákon:** Napětí na odporu je součinem jeho hodnoty a proudu, který skrze něj protéká.

**Theveninova věta:** Jakékoli propojení napěťových zdrojů a rezistorů s dvěma vývody je elektricky ekvivalentní ideálnímu napěťovému zdroji zapojenému sériově s jediným rezistorem.

**Nortonova věta:** Libovolná soustava lineárních zdrojů napětí, zdrojů proudu a rezistorů se dvěma svorkami je elektricky ekvivalentní k ideálnímu zdroji proudu s paralelně zapojeným ideálním rezistorem.

## Příklad

Tělo ptáka sedícího na drátu elektrického vedení je vlastně jakousi vedlejší větví tohoto vedení, jejíž odpor je ve srovnání s druhou větví (krátkým úsekem drátu mezi nohama ptáka) neobyčejně velký. Proto je intenzita proudu v těle ptáka nepatrná a nemůže mu uškodit. Kdyby se však pták sedící na drátě dotkl křídlem, ocasem nebo zobákem sloupu, nebo se jakýmkoli způsobem spojil se zemí, byl by okamžitě usmrcen proudem, který by prošel do země jeho tělem.



## Elektrický zdroj

V **elektrickém zdroji** se přeměňuje jiný typ energie na elektrickou. Elektrické zdroje mohou být chemické (galvanické články), fotočlánky, termočlánky. V elektrárnách vzniká elektrická energie v alternátorech.

**Elektromotorické napětí** je elektrické napětí, které se vytvoří v elektrickém zdroji přeměnou nějaké formy energie na energii elektrického pole. V důsledku elektromotorického napětí  $U_e$  se uvnitř elektrického zdroje přesouvají kladné náboje ke kladnému pólu zdroje a záporné náboje k pólu zápornému. Mezi takto přesunutými náboji vznikne elektrické napětí stejné velikosti, jakou má napětí elektromotorické, ale opačného směru a nazývá se **vnitřní napětí zdroje** ( $U_i$ ). Elektromotorické napětí má směr proudu, protékajícího zdrojem.

$$U_e = \frac{W}{Q}$$

kde  $W$  je práce neelektrických sil při přemístování elektrického náboje  $Q$  uvnitř zdroje.

**Svorkové napětí** je rozdíl elektrických potenciálů mezi svorkami elektrického zdroje. Není-li elektrický zdroj zatížen (tj. neprotéká elektrický proud), je svorkové napětí rovno elektromotorickému napětí zdroje. Při zátěži se svorkové napětí vlivem **vnitřního odporu zdroje** sníží.

**Vnitřní odpor zdroje.** Protéká-li elektrický proud obvodem, protéká také elektrickým zdrojem. Ideální zdroj neklade proudu žádný odpor, jeho vnitřní odpor je nulový a svorkové napětí (napětí na svorkách zdroje) má vždy stejnou velikost jako elektromotorické napětí. U reálných zdrojů se projevuje jejich vnitřní odpor a napětí na svorkách zatíženého zdroje je menší než elektromotorické napětí.



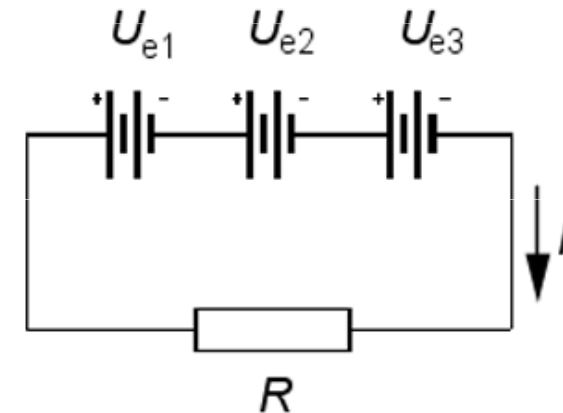
# Zapojení zdrojů napětí

**Sériové zapojení** dvou a více zdrojů má za následek zvýšení celkového elektromotorického napětí:

$$U_e = U_{e1} + U_{e2} + \dots$$

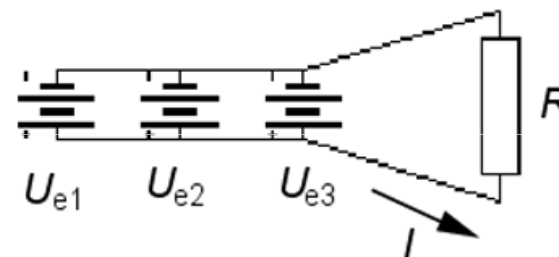
Větším elektromotorickým napětím se dosáhne zvětšení výkonu zdroje, nevýhodou je zvětšení celkového vnitřního odporu:

$$R_i = R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{in}$$



**Paralelním zapojením** dvou a více zdrojů se nezvyšuje elektromotorické napětí, ale celkový elektrický výkon zdrojů, které jsou schopny dodávat při stejném napětí větší elektrický proud.

Důležitou podmínkou je stejná velikost elektromotorických napětí jednotlivých zdrojů, aby nedocházelo k tomu, že silnější zdroj bude způsobovat elektrický proud opačného směru ve slabším zdroji.



## Elektrický proud ve vodičích (v kovech)

**Elektrická vodivost** (konduktance)  $G$  udává velikost elektrického proudu procházejícího vodičem při jednotkovém napětí na jeho koncích. Čím větší je vodivost, tím silnější elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí. Dobrý vodič má vysokou hodnotu vodivosti, špatný vodič má nízkou hodnotu vodivosti.

$$G = \frac{I}{U} \quad [G] = \text{S (siemens)}$$

$$G = \sigma \frac{S}{l}$$

kde  $\sigma$  je konduktivita látky,  $S$  je obsah průřezu vodiče a  $l$  je délka vodiče.

