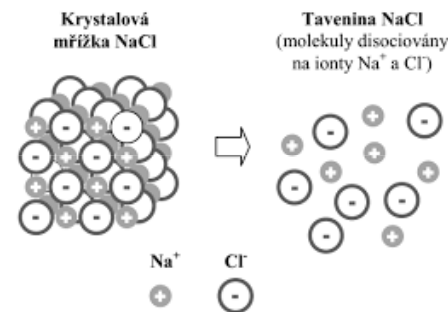
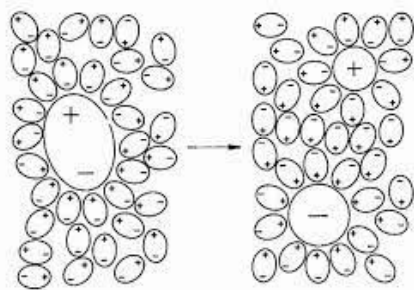


# Elektrický proud v kapalinách

Kapaliny v čistém stavu jsou zpravidla izolanty. **Elektrolyty** jsou roztoky iontových sloučenin v polárních rozpouštědlech nebo jejich taveniny, které vedou elektrický proud. V elektrolytech nepřenášejí proud elektrony jako u kovů (vodičů I. řádu), ale **ionty**. Ionty jsou proti elektronům větší, jejich pohyblivost je menší, takže vodivost je u elektrolytů nižší než u kovů. Proto jsou elektrolyty označovány jako vodiče II. řádu. K ionizaci elektricky neutrální atomů či molekul je tedy nutné dodat energii.

Krystalické iontové sloučeniny – soli rovněž mohou vést elektrický proud, a to přenosem iontů například přes neobsazené uzly (vakance) jejich krystalové mřížky. Takové materiály (obvykle tuhé roztoky) nazýváme **tuhými elektrolyty**.



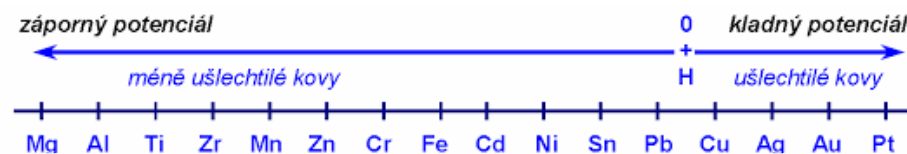
**Schopnost rozpouštědel vytvářet vodivé roztoky** závisí na jejich **relativní permitivitě**  $\epsilon_r$ . Čím je relativní permitivita vyšší, tím je schopnost rozpouštědla vytvářet vodivé roztoky lepší. Např. voda má  $\epsilon_r = 81$ , kdežto toluen jen  $\epsilon_r = 2,4$ , takže toluen vodivé roztoky prakticky nevytváří.

# Vznik elektrického proudu v kapalinách

Samotná existence volných nosičů náboje – iontů – však pro vznik elektrického proudu nestačí. V elektrolytu je třeba vytvořit elektrické pole, které působí elektrickými silami na ionty a uvádí je do uspořádaného pohybu.

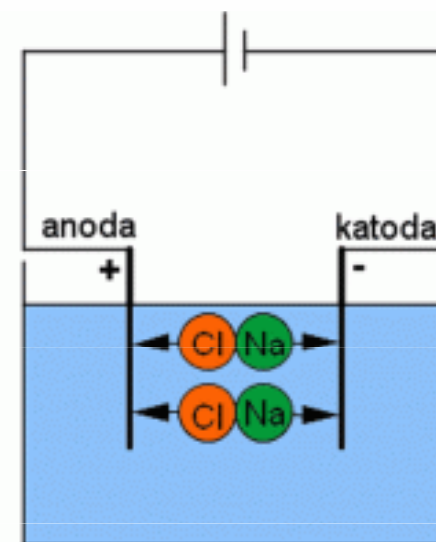
**Elektroda** je elektrický vodič v kontaktu s nekovovou částí elektrického obvodu (např. vakuem nebo prostorem naplněným plynem, elektrolytem apod.).

**Katoda** je elektroda, na které probíhá redukce.



**Anoda** je elektroda, na které probíhá oxidace.

Elektrické pole, které vznikne v elektrolytu mezi **anodou** (spojenou s kladným pólem zdroje) a **katodou** (spojenou se záporným pólem zdroje), působí na ionty elektrostatickými silami a vyvolává jejich uspořádaný pohyb: **elektrický proud**. Kationty se pohybují směrem ke katodě, anionty k anodě.



Každá z obou elektrod může mít různý náboj podle toho, jestli se jedná o **elektrolýzu** (na elektrody napětí vkládám), nebo o **galvanický článek** (napětí vzniká).

**Silné elektrolyty** — obsahují pouze ionty (disociace proběhla zcela).

**Slabé elektrolyty** — obsahují jak ionty, tak nedisociované molekuly.

**Měrná vodivost roztoků**  $\gamma$  silně závisí na koncentraci. V oboru malých koncentrací vodivost s jejím zvyšováním vzrůstá, po dosažení určitého maxima pak dále klesá.

$$[\gamma] = \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$$

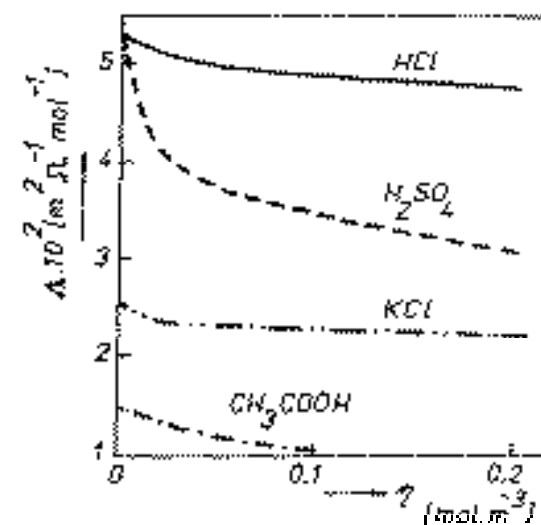
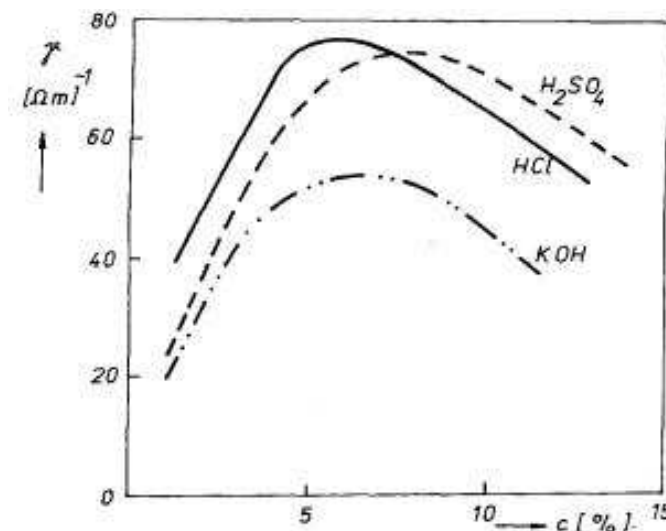
**Molární vodivost**  $\Lambda$  číselně vyjadřuje měrnou vodivost roztoku, v němž na jednotkový objem připadá jeden mol částic realizujících vodivost.

$$\Lambda = \frac{\gamma}{\eta} \quad [\Lambda] = \text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$\eta$  je molární koncentrace roztoku.

**Limitní molární vodivost**  $\Lambda^0$

$$\Lambda^0 \equiv \Lambda_{\infty} = \lim_{c \rightarrow 0} \Lambda$$



## Kohlrauschův zákon o nezávislé vodivosti iontů

měření  $\lambda_i$  :

- 1) pohyblivosti iontů  $U_i$  :  $\lambda_i = |z_i| \cdot F \cdot U_i$
- 2) převodová čísla  $t_i$  :  $t_i = q_i/q = v_i \lambda_i / \Lambda$

$$\Lambda^{\circ} = v_{+} \lambda_{+}^{\circ} + v_{-} \lambda_{-}^{\circ}$$

využití měření vodivosti – titrace, čistota vody, disociační konstanty, kinetika.

Výsledný elektrický proud v elektrolytu závisí na jeho teplotě, protože s rostoucí teplotou se pohyblivost iontů zvyšuje. Závisí také na koncentraci roztoku, protože s rostoucí koncentrací vodivost roztoku roste až k maximální hodnotě, pokud se roztok nestane nasyceným.

Na elektrodách odevzdávají ionty svůj náboj a mění se v elektricky neutrální atomy nebo molekuly, které se vylučují na povrchu elektrod nebo chemicky reagují s materiálem elektrody nebo elektrolytem. Látkové změny vyvolané průchodem proudu elektrolytem na elektrodách se nazývají **elektrolýza**.



# Galvanické články

**Elektrochemický článek** se skládá ze dvou poločlánků, tvořených např. kovovou elektrodou ponořenou do roztoku iontu elektrodového kovu. Poločlánky jsou navzájem vodivě propojeny, např. solným můstkem. V každém poločlánku se nachází **oxidovaná a redukovaná složka**, které spolu vytvářejí **redoxní pár**.

Potenciál kovové elektrody, jež vysílá do roztoku kationty je dán **Nernstovou rovnicí**:

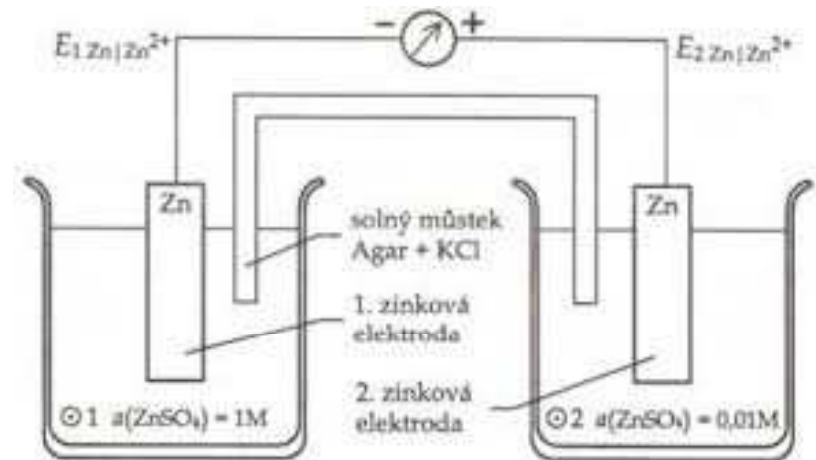
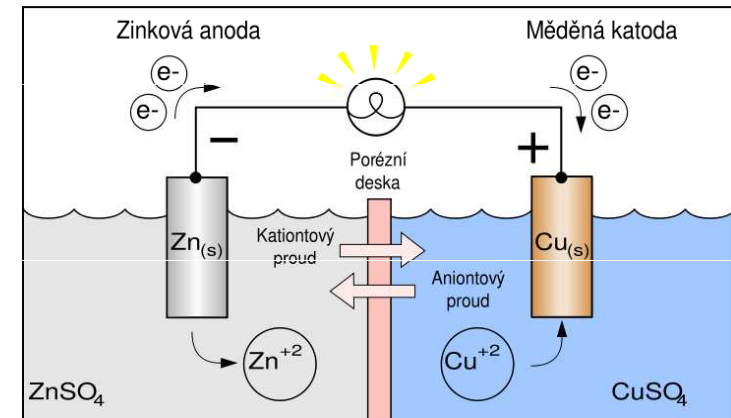
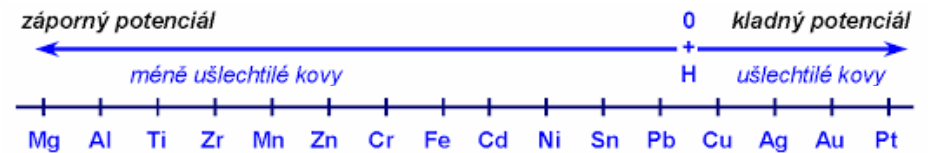
$$E = - RT/nF \cdot \ln c$$

kde R je univerzální konstanta, n je počet elektronů tvořících rozdíl mezi kovem a iontem, c je koncentrace iontu

**Koncentrační galvanický článek** je tvořen stejnými elektrodami, které se liší pouze koncentrací elektrolytu.

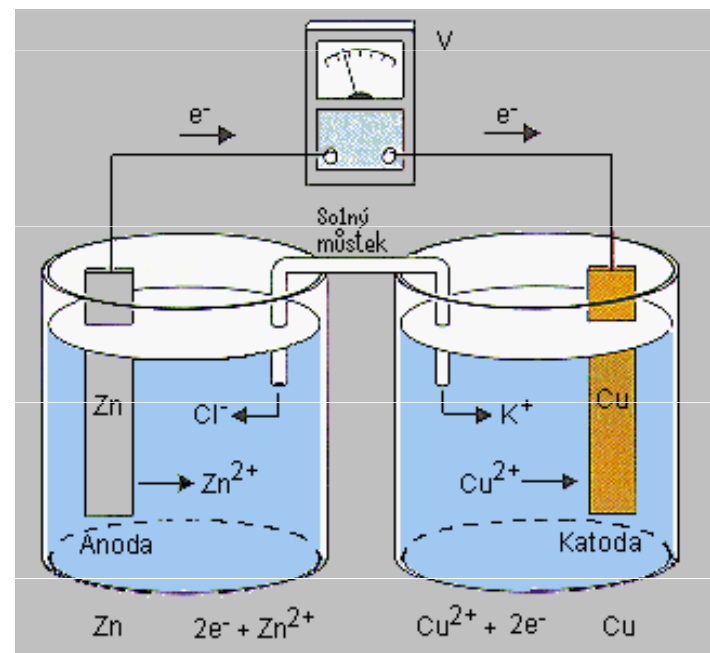
$$E = E^0 - RT/2F \ln (c_2/c_1)$$

$E^0$  = standardní redoxní potenciál

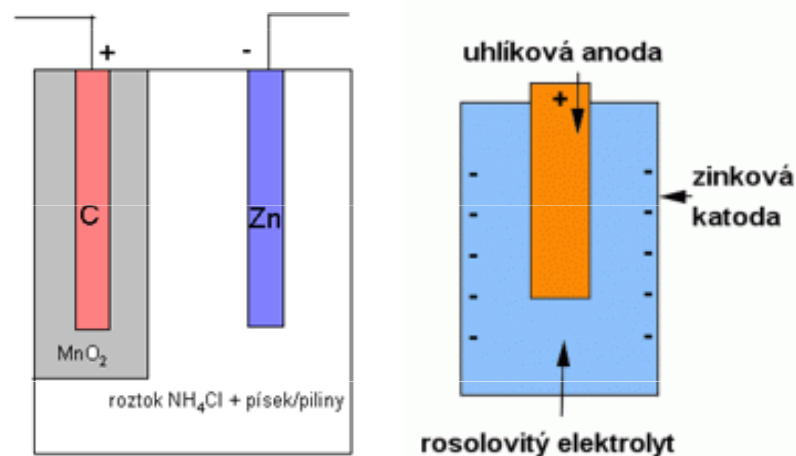


Jestliže k článku připojíme spotřebič, obvodem prochází elektrický proud, napětí na svorkách zatíženého článku klesne na svorkové napětí. Proud ve vnějším obvodu je tvořen elektrony, v elektrolytu ionty a na povrchu elektrod probíhá výměna nábojů.

**Daniellův článek** – se skládá ze zinkové elektrody ponořené do vodného roztoku  $ZnSO_4$  a měděné elektrody ponořené do vodného roztoku  $CuSO_4$ , oba elektrolyty jsou od sebe odděleny pórovitou stěnou, která zabraňuje smíchání, ale umožňuje přechod iontů. Elektromotorické napětí tohoto článku je 1,1V. Z katody uvolňují do roztoku ionty  $Zn^{2+}$  a vzniká síran zinečnatý, článek se postupně znehodnocuje.

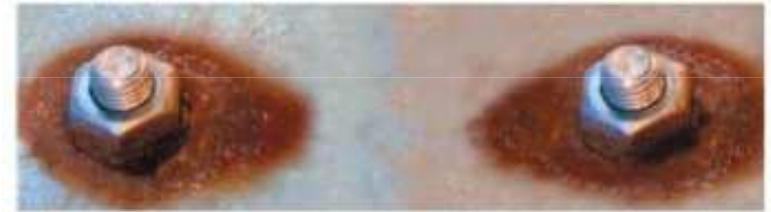


**Suchý článek** je druh galvanických článků, elektromotorické napětí je asi 1,5V, uvnitř probíhá elektrolýza, při ní se zinková elektroda rozpouští a na uhlíkové katodě se vylučuje vodík, který reaguje s burelem za vzniku vody, článek se postupně znehodnocuje.

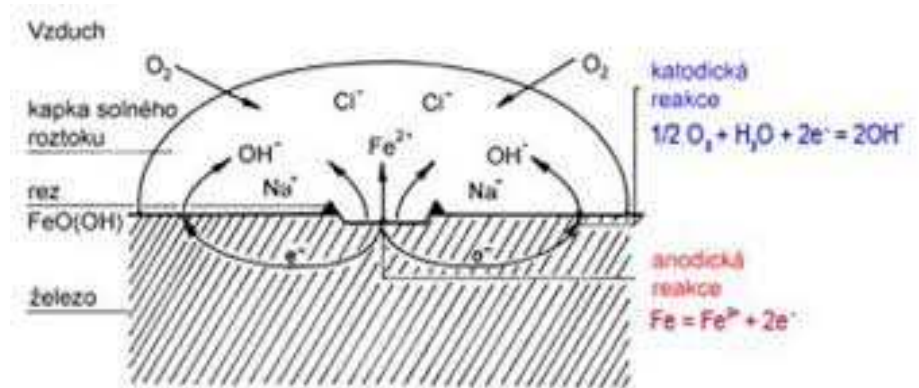


# Elektrochemická (galvanická) koroze

Vzniká spojením dvou odlišných kovů a jejich vystavením koroznímu prostředí. Ušlechtilejší kov (katoda) koroduje pomaleji než by korodoval sám, kov méně ušlechtilý (anoda) naopak koroduje rychleji. Tento jev je využíván v praxi při tzv. katodické ochraně obětovanou anodou. Neúmyslná galvanická koroze je však většinou jevem nežádoucím.

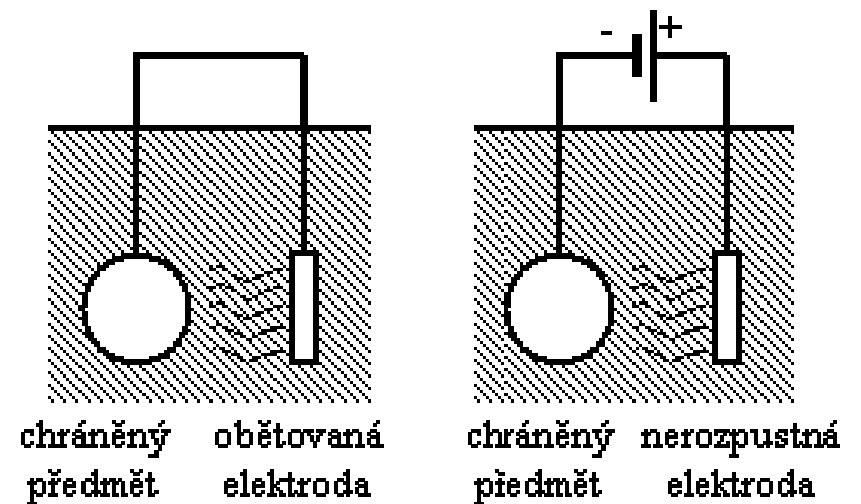


Obr. 1 Příklad bimetalické koroze šroubů z korozivzdorné oceli použitých pro spojení žárově zinkovaných dílů



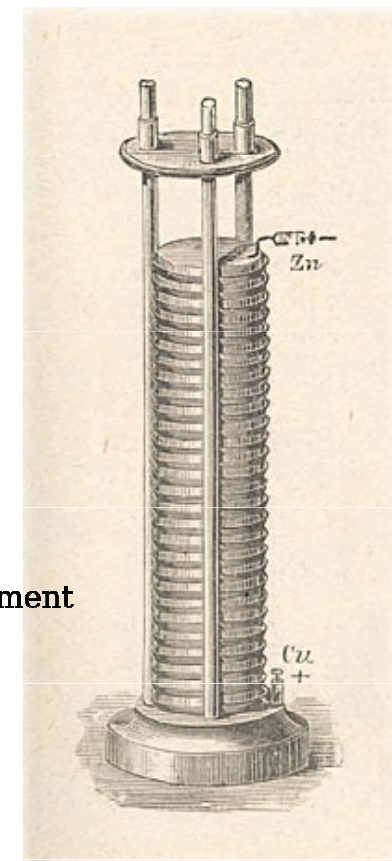
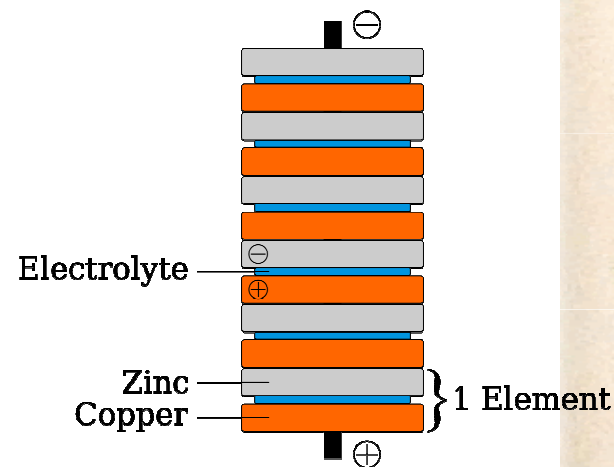
**Katodická ochrana** se provádí dvěma způsoby:

- pomocí obětované elektrody z materiálu s nižším elektrodovým potenciálem, než má chráněný materiál (pro ocel např. Zn, Al, Mg)
- pomocí stejnosměrného elektrického zdroje, kdy chráněný předmět je připojen na katodu a anoda je zhotovena z relativně málo rozpustného vodivého materiálu (grafit, olovo, titan, korozivzdorné oceli).



# Voltův sloup

**Voltův sloup** byl sestaven A. Voltou v roce 1800. Šlo se o galvanickou baterii tvořenou několika sériově zapojenými elektrickými články se zinkovou a měděnou elektrodou. Skládal se z navrstvených měděných a zinkových plíšků, proložených plátkou kůže, textilie či kartonu, které byly provlhčeny roztokem nebo kyseliny sírové nebo slanou vodou.



# Elektrolytický kondenzátor

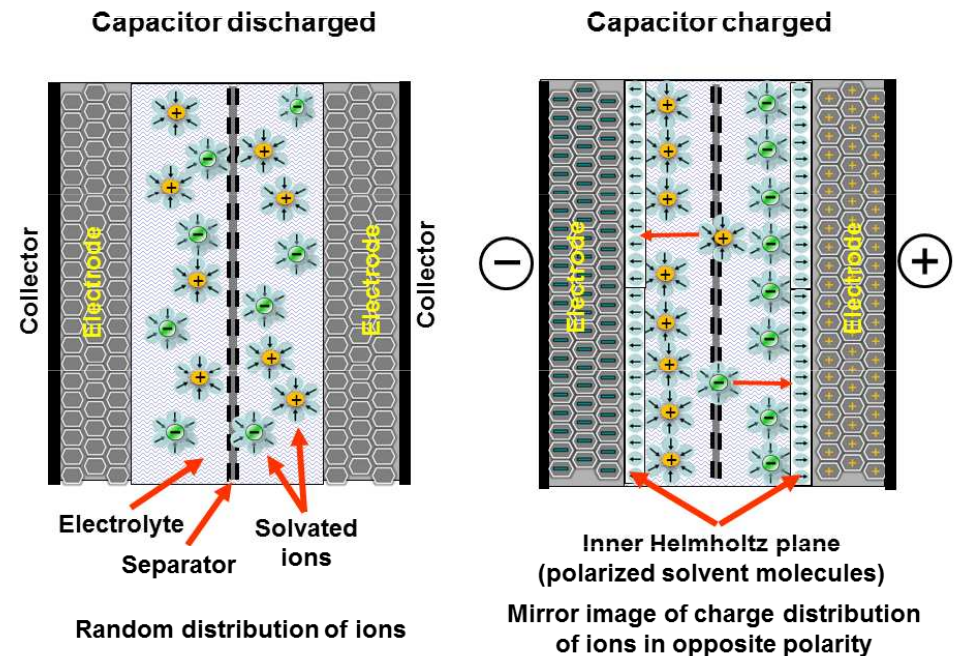
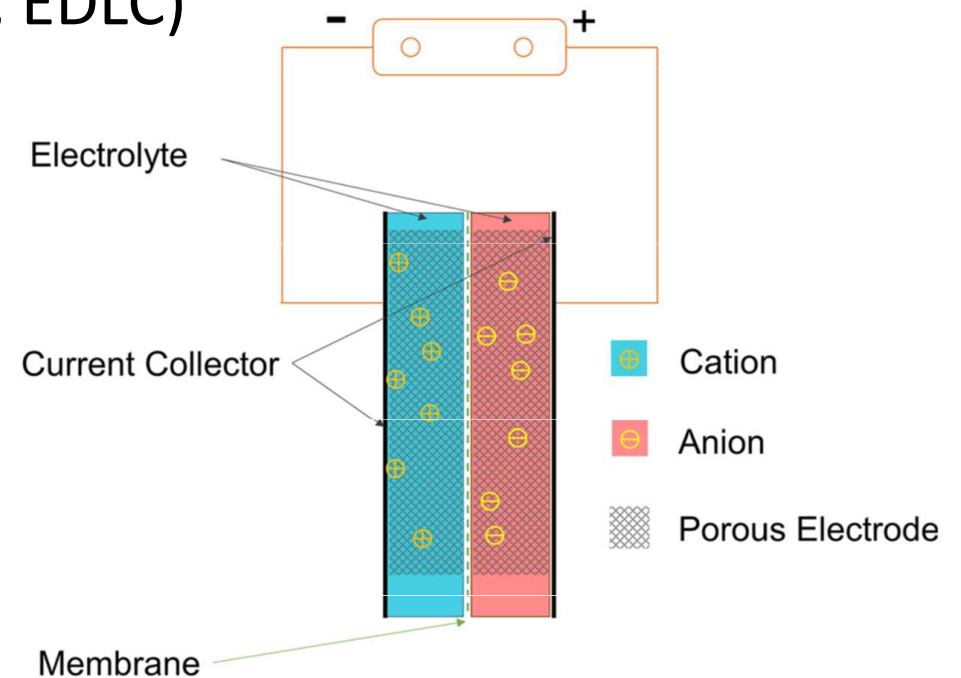
**Elektrolytický kondenzátor** tvoří dvě hliníkové nebo tantalové fólie, mezi nimiž je vrstva papíru napuštěná elektrolytem, na jedné fólii se elektrochemicky vytvoří tenká vrstva oxidu, která slouží jako dielektrikum, vzhledem k malé tloušťce dielektrika mají tyto kondenzátory poměrně velkou kapacitu – řádově  $10^{-6}$  F až  $10^{-2}$  F. Zoxidovaná fólie elektrolytického kondenzátoru musí být zapojována do místa s vyšším potenciálem, jinak by se kondenzátor zničil (může dojít i k výbuchu, při němž se kondenzátor roztrhne).



# Superkondenzátor (ultrakondenzátor, EDLC)

**Superkondenzátory** jsou kondenzátory s vysokou kapacitou, ale nízkým limitním napětím. Umožňují uchovat 10 – 100x více energie než elektrolytické kondenzátory, poskytují elektrický náboj rychleji než baterie a dovoluje více nabíjecích cyklů než akumulátory.

Perspektivní je jejich využití v automobilech, autobusech, vlacích, jeřábech a výtazích.



# Membránový potenciál

**Membránový potenciál (klidový membránový potenciál)** je rozdíl elektrického potenciálu mezi dvěma stranami polarizované polopropustné (biologické) membrány. Průchod některých iontů přes polopropustnou membránu není možný. Klidový membránový potenciál vzniká jako následek působení elektrochemického gradientu malých iontů a protonů.

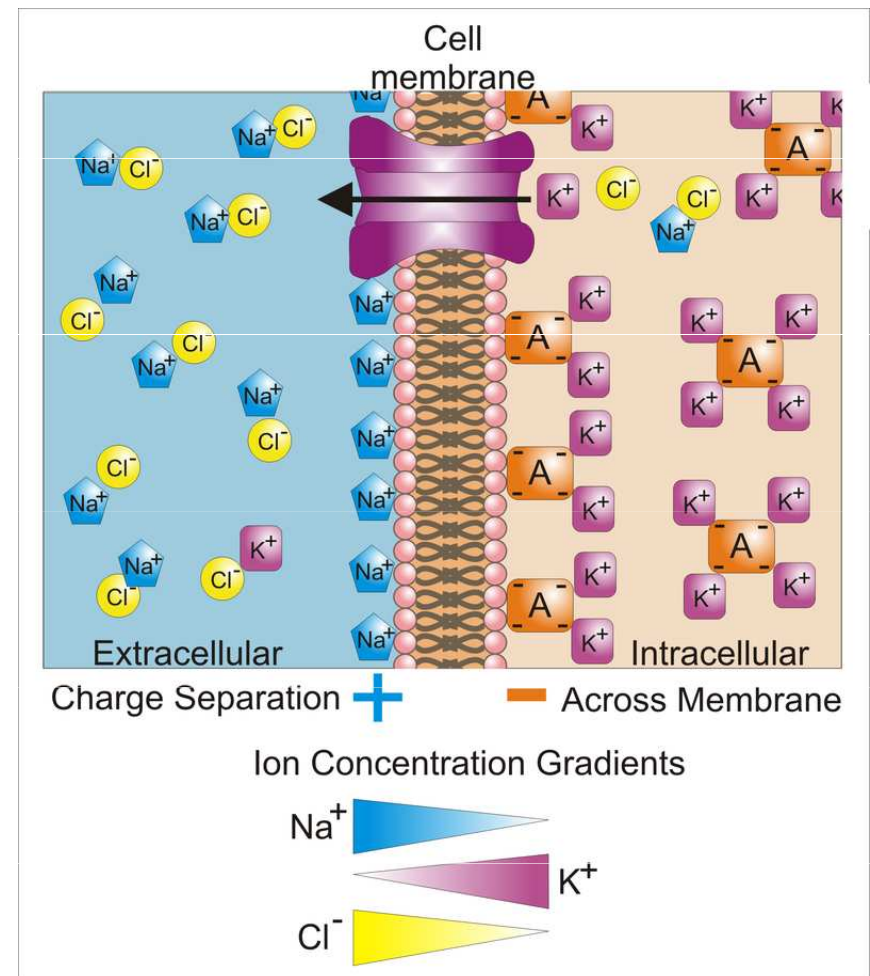
Výpočet membránového potenciálu:

*Nernstova rovnice* (propustnost jen pro K<sup>+</sup> ionty)

$$E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[K^+]_{outside}}{[K^+]_{inside}}$$

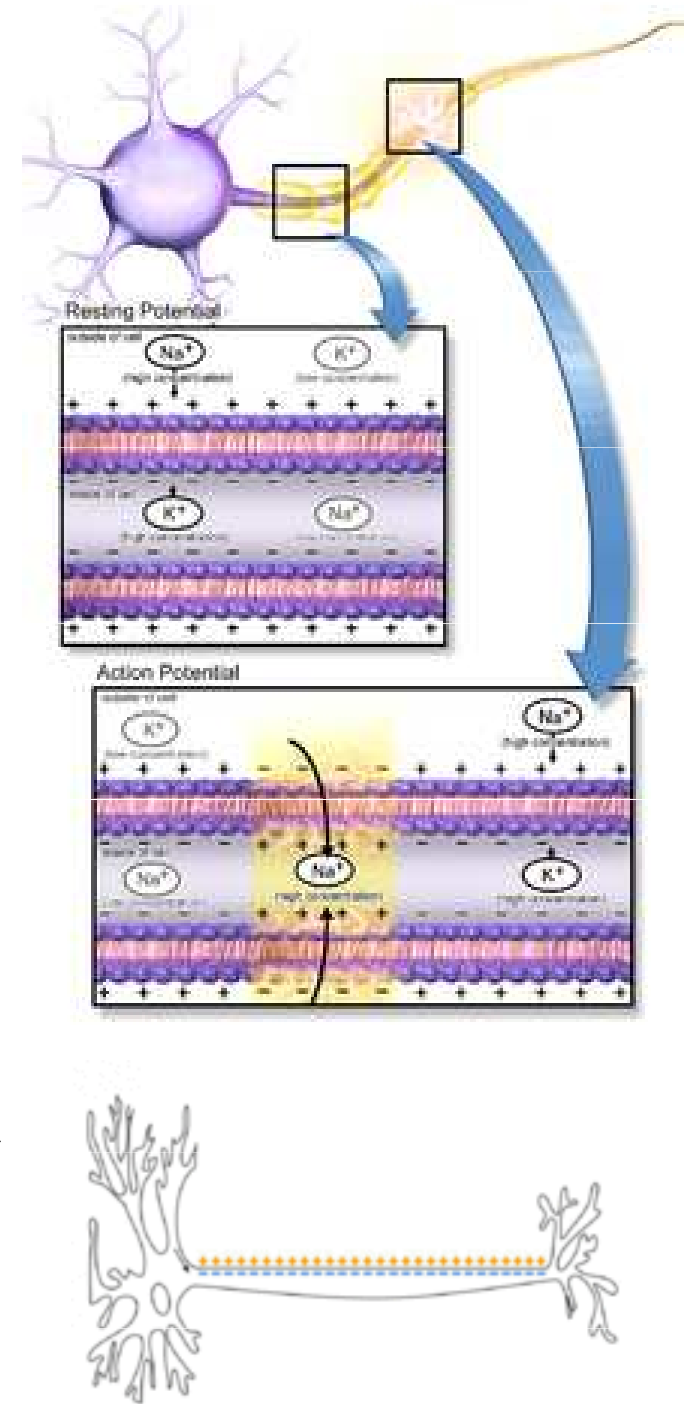
*Goldmannova rovnice* (propustnost i pro ostatní ionty)

$$E_m = \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{P_A \cdot [A]_o + P_B \cdot [B]_o}{P_A \cdot [A]_i + P_B \cdot [B]_i} \right)$$



# Membránový potenciál

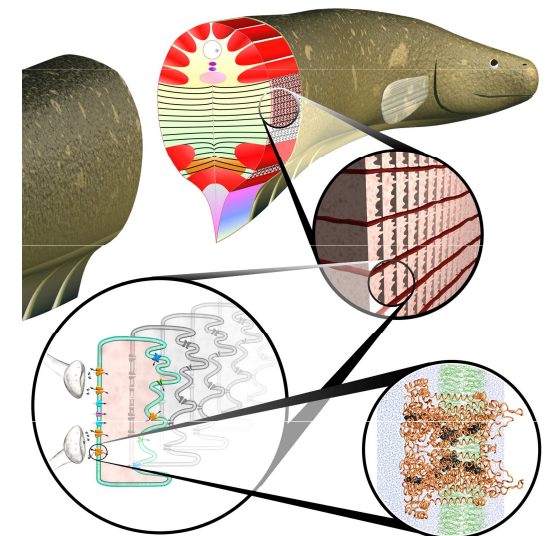
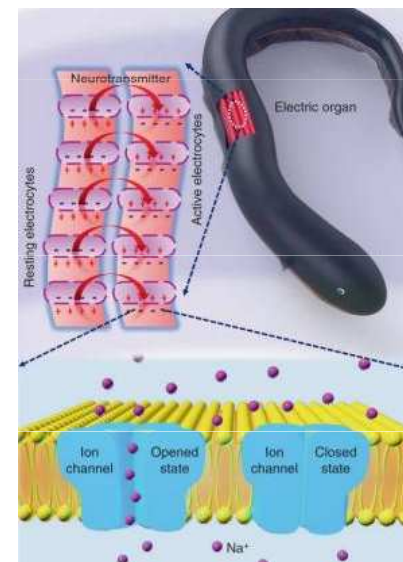
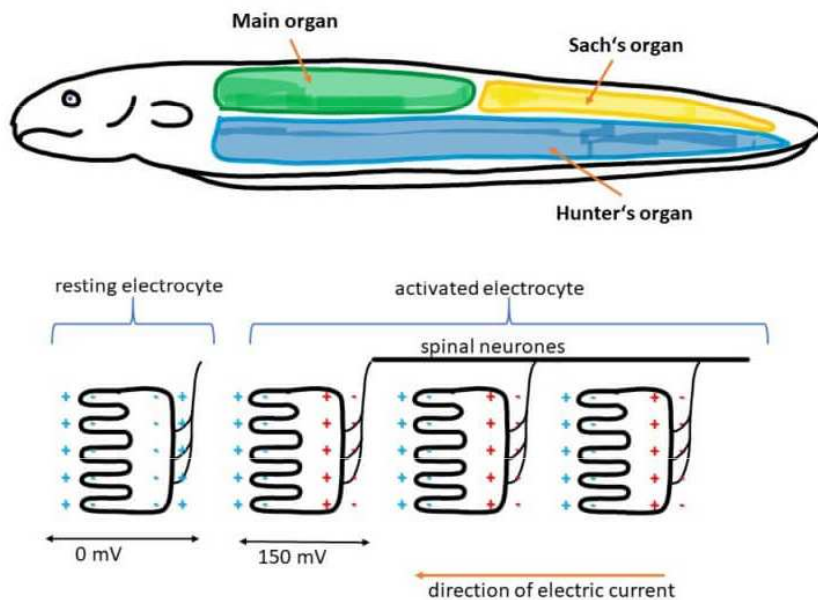
**Akční potenciál** je krátký okamžik, kdy se membránový potenciál buňky rychle zvýší a zase sníží. Je vytvářen speciálními typy iontových kanálů v membráně buňky. Tyto kanály jsou uzavřeny, když se hodnota membránového potenciálu pohybuje kolem klidové hodnoty. Otvírají se, když membránový potenciál dosáhne určité prahové hodnoty. Do buňky jsou vpuštěny  $\text{Na}^+$ , které změni elektrochemický gradient. To vede ke zvýšení hodnoty membránového potenciálu a otevření dalších kanálů, což vytvoří vyšší elektrický impuls napříč membránou, a tak dále. Výsledkem je obrovský vzrůst membránového potenciálu. Přítok  $\text{Na}^+$  iontů obrátí polaritu a iontové kanály se rychle uzavřou. Ionty  $\text{Na}^+$  nemohou vnikat do neuronu a jsou aktivním transportem přemístěny vně buňky. Pak se aktivují kanály pro  $\text{K}^+$ , jenž začne proudit ven z buňky, a tím vrací membránový potenciál na původní hodnotu.





**Paúhoř elektrický** (*Electrophorus electricus*) je sladkovodní dravá ryba která obývá povodí řek Amazonky a Orinoka. Paúhoř je schopen pomocí přeměněných svalových buněk zvaných elektroplaxy vygenerovat elektrický výboj o napětí až 600 V a proudu nad 0,5 ampéru. Takto silné napětí je schopné omráčit i koně. Elektrické napětí ryba používá primárně pro lov potravy. Při něm vysílají dva po sobě následující výboje. První (ze Sachsova orgánu) je slabší, šíří se všemi směry a kořist prozradí – ta sebou po zásahu cukne. Následující výboj (z Hunterova orgánu) ji omráčí a paúhoř ji spolkně.

Paúhoři žijí v kalných vodách, mají velmi slabý zrak. Jsou však schopni elektrické signály i přijímat, což jim pomáhá při orientaci.





# Elektrolýza

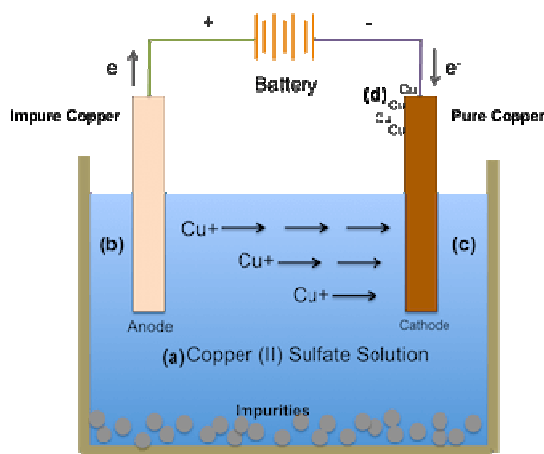
**Elektrolytická polarizace** je jev, kdy se za průchodu proudu mění v důsledku elektrolýzy povrchy elektrod, elektrody se pokrývají vyloučenými produkty, mění se kvalita a vznikají nové elektrické dvojvrstvy, elektrody se polarizují

Elektromotorické napětí, které vznikne je tzv. **polarizační napětí** a má opačnou orientaci než napětí na původní dvojvrstvě

Technickými úpravami se dá vliv polarizace omezit, elektrody se obalují látkou, která chemicky reaguje s produkty elektrolýzy, látka se nazývá **depolarizátor**

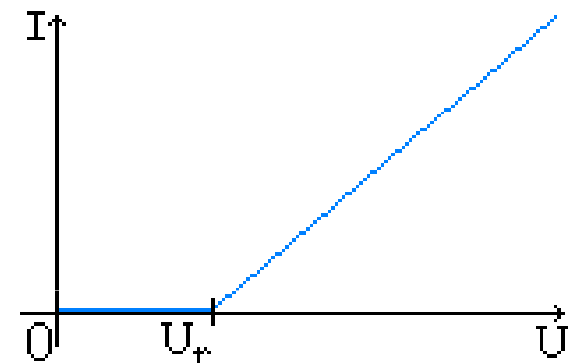
Pokud je napětí příliš malé, vznikne v určitém obvodu s elektrolytem velmi malý proud, který za krátkou dobu opět zanikne v důsledku **polarizace elektrod**.

