

## Maturitní otázka č. 2 – Kinematika hmotného bodu

**Kinematika** je obor mechaniky, který popisuje pohyb těles, ale nezabývá se příčinami pohybu.

Základními kinematickými veličinami jsou **dráha, (úhlová) rychlost a zrychlení**

**Hmotný bod** je myšlený model tělesa, u něhož je zachována hmotnost, ale vzhledem k řešené úloze jsou zanedbány rozměry a tvar. Pokud bod mění svoji polohu tak se pohybuje a naopak.

**Vztažné těleso** je těleso, vůči kterému vztahujeme pohyb/klid těles (tj. pevný bod)

**Vztažná soustava** jsou tři navzájem kolmé osy spojené se vztažným tělesem, slouží k určení polohy tělesa

**Polohový vektor** je spojnice počátku soustavy souřadnic a hmotného bodu (orientovaná k hmotnému bodu) -  $\vec{r}$

**Mechanický pohyb** je změna polohy polohového vektoru v čase

Protože poloha závisí na volbě vztažné soustavy, závisí na ní i pohyb → **pohyb a klid je relativní**

### Trajektorie, dráha, posunutí

**Trajektorie** je geometrická čára, kterou hmotný bod při pohybu opisuje

- podle jejího tvaru dělíme pohyby na **přímočaré** a **křivočaré**

**Dráha** je délka trajektorie, kterou hmotný bod opíše za určitou dobu  $[s] = m \rightarrow$  dráha je závislá na čase

**Posunutí** je orientovaná úsečka ve specifickém směru od počátku do místa, v němž trajektorie končí

**Rychlost** je změna polohy za čas. Podíl změny polohového vektoru a časového intervalu, ve kterém nastala  $[v] = m \cdot s^{-1}$

**Zrychlení** je charakteristika pohybu, která popisuje, jakým způsobem se mění rychlost tělesa v čase  $[a] =$

Rychlost:  $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$

Okamžitá rychlost (velocity):  $\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0s} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$  - její směr leží v tečně trajektorie

Průměrná rychlost (speed):  $v_p = \frac{\text{celk } s}{\text{celk } t}$  = skalární veličina, která je definována jako podíl dráhy a času

Zrychlení:  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$  = je vektor, který se týká časové změny vektoru rychlosti

Okamžité zrychlení:  $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0s} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$  - jeho směr leží v tečně trajektorie

### Druhy pohybů

#### PODLE TVARU TRAJEKTORIE

- 1) **přímočaré** – hmotný bod se pohybuje po přímce (nebo po její části)
- 2) **křivočaré** – hmotný bod se pohybuje po křivce (parabola, kružnice, elipsa, ...)

#### PODLE VELIKOSTI OKAMŽITÉ RYCHLOSTI

- 1) **rovnoměrné** – nemění se velikost vektoru okamžité rychlosti (směr se může měnit)
- 2) **nerovnoměrné** – velikost vektoru okamžité rychlosti se mění; v závislosti na velikosti zrychlení může být pohyb zrychlený, zpomalený nebo zcela obecný

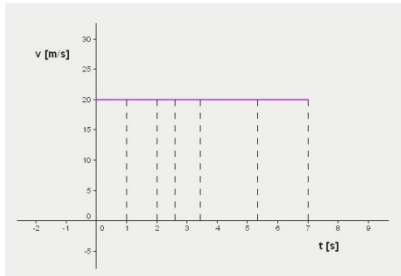
#### PODLE TRAJEKTORIÍ JEDNOTLIVÝCH BODŮ (U TĚLES)

- 1) **posuvné** – trajektorie všech bodů mají stejný tvar
- 2) **otáčivé** – trajektorie všech bodů tělesa mají tvar kružnic (části kružnic) o různých poloměrech

## Rovnoměrný přímočarý pohyb

Tento pohyb je charakterizován:  $a = 0 \rightarrow v = konst.$

Podle 1. Newtonova pohybového zákona na těleso pohybující se rovnoměrně přímočaře buď nepůsobí žádná síla, nebo je výslednice všech sil nulová.



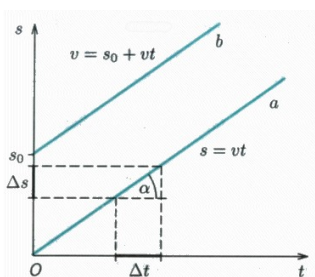
Obsah plochy pod křivkou je roven uražené dráze

$$s = v \cdot t \dots \text{počáteční dráha je nulová } (s_0 = 0 \text{ m})$$

$$s = s_0 + v \cdot t \dots \text{počáteční dráha není nulová}$$

Dráha rovnoměrného pohybu je lineární funkcí času.

Graf závislosti dráhy rovnoměrného pohybu na čase



## Rovnoměrný zrychlený přímočarý pohyb

Tento pohyb je charakterizován tím, že se velikost okamžité rychlosti zvětšuje za stejné časové intervaly o stejnou hodnotu  $a = konst.$

Podle 2. Newtonova pohybového zákona na těleso působí stálá síla  $F = m \cdot a$

$$v = at \dots \text{počáteční rychlost je nulová } (v_0 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$v = v_0 + at \dots \text{počáteční rychlost není nulová, zrychluje se}$$

$$v = v_0 - at \dots \text{počáteční rychlost není nulová, zpomaluje se}$$

$$v = at = \frac{2s}{t} = \sqrt{2as}$$

$$s = s_0 + v_0t \pm \frac{1}{2}at^2$$

Pokud vektor zrychlení působí proti vektoru rychlosti, jedná se o pohyb zpomalený.

## Volný pád

**Volný pád** je pohyb, kterým se pohybuje volně puštěné těleso v blízkosti zemského povrchu a v bezodporném prostředí (vakuu).

$$\vec{v} = \vec{g} \quad (g \doteq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$h_{(t)} = h - \frac{1}{2}gt^2 \quad (\text{výška od země v čase } t)$$

$$s_{(t)} = \frac{1}{2}gt^2 \quad (\text{uražená dráha v čase } t)$$

$$v_{(t)} = gt \quad (\text{rychlost v čase } t)$$

$$t_d = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (\text{doba dopadu})$$

### Rovnoměrný pohyb po kružnici

Trajektorií je kružnice  $v = konst.$   $a = konst.$   $\vec{a}$  stále mění svůj směr

**Průvodič hmotného bodu** je spojnice středu kružnice a pohybujícího se hmotného bodu.

**Obvodová dráha** je vzdálenost (délka oblouku kružnice), kterou urazí hmotný bod během pohybu

**Úhlová dráha** je úhel, který urazí průvodič hmotného bodu během pohybu  $[\varphi] = rad$

**Úhlová rychlost** je změna úhlové dráhy za jednotku času  $[\omega] = rad \cdot s^{-1}$

**Perioda** je doba jednoho oběhu  $[T] = s$

**Frekvence** udává počet oběhů za jednu vteřinu  $[f] = Hz = s^{-1}$

Frekvence:  $f = \frac{1}{T}$

Úhlová dráha:  $\Delta\varphi = \frac{s}{r}$

Úhlová rychlost:  $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Čím větší je  $\Delta\varphi$ , tím větší je  $v$  a  $\omega$

Čím větší je  $r$ , tím větší je  $s$ , a  $\omega$

$$\vec{v} = \omega r$$

Při pohybu se nemění velikost vektoru rychlosti, ale neustále se mění jeho směr (má vždy směr tečny ke kružnici)  $\rightarrow$  má zrychlení.

Tím pádem se mění i směr zrychlení (velikost je stále stejná), toto zrychlení vždy směřuje do středu kružnice

$\rightarrow$  **dostředivé zrychlení**  $[a_d] = m \cdot s^{-2}$

- někdy se také nazývá normálové zrychlení (má směr normály k vektoru rychlosti)

- velikost vektoru  $a_d$  je konstantní, ale směr se však neustále mění

Zrychlení:  $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$

Okamžité zrychlení:  $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$

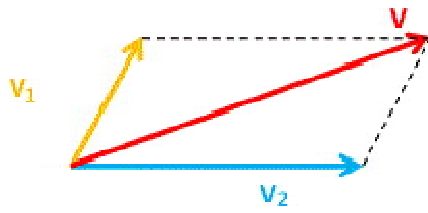
$$a_d = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

### Skládání zrychlení

Každé zrychlení má dvě složky: normálové zrychlení, které vyjadřuje změnu směru rychlosti, je kolmé na rychlost (např. dostředivé) –  $\vec{a}_n$   
tečné zrychlení, které udává změnu velikosti rychlosti, je ve směru rychlosti (např. pohyb rovnoměrně zrychlený) –  $\vec{a}_t$

Jejich součet udává skutečné zrychlení (doplnění do rovnoběžníku).

U kružnice se nemění velikost, proto tečná složka chybí a zůstává pouze normálová složka, která je kolmá na rychlost a míří do středu.

**Skládání pohybů**

Pokud bod koná více pohybů, můžeme je sloučit v jeden (například když přeplováme řeku ve člunu z břehu na břeh, zatímco nás unáší proud).



## Maturitní otázka č. 3 – Dynamika hmotného bodu

**Dynamika** je část mechaniky, která se zabývá příčinami pohybu hmotných objektů (bodů a těles)

### Klasická a relativistická dynamika

**Klasická dynamika** = platí pro makroskopické objekty pohybující se malými rychlostmi (vzhledem k rychlosti světla); zakladateli byli Galileo Galilei, Christian Huygens a především Isaac Newton

**Relativistická dynamika** = platí pro objekty, jejichž rychlosti jsou srovnatelné s rychlostí světla; základní principy relativistické dynamiky položil Albert Einstein v roce 1905 (speciální teorie relativity)

### Síla a její účinky

**Síla** je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje míru vzájemného působení těles a silových polí  $[F] = N$

#### Účinky:

a) *deformační (statické)* = působení síly má za následek deformaci tělesa (stlačení pružiny, míče)

b) *pohybové (dynamické)* = působení síly má za následek změnu pohybového stavu (kopnutí do míče)

### Izolované těleso

**Izolované těleso** je těleso, na které nepůsobí žádné síly.

Ve skutečnosti takové těleso neexistuje (stále na něj působí gravitační síla Země, Slunce, ...)

=> vytváříme **model izolovaného tělesa** – výslednice působících sil je nulová, zanedbáváme tření.

### Inerciální a neinerciální vztažné soustavy

a) **inerciální (setrvačné)** – soustavy, ve kterých izolovaná tělesa zůstávají v klidu nebo v rovnoměrném, přímočarém pohybu, neprojevuje se zde zrychlení, tj. soustavy, v nichž **platí první Newtonův pohybový zákon**

- každá soustava, která je vzhledem k jiné inerciální vztažné soustavě v klidu nebo v pohybu rovnoměrném přímočarém, je rovněž inerciální

- pro běžné pohyby probíhající na povrchu Země můžeme pokládat vztažnou soustavu spojenou s povrchem Země za inerciální

- *např.*: vlak jedoucí stálou rychlostí po rovných kolejích

- ve skutečnosti ovšem taková soustava neexistuje (celý vesmír rotuje)

b) **neinerciální** – soustavy, ve kterých se pohybový stav těles mění, aniž na ně působí silami jiná tělesa, projevuje se zde zrychlení

- tj. soustavy, ve kterých **neplatí první Newtonův pohybový zákon** → soustavy se zrychlením

- *např.*: vlak rozjíždějící se, brzdící vlak, vlak v zatáčce

### Hybnost tělesa

V dynamice nestačí k určení pohybového stavu pouze rychlost (jako v kinematice) → stav je určen nejen rychlostí, ale i hmotností (např. naložené auto jedoucí stejnou rychlostí jako prázdné brzdí déle)

**Hybnost tělesa** je vektorová fyzikální veličina, jejíž směr závisí na směru rychlosti a velikost je dána součinem hmotnosti a velikosti okamžité rychlosti  $[p] = kg \cdot m \cdot s^{-1}$

**Impuls síly** je vektorová fyzikální veličina znázorňující časový účinek síly  $[I] = kg \cdot m \cdot s^{-1}$

Hybnost:  $\vec{p} = m\vec{v}$   
 Impuls síly:  $\vec{I} = \vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$

### Zákon zachování hybnosti

„Celková hybnost izolované soustavy těles se vzájemným silovým působením těles se nemění (je konstantní).“

Uplatnění u raketových motorů v kosmonautice, u reaktivních turbín v elektrárnách, při výstřelu

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2$$

$$m_1\vec{v}_1 = m_2\vec{v}_2$$

### Newtonovy pohybové zákony

= fyzikální zákony formulované Isaacem Newtonem v roce 1687

Popisují vztah mezi tělesem a silami, které na těleso působí → umožňují určit, jaký bude pohyb tělesa v inerciální vztažné soustavě, jsou-li známy síly působící na těleso.

#### 1. NEWTONŮV POHYBOVÝ ZÁKON (tzv. zákon setrvačnosti)

„Existují vztažné soustavy (tzv. inerciální), ve kterých každé těleso (hmotný bod) setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, je-li součet všech sil, které na něj působí nulový.“

Pokud se tedy něco rovnoměrně pohybuje, tak se tak bude pohybovat do té doby, než na něj začnou působit vedlejší síly. **Platí pouze v inerciálních vztažných soustavách.** V jiných než inerciálních soustavách toto tvrzení neplatí, není obecné.

→ síla není příčinou pohybu, tělesa se mohou pohybovat i bez působení sil. Tento pohyb však musí být rovnoměrný přímočarý – těleso si tedy zachovává pohybový stav z okamžiku, kdy na něj přestala působit síla. Tato snaha setrvat v okamžitém pohybovém stavu se nazývá **setrvačnost**. Setrvačností se těleso brání proti změně svého pohybového stavu – např. proti zrychlení.

#### 2. NEWTONŮV POHYBOVÝ ZÁKON (tzv. zákon síly)

„Působí-li na těleso (hmotný bod) síla  $\vec{F}$  po dobu  $\Delta t$ , pak způsobí změnu hybnosti tělesa (hmotného bodu)  $\Delta\vec{p}$ , přičemž platí:

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \frac{m\Delta\vec{v}}{\Delta t} = m\vec{a} \quad , \text{za předpokladu že } m = \text{konst.} \text{“}$$

→ síla je příčinou změny pohybu, nikoli pohybu jako takového

Tento zákon umožňuje dynamické měření hmotnosti ( $m=F/a$ ), které se uplatňuje v situacích, kdy není možné měřit hmotnost vážením (hmotnost hvězd, atomů, ...)

Pohybová rovnice:  $\vec{F} = m\vec{a}$   
 $\vec{F}$ ... výslednice sil působících na těleso (hmotný bod)  
 $m$ ... hmotnost tělesa (bodu)  
 $\vec{a}$ ...zrychlením, které působením síly  $\vec{F}$  těleso (bod) získá

**Platí pouze v inerciálních vztažných soustavách a pro nedeformovatelná tělesa** (nebo hmotný bod, ten nelze deformovat)

#### 3. NEWTONŮV POHYBOVÝ ZÁKON (tzv. zákon akce a reakce)

„Dvě tělesa na sebe navzájem působí stejně velkými silami opačného směru. Tyto síly vznikají a zanikají současně.“

→ působení těles je vždy vzájemné, přitom se účinky sil akce a reakce navzájem neruší ani je nejde počítat

(každá působí na jiné těleso).

Nezávisí na pohybovém stavu tělesa → **platí vždy** (nejen v inerciálních vztažných soustavách).

### Galileův princip relativity

„Zákony mechaniky (i rovnice, které je vyjadřují) jsou stejné ve všech inerciálních vztažných soustavách.“

Pro děje, jejichž rychlost se blíží rychlosti světla, důsledky tohoto zákona odporují experimentům a je tedy třeba použít Einsteinův princip relativity.

### Dostředivá síla

**Dostředivá síla** je síla, která udržuje hmotný bod v rovnoměrném pohybu při pohybu po kružnici  $[F_d] = N$ .

Tato síla má stejný směr jako dostředivé zrychlení (tedy do středu).

$$\vec{F}_d = m\vec{a}_d$$

$$F_d = ma_d = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$$

### Setrvačná síla

V **neinerciálních soustavách** nezůstává izolované těleso v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Na těleso v neinerciální vztažné soustavě působí setrvačná síla  $[F_s] = N$ , která vzniká jako důsledek zrychleného pohybu soustavy.

Setrvačná síla má vždy **opačný směr** než zrychlení soustavy vzhledem k inerciální vztažné soustavě.

$$\vec{F}_s = -m\vec{a}$$

Kde:  $m$ ... je hmotnost objektu

$\vec{a}$ ... je zrychlení soustavy

Setrvačné síly jsou pro pozorovatele v neinerciální vztažné soustavě stejně reálné jako síly vzájemného působení mezi tělesy a mohou se s těmito silami skládat (např. s tíhovou silou působící na těleso)

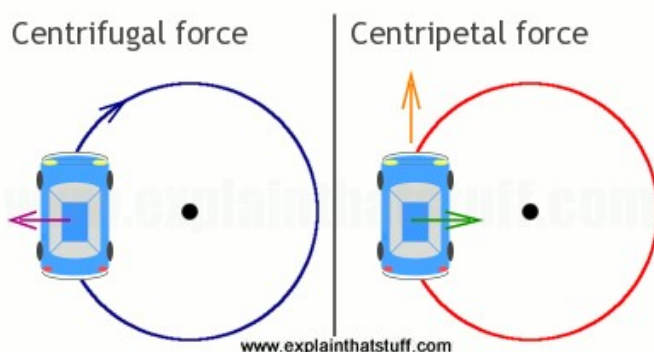
### Odstředivá síla

Ve vztažné soustavě, která se otáčí, ve které popisujeme pohyb vůči pohybujícímu se bodu, působí na těleso setrvačná **odstředivá síla**, směřující od osy otáčení  $[F_o] = N$ .

Odstředivá i dostředivá síla je stejně veliká, ale každá popisována vůči jinému vztažnému tělesu. Jde totiž o různý popis stejné situace z různých míst.

$$F_o = F_d$$

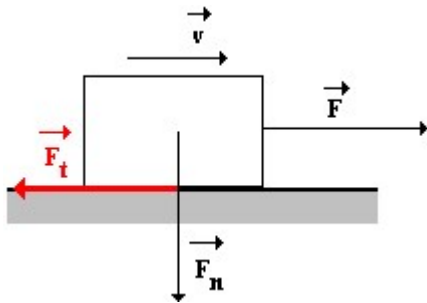
**Nelze tyto dvě síly kreslit na tentýž obrázek.**



### Smykové tření

Při posouvání těles (jedno po druhém) vzniká třecí síla  $[F_t] = N$ .

Tu způsobují drobné mikroskopické nerovnosti obou povrchů a v některých případech (např. sklo a sklo) také vzájemné působení částic.



Velikost třecí síly závisí na:

- 1) normálové síle  $F_n$  (kolmá síla kterou působí těleso na podložku)
- 2) koeficientu tření  $f$  (záleží na rychlosti a materiálu)

Než se předmět začne pohybovat, musíme na něj zpočátku působit větší silou, než která je později potřebná k samotnému rovnoměrnému pohybu. Rozlišujeme:

$f_0$  - klidový koeficient smykového tření

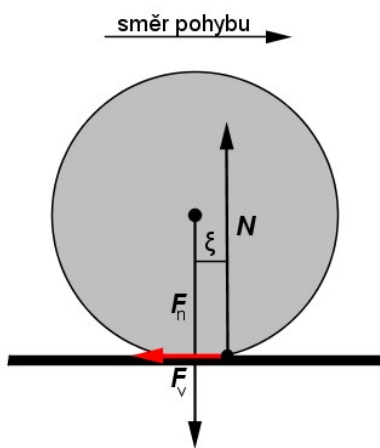
$f$  - dynamický koeficient smykového tření

$$f_0 > f$$

$$F_t = f * F_n$$

### Valivý odpor

Při valivém pohybu tělesa kruhového průřezu vzniká mezi ním a podložkou valivý odpor  $[F_v] = N$ .



Velikost valivého odporu závisí na:

- 1) normálové síle  $F_n$  (kolmá síla kterou působí těleso na podložku)
- 2) rameni valivého odporu  $[\xi] = m$
- 3) poloměru valivého předmětu  $[R] = m$

$$F_v = \xi * \frac{F_n}{R}$$

## Maturitní otázka č. 4 – Energie hmotných bodů

### Mechanická práce

**Mechanická práce** je děj, kdy síla působící na těleso posouvá tímto tělesem po určité dráze. Je to fyzikální veličina, která vyjadřuje množství vykonané práce  $[W] = J$ .

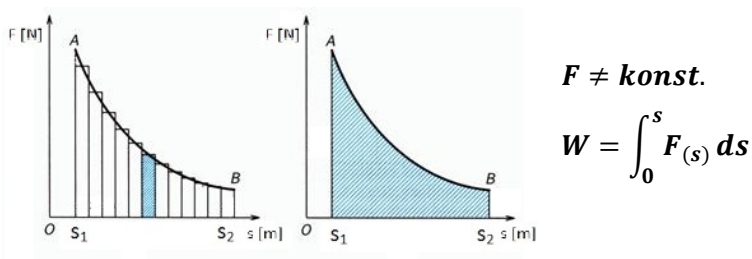
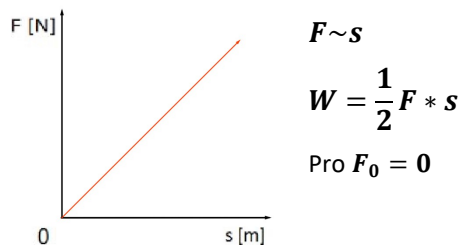
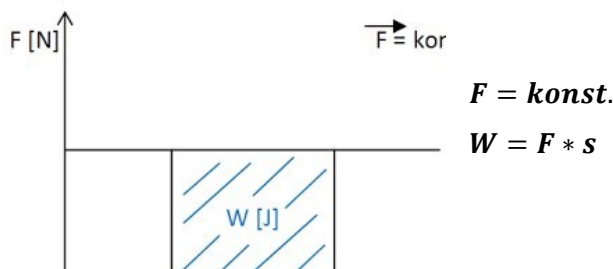
Pokud:  $F = konst.$   
 $\vec{F}$  má stejný směr jako  $\vec{v}$

$$W = F * s$$

Pokud:  $F = konst.$   
 $\vec{F}$  nemá stejný směr jako  $\vec{v}$   
 $\alpha$  je úhel, který svírá trajektorie s působící silou

$$W = F * s * \cos\alpha$$

Při popisu práce používáme tzv. **Pracovní diagramy**, tedy graf závislosti síly na dráze. Práci zde vyjadřuje obsah plochy pod křivkou (lze použít určitý integrál)



Mechanická práce se nekoná:

1. těleso se pohybuje, ale nepůsobí na něj žádná síla (při rovnoměrném přímočarém pohybu)
2. na těleso působí síla, ale těleso zůstává v klidu (držení předmětu v určité výšce nad zemí)
3. síla, která na těleso působí, je kolmá na směr jeho pohybu (dostředivá síla)

Kladná práce:  $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$

Záporná práce:  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$

## Výkon, příkon a účinnost

**Výkon** je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje množství práce vykonané za jednotku času  $[P] = W$ .

Dělení:

1) **průměrný výkon** – vztahuje se k určitému časovému intervalu  $P_p = \frac{W}{t} = \frac{F\Delta s}{\Delta t} = F\Delta v$

2) **okamžitý výkon** – vztahuje se k určitému okamžiku  $P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt}$

Ze vztahu pro průměrný výkon plyne pro mechanickou práci vztah:  $W = P_p t$ . Odtud plynou nová vyjádření jednotky práce, a to **Wattsekunda (Ws)** a **Kilowatthodina (kWh)**

**Příkon**  $P_0$  je určen podílem energie, která byla stroji dodána za dobu  $t$  a této doby:  $P_0 = \frac{\Delta E}{\Delta t}$

**Účinnost**  $\eta$  definujeme jako podíl výkonu  $P$  a příkonu  $P_0$ , tedy:  $\eta = \frac{P}{P_0} \text{ v } (\%)$

$$P_0 > P$$

## Kinetická a potenciální energie

**Kinetická energie** je druh energie, kterou má pohybující se těleso (vzhledem k určité soustavě)  $[E_k] = J$ .

$$\text{Odvození: } E_k = W = Fs = ma \frac{1}{2} at^2 = m \frac{v^2}{t^2} t^2 = \frac{1}{2} mv^2 \quad \rightarrow \quad E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

Závisí na hmotnosti a velikosti rychlosti – není rozhodující působící síla ani dráha, důležitá je práce.

Změna  $E_k$  je rovna práci, kterou vykoná výslednice působících sil:  $\Delta E_k = E_{k1} - E_{k2} = W$

$E_k$  je relativní, je závislá na volbě vztažné soustavy (protože je na ní závislá velikost rychlosti).

Celková  $E_k$  soustavy hmotných bodů je dána součtem kinetických energií jednotlivých bodů.

**Potenciální energie** je druh energie, kterou má každé těleso nacházející se v silovém poli určité síly a také pružně deformovatelná tělesa. My používáme pouze **potenciální tíhovou energii**  $[E_p] = J$ .

$$\text{Odvození: } \Delta E_p = E_{p1} - E_{p2} = W = F_G \cdot d = mg(h_1 - h_2) \quad \rightarrow \quad E_p = mgh \text{ (potenciální tíhová energie)}$$

Úbytek tíhové potenciální energie závisí na hmotnosti hmotného bodu, na tíhovém zrychlení a na výšce nad povrchem Země. Nezávisí však na tvaru trajektorie, po níž se hmotný bod pohybuje, ani na délce jeho dráhy.

$E_p$  je relativní, je závislá na tom, **v jakém místě si zvolíme místo s nulovou potenciální energií ( $h$ )**.

Různí pozorovatelé se na těchto energiích neshodnou. Ale jsou schopni se shodnout na jejich změnách  $\Delta E_k$  a  $\Delta E_p$ .

## Mechanická energie

**Mechanická energie** je součet kinetické a potenciální energie soustavy

$$E_k + E_p$$

Působí-li v soustavě těleso/Země pouze tíhová síla zůstává celková mechanická energie stálá. Pokud předpokládáme, že:  $E_k + E_p = \text{konst.}$ , pak platí tzv. **Zákon zachování mechanické energie**.

### Zákon zachování mechanické energie

„Při všech mechanických dějích zůstává celková mechanická energie soustavy stálá.“

$$E_k + E_p = \text{konst.}$$

Může se měnit  $E_k$  na  $E_p$  a naopak. To platí právě tehdy, když se žádné jiné druhy energie nemění (např. při volném pohybu ve vakuu apod.) Platí tedy pouze pro **izolovanou soustavu těles**, na která nepůsobí třecí síly ani odpor prostředí.

Práce tak souvisí s přírůstkem energie:

$$W = \Delta E$$

#### **Zákon zachování energie**

*„Při všech dějích v izolované soustavě těles zůstává celková energie soustavy stálá.“*

Mění se jedna forma energie v jinou nebo energie přechází z jednoho tělesa na druhé.

*„Nelze sestavit perpetuum mobile prvního druhu.“* (jiná formulace)

#### **Zákon zachování energie – mechanika kapalina a plynů**

Podívejme se na rovnici kontinuity z hlediska mechanické energie, neboť se změnou rychlosti kapaliny se mění i její kinetická energie. V zúžené části potrubí proudí kapalina větší rychlostí a má tedy i větší kinetickou energii. Z hlediska zákona zachování mechanické energie roste kinetická energie na úkor energie potenciální.

#### **Zákon zachování energie – speciální teorie relativity**

*„Celková energie izolované soustavy zůstává při všech dějích probíhajících uvnitř soustavy konstantní.“*

## Maturitní otázka č. 7 – Gravitační pole

Gravitační pole mají všechny hmotné objekty.

### Newtonův gravitační zákon

„Každá dvě tělesa se navzájem přitahují stejně velkými gravitačními silami opačného směru ( $F_g, -F_g$ ), přičemž velikost gravitační síly pro dvě stejnorodá tělesa tvaru koule je přímo úměrná součinu jejich hmotností ( $m_1, m_2$ ) a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti jejich středů ( $r$ ).“

Platí:

$$\mathbf{F}_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, G \dots \text{gravitační konstanta } (G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2})$$

Reakcí k této síle je stejně velká, ale opačně orientovaná síla z druhého tělesa. Zrychlení u obou sil bude různé, ale síla bude stejná.

Tento vztah platí nejen pro dva hmotné body a dvě stejnorodé koule ( $r$  je vzdálenost středů), ale dá se použít pro všechna tělesa, jejichž rozměry jsou velmi malé vzhledem k jejich vzdálenostem.

Gravitační síla působí mezi libovolnými dvěma hmotnými objekty, ale prakticky se projevuje až tehdy, je-li hmotnost jednoho z těles značně velká.

### Gravitační síla, tíhová síla, tíha

**Gravitační síla** je síla, kterou se přitahují všechna tělesa nenulových hmotností  $[\mathbf{F}_g] = N$ .

$$\mathbf{F}_g = m \cdot \mathbf{a}_g, \quad \mathbf{a}_g \text{ je gravitační zrychlení}$$

Na všechna tělesa při povrchu Země, která neleží na ose otáčení, působí kromě gravitační síly směřující do středu Země, ještě setrvačná odstředivá síla směřující kolmo od osy otáčení.

**Tíhová síla ( $\mathbf{F}_G$ )** je výslednice gravitační a odstředivé síly při povrchu Země  $[\mathbf{F}_G] = N$ .

$$\mathbf{F}_G = m \cdot \mathbf{g}, \quad \mathbf{g} \text{ je tíhové zrychlení } (g \doteq 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$$

Velikost tíhové síly se na různých místech na Zemi liší díky nestejně velikosti setrvačné odstředivé síly  $F_s$ . Ta je na pólech nulová (-> tíhová síla je největší), na rovníku největší (-> tíhová síla nejmenší).

Platí:

$$\vec{\mathbf{F}}_G = \vec{\mathbf{F}}_g + \vec{\mathbf{F}}_s$$

Od veličiny tíhová síla musíme odlišit veličinu tíha tělesa

**Tíha ( $\mathbf{G}$ )** je síla, kterou působí těleso v tíhovém poli Země na podložku (tlak) nebo závěs (tah)  $[\mathbf{G}] = N$ .

Působíště tíhové síly je v těžišti tělesa, působíště tíhy leží ve stykové ploše nebo v bodě závěsu. Těleso, u kterého vymizí účinek tíhy na jiná tělesa, se nachází v **beztížném stavu**.

### Intenzita gravitačního pole

**Intenzita gravitačního pole** je fyzikální vektorová veličina, která charakterizuje silové působení gravitačního pole v daném místě  $[\mathbf{K}] = N \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Je to podíl gravitační síly, která působí v daném místě pole a hmotnosti tělesa. Intenzita gravitačního pole se tedy vždy rovná gravitačnímu zrychlení v daném místě.

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{F}_g}{m} = \mathbf{a}_g$$

Pro výpočet velikosti intenzity gravitačního pole ve vzdálenosti  $r$  od hmotného bodu platí:

$$\mathbf{K} = G \frac{M}{r^2}$$



### Gravitační potenciální energie

**Gravitační potenciální energie** je druh mechanické resp. potenciální energie, kterou mají všechna tělesa v gravitačním poli Země.

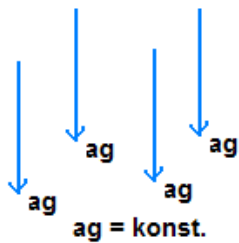
### Druhy gravitačních polí

**RADIÁLNÍ** – ve všech místech směřuje gravitační síla/zrychlení do středu gravitačního pole

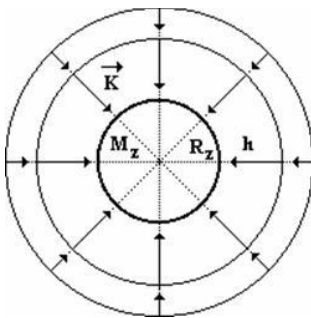
- velikost intenzity tohoto pole klesá s druhou mocninou vzdálenosti od středu
- nachází se v blízkosti každého stejnorodého tělesa, které má tvar koule a rovněž v okolí hmotného bodu; je prostorově neohrazené
- např. gravitační pole Země

**HOMOGENNÍ** – ve všech místech má gravitační síla/zrychlení stejný směr i velikost

- např. malý prostor při povrchu Země -> velmi malé odchylky



homogenní gravitační pole



radiální gravitační pole

## Maturitní otázka č. 8 – Pohyby těles v gravitačním poli

Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země jsou všechny pohyby při povrchu Země, jejichž délky a výšky jsou zanedbatelné v porovnání s rozměry Země. Na tělesa působí tíhová síla  $F_G$ , která vyvolává tíhové zrychlení.