Elektrická vodivost je převrácená hodnota **elektrického odporu**  $R$

$$G = \frac{1}{R}$$

**Měrná elektrická vodivost** (konduktivita) je fyzikální veličina, která popisuje schopnost látky dobře vést elektrický proud. Látka, která je dobrým vodičem, má vysokou hodnotu konduktivity, špatně vodící látky mají nízkou hodnotu konduktivity. Konduktivita závisí na teplotě.

**Konduktivitu** (měrnou vodivost) lze vyjádřit jako převrácenou hodnotou **resistivity** (měrného odporu).

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Pokud je známa elektrická vodivost jednolitého bloku látky, je možno konduktivitu vypočítat podle vztahu

$$\sigma = \frac{lG}{S}$$

kde  $l$  je délka tělesa, na které je přiložené napětí,  $S$  je obsah kolmého průřezu,  $G$  je elektrická vodivost tělesa.

**Elektrický odpor**  $R$  je fyzikální veličina charakterizující schopnost vodiče bránit průchodu elektrického proudu. Hodnota elektrického odporu je dána materiálem, tvarem i teplotou vodiče. Velikost odporu závisí na délce vodiče (přímo úměrně), na obsahu průřezu vodiče (nepřímo úměrně), na materiálu vodiče (měrný elektrický odpor) a na teplotě - odpor vodičů se vzrůstající teplotou stoupá (kladný teplotní součinitel elektrického odporu). Elektrický odpor má vždy kladnou hodnotu. Dobré vodiče kladou malý odpor, špatné vodiče kladou velký odpor.

**Elektrický odpor** lze určit z vlastností vodiče pomocí vztahu

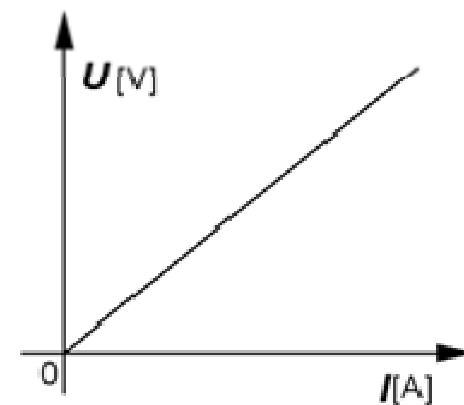
$$R = \frac{\rho l}{S} \quad [R] = \Omega \text{ (ohm)}$$

kde  $\rho$  je měrný el. odpor (rezistivita) materiálu,  $l$  je délka vodiče a  $S$  obsah příčného průřezu vodiče.

K výpočtu lze také použít Ohmova zákona  $R = \frac{U}{I}$

**Ohmův zákon** je jeden ze základních fyzikálních zákonů, který vyjadřuje závislost proudu mezi dvěma body na vodiči na přiloženém napětí a na odporu vodiče:

$$I = \frac{U}{R} \quad U = I \cdot R$$



Voltampérová charakteristika

Zákon platí pro stejnosměrný i střídavý proud s tou výhradou, že  $U$  a  $I$  jsou komplexní čísla a místo  $R$  se užívá označení  $Z$ , které znamená impedanci (včetně imaginárních složek).

**Měrný odpor** homogenního vodiče stálého průřezu lze určit ze vztahu

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

kde  $R$  je odpor vodiče,  $S$  je obsah kolmému průřezu a  $l$  je délka vodiče.

**Závislost elektrického odporu vodiče na teplotě** lze vyjádřit lineárním vztahem

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

kde  $R_0$  je odpor vodiče při normální teplotě,  $\alpha$  je teplotní součinitel elektrického odporu a  $\Delta t$  je teplotní rozdíl.

**Závislost rezistivity na teplotě** lze v technicky běžném rozsahu teplot přibližně vyjádřit lineární závislostí:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t)$$

kde  $\rho_0$  je počáteční rezistivita,  $\Delta t$  je rozdíl teplot a  $\alpha$  je teplotní součinitel elektrického odporu.

Za nízkých teplot může elektrický odpor i rezistivita u některých látek klesnout na nulu. Takovým látkám se říká **supravodiče**.

## Příklad

Cívka má 3000 závitů o středním průměru 1,5 cm a je navinuta z měděného drátu o průměru 0,6 mm. Při provozu se její teplota zvýšila z 20 °C na 60 °C. Na jakou hodnotu vzrostl objem cívky.  $\rho_{\text{Cu}} = 4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$   $\alpha_{\text{Cu}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$

$$n = 3000$$

$$d_c = 1,5 \text{ cm} = 0,015 \text{ m}$$

$$d_z = 0,6 \text{ mm} = 0,0006 \text{ m}$$

$$\Delta t = 60 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 40 \text{ °C}$$

$$\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$$

$$\rho_0 = 4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

$$R_0 = \rho_0 \cdot l / S = n \cdot \pi \cdot d_c / \pi \cdot d_z = 8,5 \Omega$$

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta t] = \underline{9,9 \Omega}$$

## Ohmův zákon pro celý obvod

V uzavřeném elektrickém obvodu prochází proud všemi částmi obvodu, tzn. spojovacími vodiči, spínačem a spotřebičem, ale také zdrojem napětí. Přitom všechny části obvodu kladou procházejícímu proudu elektrický odpor. Odpor, který klade proudu zdroj napětí, nazýváme vnitřní odpor zdroje ( $R_i$ ).