Při postupném zvyšování napětí se tento jev opakuje tak dlouho, dokud není překročeno tzv. **rozkladné napětí** ( $U_r$ ). Rozkladné napětí  $U_r$  elektrolytu je napětí, od kterého se proud s napětím v elektrolytu lineárně zvyšuje.



$$I = \frac{U - U_r}{R}$$

$R$  je odpor elektrolytu,  $U_r$  je rozkladné napětí elektrolytu.



# Faradayovy zákony pro elektrolýzu

**1. Faradayův zákon:** Hmotnost  $m$  vyloučené látky je přímo úměrná součinu stálého proudu  $I$  a doby  $t$ , po kterou proud elektrolytem procházel

$$m = A \cdot I \cdot t$$

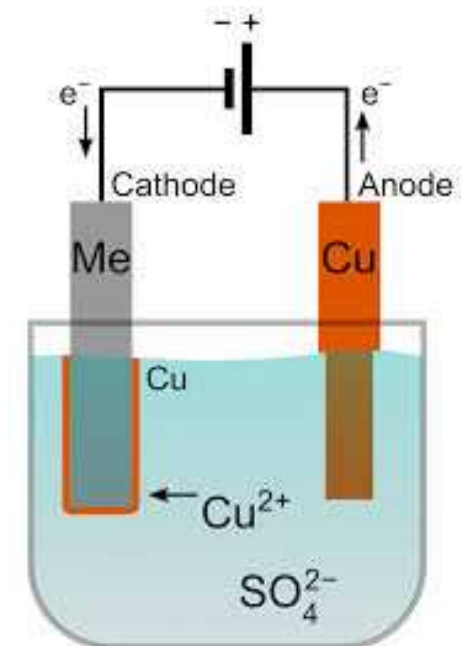
**2. Faradayův zákon:** Elektrochemický ekvivalent látky vypočteme, jestliže její molární hmotnost vydělíme Faradayovou konstantou a počtem elektronů potřebných k vyloučení jedné molekuly:

$$A = \frac{M_m}{F \cdot z}$$

kde  $F$  je **Faradayova konstanta**  $F = 9,6481 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$  a  $z$  je počet (mocenství) elektronů, které jsou potřeba při vyloučení jedné molekuly,  $A$  je **elektrochemický ekvivalent** látky; jednotkou je  $\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$

**Látková množství různých látek vyloučených při elektrolýze tímž nábojem jsou chemicky ekvivalentní.** (Mohou se navzájem nahradit v chemické sloučenině nebo se mohou beze zbytku sloučit.)

Vylučování kovů na katodě při elektrolýze se užívá v **elektrometalurgii** k získávání kovů z roztoků, v **galvanostegii** k pokovování, v **galvanoplastice** k vytváření odlitků, matric na výrobu gramofonových desek apod.



## Příklad

Výrobek je třeba pokrýt vrstvou chromu o tloušťce 50  $\mu\text{m}$ . Roztokem chromité soli ( $v = 3$ ) prochází proud o hustotě 2  $\text{kA}\cdot\text{m}^{-2}$ . Určete dobu chromování.  $\rho_{\text{Cu}} = 7,1\cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

$$d = 50 \mu\text{m} = 50\cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$v = 3$$

$$F = 9,65\cdot 10^4 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$M = 58,69 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 7,1\cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$j = 2 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-2} = 2000 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$t = ?$$

$$I = j\cdot S$$

$$m = A\cdot I\cdot t = M\cdot I\cdot t/(v\cdot F)$$

$$m = S\cdot d\cdot \rho_{\text{Cu}}$$

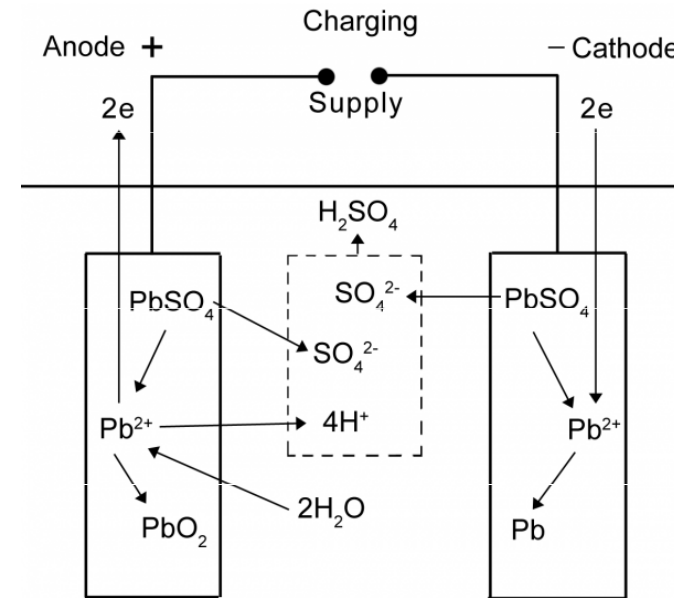
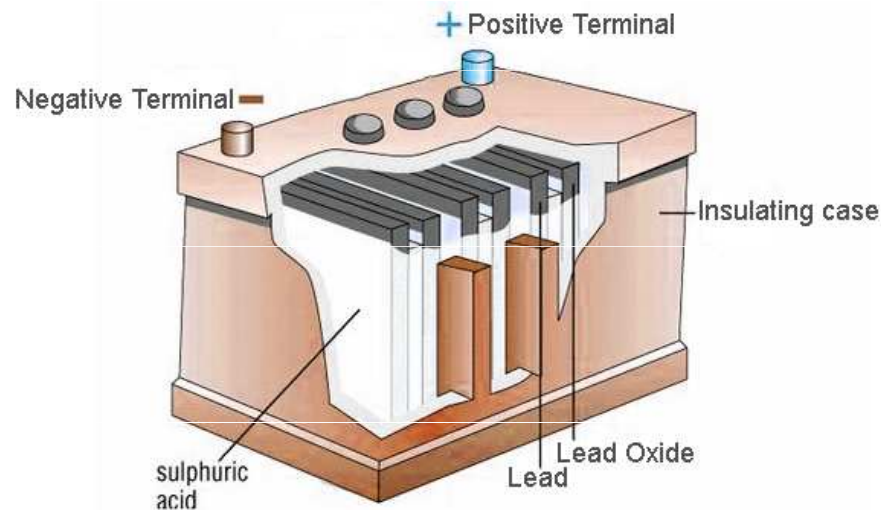
$$t = S\cdot d\cdot \rho_{\text{Cu}}\cdot v\cdot F/(M\cdot j\cdot S)$$

$$t = d\cdot \rho_{\text{Cu}}\cdot v\cdot F/(M\cdot j)$$

$$t = 50\cdot 10^{-6}\cdot 7,1\cdot 10^3\cdot 3\cdot 9,65\cdot 10^4/(58,69\cdot 2000) = \underline{16 \text{ min.}}$$

# Akumulátor

**Akumulátor** (sekundární galvanický člunek) je založen na vzniku elektrolytických potenciálů elektrod po proběhnutí vratných chemických dějů. To znamená, že akumulátor je potřeba nejdříve nabít a teprve potom je možné jej použít jako zdroj energie.



Akumulátory se využívají v mnoha složitějších strojích jako pomocný zdroj energie. Olověné akumulátory jsou součástí prakticky každého automobilu jako zdroj pro startér. Akumulátory pohání klasické ponorky, jsou prováděny i pokusy s pohonem mnoha dalších dopravních prostředků.

**Kapacita akumulátoru** je celkový elektrický náboj, který akumulátor vydá při vybíjení, než se vybije resp. jeho napětí poklesne pod přípustnou hodnotu. Udává se v ampérhodinách (Ah).

## Elektrický proud v plynech

Plyny jsou tvořeny elektricky neutrálními molekulami. Proto jsou za normálního tlaku a teploty velmi dobrými izolanty a jejich elektrická vodivost je zanedbatelná. Aby v plynu vznikl elektrický proud, musí obsahovat volné částice s nábojem a musí být v elektrickém poli. Za těchto podmínek plyn vede elektrický proud a děje, které v něm probíhají, označujeme jako **výboj v plynu**.

Nosiči nábojů v plynu jsou kladné ionty, záporné ionty a elektrony, které vznikají při ději zvaném **ionizace plynu**. Příčinou ionizace plynu může být silné elektrické pole, vysoká teplota, nízký tlak, působení ultrafialového nebo radioaktivního záření na molekuly plynu. Při ionizaci se z elektricky neutrální molekuly uvolňují elektrony a zbytek molekuly tvoří kladný iont. Elektrony se mohou zachytit na neutrálních molekulách a vznikají záporné ionty.

Současně s ionizací plynu probíhá opačný děj – **rekombinace iontů**. Ionty s opačným nábojem, popř. kladné ionty a elektrony, se spojují a vznikají opět neutrální molekuly plynu. Přestanou-li na plyn působit vlivy, které vedou k ionizaci, nosiče náboje zanikají a plyn se stává nevodivým. Když naopak ionizace plynu trvá, nastane rovnovážný stav mezi ionizací a rekombinací. Počet nosičů proudu je pak relativně stálý.

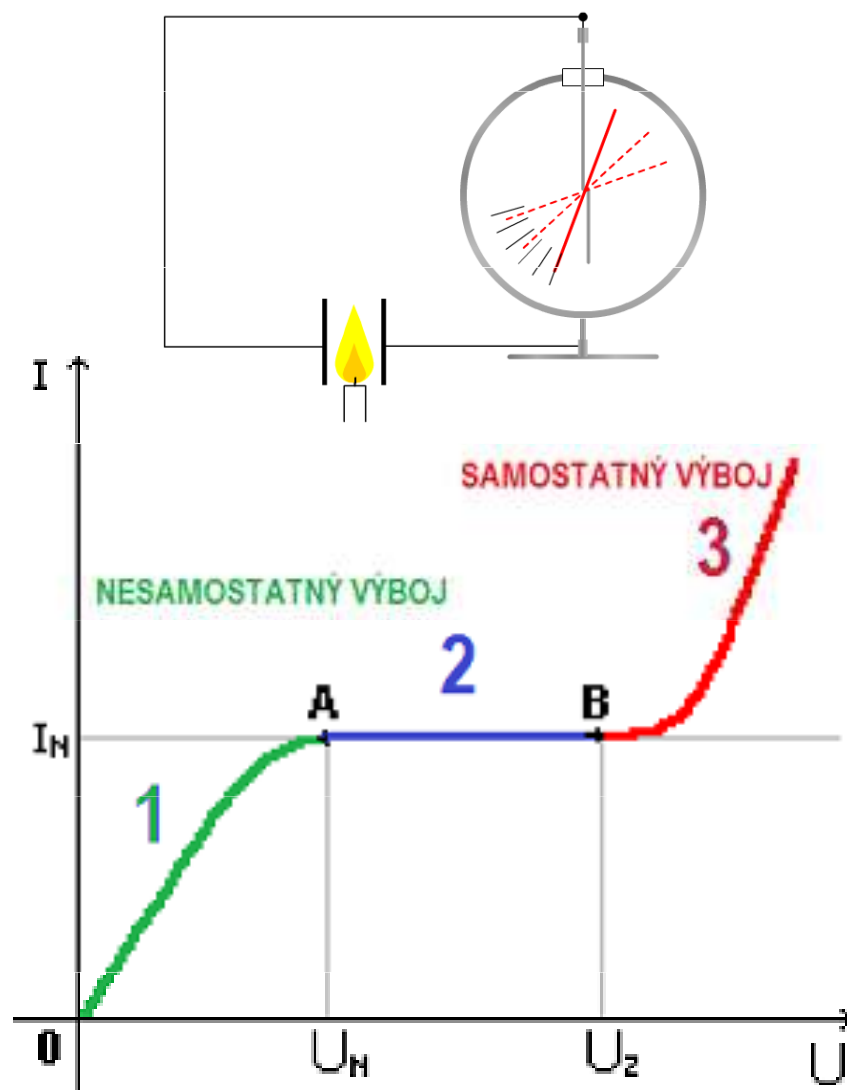
**Nesamostatný výboj:** elektrický proud prochází pouze za přítomnosti ionizátoru (plamen, UV, rentgenové nebo  $\gamma$ -záření, proud elektronů ze žhavého kovu nebo  $\beta$ -záření,  $\alpha$ -záření). Výboj zanikne v okamžiku, kdy ionizátor přestane působit. Nesamostatný výboj vzniká při nejnižších napětích. Zprvu proud stoupá s napětím, až dosáhne hodnoty **nasyceného proudu** ( $I_n$ ).

K dalšímu zvýšení proudu dojde po překročení tzv. **zápalného napětí**  $U_z$  nastane *ionizace nárazem*.

**Oblast 1:** většina iontů zaniká než doletí na elektrody (platí Ohmův zákon).

**Oblast 2:** všechny elektrony vzniklé ionizací doletí na elektrody (proud se nezvyšuje - **nasycený proud**  $I_N$ ), rekombinace téměř ustává.

**Oblast 3:** překročení **zápalného napětí**  $U_z$  - nastává ionizace nárazem (elektrony a ionty vzniklé ionizací sami předávají část energie neutrálním částicím - výboj probíhá i bez přítomnosti ionizátoru (samostatný výboj)).

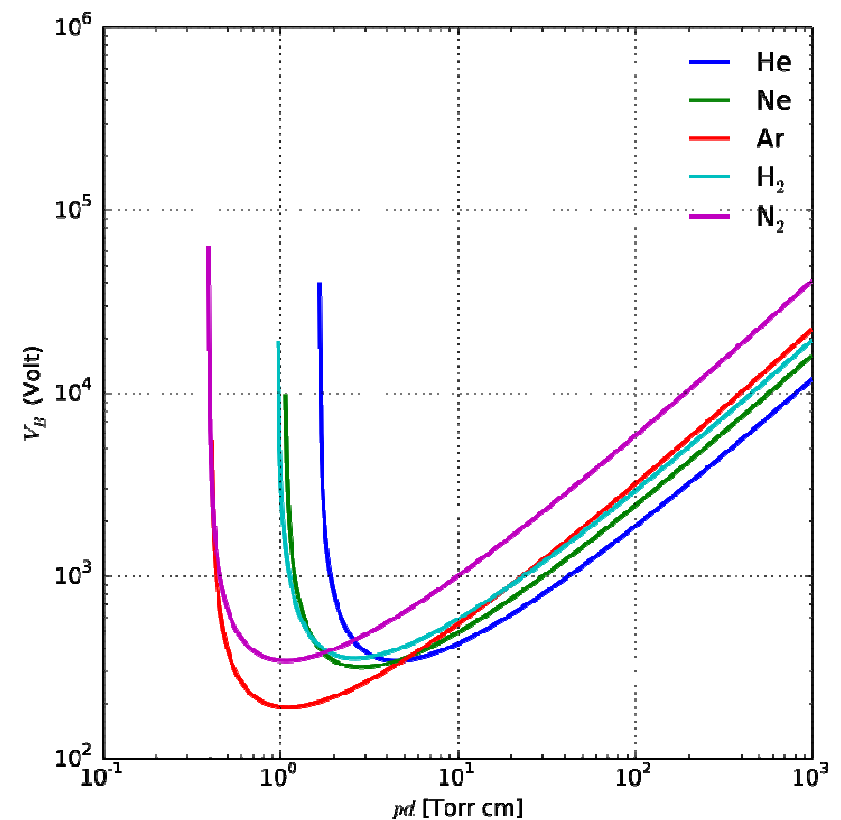


**Samostatný výboj:** výboj v plynu se udrží vlastní ionizací, nepotřebuje přítomnost ionizátoru. Elektrony, případně i ionty, jsou silným elektrickým polem urychleny natolik, že při srážkách ionizují neutrální molekuly. Elektrony, vzniklé jako produkty této ionizace, získávají díky elektrickému poli energii a ionizují další molekuly. Nastává lavinovitá ionizace, iontů i elektronů přibývá geometrickou řadou. Vysoce ionizovaný plyn v samostatném výboji se nazývá **plasma**.

**Paschenův zákon** je rovnice udávající vztah mezi průrazným napětím  $U_z$  a tlakem plynu ( $p$ ) a vzdáleností mezi elektrodami ( $d$ ).

$$U_z = A \frac{pd}{\ln \left[ B \frac{pd}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]}$$

$$(pd)_{min} = \frac{2,718}{B} \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$



Paschenova křivka pro různé plyny  
(1 torr = 133,3 Pa)

**Samostatný výboj za normálního tlaku:** jiskrový výboj, obloukový výboj, koróna, aj.

**Samostatný výboj za sníženého tlaku:** doutnavý výboj

Při **samostatném výboji** se mohou uplatnit i elektrony uvolněné z elektrod dopadem iontů. Tento děj se nazývá sekundární emise. K uvolnění elektronů z elektrody může dále dojít:

1. *tepelnou emisí* - rozžhavením elektrody dochází k uvolňování elektronů
2. *fotoemisí* - dopad ultrafialového záření může také vyvolat emisi elektronů
3. *tunelovým jevem* - elektrony jsou vytrhovány silným elektrickým polem v blízkosti katody

a) Nesamostatný výboj

b) Temný výboj

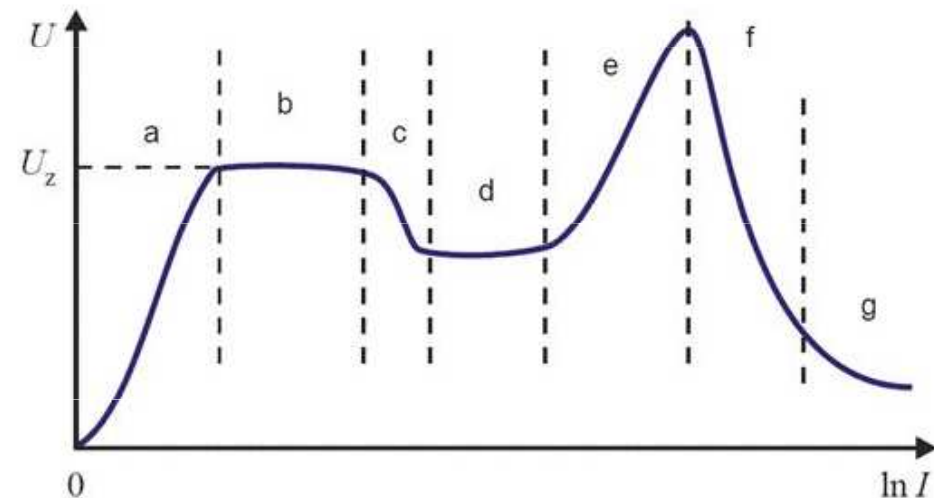
c) Korónový výboj

d) Doutnavý výboj

e) Anomální EV

f) Jiskrový výboj

g) Obloukový výboj

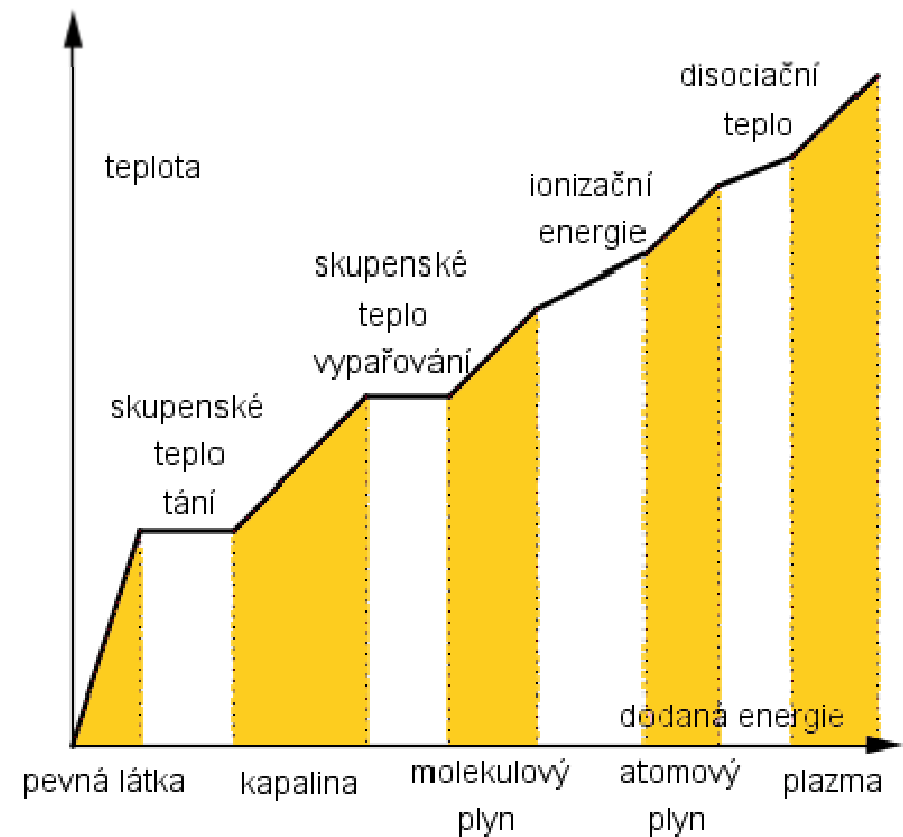




# Plazma

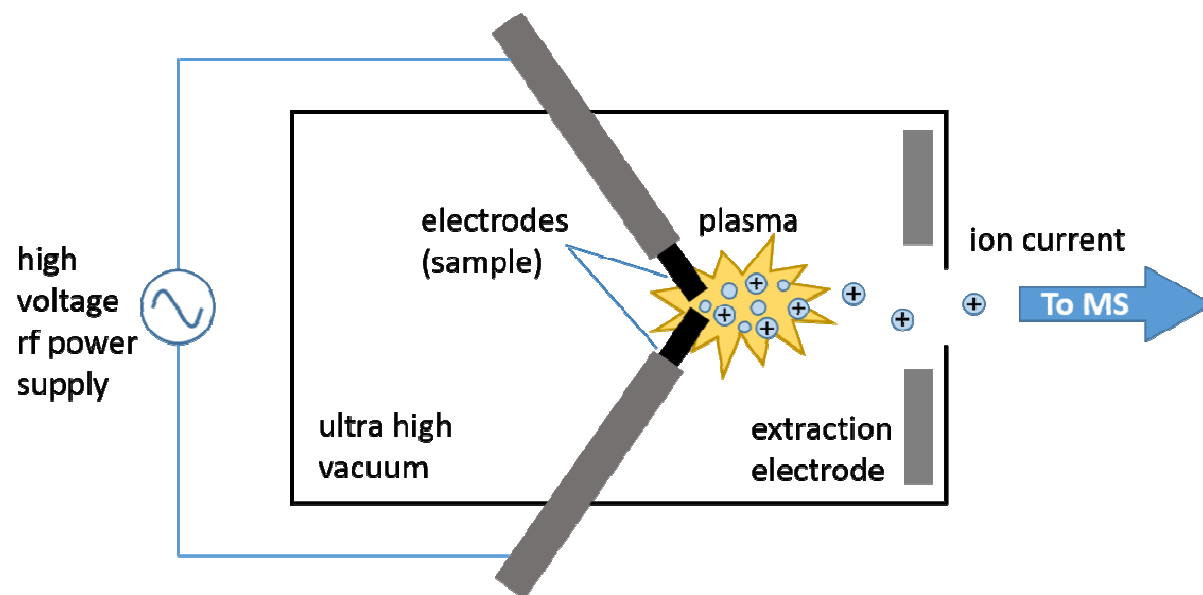
Plazma obsahuje elektrony, kladné a záporné ionty a neutrální částice, celý soubor částic je pak z makroskopického hlediska neutrální (= *kvazineutralita*). Díky přítomnosti volných nabitých částic se v objemu plazmatu vytváří prostorový náboj a elektrostatické pole, které zpětně silově působí na nabitě částice. Výsledkem je kompenzace fluktuací hustoty náboje a plazma se ve větším měřítku jeví jako elektricky neutrální.

V zemských podmínkách se plazma tvoří za vysoké teploty nebo pomocí vysokého napětí, rozlišujeme pak **izotermické plazma** (plamen, polární záře, ionosféra) nebo **výbojové plazma** (blesk, obloukový výboj, apod.).



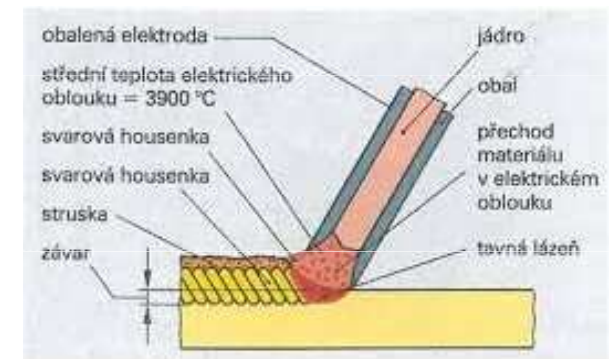
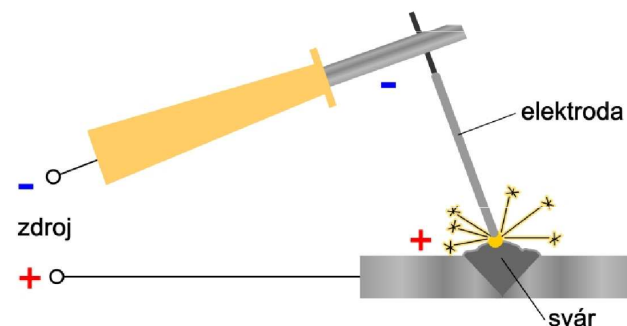
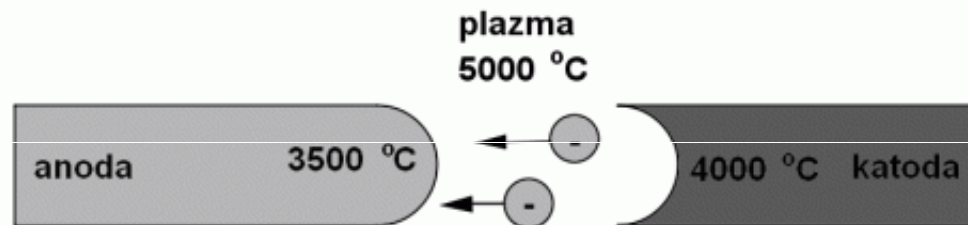
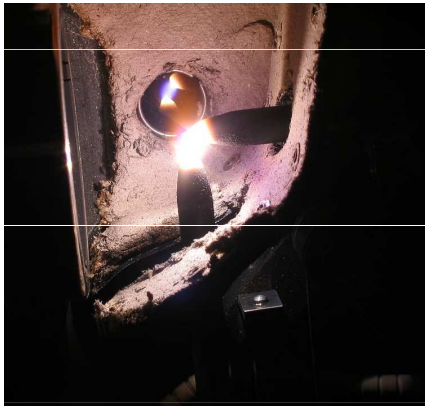
# Elektrický (jiskrový) výboj

Silné elektrické pole způsobí vytrhávání elektronů z atomů a molekul plynu (ionizaci plynu). Elektrický proud za této podmínky se nazývá **elektrický výboj (jiskrový výboj)** a je tvořen směsí volných elektronů a kladných, příp. záporných iontů v plynu. Nastává, když intenzita elektrického pole mezi elektrodami je dostatečně velká a dojde k tzv. *lavinovité ionizaci*. Výboj trvá většinou krátce - do vybití vnějšího elektrického pole - ale může jít o velmi velký proud, protože se jedná o krátkodobé uvolnění nahromaděné potenciální elektrické energie a volných nábojů. Elektrický výboj pozorujeme ve van de Graafově generátoru, při bouřce jako blesk, kolem elektrického vedení s vysokým napětím, při spínání nebo vypínání silnějších elektrických spotřebičů, ve svíčkách zážehových motorů, při vzájemném tření umělohmotných kusů oblečení, apod.



# Elektrický oblouk

Vysoká teplota znamená velkou kinetickou energii částic plynu, při jejichž nárazech může docházet k vyrážení elektronů z atomů nebo molekul. Elektrický proud v plynu za vysoké teploty se nazývá elektrický oblouk a je tvořen směsí elektronů a iontů. Vyznačuje se velmi jasným světelným zářením, které se využívá v obloukových lampách. Vysoké teploty elektrického oblouku se rovněž využívá při obloukovém svařování, řezání plechů nebo v elektrických tavicích pecích.

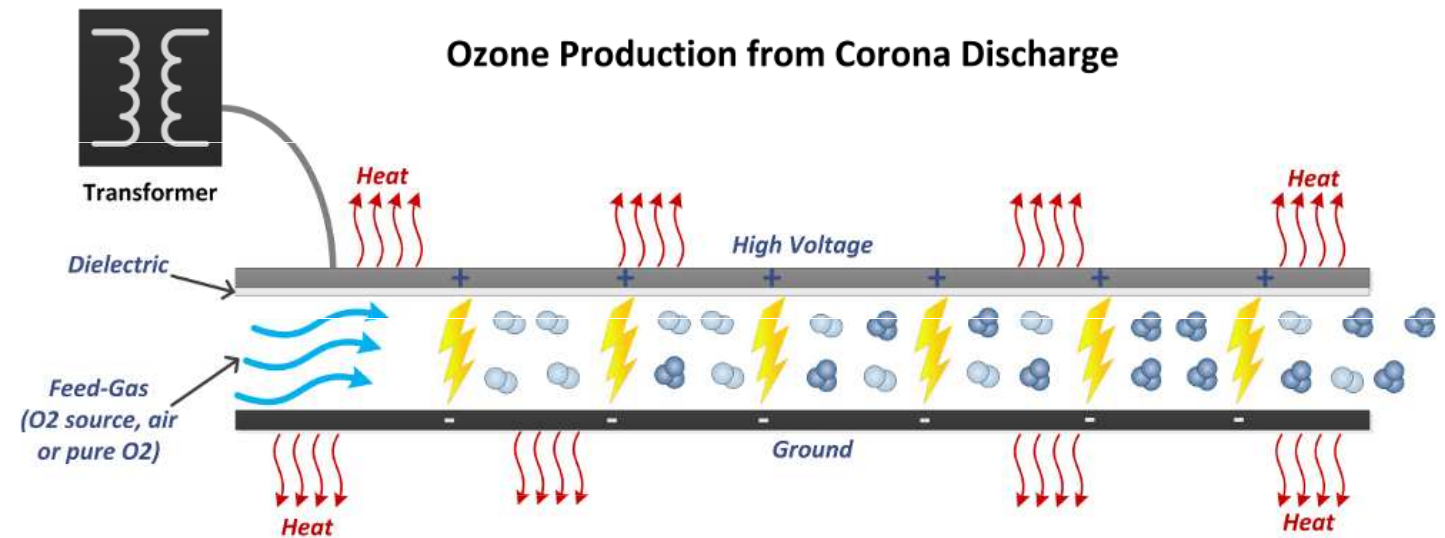


# Koróna

**Koróna** je trsovitý výboj, který vzniká v blízkosti hrotů a hran vodičů s vysokým napětím vůči okolí. Výboj je slabý a prakticky neviditelný.



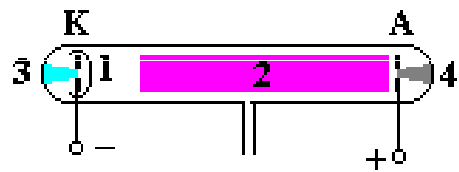
## Generátor ozonu



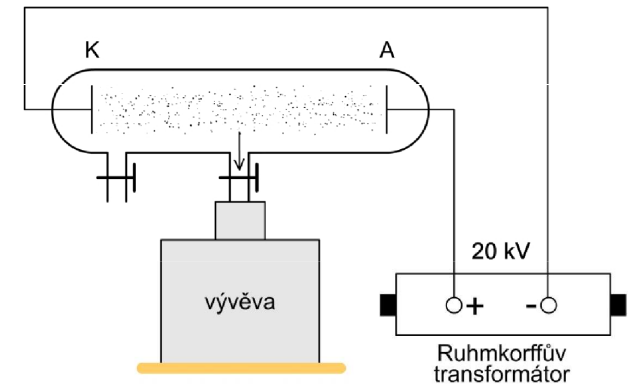
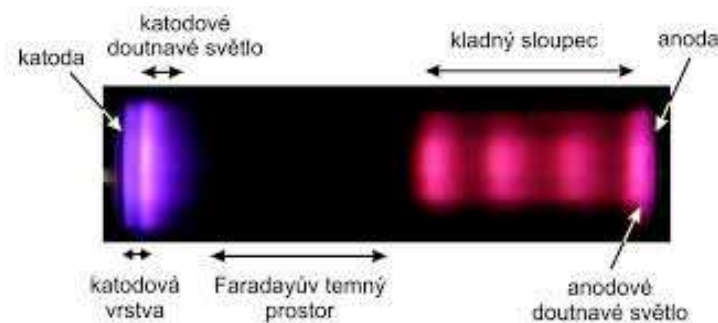
Ozone is formed via an electrical discharge that is diffused over an area using a dielectric to create a corona discharge. Oxygen passed through this corona discharge is converted to ozone.

# Doutnavý výboj

Snížením tlaku v plynu (vyčerpáním částic) dojde ke zvětšení střední volné dráhy částic plynu. Tím mohou částice dosáhnout větší rychlosti, a tedy kinetické energie dostatečné k ionizaci – vytrhávání elektronů z atomů a molekul plynu. Elektrický proud za této podmínky se nazývá elektrický výboj za nízkého tlaku (např. **doutnavý výboj**) a je způsoben směsí elektronů a iontů. Tento elektrický výboj se vyvolává v trubicích s vyčerpáním vzduchem (výbojové trubice, katodové trubice), případně naplněné nějakým plynem. Různé druhy plynu a různé tlaky vyvolávají různé světelné jevy, které se využívají mj. ve výbojkách, zářivkách a doutnavkách.



- 1 - katodové doutnavé světlo
- 2 - anodový sloupec
- 3 - kanálové záření
- 4 - katodové záření



# Elektrický proud ve vakuu

**Katodové záření** je proud elektronů vycházející z katody katodové trubice, který vytváří elektrický proud, k čemuž dojde, pokud se tlak v uzavřeném tělese sníží na hodnotu 1 Pa. Při interakci s látkami se energie elektronů přeměňuje na následující formy:

*energii mechanickou*

*energii elektromagnetického záření:* infračervené (tepelné), viditelné, ultrafialové, rentgenové záření.

*vnitřní energii*

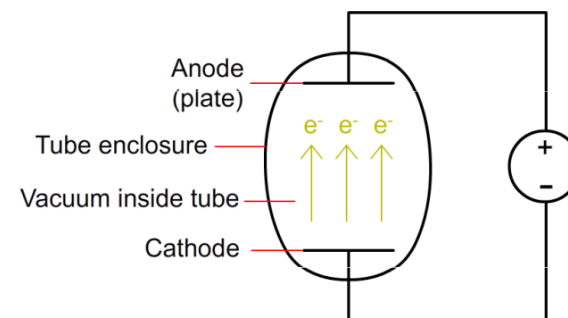
## Termoemise

**Termoemise** se využívá v elektronkách nebo častěji v obrazovkách. Katoda ve výbojové trubici je vyrobena z wolframového vlákna a rozžhavená procházejícím elektrickým proudem. Z vlákna katody se díky termoemisi uvolňují elektrony s velkou rychlostí. V oblasti mezi katodou a anodou tak vzniká záporný prostorový náboj, který ale zabraňuje vystupování dalších elektronů z katody. Jestliže je napětí mezi katodou a anodou dostatečné, pak převládá elektrické pole mezi katodou a anodou a elektrony vytvoří vodivé spojení.

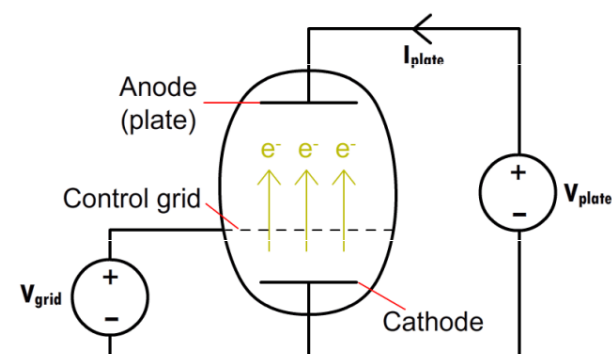


Klesne-li napětí anody pod určitou hodnotu, zabrání prostorový záporný náboj mezi anodou a katodou dalšímu pohybu elektronů a proud mezi anodou a katodou ustane.

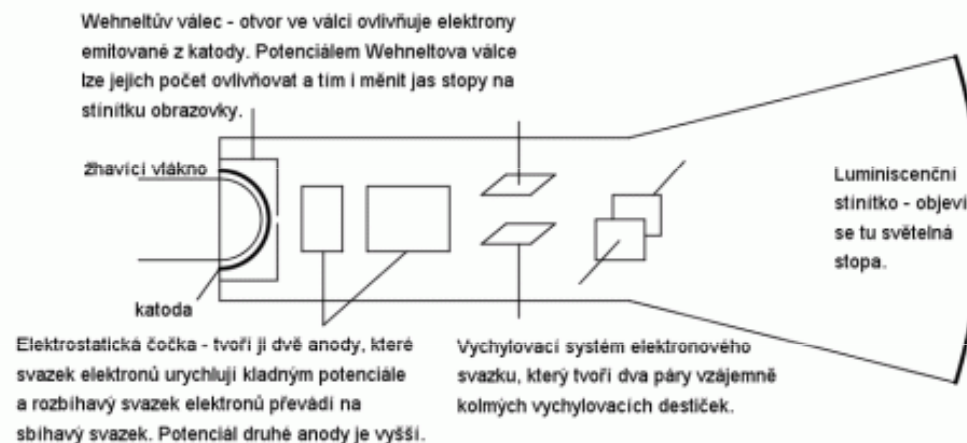
Nejjednodušší elektronkou je **dioda**, jejíž vzduchoprázdná baňka obsahuje jen katodu a anodu. Používá se jako usměrňovače střídavého proudu na stejnosměrný.



**Trioda** navíc obsahuje třetí elektrodu – mřížku. Pomocí napětí na mřížce lze velmi dobře regulovat anodový proud. Používá se v zesilovačích, vysokofrekvenčních generátorech a detektorech elektromagnetických vln.



**Katodová trubice s luminiscenčním stínítkem** se používá v osciloskopech a v obrazovkách.



## Inverzní fotoelektrický jev

Pokud na látku dopadají elektrony, které způsobují vyzařování fotonů, mluví se o **inverzním (obráceném) fotoelektrickém jevu**. Energie pohybujícího se elektronu je obvykle podstatně větší než výstupní práce, proto ji lze zanedbat proti kinetické energii elektronu, tzn.

$$E_k = h\nu$$

Pokud dojde k přeměně celé energie elektronu ve foton jedním nárazem, bude fotonu dodáno největší možné množství energie, tzn.

$$E_k = h\nu_{\max} = eU$$

kde  $e$  je elektrický náboj elektronu a  $U$  je urychlující potenciál.

Vyjádřením pomocí vlnové délky získáme tzv. **Duane-Huntův zákon**.

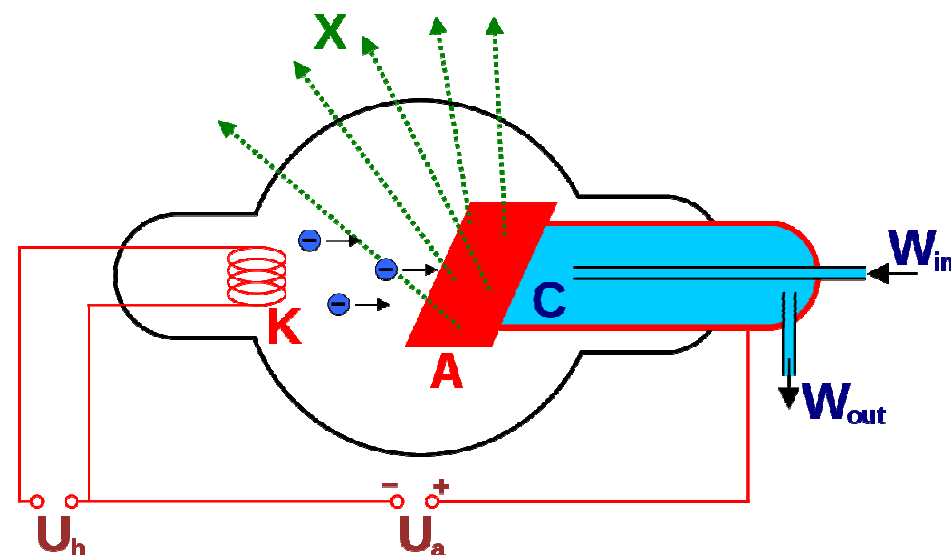
$$\lambda_{\min} U = \frac{hc}{e} = \text{konst}$$

kde  $c$  je rychlost světla.

Z tohoto vztahu plyne, že se zvyšováním urychlujícího potenciálu se maximum energie posouvá ke kratším vlnovým délkám.