### Slunce

Nejbližší hvězda, vzdálená 150 mil. km (= 1 AU, astronomická jednotka).

### Gravitační pole Slunce

Mnohonásobně silnější než gravitační pole Země (téměř 28x  $\rightarrow$  280 m.s<sup>-2</sup>).

Centrální, pohybuje se v něm mnoho různých těles (planety, měsíce, planetky, komety).

### Sluneční soustava

Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun

Nejmenší Merkur, největší Jupiter.

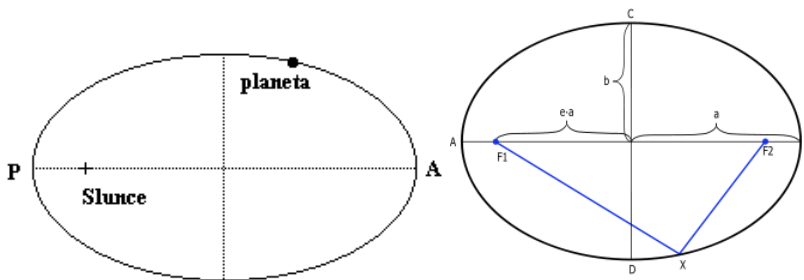
### Keplerovy zákony

Při formulaci využil tento německý astronom systematická a ve své době nejpřesnější měření Tycha de Brahe, kterému byl asistentem na dvoře Rudolfa II.

Platí nejen pro pohyby planet, ale obecně pro každou soustavu těles, která se pohybuje v centrálním gravitačním poli ústředního tělesa, jehož hmotnost je mnohonásobně větší než hmotnost obíhajících těles  $\rightarrow$  např. soustava umělých družic Země, soustava měsíců okolo Jupiteru.

#### 1. KEPLERŮV ZÁKON

„Planety se pohybují kolem Slunce po eliptických drahách s malou numerickou výstředností, v jejichž společném ohnisku je Slunce.“

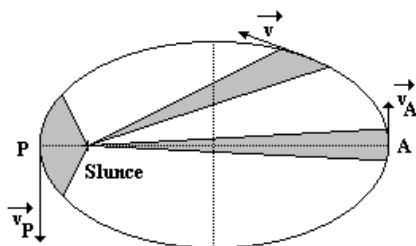


a... hlavní poloosa  
b... vedlejší poloosa  
F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>... ohniska  
e... excentrická vzdálenost  
$$\varepsilon = \frac{e}{a}$$

#### 2. KEPLERŮV ZÁKON

„Obsahy ploch opsaných průvodičem planety za jednotku času jsou konstantní.“

„Plošná rychlost planety je konstantní“



Planety se v perihéliu pohybují nejrychleji, v aféliu zase nejpomaleji.

Země prochází perihéliem v lednu, aféliem v červenci.

### 3. KEPLERŮV ZÁKON

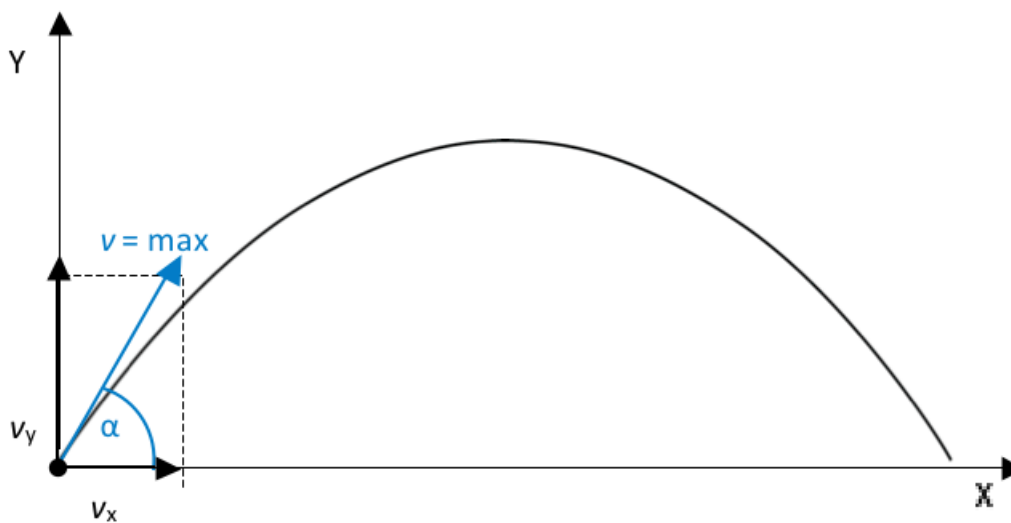
„Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin hlavních poloos jejich trajektorií.“

Považujeme-li trajektorie planet přibližně za kružnice, můžeme hlavní poloosy nahradit střední vzdáleností od Slunce.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

### Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země

Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země jsou pohyby těles v blízkosti povrchu Země, jejichž trajektorie jsou k rozměrům Země zanedbatelné. Většinou se uvažuje pouze působení tíhové síly (ostatní síly se zanedbávají – např. odpor vzduchu). V bezodporovém prostředí se bod pohybuje po parabole, v odporovém prostředí tzv. balistické křivce.



Vodorovný směr (ve směru x):

= rovnoměrný pohyb

$$v_{x(t)} = v_{0x} = v_0 \cos \alpha$$

$$x(t) = v_{0x} \cdot t = v_0 \cos \alpha \cdot t$$

Svislý směr (ve směru y):

= rovnoměrně zrychlený (resp. zpomalený) pohyb

$$v_{y(t)} = v_{0y} - gt = v_0 \sin \alpha - gt$$

$$y(t) = h + v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} gt^2 = h + v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} gt^2$$

### VOLNÝ PÁD

Volný pád je rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb s nulovou počáteční rychlostí.

$$v_0 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$h(t) = h - \frac{1}{2} gt^2 \quad \text{výška nad zemí v čase } t$$

$$s(t) = \frac{1}{2} gt^2 \quad \text{uražená dráha v čase } t$$

$$v(t) = gt \quad \text{rychlost v čase } t$$

$$t_d = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{doba dopadu}$$

Pokud je těleso vrženo větší počáteční rychlostí než 0, neboli **VRH SVISLÝ DOLŮ**:

$$v_0 \neq 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$h_{(t)} = h - (v_0 t + \frac{1}{2} g t^2) \quad \text{výška nad zemí v čase } t$$

$$s_{(t)} = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{uražená dráha v čase } t$$

$$v_{(t)} = v_0 + g t \quad \text{rychlost v čase } t$$

### VRH SVISLÝ VZHŮRU

Počáteční rychlost ( $v_0$ ) má směr svislý vzhůru tj. ve směru kolmém, neboli opačném než tíhové zrychlení  $g$ .

- Směrem vzhůru jde o pohyb rovnoměrně zpomalený, v nejvyšším bodě trajektorie se těleso na okamžik zastaví, potom se vrací volným pádem k zemi
- Doba pádu je stejná jako doba výstupu
- Těleso dopadá na zem stejně velkou rychlostí, jakou bylo vrženo

$$v_{(t)} = v_0 - g t \quad \text{rychlost v čase } t$$

$$y_{(t)} = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{uražená dráha v čase } t$$

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g} \quad \text{maximální výška}$$

$$t_h = \frac{v_0}{g} \quad \text{doba výstupu } (t_h = t_d)$$

### VRH VODORVNÝ

Počáteční rychlost má vodorovný směr.

- Trajektorie je část paraboly s vrcholem v místě vrhu.

$$x_{(t)} = v_0 t \quad \text{uražená vzdálenost ve směru } x \text{ v čase } t$$

$$y_{(t)} = h - \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{uražená vzdálenost ve směru } y \text{ v čase } t \text{ (viz volný pád)}$$

$$v_x = v_0 \quad \text{x-ová složka rychlosti}$$

$$v_y = g t \quad \text{y-ová složka rychlosti}$$

$$t_d = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{doba dopadu}$$

$$d = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{vzdálenost dopadu}$$

### VRH ŠIKMÝ VZHŮRU

Počáteční rychlost svírá s vodorovným úhlem tzv. **elevační úhel** ( $\alpha$ ).

- Výslednou trajektorii je **parabola**, jejíž vrchol je v nejvyšším bodě trajektorie.
- Ve vzduchu se těleso díky odporovým silám pohybuje po nesouměrné balistické křivce.

$$x_{(t)} = v_0 \cos \alpha \cdot t \quad \text{uražená vzdálenost ve směru } x \text{ v čase } t$$

$$y_{(t)} = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{uražená vzdálenost ve směru } y \text{ v čase } t \text{ (viz volný pád)}$$

$$v_x = v_0 \cos \alpha \quad \text{x-ová složka rychlosti}$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - g t \quad \text{y-ová složka rychlosti}$$

$$t_d = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \quad \text{doba dopadu}$$

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad \text{maximální výška}$$

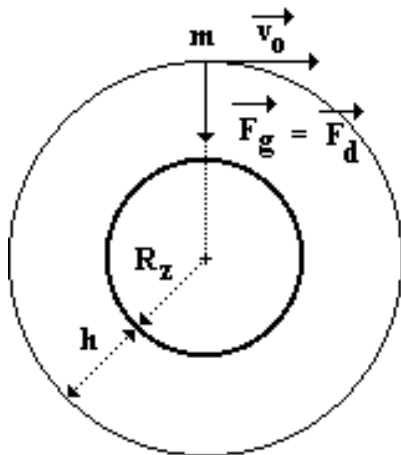
$$d = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad \text{vzdálenost dopadu}$$

### Pohyby těles v radiálním gravitačním poli Země

Platí Newtonův gravitační zákon (resp. obecná teorie relativity)

**Kruhá rychlost** je rychlost, při které těleso opisuje kružnici se středem ve středu Země ( $v_k$ ). Velikost kruhové rychlosti závisí na výšce tělesa nad povrchem Země  $\rightarrow$  s rostoucí výškou (tzn. s rostoucím poloměrem kružnice) se kruhá rychlost zmenšuje.

Příklad – obíhající satelit kolem Země



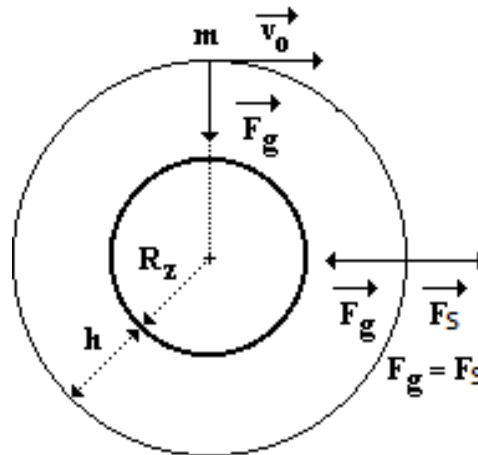
Ze Země – Inerciální soustava

$$F_d = F_g$$

$$m \cdot a_d = G \cdot \frac{m \cdot M_Z}{(R_Z + h)^2}$$

$$m \cdot \frac{v_k^2}{R_Z + h} = G \cdot \frac{m \cdot M_Z}{(R_Z + h)^2}$$

$$v_k = \sqrt{\frac{G \cdot M_Z}{R_Z + h}}$$



Z satelitu – Neinerciální soustava

$$F_s = F_g$$

$$m \cdot a_d = G \cdot \frac{m \cdot M_Z}{(R_Z + h)^2}$$

$$m \cdot \frac{v_k^2}{R_Z + h} = G \cdot \frac{m \cdot M_Z}{(R_Z + h)^2}$$

$$v_k = \sqrt{\frac{G \cdot M_Z}{R_Z + h}}$$

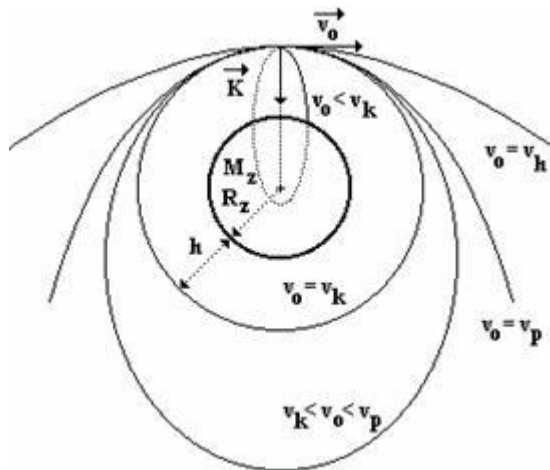
Pro  $h \rightarrow 0$ :

$$v_K = \sqrt{\frac{G \cdot M_Z}{R_Z}}$$

**První kosmická rychlost** je velikost kruhové rychlosti při povrchu Země  $\rightarrow v_1 = 7,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$   $T = 84,4 \text{ min}$

- Je-li tělesu udělena počáteční rychlost větší než rychlost kruhá, začne se pohybovat po elipse (se vzdálenějším ohniskem ve středu Země). Je-li naopak rychlost větší, těleso se pohybuje po elipse s bližším ohniskem ve středu Země.

**Stacionární družice** je taková družice, která obíhá kolem Země v rovině rovníku a její perioda je stejná jako perioda rotace Země.



- Bod na eliptické dráze, ve kterém má těleso nejmenší vzdálenost od Země se nazývá **perigeum**, opačný bod se nazývá **apogeum**
- Při zvětšování rychlosti se eliptická dráha protahuje, až se změní na **parabolickou**

**Úniková rychlost** je rychlost, při které se eliptická dráha změní na parabolickou ( $v_p$ ).

$$v_p = \sqrt{\frac{2\kappa \cdot M_Z}{R_Z + h}} = v_k \sqrt{2}$$

**Druhá kosmická rychlost** je velikost únikové rychlosti při povrchu Země  $\rightarrow v_2 = 11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

$\rightarrow$  Těleso uniká z oblasti gravitačního působení Země a stává se družicí Slunce

## Maturitní otázka č. 5 – Mechanika tuhého tělesa

**Tuhé těleso** je myšlenkový model ideálního tělesa, jehož tvar ani objem se účinkem libovolně velkých sil nemění. Je nedeformovatelné a můžeme ho nahradit soustavou hmotných bodů, jejichž vzájemné vzdálenosti se nemění.

Pohyby tuhého tělesa:

- posuvný pohyb (translace) – všechny body tělesa se pohybují po stejných, pouze navzájem posunutých trajektoriích stejnou rychlostí.
- otáčivý pohyb (rotace) – všechny body opisují soustředné kružnice kolem volné nebo nehybné osy. Čím dál bod od osy je, tím větší má rychlost. Všechny body ale mají stejnou úhlovou rychlost.
- složený

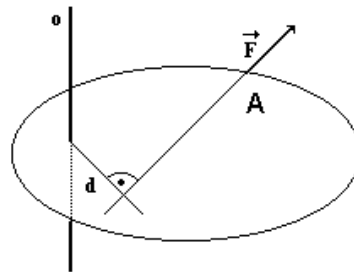
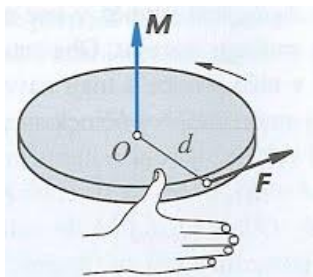
**Moment síly vzhledem k ose otáčení** je vektorová fyzikální veličina vyjadřující otáčivý účinek síly  $[\mathbf{M}] = \text{Nm}$ .

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r}$$

Velikost momentu síly je rovna součinu velikosti síly ( $F$ ) a kolmé vzdálenosti osy síly od osy otáčení (zn.  $r$  – rameno síly)

Otáčivé účinky sil působících na tuhé těleso otáčivé kolem nehybné osy se navzájem ruší, je-li vektorový součet momentů všech sil vzhledem k ose otáčení nulový. Pokud vektor síly prochází osou, nulový otáčivý účinek. Moment síly leží v ose otáčení a jeho směr určíme pomocí **pravidla pravé ruky**: „Položíme-li pravou ruku na těleso tak, aby prsty ukazovaly směr otáčení tělesa, pak vztyčený palec ukazuje směr momentu síly.“ Nebo pomocí vektorového součinu:

$$\vec{\mathbf{M}} = \vec{\mathbf{F}} \times \vec{\mathbf{r}}$$



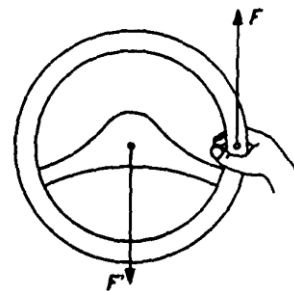
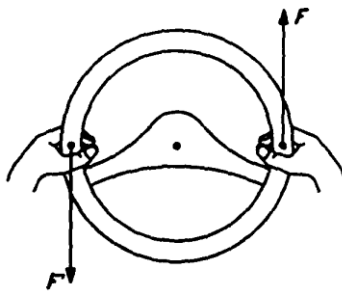
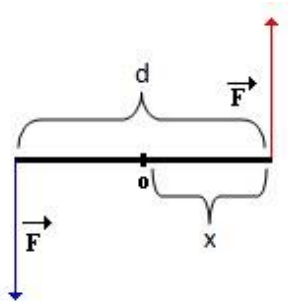
**Dvojice sil** jsou dvě stejně velké rovnoběžné síly opačného směru (např. volant u auta)

Výslednice těchto sil je nulová a síly tak na těleso nemají žádný posuvný účinek. Protože síly působí v různých místech, neruší se jejich momenty sil a mají otáčivé účinky

Velikost momentu dvojice sil ( $D$ ) je rovna součinu velikosti jedné síly a ramena dvojice

$$\mathbf{D} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d}$$

Moment dvojice sil je kolmý k rovině, v níž leží síly, a jeho směr určíme pomocí pravidla pravé ruky.

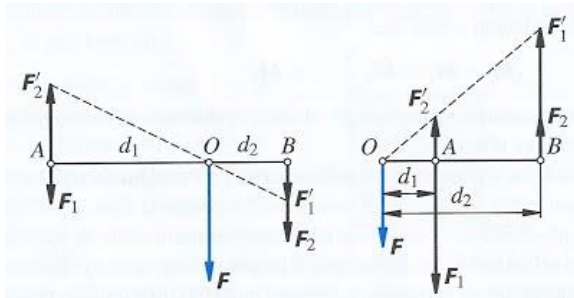
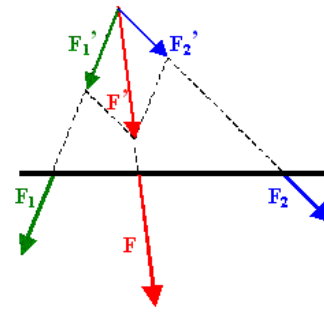


### Skládání sil

**Skládání sil** je nahrazování sil působících na tuhé těleso jedinou silou (tzv. výslednice sil), která má na těleso stejné účinky jako skládané síly.

**Rozklad sil** je postup, kterým se síla rozkládá na složky.

Vše řešíme doplňováním na rovnoběžník



Poččetně:

$$M_1 = M_2$$

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$r_1 + r_2 = r$$

### Těžiště tuhého tělesa

**Těžiště tuhého tělesa** je působíště tíhové síly působící na těleso v homogenním tíhovém poli

- Jeho poloha je dána rozložením látky v tělese
- Pokud má homogenní těleso střed/osu/rovinu souměrnosti, nachází se tam **těžiště**

Výpočet těžiště:

$$x_T = \frac{x_1 \cdot m_1 + x_2 \cdot m_2 + \dots + x_n \cdot m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

Platí i pro plochu a prostor, pros souřadnice  $y_T$ ,  $z_T$

Pokud je těleso složitější, počítá se těžiště pomocí integrálů.

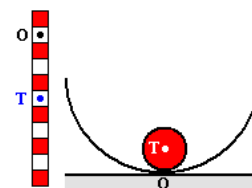
### Rovnovážná poloha tuhého tělesa

**Rovnovážná poloha tuhého tělesa** je výslednice všech sil, které na ně působí, i vektorový součet všech momentů těchto sil je rovný nule.

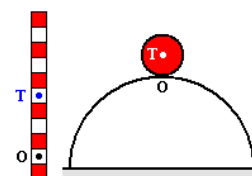
Pokud je výslednice sil nulová, nebo výsledný moment nulový, nachází se těleso v **rovnovážné poloze**.

Dělení:

- a. **stálá** (stabilní) – těleso se po vychýlení vrací zpět do rovnovážné polohy, výchylky se zmenšuje
- v této poloze má těleso **nejmenší** tíhovou potenciální energii, která se při vychýlení zvětšuje
  - např. kulička v důlku, těleso zavěšené nad těžištěm (těžiště i zavěšení leží na stejné těžnici)



- b. **vrátká** (labilní) – těleso se po vychýlení samo do rovnovážné polohy nevrátí, výchylka se zvětšuje
- v této poloze má těleso **největší** tíhovou potenciální energii, která se při vychýlení zmenšuje
  - např. kulička na kopci, těleso zavěšené pod těžištěm

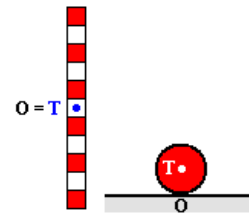




c. **volná** (indiferentní) – těleso po vychýlení zůstává v nové poloze, výchylka se nezvětšuje ani nezmenšuje → těleso je v nové rovnovážné poloze

- výška těžiště se při vychylování nemění → tíhová potenciální energie je **konstantní**

- např. kulička na vodorovné podložce

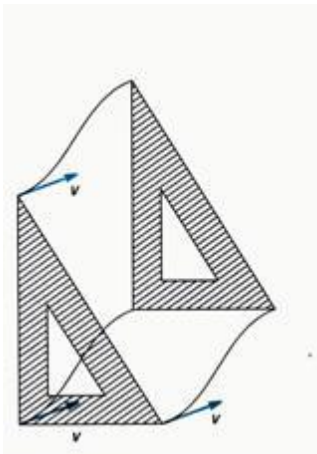


**Stabilita tělesa** je míra práce, kterou musíme vykonat, abychom těleso přemístili ze stálé rovnovážné polohy do polohy vratké. Čím větší je práce, tím stabilnější je daná poloha.

$$W = mg(h_2 - h_1)$$

## Energie tuhého tělesa

a) Posuvný pohyb

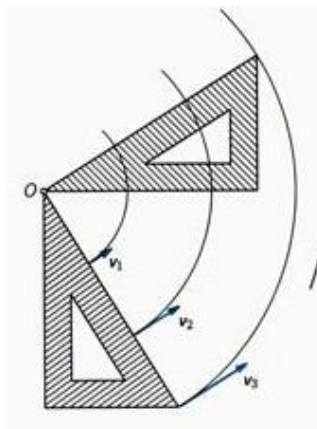


$$E_k = \frac{1}{2} m_1 v^2 + \frac{1}{2} m_2 v^2 + \dots + \frac{1}{2} m_n v^2 = \frac{1}{2} v^2 (m_1 + m_2 + \dots + m_n) \\ = \frac{1}{2} m v^2$$

$\vec{v}$  je konstantní

$m$  se mění

b) Rotační pohyb



$$E_k = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \dots + \frac{1}{2} m_n v_n^2 = \frac{1}{2} m_1 (\omega r_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\omega r_2)^2 + \\ \dots + \frac{1}{2} m_n (\omega r_n)^2 = \frac{1}{2} \omega^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2) = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$\vec{\omega}$  je konstantní, ale  $\vec{v}$  se mění

**Moment setrvačnosti tuhého tělesa vzhledem k ose otáčení** je fyzikální veličina která vystihuje, jak je rozložena hmota v tělese [ $J$ ] = **kg · m<sup>2</sup>**

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots + m_n r_n^2$$

Kinetická energie závisí na rozložení látky v tuhém tělese vzhledem k ose otáčení → to vyjadřuje fyzikální veličina **moment setrvačnosti tuhého tělesa vzhledem k ose otáčení**

Momenty setrvačnosti lze najít v tabulkách, nebo spočítat přes integrály.

**Setrvačnick** je těleso s velkým momentem setrvačnosti

Koná-li těleso současně posuvný a otáčivý pohyb kolem osy procházející těžištěm, je kinetická energie dána součtem posuvného a otáčivého pohybu

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} J \omega^2$$

## Maturitní otázka č. 6 – Mechanika tekutin

**Tekutiny** jsou látka, které nemají stálý tvar díky snadnému vzájemnému pohybu částic (→ jsou tekuté). Patří sem **kapaliny** a **plyny**.

**Ideální kapalina** je dokonale tekutá kapalina, bez vnitřního tření a je zcela nestlačitelná.

### Vlastnosti kapalin

Mají stálý objem ← velmi malá stlačitelnost ← odpudivé síly mezi molekulami.

Nemají vlastní tvar, odpovídá tvaru nádoby.

Vytvářejí vodorovnou hladinu.

### Tlak v kapalinách

**Tlak** je fyzikální veličina, jde o poměr síly působící na plochu a plochy  $[p] = \text{Pa}$ .

Vzniká nárazy částic tekutiny na stěny nádoby → tlaková síla (vždy působí kolmo na plochu).

$$p = \frac{F}{S}$$

## HYDROSTATIKA

**Hydrostatika** zkoumá podmínky rovnováhy kapalin a těles v nich ponořených (nepohybující se kapaliny).

Příčiny vzniku tlaku:

### A) Působením vnější tlakové síly

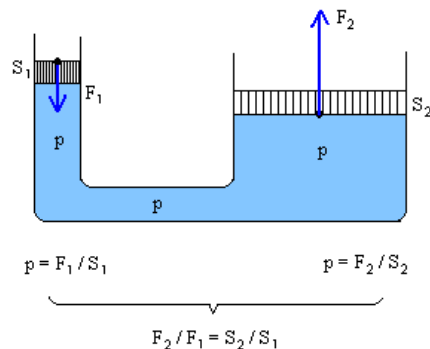
#### PASCALŮV ZÁKON

„Přírůstek tlaku způsobený působením vnější tlakové síly na kapalně těleso je ve všech místech kapalného tělesa stejný.“

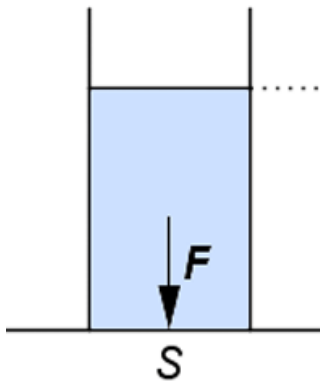
Tlak sám o sobě v kapalině není všude stejný (např. dole je větší), pouze přírůstek tlaku vyvolaný vnější silou je všude stejný

uplatňuje se v hydraulických zařízeních (lisech, brzdách)

Platí i pro vzduch → pneumatická kladiva a brzdy



### B) Vyvolaný tíhovým polem



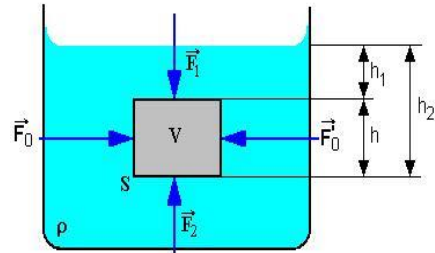
#### HYDROSTATICKÝ TLAK

$$F_t = mg = V\rho g = Sh\rho g$$
$$p = \frac{F_t}{S} = \frac{Sh\rho g}{S} = h\rho g$$

**ARCHIMÉDŮV ZÁKON**

„Velikost vztlačové síly, kterou je nadlehčováno těleso ponořené do kapaliny je rovna velikosti tíhy kapaliny o stejném objemu jako je ponořená část tělesa.“

- Na těleso působí:
- tíhová síla  $F_G = \rho_{\text{tělesa}} \cdot V \cdot g$
  - vztlačová síla  $F_{VZ} = \rho_{\text{kapaliny}} \cdot V \cdot g$



Vztlačová síla je způsobena rozdílem velikostí hydrostatických sil v různé hloubce kapaliny (**odtud odvození!!!**), a míří proti  $\vec{g}$

$$F_{VZ} = Sp_{h_2} - Sp_{h_1} = Sh_2\rho_k g - Sh_1\rho_k g = S\rho_k g(h_2 - h_1) = \rho_{\text{kapaliny}} \cdot V \cdot g$$

Výslednice těchto sil rozhoduje o chování tělesa:

- $\rho_t > \rho_k$  ( $F_G > F_{VZ}$ )... těleso klesá ke dnu
- $\rho_t = \rho_k$  ( $F_G = F_{VZ}$ )... těleso se volně vznáší v kapalině
- $\rho_t < \rho_k$  ( $F_G < F_{VZ}$ )... těleso stoupá k hladině, kde se ustálí tak, aby  $F_G$  a  $F_{VZ}$  byly v rovnováze → **plove**

Objem ponořené části tělesa a objem celého tělesa je ve stejném poměru jako  $\rho_t$  a  $\rho_k$

→ těleso se ponoří do kapaliny tím větší částí, čím je jeho hustota větší (nebo hustota kapaliny menší); na tomto principu jsou založeny *hustoměry*

**Atmosférická tlaková síla**

Je to síla, kterou působí atmosféra na tělesa v atmosféře.

Je způsobena tíhovou silou; tlak klesá exponenciálně s výškou (kvůli změně hustoty vzduchu s nadmořskou výškou, vzduch je totiž stlačitelný).

$p_n = 1013,15 \text{ hPa}$ , tzv. **normální tlak**

Způsoby měření tlaku: rtuťový tlakoměr, aneroid, barograf

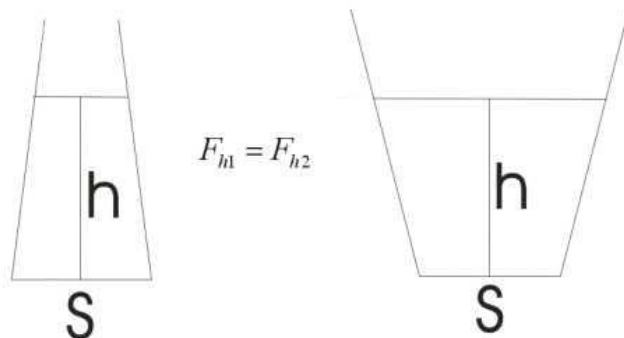
→ vztlačová síla působí i ve vzduchu → vznášení balónů a vzducholodí

**HYDROSTATICKÝ PARADOX**

Výsledkem působení tíhové síly na částice kapaliny je *hydrostatická tlaková síla* ( $F_h$ ).

Tou působí kapalina nejen na dno a stěny nádoby, ale také na pevná tělesa ponořená do kapaliny. Velikost hydrostatické tlakové síly závisí na hustotě kapaliny, obsahu dna a na hloubce pod volným povrchem kapaliny.

$$F_h = p_h \cdot S = \rho \cdot h \cdot g \cdot S$$



**Hydrostatický paradox** je skutečnost, že velikost hydrostatické tlakové síly na dno nádoby nezávisí na objemu kapaliny.