Je-li  $R$  odpor elektrického spotřebiče, spojovacích vodičů a spínače a  $R_i$  vnitřní odpor zdroje, pak celkový odpor uzavřeného obvodu je  $R + R_i$ . Při elektromotorickém napětí  $U_e$ , prochází celým uzavřeným obvodem proud

$$U_e = IR + IR_i \qquad I = \frac{U_e}{R + R_i}$$

Vztah vyjadřuje **Ohmův zákon pro celý obvod**.

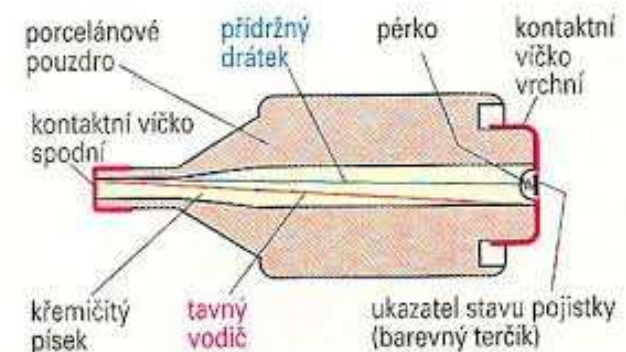
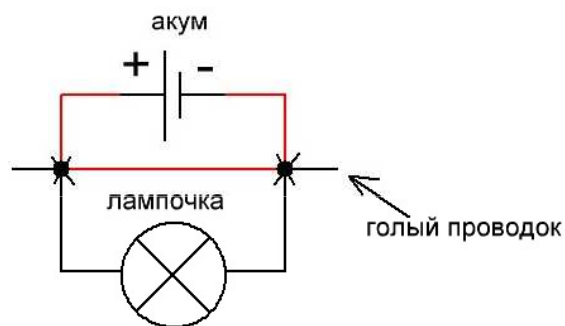
Vnitřní odpor hraje významnou roli v případě tzv. **zkratových proudů**. Jestliže vnější odpor (např. spotřebiče) klesne na hodnotu daleko menší než je hodnota vnitřního odporu, pak hovoříme o **spojení nakrátko** neboli **zkratu**. Obvodem pak prochází zkratový proud  $I_z$ , pro jehož velikost vychází z Ohmova zákona pro celý obvod

$$I_z = \frac{U_e}{R_i}$$



Zkrat nastává přímým vodivým propojením pólů zdroje (tzv. spojení nakrátko), např. když se poškodí izolace přívodních vodičů nebo vodičů uvnitř spotřebiče a dojde k jejich vzájemnému dotyku. Zkrat může způsobit i vodivá kapalina (elektrolyt), dostane-li se do styku s vodiči.

Při zkratu je elektrickému proudu kladen velmi malý odpor, takže velikost proudu (tzv. nadproud) může být vysoká a ve vodiči může vznikat velké teplo. Následkem tepla vznikajícího během zkratu může dojít k poškození zdroje nebo přívodních vodičů nebo celého spotřebiče. Nacházejí-li se vodiče blízko hořlavých materiálů, mohou se tyto vysokou teplotou zapálit. U chemických zdrojů dochází také k rychlému vybití těchto zdrojů - k rychlému přenosu elektrického náboje mezi elektrodami, a tím ke snížení elektrického napětí mezi nimi. Zahřátí chemikálií uvnitř zdroje může vést k nežádoucím chemickým reakcím a poškození elektrod a v některých případech až k explozi.



Proto se do elektrických sítí zařazují **pojistky** nebo **jističe**, které obvod při zkratu včas přeruší.

## Příklad

Ke zdroji o elektromotorickém napětí 3 V a vnitřním odporu 1,2 Ω je připojena žárovka o odporu 8 Ω. Napětí na svorkách žárovky je 2,4 V. Určete odpor přívodních vodičů.

$$U_e = 3 \text{ V}$$

$$U_s = 2,4 \text{ V}$$

$$R_i = 1,2 \text{ } \Omega$$

$$R_z = 8 \text{ } \Omega$$

$$R_v = ?$$

Zdroj + žárovka + vodiče = sériový obvod.

$$U_e = (R_z + R_v + R_i) \cdot I$$

$$I = U_s / R_z = 2,4 / 8 = 0,3 \text{ A}$$

$$R_v = (U_e - (R_i \cdot I + U_s)) / I = (3 - (1,2 \cdot 0,3 + 2,4)) / 0,3 = \underline{0,8 \text{ } \Omega}$$

## Příklad

Akumulátorová baterie je nabíjena proudem 2,6 A a na svorkách baterie je napětí 12,5 V. Elektromotorické napětí baterie je 12 V. Určete vnitřní odpor baterie.

$$U_e = 12 \text{ V}$$

$$U = 12,5 \text{ V}$$

$$I = 2,5 \text{ A}$$

$$R_i = ?$$

Nabíjecí proud má opačnou polaritu.

$$U - U_e = I \cdot R_i$$

$$R_i = (U - U_e) / I = (12,5 - 12) / 2,5 = \underline{0,2 \text{ } \Omega}$$

## Práce a výkon elektrického proudu

Při přemísťování volných elektronů ve vodiči konají síly elektrického pole **práci**. Tato práce je mírou elektrické energie přeměněné ve vodiči v jinou formu energie. Jestliže se ve vodiči, na jehož koncích je elektrické napětí  $U$ , přemístí částice s nábojem  $Q$ , vykonají síly elektrického pole práci

$$W = QU$$

Prochází-li vodičem konstantní proud  $I$  po dobu  $t$ , je elektrický náboj  $Q = I \cdot t$  a pro práci elektrického proudu ve vodiči platí

$$W = UI t$$

**Příkon spotřebiče**, definován jako

$$P_p = U \cdot I = R \cdot I^2$$

je mírou elektrické energie odebrané spotřebičem za jednu sekundu. **Výkon spotřebiče**  $P$  vyjadřuje užitečnou práci, kterou spotřebič vykoná za dobu jedné sekundy.