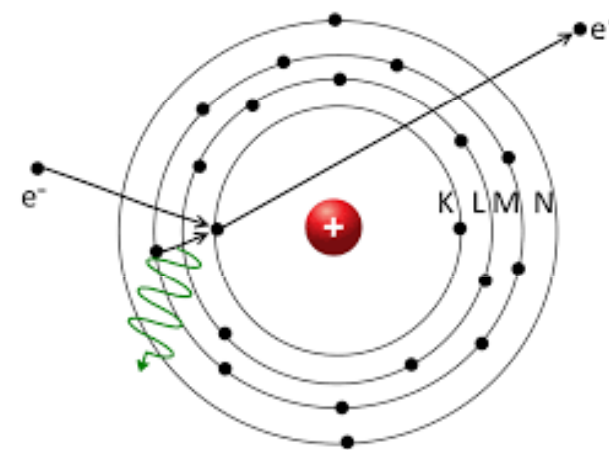


**Rentgenka** je zvláštní elektronka určená k produkci rentgenového záření. V nejjednodušším provedení se skládá z katody a z anody (antikatody). Obě tyto elektrody jsou zataveny ve vakuově těsné, obvykle skleněné baňce.

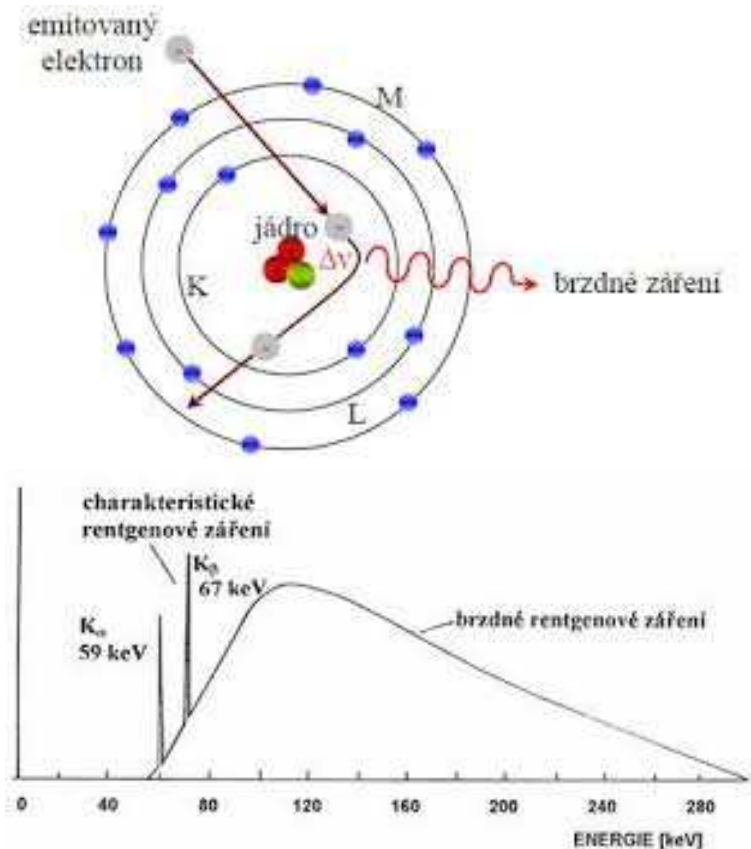


Katoda emituje elektrony, které se urychlují vysokým napětím (25 kV až 600 kV) k anodě a pronikají do materiálu anody. Přitom jsou zbrzděny a vytvářejí různé typy záření.

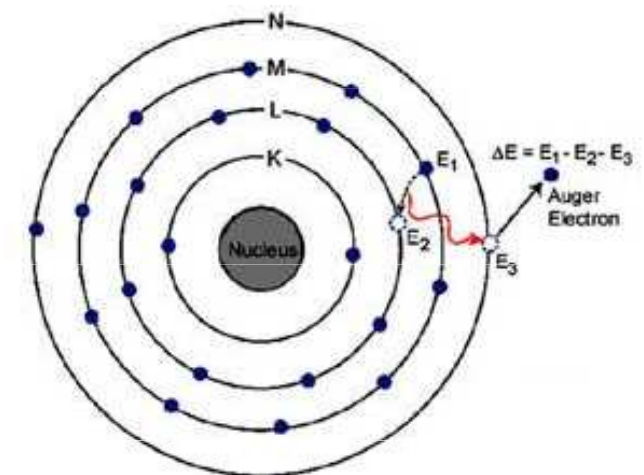
**Charakteristické rentgenové záření:** Vysokoenergetické elektrony dopadající na anodu z atomů jejího materiálu vyrážejí i elektrony z vnitřních slupek elektronového obalu. Do takto vzniklých mezer pak „skáčou“ buď elektrony z vyšších energetických hladin anebo elektrony volné. Tím vzniká charakteristické rentgenové záření s diskrétními kvantovanými energiemi (popř. vlnovými délkami), které jsou typické pro jednotlivé materiály anody.



**Brzdné rentgenové záření** vzniká zabrzděním elektronů při jejich pronikání kovovým materiálem anody. Vlnová délka tohoto záření přitom závisí na velikosti zrychlení (popř. zbrzdění), takže při vyšším urychlovacím (anodovém) napětí vzniká tvrdší rentgenové záření. Spektrum brzdného záření je ohraničeno minimální vlnovou délkou, při níž se veškerá kinetická energie elektronu předává jedinému fotonu rentgenového záření. Tato spodní mezní vlnová délka závisí pouze na anodovém napětí a materiál anody na ni nemá žádný vliv.



**Augerův jev:** namísto fotonu rentgenového záření je energie předána ve formě kinetické energie některému elektronu ve vnější slupce. Pravděpodobnost, zda bude uvolněná energie vyzářena fotonem jako rentgenové záření nebo Augerovými elektrony, závisí na atomovém čísle prvku, Augerův jev se ve výrazné míře projevují u lehčích prvků.



## Příklad

Jakou rychlost získá elektron při dopadu na anodu vyčerpané trubice, pokud  $U = 3000 \text{ V}$  a počáteční rychlost  $v_0 = 0$

$$U = 3000 \text{ V}, v_0 = 0, m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}, v = ?$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \quad \wedge \quad E = e \cdot U$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = e \cdot U$$

$$v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_e}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3000 \text{ V}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = \sqrt{10,56 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} = 3,25 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}$$

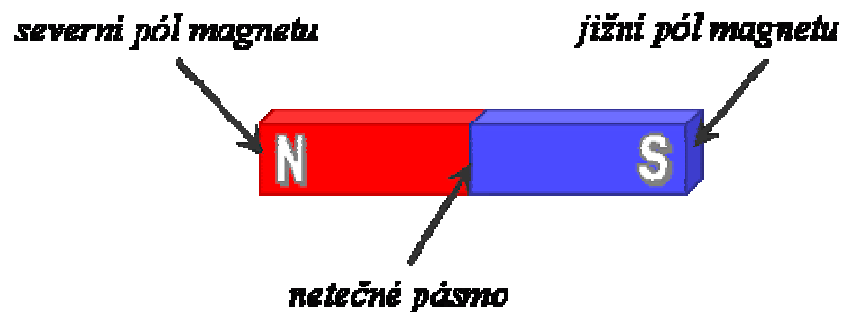
$$\underline{v = 3,25 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}}$$

# Magnetismus

**Magnet** je trvale (permanentní magnet) nebo dočasně zmagnetované těleso, které je zdrojem magnetického pole.

Magnet má *severní pól* (N) a *jižní pól* (S). Nesouhlasné póly dvou magnetů se přitahují, souhlasné se odpuzují.

**Magnetka** je trvalý magnet otáčivý okolo svislé osy.



## Magnetické pole

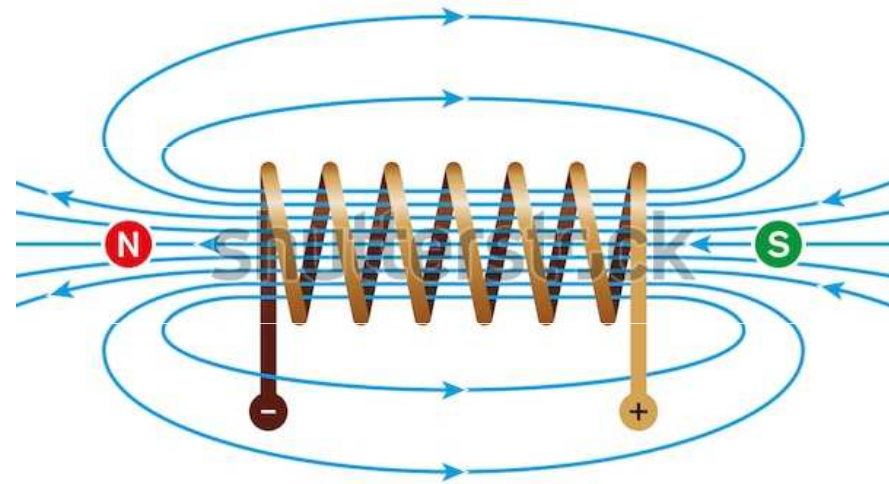
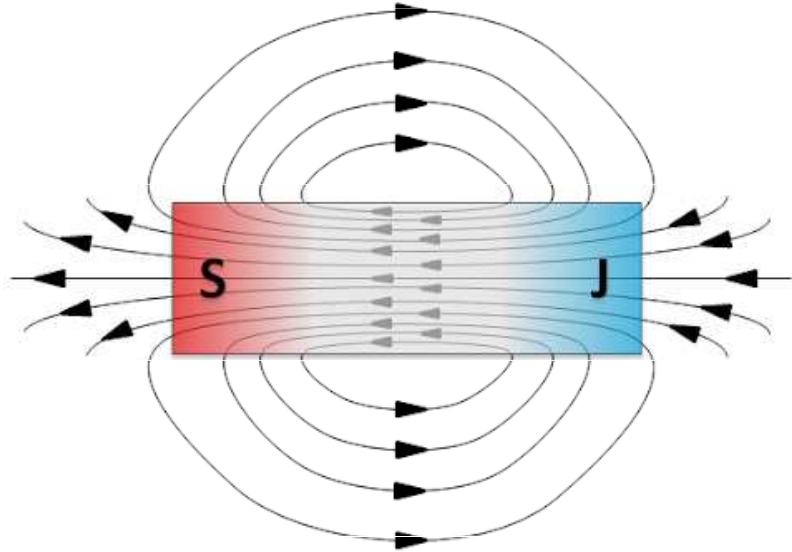
Magnetické pole se projevuje silovými účinky na železo, kobalt, nikl a jejich slitiny, na ostatní magnety a na pohybující se elektrické náboje. Objevuje se

v okolí magnetů

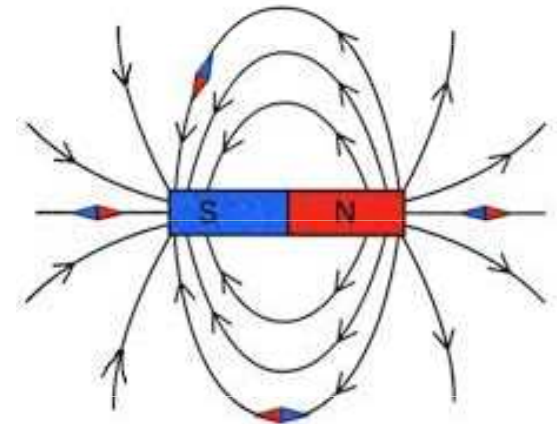
v okolí vodičů jimiž prochází elektrický proud

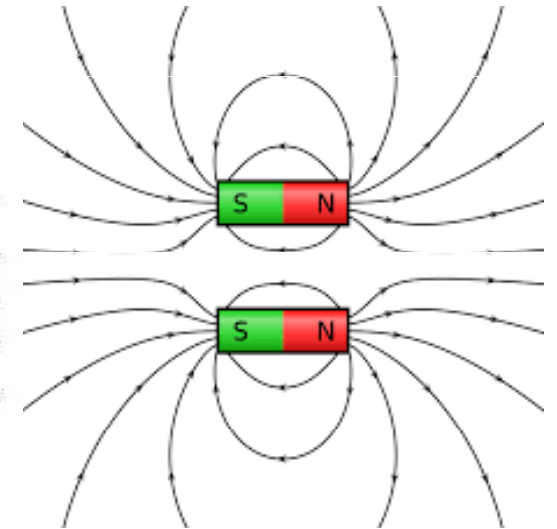
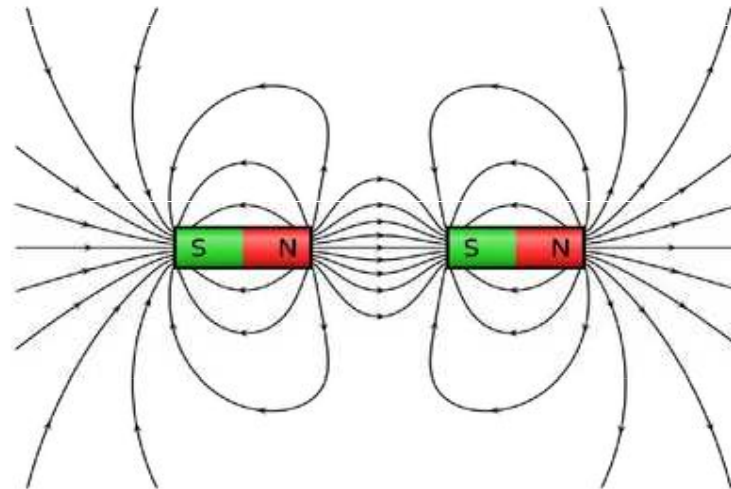
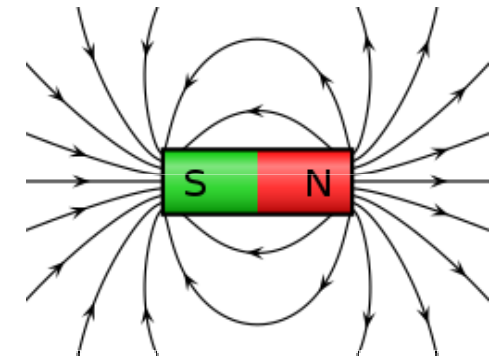
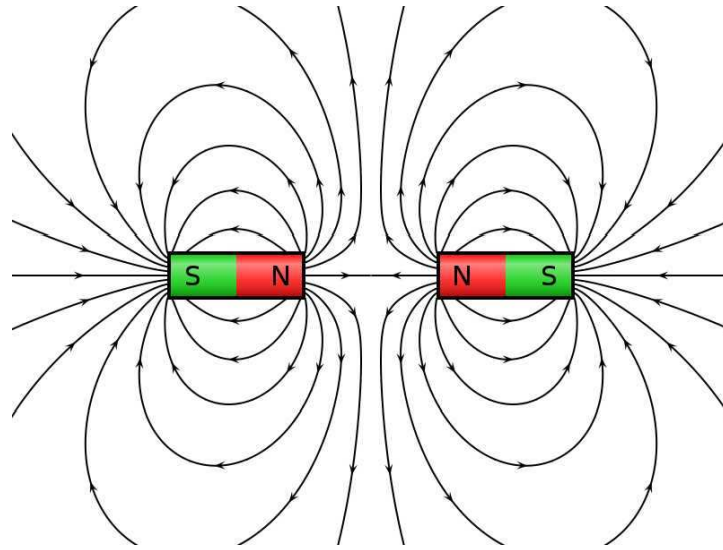
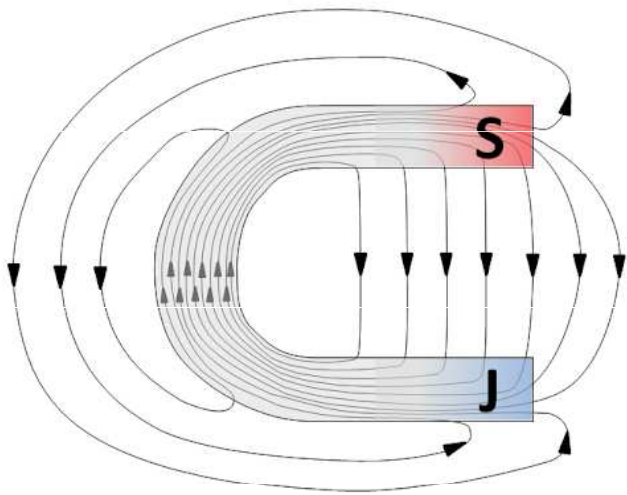
Příčinou magnetického pole v okolí vodiče je pohybující se elektrický náboj. Magnetickou silou na sebe působí i dva vodiče se stálým proudem.

**Stacionární magnetické pole** je magnetické pole, jehož vlastnosti se nemění v čase (veličiny, které jej charakterizují jsou konstantní). Nachází se v okolí nepohybujících se permanentních magnetů nebo v okolí nepohybujícího se vodiče se stálým proudem.



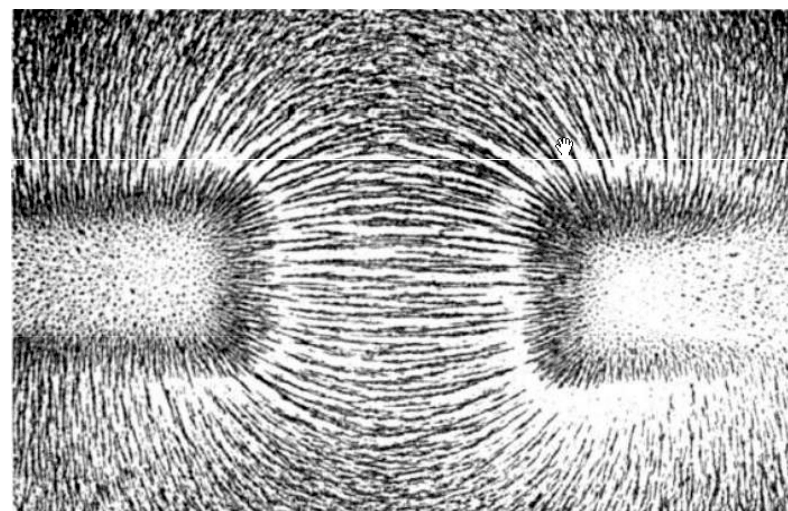
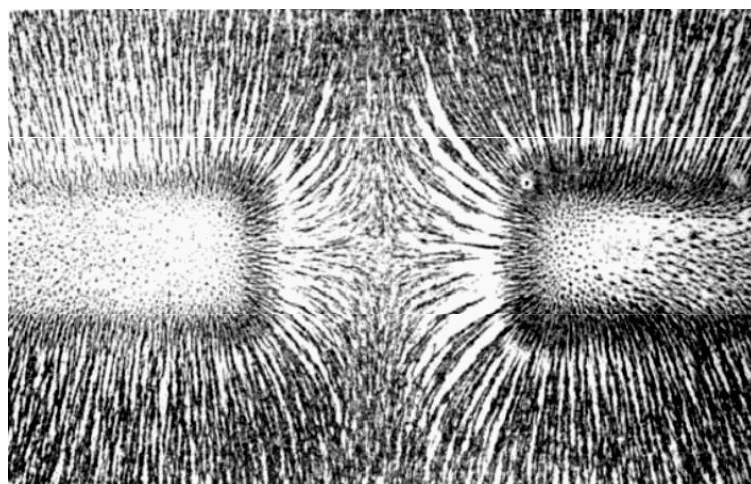
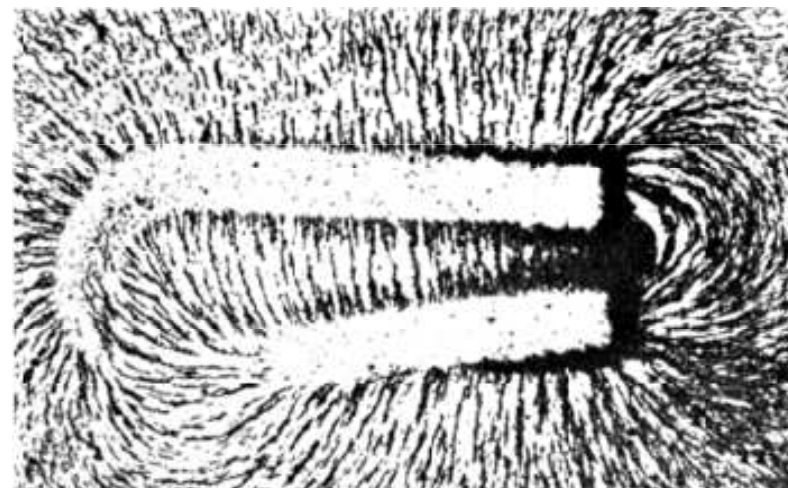
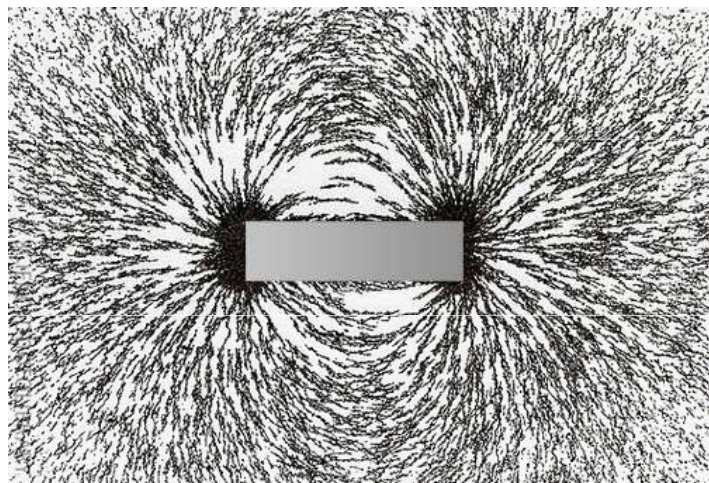
**Magnetické indukční čáry** jsou orientované křivky, jejichž tečna v každém bodě má směr magnetické indukce a také směr osy velmi malé magnetky umístěné v daném bodě. Směr od jižního k severnímu pólu magnetky určuje orientaci indukční čáry. Magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené křivky a procházejí i magnetem. Jejich hustota v daném místě je úměrná velikosti magnetické indukce.







# Siločáry magnetického pole



Ačkoli je to běžnou praxí, **neměli bychom zaměňovat siločáry magnetického pole s indukčními čarami**. Indukční čáry vyjadřují směr magnetické indukce a jsou to vždy uzavřené křivky, magnetické siločáry jsou hustší v prostředí, které přenáší hůře magnetické pole a naopak.



# Intenzita magnetického pole

**Intenzita magnetického pole (H)** vyjadřuje velikost a směr magnetického pole nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

$$H = B / \mu$$

$$H = B / (\mu_0 \cdot \mu_r)$$

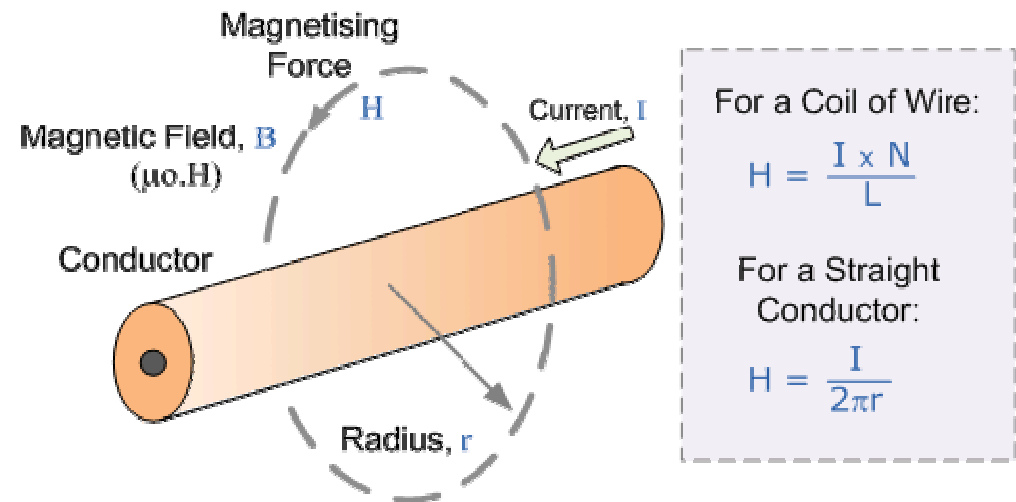
$$[H] = A \cdot m^{-1}$$

V daném místě má H směr daný tečnou k siločáře a směr podle orientace siločáry. Obecný vztah pro intenzitu magnetického pole tvořeného proudem  $I$  na siločáře o délce  $l$ :

$$H = \frac{U_m}{l} = \frac{I}{l} \quad (A \cdot m^{-1}; A, m)$$

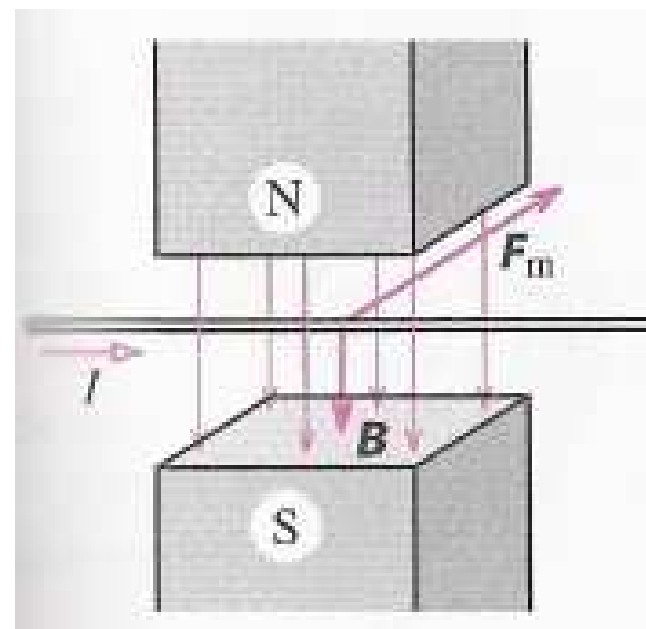
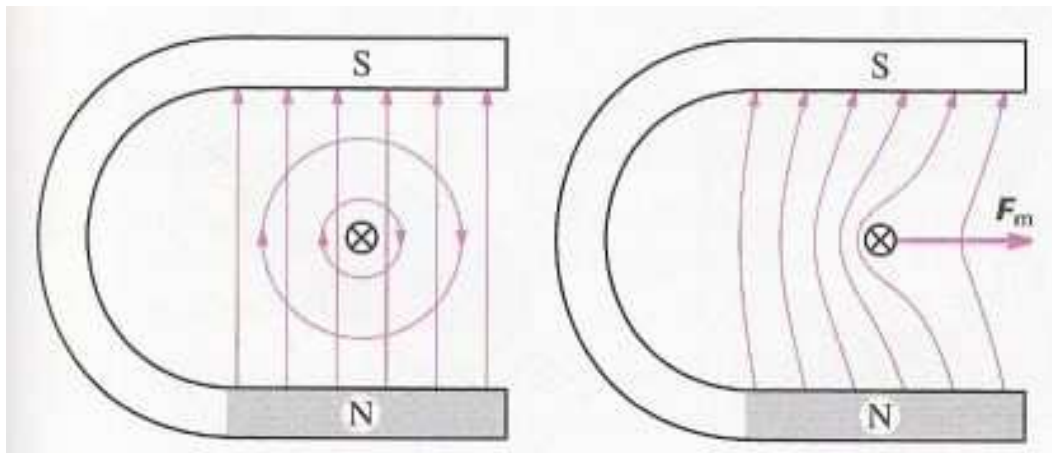
Pro cívku

$$H = \frac{F}{l} = \frac{NI}{l}$$



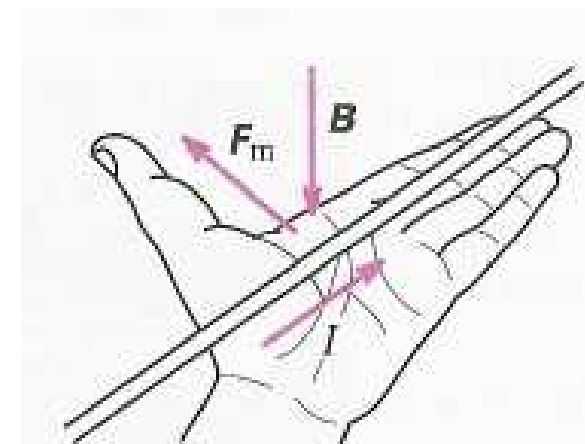
# Magnetická (Ampérova) síla

Na vodič kterým protéká proud působí v magnetickém poli **magnetická síla  $F_m$** . Je-li vodič

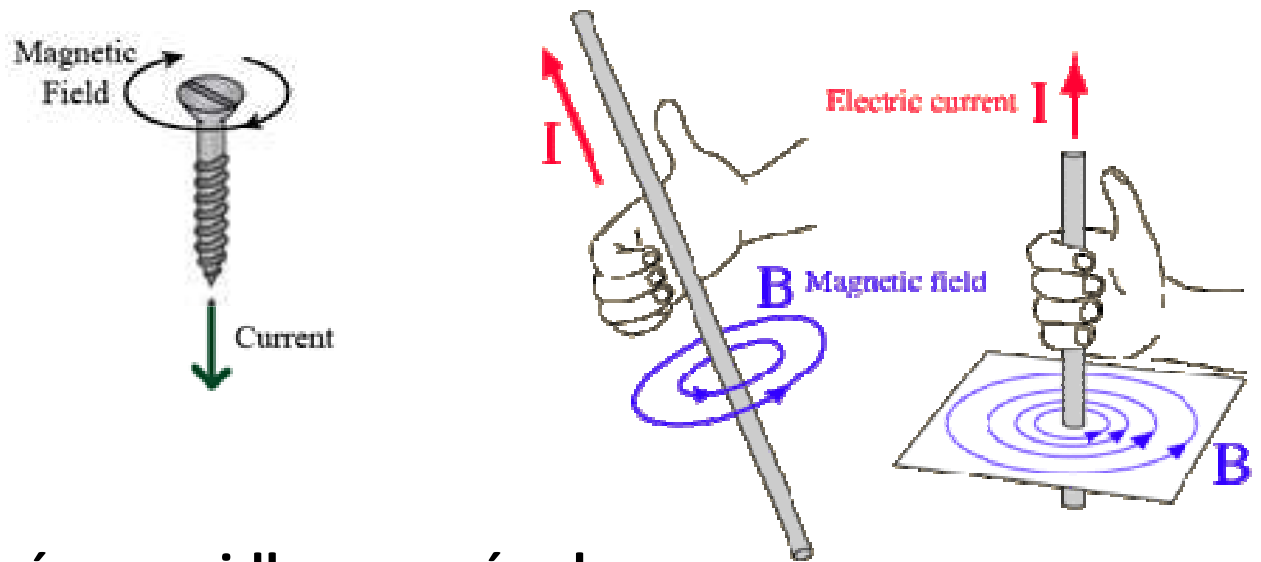


Podle **směru proudu** a **orientace magnetických indukčních čar** se vodič vychýlí vlevo nebo vpravo. Změnou směru proudu dojde ke změně výchylky opačným směrem.

**Flemingovo pravidlo levé ruky:** položíme-li otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly směr proudu a indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem.

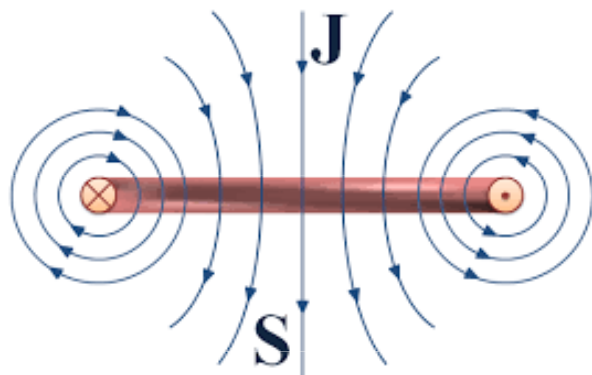


# Indukční čáry vodičů s proudem

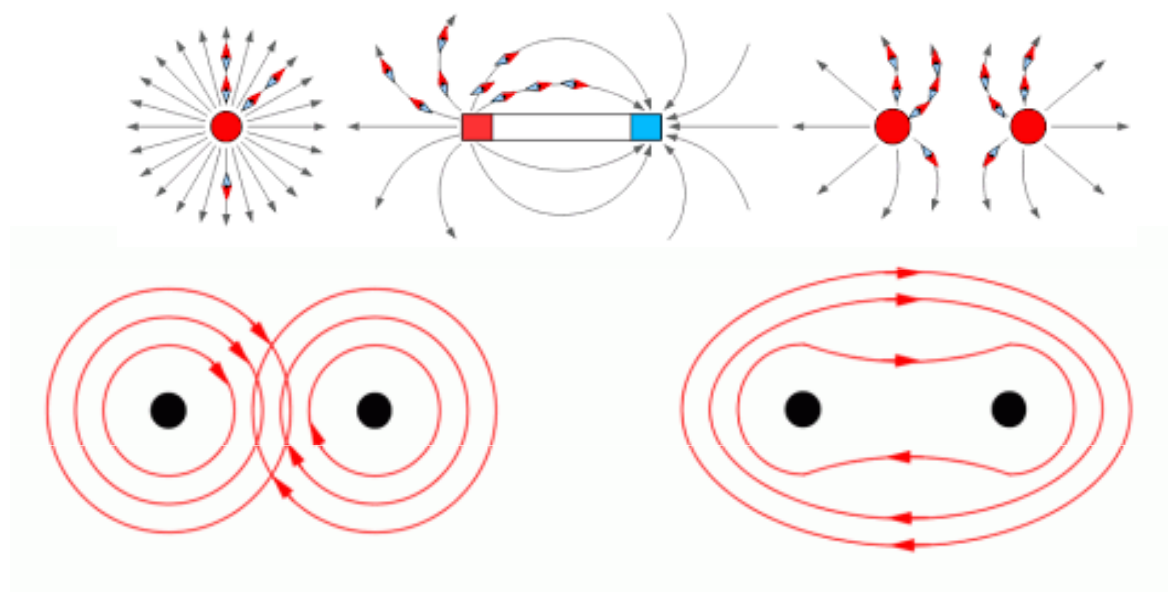


Jejich směr se určuje **Ampérovým pravidlem pravé ruky**:

Ukazuje-li při uchopení vodiče pravou rukou palec dohodnutý směr proudu, pak prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.



Magnetické pole dvou rovnoběžných vodičů.



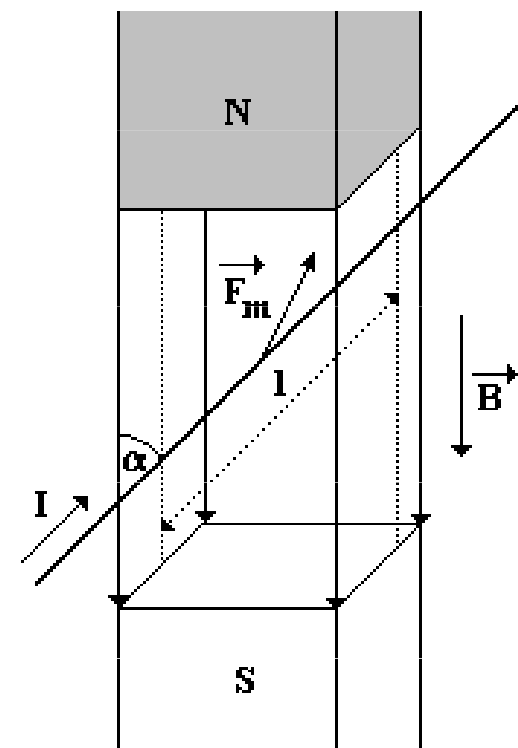
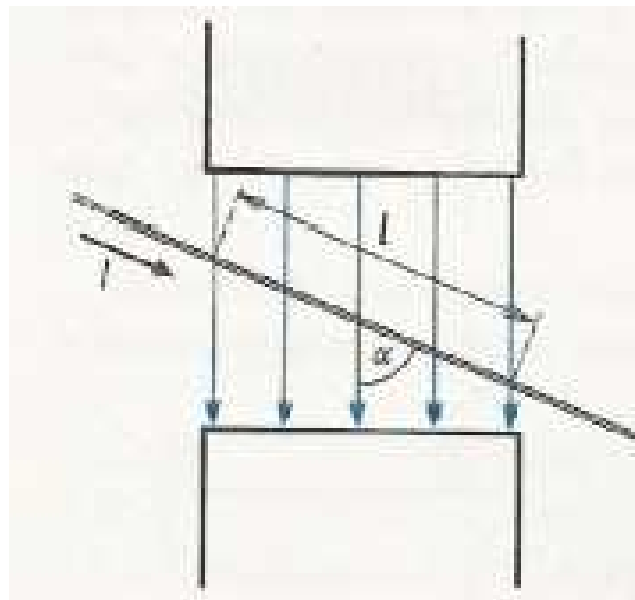
## Ampérův zákon

$$F_m = B \cdot l \cdot \sin \alpha$$

$l$  je aktivní délka vodiče,  
 $I$  je proud procházející vodičem,  
 $\alpha$  je úhel, který svírá vodič s  
indukčními čarami,  
 $B$  je **magnetická indukce**.

$$\alpha = 0^\circ \quad \text{potom} \quad F_m = 0$$

$$\alpha = 90^\circ \quad \text{potom} \quad F_m = \max$$



**Magnetická indukce  $B$**  je vektorová fyzikální veličina, charakterizující magnetické pole (směr je určen tečnou k dané indukční čáře). V místě, kde je magnetická indukce největší, je nejsilnější magnetické pole a největší hustota indukčních čar.

Pro dané homogenní pole je konstantní, jednotkou je Tesla ( $T = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ )

## Příklad

Jak velkou silou působí magnetické pole o magnetické indukci 20 mT na vodič o délce 20 cm, kterým protéká proud 500 mA. Vodič svírá s vektorem magnetické indukce úhel 30°.

$$B = 20 \text{ mT} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$l = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$I = 500 \text{ mA} = 0,5 \text{ A}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$F_m = ?$$

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,2 \cdot \sin 30^\circ$$

$$F_m = 0,001 \text{ N} = \underline{\underline{1 \text{ mN}}}$$



# Částice s nábojem v magnetickém poli

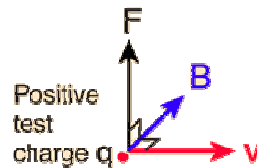
Na částici s nábojem  $Q$  pohybující se rychlostí  $v$  v magnetickém poli o indukci  $B$  působí síla

$$F_m = B \cdot l \cdot I \cdot \sin\alpha = B \cdot v \cdot t \cdot Q/t \cdot \sin\alpha = \underline{B \cdot v \cdot Q \cdot \sin\alpha}$$

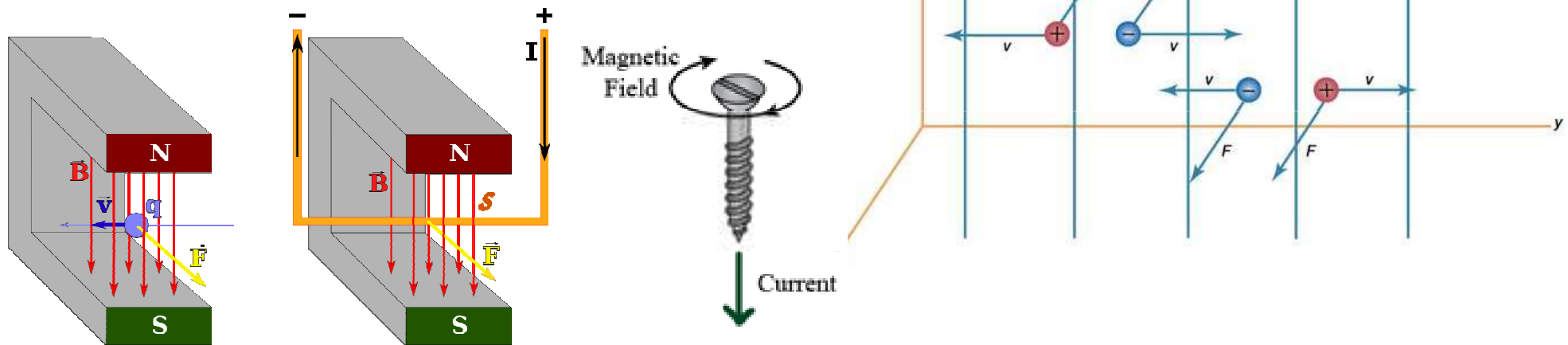
Směr pohybu **částice s kladným nábojem** se určí Flemingovým pravidlem levé ruky (směr proudu se nahradí směrem pohybu nabité částice).

U **částice se záporným nábojem** bude směr pohybu opačný.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

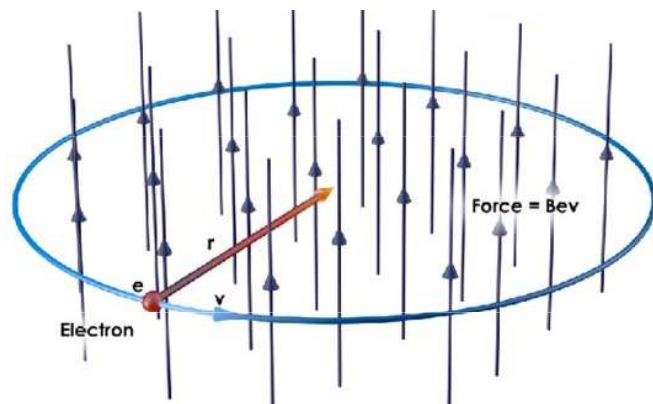
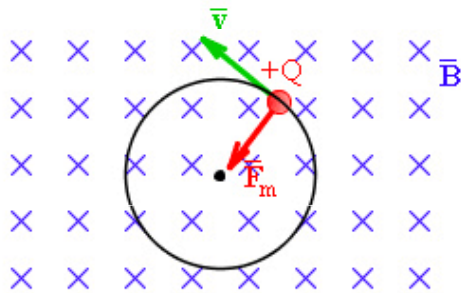


Směr vektoru  $F$  je dán **pravidlem pravé ruky** resp. **pravidlem pravotočivého šroubu**.