- Rozdíl mezi tíhovou a tlakovou silou je způsoben reakcemi stěn nádoby (rozšiřující se nadlehčují, zužující se „tlačí dolů“).

$$F_h = mg = V\rho g = Sh\rho g$$

**Kapaliny různých hustot ve spojených nádobách**

- hydrostatické tlaky na společném rozhraní kapalin jsou stejné

$$(\rho_2 < \rho_1) \quad p_{h1} = p_{h2} \quad \rightarrow \quad h_1 \rho_1 g = h_2 \rho_2 g \quad \rightarrow \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{h_1}{h_2}$$

**HYDRODYNAMIKA**

**Hydrodynamika** zkoumá pohyb kapalin (proudění)

Druhy proudění:

**Proudění** je pohyb kapalin převážně v jednom směru.

a) **stacionární** (ustálené) – rychlost částic procházejících libovolným bodem je stálá

- Trajektorie částic proudící tekutiny při ustáleném proudění znázorňujeme **proudnicemi**

- **Proudnice** je myšlená čára, jejíž tečna v libovolném bodě má směr rychlosti pohybující se částice

- Proudnice se při ustáleném proudění nemohou protínat

b) **nestacionární** (neustálené) – rychlost částic procházejících libovolným bodem se s časem mění

**ROVNICE KONTINUITY**

Pro ustálené proudění kapaliny zavádíme veličinu objemový průtok  $[Q_v] = \text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$$Q_v = \frac{V}{t} = S \cdot v$$

**Objemový průtok** je objem kapaliny, která proteče průřezem trubice za daný čas

Objemový průtok je pro ideální kapalinu konstantní

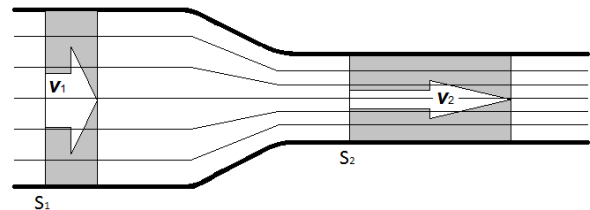
$(Q_v = Sv = \text{konst.}) \rightarrow$  **rovnice kontinuity**

$$V_1 = V_2$$

$$S_1 d_1 = S_2 d_2$$

$$S_1 v_1 t = S_2 v_2 t$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$



„Při ustáleném proudění ideální kapaliny je součin obsahu průřezu a rychlosti proudu v každém místě trubice stejný.“

→ při zmenšení průřezu trubice se zvětší rychlost proudění

**Vysvětlit!**

**BERNOULLIHO ROVNICE**

Tato rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny.

„Součet kinetické a tlakové potenciální energie kapaliny o jednotkovém objemu je ve všech částech vodorovné trubice konstantní.“

→ ve větším průřezu má kapalina menší rychlost, ale větší

tlak

ODVOZENÍ

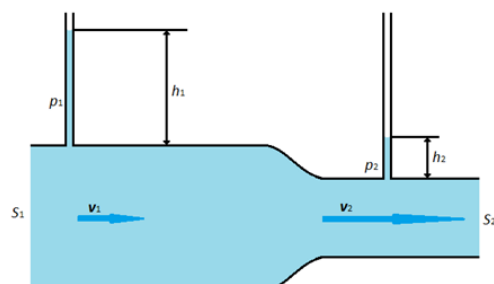
$$E_k + E_p = \text{konst.}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot v^2$$

$$E_p = W = F \cdot l = p \cdot S \cdot l = p \cdot V$$

$$\frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot v^2 + p \cdot V = \text{konst.}$$

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + p = \text{konst.}$$



$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{konst.}$$

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2$$

**Hydrodynamický paradox** - v zúžené části trubice se zvětšuje rychlost, ale klesá tlak → při dost vysoké rychlosti proudění vzniká podtlak; využití: rozprašovače, karburátory

**Výtoková rychlost** kapaliny, při vytékání z nádoby s hladinou ve výšce  $h$

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \rho gh$$

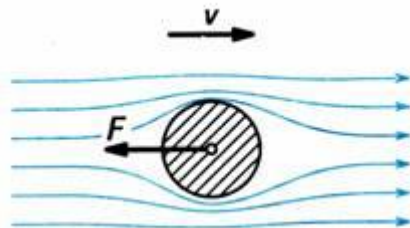
$$v = \sqrt{2gh}$$

### PROUDĚNÍ REÁLNÉ KAPALINY

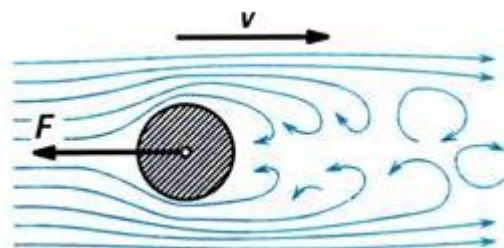
U ideální kapaliny jsme předpokládali, že rychlost částic kapaliny je ve všech místech průřezu stejná. Tak tomu při proudění reálné kapaliny není. Vrstva kapaliny, která se bezprostředně stýká se stěnami trubice (tzv. **mezní vrstva**) se v důsledku tření pohybuje nejmenší rychlostí nebo je v klidu. Po této vrstvě se malou rychlostí posouvá druhá vrstva a po ní další a další vrstvy se stále větší rychlostí. Největší rychlost mají částice kapaliny procházející středem průřezu

Dělení proudění reálných kapalin:

a) laminární proudění – trajektorie částic kapaliny jsou rovnoběžné; při nízkých rychlostech proudění



b) turbulentní proudění – částice kapaliny procházejí mezi různými vrstvami; při vyšších rychlostech



### OBTĚKÁNÍ TĚLES REÁLNOU KAPALNOU

Při vzájemném pohybu tělesa a tekutiny vznikají odporové (třecí) síly, které působí proti pohybu.

Velikost odporových sil závisí na:

a) tvaru tělesa – největší odpor: tělesa tvaru duté polokoule (padák)

– nejmenší odpor: tělesa aerodynamického tvaru (u letadel, lodí), (**až 1000x větší rozdíl**)

b) rychlosti proudění – malé rychlosti: velikost odporové síly je přímo úměrná rychlosti

→ při laminárním proudění lze pro popis odporové síly pro těleso tvaru koule použít

tzv. **Stokesův vztah**:  $F = 6\pi\eta r v$

v... rychlost obtékání,  $r$  ... poloměr koule,  $\eta$  ... dynamická viskozita (vnitřní tření)

- vyšší rychlosti: velikost odporové síly roste s druhou mocninou rychlosti
- při turbulentním proudění lze pro popis odporové síly použít

tzv. **Newtonův vztah**:  $F = \frac{1}{2} C S \rho V^2$

$\rho$  ... hustota kapaliny,  $S$  ... obsah kolmého průřezu tělesa,  $C$  ... součinitel odporu

- nadzvukové rychlosti – velikost odporové síly roste s třetí mocninou rychlosti

c) **hustotě kapaliny**

## Maturitní otázka č. 8 – Základní poznatky molekulové fyziky

**Molekulová fyzika** zkoumá makroskopické vlastnosti a chování látek na základě:

- Jejich makroskopické molekulární nebo atomové struktury
- Neustálého pohybu molekul
- Vzájemného působení molekul, atomů nebo iontů

Molekulová fyzika používá při popisu chování soustav skládajících se z velkého počtu částic (molekul, iontů, atomů) statistické metody

**Kinetická teorie látek** vysvětluje makroskopické vlastnosti látek na základě představ, že:

- Látka kteréhokoliv skupenství je složena z částic (atomů, molekul nebo iontů);
- Částice se v plynech a kapalinách neuspořádaně a nepřetržitě pohybují, v pevných látkách konají kmitavé pohyby; všechny tyto pohyby nazýváme **tepelný pohyb**;
- Tyto částice na sebe navzájem působí současně přitažlivými a odpudivými silami

Historicky nejstarší částí molekulové fyziky je **kinetická teorie plynů** (od poloviny 19. století), která vyústila postupně v kinetickou teorii látek a nakonec ve statistickou fyziku.

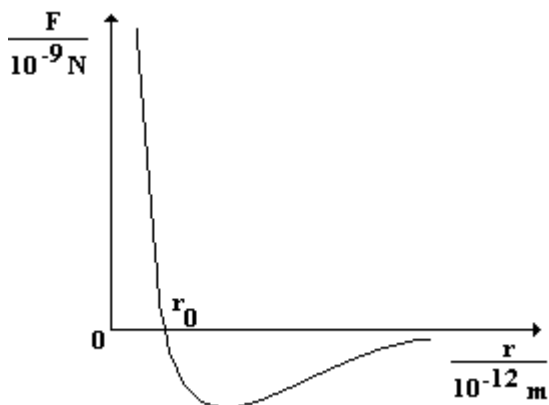
Představy kinetické teorie látek a plynů o částicovém složení látky vycházejí z experimentálních poznatků o Brownově pohybu, difuzi, chemických reakcích atd. S kinetickou teorií úzce souvisí také vysvětlení tlaku plynu, pochopení vnitřního tření v tekutinách, kapilárních jevů, vedení tepla atd.

**Brownův pohyb** je neustálý chaotický pohyb mikroskopických částic (o rozměru kolem 1 mikrometr) rozptýlených v tekutinách. Jeho příčinou jsou nepravidelné nárazy molekul tekutiny na částice.

**Difuze** je samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice druhé látky, přičemž dochází k postupnému vyrovnání hustot látek (např. mísení kapalin v klidu, pronikání vonných par do vzduchu apod.)

Vzájemné síly působící mezi atomy, ionty a molekulami, tzv. **mezimolekulární síly**, závisejí na povaze těchto částic a na jejich vzájemné vzdálenosti. Rozlišujeme dva hlavní druhy těchto sil:

- Přitažlivé síly  $\vec{F}_p$ , které mají značně delší dosah než odpudivé a nazývají se **kohezní síly**;
- Odpudivé síly  $\vec{F}_e$  mající původ hlavně ve vzájemném elektrostatickém odpuzování elektronových obalů vnějších elektronů.



Pro každou molekulu můžeme určit **vazebnou energii** molekuly  $E_v$ , která je rovna práci potřebné k rozrušení vazby mezi atomy a rozbití molekuly na jednotlivé atomy nebo menší molekuly.

## Struktura plynů, pevných látek a kapalin

Vlastnosti látek v určitém skupenství vyplývají:

- Z vlastností molekul, resp. atomů, které tvoří danou látku;
- Z velikosti kinetické energie neuspořádaného pohybu (tepelného pohybu) molekul;
- z velikosti potenciální energie vzájemné vazby molekul, atomů, resp. iontů, která závisí na velikosti přitažlivých sil a vzdálenosti mezi částicemi.

### Pevné látky

- Mají stálý tvar i objem, který se mění jen nepatrně vlivem teploty a působících sil;
- Molekuly konají kmitavý pohyb kolem neměnných rovnovážných poloh – tepelný pohyb;
- Molekuly jsou blízko sebe a působí mezi nimi silné přitažlivé síly;
- Molekuly jsou většinou uspořádány pravidelně.
- Celková vnitřní potenciální energie soustavy částic pevného tělesa je větší než celková vnitřní kinetická energie tepelného pohybu těchto částic.

Pevné látky se podle uspořádání molekul dělí na:

- **krystalické látky**, ve kterých molekuly vytvářejí pravidelnou krystalovou mřížku;
- **amorfní látky**, ve kterých neexistuje pravidelná struktura

### Kapaliny

- Nemají vlastní tvar, v silovém poli nabývají tvaru nádob;
- Jsou tekuté, mají vlastní objem, jenž se mění jen nepatrně vlivem teploty a tlaku;
- Molekuly konají tepelné kmity kolem rovnovážných poloh uvnitř objemu poskytovaného molekulou sousedními molekulami; rovnovážné polohy se s časem mění – molekuly se přemístí do vzdálenosti cca 0,1 mikrometru;
- Vzájemné přitažlivé síly mezi molekulami jsou menší než u pevných látek, nejsou ovšem zanedbatelné jako u plynů
- Částice vytvářejí krátkodobé shluky, kde jsou molekuly vázány a uspořádány pravidelně, přičemž se shluky vzájemně pohybují.
- U kapaliny daného objemu je celková vnitřní potenciální energie soustavy částic srovnatelná s celkovou vnitřní energií tepelného pohybu těchto částic.

### Plyny

- Nemají stálý tvar ani objem;
- Jsou velmi dobře stlačitelné;
- Molekuly se pohybují volně v celém objemu;
- Vzájemné přitažlivé síly jsou velmi malé díky velkým vzdálenostem mezi nimi
- Celková vnitřní potenciální energie je zanedbatelná oproti celkové vnitřní energii tepelného pohybu.

### Plazma

- Soustavy elektricky nabitých a neutrálních částic, ionizovaný plyn (např. plamen, blesk, 99% viditelné hmoty vesmíru)

**Stavové veličiny** – fyzikální veličiny, jimiž je určen stav soustavy (např. objem, teplota, tlak)



**Atomová hmotnostní konstanta**  $m_u$  = je  $\frac{1}{12}$  atomové hmotnosti nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$ .

$$m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

**Relativní molekulová hmotnost**  $M_r$  = je poměr průměrné hmotnosti molekuly  $m_m$  k  $\frac{1}{12}$  atomové hmotnosti  $m_u$  nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$ .

$$M_r = \frac{m_m}{m_u}$$

**Relativní atomová hmotnost**  $A_r$  = je poměr hmotnosti atomu  $m_a$  k  $\frac{1}{12}$  atomové hmotnosti  $m_u$  nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$ .

$$A_r = \frac{m_a}{m_u}$$

**Termodynamická soustava** = je těleso nebo skupina těles, jejichž fyzikální stav zkoumáme.

**Avogadrova konstanta**  $N_A$  = je číslo udávající počet atomů v 0,012 kg nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$ . Současně udává počet částic obsažených v jednom molu látky.

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

**Látkové množství**  $n$  = je jednotka vyjadřující množství částic v látce. Jednotka 1 mol udává počet atomů v 0,012 kg nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$ .

$$n = \frac{N}{N_A}$$

**Molární hmotnost**  $M_m$  = je hmotnost jednoho molu látky.

$$M_m = \frac{m}{n}$$

Vztah mezi molární hmotností  $M_m$  a hmotností molekuly  $m_m$  je:

$$M_m = N_A \cdot m_m$$

Pro hmotnost  $m$  chemicky stejnorodého tělesa platí:

$$m = N \cdot m_m = n \cdot N_A \cdot m_m$$

**Molární objem**  $V_m$  = je objem jednoho molu látky.

$$V_m = \frac{V}{n}$$

Pro všechny reálné plyny, které se při normálních podmínkách chovají jako ideální plyn, je molární objem  $V_m$  stejný a má hodnotu.

$$V_m = 22,4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \quad (22,7 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1})$$

**Rovnovážný stav** je takový stav termodynamické soustavy, ve kterém stavové veličiny dané soustavy:

1. jsou rovny odpovídajícím stavovým veličinám okolního prostředí
2. jsou ve všech místech soustavy stejné

**Teplota a její měření**

- **teplota** = označení tepelného stavu hmoty
- tělesům, která jsou při vzájemném styku v rovnovážném stavu, přiřazujeme stejnou teplotu
- k měření teploty používáme různé druhy teploměrů, které se liší účelem (pokojový, laboratorní, lékařský) i teploměrnou látkou nebo metodou měření (lihový, rtuťový, bimetalový)

**Celsiova teplotní stupnice** má dvě základní teploty – teplotu tuhnutí ( $0^{\circ}\text{C}$ ) a teplotu varu ( $100^{\circ}\text{C}$ )

**Termodynamická teplotní stupnice** má jednu základní teplotu-teplota trojného bodu vody ( $273,16\text{ K}$ ), *trojný bod vody = rovnovážný stav soustavy led, voda, sytá vodní pára*

**$0^{\circ}\text{C}$  ...  $273,15\text{ K}$ , ale rozdíl  $1^{\circ}\text{C}$  ... rozdíl  $1\text{ K}$**

## Maturitní otázka č. 9 – Vnitřní energie, práce, teplo

Vnitřní energie je součet :

1. Kinetické energie všech pohybujících se částic (mění se)
2. Potenciální energie vzájemné polohy částic (nemění se při termodynamických pokusech)
3. Vnitřní energie každé částice (nemění se při termodynamických pokusech)

$$[U] = J$$

Souvisí s částicovou strukturou tělesa a ovlivňuje vlastnosti a stav tělesa; např. vyšší kinetická energie se projevuje jako zvýšení teploty, vyšší polohová zase jako větší pevnost tělesa.

Mechanická energie je součet  $E_p$  a  $E_k$  tělesa, vnitřní energie je součet  $E_p$  a  $E_k$  částic.

Změna vnitřní energie může probíhat dvěma způsoby:

- konáním mechanické práce (tření)
- tepelnou výměnou

**Tepelná výměna** je děj, při němž neuspořádaně se pohybující částice teplejšího tělesa narážejí na částice chladnějšího tělesa a předávají jim část své energie; při tepelné výměně mezi tělesy jedné soustavy zůstává vnitřní energie této soustavy stálá.

*Tepelná výměna mezi tělesy může probíhat:*

- a. vedením – zahříváme-li jeden konec tělesa, postupně se zvyšuje teplota i na druhém konci, závisí to na tepelné vodivosti látek
- b. zářením – tělesa vyzařují nebo pohlcují elektromagnetické záření, např. záření ze Slunce
- c. prouděním – vzniká při pohybu kapalin nebo plynů; teplejší tekutiny mají menší hustotu a stoupají vzhůru, chladnější klesají dolů; např. proudění vzduchu, proudění vody v hrnci

**Teplo** je fyzikální veličina vyjadřující energii přijatou/odevzdanou při tepelné výměně. Je rovno změně vnitřní energie.  $[Q] = J$

$$Q = \Delta U$$

$$Q = mc\Delta t$$

### (Měrná) tepelná kapacita

Jestliže těleso při tepelné výměně přijme teplo ( $Q$ ), vzroste jeho vnitřní energie ( $\Delta U$ ) a pokud nedojde ke změně skupenství, zvýší se i jeho teplota ( $\Delta t$ ). Tento nárůst teploty je u různých látek různý a závisí na hmotnosti látky i materiálu.

Abychom popsali teplo přenášené při tepelné výměně, zavádíme dvě fyzikální veličiny:

**Tepelná kapacita tělesa** udává, jaké teplo je třeba dodat tělesu, aby se jeho teplota zvýšila o 1K resp. 1°C; charakterizuje každé těleso a závisí na hmotnosti a materiálu  $[C] = J \cdot K^{-1}$

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

**Měrná tepelná kapacita tělesa** udává, jaké teplo je třeba dodat tělesu o hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o 1K resp. o 1°C; závisí pouze na materiálu a skupenství; hodnoty této materiálové konstanty jsou uváděny v tabulkách  $[c] = J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}$$

**Směšovací kalorimetr** je dvouplášťová tepelně izolovaná nádoba s míchačkou a teploměrem, pomocí něj zkoumáme tepelnou výměnu

Při tepelné výměně platí zákon zachování energie, který vyjadřujeme kalorimetrickou rovnicí:

$$Q_{př.} = Q_{od.}$$

*„Teplo přijaté při tepelné výměně chladnějšími tělesy je rovno teplu odevzdanému teplejšími tělesy.“*

### První termodynamický zákon

*„Dodáme-li soustavě teplo  $Q$ , a vykonají-li na soustavě okolní tělesa práci  $W$ , vnitřní energie stoupne o  $\Delta U$ .“*

$$\Delta U = Q + W$$

*„Dodáme-li tělesu nějaké teplo, tak tato energie se rozloží mezi  $W'$  a  $\Delta U$ .“*

$$Q = \Delta U + W'$$

$W$ ...práce kterou dodáme

$W'$ ...práce kterou vykoná soustava

*„Neexistuje cyklicky pracující stroj, který by konal práci, ale nepřijímal energii, tzv. **Perpetuum mobile 1. druhu**“*

### Důsledky:

Jestliže  $Q > 0$  (soustava přijímá teplo) a  $W > 0$  (vnější síly konají práci), pak  $\Delta U > 0$  (vnitřní energie roste) → částice se pohybují rychleji, teplota stoupá

Jestliže  $Q < 0$  a  $W < 0$  (soustava koná práci), pak  $\Delta U < 0$  → částice se pohybují pomaleji, teplota klesá

Jestliže se během termodynamického děje nekoná práce pak je  $W = 0$  a  $\Delta U = Q$ , neboli vnitřní energie se mění pouze díky teplu. Jedná se o tepelnou výměnu.

### Kalorimetrická rovnice:

$$m_1 c_1 (T_1 - T) = m_2 c_2 (T - T_2)$$

(když počítáme i s kalorimetrem pak si musíme dávat pozor, na kterou stranu ho přiřazujeme, záleží na tom, jestli se ohřívá nebo ochlazuje)

## Maturitní otázka č. 10 – Ideální plyn

Ideální plyn je zjednodušený model reálných plynů, pro jehož částice platí:

- Rozměry částic ideálního plynu jsou ve srovnání se vzdálenostmi mezi nimi zanedbatelně malé, proto můžeme molekuly ideálního plynu považovat za hmotné body.
- Částice ideálního plynu na sebe (kromě srážek) nijak nepůsobí, díky tomu je polohová energie soustavy molekul nulová (vnitřní energie se rovná kinetické energii).
- Vzájemné srážky částic a jejich srážky se stěnami nádoby jsou dokonale pružné, celková kinetická energie se při srážkách nemění.

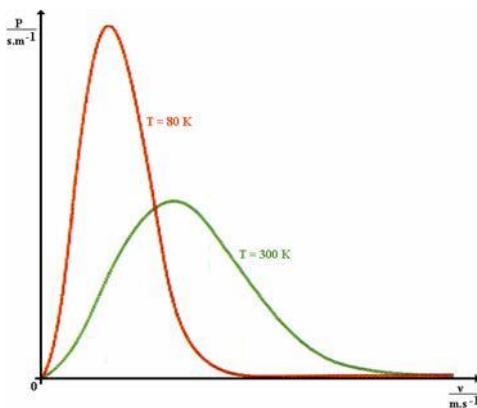
⇒ **důsledkem těchto vlastností je dokonalá stlačitelnost a dokonalá tekutost**

Reálný plyn můžeme považovat za ideální při vysokých teplotách a nízkých tlacích. Což splňují normální podmínky.

$$p = 1013,25 \text{ hPa}$$

$$T = 293,15 \text{ K}$$

### Rozdělení molekul plynu podle rychlosti



Změřit rychlost molekul umožňuje např. Lammertův pokus.

Toto rozdělení znázorňujeme Maxwellovou křivkou. Čím nižší teplota, tím je křivka vyšší a užší → její vrchol odpovídá menšímu rychlostem. Stejně jako rozdělení rychlostí molekul závisí na teplotě, závisí i na hmotnosti molekul (čím menší, tím se pohybují rychleji).

Svislá křivka je tzv. **rozdělovací funkce**.

**Nejpravděpodobnější rychlost  $v_p$**  je rychlost, kterou se pohybuje nejvíce molekul plynu (vrchol křivky).

**Střední kvadratická rychlost  $v_k$**  je rychlost, kterou by se musely pohybovat všechny molekuly plynu, **aby zůstala celková kinetická energie soustavy nezměněna**.

$$E_{k1} = E_{k2}$$

$$E_{k1} = N_1 \cdot \frac{1}{2} m_0 v_1^2 + N_2 \cdot \frac{1}{2} m_0 v_2^2 + \dots + N_n \cdot \frac{1}{2} m_0 v_n^2$$

$$N \cdot \frac{1}{2} m_0 v_k^2 = N_1 \cdot \frac{1}{2} m_0 v_1^2 + N_2 \cdot \frac{1}{2} m_0 v_2^2 + \dots + N_n \cdot \frac{1}{2} m_0 v_n^2$$

$$N \cdot \frac{1}{2} m_0 v_k^2 = \frac{1}{2} m_0 (N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_n v_n^2)$$

$$v_k^2 = \frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_n v_n^2}{N}$$

**Odvodit!!!**

Vztah mezi střední kvadratickou rychlostí a termodynamickou teplotou teoreticky dokázal anglický fyzik **J.C. Maxwell** a platí:

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

**Odvodit!!!**

...kde **k** je Boltzmannova konstanta (vyjadřuje množství energie potřebné k zahřátí jedné částice ideálního plynu o jeden kelvin), **m<sub>0</sub>** je hmotnost jedné molekuly

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Kinetická energie jedné molekuly**

$$E_0 = \frac{1}{2} m_0 v_k^2$$

$$E_0 = \frac{3}{2} kT$$

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_k^2$$

**Stavová rovnice ideálního plynu**

Vyjadřuje vztah mezi veličinami popisující ideální plyn v rovnovážném stavu.

Tyto veličiny jsou teplota, tlak, objem, počet molekul, hmotnost, látkové množství.

$$E_0 = E_0$$

$$\frac{1}{2} m_0 v_k^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$m_0 v_k^2 = 3kT$$

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_k^2 = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 \frac{3kT}{m_0} = \frac{N}{V} kT$$

$$pV = NkT \quad \text{První tvar}$$

$$N = n \cdot N_A$$

$$pV = nN_A kT$$

$$R_m = N_A \cdot k = 8,31 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ molární plynová konstanta}$$

$$pV = R_m nT \quad \text{Druhý tvar}$$

$$n = \frac{m}{M_m}$$

$$pV = \frac{m}{M_m} R_m T \quad \text{Třetí tvar}$$

Pokud zůstává konstantní i počet molekul  $N$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{Čtvrtý tvar}$$

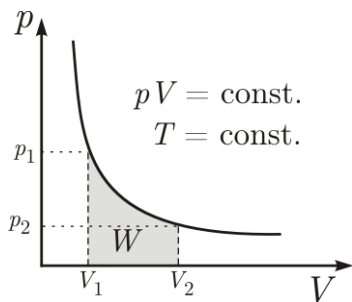
**Nová definice ideálního plynu** = plyn, pro který přesně platí stavová rovnice v některém z tvarů

**Izotermický děj**

$$T = \text{konst.}$$

$$pV = \text{konst.}$$

= děj, při němž je teplota plynu konstantní



Grafem izotermického děje v pV diagramu je větev hyperboly, kterou nazýváme **izoterma**

Ze změny stavové rovnice odvozujeme Boyle – Mariottův zákon:

„Při izotermickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je součin tlaku a objemu konstantní.“

### Energetické hledisko

$$T = \text{konst.}, U = E_k \Rightarrow U = \text{konst.} \quad (\Delta U = 0 \text{ J}) \quad Q = W'$$

Protože je teplota plynu stálá, je stálá i střední  $E_k$  molekul konajících neustálý neuspořádaný tepelný pohyb.

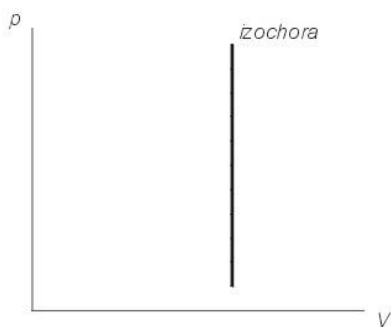
Protože jde o ideální plyn, je tato  $E_k = U$ . Při izotermickém ději je  $U$  ideálního plynu konstantní. Teplo přijaté při izotermickém ději se rovná práci, kterou při tomto ději plyn vykoná.

### Izochorický děj

$$V = \text{konst.}$$

$$\frac{p}{T} = \text{konst.}$$

= děj, při němž je objem plynu konstantní



Grafem izochorického děje v pV diagramu je přímka kolmá na osu x, kterou nazýváme **izochora**. Ze stavové rovnice odvozujeme

Charlesův zákon: „Při izochorickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je podíl tlaku a teploty konstantní.“

### Energetické hledisko

$$V = \text{konst.} \Rightarrow W = 0 \text{ J} \quad \Delta U = Q = mc_v \Delta t$$

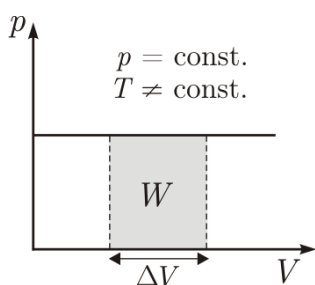
Protože je objem plynu stálý, nemůže plyn ani vnější síly konat mechanickou práci. Teplo přijaté při izochorickém ději se rovná přírůstku jeho vnitřní energie.

### Izobarický děj

$$p = \text{konst.}$$

$$\frac{V}{T} = \text{konst.}$$

= děj, při němž je tlak plynu konstantní



Grafem izobarického děje v pV diagramu je přímka rovnoběžná s osou x, kterou nazýváme **izobara**. Ze stavové rovnice odvozujeme Gay – Lussacův zákon: „Při izobarickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je podíl objemu a teploty konstantní.“

**Energetické hledisko**

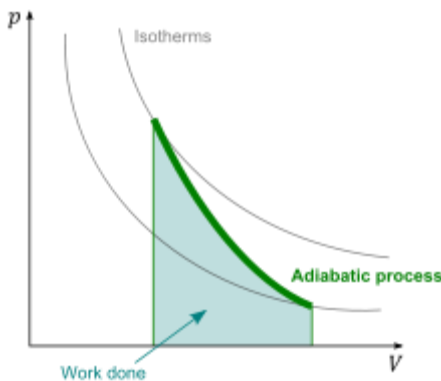
$$p = \text{konst.} \Rightarrow W' = p * \Delta V \quad (W' > 0 J) \quad \Delta U = Q_p - W'$$

Zvýšíme-li teplotu ideálního plynu stálé hmotnosti o stejnou hodnotu jako u izochorického děje, přijme plyn teplo. Aby se nezvýšil tlak, musí plyn zvětšit objem. Teplo přijaté ideálním plynem při izobarickém ději se rovná součtu přírůstku jeho vnitřní energie a práce, kterou plyn vykoná.

**Adiabatický děj**

$$pV^\kappa = \text{konst.}$$

= děj, při němž neprobíhá tepelná výměna mezi plynem a okolím



Grafem adiabatického děje v pV diagramu je křivka vždy klesající strměji než izoterma, kterou nazýváme **adiabata**. Adiabatický děj s ideálním plynem stálé hmotnosti popisuje Poissonův zákon: „Při adiabatickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je součin tlaku a objemu umocněného Poissonovou konstantou konstantní.“

Hodnota Poissonovy konstanty závisí na druhu plynu. Pro plyny s jednoatomovými molekulami je  $\kappa = 1,67$ ; s dvouatomovými je  $\kappa = 1,4$  a pro víceatomové plyny s klade obvykle  $\kappa = 1,33$ .

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v}$$

$$C_p = C_v + R$$

$$1 \text{ at.: } C_v = \frac{3}{2}R$$

$$2 \text{ at.: } C_v = \frac{5}{2}R$$

**Energetické hledisko**

$$Q = 0 J \quad \Rightarrow \quad \Delta U = W$$

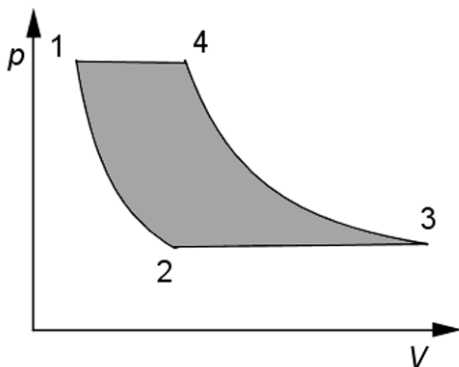
Při adiabatickém stlačování plyn přijímá práci, zvětšuje se jeho vnitřní energie a plyn se zahřívá (využití ve vznětových motorech). Při adiabatickém rozpínání plyn koná práci na úkor jeho vnitřní energie, čímž se ochlazuje.

Adiabatického děje dosáhneme při změně objemu plynu během velmi krátké doby.



**Kruhový děj**

= děj, při kterém se soustava dostává opět do výchozího stavu



Těleso, od kterého pracovní látka přijímá teplo  $Q_1$ , se nazývá **ohříváč**.

Těleso, kterému pracovní látka předává teplo  $Q_2$  ( $Q_2 < Q_1$ ), se nazývá **chladič**.

Pro celkové teplo  $Q$ , které pracovní látka přijme během jednoho cyklu, platí:  $Q = Q_1 - Q_2$

Na vykonání práce  $W'$  se zužitkuje pouze část tepla  $Q_1$  dodaného ohříváčem.