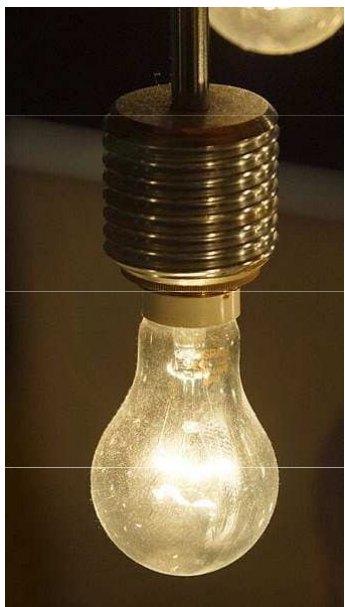
**Účinnost spotřebiče**  $\eta$

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{UQ}{U_e Q} = \frac{U}{U_e} = \frac{RI}{(R + R_i)I} = \frac{R}{R + R_i}$$

Obvyklým způsobem redukce výkonové ztráty je užívání tlustších vodičů a vyšších napětí. Ve speciálních aplikacích se používají supravodiče.

**Jouleovo teplo** vzniká ve vodiči průchodem elektrického proudu. Zahřívání vodiče lze vysvětlit předáváním části kinetické energie částic způsobujících elektrický proud (nejčastěji elektronů) částicím, které se elektrického proudu neúčastní (nejčastěji kladné ionty v pevných pozicích). Tím se zvyšuje tepelný pohyb těchto částic – vodič se zahřívá.

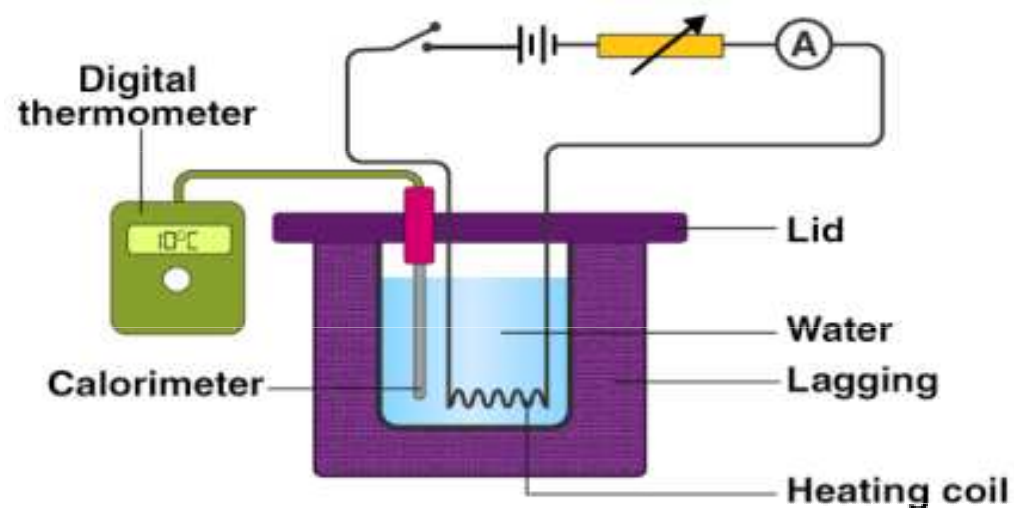
Velikost Jouleova tepla  $Q$  vznikajícího ve vodiči, jímž prochází elektrický proud po dobu  $t$  a na jehož koncích je napětí  $U$ , se vypočte podle **Jouleova zákona** (Lenz-Jouleova zákona):



$$Q = U \cdot I \cdot t$$

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

$$Q = \frac{U^2}{R} \cdot t$$



Tepelná energie  $Q$ , jednotkou tepla je  $J$  (Joule= $W \cdot s$ )

## Příklad

Jak dlouho se bude zahřívát 1,5 l vody z 20 °C na 100 °C na elektrickém vařiči o příkonu 600 W, je-li účinnost vařiče je 80 %.  $c = 4200 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$$V = 1,5 \text{ l} = 0,0015 \text{ m}^3$$

$$\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\Delta t = 100 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_p = 600 \text{ W}$$

$$\eta = 80 \% = 0,8$$

$$c = 4200 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\tau = ?$$

$$P = \eta \cdot P_p$$

$$Q = \eta \cdot P_p \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta t$$

$$t = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta t / (\eta \cdot P_p) = 1000 \cdot 0,0015 \cdot 4200 \cdot 80 / (600 \cdot 0,8) \\ = 1050 \text{ s} = \underline{17,5 \text{ min}}$$

## Příklad

Ponorným vařičem na napětí 220 V se zahřálo 0,5 l vody ze 20 °C na 100 °C za 8 minut. Určete příkon vařiče.  $c = 4200 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$$V = 0,5 \text{ l} = 0,0005 \text{ m}^3$$

$$\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\Delta t = 100 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_p = ?$$

$$\tau = 8 \text{ min} = 480 \text{ s}$$

$$c = 4200 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$P_p = U \cdot I$$

$$Q = U \cdot I \cdot \tau = P_p \cdot \tau = m \cdot c \cdot \Delta t = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta t$$

$$P_p = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta t / \tau = 1000 \cdot 0,0005 \cdot 4200 \cdot 80 / 480$$