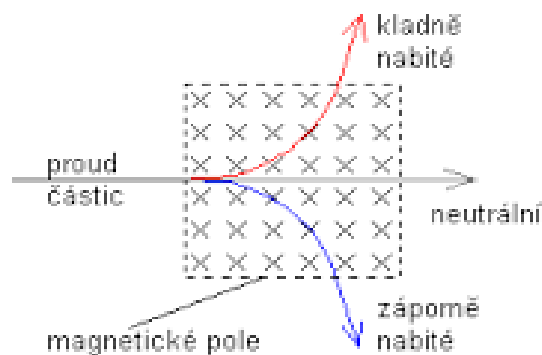
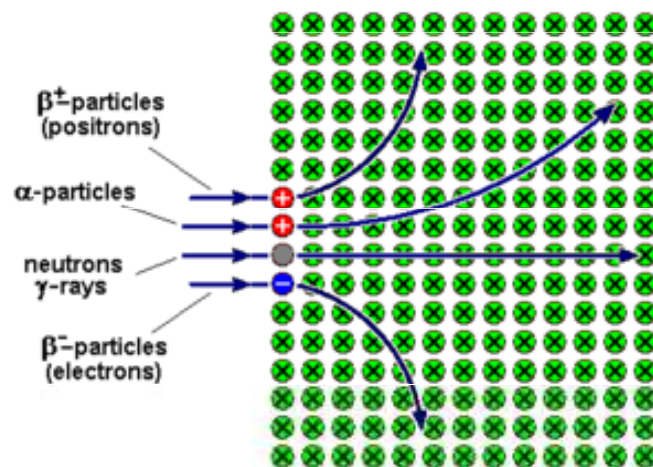


Vlétne-li do homogenního magnetického pole kolmo k vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$  částice s nábojem  $Q$ , bude na ni kolmo na směr pohybu působit magnetická síla

$$F_m = Q \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 / r$$



Částice se bude pohybovat po kružnici,  $F_m$  působí jako dostředivá síla.



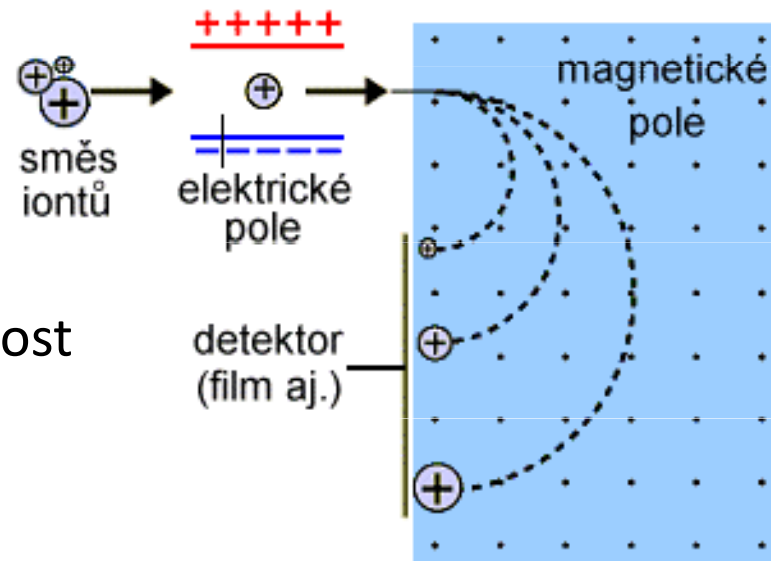
značení magnetického pole kolmé k rovině zobrazení:



síločáry vstupující kolmo "do monitoru"



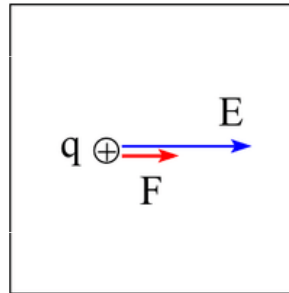
síločáry vystupující kolmo "ven z monitoru"



Měřením poloměru trajektorie lze určit hmotnost nabitě částice (**hmotnostní spektrometrie**)

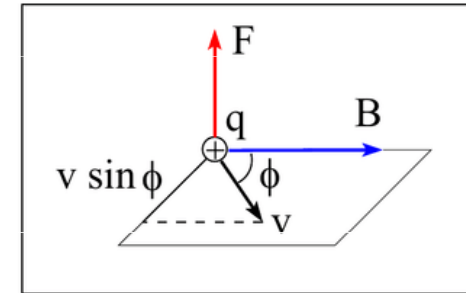
## Electric Force

- $\vec{F} = q\vec{E}$
- electric force is parallel to electric field
- SI unit of  $E$ :  $1\text{N/C}=1\text{V/m}$



## Magnetic Force

- $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ ,  $F = qvB \sin \phi$
- magnetic force is perpendicular to magnetic field
- SI unit of  $B$ :  $1\text{Ns/Cm}=1\text{T}$  (Tesla)
- $1\text{T}=10^4\text{G}$  (Gauss)



$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Electric force
Magnetic force

	point charge	infinite line of charge	infinite plane of charge
electric field $\vec{E}$ units: N/C	$E \propto \frac{1}{r^2}$	$E \propto \frac{1}{r}$	$E \propto 1$
magnetic field $\vec{B}$ units: Tesla (T)	(no magnetic monopoles)	$B \propto \frac{1}{r}$	$B \propto 1$

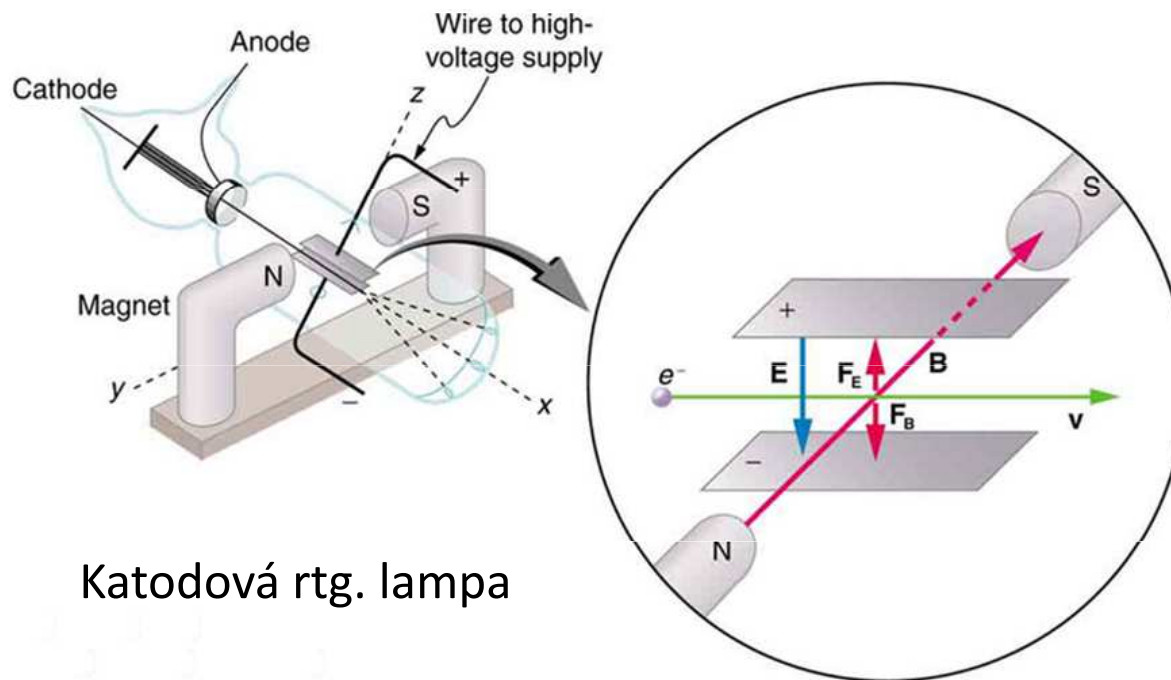
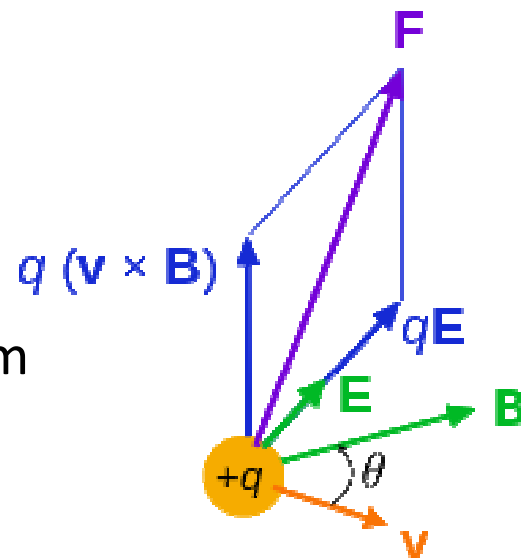
# Lorentzova síla

V elektromagnetickém poli se pohybuje částice s nábojem, na tuto částici současně působí síla elektrostatická  $F_e$  a magnetická  $F_m$ . Proto výsledná síla působící na částici bude dána jejich vektorovým součtem

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Electric force                      Magnetic force

**Lorentzova síla**  $F_L$  je síla, která vzniká působením magnetické a elektrostatické síly na částici s nábojem.

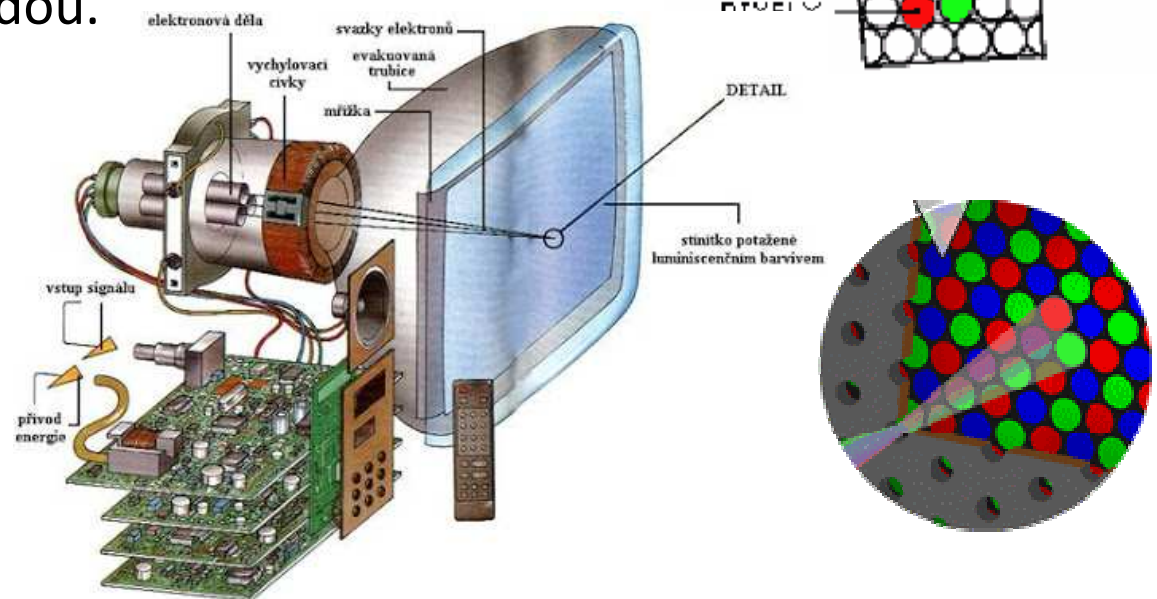
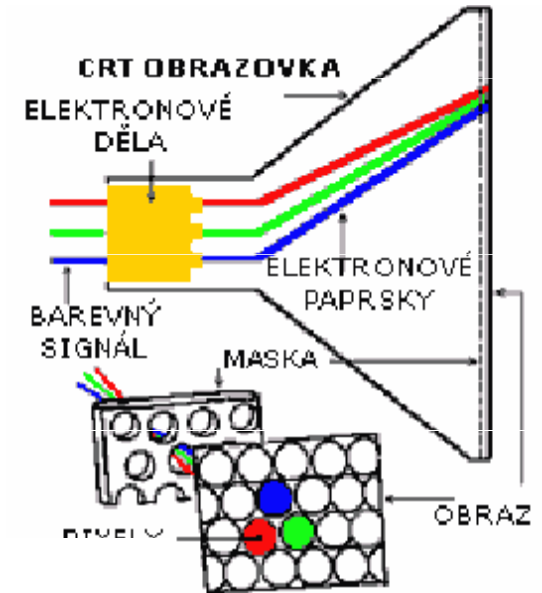
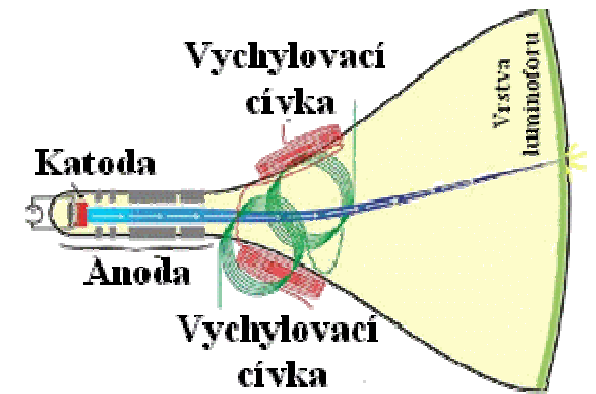


Katodová rtg. lampa

# CRT obrazovka

CRT (Cathode Ray Tube, obrazová elektronka) funguje na následujícím principu:

Obraz se vytváří tak, že z katody v hrdle obrazovky jsou emitovány elektrony, ty následně prochází trubicí, kde jsou díky anodě usměrňovány do úzkého svazku. Poté prochází štěrbinovou či bodovou maskou, aby dopadly na dané místo a vytvořily barevný bod ("tečku"). Elektron pak dopadne na luminofor a ten podle intenzity vyloučí foton (rozsvítí se). Obraz vzniká po tečkách, které jsou uspořádány do řad a sloupců. K tomu, aby se elektrony mohly takto vychylovat, slouží vychylovací cívky umístěné za anodou.



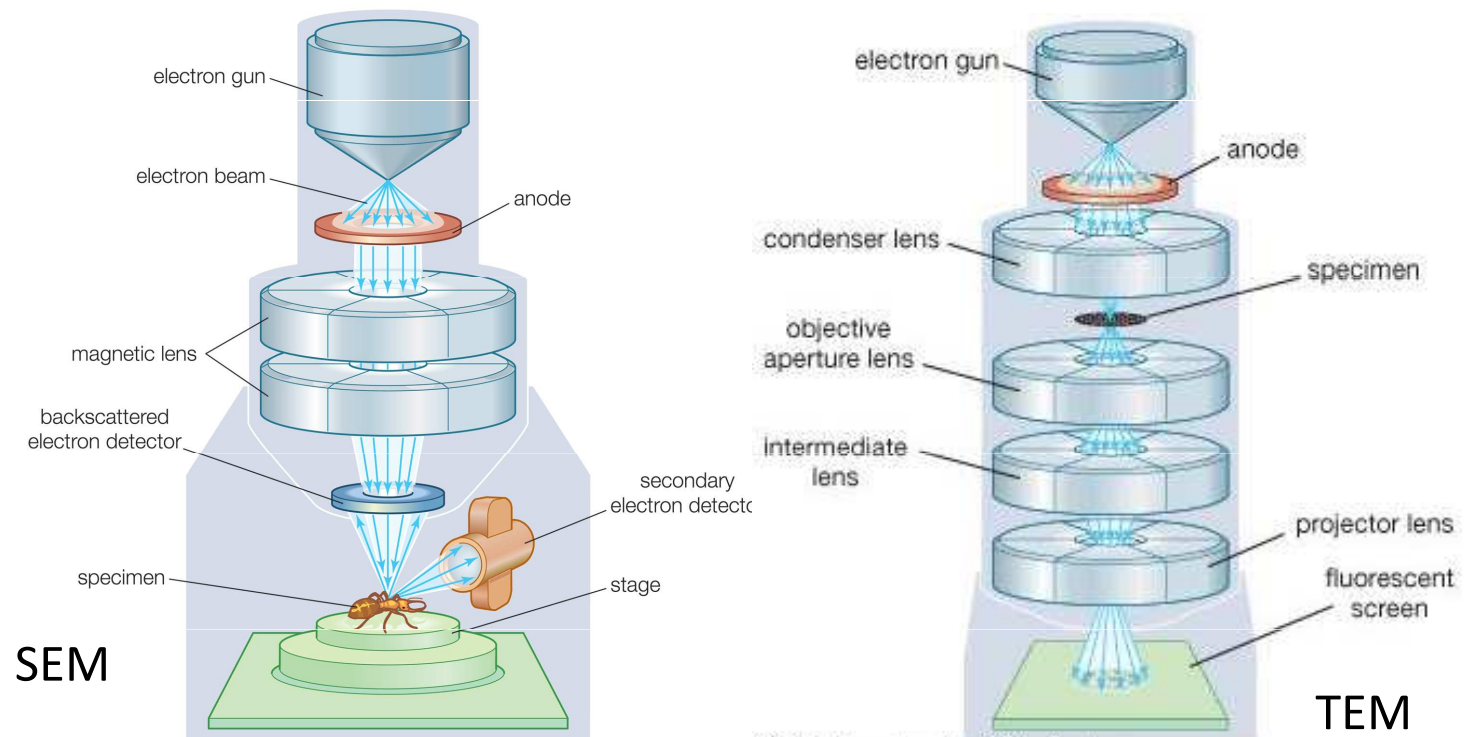


# Elektronový mikroskop

**Elektronový mikroskop** je obdoba světelného mikroskopu, ve kterém jsou ale fotony nahrazeny elektrony a skleněné čočky elektromagnetickými čočkami. Elektromagnetická čočka je v podstatě cívka, která vytváří vhodně tvarované magnetické pole. Protože mezní rozlišovací schopnost je úměrná vlnové délce použitého záření a elektrony mají podstatně kratší vlnovou délku (de Broglieho vlna) než má viditelné světlo, má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího *efektivního zvětšení* (až 1 000 000×) než světelný mikroskop.

Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

Transmisní elektronový mikroskop (TEM)





## Příklad

Do homogenního magnetického pole vletne proton rychlostí  $5 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  kolmo k magnetickým indukčním čarám. Velikost magnetické indukce magnetického pole je 20 mT. Určete poloměr kružnicové trajektorie protonu ( $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

$$v = 5 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$B = 20 \text{ mT} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$r = ?$$

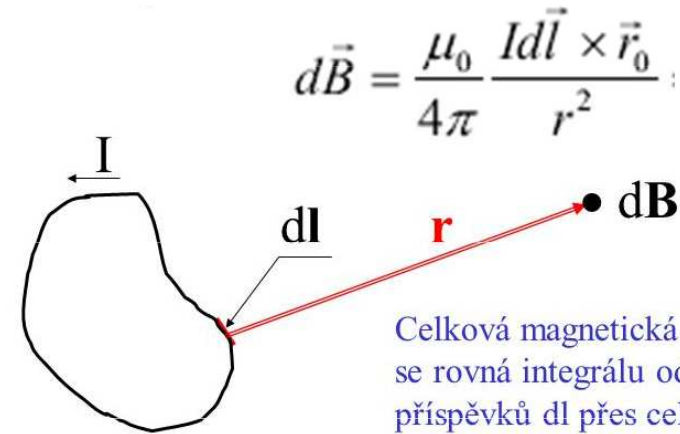
$$Q \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 / r$$

$$r = m \cdot v / (e \cdot B) = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 5 \cdot 10^6 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 20 \cdot 10^{-3})$$

$$r = \underline{2,6 \text{ m}}$$

# Biotův - Savartův zákon

**Biotův-Savartův zákon** (Biotův-Savartův-Laplaceův zákon) popisuje magnetickou indukci, která vzniká díky pohybujícímu se náboji. Udává vztah mezi magnetickou indukcí  $B$ , proudem  $I$  a geometrickým uspořádáním vodiče v prostoru.



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2}$$

Celková magnetická indukce  $B$  se rovná integrálu od všech příspěvků  $d\vec{l}$  přes celou smyčku protékanou proudem  $I$

## Srovnání vztahů pro elektrické a magnetické pole

### Elektrické pole

Coulombův zákon

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{r^2} \vec{r}^0$$

Gaussův zákon

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum Q_c$$

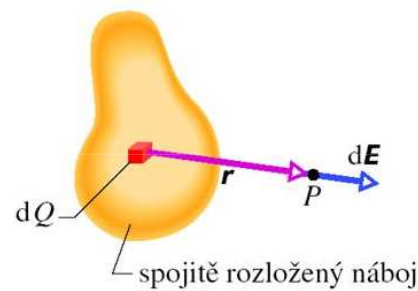
### Magnetické pole

Biotův-Savartův zákon

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \vec{r}^0}{r^2}$$

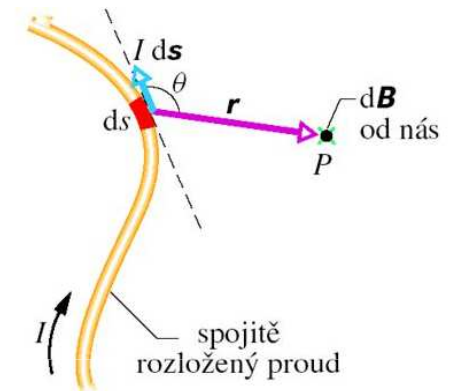
Ampérův zákon

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \sum I_c$$



$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{r^3} \vec{r}$$

Coulombův zákon



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$\mu_0 = 1/(c^2 \epsilon_0) = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Biotův- Savartův zákon

# Magnetické pole přímého vodiče

Magnetické indukční čáry v okolí přímého vodiče s proudem, mají tvar soustředných kružnic. Jejich směr se určuje pomocí Ampérova pravidla pravé ruky.

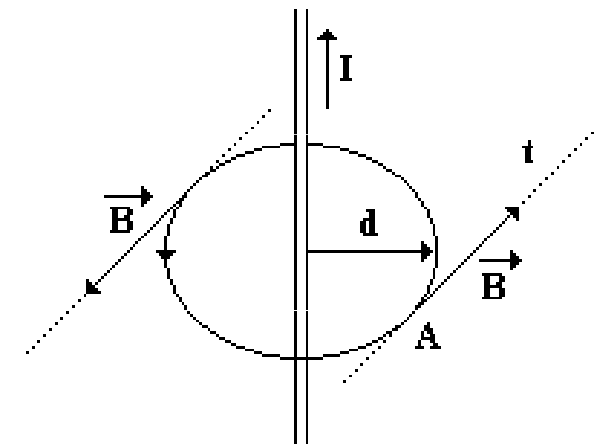
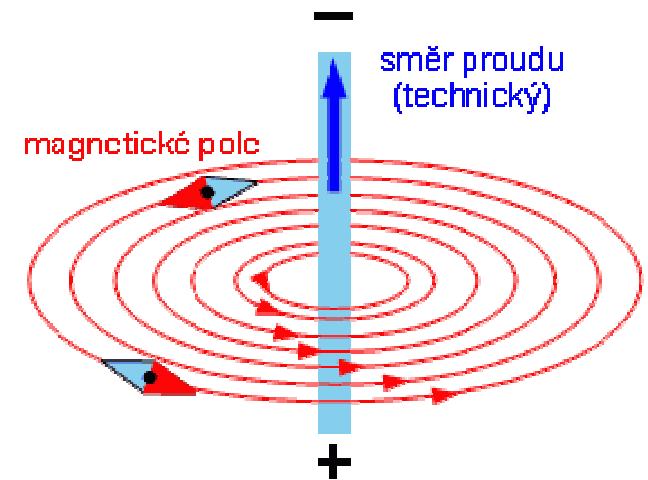
Velikost magnetické indukce  $B$  ve vzdálenosti  $l$  od přímého vodiče, kterým protéká proud  $I$  je

$$B = \mu / (2 \cdot \pi) \cdot I / d$$

**Permeabilita prostředí**  $\mu$  je veličinou charakterizující prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno elektrickým proudem. Ve vakuu je to **permeabilita vakua**  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ .

$$\mu = \mu_0 \cdot M_r$$

$\mu_r$  je **relativní permeabilita**.



# Magnetické pole dvou přímých vodičů

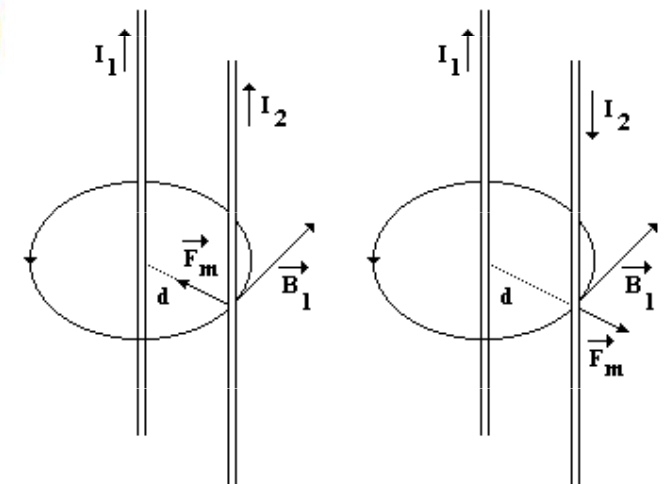
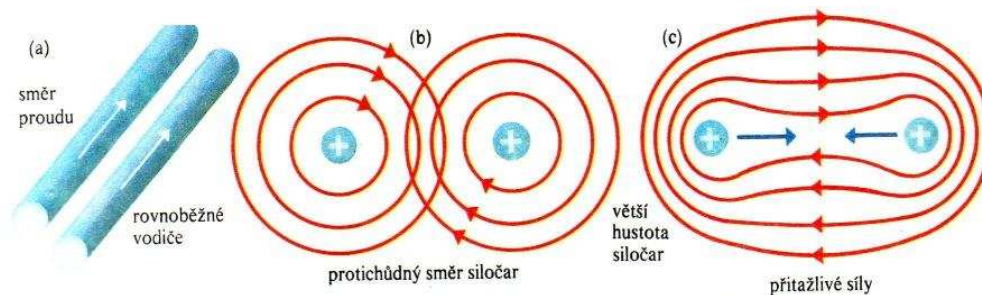
Když umístíme blízko sebe dva přímé rovnoběžné vodiče, kterým bude procházet proud, budou na sebe navzájem působit silou  $F_m$  o velikosti

$$F_m = (\mu/2\pi) \cdot (I_1 \cdot I_2 \cdot l) / d.$$

$d$  je vzdálenost mezi vodiči,  $l$  je délka vodičů,  $I_1$  a  $I_2$  jsou proudy protékající vodiči 1 a 2.

*Vodiči budou procházet proudy stejného směru a oba vodiče se budou navzájem přitahovat.*

*Vodiči budou procházet proudy opačného směru a oba vodiče se budou navzájem odpuzovat.*



Použitím Ampérova pravidla pravé ruky lze zjistit orientaci indukčních čar, pro zjištění směru síly, která bude působit mezi vodiči, lze použít Flemingovo pravidlo levé ruky.

## Příklad

Dvěma přímými rovnoběžnými vodiči, vzdálenými od sebe 2 cm, prochází proudy 20 A a 25 A. Jaká magnetická síla působí na část každého vodiče o délce 2,5 m jestliže oba proudy mají a) stejný směr, b) opačný směr? Permeabilita vakua je  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ .

$$d = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

$$I_1 = 20 \text{ A}$$

$$I_2 = 25 \text{ A}$$

$$l = 2,5 \text{ m}$$

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$

$$F_m = ?$$

$$F_m = \mu / (2 \cdot \pi) \cdot (l \cdot I_1 \cdot I_2) / d = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} / (2 \cdot \pi) \cdot (2,5 \cdot 20 \cdot 25) / 0,02$$

$$F_m = 0,0125 \text{ N} = \underline{12,5 \text{ mN}}$$

a) Vodiče se přitahují silou 12,5 mN.

b) Vodiče se odpuzují silou 12,5 mN.

# Cívka (solenoid)

Cívka je elektrotechnická součástka používaná v elektrických obvodech k vytvoření magnetického pole elektrického proudu (cívka s jádrem slouží jako **elektromagnet**) a k indukci elektrického proudu proměnným magnetickým polem (cívka slouží jako **induktor**, nositel indukčnosti). Cívka s velkým počtem závitů se nazývá **solenoid**.

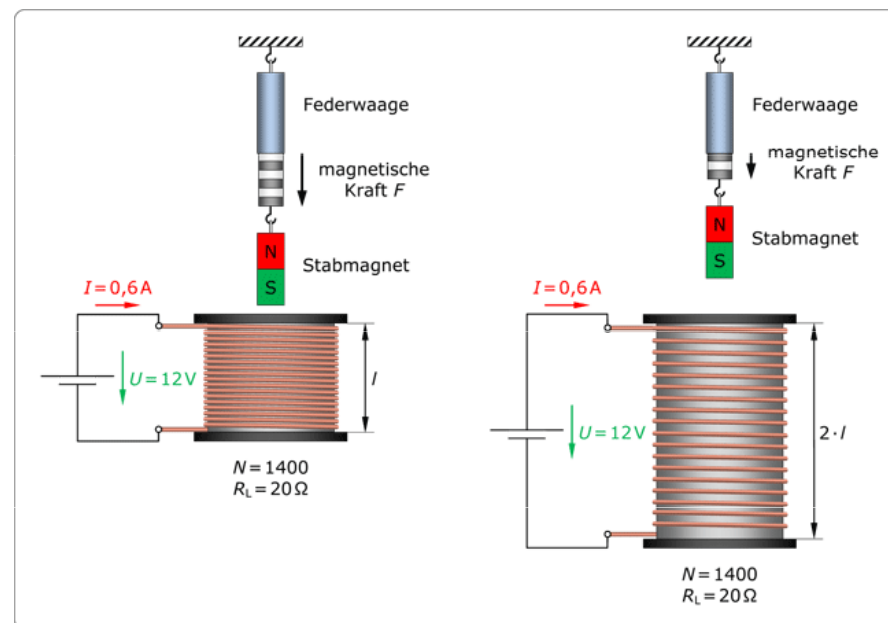
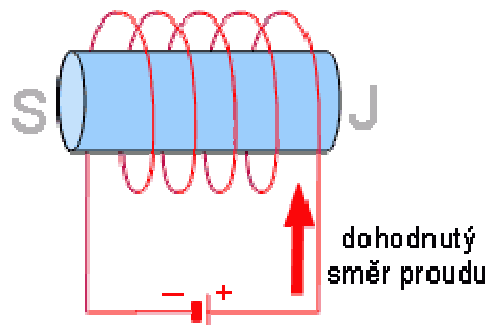
Cívka = více vodičů - jejich magnetická pole se složí -> silnější výsledné pole.

Magnetické pole v okolí cívky je shodné s magnetickým polem tyčového magnetu. Směr magnetických indukčních čar v okolí cívky se určí pomocí Ampérova pravidla pravé ruky.

Velikost magnetické indukce  $B$  uvnitř solenoidu ve vakuu

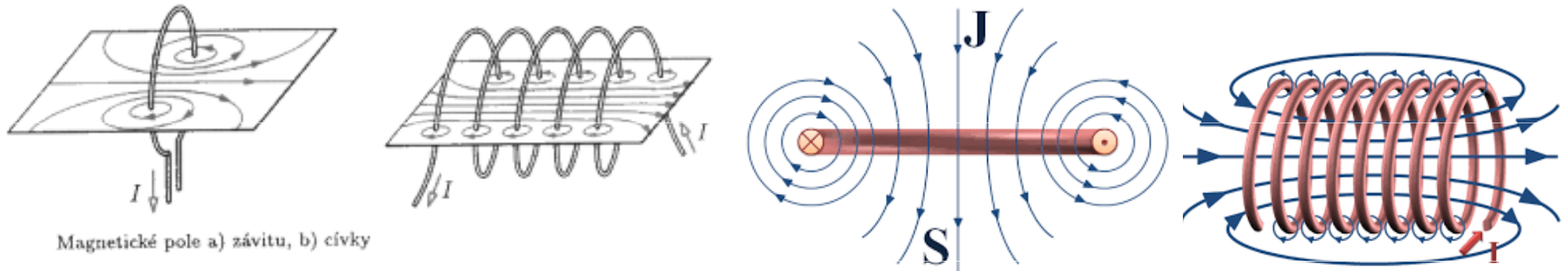
$$B = \mu_0 \cdot N \cdot I / l$$

$l$  je délka cívky,  $N$  počet závitů cívky,  $I$  je proud protékající cívkou.





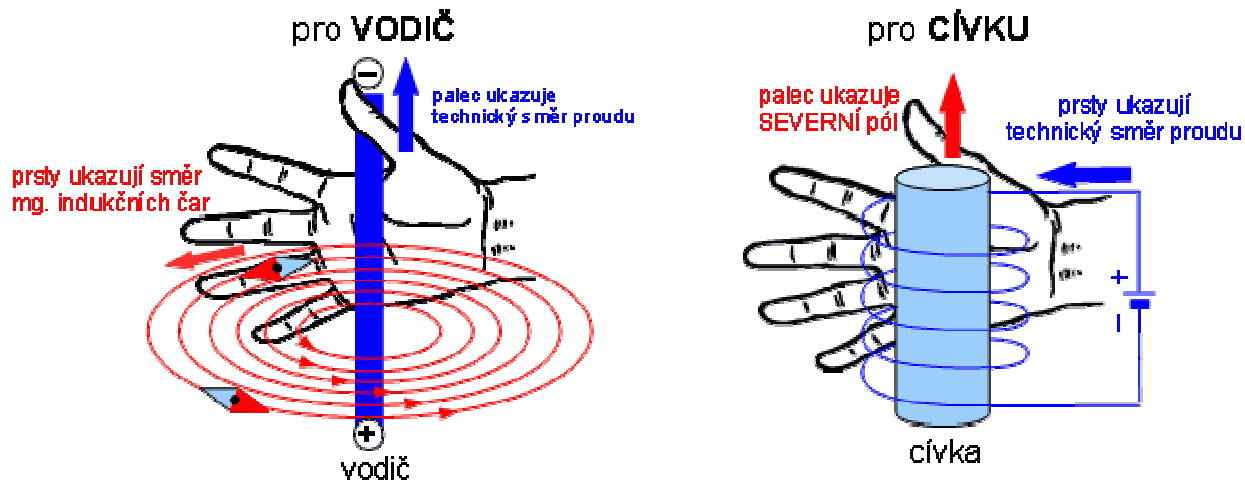
# Magnetické pole cívky



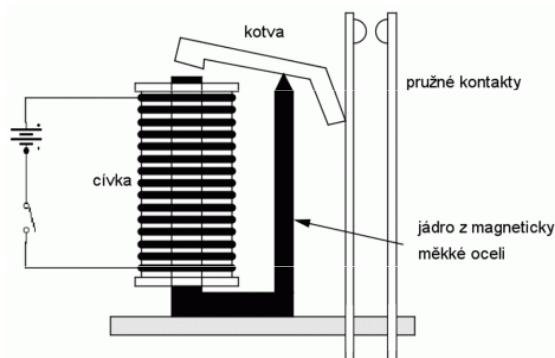
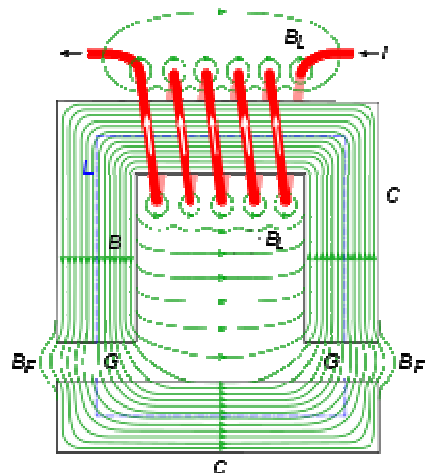
Magnetické pole a) závitů, b) cívky

**Ampérovo pravidlo pravé ruky pro cívku:** pokrčené prsty ukazují směr proudu v závitěch a orientaci magnetických indukčních čar pak značí palec.

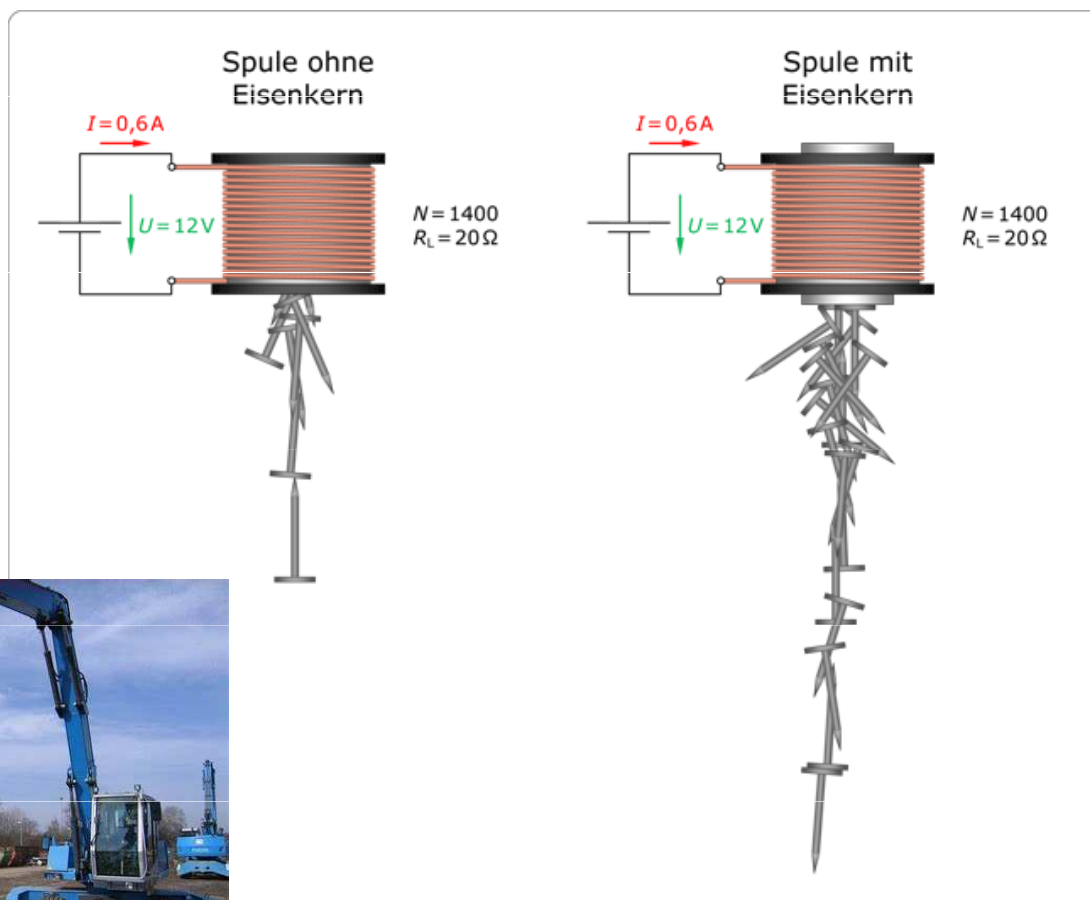
Ampérovo pravidlo pravé ruky



Pro zesílení elektromagnetického pole cívky se do ní vkládá jádro z oceli, nebo z nějaké jiné měkké ferromagnetické látky. Cívka navinutá na ferromagnetickém jádře se nazývá **elektromagnet**. Jako slabý elektromagnet se chová i cívka s proudem bez ferromagnetického jádra. Elektromagnet je používán např. v elektrickém zvonku, v jističích, stykačích, v hutním průmyslu, ve sběrnách kovového šrotu nebo v elektromagnetických relé, v automobilovém průmyslu jako snímač otáček klikového hřídele, pro brzdění tramvajových vozů, obráběcích strojů a ve zdravotnictví.



elektromagnetické relé



# Hallův jev

**Hallův jev** je posun vodivostních elektronů ve vodiči, jímž podélně prochází elektrický proud, působením magnetické síly a následný vznik příčného elektrického pole ve směru kolmém k vektoru magnetické indukce a ke směru proudu. Mezi protilehlými stranami vodiče vznikne rozdíl potenciálů, **Hallovo napětí**  $U_H$ .

$$U_H = E \cdot d$$

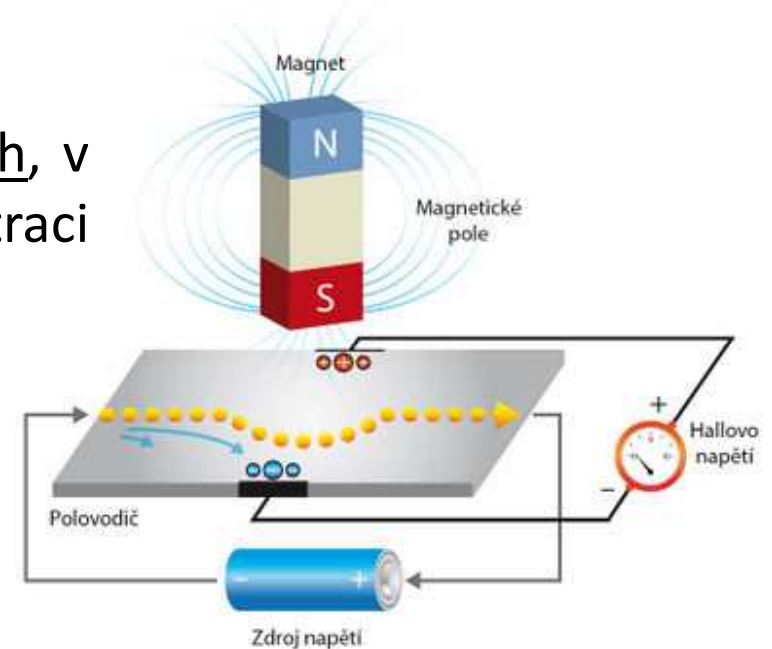
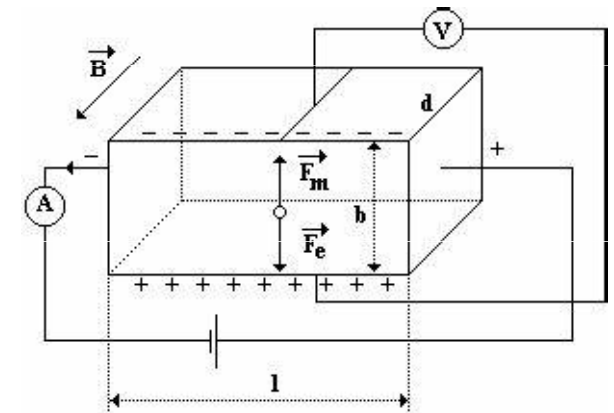
Pro velikost *elektrické síly*  $F_e$  platí:  $F_e = E \cdot e = U_H \cdot e / d$

Pro velikost *magnetické síly*  $F_m$  platí:  $F_m = e \cdot v \cdot B$

$$U_H = B \cdot v \cdot d$$

Hallův jev je generován především v polovodičích, v kovech se vzhledem k vysoké koncentraci vodivostních elektronů téměř neuplatňuje.