Pro posouzení míry využitého tepla dodaného ohříváčem zavádíme veličinu **účinnost kruhového děje**

$$\eta = \frac{W'}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (\%)$$

**2. Termodynamický zákon**

„*Neexistuje cyklický pracující stroj, který by pouze přijímal teplo od ohříváče a konal stejně velkou práci.*“

„*Nelze sestavit perpetuum mobile 2. druhu.*“

Má statistickou povahu

**Tepelné motory**

= zařízení, která přeměňjí část vnitřní energie paliva (uvolněného hořením) na energii mechanickou

Účinnost tepelného motoru je tím vyšší, čím vyšší je teplota ohříváče a čím nižší je teplota chladiče.

Dělení:

**1) Parní motory**

- parní stroj (historický)
- parní turbíny (elektrárny)

**2) Spalovací motory**

- zážehové (dvoudobé, čtyřdobé, Wankelovy)
- vznětové (větší účinnost, díky zahřívání vzduchu nejen spalováním, ale i kompresí)

**3) Raketové motory** – větší účinnost dosažena vyššími spalovacími teplotami

## Maturitní otázka č. 11 – **Struktura a vlastnosti pevných látek a kapalin**

### **Pevné látky**

Kinetická energie neuspořádaného pohybu částic je menší než potenciální energie (odpovídající molekulovým přitažlivým silám). Částice se udržují v určitých rovnovážných polohách, kolem kterých kmitají. Na rozdíl od kapalin se tyto rovnovážné polohy nepřemísťují.

### **Dělení pevných látek podle uspořádání částic**

**KRYSTALICKÉ** – jsou charakterizovány pravidelným (tzv. dalekodosahovým) uspořádáním částic

a) **monokrystaly** – rozložení částic se periodicky opakuje v celém krystalu

- **anizotropní** = fyzikální vlastnosti jsou závislé na směru vzhledem ke stavbě krystalu

*přirodní:* chlorid sodný, diamant, křemen

*umělé:* rubín, křemík, germanium

b) **polykrystaly** – jsou složeny z velkého množství drobných krystalů (tzv. zrn); uvnitř zrn jsou částice

- uspořádány pravidelně, ale vzájemná poloha zrn je náhodná

- **izotropní** = fyzikální vlastnosti těchto látek jsou ve všech směrech uvnitř krystalu

stejně; např.: *většina kovů, zemina*

**AMORFNÍ** – periodické uspořádání je omezeno na několik atomů ( $10^{-8}$  m → tzv. krátkodosahové), pro větší vzdálenosti je uspořádání částic náhodné

- většina amorfních látek je izotropních

např.: sklo, vosk, asfalt + polymery (dřevo, bavlna, bílkoviny, pryskyřice)

### **Krystalická mřížka a její poruchy**

K popisu geometrického uspořádání částic v krystalu používáme trojrozměrnou soustavu souřadnic, která tvoří geometrickou mřížku. Umístíme-li do základního rovnoběžnostěnu částice, dostaneme základní (elementární) mřížku. Seřazením velkého počtu základních buněk v prostoru vzniká ideální krystalová mřížka. Podle rozměru a tvaru základní buňky dělíme krystaly do tzv. krystalových soustav.

Reálné krystaly se od ideálních liší tím, že se v nich vyskytují určité poruchy:

#### **1. Bodové poruchy**

a. **vakance** – v krystalové mřížce chybí částice (uvolňuje se ozářením, chemickou reakcí)

b. **částice v intersticiální poloze** – tj. mezimřížkové; částice je zde navíc a mimo pravidelnou mřížku

c. **příměs** – v krystalu daného složení se vyskytuje cizí částice (v mřížce nebo mimo ní)

- příměsi významně ovlivňují fyzikální vlastnosti látek (např. oceli, polovodičů)

#### **2. Čárové poruchy (dislokace)**

- porušení pravidelného uspořádání částic v krystalové mřížce podél určité (tzv. dislokační) čáry

- díky těmto poruchám mají reálné krystaly jen 0,1% ideální pevnosti dokonalé krystalové struktury

→ při namáhání reálných krystalů se neporušují vazby mezi dvěma vrstvami najednou, ale jen postupně překonávají vazby mezi jednotlivými částicemi podél dislokační čáry

### **Deformace pevného tělesa**

Pevná tělesa mají za normálních podmínek stálý tvar. Změnu tvaru, rozměrů nebo objemu tělesa působením vnějších sil nazýváme deformace.

Podle doby trvání dělíme deformace na:

- a) pružné (elastické)** – trvá pouze po dobu působení vnějších sil (po ukončení působení se vrací zpět)  
**b) tvárné (plastické)** – přetrvává i po ukončení působení vnějších sil (trvalé)

Podle způsobu působení sil dělíme deformaci na:

- a) tahem** – dvě stejně velké síly ve směru ven z tělesa (objem tělesa se zvětšuje)  
**b) tlakem** – dvě stejně velké síly ve směru dovnitř tělesa (objem tělesa se zmenšuje)  
**c) ohybové** – síla působící kolmo k podélné ose tělesa podepřeného na koncích (např. kolejnice)  
**d) smykem** – na horní a dolní podstavu působí dvě stejně velké tečné síly (např. nýt, šroub)  
**e) kroucením** – na koncích tyče působí dvě silové dvojice se stejnými momenty, ale opačnými směry

Působením vnějších sil se zvětšují vzdálenosti mezi částicemi látky. To má za následek, že ve vzájemném působení převládají přitažlivé síly. Říkáme, že při pružné deformaci tahem vznikají v tělese **síly pružnosti**. Je-li pevné těleso deformováno tahem silami o velikosti  $F$ , je v rovnovážném stavu tělesa velikost síly pružnosti stejná s vnější silou.

V tělese tak vzniká stav napjatosti, který popisujeme veličinou **normálové napětí**  $[\sigma_n] = Pa$

$$\sigma_n = \frac{F_p}{S}$$

**Mez pružnosti** = největší hodnota normálového napětí (určená experimentálně), při kterém je deformace tlakem/tahem ještě pružná, překročením meze pružnosti nastává trvalá deformace  $[\sigma_E] = Pa$

**Mez pevnosti** = největší hodnota normálového napětí, při jejímž překročení se poruší soudržnost materiálu

Působením deformujících sil tahem dochází ke změně délky. Velikost této změny popisujeme pomocí:

$$\begin{array}{lll} \text{prodloužení:} & \Delta l = l - l_0 & [\Delta l] = m \\ \text{relativní prodloužení:} & \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} & [\varepsilon] = \% \end{array}$$

Z pokusů vyplývá Hookův zákon:

„Při pružné deformaci tahem je relativní prodloužení přímo úměrné normálovému napětí.“

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon$$

$E$  ... modul pružnosti v tahu;  $[E] = Pa$

### **Teplotní roztažnost pevných látek**

= jev, kdy se při změně teploty mění rozměry pevných těles

- např. mostní konstrukce, lana a dráty, písty motorů, potrubí

#### **teplotní DÉLKOVÁ roztažnost**

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

$\alpha$  = teplotní součinitel délkové roztažnosti;  $[\alpha] = K^{-1}$

Tento vztah platí: - u těles, kde jeden rozměr převyšuje ostatní (např. tyče)

- pro nepříliš velké rozdíly teplot
- při konstantním vnějším tlaku

#### **teplotní PLOŠNÁ roztažnost**

$$\Delta S \approx S_0 \cdot 2\alpha \cdot \Delta t$$

Tento vztah platí: - pro nepříliš velké rozdíly teplot

- při konstantním vnějším tlaku

**teplotní OBJEMOVÁ roztažnost**

$$\Delta V \approx V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta t$$

Tento vztah platí: - pro nepříliš velké rozdíly teplot  
- při konstantním vnějším tlaku

**Kapaliny****Povrchová vrstva kapaliny**

Experimenty dokázaly, že se povrch kapaliny chová jako tenká pružná blána. Molekuly kapaliny na sebe navzájem působí přitažlivými silami, jejichž velikost rychle klesá s jejich rostoucí vzájemnou vzdáleností. Kolem každé molekuly lze tedy opsat myšlenou kouli (tzv. **sféru molekulového působení**), o takovém poloměru  $r_m$ , aby síly kterými na tuto molekulu působí ostatní molekuly mimo tuto kouli, byly zanedbatelné.

**Povrchová vrstva** je vrstva molekul, jejichž vzdálenost od volného povrchu kapaliny je menší než poloměr  $r_m$  sféry molekulového působení; na každou molekulu ležící v povrchové vrstvě kapaliny působí sousední molekuly výslednou přitažlivou silou směřující do kapaliny.

Při posunutí molekuly z vnitřku do její povrchové vrstvy je nutné vykonat práci k překonání působící přitažlivé síly. Proto mají molekuly v této vrstvě větší potenciální energii. Tuto část energie „navíc“ nazýváme **povrchová energie**.

Síly směřující do kapaliny způsobují, že kapalina daného objemu nabývá takového tvaru, aby byl její povrch co nejmenší a tím byla i nejmenší povrchová energie. Tuto podmínku splňuje koule, a proto mají malé vodní kapky kulový tvar. Větší kapky bývají většinou deformovány tíhovou silou. Povrch kapaliny se díky těmto silám chová jako tenká pružná blána.

**Povrchová síla** je síla v každém bodě okraje kapaliny, která je výslednicí všech sil, kterými molekuly působí na okraj, má směr tečny v daném bodě kapaliny.

**Povrchové napětí** je veličina vyjadřující podíl velikosti povrchové síly ( $F$ ) a délky ( $l$ ) okraje povrchové blány, na který povrchová síla působí kolmo v povrchu kapaliny  $[\sigma] = N \cdot m^{-1}$

$$\sigma = \frac{F}{l}$$

**Jevy na rozhraní kapalin a pevných těles**

Zakřivení volného povrchu kapaliny vzniká díky vzájemnému působení mezi molekulami kapaliny, nádoby a vzduchu nad volným povrchem kapaliny. Pokud výsledná síla leží v povrchu nádoby, je povrch rovný.

V ostatních případech kapalina smáčí nebo nesmáčí stěny nádoby.

Pod zakřiveným povrchem kapaliny při stěnách nádoby v kapilárách, u kapek a bublin vzniká v kapalině přídavný tlak (tzv. **kapilární tlak**), který je způsobený pružností povrchové vrstvy. Pod dutým povrchem, je vnitřní tlak (ve srovnání s vodorovným povrchem) menší o kapilární tlak a u vypouklého povrchu naopak. U kulové bubliny kapilární tlak s klesajícím poloměrem roste.

Z měření i teoretického odvození vyplývá, že má-li povrch kapaliny tvar kulového vrchlíku (resp. koule jako např. u kapky) je kapilární tlak ( $p_k$ ) dán vztahem

$$p_k = \frac{2\sigma}{R}$$

Pro bublinu, která má povrchy dva platí

$$p_k = \frac{4\sigma}{R}$$

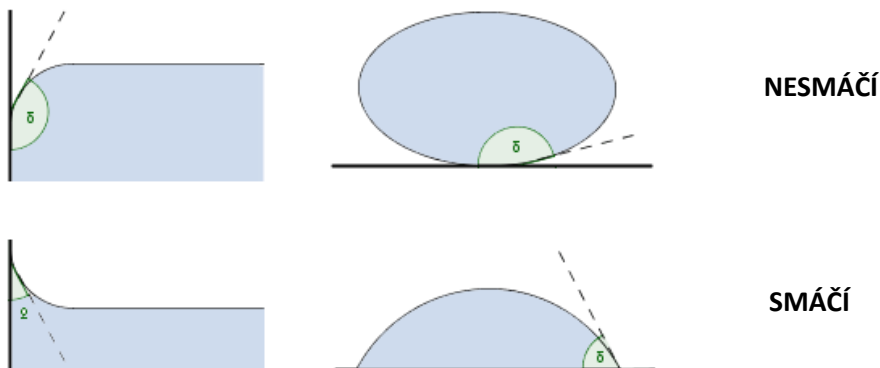
**stykový úhel** = úhel, který svírá kapalina s povrchem nádoby, zn.  $\vartheta$

A) kapalina **NESMÁČÍ STĚNY** nádoby

- výsledná síla směřuje do kapaliny
- povrch kapaliny u stěny je vypouklý (musí být kolmý na sílu)
- $\vartheta \in (\pi/2; \pi)$ ; pro úhel  $\pi$  tzv. dokonale nesmáčí
- rtuť ve skle

B) kapalina **SMÁČÍ STĚNY** nádoby

- výsledná síla směřuje ven z kapaliny
- povrch kapaliny u stěn je dutý (musí být kolmý na sílu)
- $\vartheta \in (0; \pi/2)$ ; pro úhel  $0^\circ$  tzv. dokonale smáčí
- např. voda, líh, rtuť v měděné nádobě



## Kapilární jevy

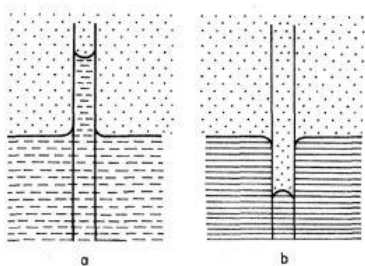
**Kapilární jevy** jsou jevy, které jsou úzce spojeny s existencí povrchového napětí kapaliny

jsou dobře pozorovatelné při ponoření úzké trubice malého vnitřního průměru (tzv. kapilára) do nádoby s kapalinou

v praxi např. schopnost vaty/knotu/půdy/betonu vstřebávat vlhkost

**obr. a** = kapalina smáčí stěny nádoby → vytvoří v trubici dutý vrchlík a vystoupí do výšky  $h$  nad volnou hladinou  
→ nastává **kapilární elevace**

**obr. b** = kapalina nesmáčí stěny nádoby → vytvoří v trubici vypouklý vrchlík a klesne do hloubky  $h'$  pod hladinou  
→ nastává **kapilární deprese**



Tyto změny výšky hladiny jsou způsobeny kapilárním tlakem. Těsně pod dutým povrchem je vnitřní tlak menší než těsně pod rovinným povrchem kapaliny v okolí kapiláry, a to o kapilární tlak. Proto kapalina vystoupí do takové výšky  $h$ , aby hydrostatický tlak odpovídající tomuto sloupci vyrovnal rozdíly vnitřních tlaků. U kapilární deprese je tomu naopak.

$$p_h = p_k$$

$$h\rho g = \frac{2\sigma}{R}$$

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$$

**Odvodit!!!**

**Teplotní objemová roztažnost**

Stejně jako pevné látky, tak i kapaliny se změnou teploty mění svůj objem. Tato změna je za stálých podmínek u různých kapalin různá. Pro nevelké teplotní rozdíly za stálého vnějšího tlaku platí

$$\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta t$$

$$V = V_0 + V_0 \cdot \beta \cdot \Delta t$$

$\beta$ ... součinitel teplotní objemové roztažnosti kapalin;  $[\beta] = K^{-1}$

Pro velké rozdíly teplot platí

$$V = V_0(1 + \beta_1 \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot \Delta t^2)$$

**Využití:** teploměry, termostatické ventily

Se změnou teploty kapaliny se mění také její hustota

$$\Delta \rho = \rho_0 \cdot \beta \cdot \Delta t$$

$$\rho = \rho_0 - \rho_0 \cdot \beta \cdot \Delta t$$

U většiny kapalin objem s rostoucí teplotou roste, hustota klesá. Jednou z mála výjimek je voda (→ tzv. **anomálie vody**): V teplotním intervalu **<0°C; 3,98°C>** je  $\beta$  záporný a objem se s rostoucí teplotou snižuje. Teprve při vyšších teplotách se začne chovat jako ostatní kapaliny a až při teplotě 8°C má stejný objem jako při 0°C. Tento jev se vysvětluje tím, že led při teplotě 0°C úplně neroztaje, takže ve vodě zůstávají drobné krystalky ledu. V nich jsou střední vzdálenosti molekul H<sub>2</sub>O větší, než je tomu v kapalném skupenství. Při zvětšování teploty v „anomálickém“ intervalu krystalky postupně mizí a vzdálenosti molekul se zmenšují. Při dalším zvětšování teploty na 3,98°C se střední vzdálenosti molekul již zvětšují, objem roste, hustota klesá. Anomálie vody umožňuje život vodních živočichů a rostlin v zimním období. Voda u dna rybníků a jezer má teplotu přibližně 4°C a tak nezamrzá.

## Maturitní otázka č. 12 – Změny skupenství látek

### Fázový diagram (pro H<sub>2</sub>O)

= v jednom grafu zakreslené

**křivka tání** – rovnovážné stavy pevné a kapalné fáze téže látky

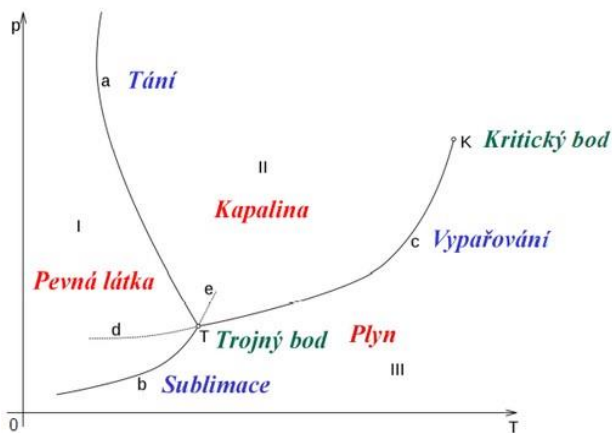
- graf závislosti teploty tání na vnějším tlaku
- začíná v bodě T a není ukončená
- normálně rostoucí, ale pokud je klesající (např. voda), tak při tání zvětšuje objem

**sublimační křivka** – rovnovážné stavy pevné látky a její syté páry

- graf závislosti tlaku syté páry na teplotě
- začíná v počátku soustavy souřadnic a končí v bodě A

**křivka syté páry** – rovnovážné stavy kapaliny a její syté páry

- graf závislosti tlaku syté páry na teplotě
- začíná v bodě T a končí kritickým bodem K
- čím dál jsme od křivky, tím více má plyn podobu ideálního plynu



Přechod z jedné oblasti fázového diagramu do druhé představuje vždy změnu skupenství.

**Trojný bod** = bod T (styk všech tří křivek)

- znázorňuje rovnovážný stav pevné, plynné a kapalné fáze látky
- teplota trojného bodu vody je základní teplotou termodynamické teplotní stupnice

**Přehřátá pára** = pára, která má nižší tlak a hustotu než sytá pára téže teploty.

- může vzniknout ze syté páry dvěma základními způsoby

a) dalším zahříváním syté páry bez přítomnosti její kapaliny (konstantní tlak)

b) zvětšením objemu syté páry bez přítomnosti její kapaliny (konstantní teplota)

**Kritický bod** = bod K

- bod, ve kterém zmizí rozhraní mezi kapalinou a její sytou párou
- obě mají stejnou hustotu

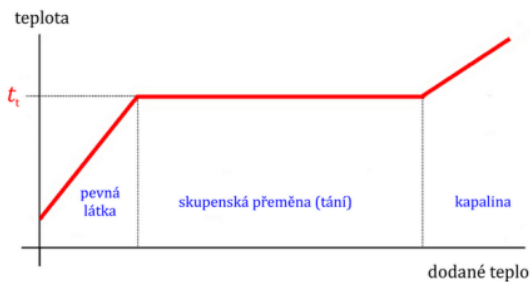
Má-li být plyn zkapalněn, je třeba ho ochladit pod kritickou teplotu. To lze provést dvěma způsoby:

- adiabatickým rozpínáním – u látek s vysokou kritickou teplotou (např. vodní páry, ether, chlor)
- prudké vypařování zkapalněných plynů – např. dusík

Možnost snižovat teplotu kapaliny vypařováním za sníženého tlaku se využívá v chladicích strojích (např. chladnička, mraznička, klimatizace). Chladicí látka se za nižšího tlaku vypařuje ve výparníku a při tom odebírá teplo (skupenské teplo vypařování) z chladicího prostoru. Na jiném místě látka kondenzuje za vyššího tlaku a odevzdává okolí skupenské teplo kondenzační.

## Tání

PEVNÁ LÁTKA → KAPALNÁ



<http://fyzikalnypokusy.cz/>

= při zahřívání krystalické látky se zvyšuje jeho teplota a po dosažení teploty tání  $t_t$  se pevná látka mění na kapalnou téže teploty.

$L_t$  ...skupenské teplo tání [ $L_t$ ] = J

= Teplo, které musíme dodat pevné látce zahřáté na teplotu tání, aby se zcela přeměnila na kapalinu téže teploty

$l_t$  ...měrné skupenské teplo tání [ $l_t$ ] = J · kg<sup>-1</sup>

$$l_t = \frac{L_t}{m}$$

Tání má jiný průběh pro krystalické a amorfní látky. Krystalické látky tají při určité teplotě tání, zatímco amorfní látky přecházejí do kapalného skupenství spojitě v určitém teplotním intervalu → nemají tedy teplotu tání, postupně měknou.



Závislost teploty tání na tlaku graficky znázorňujeme pomocí křivky tání. Každý bod této křivky znázorňuje rovnovážný stav mezi pevnou a kapalnou fází dané látky. Vždy začíná v bodě A, jemuž odpovídá nejmenší možný tlak, při kterém je ještě kapalina a pevná látka v rovnováze. V tabulkách se udávají normální teploty tání (tj. za normálního tlaku).

Většina krystalických látek při tání zvětšuje svůj objem. Jejich křivka tání má potom vzestupnou tendenci

Některé látky (např. led, bismut, germanium + některé slitiny) naopak při tání svůj objem zmenšují. Křivka tání je klesající.

## Tuhnutí

KAPALNÁ → PEVNÁ LÁTKA

Opak tání.

K tuhnutí dochází při ochlazení kapaliny na **teplotu tuhnutí** ( $t_t$  = teplota tání/tuhnutí).

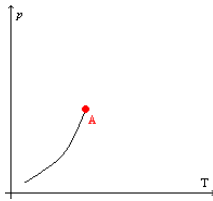
Po dosažení teploty tuhnutí se vlivem vazebných sil v kapalině vytvářejí krystalizační jádra. K nim se pak připojují a pravidelně se uspořádávají další částice → tento proces se nazývá **krystalizace**. Pokud při tuhnutí vznikne pouze jedno krystalizační jádro, vzniká monokrystal. Z více zárodků pak vznikají polykrystaly.



## Sublimace

PEVNÁ → PLYNNÁ

K sublimaci dochází při každé teplotě.



Sublimující látka v uzavřené nádobě sublimuje tak dlouho, až vytvoří rovnovážný stav mezi pevnou a plynnou fází → vzniká sytá pára. Závislost tlaku syté páry na teplotě udává **sublimační křivka**, která končí v bodě A, kde začíná křivka tání.

$L_s$  ...skupenské teplo sublimace [ $L_s$ ] = J

$l_s$  ...měrné skupenské teplo sublimace [ $l_s$ ] = J · kg<sup>-1</sup>

$$l_s = \frac{L_s}{m}$$

## Desublimace

PLYNNÁ → PEVNÁ

Opak sublimace. Např. vznik jinozatky, vznik krystalků jodu z jodových par.

## Vypařování

KAPALNÁ → PLYNNÁ

Vypařování z volného povrchu kapaliny **probíhá za každé teploty**.

$L_v$  ...skupenské teplo vypařování [ $L_v$ ] = J

$l_v$  ...měrné skupenské teplo vypařování [ $l_v$ ] = J · kg<sup>-1</sup>

$$l_v = \frac{L_v}{m}$$

**Var kapaliny** je děj, kdy se kapalina vypařuje nejen na volném povrchu, ale v celém svém objemu.

Teplota, při které (za daného vnějšího tlaku) nastává var kapaliny, se nazývá **teplota varu**  $t_v$ . Teplota varu je závislá na vnějším tlaku → s rostoucím tlakem se zvyšuje. Toho se využívá v technické praxi – tlakové hrnce pro sterilizaci, výroba papíru, příprava potravin; podtlakové nádoby pro výrobu sirupů, krystalového cukru  
Měrné skupenské teplo varu se rovná měrnému skupenskému teplu vypařování při teplotě varu kapaliny.

## Kondenzace = kapalnění

PLYNNÁ → KAPALNÁ

Opak Vypařování. Látka při tomto ději odevzdává svému okolí **skupenské teplo kondenzační**. **Měrné skupenské teplo kondenzační** je rovno měrnému skupenskému teplu vypařování téže látky při téže teplotě.

## Sytá pára

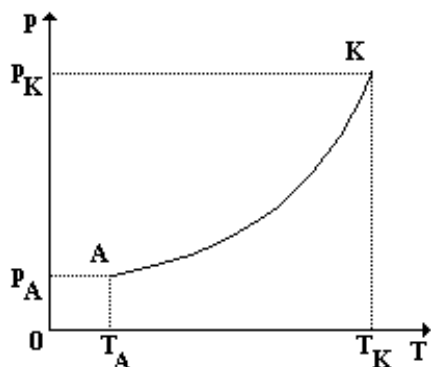
**Sytá pára** je pára, která je v rovnovážném stavu se svou kapalinou

V uzavřené nádobě je počet částic, které kapalinu opouštějí roven počtu částic, které se za stejný čas do kapaliny vrací. Tlak syté páry nezávisí při stálé teplotě na objemu páry → pro sytou páru neplatí stavová rovnice ideálního plynu. Při zvýšení teploty se vypaří větší část kapaliny → **vzrůstá hustota molekul syté páry** → roste tlak

**Křivka syté páry** je graf závislosti tlaku syté páry na teplotě.

Tato křivka je pro různé kapaliny různá a každý její bod odpovídá rovnovážnému stavu (určeného teplotou a

tlakem) mezi sytou párou a její kapalinou. Při varu je tlak syté páry přibližně roven vnějšímu tlaku → z křivky můžeme určit teplotu syté páry.



**Bod A** = nejmenší hodnota teploty ( $T_A$ ) a tlaku ( $p_A$ ), při kterých existuje kapalina a pára v rovnovážném stavu

- voda:  $T_A = 273,16 \text{ K}$        $p_A = 610 \text{ Pa}$

**Bod B** = tzv. **kritický bod** (→ znázorňuje kritický bod látky)

Po překročení kritického bodu již neexistuje látka v kapalně fázi; je určen kritickou teplotou ( $T_K$ ), tlakem ( $p_K$ ) a hustotou ( $\rho_K$ )

- voda:  $T_K = 647,3 \text{ K}$        $p_K = 22,13 \text{ MPa}$        $\rho_K = 315 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

### Vodní pára v atmosféře

Díky vypařování vody je v atmosféře Země vždy obsažena vodní pára. Množství vodní páry v atmosféře ovlivňuje četnost dešťových srážek i fyziologický pocit člověka a mění se v denní i roční době a místem na Zemi.

Hustotu vodní páry ve vzduchu za dané teploty nazýváme **absolutní vlhkost vzduchu** [ $\Phi$ ] =  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\Phi = \frac{m}{V}$$

Vodní pára ve vzduchu je zpravidla přehřátá. Stane-li se za určité teploty sytou párou (např. dalším vypařením vody, poklesem teploty), pak absolutní vlhkost vzduchu dosáhne za dané teploty maximální hodnoty ( $\Phi_m$  ...absolutní vlhkost syté páry). Ta je pak rovna hustotě syté vodní páry téže teploty.

Řada jevů, které souvisí s vlhkostí vzduchu, nezávisí na absolutní vlhkosti, ale na tom, jak se stav vodní páry ve vzduchu liší od stavu syté vodní páry → zavádíme **relativní vlhkost vzduchu** [ $\phi$ ] = %. Pro člověka a jeho zdraví je nejvhodnější relativní vlhkost 50 – 70%.

$$\phi = \frac{\Phi}{\Phi_m}$$

Klesne-li teplota vzduchu, aniž by se změnila absolutní vlhkost vzduchu, stane se při určité teplotě (tzv. **teplota rosného bodu** – zn.  $t_r$ ) vodní pára sytou a začne kapalnět → vznik rosy, mlhy a mraků. Je-li teplota rosného bodu menší než  $0^\circ\text{C}$ , vodní pára desublimuje → vznik jinovatky, sněhu

### Měření absolutní vlhkosti vzduchu

Vzduch necháme procházet hygroskopickou látkou (tzn. pohlcující vodní páru ze vzduchu, např.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) a zjistíme přírůstek její hmotnosti. Ten je pak roven hmotnosti vodní páry ve vzduchu.

### **Měření relativní vlhkosti vzduchu**

#### **a) vlasový vlhkoměr**

- využívá toho, že lidský vlas (zbavený tuku) mění se změnou vlhkosti svojí délku

#### **b) psychrometr**

- složen ze dvou teploměrů (suchý a vlhký) → na základě naměřených teplot určíme vlhkost
- užití: v meteorologických stanicích

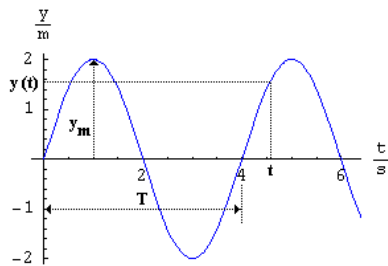
#### **c) hydrograf**

- zaznamenává relativní vlhkost vzduchu jako funkci času

## Maturitní otázka č. 13 – Kinematika kmitavého pohybu

### Mechanický pohyb

**Periodický pohyb** je pohyb, při němž se pohybový stav tělesa pravidelně opakuje, neboli pohyb složený ze stejných částí.



**Kmitavý pohyb** je periodický pohyb mechanických zařízení (např. těleso na pružině, kyvadlo, apod.), nebo-li pohyb průmětu bodu po ose x (resp. x), koná-li bod rovnoměrný pohyb po kružnici

**Oscilátor** je každé zařízení, které může volně kmitat (tj. bez vnějšího působení)

**Kmit** je periodicky se opakující část kmitavého pohybu

Charakteristické veličiny kmitavého pohybu:

**PERIODA** = doba, za kterou proběhne jeden kmit a pohybový stav oscilátoru se začne opakovat  $[T] = s$

**FREKVENCE** = počet kmitů, které proběhnou za 1 s  $[f] = Hz$

Platí vztah:  $f = \frac{1}{T}$

**Harmonický pohyb** vzniká tehdy, pokud se bod po kružnici pohybuje konstantně (pokud jde o rovnoměrný pohyb po kružnici) a pohyb průmětu bodu na ose y (resp. x) lze vyjádřit funkcí sinus.

### Kinematika kmitavého pohybu

Kmitavý pohyb popisujeme pomocí:

**Okamžitá výchylka** = při pohybu oscilátoru se periodicky mění ( $y$ )

**Amplituda** = největší hodnota výchylky ( $y_m$ )

**Úhlová frekvence**  $[\omega] = rad \cdot s^{-1}$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

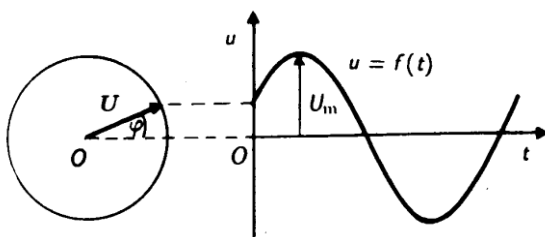
Závislost okamžité výchylky na čase lze u harmonicky kmitajícího oscilátoru vyjádřit vztahem:

$$y = y_m \cdot \sin \omega t$$

### Fázorový diagram

Kmitavé děje můžeme graficky znázorňovat jednak časovým a jednak fázorovým diagramem. Fázorový diagram využívá souvislosti mezi harmonickým kmitavým pohybem a rovnoměrným pohybem po kružnici.

Ve fázorovém diagramu je harmonické kmitání znázorněno vektorem (tzv. **fázor**), jehož velikost je rovna amplitudě, a který rotuje proti směru hodinových ručiček. Je vhodný zejména pro vyjádření fázových rozdílů dvou nebo více veličin, které mají stejnou úhlovou frekvenci.