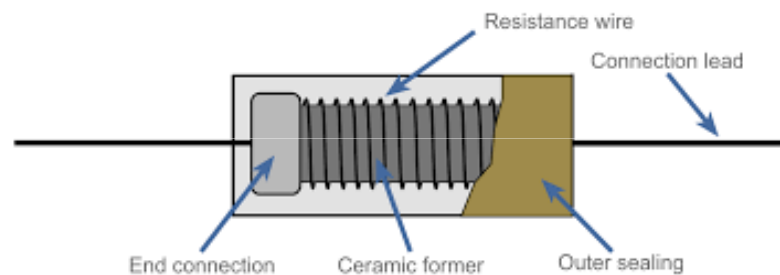
$$P_p = \underline{350 \text{ W}}$$

# Rezistor

**Rezistor** je pasivní elektrotechnická součástka projevující se v elektrickém obvodu v ideálním případě jedinou vlastností – elektrickým odporem. Důvodem pro zařazení rezistoru do obvodu je obvykle snížení velikosti elektrického proudu nebo získání určitého úbytku napětí. Rezistory se také mohou používat jako topné články, testovací zátěže pro generátory apod.

**Pevné rezistory** mají pevně danou hodnotu odporu, která se mírně mění pouze v závislosti na teplotě, procházejícím proudem a životnosti rezistoru.

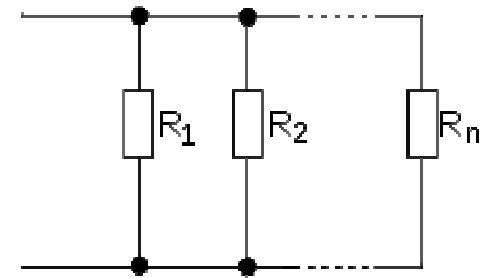
U **proměnných rezistorů** můžeme měnit jeho fyzikální veličinu (odpor) v určitém rozsahu, ty se používají k plynulému upravení činnosti dalších částí obvodu – potenciometr nebo odporový trimmer (např. nastavení hlasitosti, stmívání svítidel, nastavení teploty apod.), nebo jako senzory teploty (termistor), napětí (varistor), světla (fotorezistor), síly nebo chemických procesů.



# Řazení rezistorů

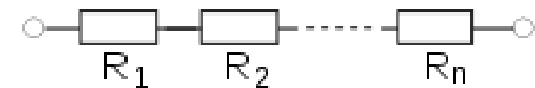
Při **paralelním řazení** je na všech rezistorech stejné napětí  $U$  a proud se dělí podle Ohmova zákona. Celkový odpor  $R_c$  je dán součtem vodivostí tedy převrácených hodnot jednotlivých odporů ( $1/R$ ).

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



Při **sériovém řazení** teče všemi rezistory stejný proud a napětí se rozloží na každý rezistor podle Ohmova zákona. Celkový odpor  $R_c$  je tady dán součtem jednotlivých odporů.

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

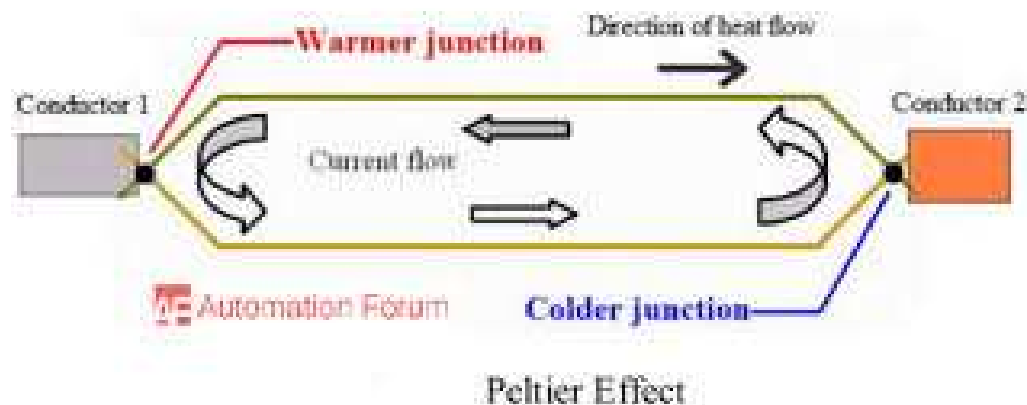
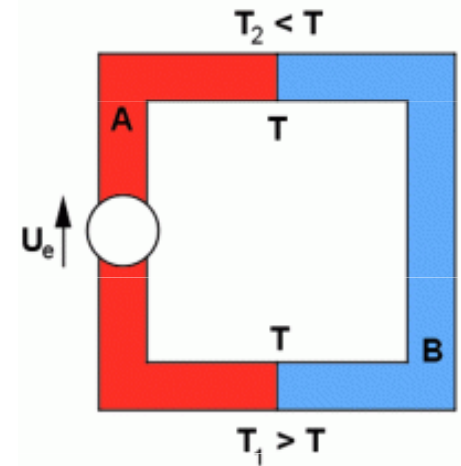




# Peltierův jev

Inverzní jev k Seebeckovu jevu je **jev Peltierův**. Jestliže do obvodu složeného ze dvou kovů zařadíme zdroj elektromotorického napětí, pak se jeden spoj kovů začne zahřívat a druhý ochlazovat. Rozdíl teplot mezi spoji závisí pouze na velikosti proudu, jenž obvodem protéká a na materiálech vodičů složeného obvodu.