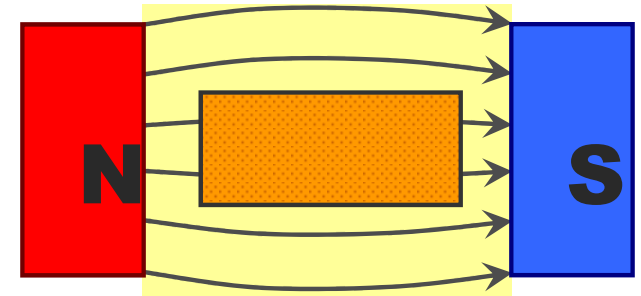
Hallův jev se využívá při měření magnetických polí (Hallova sonda), bezkontaktního měření el. proudu, apod.





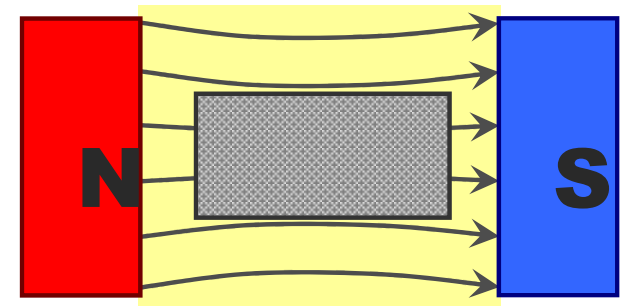
1. **diamagnetické látky** jsou složeny z diamagnetických atomů, nepatrně zeslabují magnetické pole, jejich relativní permeabilita je o něco menší než jedna.

Ve vnějším magnetickém poli látka projevuje slabý magnetismus s polem vektoru indukce opačného směru vzhledem k vektoru indukce vnějšího pole.



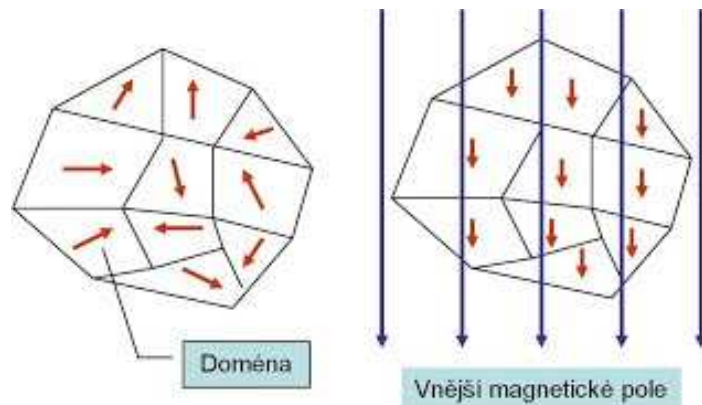
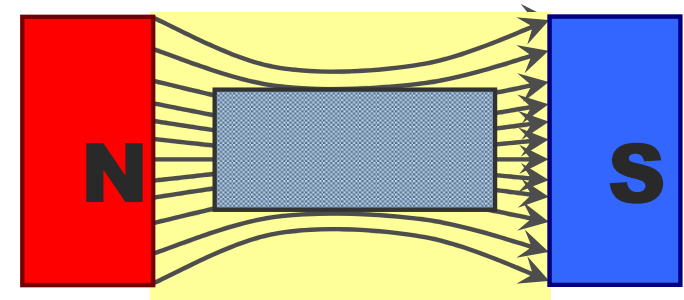
2. **paramagnetické látky** jsou složeny z paramagnetických atomů, rušivým vlivem tepelného pohybu nelze dosáhnout paralelního uspořádání jejich magnetických momentů, nepatrně zesilují magnetické pole. Jejich relativní permeabilita je o něco větší jako jedna.

Ve vnějším magnetickém poli látka projevuje slabý magnetismus s polem vektoru indukce stejného směru vzhledem k vektoru indukce vnějšího pole.



3. **ferromagnetické látky jsou** složeny z paramagnetických atomů, v látkách působí tzv. výměnné síly  $\Rightarrow$  dochází k paralelnímu uspořádání magnetických momentů  $\Rightarrow$  vznikají tzv. **magnetické domény**. Jejich relativní permeabilita je mnohem větší jako jedna.

Ve vnějším magnetickém poli látka projevuje silný magnetismus s polem vektoru indukce stejného směru vzhledem k vektoru indukce vnějšího pole.

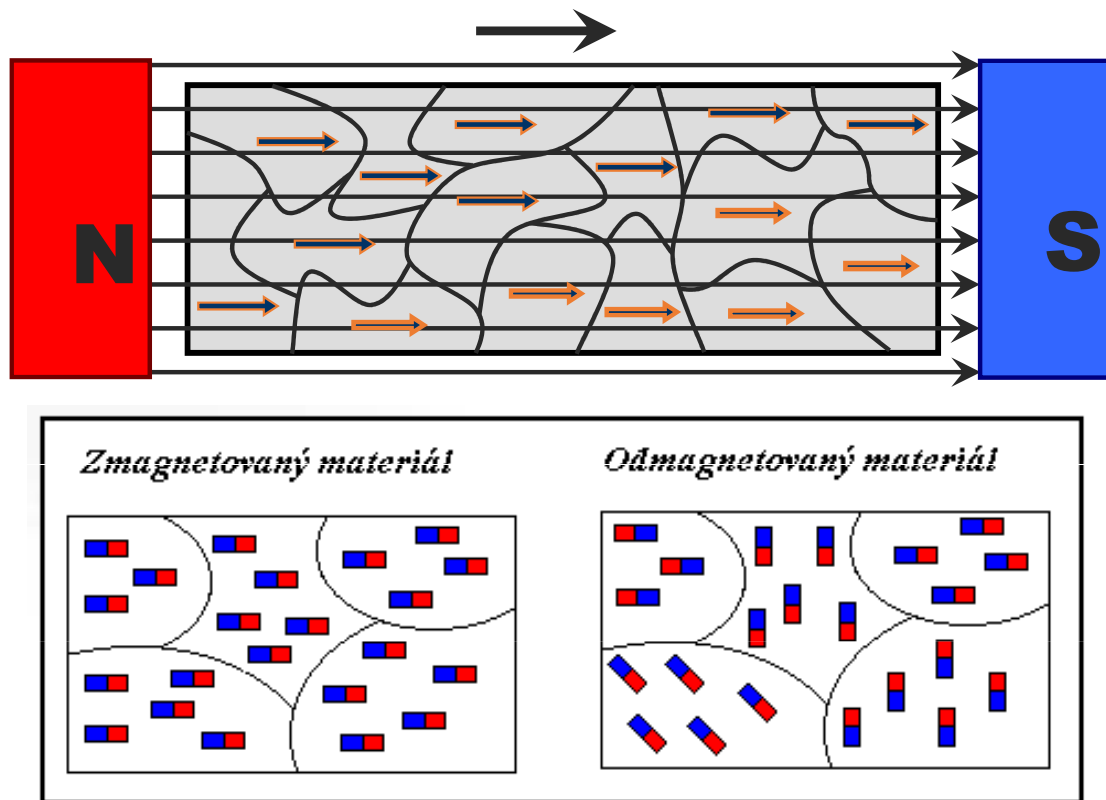


**Magnetické momenty** v doméně mají stejný směr - domény se projevují silným magnetickým polem. Směry magnetických polí domén jsou zpravidla rozloženy nahodile - látka se navenek magneticky neprojevuje.

**Spontánní magnetizace** - samovolné magnetické nasycení domén, tj. bez působení vnějšího magnetického pole.



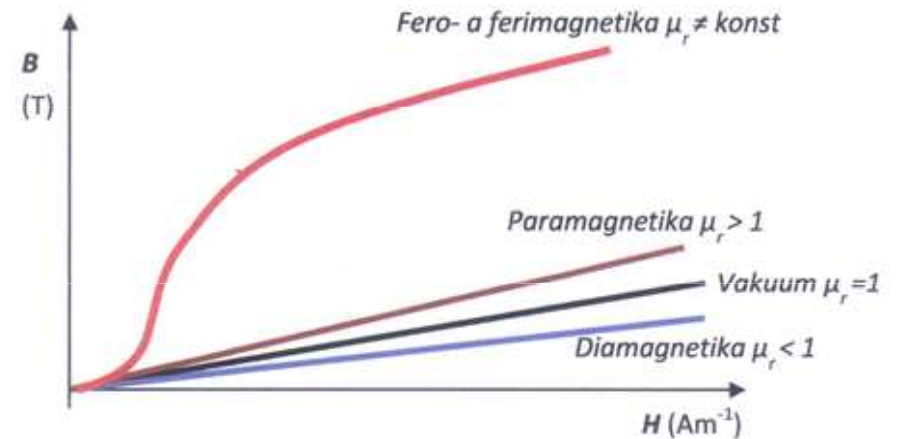
**Magnetizace** - magnetické nasycení feromagnetické látky vlivem vnějšího magnetického pole. Atomy se orientují do směru souhlasného s indukčními čarami vnějšího pole. Čím vyšší je uspořádanost v doméně, tím silnější je výsledné pole. Vzdálené uspořádání (a výsledné silné magnetické pole) je hlavním znakem feromagnetických materiálů.



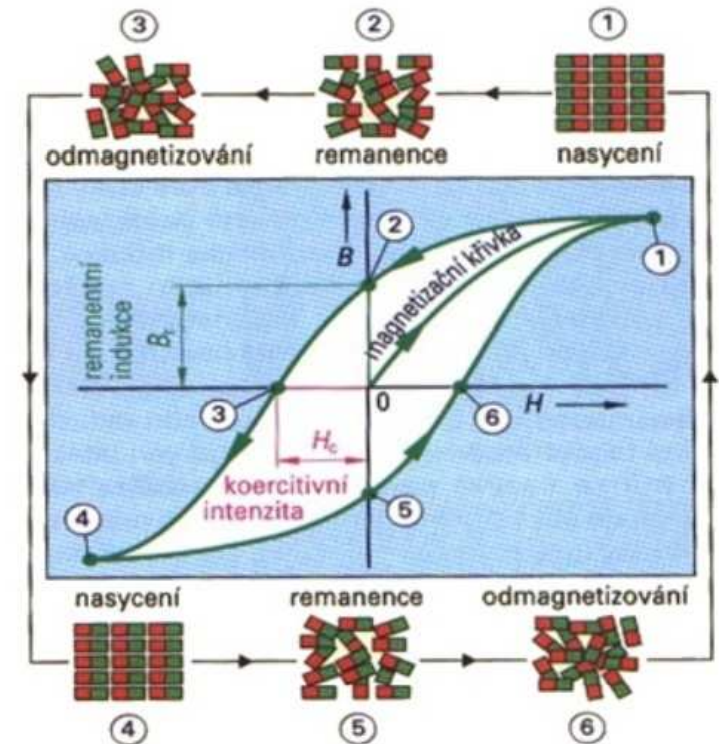
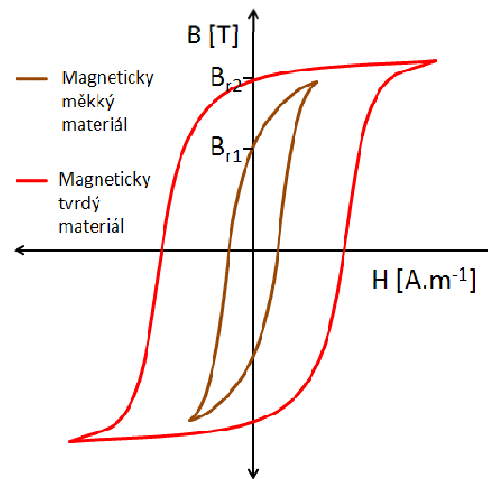
**Curieova teplota** ( $T_c$ ) je charakteristická vlastnost feromagnetických a piezoelektrických látek, nad Curieovou teplotou ztrácí látka své feromagnetické (či piezoelektrické) vlastnosti.

**Magnetizační křivka** je závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole  $B = f(H)$ .

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$



**Hysterezní křivka (hysterezní smyčka)** vyjadřuje závislost  $B$  na  $H$  při pomalé, plynulé změně  $H$  od  $+H_s$  do  $-H_s$ .



**Magnetická susceptibilita ( $\chi$ )** je skalární veličina, popisuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli.

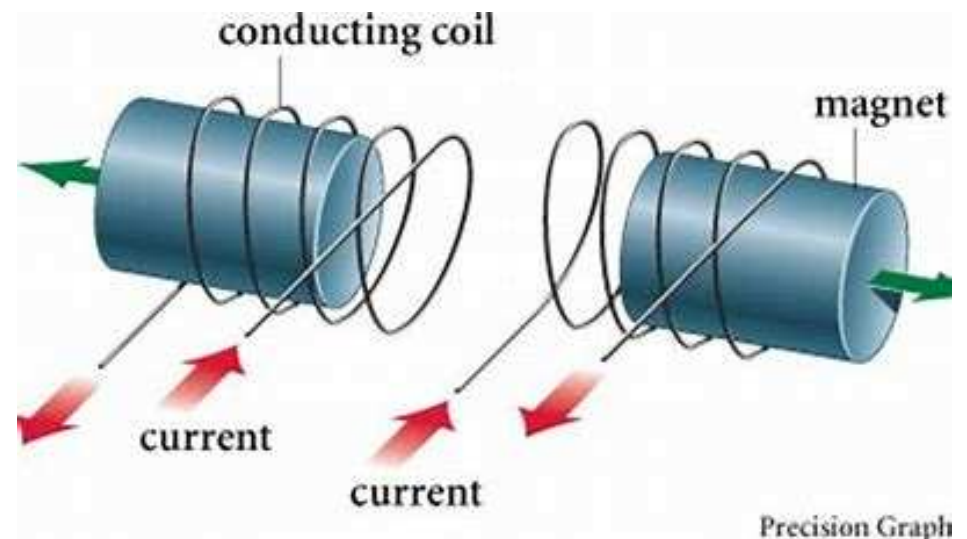
$$\vec{B} = \mu_m \vec{H}$$

$$\mu_m = \mu_0 (1 + \chi)$$

# Elektromagnetická indukce

**Elektromagnetická indukce** je jev, při kterém ve vodiči dochází ke vzniku indukovaného elektromotorického napětí  $U_i$  a indukovaného proudu v důsledku časové změny magnetického indukčního toku, tj. důsledkem umístění vodiče v nestacionárním magnetickém poli.

Vlastnosti **nestacionárního magnetického pole** (magnetická indukce) se s časem mění. Mezi zdroje tohoto pole můžeme zařadit nepohybující se vodič s časově proměnným proudem, pohybující se vodič s proudem (časově proměnným i konstantním) nebo pohybující se permanentní magnet či elektromagnet.



Velikost indukovaného napětí závisí na velikosti změny magnetického pole a rychlosti této změny.

# Magnetický indukční tok

**Magnetický indukční tok  $\Phi$**  je skalární veličina, která slouží pro kvantitativní popis sumárního působení magnetického pole a používá se např. ke kvantitativnímu popisu elektromagnetické indukce.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad [\Phi] = \text{Wb (weber)}$$

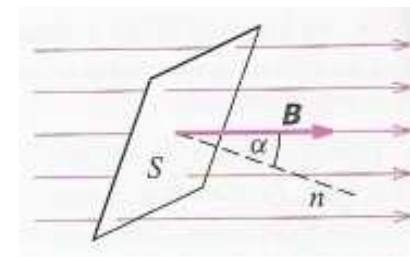
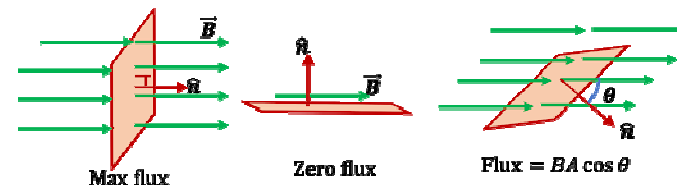
homogenní magnetické pole, rovinnou plochu o obsahu  $S$ , normálu  $n$  k ploše  $S$ , vektor magnetické indukce  $B$  a úhel  $\alpha$ , který svírá normála  $n$  s vektorem  $B$

Vyjadřuje úhrnný tok magnetické indukce procházející určitou jednoduše souvislou plochou. Při názorném zobrazení pomocí indukčních čar je mírou celkového počtu indukčních čar procházejících touto plochou.

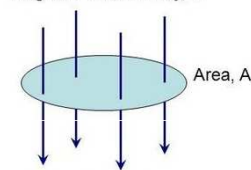
## Indukčnost

**Vlastní indukčnost** (indukčnost)  $L$  je fyzikální veličina, vyjadřující schopnost dané konfigurace elektricky vodivých těles protékaných elektrickým proudem vytvářet ve svém okolí magnetické pole.

$$L = \Phi / I \quad [L] = \text{H (henry)}$$



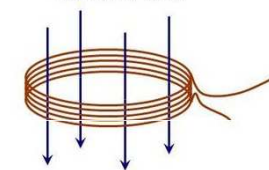
Magnetic Flux Density,  $B$



Flux,  $\Phi = B \times A$

Unit of Flux is the Weber (Wb)  
Flux is a vector term

Coil with  $N$  turns



Flux linkage of a coil =  $N \times \Phi$   
=  $N \times B \times A$

Vlastní indukčnost cívky:

$$L = \frac{\mu N^2}{l} S$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí,  $N$  je počet závitů cívky,  $l$  je délka cívky,  $S$  je obsah průřezu cívky (vztah platí pro cívku, jejíž délka je mnohem větší než poloměr (solenoid), při zanedbání rozptylu magnetického pole na krajích cívky)

Pro výpočet **indukovaného elektromotorického napětí**  $U_i$  v cívce při změně elektrického proudu v čase

$$U_i = -L \frac{dI}{dt}$$

**Faradayův - Lenzův zákon** (Lenzův zákon) popisuje vztah mezi elektrickým proudem a změnou magnetického indukčního toku:

*Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.*

$$\text{Emf} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Lenz's Law

where  $N$  = number of turns  
 $\Phi = BA$  = magnetic flux  
 $B$  = external magnetic field  
 $A$  = area of coil

**Energie magnetického pole** kolem cívky je vyjádřena vztahem

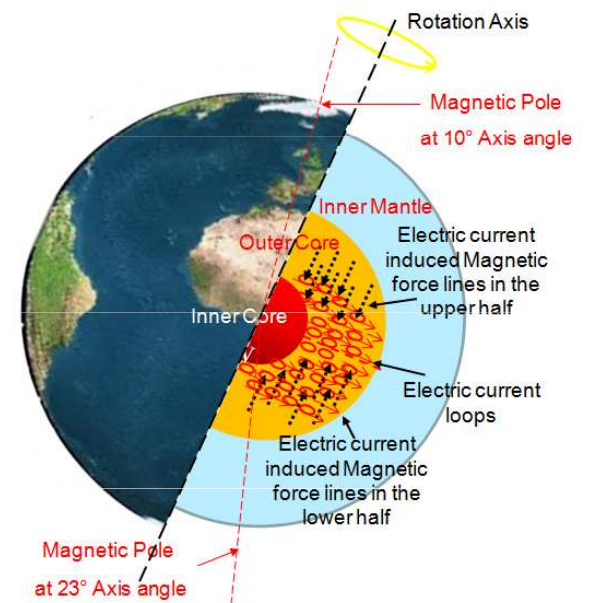
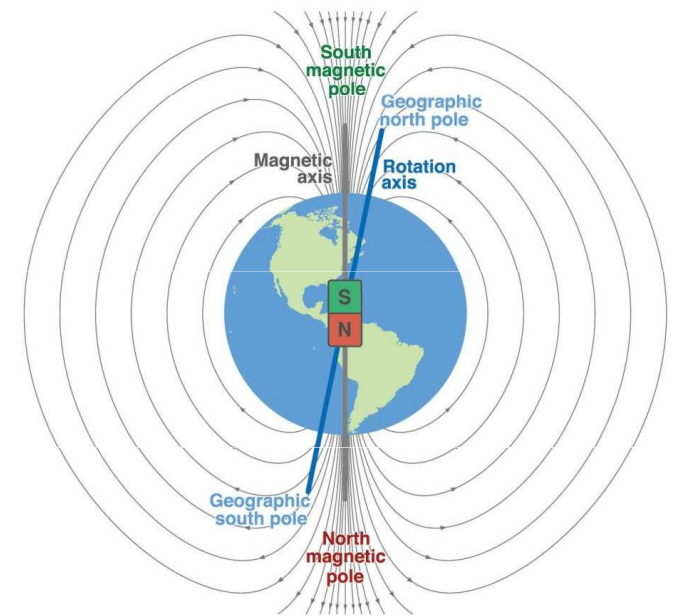
$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$



# Geomagnetické pole Země

**Magnetické pole Země** (geomagnetické pole) je indukované magnetické pole v určitém prostoru okolo Země, ve kterém působí magnetická síla generovaná geodynamem uvnitř Země. Magnetické pole Země má převážně dipólový charakter (rozložení siločar je podobné siločarám v okolí tyčového magnetu). Jeho osa neprochází středem Země, ale je na povrchu Země přibližně o 520 kilometrů odkloněna. Poloha magnetických pólů driftuje různou rychlostí, v posledních letech i několik desítek km za rok, což způsobuje problémy v navigaci.

Magnetické pole se vytváří elektrickým proudem vznikajícím prouděním tekutého vnějšího zemského jádra nacházejícího se mezi pevným vnitřním jádrem planety a zemským pláštěm. Tento proces funguje jako obrovské hydrodynamické geodynamo (prvky jádra jsou hlavně nikl a železo).



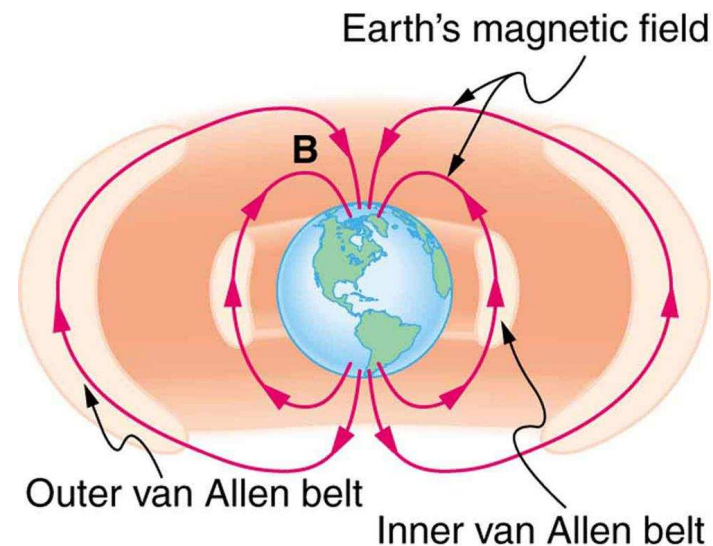


# Magnetosféra Země

Působením magnetického pole Země vzniká zemská **magnetosféra**.

Van Allenovy **radiační pásy** jsou oblasti v okolí planety, ve kterých je zachycené korpuskulární záření (energetické ionty a elektrony ze slunečního větru). Nabité částice zde jsou ovládané Lorentzovou silou a vykonávají tři různé pohyby:

1. oběh okolo své siločáry s periodou několika mikrosekund až milisekund.
2. posuvný (při složení s prvním pohybem spirálový) pohyb podél siločar.
3. pohyb kolmý na rovinu magnetického poledníku.



# Kompas

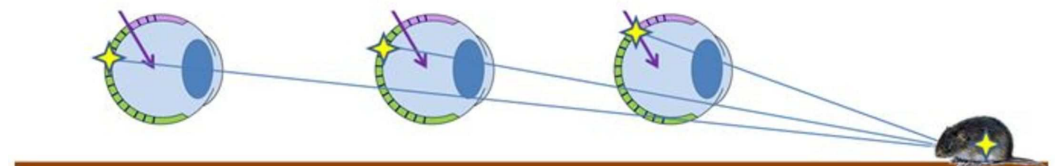
**Kompas** je zařízení k určování světových stran, obsahuje volně pohyblivou magnetickou střílku, která se vlivem zemského magnetického pole natáčí ve směru magnetického severu a jihu.



# Magnetorecepce

Lišky se při lovu hlodavců pod sněhem či ve vysoké trávě přednostně staví severojižně a skoky provedené tímto směrem mají vyšší pravděpodobnost úspěšného ulovení kořisti. Liška tedy zřejmě nejen vnímá zemské magnetické pole, ale při lovu ho dokáže využít i k vylepšení odhadu vzdálenosti.

Na základě terénních záběrů zvěře a satelitních snímků se ukázalo, že pasoucí se nebo odpočívající krávy, srnci a jeleni nepostávají náhodně, ale nejčastěji se orientují v severojižním směru. Pod dráty vysokého napětí je poloha zvířat naopak náhodná, tj. indukovaná elektromagnetická pole vedou k dezorientaci a ztrátě schopnosti vnímat zemské magnetické pole. Čím dále od elektrického vedení, tím více opět začala u zvířat převládat severojižní orientace.



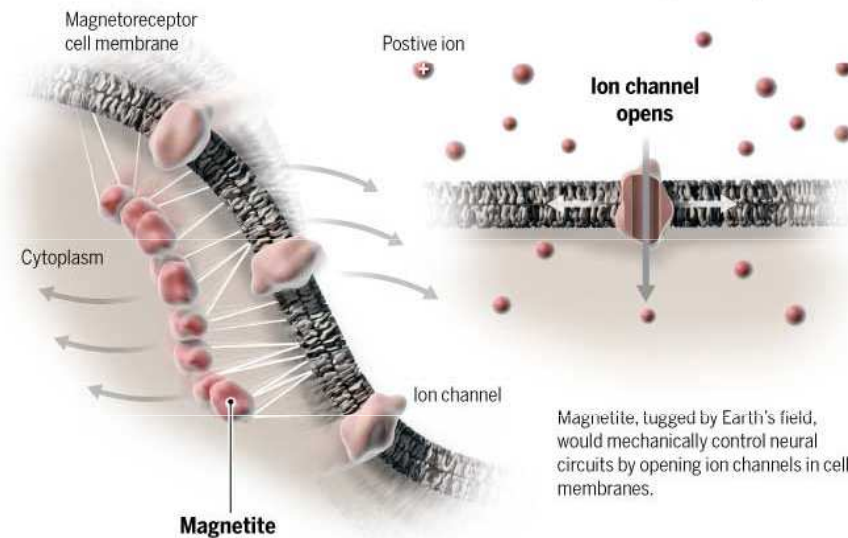
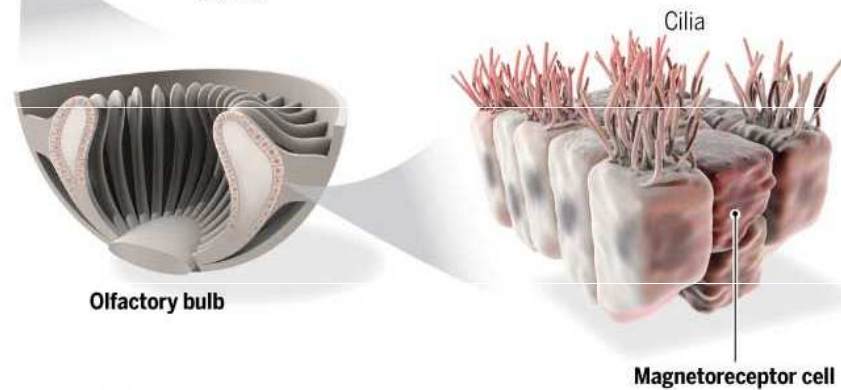
# Mechanismy magnetorecepce

*mechanický, založený na magnetickém minerálu magnetitu*  
*biochemický, založený na proteinu kryptochromu.*

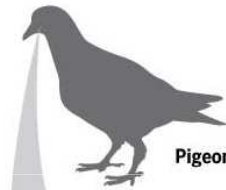
## Magnetite model



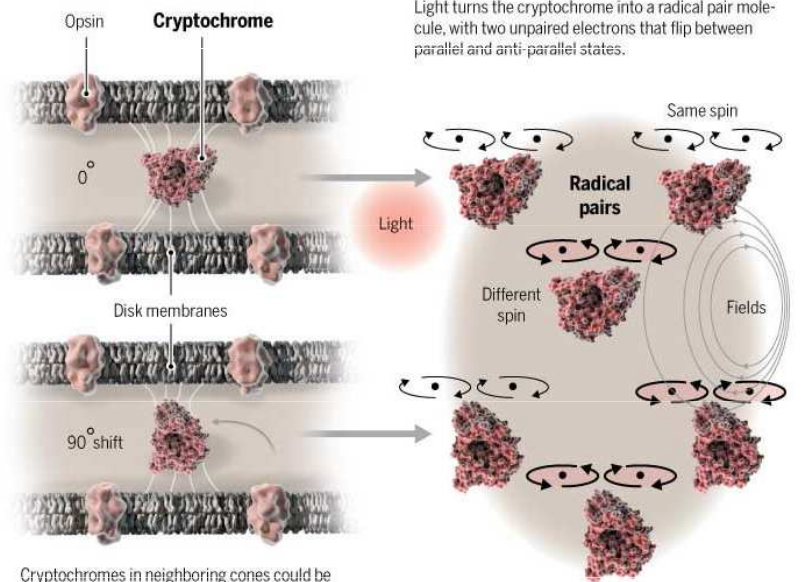
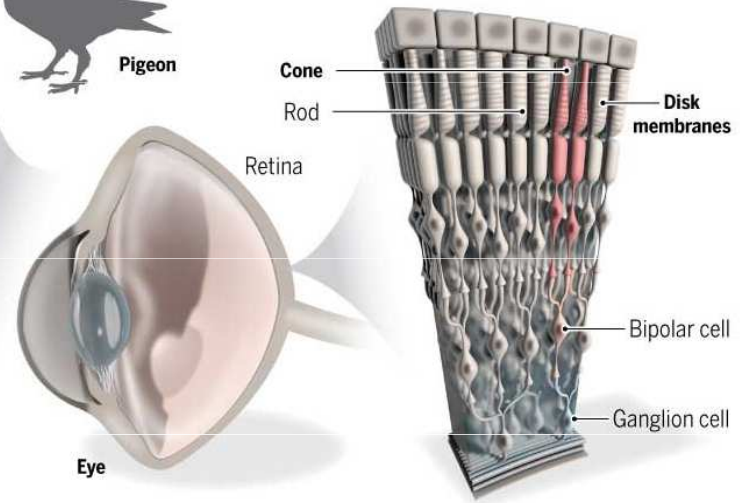
Magnetite has been found in many animal tissues, but in fish, some evidence points to the nose as the home for magnetoreceptors. They could sit between ciliated olfactory sensory cells.



## Cryptochrome model



Cryptochromes may lie in mysterious double cone cells. The ratio of chemical products from each cone could determine magnetic orientation, which the brain might process as light and dark patches on the visual field.



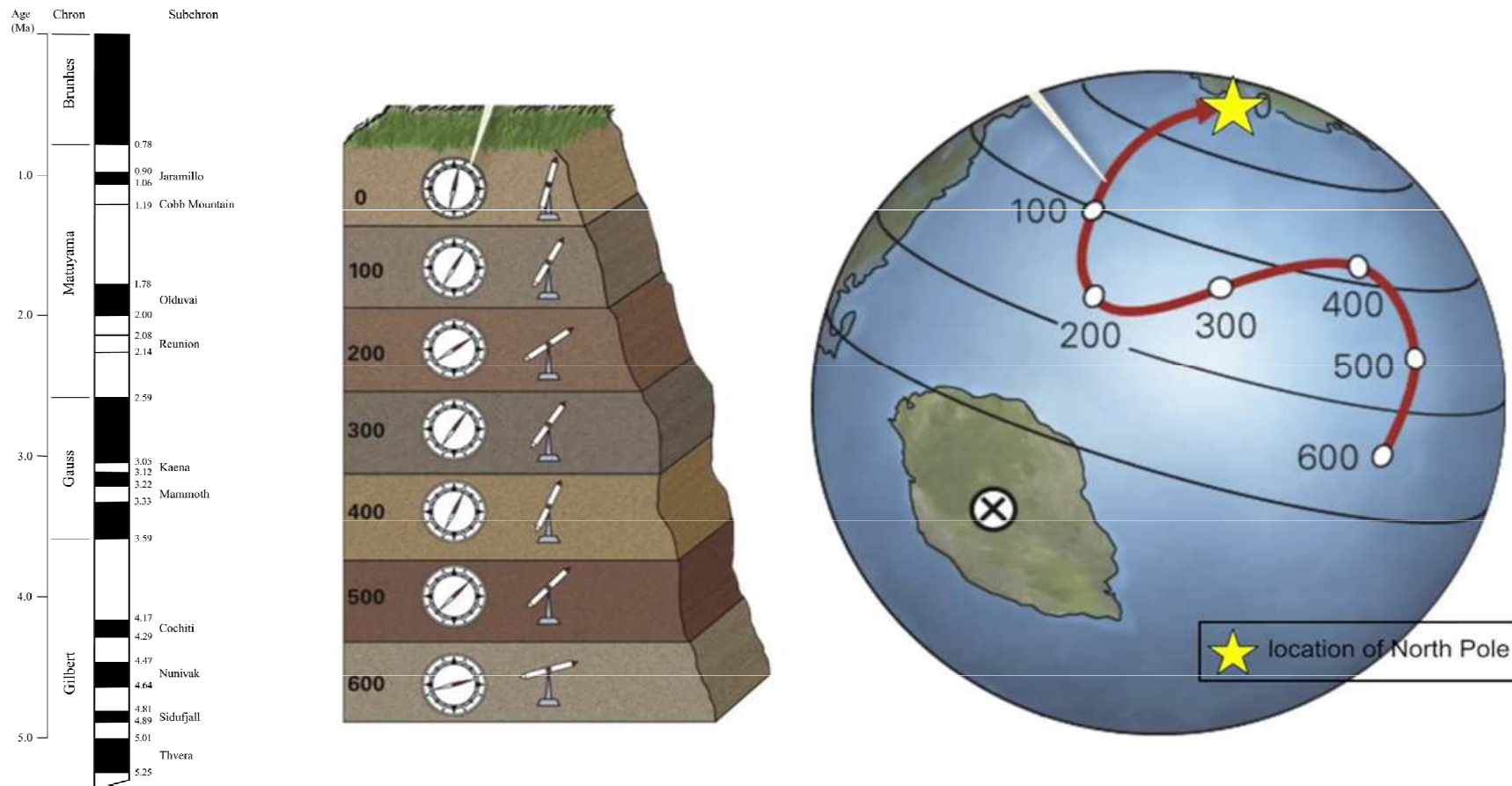
Cryptochromes in neighboring cones could be oriented 90 degrees from each other, and held in place by membrane stacks.

Magnetic fields can boost the tendency for anti-parallel states, altering chemical reaction outputs.



# Paleomagnetismus

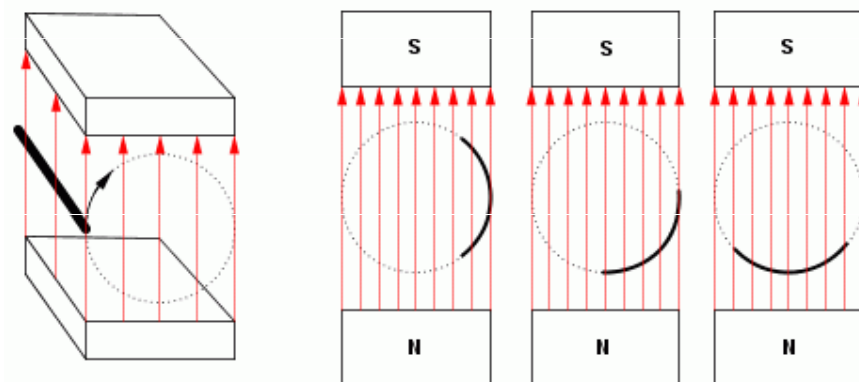
**Paleomagnetismus** zkoumá rozložení geomagnetického pole a jeho změny v jednotlivých geologických obdobích na základě studia zbytkového magnetismu některých hornin. Metoda je založena na magnetizaci kovových částic v horninách, které se buď během fáze roztavení hornin ( $T_t > T_c$ ) orientují ve směru geomagnetického pole (převážně magnetit) či na sedimentárních horninách, kde se částice orientují během sedimentace (hematit).



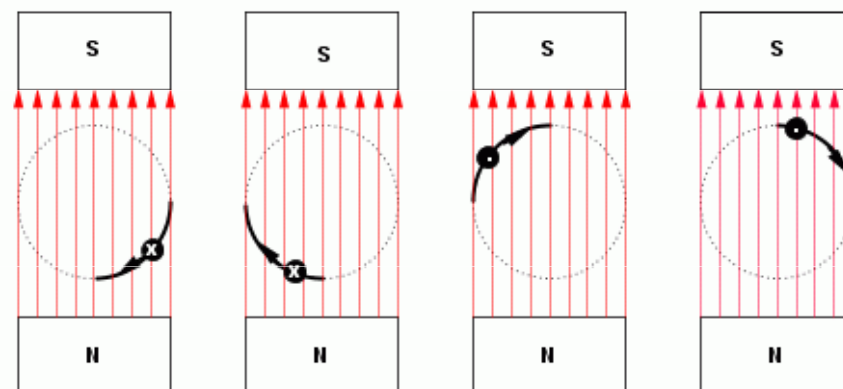
## Vznik střídavého proudu

Jestliže se hodnota napětí na svorkách zdroje nemění, obvodem protéká stálý, tzv. **stejnoseměrný proud (DC)**. Bude-li se polarita obou svorek rychle a periodicky měnit, bude se obdobně měnit i směr elektrického napětí, čímž získáme tzv. střídavé elektrické napětí. Připojíme-li ke svorkám zdroje střídavého napětí elektrický obvod, bude jím procházet proud, který periodicky mění směr i velikost, tzv. **střídavý elektrický proud**.

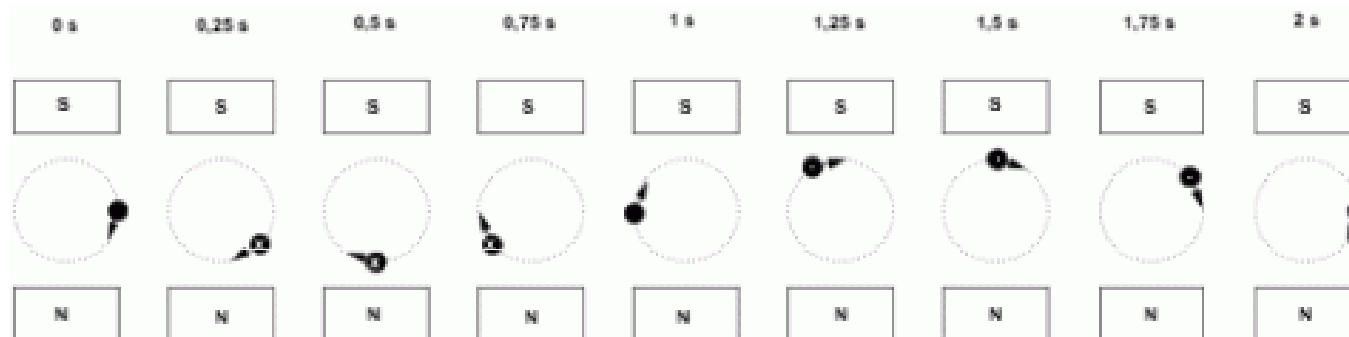
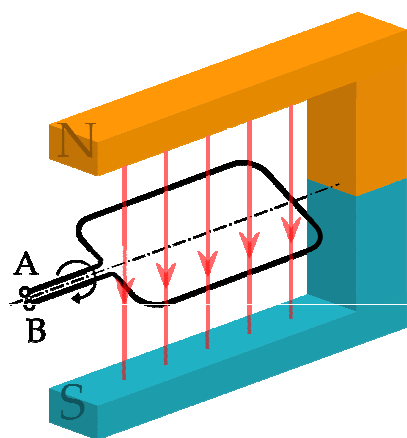
Pohybuje-li se vodič v magnetickém poli po kruhové dráze, můžeme sledovat, kolik indukčních čar vodič protne za stejnou dobu. Čím více indukčních čar vodič protne, tím větší napětí se v něm indukuje.