Pokud na začátku měření prochází oscilátor rovnovážnou polohou ve směru kladné osy y → lze jeho okamžitou výchylku vyjádřit vztahem:

$$y = y_m \cdot \sin \omega t$$

Pokud oscilátor prošel touto polohou o čas ( $t_0$ ) dříve, má rovnice kmitavého pohybu tvar:

$$y = y_m \cdot \sin(\omega(t + t_0))$$

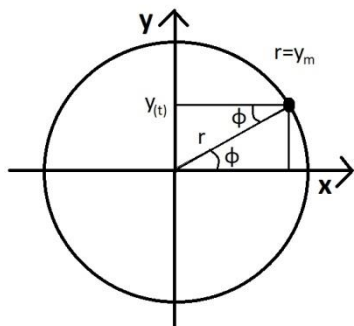
$$y = y_m \sin(\omega t + \omega t_0)$$

$$y = y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Kde  $\omega t + \varphi_0$  je fáze

$\varphi_0$  je počáteční fáze kmitavého pohybu; určuje hodnotu fáze v okamžiku, kdy začínáme měřit čas ( $t_0$ )

Takový pohyb znázorníme pomocí fázoru, který s kladnou osou  $x$  svírá úhel  $\varphi_0$ .



**Vysvětlit!!!**

Zvláštní význam mají případy, kdy je mezi dvěma harmonickými pohyby stejné frekvence fázorový rozdíl rovný:

a) **sudým násobkům  $\pi$**   $\rightarrow$  mají stejnou fázi

b) **lichým násobkům  $\pi$**   $\rightarrow$  mají opačnou fázi

### Rychlost a zrychlení kmitavého pohybu

Protože je kmitavý pohyb analogický s rovnoměrným pohybem po kružnici, můžeme z jejich souvislosti určit rychlost a zrychlení.

#### RYCHLOST

$$\cos \varphi = \frac{v}{v_k}$$

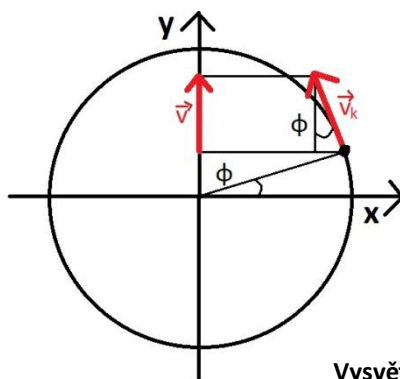
$$v = v_k \cdot \cos \varphi = v_k \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$v = \omega r$$

$$v_k = \omega y_m$$

$$v_y = \omega y_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$v = \frac{dy}{dt}$$



**Vysvětlit!!!**

#### ZRYCHLENÍ

Směr zrychlení je vždy opačný než směr okamžité výchylky.

$$\sin \varphi = \frac{a}{a_d}$$

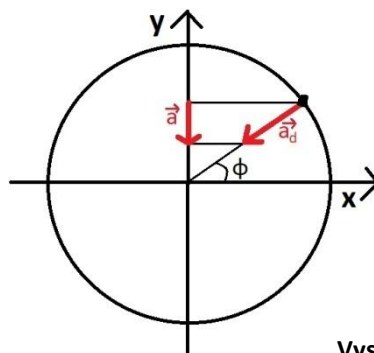
$$a = a_d \cdot \sin \varphi = a_d \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$a_d = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

$$a_d = -\omega^2 r \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$a_{dx} = -\omega^2 y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2}$$



**Vysvětlit!!!**

## Složené kmitání

Mechanický oscilátor nemusí konat pouze jeden kmitavý pohyb, ale může se pohybovat více kmitavými pohyby najednou. Vzniklé kmitání pak nazýváme **složené kmitání**. Při skládání kmitání v mechanice platí tzv. **princip superpozice**:

*„Výsledná poloha tělesa, které současně koná více pohybů, je stejná, jako kdyby tyto pohyby konalo po sobě v libovolném pořadí.“*

Koná-li hmotný bod současně několik harmonických pohybů téhož směru s okamžitými výchylkami  $y_1, y_2, \dots$ , okamžitá výchylka výsledného kmitání je rovna součtu výchylek:  $y = y_1 + y_2 + \dots + y_n$

Skládáním (neboli superpozicí) vzniká složené kmitání, jehož časový průběh závisí na charakteristikách jednotlivých složek ( $y_m, \Phi, v_0, \dots$ )

Nejjednodušším případem je skládání dvou harmonických pohybů, které probíhají v jedné přímce a jsou **izochronní** (tzn. mají stejnou úhlovou frekvenci  $\omega$ )

### V ČASOVÉM DIAGRAMU

Průběh kmitání určíme jako součty okamžitých výchylek v jednotlivých okamžicích kmitání

### VE FÁZOROVÉM DIAGRAMU

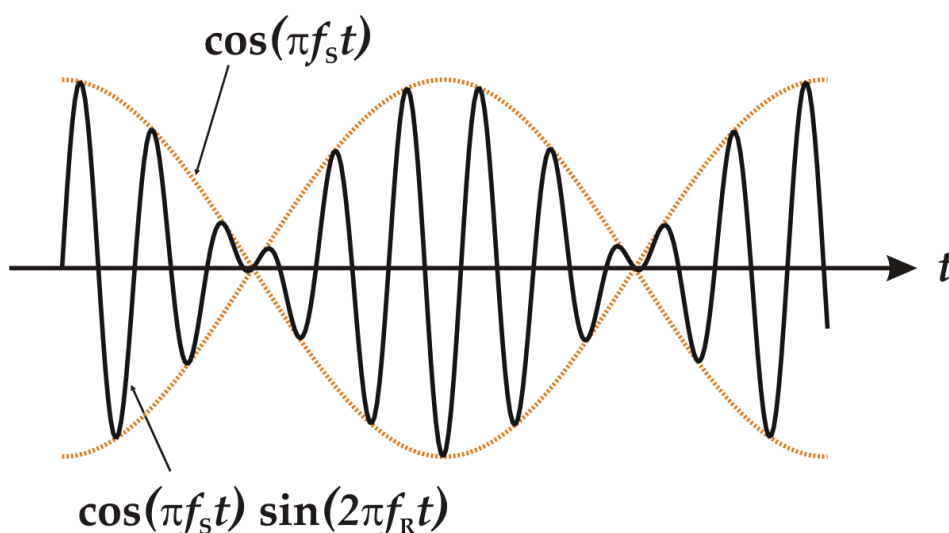
Ve většině případů je pro určení složeného kmitání výhodnější použít místo časových diagramů diagramy fázorové. Jedná-li se o izochronní kmity, určíme fázor výsledného kmitání jako vektorový součet fázorů složek.

- je-li fázový rozdíl izochronních kmitů  $\Delta\Phi = 0 \text{ rad}$  (počáteční fáze obou kmitavých pohybů je stejná), dosahuje amplituda ( $y_m$ ) výsledného kmitání hodnoty  $y_m = y_{m1} + y_{m2}$
- je-li fázový rozdíl izochronních kmitů  $\Delta\Phi = \pi \text{ rad}$  (počáteční fáze obou kmitavých pohybů je opačná), dosahuje amplituda výsledného kmitání hodnoty  $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$  a má stejnou počáteční fázi jako harmonický pohyb s větší amplitudou výchylky.
- je-li fázový rozdíl izochronních kmitů  $\Delta\Phi = \pi/2 \text{ rad}$ , určíme amplitudu výsledného kmitání a jeho počáteční fázi z vektorového rovnoběžníku (příp. Pythagorovou větou)

Kmitání stejné frekvence se při shodné počáteční fázi složek superpozicí zesilují a při opačné fázi se zeslabují popř. ruší. Superpozicí kmitání různých frekvencí vzniká složené kmitání, které není harmonické (časový průběh není vyjádřen  $\sin/\cos$ ).

Složením 2 harmonických kmitání vznikne kmitání **periodické**, a pokud bude stejná frekvence, bude navíc opět **harmonické**.

Při skládání kmitání blízkých frekvencí vznikají tzv. **rázy** – jde o kmitání, jehož amplituda se periodicky zvětšuje a zmenšuje. Jsou-li frekvence kmitavých pohybů stejné, rázy zaniknou – toho se využívá například při měření frekvence.



## Maturitní otázka č. 14 – Dynamika kmitavého pohybu

### Pružina

Čím více pružinu natahujeme, tím více síly k tomu potřebujeme.

$$F = -ky$$

**Mínus** proto, protože síla má vždy opačný směr než výchylka.

Tato síla je jediná, která se projeví, neprojevuje se tíhová síla!! (Stejně by to tedy fungovalo i v beztížném stavu)

$F$  síla pružiny

$k$  tuhost pružiny (závisí na materiálu)

$$F = -ky$$

$$ma = -ky$$

$$a = -\frac{ky}{m}$$

$$a = -\omega^2 y$$

$$-\frac{ky}{m} = -\omega^2 y$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

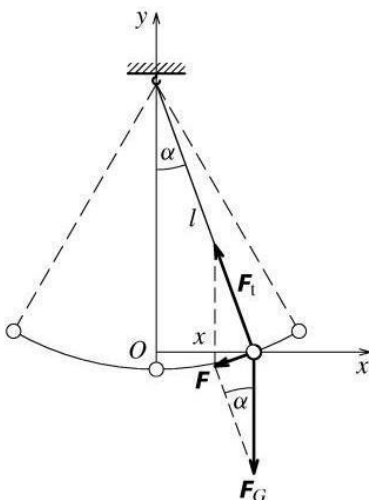
$\omega_0$ ,  $T_0$  a  $f_0$  jsou: **vlastní úhlová rychlost**, resp. **vlastní perioda**, resp. **vlastní frekvence**

**Odvodit!!!**

### Kyvadlo

**Matematické kyvadlo** je fyzikální abstrakce a jde o hmotný bod na nehmotném závěsu (ovšem pokud je hmotnost závaží mnohonásobně vyšší než hmotnost provázku, chová se tak i reálné kyvadlo).

Výchylka musí být do  $5^\circ$ .



x v obrázku naznačuje y

$$\frac{y}{l} = \frac{F}{F_G}$$

$$F = \frac{y}{l} \cdot F_G = \frac{y}{l} \cdot mg$$

$$ma = \frac{y}{l} \cdot mg$$

$$a = \frac{y}{l} \cdot g$$

$$a = \omega^2 y$$

$$\frac{y}{l} \cdot g = \omega^2 y$$

$$\omega^2 = \frac{g}{l} \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

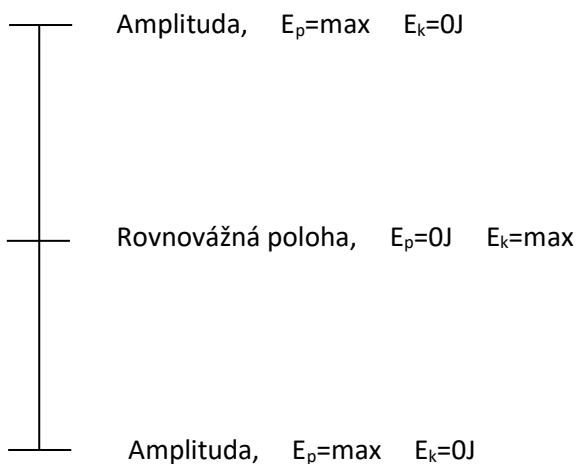
$\omega_0$ ,  $T_0$  a  $f_0$  jsou: **vlastní úhlová rychlost**, resp. **vlastní perioda**, resp. **vlastní frekvence**

**Odvodit!!!**

### Energie

Mění se pohybová energie na potenciální a naopak (pokud předpokládáme, že do procesu nevstupují žádné vnější síly, ve skutečnosti se totiž pružina zahřívá atd.)

$$E_p \Leftrightarrow E_k \quad E_p + E_k = \text{konstanta}$$



$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_p = W = \frac{1}{2} F s = \frac{1}{2} k y \cdot y = \frac{1}{2} k y^2$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k y^2$$

Pro rovnovážnou polohu platí:

$$E_k = \max \quad \cos(\omega t) = 1$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot y_m^2 \cdot \omega^2$$

Pro amplitudu platí:

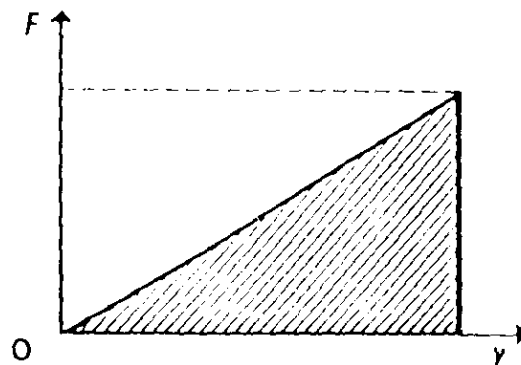
$$E_p = \max \quad \sin(\omega t) = 1$$

$$E_p = \frac{1}{2} k \cdot y_m^2$$

**Jde zároveň i o celkovou energii!!!**

$$E_{\text{celk}} = \frac{1}{2} k \cdot y_m^2 = \frac{1}{2} m \cdot y_m^2 \cdot \omega^2$$

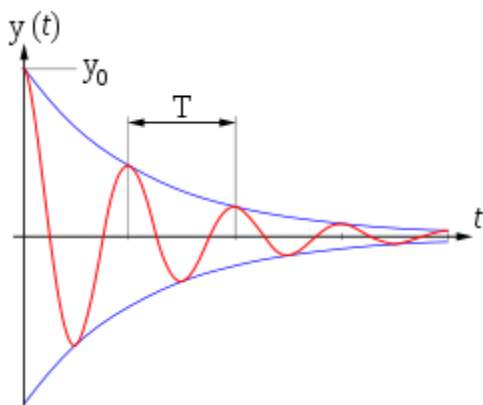
**Odvodit!!!**





## Tlumené kmitání

Reálný oscilátor nekmitá stejně, jelikož se část Energie přeměňuje. Snižuje se tak jeho amplituda.

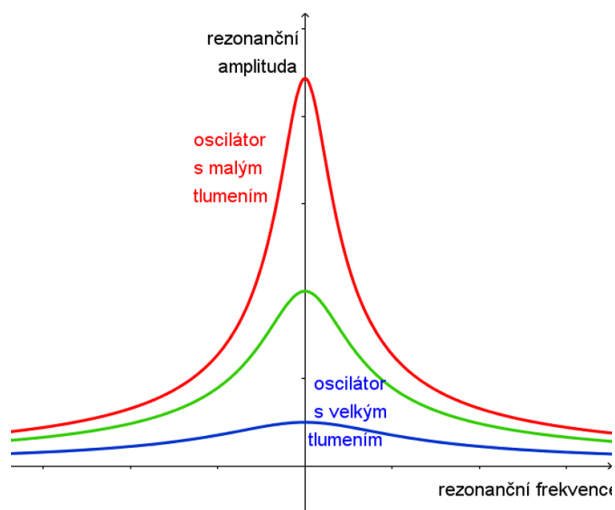


$$y = e^{-bt} \cdot y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$b$  ...logaritmický dekrement útlumu

Pokud bychom chtěli vytvořit stejné kmitání, musíme oscilátoru dodávat energii. Pokud energii přidáváme při amplitudě, výsledné kmitání nebude harmonické. Proto musíme působit harmonickou vnější silou, aby výsledné kmitání bylo opět harmonické, tzv. **nucené kmitání**.

Výsledný oscilátor kmitá se stejnou úhlovou rychlostí  $\omega$ , jakou má vnější síla. Pokud oscilátor kmitá vlastní úhlovou rychlostí  $\omega_0$ , tak můžeme pozorovat tzv. **rezonanci**.



Největší amplituda nastane tehdy, je-li  $\omega$  stejné jako  $\omega_0$ . Pokud je kmitání hodně tlumené, bude malá rezonance (používá se u hudebních nástrojů, aby hrál pouze jeden tón).

## Maturitní otázka č. 15 – Mechanické vlnění

**Mechanické vlnění** je děj, při němž se kmitavý pohyb šíří prostředím, které musí být pružné.

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších fyzikálních dějů; jako vlnění se šíří např. vzduch, světlo, zvuk, televize, apod. Vlnění je periodické v čase i v prostoru.

### POSTUPNÉ VLNĚNÍ

Vzniká ve všech skupenstvích látek, jeho příčinou je existence vazebných sil mezi částicemi prostředí, kterým se vlnění šíří (tzv. **pružné prostředí**).

Kmitání jedné částice se přenáší vazebnými silami na další částice a v důsledku toho **vlna prostupuje** řadou částic rychlostí  $v$  → dochází k přesunu energie (a také hybnosti) mezi částicemi prostředí.

Dělení: **a) příčné vlnění** = hmotné body kmitají kolmo na směr šíření

- např. struna upevněná na obou koncích

**b) podélné vlnění** = vlnění, při kterém částice pružného tělesa kmitají ve směru šíření vlnění

- např. postupné zhušťování a zředňování částic (vzduch) → tlaková vlna, vzduch

**Vlnová délka** je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

**Fázová rychlost vlnění** je rychlost, kterou se přemísťuje fáze vlnění tj. rychlost šíření vlnění  $[v] = \text{ms}^{-1}$

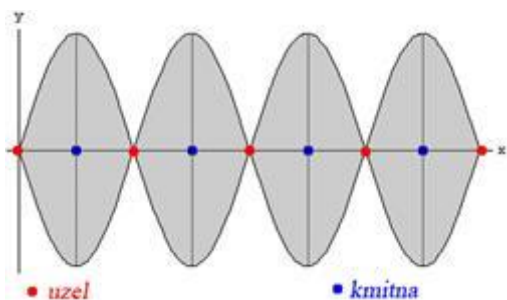
### STOJATÉ VLNĚNÍ

Vzniká složením (interferencí) přímého a odraženého vlnění, které má stejnou amplitudu i vlnovou délku. Jednotlivé body harmonicky kmitají se stejnou fází, ale s různými amplitudami výchylky (pro každý bod je amplituda konstantní) → **vlna neprostupuje** prostředím

**Uzly** jsou body, které jsou v klidu ( $y = 0$ )

**Kmitny** jsou body, v nichž vlnění dosahuje amplitudy výchylky

Vzdálenost dvou sousedních uzlů/kmiten je  $\lambda/2$ ; vzdálenost kmitny a sousedního uzlu je  $\lambda/4$

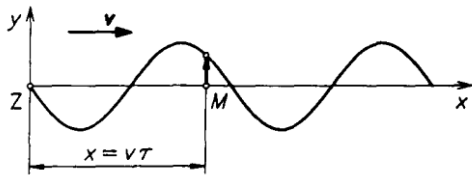


### Rovnice postupné vlny

**Rovnice postupné vlny** popisuje okamžitou výchylku v každém bodě řady oscilátorů v libovolném časovém okamžiku

Tuto rovnicí je popsáno vlnění, které se šíří homogenním prostředím z harmonicky kmitajícího zdroje a při němž nedochází ke ztrátám mechanické energie

Pokud vlnění postupuje záporným směrem, mění se znaménko fáze



$$y = y_m \cdot \sin \omega(t - \tau) \quad \tau = \frac{x}{v}$$

$$y = y_m \cdot \sin \omega(t - \frac{x}{v}) \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$y = y_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T}(t - \frac{x}{v})$$

$$y = y_m \cdot \sin(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{vT}) \quad v \cdot T = \lambda$$

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) \quad \text{ROVNICE POSTUPNÉ VLNY}$$

Okamžitá výchylka libovolného bodu prostředí závisí na:

- vzdálenosti  $x$  od zdroje vlnění
- čase  $t$

Do bodu M ve vzdálenosti  $x$  od zdroje vlnění Z dospěje vlnění za dobu  $\tau = \frac{x}{v} \rightarrow$  kmitání bodu M bude mít stejnou výchylku, jako měl zdroj o dobu  $\tau$  dříve

### Interference vlnění

Jestliže se pružným prostředím šíří dvě nebo více vlnění stejného druhu, dochází v místech, kde se vlnění překrývají, k jejich skládání neboli **interferenci**. Výsledný kmitavý pohyb hmotných bodů prostředí je určen superpozicí jednotlivých kmitání vyvolaných vlněními.

Různé případy interference vlnění jsou obecně složité. Nejjednodušší je interference vlnění o stejné vlnové délce a amplitudě postupujících stejnou fázovou rychlostí a stejným směrem.

Obě skládající se vlnění mají konstantní fázový rozdíl:  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_2 - x_1) \rightarrow \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d$

**Dráhový rozdíl vlnění** je vzdálenost dvou bodů, ve kterých mají obě vlnění stejnou fázi [ $d$ ] =  $m$

**Koherentní vlnění** jsou dvě a více vlnění, které mají konstantní fázový rozdíl (nezávislý na čase)

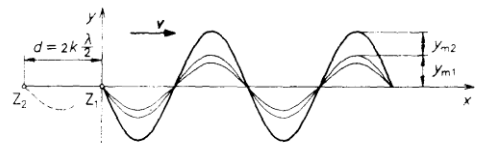
Výsledné kmitání bude mít stejnou vlnovou délku jako složky, ale různou amplitudu. Obecně je amplituda při interferenci největší v místech, kde se obě vlnění setkávají se stejnou fází a naopak nejmenší tam, kde mají obě vlnění opačnou fázi.

#### Speciální případy:

Dráhový rozdíl je roven **sudému počtu půlvln**:

- interferující vlnění se setkávají v každém bodě se stejnou fází a vzniká vlnění, jehož amplituda se rovná součtu amplitud složek

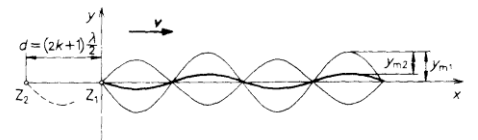
$\rightarrow$  vzniká interferenční maximum  $d = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$



Dráhový rozdíl je roven **lichému počtu půlvln**:

- interferující vlnění se setkávají v každém bodě s opačnou fází a navzájem se ruší

$\rightarrow$  vzniká interferenční minimum  $d = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

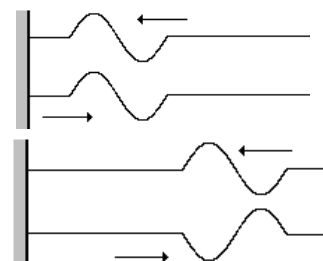


### Odraz vlnění v řadě bodů, stojaté vlnění

Postupuje-li vlnění řadou bodů a dospěje-li na konec této řady, nastává odraz vlnění a vlna se vrací zpět. Na konci může dojít ke dvěma „typům konce“ řady bodů:

1. pevný konec – dochází k odrazu vlnění s opačnou fází  
- pevný konec lze realizovat např. pomocí

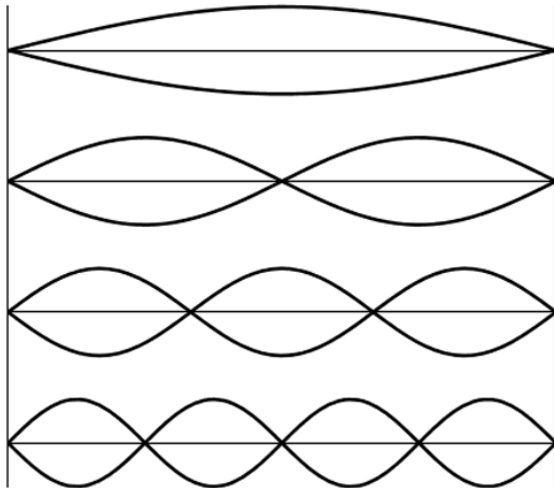
gumové hadice upevněné ke skobě ve zdi.



2. volný konec – dochází k odrazu se stejnou fází

- Volný konec lze realizovat např. volně visící dětské pružiny, volně visící lana, ...

**Stojaté vlnění** vzniká interferencí postupného přímého vlnění a vlnění odraženého od pevného konce daného prostředí

**Chvění soustav**

$$\lambda = 2l$$

$$f_Z = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} = 1 \cdot \frac{v}{2l}$$

$$\lambda = l$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{l} = 2 \cdot \frac{v}{2l}$$

$$\Rightarrow f_k = k \cdot f_Z$$

$$k = 2, 3, 4 \dots$$

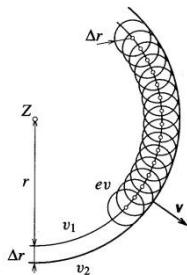
$f_Z$  základní frekvence

$f_k$  vyšší harmonická frekvence

Struna může kmitat několika tyto pohyby najednou -> pohyb bude hodně složitý -> **rozdíl mezi chvěním a kmitáním** (chvění je kmitání několika frekvencí najednou)

V akustice zastoupení těchto frekvencí tvoří **barvu tónu**.

**Výška tónu** je dána základní frekvencí.

**Huygensův princip**

Objasňuje mechanismus šíření vlnění v prostoru a vychází ze studia toho, jaký útvar mají vlnoplochy šířícího se vlnění v libovolném okamžiku. Každý bod vlnoplochy, o něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za nový zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří elementárních vlnoplochách všemi směry.

Tento princip byl formulován v roce 1678, umožňuje konstrukci vlnoplochy v určitém okamžiku, je-li známa její poloha a tvar v okamžiku předchozím, aniž bychom museli nutně znát polohu zdroje vlnění.

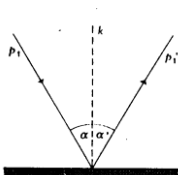
Využíváme ho pro vysvětlení šíření, lomu, a ohybu vlnění.

*„Každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch.“*

**Odraz vlnění**

Dopadá-li vlnění na rozhraní dvou prostředí, může se odrazit nebo projít do druhého prostředí. Při odrazu vlnění platí **zákon odrazu**: „Úhel odrazu se rovná úhlu dopadu. Odražený paprsek leží v rovině dopadu.“

**Rovina dopadu** je určena dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu.



## Lom vlnění

Lom se projevuje změnou směru, kterým se vlnění po průchodu rozhraním dvou prostředí šíří.

Platí Snellův zákon lomu: „Poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí konstantní a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.“

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

$n$  ... index lomu,  $\alpha$  ... úhel dopadu,  $\beta$  ... úhel lomu,  $v_1$  ... rychlost šíření v 1. prostředí,  $v_2$  ... rychlost šíření ve 2. prostředí  
Při lomu mohou nastat 2 situace:

1. **lom ke kolmici** ( $\alpha > \beta$ ) – pokud  $v_1 > v_2$
2. **lom od kolmice** ( $\alpha < \beta$ ) – pokud  $v_1 < v_2$

Uvažujme průchod světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího (lom od kolmice).

S rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu a při určitém, tzv. **mezním úhlu**  $\alpha_m$  bude  $\beta = 90^\circ$ . To je maximální úhel, při němž ještě nastává lom světla. Při větších úhlech dopadu lom světla nenastává a světlo se jen odráží. Nastává **úplný (totální) odraz**.

Zákon lomu se tady dá napsat ve tvaru:

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad \rightarrow \quad \sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$$

## Ohyb vlnění

Ohyb vlnění je děj, díky němuž vlnění z části proniká i do prostoru geometrického stínu za překážkou.

Ohybový jev je tím výraznější, čím je otvor v překážce při dané vzdálenosti od zdroje menší a čím je vlnová délka vlnění delší → ohyb je nejvýraznější v případě, kdy je rozměr překážky srovnatelný s vlnovou délkou vlnění.

Ohyb vlnění je tím menší, čím je menší vlnová délka.

## Zvuk

**Zvuk** je mechanické vlnění hmotného prostředí o frekvencích 16 – 16.10<sup>3</sup> Hz, které ve zdravém lidskémuchu vyvolává sluchový vjem

zvuk < 16 Hz ... **infrazvuk**

zvuk > 16.10<sup>3</sup> Hz ... **ultrazvuk**

Zvuk se přenáší v informační soustavě, která se skládá ze 3 základních částí: *zdroj, prostředí, přijímač*.

Fyzikální jevy týkajícími se zvuku se zabývá **akustika**.

### Zdroje zvuku

Zdrojem zvuku je chvění pružných těles. Zvuk se šíří jako postupné podélné vlnění a jeho rychlost šíření je v různých látkách různá. Prostředí zvuk zeslabuje (zmenšuje amplitudu) – tzv. pohlcování (absorpce) zvuku

Zvuk je ovlivněn jednak vlastnostmi zdroje, prostředím tak i vlastnostmi přijímače. Zvuk proto můžeme charakterizovat objektivními (výška/frekvence, hlasitost/energie) nebo subjektivními (barva) veličinami.

Sluchem rozlišujeme především zvuky *periodické (tóny) a neperiodické (ruchy)*

### Výška zvuku

Výška je ovlivněna jeho frekvencí. Jako základní tón v hudební akustice byl dohodou stanoven tón o frekvenci 440 Hz – tzv. komorní A

### Hlasitost a intenzita zvuku

Zvuková vlna představuje periodické stlačování a rozpínání pružného prostředí a tyto periodické změny tlaku

vzduchu vnímáme jako zvuky o různé hlasitosti. Citlivost běžného lidského ucha umožňuje vnímat tlakové změny od  $10^{-5}$  Pa ... **práh slyšení** až do  $10^2$  Pa ... **práh bolesti**

Objektivně hodnotíme hlasitost zvuků veličinou **intenzita zvuku – vlnění**  $I = \frac{P}{S}$

Pro vyjádření intenzity zvuku používáme logaritmickou stupnici s jednotkou decibel (dB)

### **Rychlost zvuku**

Zvukové vlnění se šíří konečnou fázovou rychlostí, která závisí na látce a na teplotě. Rychlost zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě určíme ze vztahu:  $v = 331,8 + 0,61 \cdot t$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]  $t(20^\circ C) \rightarrow v = 340 \frac{m}{s}$

V kapalinách a v pevných látkách se zvuk šíří rychleji.

## Maturitní otázka č. 17 – Elektrický náboj a elektrické pole

### Elektrický náboj

Při těsném styku některých těles (např. tření) se na jejich povrchu objevuje elektrický náboj – taková tělesa nazýváme elektricky nabitá (zelektrovaná).

**Elektrický náboj** je základní vlastností některých částic (podobně jako hmotnost). Elektron má náboj  $Q = -e$  a proton  $Q = e$ . Existují i částice, které tuto vlastnost nemají (např. neutron).

Velikost elektrického náboje popisuje fyzikální veličina **elektrický náboj**  $[Q] = C (A \cdot s)$

**1 coulomb** = elektrický náboj, který projde průřezem vodiče při elektrickém proudu 1 A během 1 s

Velikost elektrického náboje je vždy násobkem tzv. **elementárního náboje**  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$

### VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO NÁBOJE

Elektrický náboj je skalární veličinou.

Tělesa (částice) s **nulovým elektrickým nábojem** se nazývají **elektricky neutrálními tělesy**. Tělesa (částice) s **elektrickým nábojem** (říkáme o nich, že *nesou elektrický náboj*), se označují jako **nabitá tělesa**.

Elektrický náboj může mít kladnou nebo zápornou hodnotu. O tělesech nesoucích kladný náboj říkáme, že jsou **kladně nabitá**, a tělesa se záporným elektrickým nábojem označujeme jako **záporně nabitá**.

Síly působící mezi dvěma nabitými (nepohybujícími se) tělesy jsou **přitažlivé**, jestliže mají tělesa náboje s opačnými znaménky, a **odpudivé**, pokud mají tělesa náboje se shodnými znaménky. Tyto síly se označují jako **elektrostatické**. Pohybující se nabitá tělesa na sebe navíc působí **magnetickými silami**. Pohybující se elektrický náboj je popisován pomocí elektrického proudu.

Volba kladného a záporného náboje je dána pouze konvencí ještě před objevem elektronu, podle které byl směr elektrického proudu stanoven jako směr **od kladného pólu k zápornému**; tím pádem došlo k tomu, že elektronu byl posléze přisouzen záporný náboj.

Pokud se v tělese nachází více elektrických nábojů, je výsledný elektrický náboj tělesa roven algebraickému součtu elektrických nábojů jednotlivých částí, tzn. :

$$e_c = \sum_i e_i$$

kde  $e_i$  označuje elektrický náboj  $i$ -té části tělesa a  $e_c$  je jeho celkový elektrický náboj.

Některá tělesa mohou obsahovat nositele kladného i záporného náboje (často ve velkém množství), přičemž celková hodnota elektrického náboje takového tělesa může být nulová, tzn. těleso jako celek je elektricky neutrální. Přestože je celkový elektrický náboj tělesa nulový, bude i takové těleso působit na své okolí určitými elektrickými silami. Nebudou-li nositelé náboje rozptýleni po tělese rovnoměrně, bude se působení těchto sil projevat i v makroskopickém měřítku. Taková tělesa pak označujeme jako **polarizovaná**.