Jestliže zdroj elektromotorického napětí vyvolá proud stejného směru jako u Seebeckova jevu, pak se začne ochlazovat ten spoj, který měl při Seebeckově jevu vyšší teplotu.



# Elektrický proud v polovodičích

**Odpor** polovodičů, uhlíku a některých speciálních slitin kovů se vzrůstající teplotou klesá (záporný teplotní součinitel elektrického odporu).

**Rezistivita** polovodičů klesá s teplotou přibližně podle exponenciální závislosti.

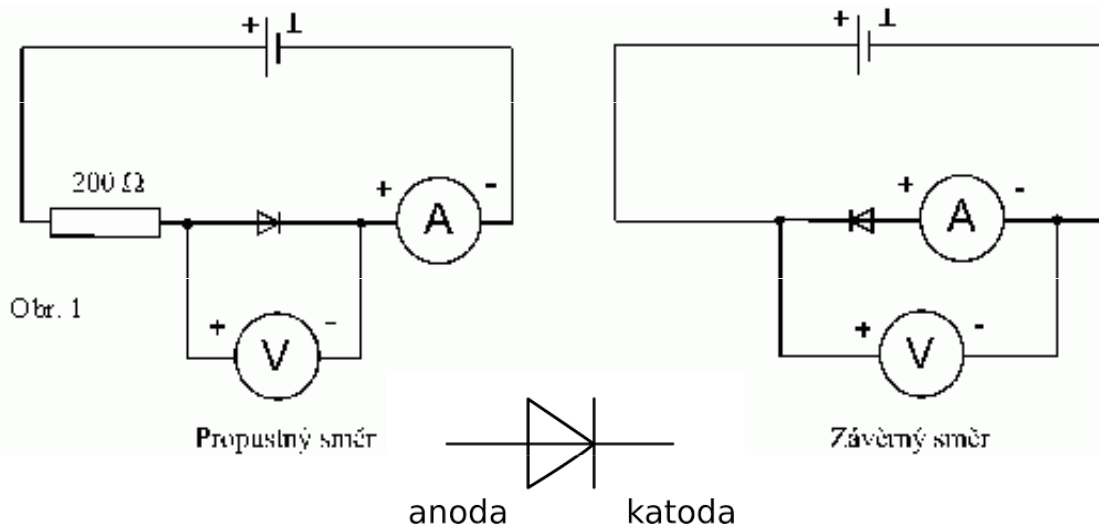
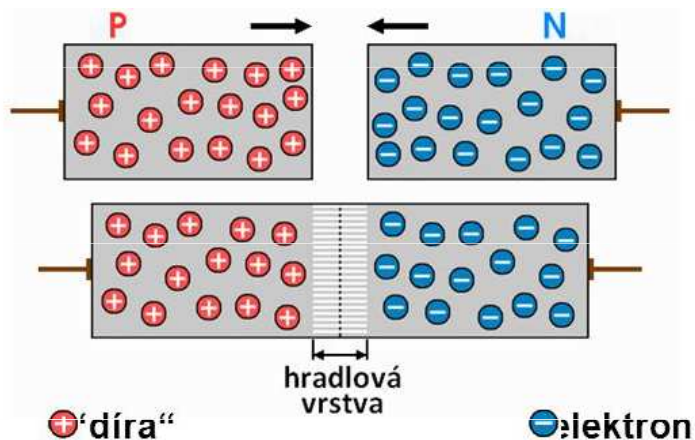
$$\rho \propto e^{-\frac{\textit{konst.}}{T}}$$

**Termistor** je v elektrotechnice typ součástky, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Termistor se používá například pro měření teploty. Pro převod změny odporu na teplotu musíme znát voltampérovou charakteristiku termistoru, která není lineární.

Princip **fotorezistoru** je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu: světlo (foton) předá elektronu ve valenční sféře energii, tím elektron získá dostatek energie k překonání zakázaného pásu a přeskočí z valenčního pásu do vodivostního. Na jeho místě vznikla díra. Takto vzniklé volné elektrony přispívají ke snížení elektrického odporu (zvýšení elektrické vodivosti). Čím více světla na fotorezistor dopadá, tím vzniká více volných elektronů a zvyšuje se tím elektrická vodivost.

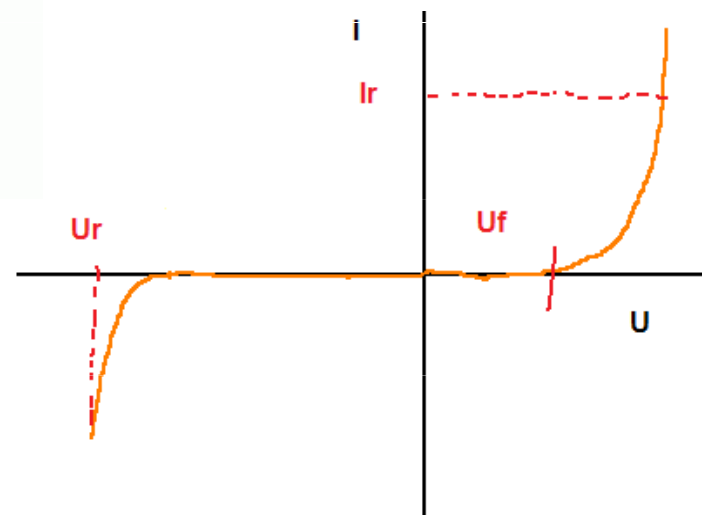
**Polovodičová dioda** se skládá ze dvou příměsových polovodičů - jeden polovodič je typu N (katoda) a druhý polovodič je typu P (anoda). Na rozhraní polovodičů vznikne rekombinací elektronů a děr přechod P-N (hradlová vrstva) bez volných nábojů.