Podle Ampérova pravidla pravé ruky určíme, že v první polovině pohybu bude proud směřovat od nás a v druhé polovině pohybu k nám.



V čase 0 s se vodič pohybuje ve směru indukčních čar, neprotíná téměř žádné magnetické indukční čáry a ve vodiči žádné napětí nevzniká. V čase 0,25 s už vodič protíná více magnetických indukčních čar, a proto se ve vodiči indukuje napětí a jemu odpovídají proud směřující od nás. V čase 0,5 s protíná vodič nejvíce indukčních čar, a proto se indukuje největší napětí tzv. amplituda napětí. Průběh napětí indukovaného ve vodiči je o periodický děj. Grafem závislosti střídavého indukovaného napětí na čase je sinusoida.

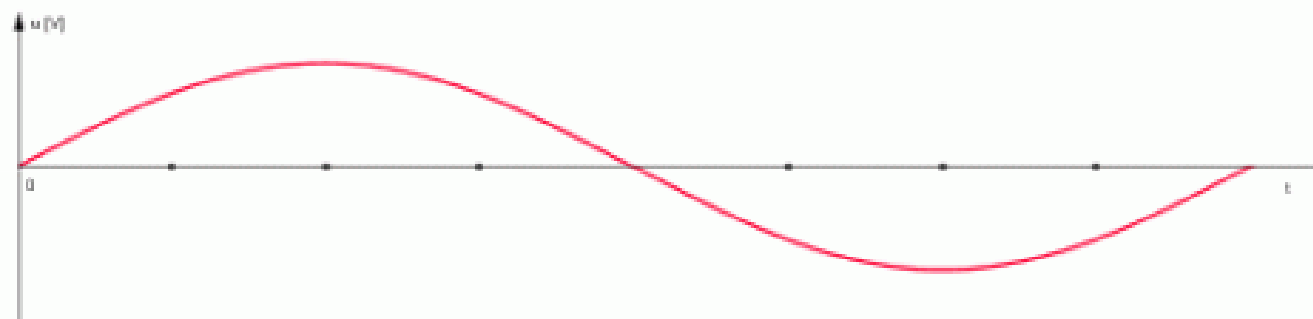


$$u = U_m \sin \omega t$$

$u$  ... okamžitá hodnota napětí

$U_m$  ... amplituda napětí

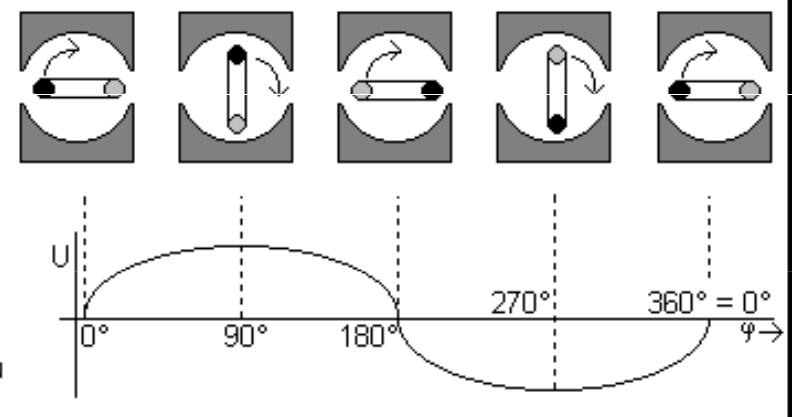
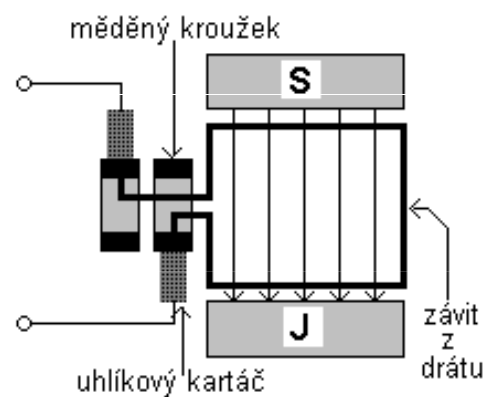
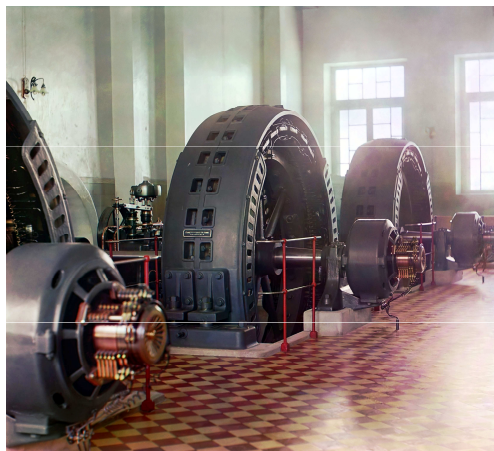
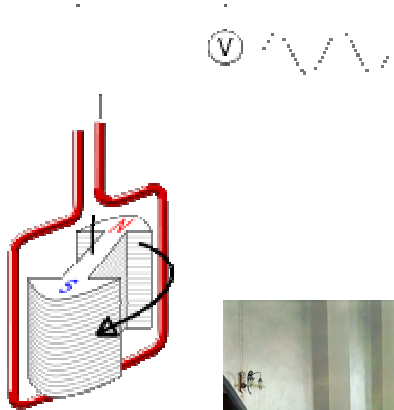
$\omega$  ... úhlová frekvence





# Alternátor

**Alternátor** (synchronní generátor) je typ elektrického generátoru, synchronního stroje měnící točivou mechanickou energii na střídavý elektrický proud. Přeměňuje kinetickou energii (pohybovou energii) rotačního pohybu na energii elektrickou ve formě střídavého proudu a střídavého napětí, čímž se liší od dynama generující proud stejnosměrný. Výstupní střídavý proud (a odpovídající střídavé napětí) může být jednofázový nebo vícefázový (nejčastěji třífázový). Alternátor pracuje na principu elektromagnetické indukce – ve vodiči je indukováno napětí, pokud se vodič a magnetické pole vůči sobě pohybují.

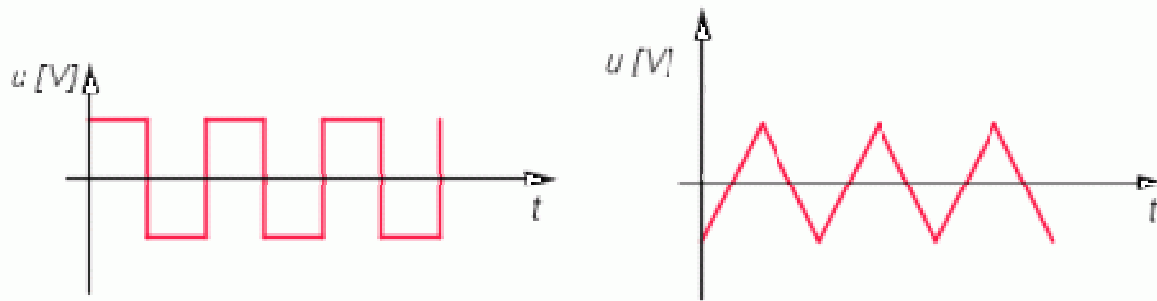


# Magneto

**Magneto** je generátor elektřiny, který využívá otáčivého pohybu permanentních magnetů k výrobě střídavého proudu (alternátory používají místo permanentních magnetů elektromagnetické cívky). Ručně poháněná magneta byla součástí prvních telefonů (poskytovala proud pro vyzvánění), magneta upravená pro generování pulsů vysokého napětí jsou používána v některých systémech spalovacích motorů jako zdroj energie pro zapalovací svíčky.

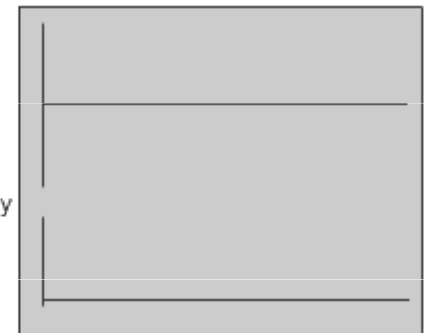
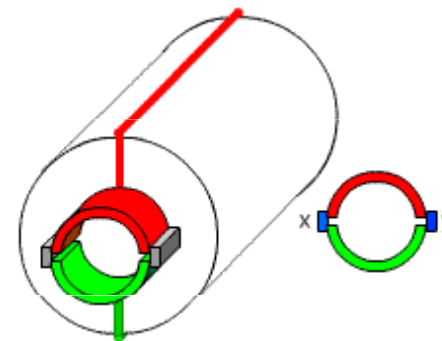
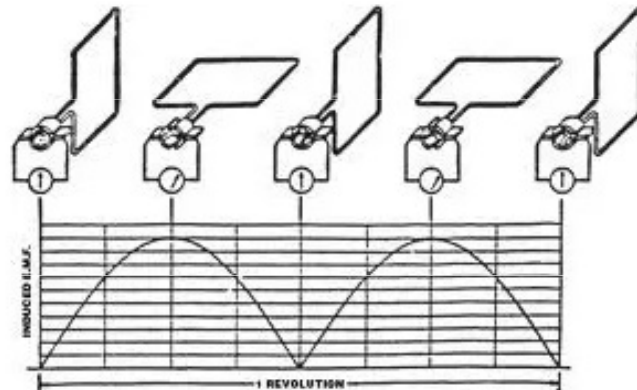
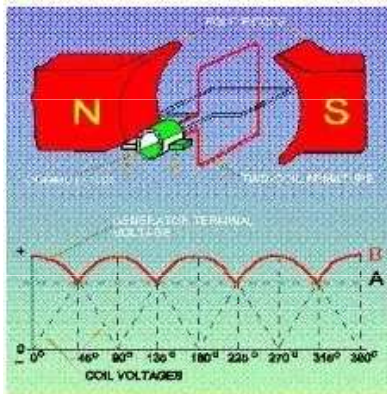


Graf závislosti střídavého napětí na čase může mít i jiný než sinusový průběh



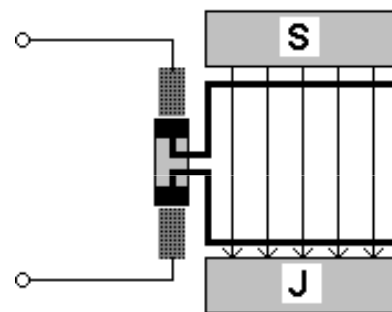
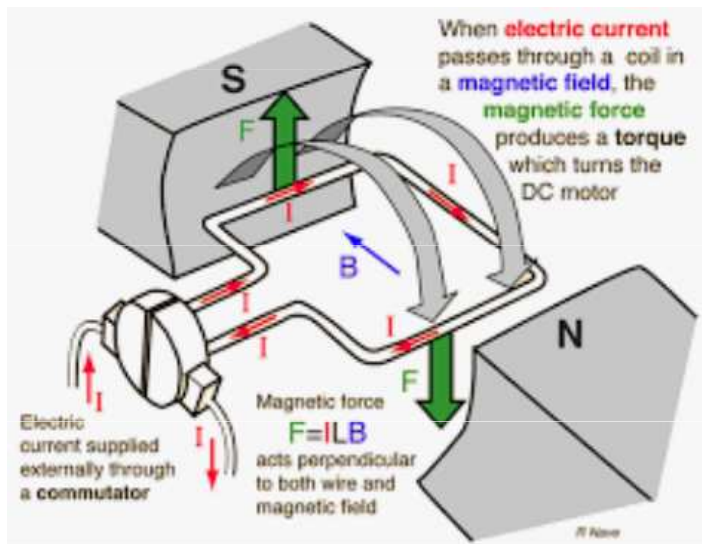
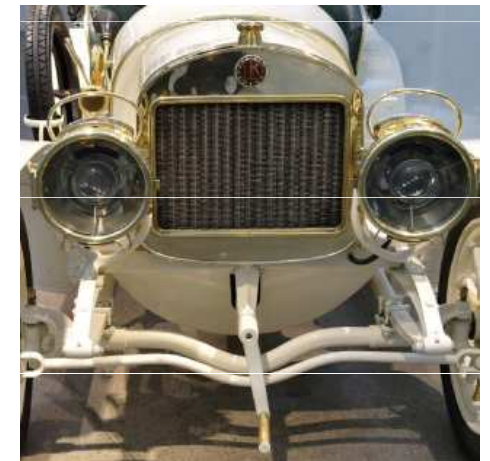
## Komutátor

Komutátor je v elektrotechnice speciální sběrný kroužek, který je rozdělen na vzájemně izolované lamely, na něž doléhají kartáče (obvykle grafitové). Zajišťuje přívod a přepínání směru proudu vedeného do rotorových cívek tak, aby byla napájena vždy cívka pod aktivním pólem a bylo dosaženo co největší účinnosti stroje (stejnoseměrný motor nebo univerzálního motoru – vrtačka, mixér atd.). U dynamů slouží komutátor jako mechanický rotační usměrňovač.

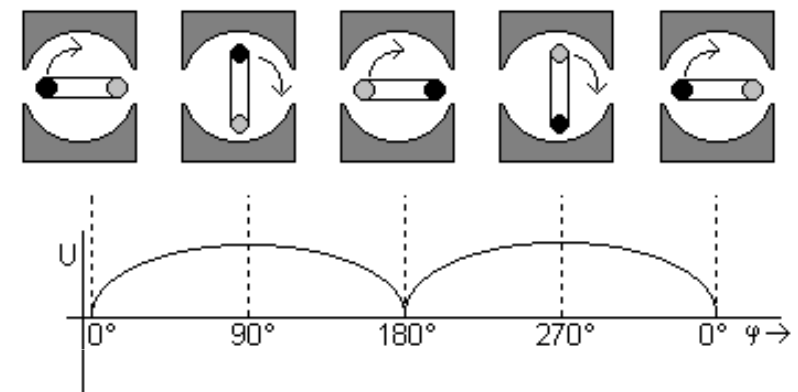


# Dynamo

**Dynamo** je již zastaralý elektrický generátor, který přeměňuje mechanickou energii na stejnosměrný proud. Mechanickou energii dodává dynamu vnější zdroj (např. turbína, kliky). Dynamo se skládá ze statoru tvořeného magnetem nebo elektromagnetem, rotoru s vinutím a komutátorem. Slouží k přeměně mechanické energie na stejnosměrný proud. Nevýhodou dynama je přítomnost **komutátoru** a závislost výstupního napětí na otáčkách rotoru. Dynamo bylo používáno například ve starých automobilech, protože při použití permanentních magnetů nepotřebuje buzení (a tedy ani přítomnost akumulátoru) – staré automobily neměly baterii a startovaly se klikou.



měděné lamely  
hřídel  
izolace (většinou mikanitová)

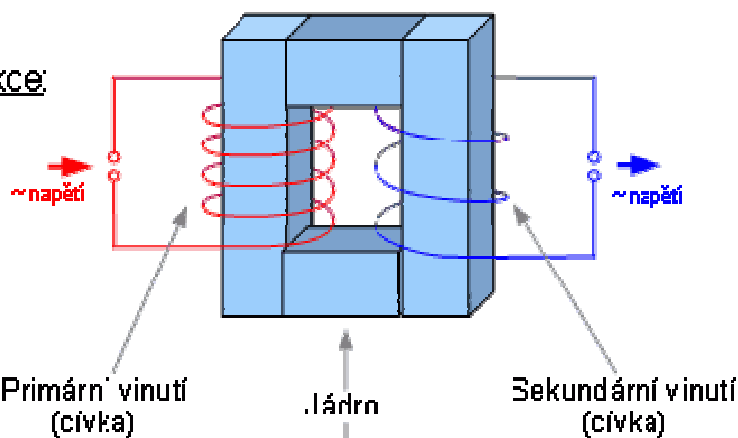


# Transformátor

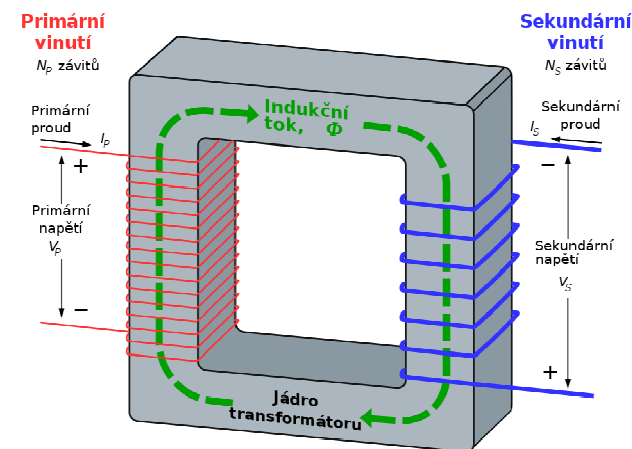
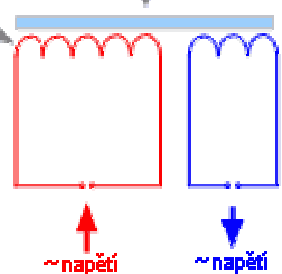
**Transformátor** umožňuje přenášet elektrickou energii z jednoho obvodu do druhého pomocí elektromagnetické indukce. Používá se zejména pro transformaci nízkého střídavého napětí na vysoké (a zpět) nebo pro galvanické oddělení obvodů (ochrana před úrazem elektrickým proudem). Transformátor je základním prvkem pro zajištění přenosu elektrické energie od místa výroby ke spotřebiteli, protože při přenosu vysokého napětí jsou ztráty nepoměrně nižší.

## Transformátor

Konstrukce:



Schématická značka:



$$P = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

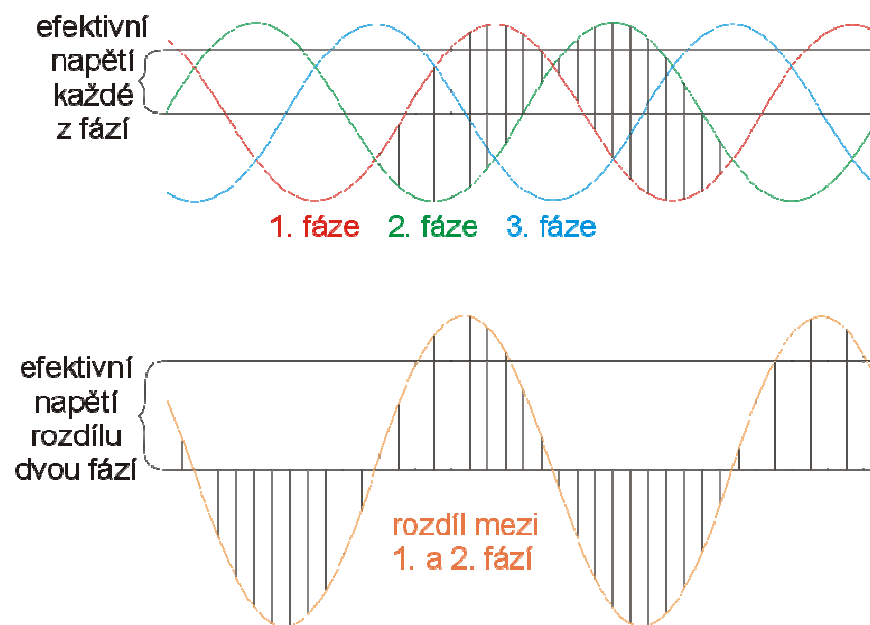
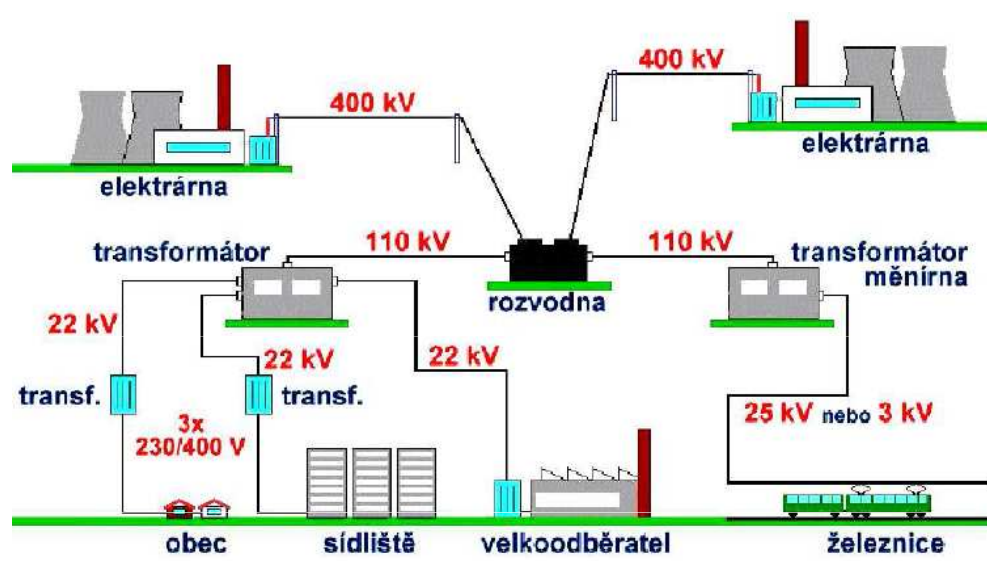
$U_1$	napětí na primární cívce
$I_1$	proud na primární cívce
$N_1$	počet závitů na primární cívce
$U_2$	napětí na sekundární cívce
$I_2$	proud na sekundární cívce
$N_2$	počet závitů na sekundární cívce
$p$	převod transformátoru



# Elektrická přenosová soustava

**Elektrická přenosová soustava** je systém zařízení, která zajišťují přenos elektrické energie od velkých zdrojů (elektráren) k velkým rozvodnám. Část od rozvodnů k jednotlivým uživatelům, například domácnostem, se nazývá **distribuční soustava**.

V české elektrické síti nízkého napětí je střídavé napětí o frekvenci 50 Hz a efektivní napětí 230 V. Maximální napětí (amplituda) během periody trvající 0,02 s je asi 325 V. Tato napětí jsou vztažena vůči zemi (pracovnímu vodiči). Udávané napětí třífázové soustavy je efektivní napětí mezi jejími každými dvěma fázemi, tzv. **sdužené napětí**. V evropské soustavě nízkého napětí je sdužené napětí definováno na 400 V. Každá fáze přitom má efektivní napětí vůči střednímu vodiči (tzv. fázové napětí) symetricky zhruba 231 V.





# Obvod střídavého proudu s odporem

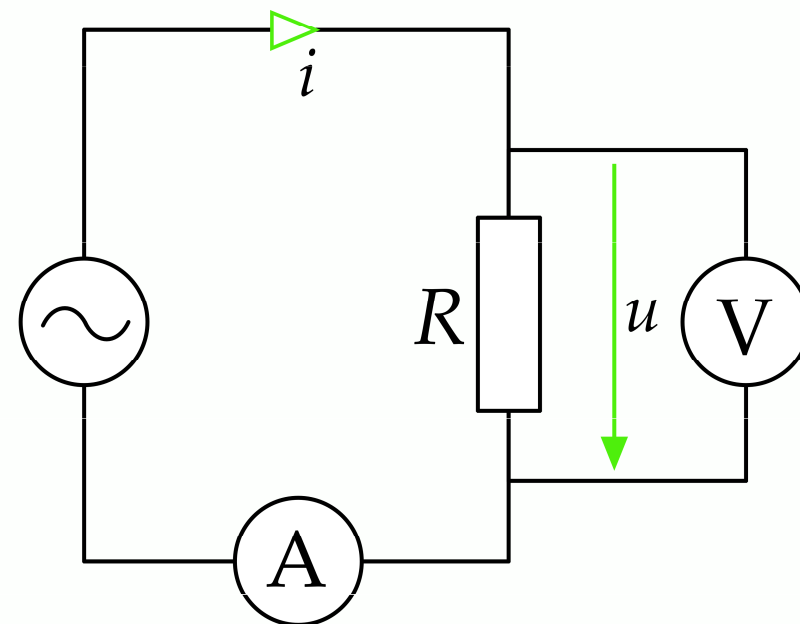
Obvodem prochází **střídavý proud**, jehož okamžitá hodnota  $i$  je dána vztahem :

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t) = I_m \sin(\omega t)$$

$I_m$  ... amplituda střídavého proudu

$U_m$  ... amplituda střídavého napětí

$R$  ... **rezistance** (odpor)

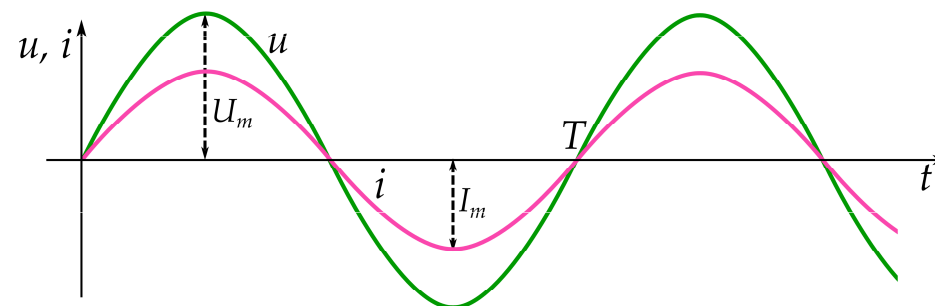


Odpor  $R$  rezistoru v obvodu střídavého proudu je stejný jako v obvodu stejnosměrného proudu a nazývá se **rezistance**.

Pro okamžitou hodnotu **napětí**  $u$  platí :

$$u = U_m \sin(\omega t)$$

Rezistance střídavého obvodu nemá vliv na fázový rozdíl střídavého napětí a proudu. V jednoduchém obvodu s odporem mají obě veličiny stejnou fázi a jejich fázový rozdíl je nulový ( $\varphi = 0$ )



# Obvod střídavého proudu s indukčností

Střídavý proud procházející cívkou vytváří měnící se magnetické pole v cívce. V cívce se indukuje napětí, které podle **Faraday - Lenzova zákona** má opačnou polaritu než napětí zdroje.

Pro **okamžitou hodnotu střídavého proudu**  $i$  platí :

$$i = I_m \sin(\omega t)$$

Pro **okamžitou hodnotu napětí**  $u$  platí:

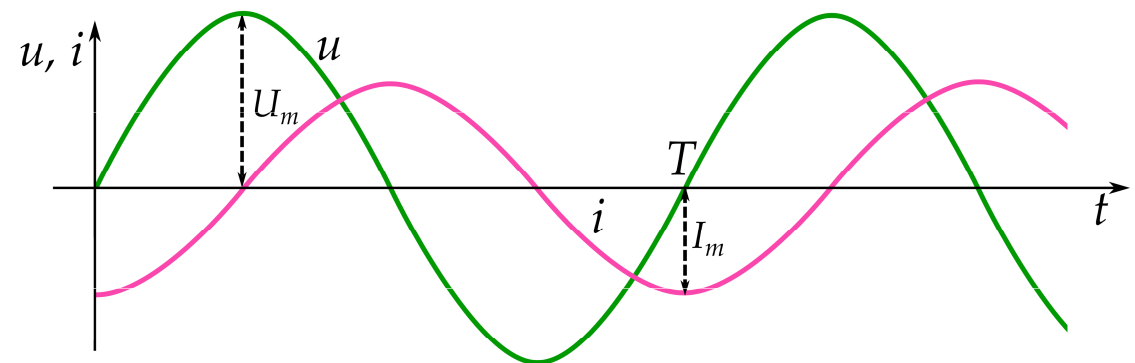
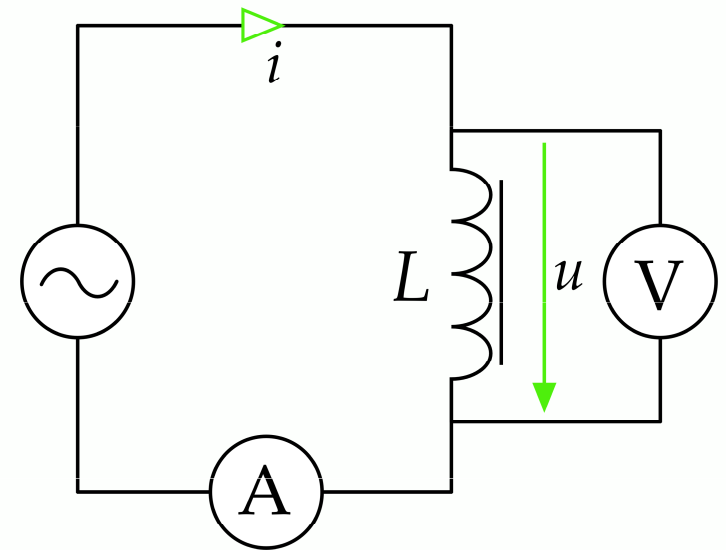
$$u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos(\omega t)$$

Cívka svou indukčností  $L$  vytváří v obvodu zdánlivý odpor, který způsobuje předbíhání napětí před proudem ( $\varphi = +\pi/2$ ). Tento odpor nazýváme **induktance** ( $X_L$ , jednotka  $\Omega$  (ohm)).

$$X_L = \frac{U_m}{I_m}$$

$$X_L = \omega L$$

$L$  ... indukčnost cívky  
 $\omega$  ... úhlová frekvence



# Obvod střídavého proudu s kapacitou

Střídavý proud dielektrikem mezi deskami kondenzátoru neprochází. Kondenzátor se střídavě nabíjí a vybíjí, napětí se zpožďuje za proudem.

Pro **okamžitou hodnotu střídavého proudu**  $i$  platí:

$$i = I_m \sin(\omega t)$$

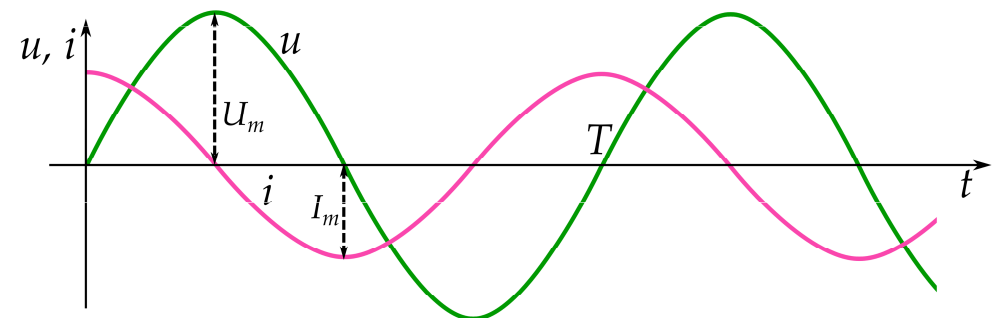
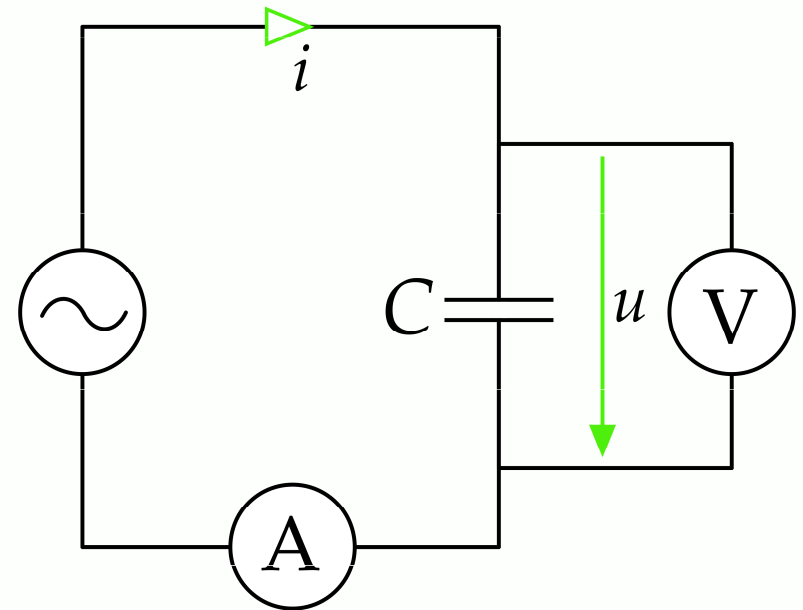
Pro **okamžitou hodnotu napětí**  $u$  platí:

$$u = U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -U_m \cos(\omega t)$$

Kondenzátor svou kapacitou  $C$  vytváří v obvodu zdánlivý odpor, který způsobuje zpoždování napětí za proudem ( $\varphi = -\pi/2$ ). Tento odpor nazýváme **kapacitance** ( $X_C$ , jednotka:  $\Omega$  (ohm))

$$X_C = \frac{U_m}{I_m}$$
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$C$  ... kapacita kondenzátoru  
 $\omega$  ... úhlová frekvence

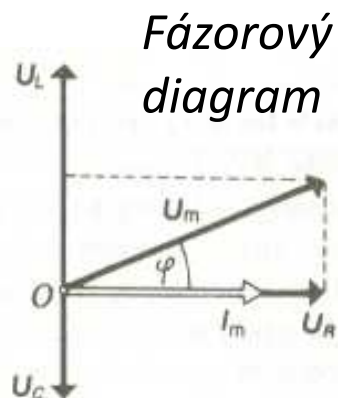
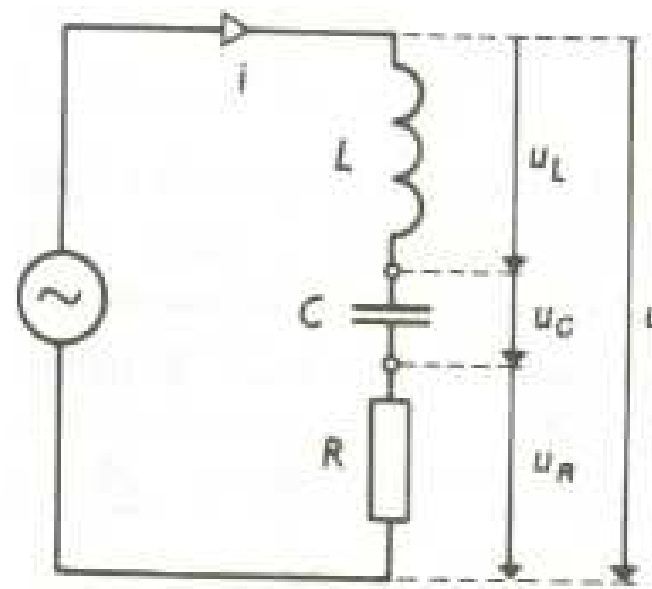


# Složený obvod střídavého proudu - sériový obvod RLC

Vlastnosti vyplývající ze způsobu zapojení:

- 1) všemi prvky prochází stejný proud
- 2) napětí na jednotlivých prvcích se liší svou velikostí i vzájemnou fází.

Pro amplitudu výsledného napětí platí:



$$U_R = I_m R$$

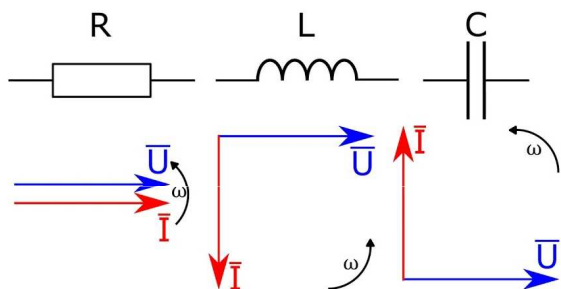
$$U_L = I_m \omega L$$

$$U_C = I_m / \omega C$$

$$U_m^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$$

$U_R, U_L, U_C \dots$  amplitudy napětí na prvcích obvodu

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$$



$$Z = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

$Z \dots$  **impedance**, parametr charakterizující sériový obvod RLC jako celek (vyjadřuje zdánlivý odpor celého obvodu), jednotka  $\Omega$  (ohm)

## Fázový rozdíl napětí a proudu v obvodu

viz fázorový diagram

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

## Reaktance (X)

= veličina charakterizující vlastnost té části obvodu střídavého proudu, v níž se elektromagnetická energie nemění v teplo, ale jen v energii elektrického a magnetického pole.

$$X = X_L - X_C$$

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad \text{a} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$$

## Rezonance střídavého proudu

= podmínka, za které proud v obvodu dosahuje největší hodnoty, t.j. pokud je Z nejmenší. To nastane právě tehdy, když

$$X_L - X_C = 0 \quad \Rightarrow \quad X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

podmínka pro rezonanční frekvenci  $f_0$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

# Výkon střídavého proudu

Kvůli neustále se měnící okamžité hodnotě střídavého proudu a napětí se mění také elektrický výkon. Průměrný elektrický výkon střídavého proudu (harmonický průběh) lze vypočítat:

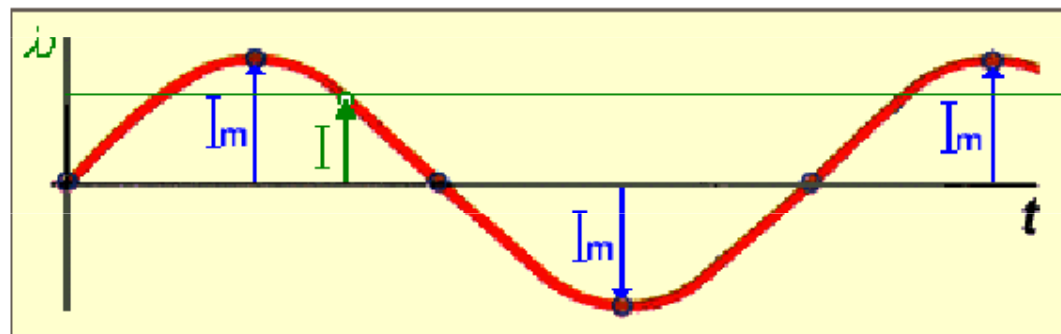
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

kde  $U$  a  $I$  jsou efektivní hodnoty střídavého proudu a napětí,  $\varphi$  je fázový posuv mezi proudem a napětím, člen  $\cos \varphi$  se nazývá **účinník**.

Efektivní hodnoty střídavého proudu a napětí jsou hodnoty takového stejnosměrného proudu a napětí, jehož výkon by byl stejný jako je výkon daného střídavého proudu a napětí. Velikost efektivní hodnoty střídavého proudu a napětí s harmonickým průběhem je

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m \approx 0,707 \cdot I_m$$

$$U_{ef} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_m \approx 0,707 \cdot U_m$$

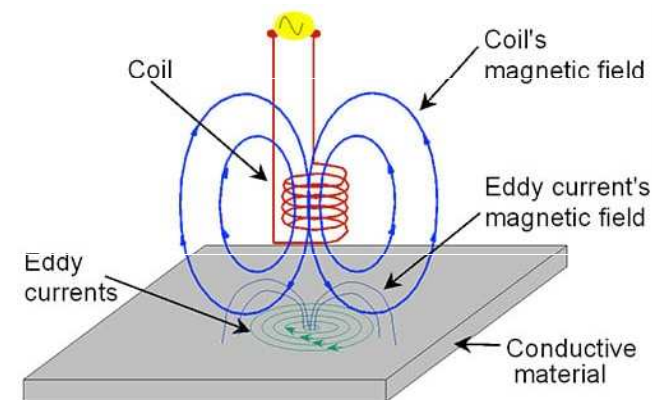
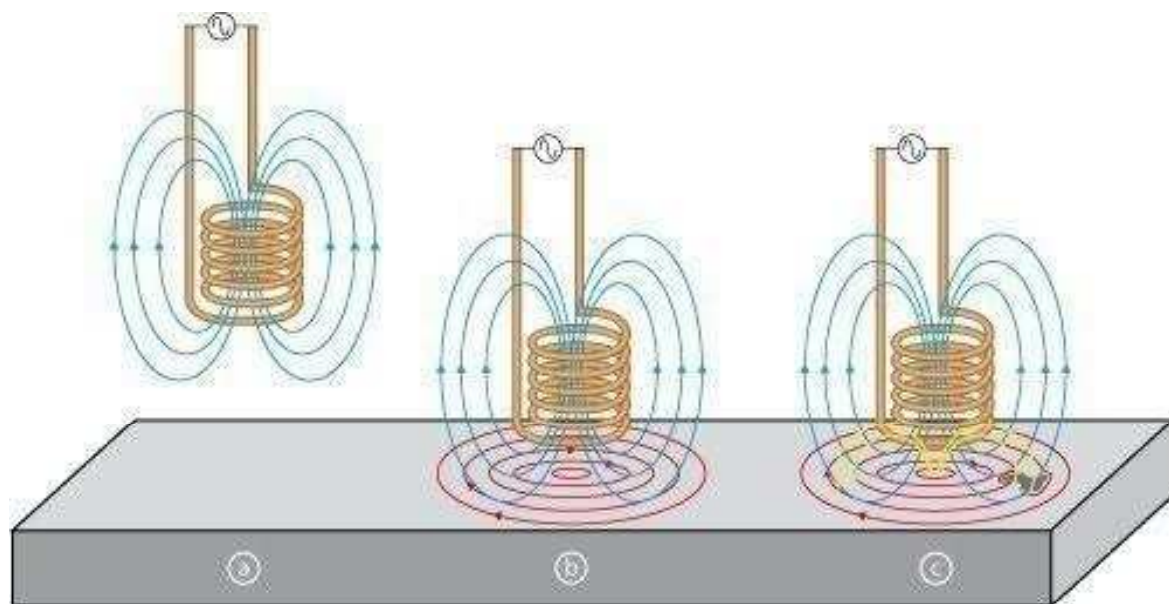


kde  $I_m$  je amplituda střídavého proudu a  $U_m$  je amplituda střídavého napětí.