Při zkoumání makroskopických těles můžeme k popisu rozložení elektrických nábojů v tělese využít hustotu elektrického náboje. V některých případech však pro nás není rozložení náboje v tělese podstatné, a celé těleso můžeme nahradit tzv. **bodovým nábojem**. Pojem bodového náboje je analogií pojmu hmotného bodu v mechanice.

Při vzájemném působení (interakci) elektricky nabitých částic bylo zjištěno, že celkový elektrický náboj systému, v němž k interakci dochází se nemění, tzn. nedochází k samovolnému vzniku nebo zániku elektrického náboje. Celkové množství náboje v elektricky izolované soustavě tedy zůstává konstantní. Tato skutečnost se označuje jako **zákon zachování elektrického náboje**. Podle tohoto zákona nelze elektrický náboj vytvořit ani zničit, lze jej jen přemístit.

**zákon zachování elektrického náboje:** „V elektricky izolované soustavě těles je celkový elektrický náboj konstantní.“

Elektrické náboje, které se mohou volně pohybovat (např. ve vodičích), se označují jako **volné náboje**.

Elektricky nabitý atom se nazývá ion (kation jestliže atom přijde o elektrony a anion jestliže atom přijme elektrony).

Experimentálně bylo také prověřeno, že velikost elektrického náboje se při jeho pohybu nemění. Tím se elektrický náboj odlišuje např. od hmotnosti, která podle teorie relativity s rostoucí rychlostí vzrůstá. Říkáme, že velikost elektrického náboje zůstává invariantní při transformacích vztažné soustavy.

**vodiče** = látky, v nichž se částice s elektrickým nábojem snadno přemísťují

**izolanty** = *dielektrika* = látky, u nichž nedochází k přemísťování částic s elektrickým nábojem

**těleso elektricky neutrální** = obsahuje stejný počet rovnoměrně rozložených částic s kladným a záporným nábojem

**elektrostatická indukce** = jev, kdy jsou částice s kladným a záporným nábojem rozloženy v tělese nerovnoměrně

## Coulombův zákon

Zelektrovaná tělesa na sebe navzájem působí přitažlivými nebo odpuzivými silami. Díky elektrostatické indukci na sebe mohou působit přitažlivými silami i zelektrované těleso a těleso elektricky nenabitě. Protože příčinou těchto sil je elektrický náboj, nazýváme je **elektrické síly**.

Podobně jako v mechanice hmotný bod, zavádíme v elektrostatice pojem **bodový náboj** = představujeme se jej jako hmotný bod, jehož elektrický náboj je stejný jako náboj na zelektrovaném tělese. Toto přiblížení používáme tehdy, jsou-li rozměry zelektrovaných těles zanedbatelné v porovnání s jejich vzdáleností.

Velikost elektrické síly, kterou na sebe působí dva bodové náboje, popisuje **Coulombův zákon**: „Velikost  $F_e$  je přímo úměrná součinu velikostí nábojů  $Q_1$  a  $Q_2$  a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti. Náboje shodného znaménka se odpuzují, náboje opačného znaménka se přitahují.“

$$F_e = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

$k$  ... závisí na prostředí

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$$

$$k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

$\epsilon_0$  ... permitivita vakua ( $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^2$ )

$\epsilon_r$  ... relativní permitivita

## Elektrického pole

Vzájemné působení elektrických nábojů se uskutečňuje prostřednictvím elektrického pole. To je podobně jako gravitační pole jednou ze základních forem hmoty a charakterizuje jej fyzikální vektorová veličina **intenzita elektrického pole**  $[E] = \text{N} \cdot \text{C}^{-1} = \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$

Intenzita je definována jako podíl síly, která by v daném místě pole působila na bodový náboj o velikosti  $q$ .

Intenzita je **vektorová** fyzikální veličina stejného směru jako elektrická síla, která působí v daném místě pole na **kladný** bodový náboj.



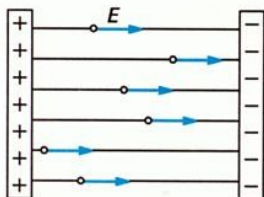
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$$

Pro velikost intenzity elektrického pole ve vzdálenosti  $r$  od osamocené bodové náboje  $q$ , platí z Coulombova zákona:

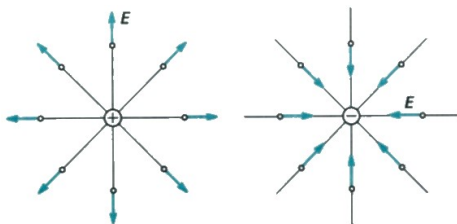
$$E = |\vec{E}| = \frac{|\vec{F}_e|}{|q|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{|Q \cdot q|}{|q| \cdot r^2} = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}$$

Má-li intenzita  $E$  ve všech místech pole stejný směr i velikost, jedná se o *homogenní pole*.

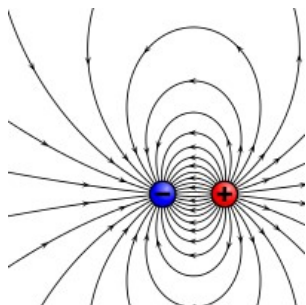
Takové pole vzniká např. mezi dvěma rovnoběžnými navzájem izolovanými kovovými deskami, které nesou stejné náboje opačného znaménka.



V okolí bodového náboje nebo v okolí náboje rovnoměrně rozmístěného na vodiči tvaru koule vzniká *radiální (centrální) elektrické pole*. Jeho intenzita má vždy směr polopřímky vycházející nebo vstupující do náboje (v závislosti na znaménku) a její velikost **klesá s druhou mocninou vzdálenosti**.



Dalším možným elektrického pole je tzv. **dipól**.



Zavedením veličiny intenzita elektrického pole vytváříme matematický model elektrického pole, kterým je vektorové pole. Jiným modelem znázornění elektrického pole je model **siločarový**. Siločáry jsou myšlené čáry, jejichž tečny sestavené v jejich libovolném bodě určují směr intenzity elektrického pole. Siločáry jsou spojitě, začínají na kladném a končí na záporném náboji. Jsou kolmé k povrchu nabitěho tělesa a navzájem se neprotínají.

### Práce v homogenním elektrickém poli

Složíme-li do určitého místa elektrického pole o intenzitě  $E$  částici s nábojem  $q$ , působí na ni elektrická síla  $F_e = q \cdot E$

Působením této síly se částice s nábojem  $q$  může pohybovat po dráze  $d$  a elektrické pole tak vykonává mechanickou práci  $W$ . Podobně jako v gravitačním nezávisí vykonaná práce na tvaru trajektorie, ale na vzdálenosti míst odkud a kam se částice pohybuje. Elektrické pole je tedy **konzervativní**.

V homogenním elektrickém poli je navíc jeho intenzita ve všech místech pole stejná a díky tomu zde na částici s nábojem působí ve všech místech stejná síla. Velikost mechanické práce vykonané elektrickým polem při přenesení náboje  $q$  do vzdálenosti  $d$ , vypočítáme:

$$W = F_e \cdot d \cdot \cos\alpha = q \cdot E \cdot d \cdot \cos\alpha$$

V nehomogenním poli je výpočet práce sil elektrického pole složitější, neboť velikost elektrické síly se při pohybu částic mění.

Každá částice umístěná v elektrickém poli má elektrickou potenciální energii  $E_p$ , která závisí na její poloze v tomto poli. Protože za místo s malou (nulovou) potenciální energií volíme Zemi a tělesa vodivě spojená se Zemí, platí:

*„Elektrická potenciální energie  $E_p$  částice s nábojem  $q$  v určitém místě pole je určena prací, kterou vykoná elektrická síla při přemístění náboje z daného místa na povrch Země (nezávisle na trajektorii).“*

Elektrická potenciální energie  $E_p$  se vztahuje k soustavě nábojů (náboje vytvářejícího elektrické pole a náboje, která se v tomto poli pohybuje).

### Elektrický potenciál

Podobně jako v gravitačním poli zavádíme pro popis elektrického pole veličinu **elektrický potenciál**  $[\varphi] = V$ .

Elektrický potenciál v daném bodě definujeme jako podíl elektrické potenciální energie  $E_p$  kladného bodového náboje  $q$  v tomto bodě a samotného náboje  $q$ .

Elektrický potenciál v daném bodě pole je definován poměrem práce, kterou vykonají síly elektrického pole při přenesení elektrického náboje  $q$  z daného místa na povrch Země a  $q$

$$\varphi = \frac{W}{q} = \frac{E_p}{q}$$

Jednotkou elektrického potenciálu je **volt**. Elektrické pole má v daném místě potenciál 1V, jestliže při přenosu kladného elektrického náboje o velikosti 1C z daného místa pole na povrch Země vykonají elektrické síly práci 1J.

Země a tělesa vodivě spojená se Zemí jsou místa **nulového elektrického potenciálu**.

Pro velikost potenciálu v homogenním poli platí:

$$\varphi = |E| \cdot d$$

Elektrický potenciál je **skalární** fyzikální veličina a pomocí potenciálu můžeme vytvořit další matematický model elektrického pole, kterým je **skalární pole**. Množiny všech bodů elektrického pole o stejném potenciálu se nazývají **ekvipotenciální plochy** (hladiny potenciálu). V homogenním elektrickém poli mezi dvěma rovnoběžnými vodivými deskami jsou potenciální plochy (mají tvar rovin rovnoběžných s deskami). V radiálním elektrickém poli jsou ekvipotenciálními plochami soustředné kulové plochy se středem v místě náboje. Potenciál v radiálním poli osamocené náboje vypočítáme:

$$\varphi = \frac{|Q|}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot r}$$

Všechny siločáry elektrického pole jsou kolmé k ekvipotenciálním plochám.

### Elektrické napětí

Elektrické napětí  $U_{AB}$  mezi dvěma body elektrického pole je podíl práce vykonané elektrickou silou při přenesení bodového náboje  $q$  z bodu A do bodu B a tohoto náboje. Tato veličina nezávisí na velikosti přenášeného náboje ani na jeho trajektorii. Je určena polohou obou bodů.

Elektrické napětí mezi dvěma body (A, B) elektrického pole je rovno absolutní hodnotě rozdílu potenciálů v bodech A a B pole:

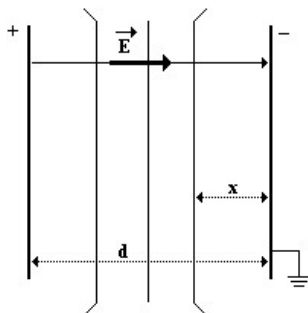
$$U_{AB} = \left| \frac{E_{pA} - E_{pB}}{q} \right| = \left| \frac{E_{pA}}{q} - \frac{E_{pB}}{q} \right| = |\varphi_A - \varphi_B|$$

Mezi dvěma rovnoběžnými vodivými deskami vzdálenými od sebe  $d$  je napětí rovno:

$$U = |E| \cdot d$$

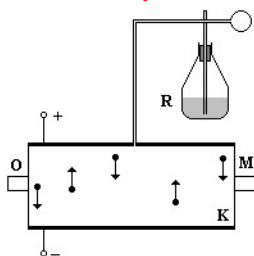
**Potenciální hladiny** = místa se stejným potenciálem (u radiálního pole kulové plochy, u homogenního přímky)

**Nulová potenciální hladina** = uzemněná hladina



$$\varphi(x) = U \cdot \frac{x}{d}$$

### Milikanův pokus



Milikan pozoroval pohyb malých olejových kapiček s elektrickým nábojem v homogenním elektrickém poli.

$$F_e = F_g$$

$$E \cdot Q = m \cdot g$$

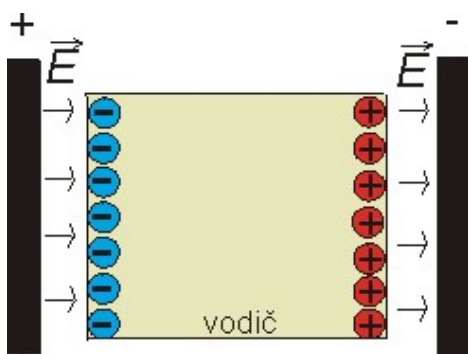
$$\frac{U \cdot Q}{d} = m \cdot g$$

$$Q = \frac{m \cdot g \cdot d}{U}$$

K rovnováze sil při tomto pokusu došlo pouze při určitých hodnotách napětí. **Milikanův pokus je proto důkazem existence elementárního náboje a poznatku, že se elektrický náboj mění nespojité.**

### Látky v elektrickém poli

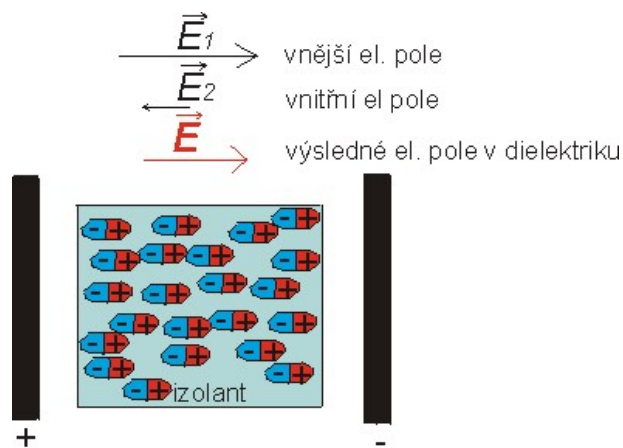
#### A) Vodič



**Elektrostatická indukce** = jev, při kterém se protilehlé části povrchu vodiče vloženého do elektrického pole zelektrují náboji stejné velikosti ale opačného znaménka

- probíhá tak dlouho, dokud intenzita el. pole uvnitř vodiče není nulová

- takto indukované náboje ve vodiči můžeme potom od sebe oddělit rozdělením vodiče na dvě části

**B) Dielektrikum**

**Polarizace dielektrika** = atomy a molekuly dielektrika se stávají elektrickými dipóly

$$E = E_1 - E_2$$

$$\frac{E_2}{E} = \epsilon_r$$

...číslo udávající, kolikrát je intenzita původního pole větší než intenzita pole výsledného

protože  $E < E_2$

**izolant účinky elektrického pole zeslabuje**

**Plošná hustota náboje**

Na vodivé kouli se náboj rozloží rovnoměrně na jejím povrchu (náboje se odpuzují a budou chtít být co nejdále od sebe)

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

$$E = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{|Q|}{R^2} = \frac{|\Delta Q|}{S \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

**Kapacita vodiče**

Každý elektricky nabitý vodič má určitý potenciál vzhledem k hladině nulového potenciálu. Připojíme-li osamocený vodič ke zdroji elektrického napětí, získá stejný potenciál, jako má svorka zdroje. Velikost elektrického náboje na vodiči je přímo úměrná potenciálu

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

C ... kapacita vodiče [C] = F (Fahrad)

Vodič má kapacitu 1F, jestliže se nábojem 1C nabije na potenciál 1V.

Pro osamělý kulový vodič o poloměru  $r$  ve vakuu platí:

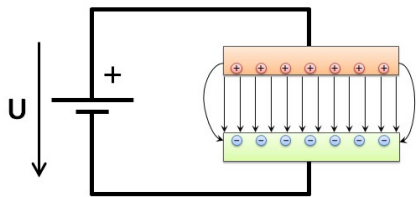
$$\varphi = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{|Q|}{R} \rightarrow C = \frac{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot R \cdot Q}{Q} = 4\pi \epsilon_0 R$$

Kapacita osamělého vodiče je velice malá. Např. kulička o poloměru 1 cm má ve vakuu kapacitu 1,1 pF.

Mnohem menší kapacitu má soustava dvou navzájem izolovaných vodičů – tzv. **kondenzátor**.

**Kondenzátor**

Nejjednodušším kondenzátorem je **deskový kondenzátor**, který tvoří dvě rovnoběžné navzájem izolované desky. Připojíme-li deskový kondenzátor ke svorkám zdroje, vznikne na desce připojené ke zdířce s vyšším potenciálem  $\varphi_1$  kladný náboj  $+Q$  a na desce připojené ke zdířce s menším potenciálem  $\varphi_2$  záporný náboj  $-Q$ .



Vzniká tak homogenní elektrické pole s intenzitou:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}$$

Mezi intenzitou elektrického pole  $E$  a hustotou náboje  $\sigma$  platí:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{Q}{S \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

Kapacita deskového kondenzátoru je přímo úměrná obsahu účinné plochy desek a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti. Účinnou plochou rozumíme obsah povrchu vodivé desky, proti níž leží povrch druhé desky.

$$Q = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d} \cdot U \quad \rightarrow \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

Kondenzátor má kapacitu  $F$ , jestliže jsou při napětí  $1V$  na jeho deskách náboje o velikosti  $1C$ . Vyplníme-li prostor mezi deskami dielektrikem, jeho kapacita se zvětší.

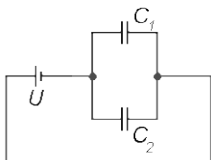
Podle obsahu dielektrika rozlišujeme kondenzátory: s papírovým dielektrikem, s plastovou fólií, skleněné, slídové, keramické, elektrolytické

Většina kondenzátorů má neměnnou kapacitu (řádově v mikrofaradech)

Kapacitu otočného kondenzátoru můžeme měnit změnou účinné plochy jeho desek, čehož se využívá např. **v ladění elektromagnetického signálu.**

## Spojování kondenzátorů

### PARALELNÍ ZAPOJENÍ



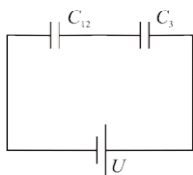
Paralelně spojené kondenzátory se oba nabíjí na napětí zdroje  $\rightarrow$  na jejich desku musíme přivést celkový náboj

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U = (C_1 + C_2) \cdot U$$

Soustava paralelně spojených kondenzátorů se chová jako jediný kondenzátor, jehož kapacita je rovna součtu kapacit všech kondenzátorů v soustavě:

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

### SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ



Na deskách sériově zapojených kondenzátorů, které spojíme svorkami zdroje, vzniknou náboje  $+Q$  a  $-Q$ . Na zbývajících deskách se díky elektrostatické indukci vytvoří stejně velké náboje s opačným

znaménkem. Napětí zdroje se rozdělí mezi oba kondenzátory.

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Soustava dvou sériově zapojených kondenzátorů se chová jako jediný kondenzátor s kapacitou  $C$ , pro níž platí:

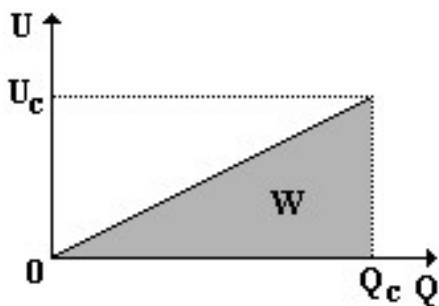
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

### Energie kondenzátoru

Při nabíjení/vybíjení kondenzátoru dochází k pohybu částic s náboji v elektrickém poli, při kterém elektrické síly konají práci. Protože schopnost konat práci popisuje fyzikální veličina **energie**, tak při nabíjení kondenzátor energii získává a při vybíjení ztrácí.

Přemísťujeme-li postupně na jednu z desek kondenzátoru elektrický náboj, zvyšuje se celkový náboj  $Q$  desky a tím i napětí desky. Grafem závislosti náboje na napětí je část přímky. Celková práce při nabití kondenzátoru nábojem  $Q$  na napětí  $U$  je graficky znázorněna obsahem plochy pod grafem funkce vyjadřující závislost náboje na napětí – tzn. obsahem trojúhelníku o základně  $U$  a výšce  $Q$ . Tato práce současně určuje energii elektrického pole nabitého kondenzátoru:

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



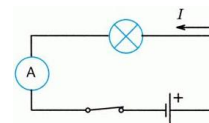
## Maturitní otázka č. 18 – Elektrický proud v látkách

### Elektrický proud

**Elektrický proud** je uspořádaný pohyb částic s elektrickým nábojem

Kladně nabitě částice se pohybují ve směru intenzity elektrického pole, záporně nabitě částice se pohybují proti směru intenzity elektrického pole. *Za směr elektrického proudu byl dohodou stanoven směr uspořádaného pohybu kladných částic.*

V jednoduchém elektrickém obvodu je směr elektrického proudu od kladného pólu zdroje k zápornému.



Fyzikální děj **elektrický proud** popisuje fyzikální veličina se stejným názvem  $[I] = A$

Elektrický proud je definován jako podíl celkového náboje  $Q$ , který projde průřezem vodiče za čas  $t$  a příslušné doby. Vodičem prochází proud 1A, jestliže projde jeho průřezem náboj 1C za čas 1s

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

Elektrický proud procházející vodičem přímo nevnímáme, ale můžeme pozorovat jeho účinky (tepelné, magnetické, chemické, fyziologické, ...)

Elektrický proud se měří **ampérmetrem**.

**Vodič** = látka, která je schopna vést elektrický proud. Musí obsahovat volný elektrický náboj.

**Izolant/Dielektrikum** = látka, která nevede elektrický proud

### Zdroje elektrického napětí

Aby mohl elektrickým obvodem procházet trvalý elektrický proud, musí být udržován stálý rozdíl potenciálů mezi svorkami zdroje. Tento rozdíl potenciálů se nazývá **svorkové napětí**.

Ve vnější části elektrického obvodu se volné částice s nábojem pohybují ve směru působení elektrického pole → elektrostatické síly konají práci a nabitě částice ztrácejí svou elektrickou potenciální energii. Vnější část elektrického obvodu se tedy chová jako spotřebič elektrické energie.

Elektrický proud prochází i uvnitř zdroje, kde se volné částice s nábojem pohybují proti elektrostatickým silám → uvnitř zdroje konají práci vnější neelektrostatické síly. Tyto síly vykonají při přenesení částic s nábojem  $Q$  uvnitř zdroje práci  $W_z$  a platí:

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

$U_e$ ...elektromotorické napětí zdroje

Pokud ke zdroji není připojen spotřebič, jsou elektrostatické a neelektrostatické síly v rovnováze a napětí mezi svorkami zdroje je stejně velké jako elektromotorické napětí. Napětí mezi svorkami zdroje nazýváme svorkové napětí. Svorkové napětí nezátíženého zdroje nazýváme **napětí na prázdno** – zn.  $U_0$  ( $U_e = U_0$ )

Připojením spotřebiče se poruší rovnováha mezi elektrostatickými a neelektrostatickými silami → udržuje se trvalý elektrický proud v obvodu. Práce neelektrostatických sil  $W_z$  se částečně spotřebuje uvnitř zdroje a částečně ve vnější části obvodu. **Svorkové napětí zatíženého zdroje je vždy menší než u nezátíženého.**

$$W = Q \cdot U < W_z = Q \cdot U_e \quad \rightarrow \quad U < U_e$$

## Typy zdrojů

### Galvanický článek (monočlánek)

Pro výrobu elektrické energie využívá energii uvolněnou při chemické reakci kovových elektrod s elektrolytem. Mezi elektrodami vzniká napětí o velikosti 1,5 V, které díky probíhající elektrochemické reakci časem klesá a nedá se obnovit. Předchůdcem byl tzv. **Voltův článek** – první stálý zdroj elektrického napětí sestavený počátkem 19. století, který poskytoval napětí 1V. Byl vytvořen měděnou a zinkovou elektrodou. Jako elektrolyt byla použita zředěná kyselina sírová.

### Fotoelektrický článek (fotočlánek)

Využívá energii světla, dopadajícího na vhodně upravenou destičku polovodiče. Z fotočláneků můžeme sestavovat sluneční baterie a používáme je např. v kalkulačkách nebo v družicích. Napětí závisí na intenzitě osvětlení a může dosahovat hodnot až 0,5 V.

### Termoelektrický článek (termočlánek)

Je založen na Seebeckově termoelektrickém jevu – při spojení dvou různých kovů vzniká na rozhraní malé kontaktní napětí, jehož velikost závisí na teplotě spoje. Poskytuje napětí řádově v mV → spíše než jako zdroj ho používáme k měření teploty.

### Akumulátor

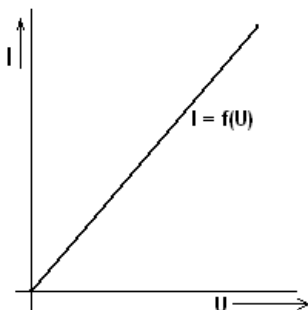
Nejběžněji používaný je olověný akumulátor, který má obě elektrody z olova a elektrolytem je vodný roztok  $H_2SO_4$ . Aby se akumulátor stal zdrojem elektrického napětí, musí se nabít – tzn. musí jím po určitou dobu procházet elektrický proud. Napětí jednoho článku akumulátoru činí po nabití cca 2V. Po vybití můžeme akumulátor znovu nabít → nejčastěji používaný v motorových vozidlech a záložních zdrojích.

### Alternátor

Pro výrobu elektrické energie využívá jev elektromagnetické indukce, kdy otáčením cívky v magnetickém poli vzniká elektrický proud. Využívá se v elektrárnách k výrobě elektrického proudu.

## Kovy

Graf závislosti proudu  $I$  procházejícího vodičem na napětí  $U$  mezi konci vodiče se nazývá **voltampérová charakteristika**, značí se **V-A charakteristika**.



$$I = G \cdot U$$

$G$  ... elektrická vodivost;  $[G] = S$  (siemens)

**Ohmův zákon** = „Proud protékající vodičem za stejné teploty je přímo úměrný napětí na jeho koncích.“



**Elektrický odpor** (rezistence) je poměr napětí a proudu ve vodiči  $[R] = \Omega$

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

Vodiče, pro které platí Ohmův zákon, nazýváme lineární, ostatní vodiče (např. wolframové vlákno) jsou nelineární, protože se jejich odpor mění.

Výraz  $U = R \cdot I$  je napětí na vodiči s odporem  $R$  a také se nazývá **úbytek napětí** na odporu vodiče nebo spotřebiče.

Odpor kovového vodiče závisí na materiálu, je přímo úměrný délce vodiče a nepřímo úměrný velikosti jeho průřezu;

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$\rho$  ... měrný elektrický odpor  $[\rho] = \Omega \cdot m$ ,  $l$  ... délka vodiče,  $S$  ... velikost průřezu

S rostoucí teplotou se odpor zvětšuje podle vztahu:

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

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

$\alpha$  ... teplotní součinitel elektrického odporu  $[\alpha] = K^{-1}$

**Rezistor** je technická součástka, jejíž odpor má stálou velikost; k výrobě rezistorů se používají látky s malým teplotním součinitelem odporu.

## Supravodivost

Supravodivost je jev, kdy při určité teplotě klesne odpor na neměřitelnou hodnotu. Existují dva druhy supravodivosti – vysokoteplotní a nízkoteplotní supravodivost. Nízkoteplotní supravodiče jdou vysvětlit BCS teorií a platí pouze pro supravodiče, jejichž kritická teplota je menší než 23 K.

Vysokoteplotní supravodiče fungují na principu *elektron-fononové interakce* (spojování dvou fermionů do tzv. Cooperových párů).

### Využití

- 1) vedení elektrického proudu – výrazné snížení ztrát elektrického proudu
- 2) Supravodivé elektromagnety – malé rozměry, dokáží vytvořit elektrické pole až o velikosti několik tesla; v lékařství nebo v urychlovačích částic
- 3) Supravodivá levitace – vlakové soustavy MagLev
- 4) Uchovávání kinetické energie – nekonečná levitace předmětu nad supravodivým magnetem se dá roztočením používat k uchovávání kinetické energie. Účinnost tohoto stroje je až 95%
- 5) Elektromagnetické dělo

## Spojování rezistorů

### SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ

Sériově zapojenými rezistory prochází stejný proud, neboť vodivostní elektrony v obvodu nezanikají ani nevznikají. Celkové napětí na této části obvodu je rovno součtu napětí na rezistorech.

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

### PARALELNÍ ZAPOJENÍ

Protože všechny rezistory jsou připojeny ke stejné dvojici uzlů, je na všech rezistorech stejné napětí. Celkový proud procházející paralelním zapojením rezistorů je roven součtu proudů procházejících

jednotlivými rezistory

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad G = G_1 + G_2 + G_3$$

Proud jednotlivých větví se při paralelním spojení rezistorů dělí v obráceném poměru odporů rezistorů.

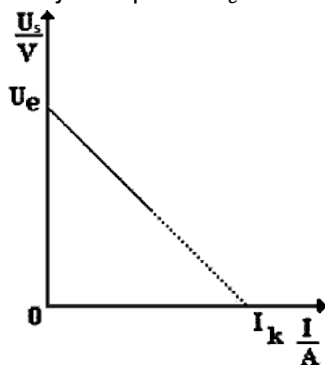
### Ohmův zákon pro uzavřený obvod

Jestli elektrickým obvodem prochází elektrický proud, svorkové napětí zdroje se zmenšuje.

**Zatěžovací charakteristika zdroje** = graf závislosti svorkového napětí na odebíraném proudu

**Elektromotorické napětí** = napětí, nezatíženého zdroje (tzv. napětí na prázdko)

Protože svorkové napětí zatíženého zdroje klesá, chová se baterie jako by byla složena z ideálního zdroje s napětím  $U_e$  a rezistoru o odporu  $R_i$ , který nazýváme **vnitřní odpor zdroje**.



Úbytek napětí z vnitřního odporu zjistíme ze vztahu:  $U_e - U = R_i \cdot I \rightarrow U = U_e - R_i \cdot I$

Podle Ohmova zákona pro část elektrického obvodu platí:  $U = R \cdot I$

$$R_i \cdot I = U_e - R_i \cdot I \rightarrow U_e = I \cdot (R + R_i) \rightarrow I = \frac{U_e}{R + R_i}$$

Proud v uzavřeném obvodu je roven podílu elektromotorického napětí zdroje a celkového odporu.

Pokud zmenšujeme odpor spotřebiče, zvyšuje se elektrický proud v uzavřeném obvodu.

Pro  $R=0$  nastává spojení nakrátko (tzv. zkrat) a obvodem prochází zkratový proud ( $I_k$ )

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

Odběr velkých proudů ze zdroje o malém vnitřním odporu může vést k poškození zdroje nebo vedení. Proto se do elektrických obvodů zařazují **pojistky** nebo **jističe**, které při překročení určité hodnoty proudu elektrický obvod přerušují.

**Tvrde zdroje** = zdroje o malém vnitřním odporu (protéká velký proud)

**Měkké zdroje** = zdroje o velkém vnitřním odporu (protéká malý proud)

### Kirchhoffovy zákony a jejich použití

**Elektrické sítě** = složitější elektrické obvody (spojení několika rezistorů a zdrojů)

**Uzel sítě** = místo, kde se stýkají alespoň tři různé vodiče

**Větev sítě** = vodivé spojení dvou sousedních uzlů

Kirchhoffovy zákony jsou zobecněním Ohmova zákona pro rozvětvené elektrické sítě a jsou návodem pro výpočet elektrických proudů na větvích sítě (případně jiných neznámých parametrů, jsou-li ostatní parametry známé)

### První Kirchhoffův zákon (pro uzel)

Tento zákon je důsledkem zachování elektrického náboje a obvykle ho používáme ve dvou formulacích.

„Algebraický součet proudů v uzlu je nulový.“

„Součet proudů do uzlu vtékajících se rovná součtu proudů z uzlu vytékajících.“

Proud směřující do uzlů bereme obvykle s kladným znaménkem, proud směřující z uzlů ven bereme obvykle se záporným. Využíváme ho při výpočtu výsledného odporu paralelně spojených rezistorů.

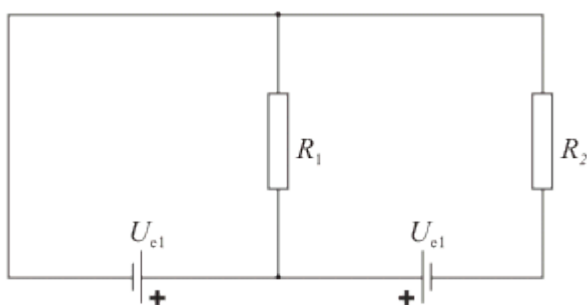
### Druhý Kirchhoffův zákon (pro jednoduchou smyčku elektrické sítě)

Tento zákon je zobecněním Ohmova zákona pro uzavřený obvod.