Po připojení zdroje napětí v ideálním případě propouští proud pouze jedním směrem, v opačném směru proud neprochází.



Otr. 2

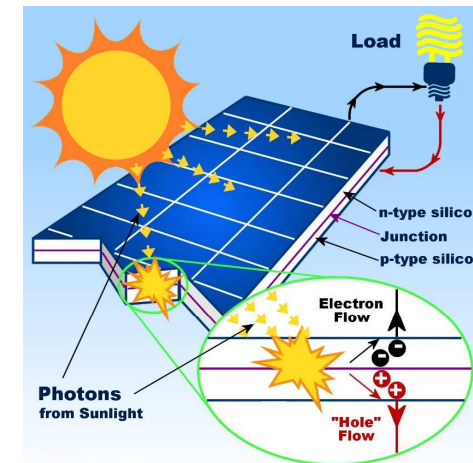
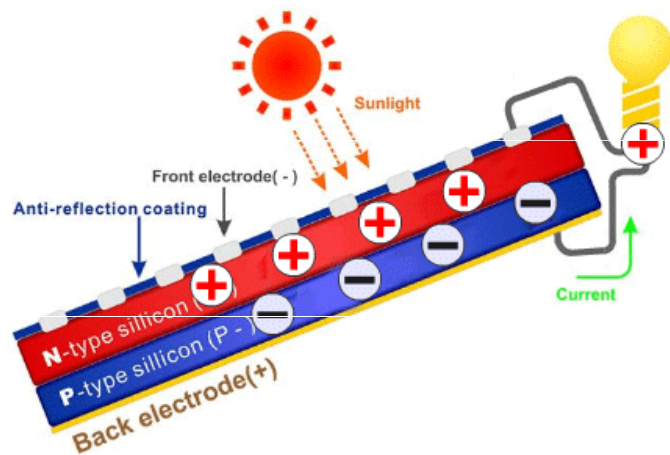
Podle konstrukce slouží k usměrňování elektrického proudu (přeměna střídavého proudu na stejnosměrný proud), ke stabilizaci elektrického napětí (Zennerova dioda) nebo k signalizaci průchodu proudu.



$U_r$  - průrazné napětí (nesmíme překročit)  
 $U_f$  - napětí hradlové vrstvy (0,5V)  
 $I_r$  - maximální přípustný proud

**Fotoelektrický jev** lze využít pomocí velkoplošných panelů s fotočlánky k přímé přeměně solární energie na elektrickou, využívají ho i jiné elektronické součástky např. fotodioda nebo fototranzistor.

**Fotovoltaický (sluneční, solární) článek** je vlastně polovodičová dioda, jejímž základem je tenká křemíková destička s vodivostí typu P, na které se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N. Obě vrstvy jsou odděleny tzv. přechodem P-N.

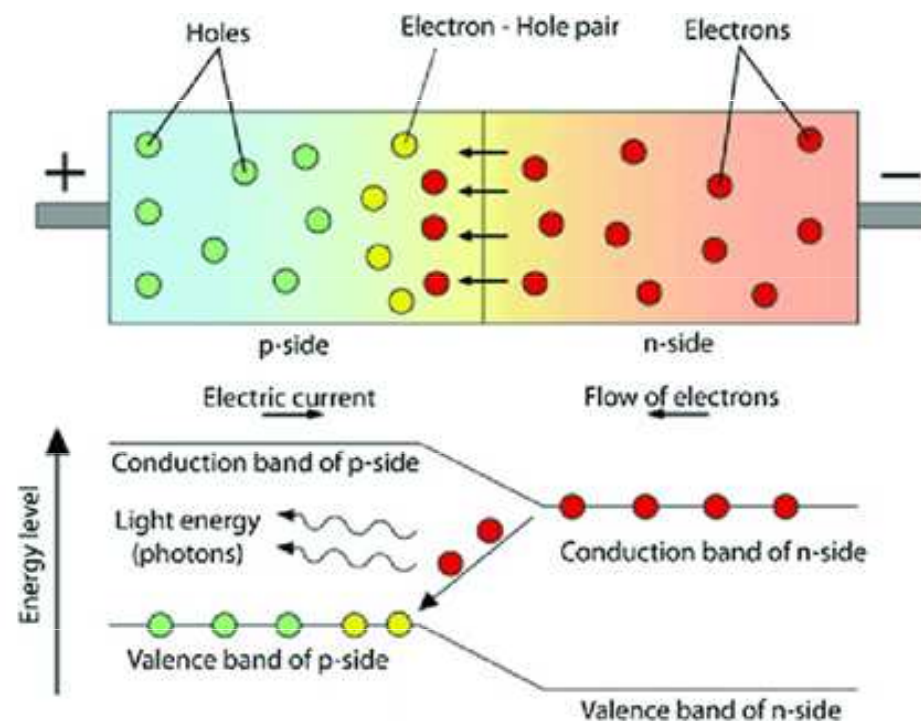
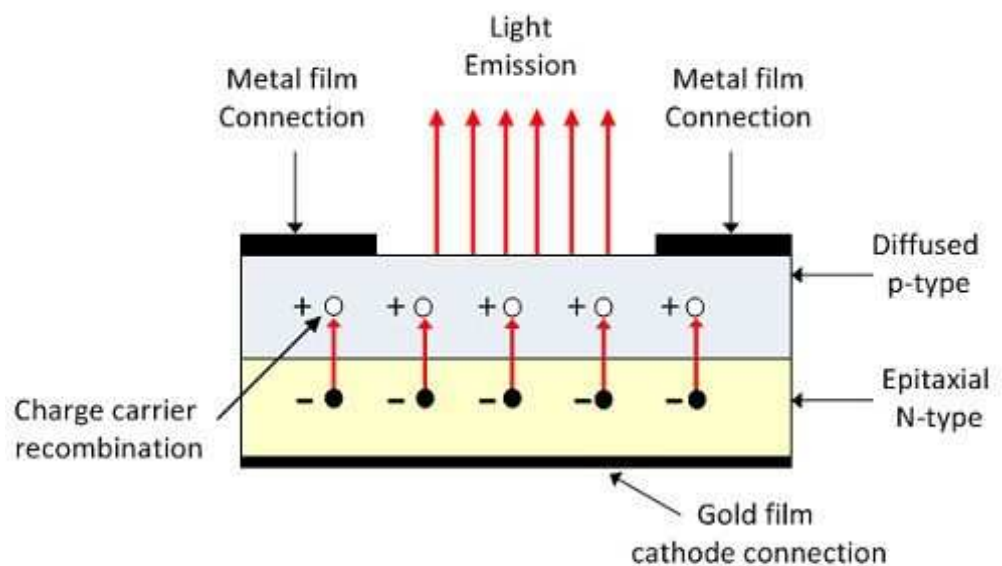