## Vířivý (Foucaultův) proud

Vířivý proud (též Foucaultův proud) vzniká v plošných a objemových vodičích, když se v jejich okolí mění magnetický indukční tok. Indukované proudy mají charakter proudových smyček.

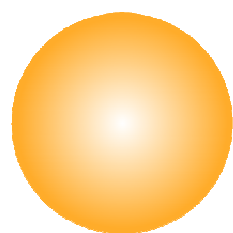
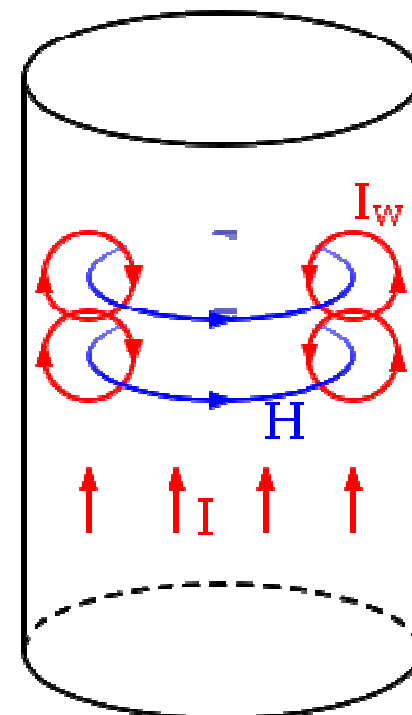


Indukovaný proud se snaží svým polem zabránit změně, která je vyvolala, tedy zeslabit budící magnetický tok. Největší zeslabení nastane uprostřed průřezu, protože ten obepínají všechny indukované proudy.

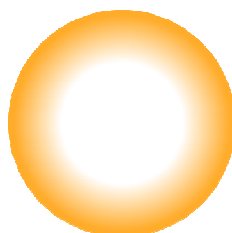
# Skin efekt

Skin efekt (povrchový jev) je fyzikální děj, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. Elektrický střídavý proud procházející vodičem uzavírá kolem sebe siločáry magnetického (indukčního) toku. Část tohoto toku prochází i tím samým vodičem a indukuje v něm uzavřené vířivé proudy. Tyto vířivé proudy mají blíže ke středu vodiče opačný směr než původní elektrický proud a odečítají se od něj, kdežto blíže k povrchu jsou směry souhlasné a proudy se sčítají.

K povrchovému jevu nedochází při průchodu stejnosměrného proudu vodičem, při frekvenci 50 Hz používané v síťových rozvodech je obvykle zanedbatelný.



Low frequency



High frequency

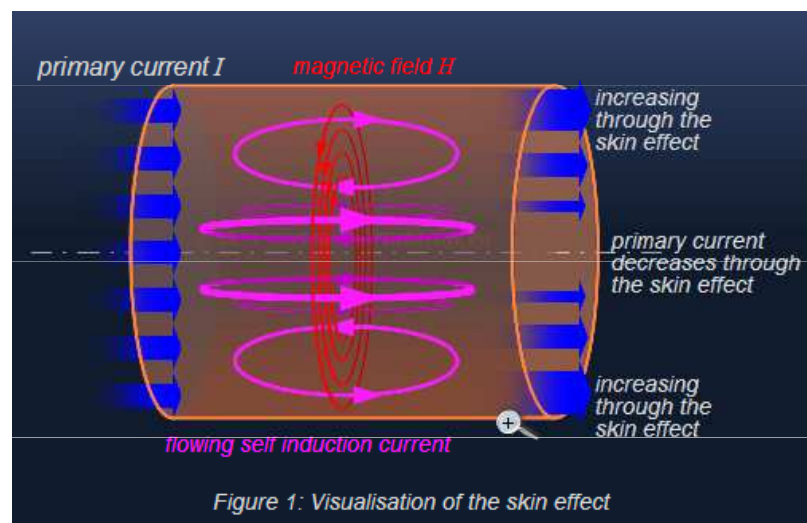
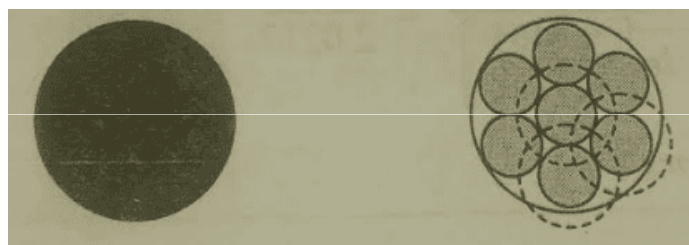


Figure 1: Visualisation of the skin effect



# Tepelné účinky vířivých proudů

Průchodem vířivých proudů vodičem vznikají tepelné ztráty, část energie, kterou dodáme na magnetování materiálu, se mění v energii tepelnou (Jouleovo teplo). Ztráty vzniklé vířivými proudy jsou značně závislé na frekvenci:

$$P_v \sim f^2 B^2$$

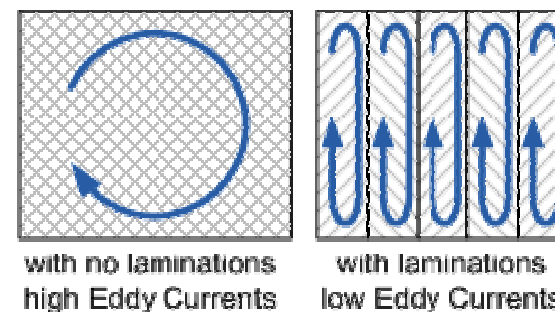
Ztráty způsobené vířivými proudy se omezují například použitím navzájem izolovaných plechů (např. jádra cívek), použitím materiálu s velkým elektrickým odporem (přidáním malého množství křemíku do základního materiálu), nebo snížením indukovaného napětí.

Celkové ztráty ve feromagnetických materiálech jsou vyjádřeny vztahem:

$$P_{Fe} = P_h + P_v$$

kde  $P_h$  jsou ztráty způsobené hysterezní křivkou a  $P_v$  jsou ztráty způsobené již zmíněnými vířivými proudy.

Tohoto jevu se využívá například při stabilizaci ručiček tachometru, pro zastavení elektroměru po ukončení odběru, nebo v indukční brzdě. Tepelných účinků se využívá například v kuchyňských indukčních vařičích nebo metalurgii.



# Indukční ohřev

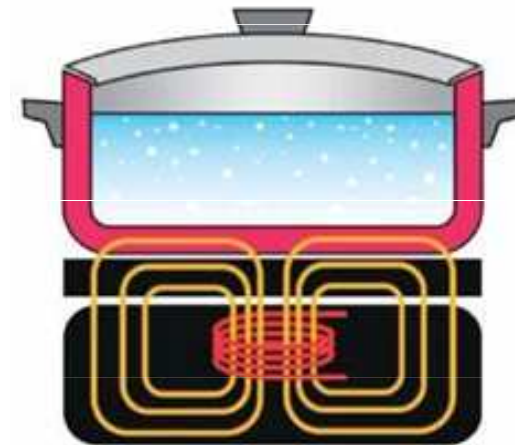
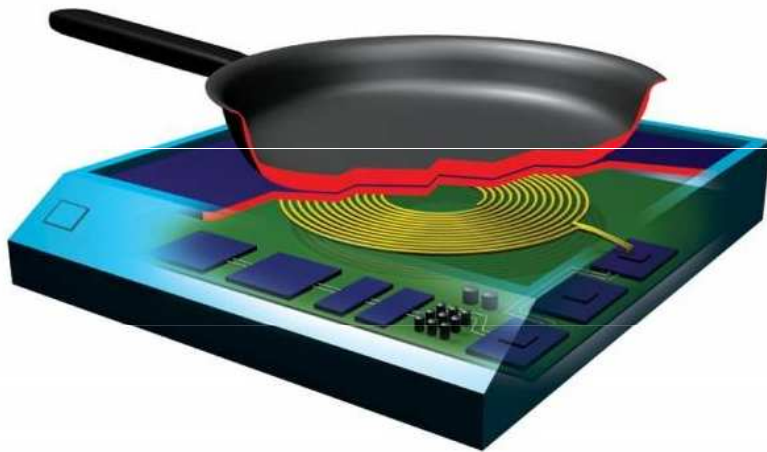
**Indukční ohřev** je ohřev vodivého materiálu (obvykle kovu) vířivými proudy, které se v něm indukují elektromagnetickým polem. Používá se na pájení, žihání a tavení kovových materiálů, od malých laboratorních zařízení až po tavicí pece. Hlavní výhody jsou úspory energie, protože se materiál ohřívá přímo, možnost provádět ohřev v ochranné atmosféře nebo ve vakuu a čistý provoz.



Ohřev se provádí cívkou s několika málo závity, do níž se umístí ohříváný materiál buď přímo nebo v nevodivém kelímku. Cívka je napájena střídavým proudem buď o frekvenci sítě (50 Hz), častěji o vysoké frekvenci desítek až stovek kHz. Nižší frekvence se používají pro velké předměty, vyšší pro tenkostěnné a drobné předměty.

## Vaření pomocí indukce

Při **vaření pomocí indukce** se teplo vytváří přímo ve dnu varné nádoby. Sklokeramická deska slouží pouze jako plocha k postavení hrnce, nikoli k přenosu tepla. Generátor (měnič) převádí proud ze sítě o frekvenci 50 Hz na vysokofrekvenční proud o asi 25000 Hz. Vysokofrekvenční proud vytváří v měděné cívce, tak zvaném induktoru, střídavé magnetické pole. To ovlivňuje pohyb elektronů ve feromagnetickém dnu hrnce, které se tak zahřívá.





# Účinek elektrického proudu na lidský organismus

Účinek elektrického proudu na lidský organismus ovlivňuje řada faktorů. Závisí na druhu proudu, jeho intenzitě, napětí i frekvenci, impedanci lidského těla, dráze proudu, době průchodu proudu a na fyziologickém a psychickém stavu organismu.

Effect/ Feeling	Direct Current – DC (mA)	Alternating Current – 60 Hz AC (mA)	Severity
Slight sensation	1	0.4	None
Perception Threshold	5.2	1.1	None
Shock not painful	9	1.8	None
Shock painful	62	9	Spasm
Muscle clamps at source	76	16	Possibly fatal
Respiratory arrest	170	30	Frequently fatal
Ventricular Fibrillation > 5 seconds exposure	375	75	Probably fatal
Cardiac Arrest	—	4000	Possibly fatal
Organs burn	—	5000	Fatal if it is a vital organ

Source: Colorado State University – High Voltage Safety Manual



**Elektrické křeslo** sloužilo k popravám pomocí střídavého elektrického proudu. Tento způsob poprav je používán téměř výlučně jen v některých státech USA (Alabama, Arkansas, Florida, Kentucky, Mississippi, Oklahoma, South Carolina, Tennessee a Virginia).



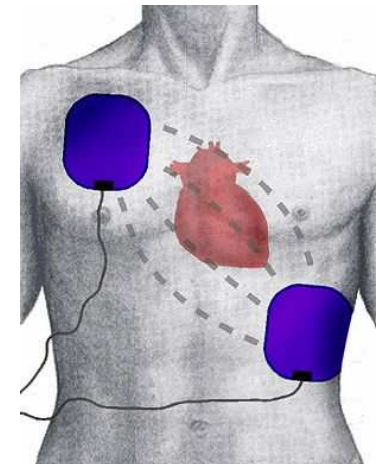


**Defibrilátor** využívá elektrického proudu ke zvrácení fibrilace komor (zhoubné srdeční arytmie), jež by bez zásahu nevyhnutelně vedla ke smrti. Ta spočívá v chaotické činnosti jednotlivých svalových buněk myokardu, při níž nedochází k účinné kontrakci srdce vedoucí k vypuzení krve. Princip metody spočívá v průchodu elektrického výboje pacientovým srdečním svalem (myokardem), který způsobí depolarizaci všech jeho vláken (dojde k jejich synchronizaci), po níž by se měl obnovit normální rytmus.

**Monofazické přístroje** používají unipolární proud ve tvaru tlumené sinusoidní vlny, která postupně klesá k nule (častější), nebo seřízlé exponenciální vlny, která je před dosažením nuly náhle ukončena.

U bifazických přístrojů teče proud po stanovenou dobu jedním směrem, poté se obrací a po zbytek periody teče směrem opačným. Ve srovnání s monofazickým, dosáhne obdobné účinnosti při použití přibližně poloviční energie.

Elektrody musí mít při defibrilaci dokonalý vodivý kontakt s kůží, jinak dojde k jejímu popálení. Po zapnutí obvodu nastává výboj (vybití kondenzátoru), který trvá 8 až 12 ms.

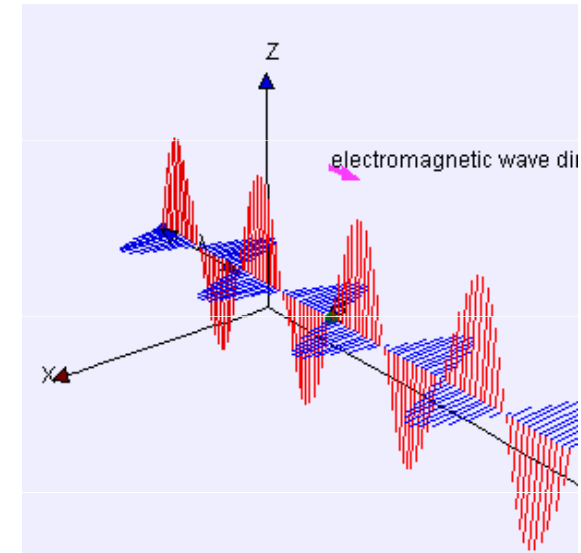


# Elektromagnetické vlnění

# Elektromagnetické vlnění

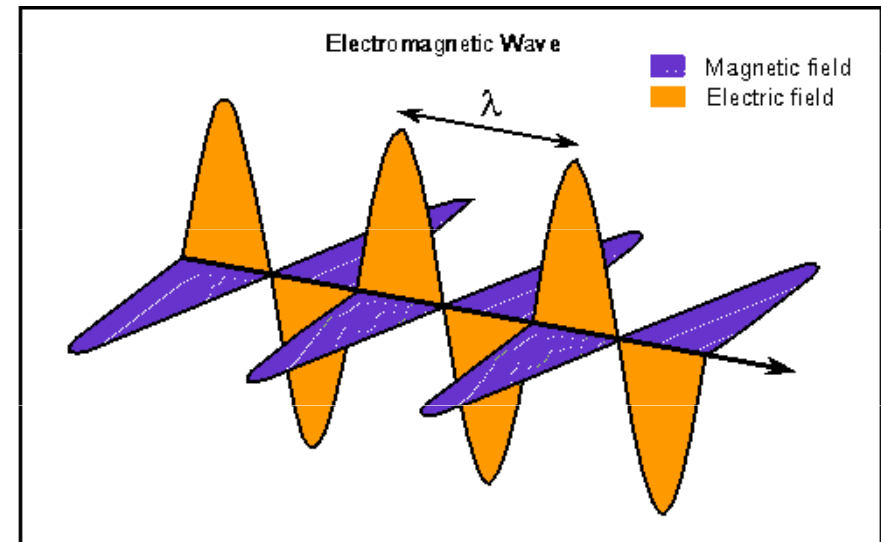
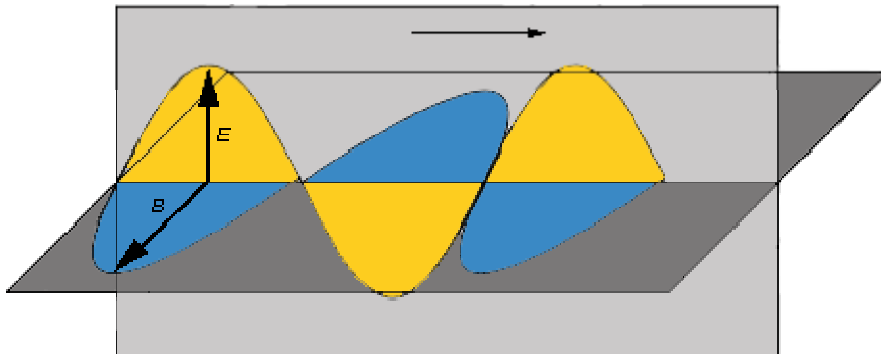
Elektromagnetické vlnění (též elektromagnetické záření) je děj, při němž se prostorem šíří příčné vlnění elektrického a magnetického pole. Popsáno je pomocí tzv. Maxwellových rovnic.

	Integrální tvar	Diferenciální tvar
1	$\oint_{\epsilon} H dl = I + \frac{d\psi}{dt}$	$\text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
2	$\oint_{\epsilon} E dl = -\frac{d\phi}{dt}$	$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
3	$\oint_{S} D dS = Q$	$\text{div}D = \rho$
4	$\oint_{S} B dS = 0$	$\text{div}B = 0$



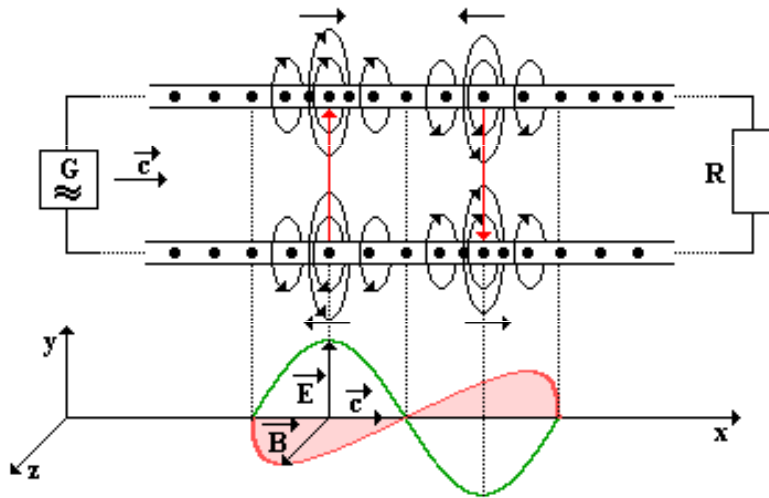
Zahrnuje dvě složky, které jsou na sebe kolmé:

- Intenzita elektrického pole **E**
- Magnetická indukce **B**



# Vznik elektromagnetického záření

Při přenosu elektromagnetické energie dvou vodičovým vedením vzniká v prostoru mezi vodiči **časově proměnné silové pole**, které má složku elektrickou a magnetickou (= **elektromagnetické pole**). Energie není přenášena samotnými vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi. Tento děj má charakter vlnění.



Za předpokladu, že veškerá elektromagnetická energie se na konci vedení pohltí dostáváme **postupné elektromagnetické vlnění**.

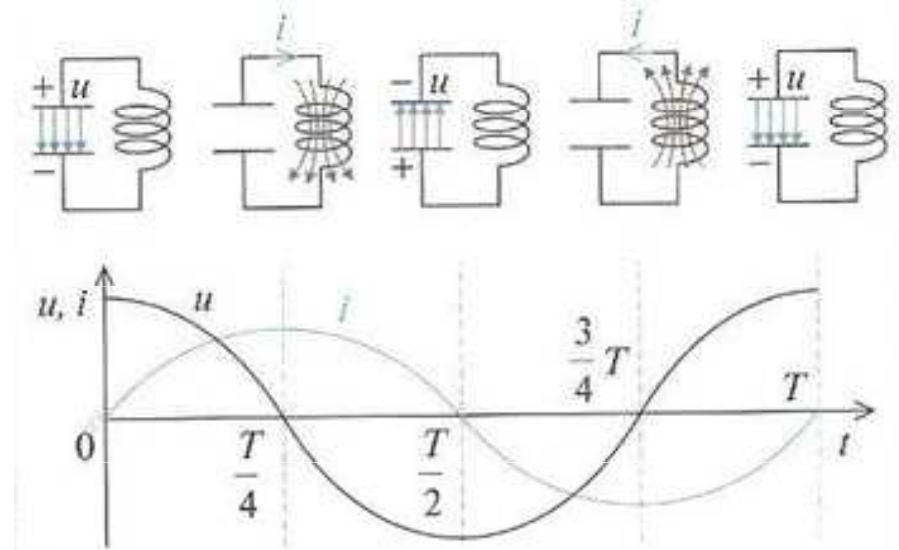
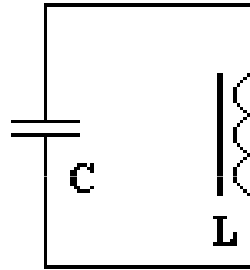
Pokud tomu tak není, nastává na konci vedení odraz vlnění a odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím a vzniká **vlnění stojaté**.

Elektromagnetické záření vzniká všude tam, kde se pohybuje náboj s nenulovým zrychlením, tzn. kde teče nekonstantní proud, např.

- Střídavý proud (např. anténa)
- Zpomalování nabitě částice (např. rentgenka)
- Emise záření podle Planckova vyzařovacího zákona (např. žárovka)

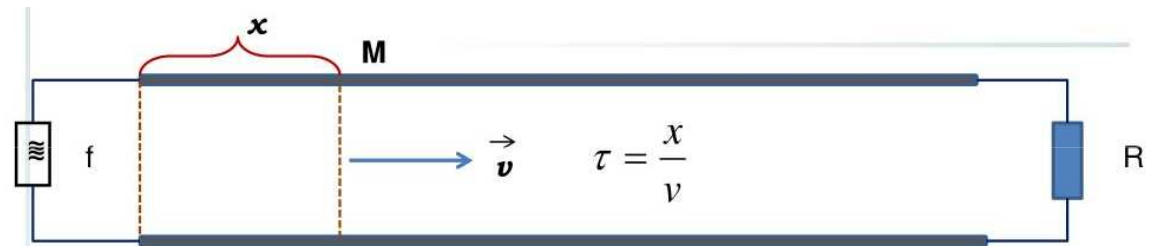
# Elektromagnetické kmitání, elektromagnetický oscilátor

Elektromagnetický oscilátor je obvod tvořený cívkou a kondenzátorem - obvod LC (oscilační obvod)



1. Po nabití kondenzátoru se mezi jeho deskami vytvoří elektrické pole, jehož energie představuje počáteční energii oscilátoru. Po připojení kondenzátoru k cívce začne oscilačním obvodem procházet proud, kondenzátor se vybíjí a energie elektrického pole se zmenšuje. Současně se zvětšuje proud procházející cívkou a kolem ní se vytváří magnetické pole. Energie elektrického pole kondenzátoru se tedy mění na energii magnetického pole cívky.
2. Kondenzátor se vybije za jednu čtvrtinu periody  $T$  kmitání obvodu LC. V tom okamžiku dosahuje proud maximální hodnoty a celková energie kmitání je dána energií magnetického pole. Kondenzátor je vybit a proud se začíná zmenšovat. To vede ke vzniku indukovaného napětí, obvodem prochází indukovaný proud a kondenzátor se opět nabíjí.
3. Polarita jeho napětí je ale opačná a v okamžiku  $t = T/2$  je ukončena přeměna magnetické energie v energii elektrickou. Ve druhé polovině periody se popsaný děj opakuje - směry proudů a pořadí polarit napětí kondenzátoru jsou ale opačné.

## Rovnice postupné elektromagnetické vlny



Do bodu M dorazí elektromagnetická vlna se zpožděním  $\tau$ , tedy v čase  $t' = t - \tau$

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau)$$

$$u = U_m \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

### Rychlost světla ve vakuu

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$c_0 = 1\,079\,252\,848,8 \text{ km/h}$$

$c_0$  je rychlost světla ve vakuu,

$\epsilon_0$  je permitivita vakua (dielektrická konstanta)

$\mu_0$  je permeabilita vakua (magnetická konstanta)

**Rychlost šíření světla v jiných prostředích** je vždy menší.

$$v_{\text{vzduch}} \approx c$$

$$v_{\text{voda}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_{\text{sklo}} = 2 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} - 1,5 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$\epsilon_r$  relativní permitivita

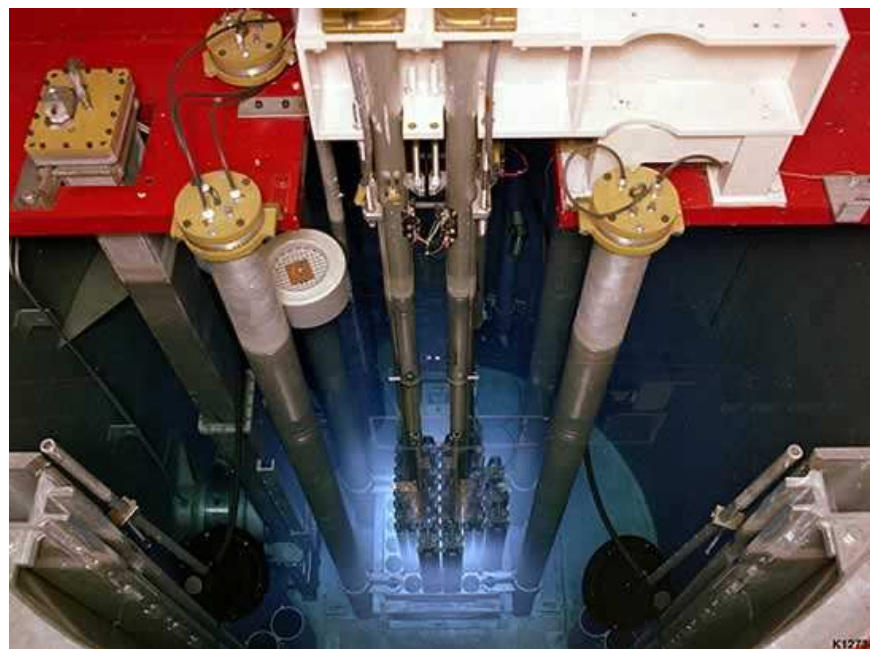
$\mu_r$  relativní permeabilita



# Čerenkovovo záření

**Čerenkovovo záření** je elektromagnetická obdoba zvukové rázové vlny. Nabitá částice, která se pohybuje v optickém prostředí rychleji, než je fázová rychlost světla pro toto prostředí, vyvolává záření, které trvá po tu dobu, kdy je částice rychlejší než světlo.

Typicky lze Čerenkovův efekt pozorovat v nádržích jaderných reaktorů, kde se uranové palivo nachází v kapalině moderující neutrony, vlivem štěpení jsou produkovány částice záření beta (vysokoenergetické elektrony), které při pohybu kapalinou emitují fotony s energií několika málo eV a voda tak získává modravý nádech.



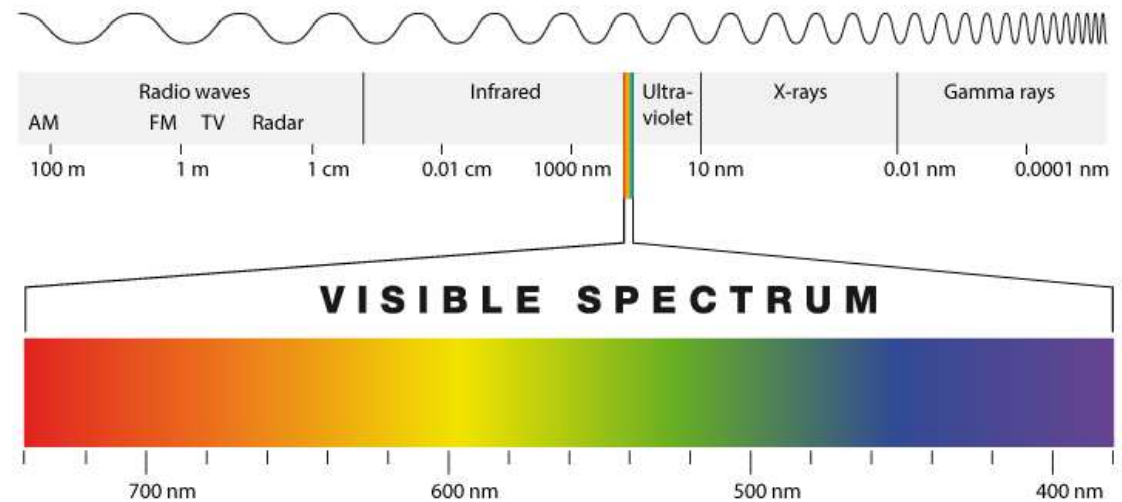
# Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí

$f$  – nezávisí na prostředí

$\lambda$  – se mění podle rychlosti

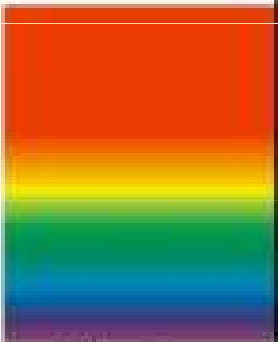
$c$  ( $v$ ) – rychlost světla ve vakuu (v daném prostředí)

## Vlnová délka



Elektromagnetické vlny se **odráží** i **lámou**. Jednotlivé druhy elektromagnetického záření se liší vlnovou délkou a tvoří **spektrum** elektromagnetického záření.

Elektromagnetické záření	Vlnová délka ve vzduchu	Frekvence (Hz)
rádiové záření	30 km – 1 m	$10^4 - 3 \cdot 10^8$
mikrovlny	1 m – 0,03 mm	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$
infračervené záření	0,3 mm – 790 nm	$10^{12} - 3,8 \cdot 10^{14}$
světlo	790 nm – 390 nm	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
ultrafialové záření	400 nm – 10 nm	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
rentgenové záření	10 nm – 1 pm	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$
záření gama	< 300 pm	$> 10^{18}$

Elektromagnetické záření, vlnění	Vlnová délka $\lambda$	Použití, výskyt	Pozn.
<b>Radiové vlny</b> Dlouhé (DV) Střední (SV) Krátké (KV) Velmi krátké (VKV) Ultra krátké (UKV)	2 000 m – 1 000 m 600 m – 150 m 50 m – 15 m 15 m – 1 m 1 m – 0,1 m	Rozhlas, televize	Neionizující záření
<b>Mikrovlny</b>	0,1 m – 0,3 mm	mobilní telefony , GPS, WiMax, Wifi, mikrovlnné trouby, radar	
<b>Infračervené záření</b>	0,3mm – 750 nm	dálkové ovladače, noční vidění, tepelné záření	
<b>Světlo</b> červené oranžové žluté zelené modré fialové 	760 nm – 390 nm	Viditelné světlo	
<b>Ultrafialové záření</b>	390 nm – 10 nm	Opalování, solária, sterilizace	
<b>Rentgenové záření</b>	10 nm – 1 pm	lékařská diagnostika, průmyslová diagnostika	Ionizující záření
<b>Záření gama</b>	< 300 pm	ozařování nádorů, kosmické záření, jaderné reaktory	

# Vlnově-korpuskulární vlastnosti elektromagnetického záření

**Vlnově-korpuskulární (vlnově-částicový) dualismus** - některé jevy u těchto objektů mikrosvěta se daří lépe vysvětlit pokud na tyto objekty nahlížíme buď jako na vlny, nebo jako na částice (fotony).

Např. **elektromagnetické záření** může někdy vykazovat vlnový charakter (např. při ohybu světla), a jindy se chová jako částicové záření (např. u fotoelektrického jevu). Světlo lze tedy popsat vlnovou teorií, ale také teorií kvantovou. Částicová povaha elektromagnetického záření se projevuje především v krátkovlnných oblastech (tzn. při vysokých energiích fotonů), vlnová povaha v oblasti dlouhovlnné.

1. Elektromagnetické záření může být pohlcováno, resp. vyzařováno, jen v určitých kvantech (fotonech), jejichž energie  $E$  odpovídá násobkům frekvence záření  $f$  (Planck 1999):

$$E = h \cdot f \quad \text{kde } h \text{ je Planckova konstanta, } h = 6,626075 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$$

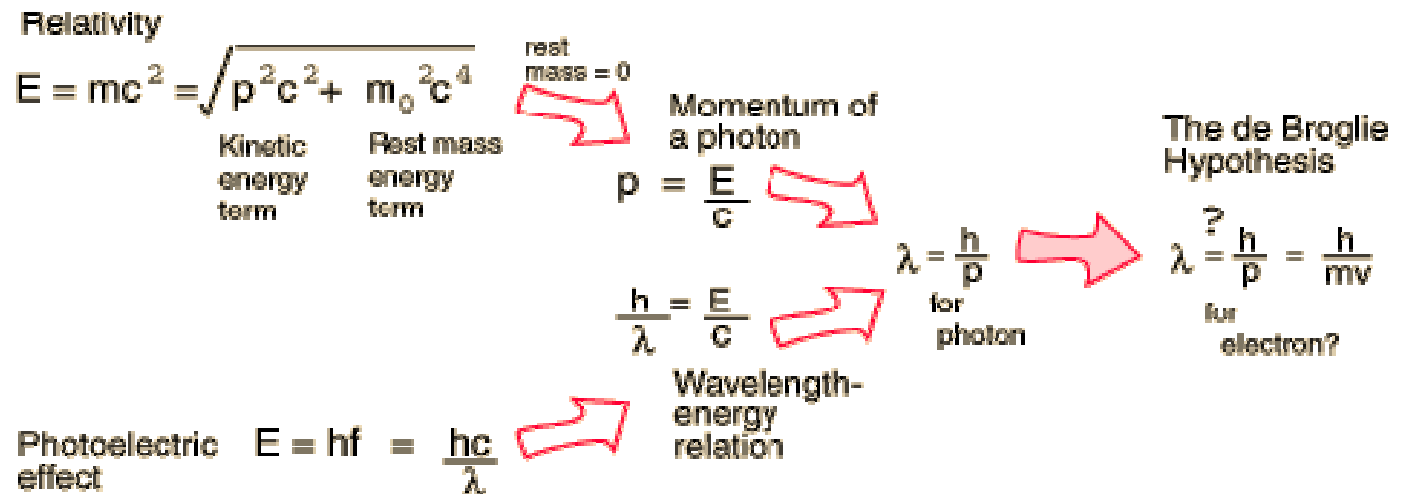
Elektromagnetická vlna o frekvenci  $f$  a vlnové délce  $\lambda$  je soubor světelných kvant (fotonů) o určité energii a hybnosti (Einstein 1905).

$$p =$$

2. Vlnové vlastnosti vykazují (v určitých situacích) všechny částice (de Broglie 1924). Částice lze popsat vlnovou délkou o velikosti

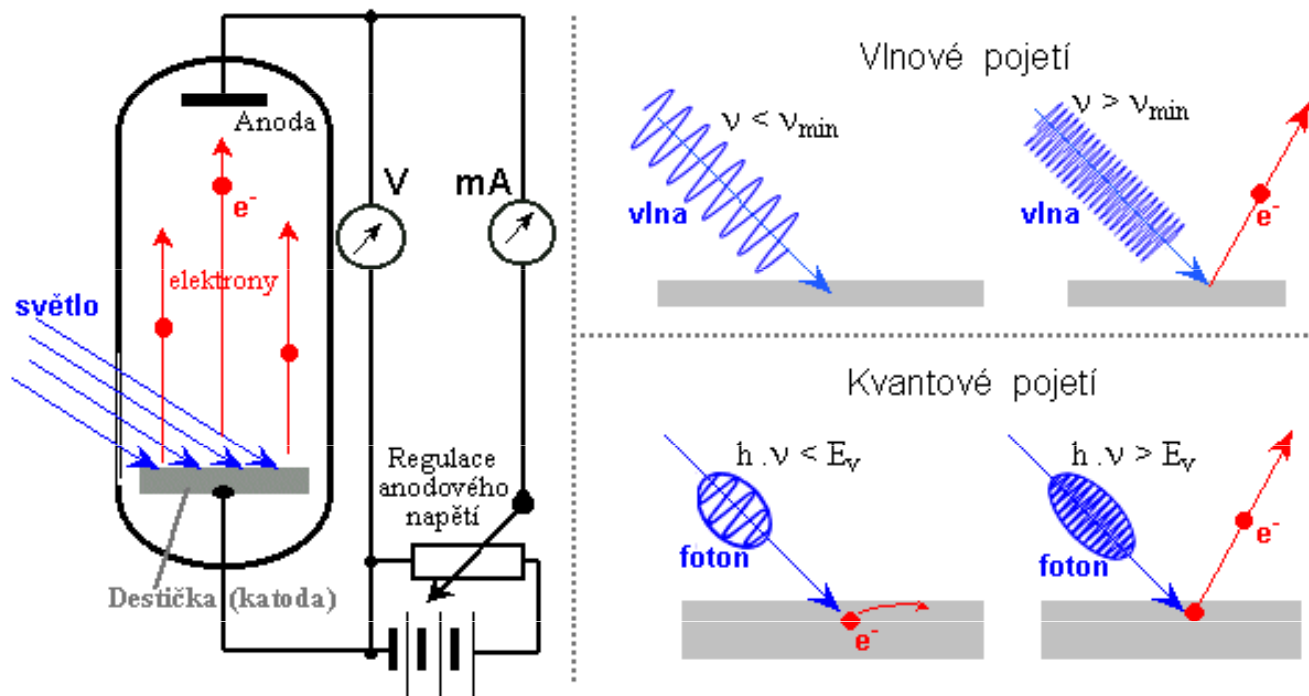
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

kde  $h$  je Planckova konstanta a  $p$  je hybnost částice.



## Příklad

Rozlišení v elektronovém mikroskopu, závisí na kinetické energii elektronů - vyšší rychlost (i kinetická energie) odpovídá vyšší hybnosti, čímž se snižuje jejich vlnová délka a lze tedy dosáhnout vyššího rozlišení.