„V jednoduchém obvodu je součet elektromotorických napětí zdrojů roven úbytku napětí na jednotlivých rezistorech.“

### POSTUP PŘI PRAKTICKÉM POUŽITÍ KIRCHHOFFOVÝCH ZÁKONŮ

1. Zvolíme označení a kladnou orientaci proudů jednotlivých větví ( $i$  když je ve skutečnosti neznáme)
2. Pro každý uzel sestavíme rovnici na základě 1. Kirchhoffova zákona (proudy vtékající do uzlu s  $+$  a vytékající z uzlu s  $-$ )
3. V síti vybereme uzavřenou smyčku a zvolíme v ní náhodně směr obíhání (většinou volíme po směru hodinových ručiček). Elektromotorická napětí orientovaná souhlasně se směrem obíhání a úbytky napětí na rezistorech, kde orientace proudu souhlasí se směrem obíhání, píšeme s kladným znaménkem, ostatní se záporným
4. Sestavíme rovnice na základě 2. Kirchhoffova zákona pro jednoduché uzavřené smyčky
5. Řešíme získanou soustavu rovnic a určíme hodnoty neznámých veličin. Záporná hodnota proudu znamená, že skutečný směr proudu je opačný než námi zvolená orientace



#### I. Kirchhoffův zákon:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

#### II. Kirchhoffův zákon aplikujeme na smyčky (světle a tmavě modrá):

$$R_1 I_3 = -U_{e1}$$

$$R_2 I_2 + R_1 I_3 = -U_{e2}$$

Ze zadání příkladu víme, že  $R_1 = R_2$ ,  $U_{e1} = U_{e2}$

Odečteme-li tedy první rovnici od druhé, získáme vztah pro  $I_2$ :

$$R_2 I_2 = U_{e1} - U_{e2} = 0$$

$$I_2 = 0.$$

Z prvního Kirchhoffova zákona nyní dostaneme  $I_3 = I_1$

Z druhého Kirchhoffova zákona pro světle modrou smyčku si vyjádříme  $I_3$ :

$$R_1 I_3 = -U_{e1}$$

$$I_3 = -U_{e1} / R_1.$$

## Polovodiče

**Polovodiče** jsou látky, jejichž měrný odpor je při obvyklých teplotách  $10^{-4} - 10^8 \Omega \cdot m$ .

Elektrické vlastnosti polovodičů výrazně závisí na teplotě dopadajícího záření nebo na obsahu příměsí, a to mnohem více než vlastnosti kovů. Mezi polovodiče patří např. **Si, Ge, Se, Te, C, PbS, CdS, Ga, As**

Využití: - **termistory** (rezistory, jejichž odpor je závislý na teplotě)  
- **fotorezistory** (rezistory, jejichž odpor se mění se změnou osvětlení)

## Čisté polovodiče

Pro výrobu polovodičových součástek se nejčastěji používá čistý křemík – atom Si má 4 valenční elektrony, které jsou vázány ve vazebných dvojicích se sousedními atomy v krystalové mřížce.

Na uvolnění elektronu z této kovalentní vazby je zapotřebí velké energie (1,1 eV) a proto se při nízkých teplotách chová křemík jako izolant. S rostoucí teplotou roste energie tepelných kmitů jednotlivých iontů z krystalové mřížky → jednotlivé vazby se porušují, některé elektrony se z nich uvolňují a na jejich místech vznikají tzv. **díry** = místa, kde převládá náboj atomového jádra nad nábojem elektronu a díky tomu má díra vlastnosti kladné částice.

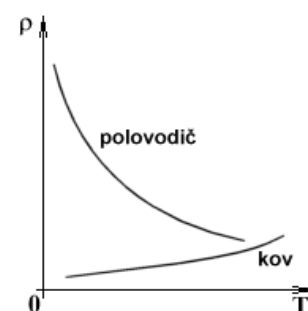
Volné elektrony se v polovodiči mohou pohybovat. Do díry může přeskočit elektron ze sousední úplné vazby atd. Tímto způsobem se v polovodiči mohou pohybovat i díry.

Setká-li se náhodně elektron s dírou, zapojí se zpět do vazebné dvojice a pár (elektron – díra) zanikne. V polovodiči se tak udržuje rovnováha mezi vznikem párů (generace) a zánikem (rekombinace).

Zapojíme-li polovodič do elektrického obvodu, je elektrický proud v polovodiči roven součtu elektronového proudu ( $I_e$ ) a děrového proudu ( $I_d$ ).

Tento typ vodivosti polovodiče způsobený generováním párů se nazývá **vlastní vodivost**. Látky s vlastní vodivostí tvoří vlastní polovodiče. Vznik párů může kromě tepelného pohybu krystalové mřížky vyvolat i dopad záření na povrch spotřebiče. Generování párů účinkem světelného záření se nazývá **vnitřní fotoelektrický jev**, kterého se využívá ve fotorezistorech.

Hustota volných elektronů v čistém polovodiči se s rostoucí teplotou rychle zvětšuje. Díky tomu měrný odpor čistého polovodiče (na rozdíl od kovů) a rostoucí teplotou klesá.



## Příměsové polovodiče

Vlastní vodivost se využívá pouze u některých polovodičových součástek (termistor, fotorezistor). Mnohem větší význam má příměsová vodivost polovodičů.

Vodivost polovodiče může ovlivnit i nepatrné množství cizích atomů nahrazujících atomy čistého křemíku. Tyto cizí atomy nazýváme příměsí. Jeden atom příměsí na 100 000 000 atomů čistého křemíku může zvětšit jeho vodivost až 1000 – krát. Ve všech příměsových polovodičích je celkový náboj elektronů a děr vyrovnán s nábojem nepohyblivých iontů a příměsí. Hustota volných nosičů náboje v příměsových polovodičích je při nízkých teplotách určena množstvím příměsí, při

vyšších teplotách se projevuje vliv vlastní vodivosti → tento vliv je u většiny součástek nežádoucí a proto je při provozu chladíme.

Podle druhu příměsi dělíme příměsové polovodiče do dvou skupin:

**TYP N** (donorové příměsi – prvky V. skupiny (P, As, Sb, Bi) → 5 valenčních elektronů

Jsou-li příměsi tvořeny atomy prvku V. skupiny, uplatní se 4 valenční elektrony příměsi v kovalentní vazbě se sousedními atomy křemíku. Zbývající pátý valenční elektron je vázán velice slabě a lehce se uvolní. Díky tomu je v krystalu takového polovodiče mnohem více elektronů než děr a převládá elektronová vodivost.

**TYP P** (akceptorové příměsi – prvky III. skupiny (B, As, Ga, In) → 3 valenční elektrony

Jsou-li příměsi tvořeny atomy prvku III. skupiny, uplatní se všechny 3 valenční elektrony ve vazbách se sousedními atomy křemíku, ale jeden elektron chybí → vzniká díra. V krystalu takového polovodiče je tedy mnohem více děr, než elektronů a převládá děrová vodivost.

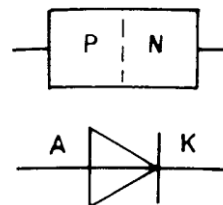
### Polovodičová dioda, PN přechod

**Polovodičová dioda** je součástka se dvěma vývody připojenými ke krystalu polovodiče s přechodem PN; PN přechod je přechod mezi oblastí typu P a typu N v jediném krystalu polovodiče.

Vývod spojený s oblastí typu P se nazývá anoda, s oblastí typu N katoda.

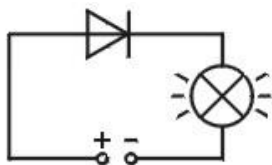
Vodivost polovodičové diody závisí nejen na velikosti, ale i na orientaci

připojeného napětí → tento jev propustnosti proudu závislé na zapojení nazýváme diodový jev



### PROPUSTNÝ SMĚR

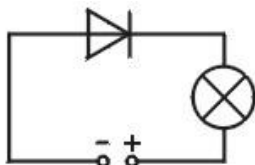
- vnější elektrické pole je orientováno proti poli hradlové vrstvy, potlačí jej a diodou prochází elektrický proud (dioda má minimální odpor)



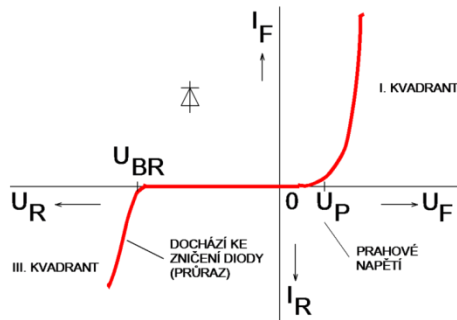
Propustný směr

### ZÁVĚRNÝ SMĚR

- vnější elektrické pole je orientováno shodně s polem hradlové vrstvy, ta se zvětší a dioda je prakticky nevodivá. Prochází pouze malý proud menšinových nosičů náboje.



Závěrný směr



Vlastnosti diod vyjadřují jejich **voltampérové charakteristiky**. Jsou to grafy závislosti proudu, který prochází diodou, na připojeném napětí. Rozlišujeme 2 části voltampérové charakteristiky diody:

- část v propustném směru (I. kvadrant) → hodnoty s indexem F (forward)
- část v závěrném směru (III. kvadrant) → hodnoty s indexem R (rear)

$U_p$  ... prahové napětí

$I_F$  ... maximální možný trvalý proud

$U_{BR}$  ... průrazné napětí (po jeho překročení prudký růst proudu, zničení diody)

### Speciální typy diod:

- Stabilizační (Zenerovy) diody – jsou vyrobeny tak, aby mohly pracovat i po překročení průrazného napětí → příslušnou hodnotu tohoto napětí  $U_z$  pak označujeme Zenerovo napětí.
- Hrotové diody – PN přechod má nepatrné rozměry; používají se ve vysokofrekvenčních obvodech
- Luminiscenční diody (LED) – při průchodu elektrického proudu svítí
- Fotodiody – jejich vodivost lze ovlivnit osvětlením; při osvětlení se samy stávají zdrojem napětí

## Fyzikální základy elektroniky

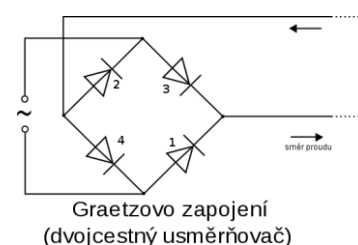
### USMĚRŇOVAČ

Polovodičovou diodou prochází elektrický proud, je-li zapojena v propustném směru. V závěrném směru prochází diodou pouze nepatrný proud. Dioda zapojená do obvodu střídavého proudu propouští proud pouze v kladných půlperiodách vstupního střídavého napětí. Dioda tak funguje jako jednocestný usměrňovač. Výstupní napětí je pulsující (tepavé).

K vyhlazení pulsace připojujeme paralelně k výstupu usměrňovače kondenzátor, který se v kladných půlperiodách nabíjí a v záporných vybíjí. Vyhlazení pulsace je tím účinnější, čím větší je kapacita kondenzátoru a odpor zátěže.

U jednocestného usměrňovače není využita polovina usměrňovaného napětí, a proto v praxi využíváme tzv. **Graetzův můstek**.

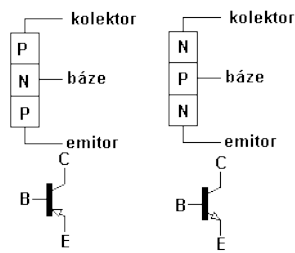
Výstupní napětí pulzuje s dvojnásobnou frekvencí než u jednocestného usměrňovače → Graetzův můstek se čtyřmi diodami funguje jako dvoucestný usměrňovač.



## TRANZISTOR

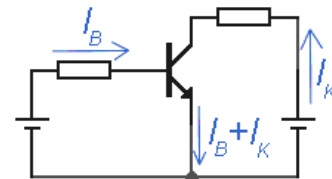
Polovodičová součástka tvořená dvojicí PN přechodů (→ tři vývody).

Podle druhu vodivosti jednotlivých částí je dělíme na: **NPN** a **PNP**



Základním zapojením tranzistoru typu NPN je zapojení se společným emitorem (SE).

Kolektorový přechod B/C je zapojen v závěrném směru → kolektorovým obvodem neprochází žádný proud. Přechod B/E je zapojen v propustném směru → obvodem může začít procházet proud báze  $I_B$ .

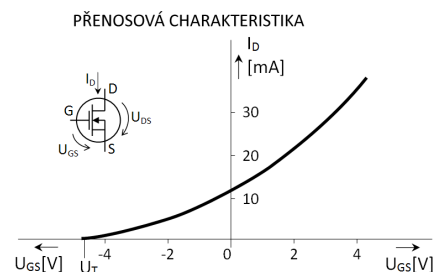


Průchodem proudy obvodem báze začne procházet proud i obvodem kolektorovým ( $I_C$ ;  $I_C \gg I_B$ ) → nastává **tranzistorový jev** – malé napětí v obvodu báze vyvolává proud, který je příčinou vzniku mnohem většího proudu v kolektorovém obvodu.

Proud báze je tvořen elektrony, které pronikají z emitoru do báze. V malém objemu báze je nedostatek volných děr → elektrony zde nemohou rekombinovat a jsou silně přitahovány ke kolektoru, který má kladný potenciál. Díky tomu pouze malá část elektronů v bázi rekombinuje (→ tvoří proud báze  $I_B$ ) a většina z nich přechází do kolektoru a vytváří značně větší (1000x až 10 000x) kolektorový proud  $I_C$ .

Při činnosti tranzistoru dochází k zesílení proudu a proto tranzistory používáme především v zesilovačích.

Graf závislosti  $I_C$  na  $I_B$  nazýváme **převodní charakteristika tranzistoru**.



Základním parametrem tranzistoru je **proudový zesilovací činitel** (zn. beta), definovaný jako podíl změny proudů  $I_C$  a  $I_B$  při konstantním napětí  $U_{CE}$ .

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}, \quad U_{CE} = \text{konst.}$$

## INTEGROVANÉ OBVODY

1. generace elektrotechnických součástek – vakuové elektronky (poč. 20. st.)
2. generace elektrotechnických součástek – polovodičové součástky (50. léta)
3. generace elektrotechnických součástek – integrované obvody (60. léta)

Podstatou integrovaných obvodů je, že na křemíkové destičce (tzv. čipu) vytvoříme elektronický systém obsahující velké množství diod, tranzistorů, rezistorů, ... Nelze jej rozčlenit na jednotlivé součástky → tvoří jediný obvodový prvek a obsahuje řádově miliony dílčích spojení.

Podle charakteru signálu, k jejichž zpracování jsou určeny, dělíme integrované obvody na:

- a. *integrované obvody analogové techniky* – zpracování spojitě proměnných signálů (např. zvuk – analogový zesilovač)

- b. *integrované obvody digitální techniky* – zpracování číslicového signálu → skokově proměnný (např. mikroprocesor)

## Plyny (vakuum)

Plyny za normálních podmínek nevedou elektrický proud. Jejich vodivost lze zvýšit ohřátím nebo intenzivním ozářením. Aby plyny mohly vést elektrický proud, musí obsahovat volné částice s elektrickým nábojem.

**Ionizace** je děj, kdy vnějším zásahem zvyšujeme počet volných částic s elektrickým nábojem v plynu. Při ionizaci se odtrhávají z původně neutrálních molekul elektrony a vznikají jednak volné elektrony a jednak volně pohyblivé kladné ionty. Kromě toho se v plynu mohou vytvářet i záporné ionty připojením volných elektronů k jiným neutrálním molekulám. Elektrický proud v plynu tedy mohou vést – *volné elektrony, kladné a záporné ionty*.

**Ionizátory** jsou prostředky, kterými se vyvolává ionizace plynu (např. plamen nebo záření)

**Ionizační energie** je nejmenší energie potřebná k uvolnění elektronu; její hodnota závisí na atomu prvku a na energetickém stavu uvolňovaných elektronů. Udáváme je zpravidla v elektronvoltech (eV).

$E = Q \cdot U \rightarrow 1 \text{ eV} = \text{energie, kterou získá částice s elementárním nábojem v elektrickém poli s napětím } 1 \text{ V}$   $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Současně s ionizací probíhá v plynu i opačný děj – tzv. **rekombinace** (= nesouhlasně nabitě částice se navzájem přitahují a vytváří neutrální molekuly).

**Elektrický výboj** je jev vedení elektrického proudu v plynu

**Nesamostatný výboj** je elektrický proud v plynu, který se udržuje pouze po dobu působení ionizátoru (tzn. přestane-li ionizátor působit, převládne rekombinace nad ionizací a výboj ustane)

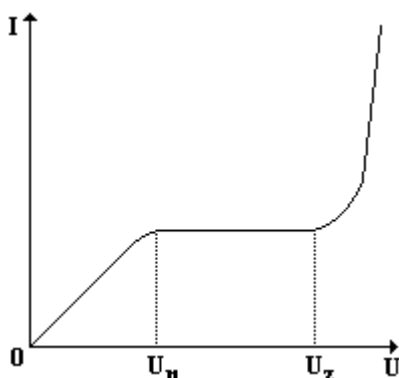
Plyny dostatečně vysokých teplot obsahují molekuly, jejichž rychlost a tím i kinetická energie jsou dostatečně vysoké k tomu, aby nastala ionizace vzájemnými srážkami molekul. Pokud se plyn může ionizovat vlastními elektrony a ionty, počet iontů exponenciálně narůstá a výboj plynu může pokračovat i po odstranění ionizátoru. Tento druh ionizace se nazývá **ionizace nárazem** a výboj v plynu, který přetrvává i bez působení ionizátoru se nazývá **samostatný výboj**.

Elektrické napětí, při kterém vzniká samostatný výboj, nazýváme **zápalné napětí ( $U_z$ )**. Vysoce ionizovaný plyn při samostatném výboji se nazývá **plazma**.

## Voltampérová charakteristika

**Voltampérová charakteristika** je graf závislosti proudu elektrického výboje na napětí mezi elektrodami.

Při zkoumání výbojů v plynu používáme **ionizační komoru**. V podstatě se jedná o deskový kondenzátor, který je umístěn v kovové krabici s okénkem pro ionizátor.



Při malých napětích zanikne většina iontů rekombinací dříve, než dorazí k elektrodám. Počet iontů, které předají svůj náboj elektrodám, je přímo úměrný napětí a platí zde Ohmův zákon. S rostoucím napětím se neuspořádaný pohyb iontů urychluje a po dosažení napětí  $U_N$  se většina z nich nestačí rekombinovat a doletí



až k elektrodám. Komorou pak prochází tzv. *nasycený proud*  $I_N$ , jehož hodnota se při dalším růstu napětí dlouho nemění.

K dalšímu zvýšení proudu dochází po překročení **zápalného napětí ( $U_z$ )**. Elektrony a ionty vzniklé ionizací získávají dostatečnou energii a při nárazu na neutrální molekulu vyvolávají novou ionizaci. Dochází tak k **ionizaci nárazem**, počet iontů v plynu lavinovitě vzrůstá a výboj pokračuje i po odstranění ionizátoru → nastává **samostatný výboj**.

Pro nasycený proud a samostatný výboj již neplatí Ohmův zákon. Charakter samostatného výboje v plynu závisí na chemickém složení plynu, na jeho teplotě, tlaku, na materiálu a vzdálenosti elektrod. Elektrický výboj v plynu bývá většinou doprovázen světelnými a zvukovými efekty. Samostatný výboj probíhá odlišně v závislosti na hodnotě proudu.

**Doutnavý výboj** – vzniká při malých proudech, pozorujeme jej jako světélkování plynu  
- je dlouhodobý a používáme jej např. v *doutnavkách*

**Obloukový výboj** – je nejdůležitější pro technickou praxi  
- vzniká, když elektrody přiblížíme na malou vzdálenost  
- plynem pak dlouhodobě prochází velký proud  
- např. *při sváření, sodíkové nebo rtuťové výbojky*

**Jiskrový výboj** - nejintenzivnější výboj, při kterém prochází velké proudy, ale je krátkodobý a se zvukem  
- např. *blesk ...* výboj atmosférické elektřiny, trvá řádově tisíce sekund, proud až  $10^5$  A

**Trsovité výboj** = sršivý výboj = koróna  
- vzniká v okolí drátů a hrotů s vysokým potenciálem → např. *u sloupů elektrického vedení*  
- způsobují velké ztráty na vedení velmi vysokého napětí

**Atmosférický tlak:** - obloukový výboj  
- jiskrový výboj  
- trsovité výboj

**Snížený tlak:** - doutnavý výboj

### Samostatný výboj v plynu za sníženého tlaku

Charakter samotného výboje se podstatně změní, umístíme-li elektrody do uzavřeného prostoru výbojové trubice se sníženým tlakem plynu. Tím zvětšíme střední volnou dráhu elektronů a iontů a k samotnému výboji tak dochází už při mnohem menším napětí než za atmosférického tlaku. Při dosažení tlaku cca 100 Pa se v trubici objeví **doutnavý výboj** → v blízkosti katody můžeme pozorovat **katodové doutnavé světlo** modré barvy a zbytek trubice vyplňuje **načervenalé anodové světlo**. Tok elektronů z katody ve vyčerpané trubici nazýváme **katodové záření**. Toto záření lze dobře pozorovat, protože způsobuje žlutozelené světélkování skleněné trubice.

**Katodové záření má následující vlastnosti:**

1. ionizuje vzduch a ostatní plyny → získávání iontů pro urychlovače
2. místo dopadu katodového záření se zahřívá → sváření elektronovým paprskem
3. způsobuje světélkování látek → využití v přístrojích s obrazovkou
4. elektrody katodového záření se vychylují v elektromagnetickém poli → záznam dynamických procesů na obrazovce
5. proniká velmi tenkými materiály a rozptyluje se → výzkum povrchu pevných látek

6. vyvolává rentgenové záření → diagnostika vad materiálů a struktur krystalů, v lékařství

### Praktické využití termoemise elektronů

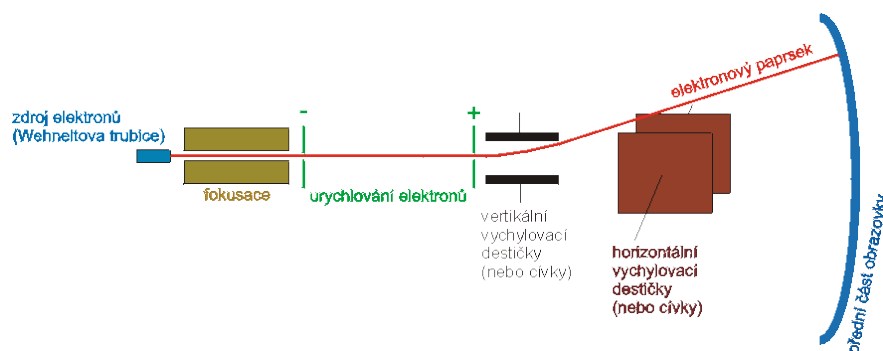
Volné elektrony jsou v kovu přitahovány kladnými ionty a za normálních podmínek nemohou kov opustit. Jestliže, ale získávají dostatečnou energii (např. tepelnou výměnou, ozářením), kov opustit mohou. Uvolňování elektronů z povrchu pevných nebo kapalných látek při vysoké teplotě nazýváme **termoemise**. Termoemise elektronů se prakticky využívá při činnosti **vakuových elektronek** z nichž nejvýznamnější je:

- **OBRAZOVKA**

= vyčerpaná skleněná trubice, která má přední stěnu (tzv. stínítko) zevnitř pokrytou vrstvou ZnS

Zdrojem elektronů je rozžhavené vlákno katody obklopené řídicí elektrodou obrazovky (tzv. Wehneltův válec). Tímto válcem vyletují elektrony v podobě elektronového paprsku směrem ke stínítku a jsou urychlovány elektrickým polem mezi katodou a anodami.

Potom se paprsek dostane do vychylovacího systému obrazovky, který tvoří dva pásy destiček vychylujících elektronový paprsek do svislého a vodorovného směru. Upravený elektronový paprsek pak dopadá na stínítko, kde vyvolává světélkování zasaženého místa.

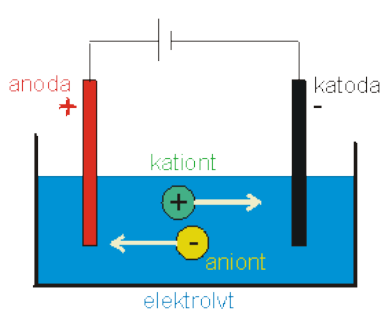


Obrazovky s elektrostatickým vychylováním elektronového paprsku se používají v osciloskopech, které umožňují sledování časových průběhů proměnných elektrických napětí. V televizních obrazovkách vychylovací destičky chybí, protože k vychylování elektronového paprsku používáme magnetické pole soustavy cívek.

## Kapaliny

Vedení proudu v kapalině se nazývá **elektrolýza**

**Elektrolyt** je kapalná látka, která vede elektrický proud (díky volně pohyblivým kladným a záporným iontům)



**Elektrolytická disociace** je vznik volných iontů rozpadem rozpuštěné látky v rozpouštědle.

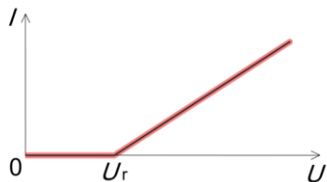
Vložíme-li do elektrolytu dvě elektrody a připojíme-li je ke zdroji napětí, vznikne uvnitř elektrolytu elektrické pole, které vyvolává usměrněný pohyb iontů v roztoku. Uspořádaný pohyb iontů v elektrickém poli mezi elektrodami elektrický proud v elektrolytu.

Kationty se začnou pohybovat směrem ke **katodě** (elektroda

připojená k záporné svorce zdroje).

Anionty směřují k **anodě**.

### Voltampérová charakteristika elektrolytu



Trvalý proud v elektrolytu vzniká až po překročení určité mezní hodnoty napětí  $U_r$  (rozkladné napětí).

V elektrolytu tedy platí:  $U = U_r + RI$

Odpor elektrolytu závisí na teplotě a s rostoucí teplotou klesá (zmenšuje se viskozita rozpouštědla → zmenšují se síly, které brzdí pohyb iontů)

### Elektrolýza

**Elektrolýza** je děj, při kterém průchodem elektrického proudu dochází k látkovým změnám.

Uspořádaný pohyb iontů v elektrolytu končí na elektrodách, kde ionty přijímají nebo odevzdávají elektrony. Při tomto ději se pak vylučují na povrchu elektrod, chemicky reagují s materiálem elektrod případně s elektrolytem. Na katodě se vylučuje vodík nebo kov. Výsledky elektrolýzy daného roztoku vždy závisí na materiálu, z něhož jsou elektrody.

Vedení elektrického proudu v elektrolytu popisují Faradayovy zákony:

#### 1. Faradayův zákon

„Hmotnost látky vyloučené na elektrodách je přímo úměrná celkovému elektrickému náboji, který přenesou ionty při elektrolýze.“

$$m = AQ = AIt$$

A ... elektrochemický ekvivalent [ $\text{kg}\cdot\text{C}^{-1}$ ]

#### 2. Faradayův zákon

„Elektrochemický ekvivalent látky vypočítáme, jestliže její molární hmotnost vydělíme Faradayovou konstantou a počtem elektronů potřebných k vyloučení jedné molekuly. → látková množství různých látek vyloučených stejným nábojem jsou chemicky ekvivalentní

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

z ... oxidační číslo, F ... Faradayova konstanta

$$F = N_A \cdot e = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$$

Projde-li povrchem elektrody náboj Q a je-li k vyloučení jedné molekuly potřebných z elementárních nábojů, je počet vyloučených molekul N:

$$N = \frac{Q}{z \cdot e} = \frac{I \cdot t}{z \cdot e}$$

Vynásobíme-li počet vyloučených molekul hmotností jedné molekuly ( $m_m = M_m/N_A$ ) dostaneme hmotnost celé látky:

$$m = \frac{M_m \cdot Q}{N_A \cdot z \cdot e} = \frac{M_m \cdot Q}{F \cdot z} = AQ$$

### Galvanické články

Galvanický neboli **elektrochemický článek** je zdroj elektrického napětí, ve kterém dochází k přeměně chemické energie v energii elektrickou. Je tvořený dvěma elektrodami ponořenými do vhodného elektrolytu.

**Primární galvanický článek** má elektrody z různých kovů. Mezi kovovou elektrodou a elektrolytem vzniká rozdíl potenciálů, který je u různých kovů různý. Výsledné napětí článku je dáno rozdílem potenciálů obou elektrod. Proces přeměny energie je nevratný, vybitý článek nelze znovu nabít.

*Suchý článek* – uhlíková a zinková elektroda, elektrolytem je roztok salmiaku,  $U_e = 1,5 \text{ V}$

*Alkalické články* – mají delší životnost, elektrolytem je KOH, elektrody jsou z grafitu a zinku

**Sekundární galvanický článek (akumulátor)** je vratný elektrochemický článek, který je možno připojením k vnějšímu zdroji a průchodem elektrického proudu v opačném směru (než je směr proudu při vybíjení) uvést do nabitého stavu a pak z něj opět odebírat elektrický proud.

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

*Olověný akumulátor* – olovené elektrody, elektrolyt je kyselina sírová,  $U=2\text{V}$ , malý vnitřní odpor

*Alkalický akumulátor* – KOH, delší životnost, větší vnitřní odpor,  $U=1,3\text{V}$

*Lithiový akumulátor* – je schopen dlouhodobého zatížení malými proudy

### Práce a výkon

#### Elektrická práce a výkon v obvodu stejnosměrného proudu

Při přenesení částic s nábojem ve vnější části elektrického obvodu, vykonají elektrické síly práci

- je-li na svorkách zdroje napětí  $U$

$$W = U \cdot Q$$

- je-li na svorkách elektrický proud v obvodu stálý

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

- má-li vnější část obvodu elektrický odpor  $R$

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

Při průchodu elektrického proudu vodičem dochází ke zvýšení jeho vnitřní energie a tím ke zvýšení teploty. Tento přírůstek energie nazýváme Jouleovo teplo ( $Q_j$ ). Pokud nedochází k jiným přeměnám elektrické energie, je jouleovo teplo rovno elektrické práci.

Výkon elektrického proudu ve spotřebiči o elektrickém odporu vypočítáme:

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad [P] = W$$

Tento výkon elektrického proudu nazýváme **příkon spotřebiče**. Uvnitř elektrického zdroje vykonávají neelektrostatické síly práci  $W_z$ , která se z části spotřebuje ve vnitřním odporu zdroje a zčásti ve spotřebiči.

$$W_z = U_e \cdot Q = U_e \cdot I \cdot t = \frac{U_e^2}{R + R_i} \cdot t$$

Výkon zdroje vypočítáme:  $P_Z = \frac{W_Z}{t} = \frac{U_e^2}{R+R_i} = (R + R_i) \cdot I^2$

Pro účinnost zdroje platí:  $\eta = \frac{W}{W_Z} = \frac{U}{U_e} = \frac{R}{R+R_i}$

Účinnost zdroje je tím větší, čím větší je odpor spotřebiče v porovnání s vnitřním odporem zdroje. Elektrický příkon spotřebiče závisí na velikosti proudu

$$P = U \cdot I = (I_e - R_i I) \cdot I = U_e I - R_i I^2$$

Z obrázku vyplývá, že maximálního výkonu dosáhneme, je-li proud v obvodu roven polovině zkratového proudu.

$$I = \frac{I_k}{2} = \frac{U_e}{2R_i} \quad \rightarrow \quad \frac{U_e}{R + R_i} = \frac{U_e}{2R_i} \quad \rightarrow \quad R = R_i$$

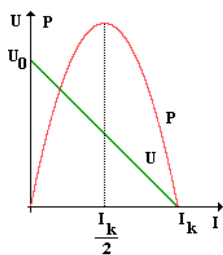
Pro maximální výkon potom platí:

$$P_{max} = R_i I^2 = R_i \left( \frac{U_e}{2R_i} \right)^2 = \frac{U_e^2}{4R_i}$$

Pro účinnost zdroje při maximálním výkonu platí:

$$\eta(P_{max}) = \frac{P_Z}{P_{max}} = \frac{R}{R + R_i} = \frac{R_i}{2R_i} = \frac{1}{2} = 50\%$$

Při navrhování elektrických obvodů se proto snažíme dosáhnout rozumného kompromisu mezi maximálním výkonem a maximální účinností.