Foton s dostatečnou energií může v polovodičovém materiálu uvolnit elektron z valenčního do vodivostního pásu. Na jeho původním místě vznikne tzv. díra (elementární kladný náboj). Je-li v polovodičovém materiálu vytvořen PN přechod (dioda), pohybují se tyto náboje směrem k elektrodě se stejnou polaritou. Jsou-li elektrody propojeny vnějším obvodem, putují elektrony k opačné elektrodě, kde rekombinují s děrami a vnějším obvodem prochází elektrický proud.

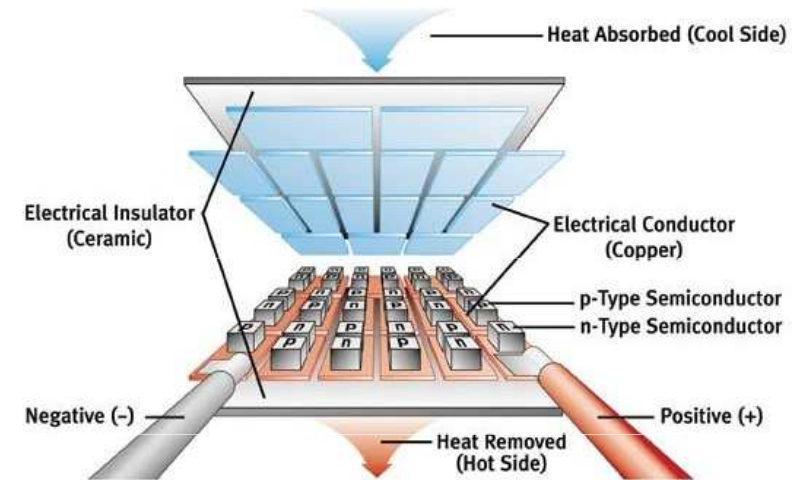
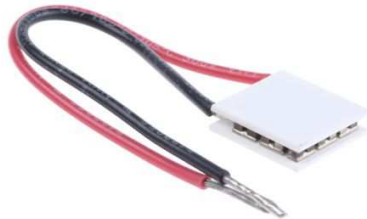
# LED diody

LED (Light-Emitting Diode, elektroluminiscenční dioda) je označení pro diodu, která emituje světlo, případně infračervené nebo ultrafialové záření, čímž se liší od standardní diody. LED vyzařuje z obnaženého PN přechodu, a vede stejnosměrný proud pouze jedním směrem. Na rozdíl od žárovky dosahuje vysoké účinnosti, je mechanicky odolná, levná na výrobu, a proto je čím dál více využívána (kontrolky, displeje, osvětlení).

LED Color	Max. Wavelength
Ultraviolet	405nm
Deep Blue	420nm
Blue	450nm
Royal Blue	470 nm
Green	525nm
Amber	590nm
Orange-Red	615nm
Red	625nm
Deep Red	660nm
Far Red	730nm
White	Various Low K ratings



**Thermoelektrické chlazení** je založeno na Peltierově jevu.



## Další přeměny elektrické energie v materiálech

**Elektrostrikce** je fyzikální jev při kterém vlivem vnějšího elektrického pole, či pod vlivem změny tohoto elektrického pole dochází k deformaci dielektrik. Deformace bývá přímo úměrná druhé mocnině intenzity elektrického pole a nedochází ke změně směru deformace s otočením směru elektrického pole.

**Nepřímý piezoelektrický jev** je jev, kdy se piezoelektrický krystal ve vnějším elektrickém poli deformuje.

**Elektrokolorický jev** je fenomén materiálů vykazujících vratnou změnu teploty za aplikovaného elektrického pole. Často je tento jev považován za fyzikálně inverzní k pyroelektrickému jevu. Mechanismus jevu není plně prozkoumaný.