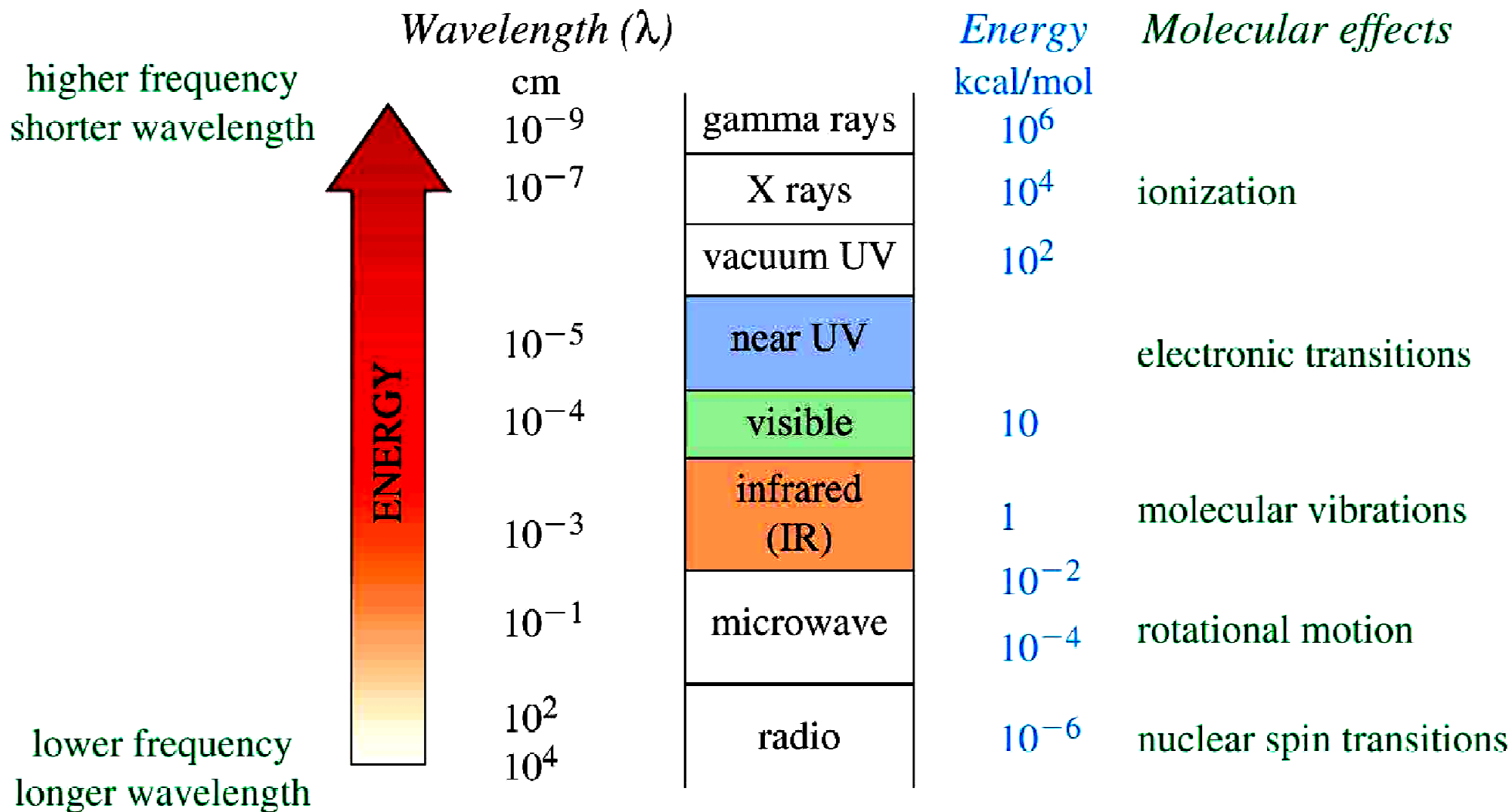
Každá mikročástice o hmotnosti  $m$  pohybující se rychlostí  $v$ , se může chovat jako vlna o vlnové délce

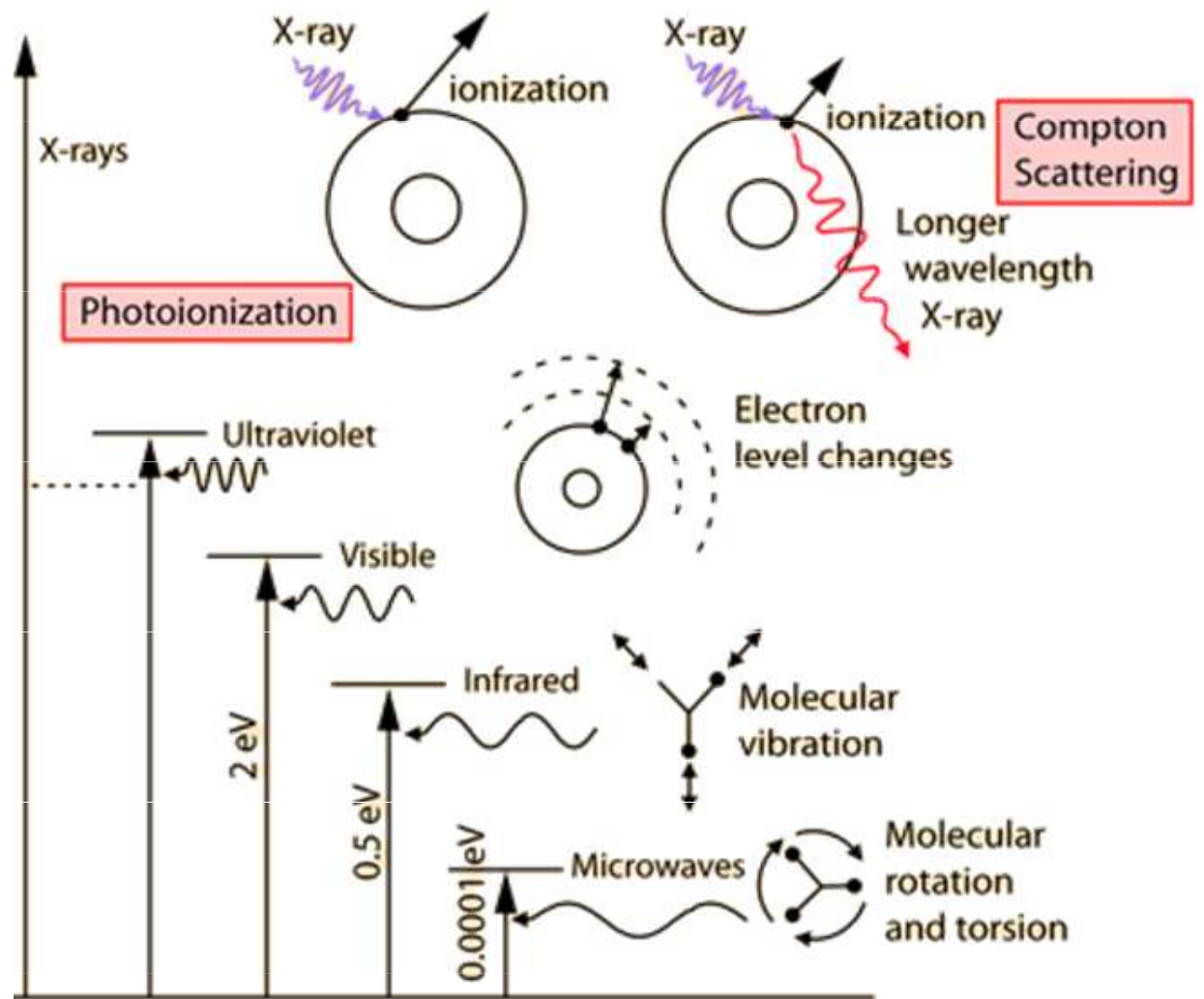
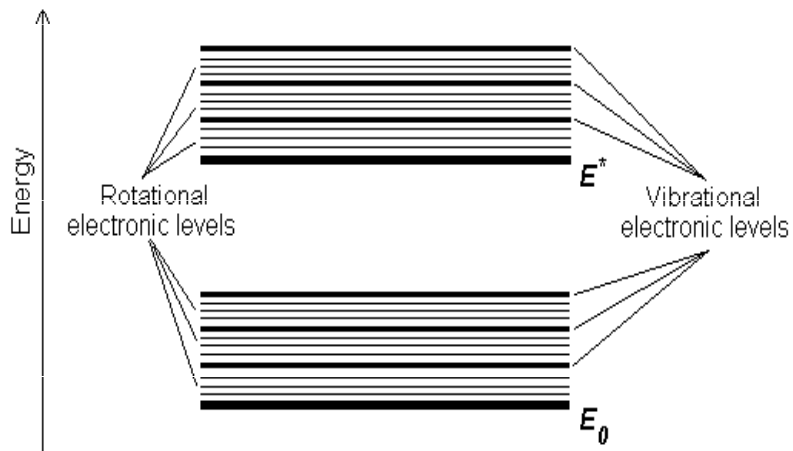
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m v} = \frac{h}{m v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

**De Broglieova-Comptonova vlnová délka**



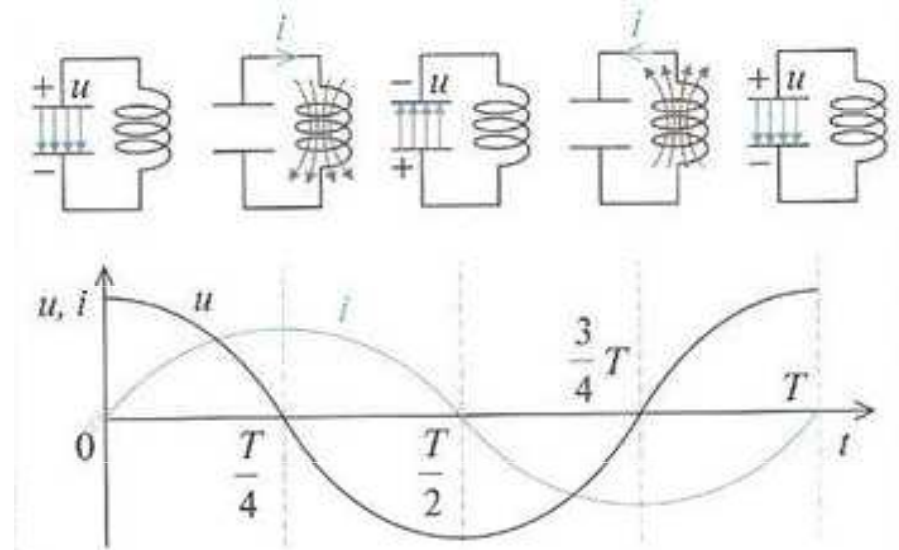
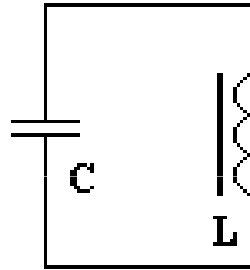
# Vliv elektromagnetického záření na molekuly





# Elektromagnetické kmitání, elektromagnetický oscilátor

Elektromagnetický oscilátor je obvod tvořený cívkou a kondenzátorem - obvod LC (oscilační obvod)



1. Po nabití kondenzátoru se mezi jeho deskami vytvoří elektrické pole, jehož energie představuje počáteční energii oscilátoru. Po připojení kondenzátoru k cívce začne oscilačním obvodem procházet proud, kondenzátor se vybíjí a energie elektrického pole se zmenšuje. Současně se zvětšuje proud procházející cívkou a kolem ní se vytváří magnetické pole. Energie elektrického pole kondenzátoru se tedy mění na energii magnetického pole cívky.
2. Kondenzátor se vybije za jednu čtvrtinu periody  $T$  kmitání obvodu LC. V tom okamžiku dosahuje proud maximální hodnoty a celková energie kmitání je dána energií magnetického pole. Kondenzátor je vybit a proud se začíná zmenšovat. To vede ke vzniku indukovaného napětí, obvodem prochází indukovaný proud a kondenzátor se opět nabíjí.
3. Polarita jeho napětí je ale opačná a v okamžiku  $t = T/2$  je ukončena přeměna magnetické energie v energii elektrickou. Ve druhé polovině periody se popsáný děj opakuje - směry proudů a pořadí polarit napětí kondenzátoru jsou ale opačné.

# Rádiové záření

Vzniká mimo jiné v obvodu střídavého proudu, k němuž je připojena anténa. Rychlost šíření rádiových vln je v prostoru přibližně rovna rychlosti světla ve vakuu. V případě jiných prostředí závisí na indexu lomu. Podle [frekvence](#) se rádiové vlny dělí na takzvaná **vlnová pásma**. Jednotlivá pásma se výrazně liší přenosovou kapacitou i dosahem.

Většina zdrojů zpráv generuje signály, které ve své původní podobě nejsou vhodné pro dálkový přenos. Proto vznikla modulace, která posílí signál (nesenou informaci), lze ho tak přenášet na delší vzdálenost.

**Modulace** je nelineární proces, kterým se mění charakter vhodného nosného signálu pomocí modulujícího signálu.

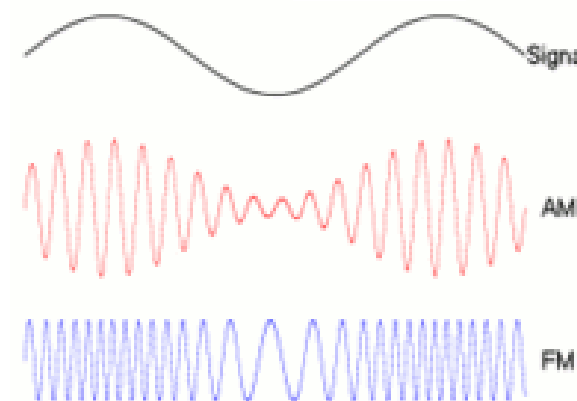
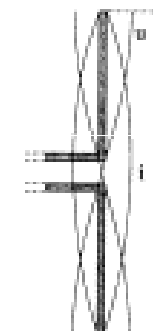
Frekvenční modulace

Amplitudová modulace

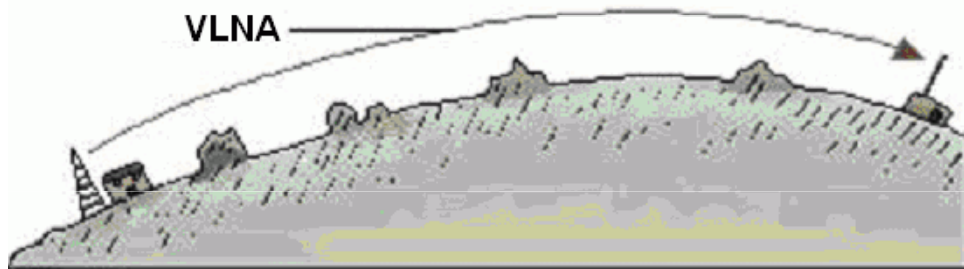
Fázová modulace

Pulzní modulace

Modulace se používá při přenosu nebo záznamu elektrických nebo optických signálů. Nejběžnějšími příklady jsou například rozhlasový a televizní přijímač, mobilní telefon, různé typy modemů, satelitní přijímače atd.

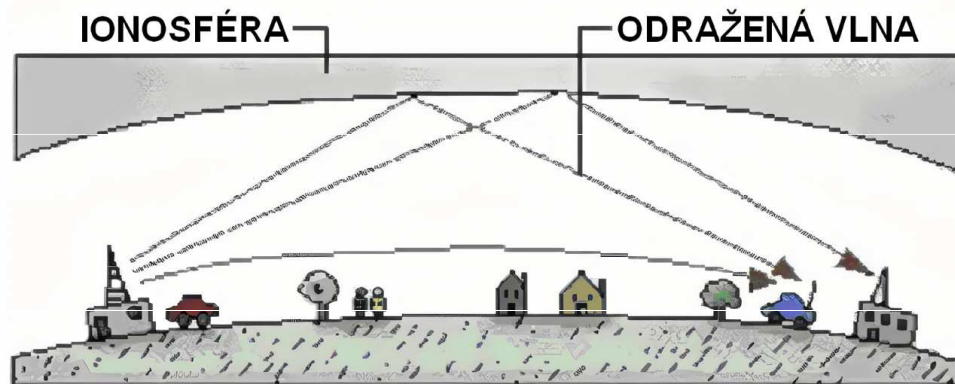


## DLOUHÉ VLNY



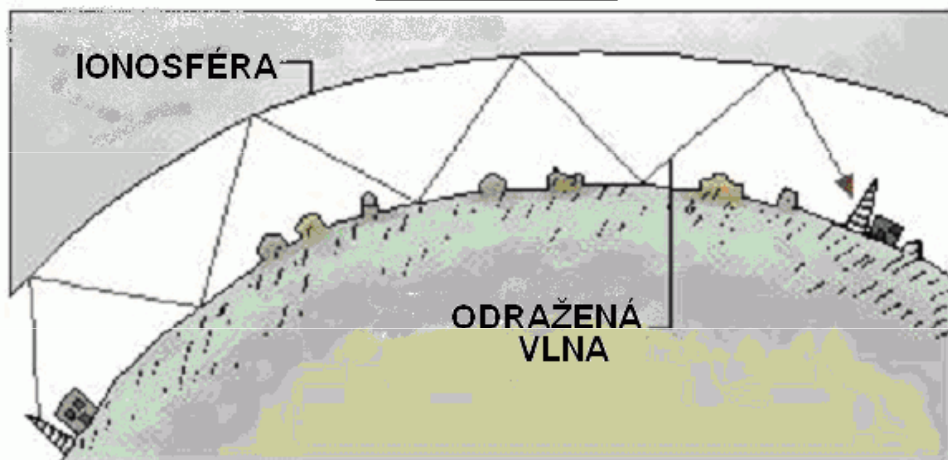
Kilometrové vlny, mají frekvence 30 až 300 kHz. Použití pro rozhlasové dlouhé vlny, radiokomunikace, meteorologické služby.

## STŘEDNÍ VLNY



Hektometrové vlny, mají frekvence 0,3 – 3 MHz. Použití k přenosu rozhlasového vysílání (SV), radionavigaci a komunikaci na malé a střední vzdálenosti.

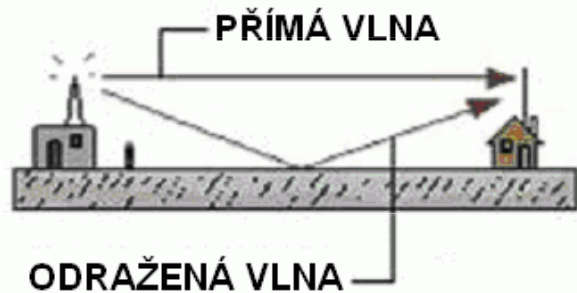
## KRÁTKÉ VLNY



Dekametrové vlny, mají frekvence 3 – 30 MHz. Použití pro radiokomunikace na střední a velké vzdálenosti, rozhlasové krátké vlny, amatérská pásma. Krátké vlny se odrážejí od ionosféry (začíná ve výšce 60 – 80 km nad zemským povrchem, obsahuje určité množství molekul vzduchu rozštěpených na ionty a volné elektrony)



## VELMI KRÁTKÉ VLNY



Metrové vlny, mají frekvence 30 – 300 MHz. Na těchto vlnách se vysílá frekvenčně modulované rozhlasové vysílání (FM) a některé televizní kanály (dnes již opouštěné I., II. a III. tel. pásmo), různé mobilní radiostanice včetně leteckých a lodních. Vysílač a přijímač musí být přibližně v přímce, na které není překážka (satelity

### **Ultra krátké vlny**

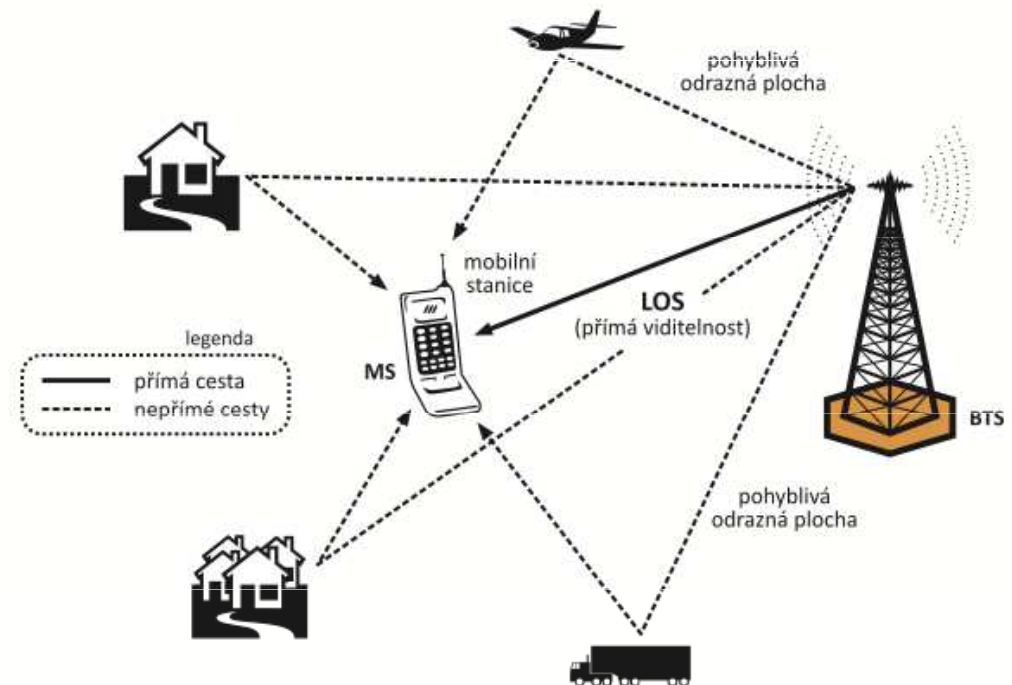
decimetrové vlny, o frekvencích 0,3 – 3 GHz. Vysílají se na nich televizní kanály (IV. a V. pásmo), dnes především digitální televize. Pracují zde i další radiokomunikační služby jako mobilní telefony, Wi-Fi, GPS, vojenská komunikace. Vysoká frekvence umožňuje přenos velkého množství informací, mezi mobilem a vysílačem ale nesmí být silná překážka (stavby, kopec).

### **Super krátké vlny**

centimetrové vlny, frekvence 3 až 30 GHz. Radiolokace, radioreléové spoje, telekomunikace, satelitní spojení, satelitní televize.

### **Extrémně krátké vlny**

milimetrové vlny, frekvence 30 až 300 GHz. Přistávací a říční radiolokátory, letecké výškoměry, radary.



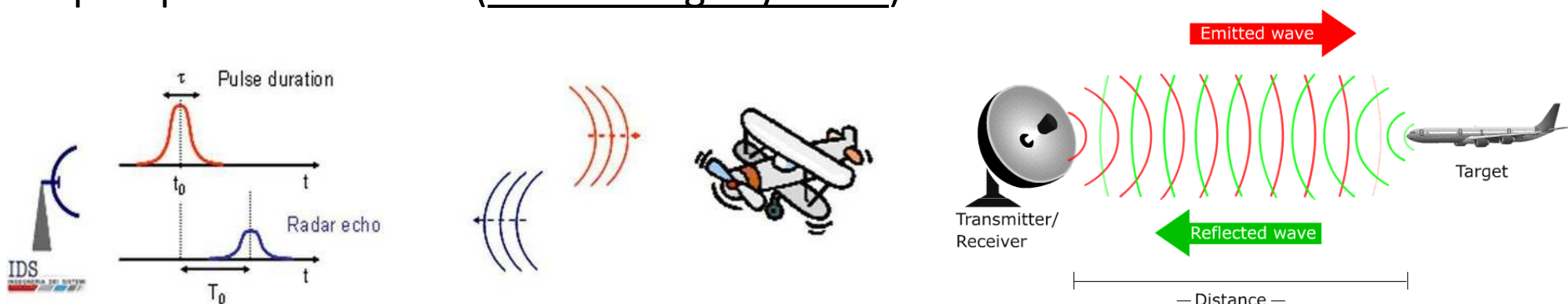


# Mikrovlnné záření

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny o vlnové délce od 1 mm do 1 m, což odpovídá frekvenci 300 MHz (0,3 GHz) až 300 GHz.

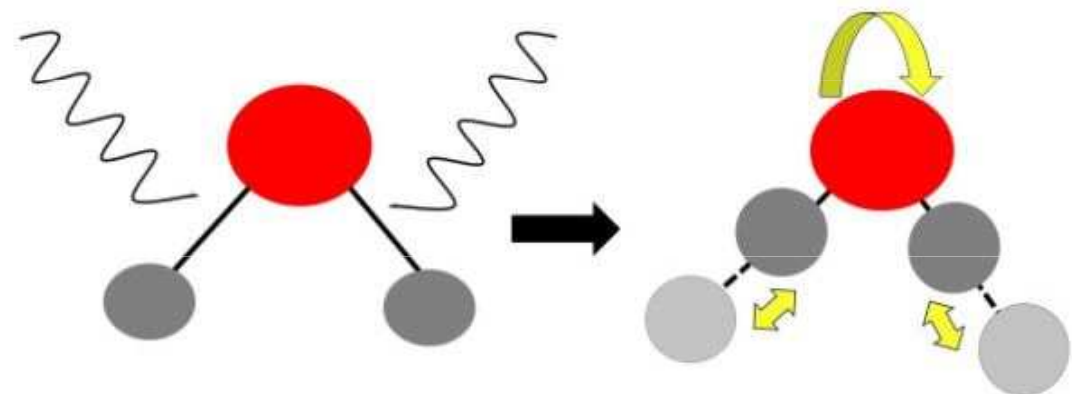
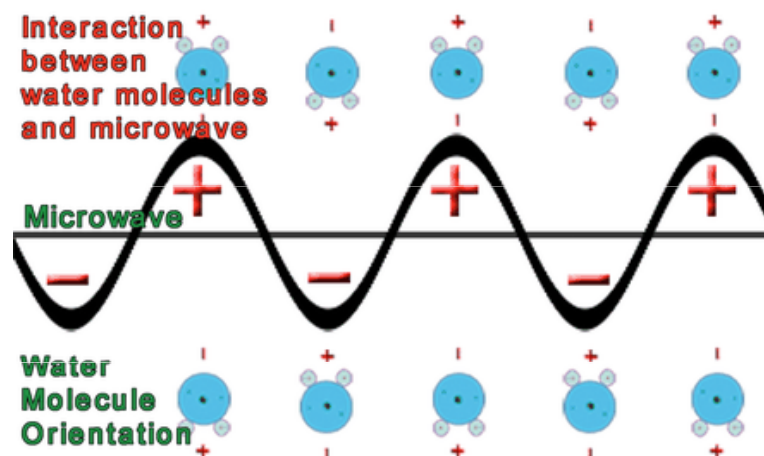
Využívají se v mnoha odvětvích lidské činnosti: k ohřevu potravin, k vysoušení knih či tkanin, obrábění materiálů, přenosu informací (Wi-Fi, mobilní sítě), radiolokaci, restaurování uměleckých děl, tavení skla, navigaci a v mnoha dalších.

**Radar** je elektronické zařízení na detekci polohy pozemních a vzdušných objektů. Princip **radiolokace** je založen na přímočarém šíření mikrovln a jejich odrazu od vodivých překážek. Radary pracují v rozsahu decimetrových nebo centimetrových vln. Radary slouží k detekci kovových objektů (automobil, letadlo, loď, apod.) a též na předpovídání bouřek (meteorologický radar).

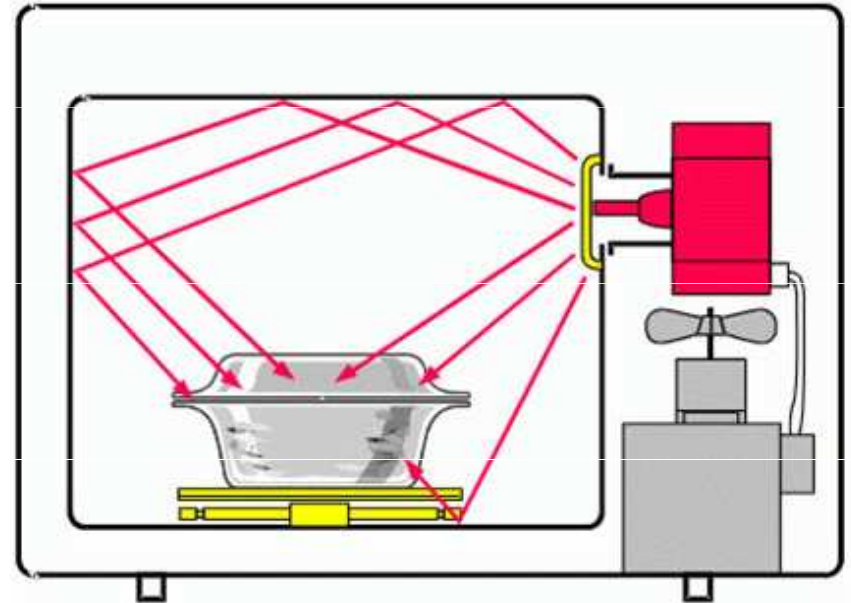
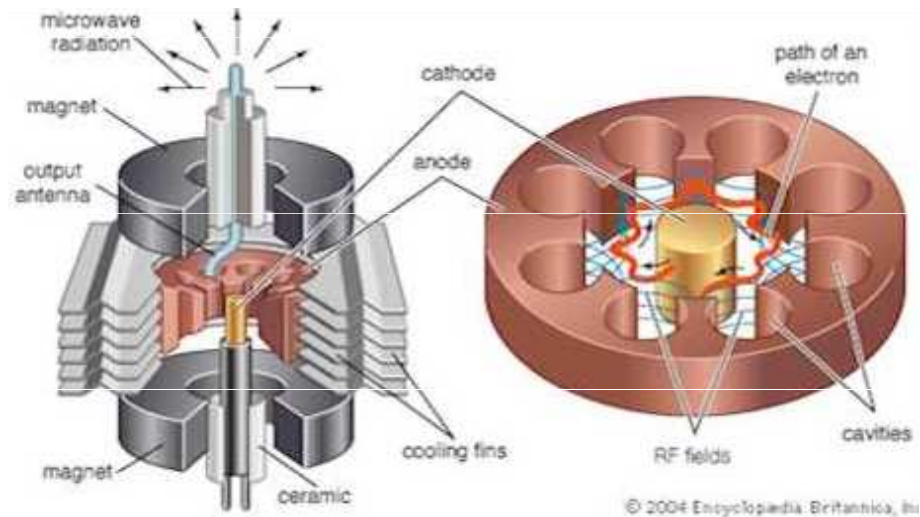


**Maser** (mikrovlnný laser) je kvantový paramagnetický zesilovač. Používá se na zesílení citlivosti radioteleskopů a spojovacích zařízení při kosmických letech a dálkových radiolokátorů, které mají zachytit tělesa na vzdálenost větší než 1 000 km.

**Mikrovlnná trouba.** Zdrojem mikrovlnného záření je magnetron. Mikrovlny o vlnové délce kolem 12 cm mají frekvenci blízkou rezonanční frekvenci některých nesymetrických molekul, hlavně vody. Dipóly polárních molekul se nepřetržitě natáčejí dle okamžitého směru elektromagnetického pole a takto mění svoji orientaci až několik miliardkrát za sekundu. Přitom se využívá dvou procesů: mezimolekulárního tření, k němuž dochází při překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil, a hystereze, která vzniká mezi působícím polem a indukovanou elektrickou odezvou vlivem setrvačnosti, jež závisí na elektrickém náboji, hmotě a tvaru molekul.



Rozkmitané molekuly vody takto mění pohybovou energii na tepelnou. Díky těmto jevům je ohřev produktu velmi rychlý a probíhá v celém objemu, ve kterém působí elektromagnetické pole na polární materiál. Potraviny obvykle obsahují velké množství vody a navíc mikrovlny nádoby (sklenice, talíře, keramické hrníčky) neohřívají



Mikrovlny procházejí některými materiály (papír, plast, bavlna, sklo). Propustnost závisí na materiálu a jeho tloušťce (výraznější útlum nastává, je-li tloušťka materiálu větší než  $1/2$  vlnové délky záření). Dipolárními materiály (voda, tuk) jsou mikrovlny pohlcovány. Kovy mikrovlny nepropouštějí, protože mají volné elektrony. Vzhledem k vlnové délce nemohou mikrovlny procházet ani malými otvory v kovech.

# Elektromagnetické záření látek

Všechny předměty kolem nás vydávají elektromagnetické záření. To se v případě studených těles nachází v infračervené části spektra, která není pro lidské oko viditelná. S rostoucí teplotou tělesa se vyzařování tepelného záření přesouvá ke kratším vlnovým délkám (k vyšším frekvencím).

Nejnižší teplota, při které je záření daného tělesa pozorovatelné pouhým okem, se označuje jako Draperův bod – ten odpovídá zhruba **525 °C**. Při této teplotě vyzařují všechny objekty, bez ohledu na materiál, z něhož jsou vyrobeny, **červené světlo**.

Když předmět **dále zahříváme**, mění se postupně jeho barva z červené přes oranžovou a žlutou k bílé. Při ještě vyšších teplotách se záření posouvá směrem do ultrafialové oblasti. Naše oči ho pak vnímají jako namodralé.



Teplota (°C)
550
630
680
740
770
800
850
900
950
1000
1100
1200
1300

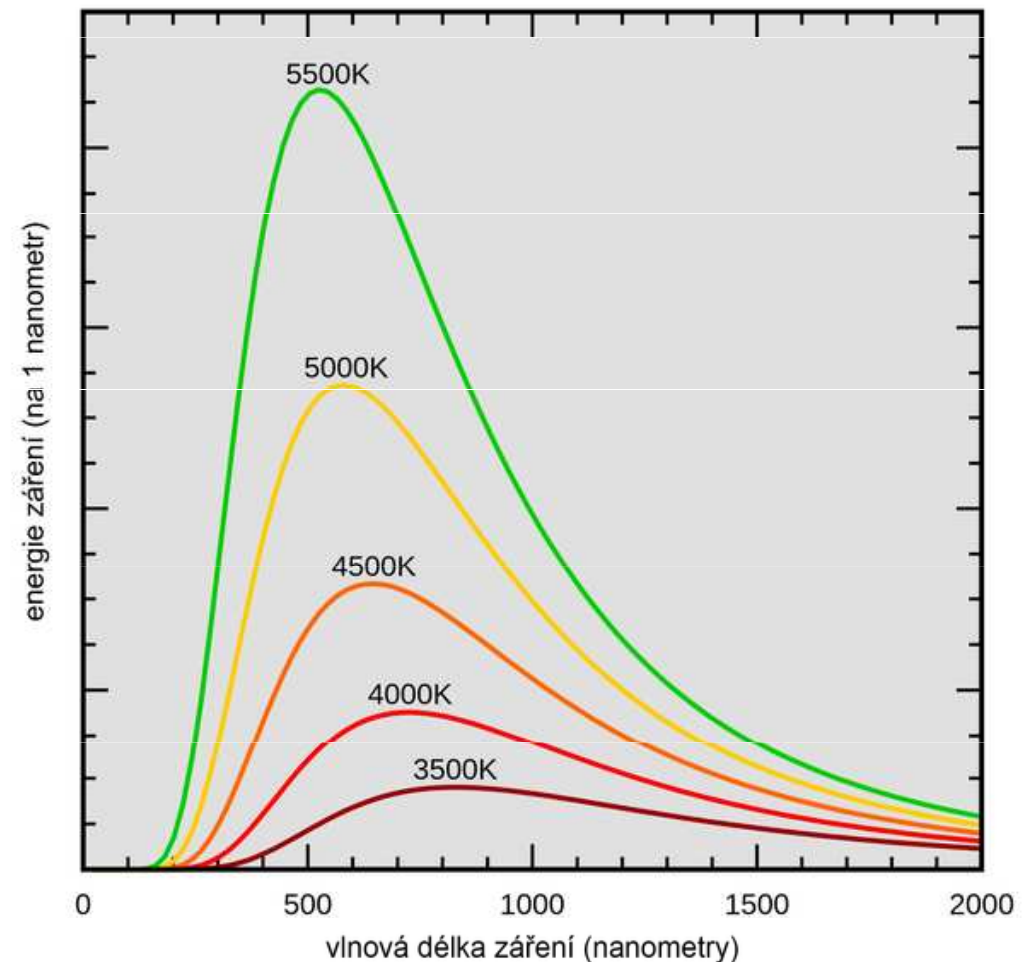
# Záření černého tělesa

Černé těleso je fyzikální abstrakce tělesa, které dokonale pohlcuje veškerou energii dopadajícího záření. V absolutně černém tělese je v rovnováze vyzařování a pohlcování záření.

## *Wienův posunovací zákon*

S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám.

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$





# Stefanův-Boltzmannův zákon

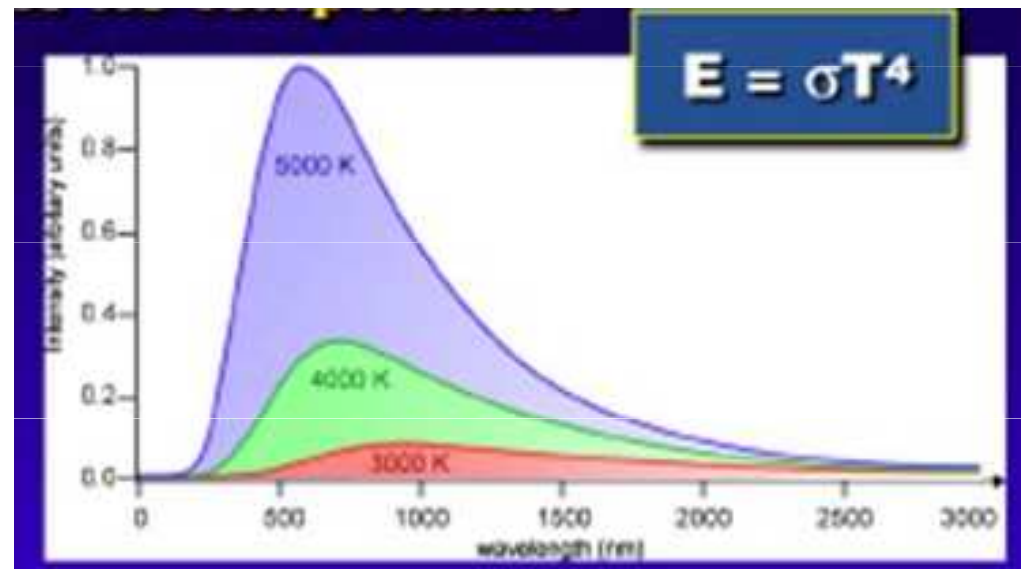
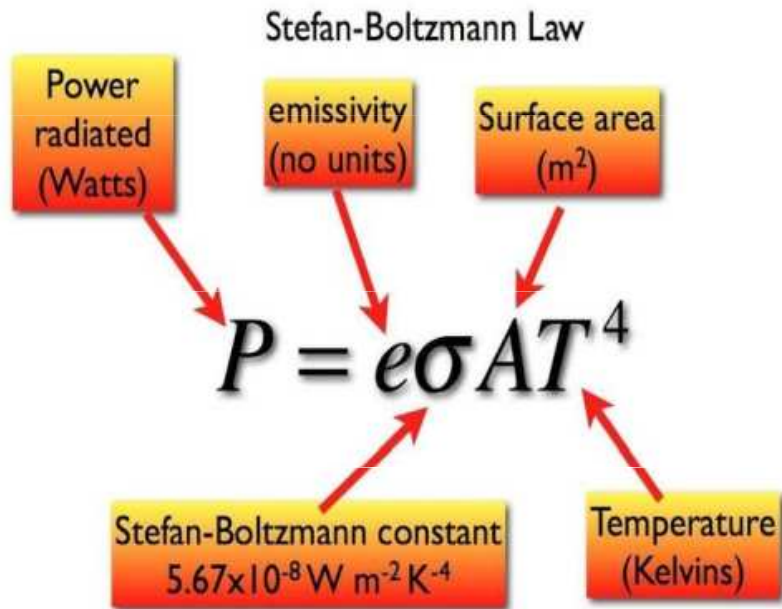
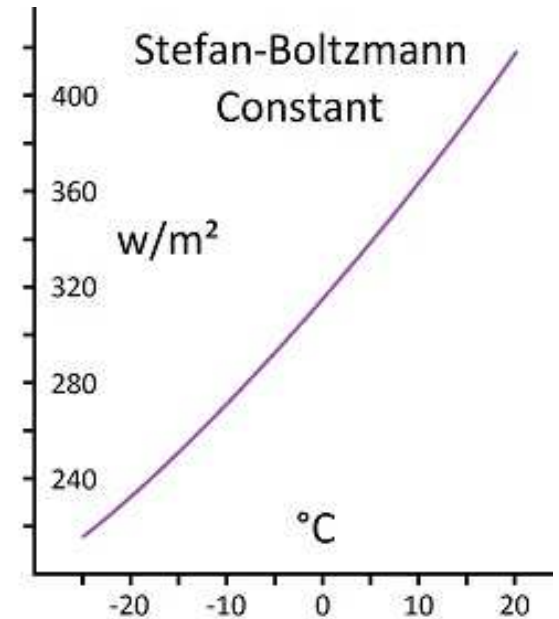
Intenzita záření vyzařovaná absolutně černým tělesem roste úměrně čtvrté mocnině termodynamické teploty.

$$I = \sigma T^4$$

$I$  – celková intenzita záření (podíl výkonu a plochy) [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

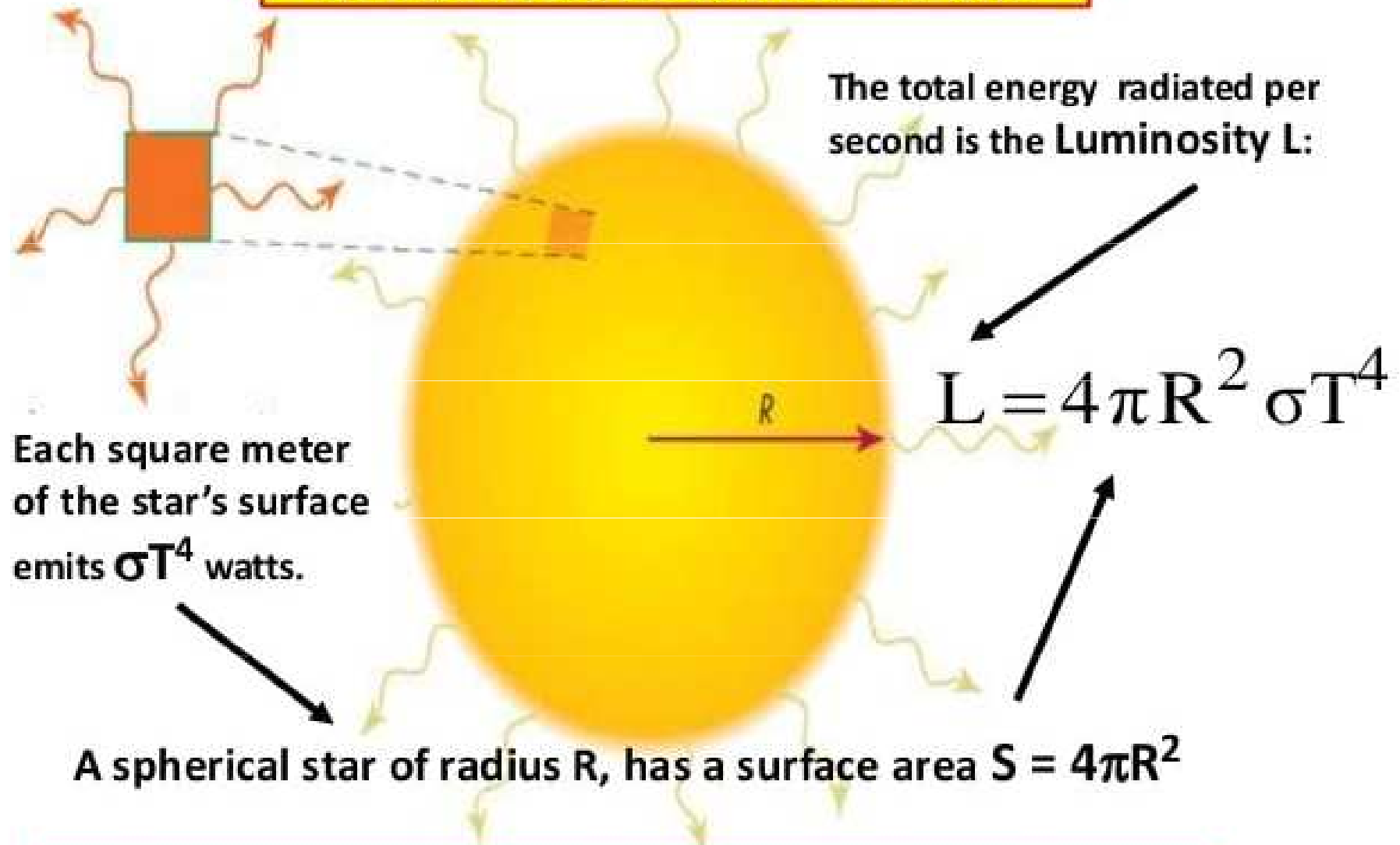
$\sigma$ -Stefan-Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot\text{K}^{-4}$

$T$  - termodynamická teplota





## The Stefan-Boltzmann Law



A star's luminosity is related to both a star's size and temperature:  
(a) Hotter stars emit more. (b) Larger stars emit more.

# Blackbody Radiation