## Maturitní otázka č. 19 – Stacionární magnetické pole

V okolí některých těles existuje magnetické pole, které působí magnetickou silou na některá tělesa ve svém okolí. Vlastnosti magnetu má i Země, a proto můžeme pomocí volně otáčivých magnetů určovat zeměpisnou polohu. N pól volně otáčivé magnetky bývá výrazněji zbarven a v magnetickém poli Země se natáčí k jižnímu magnetickému pólu (ten je však v blízkosti severní zeměpisného pólu → **magnetická deklinace**).

Každý magnet se skládá ze severního (N) a jižního pólu (S). Mezi těmito póly se nachází tzv. netečné pásmo. N a S pól magnetu od sebe nelze oddělit. Neexistují částice, které by byly zdrojem magnetického pole jako např. elektrony a protony u elektrického pole. Schopnost působit na předměty ve svém okolí magnetickou silou je dána uspořádáním látky. Magnetické pole popisujeme pomocí magnetických indukčních čar, jejichž tvar odvozujeme podle seskupení ocelových pilin v magnetickém poli.

**Magnetická indukční čára** je prostorově orientovaná křivka, jejíž tečna sestavená v libovolném jejím bodě má směr osy velmi malé magnetky, umístěné v tomto bodě. Je to vždy uzavřená křivka. Orientace indukčních čar vně magnetu určuje směr od N k S pólu magnetu.

### Magnetické pole vodiče s proudem

Magnetické pole existuje nejen v okolí trvalých magnetů, ale i v okolí vodičů s proudem. Magnetické indukční čáry přímého vodiče s proudem mají tvar soustředných kružnic rozložených v rovině kolmé k vodiči se středy v průsečíku vodiče s rovinou. K určení orientace indukčních čar v okolí přímého vodiče s proudem používáme **Ampérovu pravidlo pravé ruky**:

*„Naznačíme uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby vztyčený palec ukazoval směr proudu ve vodiči, ostatní pokrčené prsty pak ukazují orientaci magnetických indukčních čar.“*



Na rozdíl od elektrických siločar jsou magnetické indukční čáry uzavřené křivky, protože u magnetického pole neexistují částice, které by byli zdrojem tohoto pole. Elektrické pole proto označujeme jako **zřídlové** (zdrojem jsou nabitě částice), naproti tomu magnetické pole označujeme jako pole **vírové**.

Magnetické pole, jehož indukční čáry jsou rovnoběžné stejně vzdálené přímky, nazýváme **homogenní**. Každé reálné magnetické pole je nehomogenní, za homogenní pole lze považovat pouze část magnetického pole v blízkosti osy válcové cívky nebo pole mezi nesouhlasnými a rozlehlými póly magnetu v malé vzájemné vzdálenosti.

### Magnetická síla

Obdobně jako gravitační nebo elektrické pole může i magnetické pole působit silou na některé předměty v něm umístěné – tato síla se nazývá **magnetická síla  $F_m$** .

Vzniká, když dojde ke vzájemnému působení magnetických polí. Její velikost závisí jednak na velikosti (intenzitě) magnetických polí a jednak na úhlu, který svírají odpovídající indukční čáry.

## Magnetická indukce

Abychom mohli magnetické pole v každém bodě kvantitativně popsat, zavádíme fyzikální veličinu **magnetická indukce** –  $[B] = T$  (Tesla)

Pro velikost magnetické indukce platí:

$$B = \frac{F_m}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}$$

Magnetická indukce polí v blízkosti stálých magnetů dosahují hodnoty řádově  $10^{-2}$  T, magnetické pole Země má indukci řádově  $10^{-5}$  T, ve velkých elektromagnetech dosahují pole až několik jednotek T.

Uvažujeme-li přímý vodič určité délky ( $l$ ), kterým protéká proud ( $I$ ) a který je umístěn kolmo k indukčním čarám homogenního magnetického pole, působí na něj magnetická síla

$$F_m = B \cdot I \cdot l$$

→ magnetická indukce  $B$  má význam konstanty úměrnosti, která charakterizuje silové působení magnetického pole. Její směr je vždy určen směrem indukčních čar.

Obecně platí, že pro velikost magnetické síly závisí na úhlu alfa mezi vodičem a indukčními čarami:

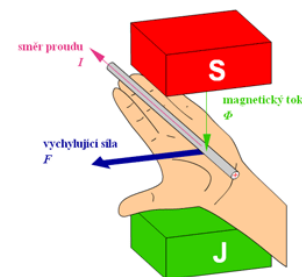
$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$$

**Indukční čára** je prostorově orientovaná křivka, jejíž tečna sestavená v libovolném jejím bodě má směr vektoru magnetické indukce.

Vektor  $F_m$  je kolmý na vodič, tak i na magnetické indukční čáry →

k určení jejího směru užíváme **Flemingovo pravidlo levé ruky**:

„Přiložíme otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly směr proudu ve vodiči a indukční čáry vstupovaly do dlaně. Vztyčený palec pak ukazuje směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem.“



Pro magnetickou sílu platí vektorová rovnice:

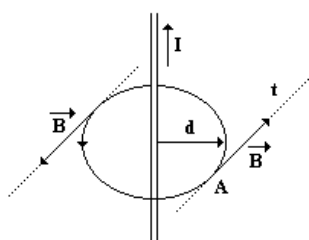
$$\vec{F}_m = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Vztah pro magnetickou sílu platí v této podobě pouze pro přímý vodič s proudem – u vodičů jiného tvaru určíme výslednou magnetickou sílu jako vektorový součet silových působení na velmi krátké úseky vodiče.

## Magnetické pole rovnoběžných vodičů s proudem

V okolí každého vodiče s proudem je magnetické pole – v magnetickém poli působí na vodič s proudem magnetická síla → jsou-li blízko sebe dva vodiče s proudem, působí na sebe navzájem magnetickými silami. Směr magnetické síly, která působí na jeden z vodičů s proudem závisí na směru proudu v druhém vodiči.

Vektor magnetické indukce  $B$  velmi dlouhého vodiče s proudem vždy leží v rovině kolmé k vodiči a má směr tečny k magnetické indukční čáře.



Pro velikost magnetické indukce  $B$  ve vzdálenosti  $d$  od vodiče platí vztah:

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2\pi d}$$

$\mu$  ... permeabilita prostředí ...  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

$\mu_0$  ... permeabilita vakua ...  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$

Na vodič s proudem  $I_1$  bude působit magnetická síla:  $F_{m1} = B_2 I_1 l = \mu \cdot \frac{I_1 I_2}{2\pi d} \cdot l$

Na vodič s proudem  $I_2$  bude působit magnetická síla:  $F_{m2} = B_1 I_2 l = \mu \cdot \frac{I_1 I_2}{2\pi d} \cdot l$

Směry magnetických sil, kterými na sebe působí rovnoběžné vodiče s proudem, závisí na směrech proudů ve vodičích.

Při souhlasných směrech proudů se vodiče přitahují, při nesouhlasných směrech proudů se odpuzují.

Na základě vzájemného silového působení mezi dvěma rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči s proudem je definována základní jednotka elektrického proudu – **Ampér**

*„Jeden ampér je proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného průřezu umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 metr od sebe vyvolá mezi vodiči sílu o velikosti  $2 \cdot 10^{-7}$  N.m na 1 metr vodiče.“*

### Magnetické pole cívky

Cívka vznikne navinutím vodiče na jádro různého tvaru. K vytvoření téměř homogenního pole používáme **solenoid** (= dlouhá válcová cívka s velkým počtem závitů, jejichž průměr je mnohem menší než délka cívky, používáme ho k vytvoření téměř homogenního pole.

Orientaci indukčních čar cívky určujeme pomocí **Ampérova pravidla pravé ruky**:

*„Pravou ruku přiložíme k cívice tak, aby pokrčené prsty ukazovaly dohodnutý směr proudu v závitě cívky. Odtahný palec pak ukazuje orientaci indukčních čar v dutině cívky a tím i severní pól cívky.“*

Pro velikost magnetické indukce uvnitř solenoidu s  $n$  závity o délce  $l$ , kterou prochází proud  $I$ , platí:

$$B = \mu \cdot \frac{NI}{l}$$

$\frac{N}{l}$  ... **hustota závitů** (počet závitů na jednotku délky cívky)

Cívky různých tvarů mají široké využití v technické praxi: elektromagnety, cívky elektromotorů, vychylovací cívky v obrazovkách ... pro vytváření homogenního magnetického pole se používají také:

- **prstencové cívky** – jádro ve tvaru prstence
- **toroidní cívky** – jádrem je prstenek s kruhovým průřezem (anoid)

### Částice s nábojem v magnetickém poli

V magnetickém poli působí na vodič s proudem magnetická síla. Protože je elektrický proud tvořen usměrněným pohybem volných částic s nábojem, tak na každou pohybující se nabitou částici působí magnetická síla. Celkovou sílu působící na vodič s proudem pak můžeme považovat za výslednici sil působících na jednotlivé nosiče proudu.

počet volných elektronů ve vodiči ...  $N$

rychlost pohybu elektronů ve vodiči ...  $v$

celkový náboj všech volných elektronů ...  $Q = N \cdot (-e) = N \cdot (-1,602 \cdot 10^{-19})$

doba, za kterou projde vodičem celkový náboj ...  $t = l/v$

Pokud odpovídá náboji, který projde vodičem za dobu  $t \rightarrow$

$$I = \frac{|Q|}{t} = \frac{Ne}{t} = \frac{Nev}{l}$$

Pro výslednou magnetickou sílu, která působí na vodič o délce  $l$  s  $N$  elektrony, platí:



$$F_m = B \cdot I \cdot l = Bnev$$

Pro magnetickou sílu, působící na jeden elektron, pak platí:  $F_{m1} = Bev$

Tento vzorec platí, pokud je vodič kolmý k indukčním čarám. V opačném případě (kdy svírá s čarami úhel alfa), musíme využít vektorového součinu  $F_{m1} = e \cdot (v \times B)$ , kdy pro velikost síly platí  $F_{m2} = Bev \cdot \sin \alpha$

Vletí-li elektron rychlostí  $v$  do magnetického pole o indukci  $B$ , která je kolmá na vektor  $v$ , působí na něj podle Flemmingova pravidla magnetická síla kolmá na vektor rychlosti  $v$ . Tato síla způsobuje zakřivení trajektorie elektronu a stává se silou dostředivou.

$$F_m = F_d$$

$$B \cdot e \cdot v = \frac{mv^2}{r}$$

Jestliže se částice s nábojem pohybuje současně v elektrickém i magnetickém poli, působí na ní současně dvě síly – elektrická  $F_e = E \cdot Q$  a magnetická  $F_m = Q \cdot (v \times B)$ . Výslednice těchto dvou sil se nazývá **Lorentzova síla**  $F = F_e + F_m = Q \cdot (E + (v \times B))$

Působení magnetického pole na částice s nábojem se využívá např. při vedení elektrickém vychylování paprsku v televizní obrazovce nebo v urychlovačích elementárních částic.

### Magnetické vlastnosti látek

Závisí na relativní permeabilitě dané látky, kterou určují vlastnosti atomů, z nichž je látka složena. Jednotlivé elektrony v atomech vytvářejí elementární magnetická pole, která se navzájem skládají na výsledné magnetické pole atomů a výsledné magnetické pole látky. Právě podle vnitřních vlastností dělíme magnetické látky na:

#### Diamagnetické látky:

Mírně zeslabují magnetické pole; relativní permeabilita je menší než jedna; např. zlato, měď, sklo, kapaliny, inertní plyny, voda, ...

#### Paramagnetické látky:

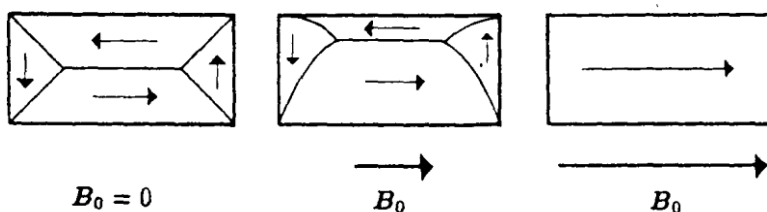
Mírně zesilují magnetické pole; relativní permeabilita je větší než jedna; např. sodík, draslík, hliník, vzduch, ...

#### Feromagnetické látky:

Značně zesilují magnetické pole; relativní permeabilita je několikanásobně větší než jedna; např. železo, kobalt, nikl, ...

Již velmi slabým vnějším magnetickým polem lze u těchto látek vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole uvnitř látky zesílí → dochází k **magnetování látky**. Ta se chová jako trvalý magnet i když vnější působení pole zanikne.

Příčinou magnetizace je působení tzv. výměnných sil mezi sousedními atomy. Vlivem těchto sil nastává i bez vnějšího souhlasné uspořádání magnetických polí atomů v malé oblasti látky → vznikají mikroskopické oblasti se stejným uspořádáním atomů – tzv. **magnetické domény**. Ty si můžeme představit jako elementární magnety, které jsou orientovány nahodile. Ve vnějším magnetickém poli se však zorientují souhlasně a látka tak získává vlastnosti magnetu.



**Využití:** jádra cívek v elektromagnetech, v transformátorech, v elektromotorech, ...

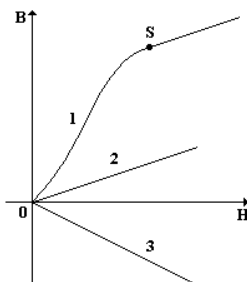
Feromagnetismus látek se projevuje pouze tehdy, když je materiál v krystalickém stavu. V kapalném nebo v plynném stavu se feromagnetické látky chovají jako paramagnetické. **Feromagnetismus je vlastností struktury látky, nikoliv jednotlivých atomů.**

Pro každou feromagnetickou látku existuje tzv. **Curieova teplota**, po jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou např. pro železo je to 770°C.

Mezi feromagnetické látky patří i tzv. **ferity** (neboli feromagnetické látky) – sloučeniny  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s oxidy některých kovů, používají se jako permanentní magnety.

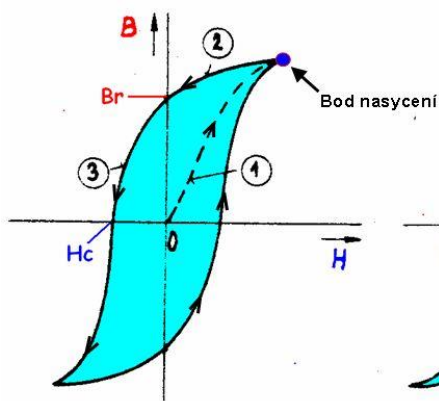
### Magnetické materiály v technické praxi

Magnetické látky se používají především jako jádra cívek. Když cívkou s feromagnetickým jádrem prochází proud, nastává zmagnetování jádra, a to se pak stává magnetem → cívka funguje jako elektromagnet.



S rostoucím proudem se magnetická indukce jádra zvětšuje až do určité hodnoty, kdy je jádro magneticky nasyceno (tj. všechny domény jsou orientovány ve směru indukce). Grafem závislosti magnetické indukce na protékajícím proudě u feromagnetických látek (1) je **křivka prvotní magnetizace**.

**S ... stav magnetického nasycení**; od tohoto bodu se s rostoucím proudem zvyšuje pouze magnetická indukce samotné cívky (bez jádra)



Závislost magnetické indukce pole jádra cívky na proudě protékajícím cívkou vyjadřuje tzv. **hysterezní smyčka**

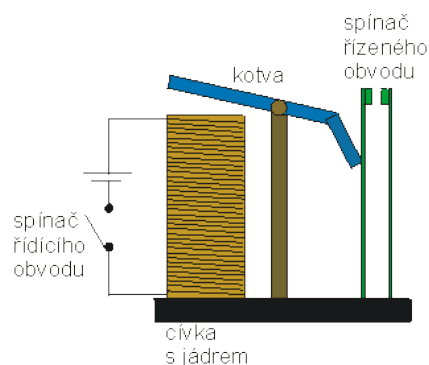
Když proud v cívce přerušíme, zůstává jádro částečně zmagnetováno a jeho pole má zbytkovou neboli **remanentní indukci ( $B_r$ )**

Podle velikosti  $B_r$  rozlišujeme materiály na:

- magneticky tvrdé** – mají velkou remanentní indukci, širokou hysterezní smyčku, po přerušení proudu se chovají jako trvalé magnety. Jsou vhodné jako permanentní magnety (např. ocel s vysokým obsahem C)
- magneticky měkké** – mají malou  $B_r$ , úzkou hysterezní smyčku, po přerušení proudu jejich magnetické pole zcela zaniká. Jsou vhodné jako jádra elektromagnetů nebo v transformátorech, ...

### Praktické použití elektromagnetu

- 1) Práce s kovovými předměty (na šrotišti)
- 2) elektromagnetické relé



V blízkosti elektromagnetu, tvořeného cívkou a jádrem z magneticky měkké látky, je pohyblivá kotva (též z magneticky měkké látky). Ta se dotýká pružných kontaktů, jimiž je ovládán řízený obvod. Prochází-li cívkou proud, kotva se přitáhne k jádru cívky a řízeným obvodem prochází elektrický proud. Pokud cívkou přestane procházet proud, kotva se vrací do původní polohy a řízený obvod se rozpojuje.

Užití: automatické regulační a řídicí zařízení

- 3) magnetický záznam signálu – Je založen na trvalém zmagnetování vrstvy feromagnetika na nosiči z plastického materiálu (pásek nebo disk → magnetofon, video, diskety). Záznam se uskutečňuje pomocí elektromagnetu, který nazýváme **záznamová hlava**.

### Intenzita magnetického pole

$$B = \mu \cdot \frac{NI}{l} = \mu \cdot H \quad \rightarrow \quad H = \frac{NI}{l}$$

**H ... velikost intenzity magnetického pole**

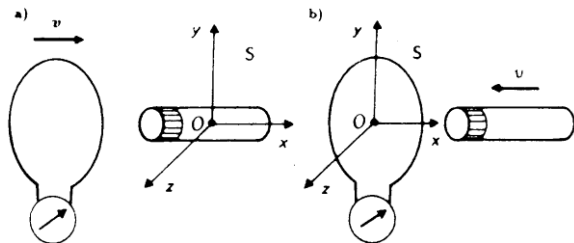
## Maturitní otázka č. 20 – Nestacionární magnetické pole

Pro nestacionární pole je charakteristické, že se jeho *magnetická indukce s časem mění*. Zdrojem tohoto pole může být:

1. časově proměnný proud v nepohyblivém vodiči (popř. pohybující se částice s nábojem)
2. pohybující se vodič s proudem (konstantním nebo časově proměnným)
3. pohybující se permanentní magnet nebo elektromagnet
4. časově proměnné elektrické pole

Děje v nestacionárním magnetickém poli jsou vždy spojeny se vznikem nestacionárního elektrického pole. Jsou to děje elektromagnetické, při nichž nestacionární elektrické a magnetické pole jsou navzájem neoddělitelná a vytvářejí jediné pole elektromagnetické.

### Elektromagnetická indukce



Jestliže je vodivý obvod, např. rovinný závit, v časově proměnném magnetickém poli, pak v obvodu vzniká indukované elektrické pole a na koncích obvodu (v místě, kde je obvod přerušen) je indukované elektromotorické napětí  $U_i$ . Je-li obvod uzavřen, prochází jím indukovaný proud  $I_i$ .

*Nestacionární magnetické pole je příčinou vzniku indukovaného elektrického pole a tento jev nazýváme **elektromagnetická indukce**. Mezi konci vodiče v nestacionárním magnetickém poli je indukované elektromotorické napětí  $U_i$  a uzavřeným obvodem prochází indukovaný proud  $I_i$ .*

### Magnetický indukční tok

S magnetickou indukcí těsně souvisí skalární veličina **magnetický indukční tok**  $\Phi$ , definovaná v homogenním magnetickém poli vztahem:

$$\Phi = BS$$

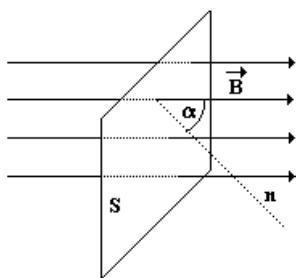
$S$  ... obsah rovinné plochy

$$[\Phi] = T \cdot m^2 = Wb \text{ (weber)}$$

Obecně je magnetický indukční tok určen vztahem:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B_n \cdot S$$

$B_n$  ... velikost složky vektoru  $B$  ve směru normály plochy



Magnetický indukční tok je tedy největší, je-li vektor  $B$  na plochu kolmý ( $\alpha = 0$ ). Naopak magnetický indukční tok je nulový, když je vektor  $B$  s plochou rovnoběžný ( $\alpha = \pi/2$ ).

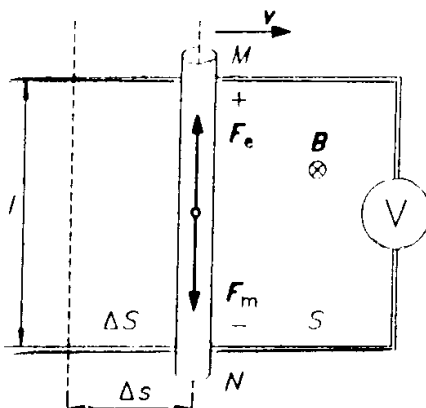
Pro magnetické pole je charakteristické, že celkový magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou plochou je nulový. To znamená, že počet magnetických indukčních čar, které do plochy vstupují, je roven počtu čar, které z plochy vystupují. Tím se magnetické pole liší od elektrického, které je tvořeno náboji.

## Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Elektromagnetickou indukci objevil Michael Faraday na základě experimentů vycházejících z úvah o těsné souvislosti elektrických a magnetických jevů. Faraday vyšel z poznatků, že elektrický proud vytváří magnetické pole. Faraday naopak usiloval o důkaz, že magnetické pole vytváří elektrický proud. Úspěchu dosáhl, když navinul na společné jádro dvě cívky a při změně proudu v jedné z nich vznikl proud ve druhé cívce. Zobecnění jeho experimentů vyústilo ve **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**: *Indukované elektromotorické napětí  $U_i$  je rovno záporně vzaté časové změně magnetického indukčního toku.*

$$U_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

### Odvození zákona elektromagnetické indukce



Vydeme z modelového pokusu (obr.). V homogenním magnetickém poli o magnetické indukci  $B$  se kolmo k indukčním čarám pohybuje vodič délky  $l$ . Vodič se při pohybu dotýká dvou rovnoběžných vodič spojených s voltmetrem. Při pohybu vodiče vpravo se ručka voltmetru vychýlí na jednu stranu a při pohybu vlevo na opačnou stranu.

Při pohybu vodiče působí na elektrony ve vodiči magnetická síla o velikost  $F_m = Bev$ . Působením této síly se elektrony pohybují směrem k dolní části vodiče, kde vzniká záporný náboj. Horní část vodiče je nabitá kladně, takže ve vodiči

vzniká indukované elektrické pole. Intenzita indukovaného elektrického pole má velikost

$$E_i = \frac{F_m}{e} = B \cdot v$$

Indukované elektrické pole způsobuje, že mezi konci vodiče (body M, N) je indukované napětí  $U_i$  o velikosti:

$$U_i = E_i l = B \cdot v \cdot l$$

Tento vztah se dá napsat ve tvaru:

$$U_i = B \cdot \frac{\Delta s l}{\Delta t} = B \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

kde  $\Delta s$  je dráha, kterou vodič urazí za dobu  $\Delta t$ , a  $\Delta S = \Delta s l$  je změna obsahu plochy opsané vodičem za tuto dobu. Součin  $B\Delta S$  je změna magnetického indukčního toku  $\Delta\Phi$ , takže:

$$U_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

V obvodu na obrázku plní pohybující se vodič funkci zdroje napětí a voltmetr ukazuje hodnotu svorkového napětí. Pokud můžeme zanedbat proud procházející voltmetrem, má toto svorkové napětí  $U$  stejnou hodnotu jako indukované napětí  $U_i$ . To nám umožňuje měřit napětí  $U_i$ , které má význam elektromotorického napětí. Obě napětí mají opačnou polaritu, což ve vztahu pro indukované napětí vyjádříme znaménkem mínus:

$$U_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

### Indukovaný proud, Lenzův zákon

V uzavřeném obvodu o odporu  $R$  vytvoří indukované napětí indukovaný proud

$$I_i = \frac{U_i}{R}$$

Orientaci indukovaného proudu v uzavřeném vodiči (elektrickém obvodu) určuje **Lenzův zákon**: *Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.*

Směr indukovaného proudu je určen **Flemingovým pravidlem pravé ruky**: *Položíme-li pravou ruku k vodiči tak, aby odtažený palec ukazoval směr pohybu vodiče a vektor magnetické indukce vstupoval do dlaně, pak prsty ukazují směr indukovaného proudu ve vodiči.*

Orientaci indukovaného proudu v uzavřeném vodiči dokazuje pokus, kdy působí magnet na pohyblivý kroužek. Lehký hliníkový kroužek je pohyblivě zavěšen na stojánku. Jestliže do kroužku prudce zasuneme magnet, kroužek se vychýlí ve směru pohybu magnetu. Když naopak magnet vysuneme, kroužek se vychýlí na opačnou stranu, opět ve směru pohybu magnetu. Směr indukovaného proudu v kroužku je při zasunutí magnetu takový, že jeho magnetické pole odpuzuje magnet, tzn. působí proti změně, která ho vyvolala. Indukční čáry magnetického pole kroužku mají opačný směr než indukční čáry magnetu. Naopak při vysunutí magnetu vzniká proud opačného směru a jeho magnetické pole působí proti vysunutí magnetu. Indukční čáry magnetického pole kroužku jsou orientovány souhlasně jako magnetické indukční čáry magnetu a kroužek je magnetem přitahován

### Vlastní indukce, přechodný děj

Indukované elektrické pole vzniká ve vodiči i při změnách magnetického pole, které vytváří proud procházející vlastním vodičem. Tento jev se nazývá **vlastní indukce**. Např. náhlé přerušení proudu, který prochází cívku, má za následek vznik indukovaného napětí, které se projeví jiskrou v místě přerušení obvodu.

Vlastní magnetické pole, např. cívky s proudem, vytváří magnetický indukční tok  $\Phi$ , který prochází závity cívky. Jestliže cívka je v prostředí s konstantní permeabilitou, je tento indukční tok přímo úměrný proudu v cívce

$$\Phi = LI$$

Veličina  $L$  závisí na vlastnostech cívky a nazývá se **indukčnost** cívky. Je to důležitý parametr elektrického obvodu, obdobně jako odpor nebo kapacita.

Jestliže se za dobu  $\Delta t$  změní proud o  $\Delta I$ , změní se indukční tok o  $\Delta\Phi = L\Delta I$  a v cívce se indukuje napětí:

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L * \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$[L] = \frac{V \cdot s}{A} = \frac{Wb}{A} = H \text{ (henry)}$$

Vodič má indukčnost 1H, jestliže se v něm při rovnoměrné změně proudu o 1A za 1s indukuje elektromotorické napětí 1V.

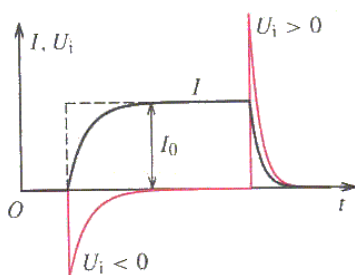
Indukčnost je vlastnost celého elektrického obvodu, všech prvků, které jsou v něm zapojeny. Indukčnost některých prvků, např. spojovacích vodičů je velmi malá. Nejčastěji se setkáme s indukčností cívek. Značnou indukčnost mají zejména cívky s uzavřeným feromagnetickým jádrem.

Indukčnost cívky závisí na její konstrukci a na permeabilitě  $\mu$  jádra. Např. dlouhá válcová cívka délky  $l$ , s obsahem plochy závitů  $S$  a s počtem  $N$  závitů má indukčnost:

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

Indukčnost cívek se projevuje zejména při přechodném ději, kdy se skokem změní napětí v elektrickém obvodu z hodnoty  $U_1$  na hodnotu  $U_2$  ( $U_1 < U_2$ ). Pokud je v elektrickém obvodu zařazen jen rezistor, zvětší se napětí na hodnotu  $U_2$  okamžitě a proud v obvodu se změní z hodnoty  $I_1$  ( $I_1 = U_1/R$ ) na hodnotu  $I_2$  ( $I_2 = U_2/R$ ).

Jestliže je do obvodu zařazena cívka o indukčnosti  $L$ , projeví se vlastní indukce tím, že při zapnutí zdroje se v cívkce indukují napětí, které má podle Lenzova zákona opačnou polaritu, než je napětí zdroje. Proud v obvodu se zvětšuje postupně a ustálí se na hodnotě  $I_2$  až po určité době. Naopak při zmenšení napětí se indukují napětí se stejnou polaritou, jakou má zdroj napětí a proud se opět zmenšuje po určitou dobu.



Popsaný jev vyplývá ze zákona zachování energie. Vytvoření magnetického pole, popř. jeho zánik jsou spojeny s přeměnami energie, které neprobíhají okamžitě, ale trvají nějakou dobu. Čím bude indukčnost větší, tím bude tato doba delší a narůstání proudu bude pomalejší. Indukčnost tak představuje určitou „setrvačnost“ ve vztahu ke změnám proudu v obvodu. V tomto smyslu má indukčnost v elektrodynamice analogický význam jako v mechanice hmotnost.

## Maturitní otázka č. 21 – Střídavý proud

Připojíme-li uzavřený elektrický obvod ke zdroji napětí, začne obvodem procházet elektrický proud. Podle použitého zdroje vzniká v obvodu proud různého typu. Použijeme-li zdroj, jehož napětí ani polarita se s časem nemění (např. elektrický článek), prochází obvodem stejnosměrný proud.

Pokud je zdrojem napětí např. cívka, která se rovnoměrně otáčí v magnetickém poli, je napětí na jejích koncích v čase proměnné (mění se velikost i směr) a jeho okamžitá hodnota je určena vztahem:

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

$u$  ... okamžitá hodnota napětí,  $U_m$  ... amplituda napětí,  $\omega$  ... úhlová rychlost otáčení cívky.

**Časově proměnné napětí s harmonickým průběhem nazýváme střídavé napětí.**

Připojíme-li uzavřený elektrický obvod ke zdroji střídavého napětí, bude jím procházet střídavý elektrický proud, který má rovněž harmonický průběh. Pro okamžitou hodnotu proudu platí:

$$i = I_m \cdot \sin \omega t$$

Zdroje střídavého napětí založené na otáčení cívek v magnetickém poli se v praxi používají častěji než zdroje stejnosměrného napětí. Střídavé napětí v energetice má frekvenci 50 Hz, střídavé napětí ve sdělovací technice může dosahovat až  $10^{10}$  Hz.

### Obvody střídavého proudu

Střídavý proud a jeho vztah ke střídavému napětí je ovlivněn vlastnostmi elektrického obvodu, který může být tvořen rezistory, cívkami, kondenzátory a jejich kombinacemi.

Tyto prvky charakterizujeme prostřednictvím příslušných parametrů a to *odporu* ( $R$ ), *indukčnosti* ( $L$ ) a *kapacity* ( $C$ ). Pokud je do obvodu zařazen prvek s jediným parametrem, vznikne **jednoduchý obvod** střídavého proudu.

Je-li v obvodu více prvků s více parametry, tvoří **složený obvod** střídavého proudu.

Při výkladu dějů v obvodech střídavého proudu sledujeme, jak parametr prvku v obvodu ovlivňuje:

- velikost napětí a proudu v obvodu**
- fázový rozdíl mezi napětím a proudem**

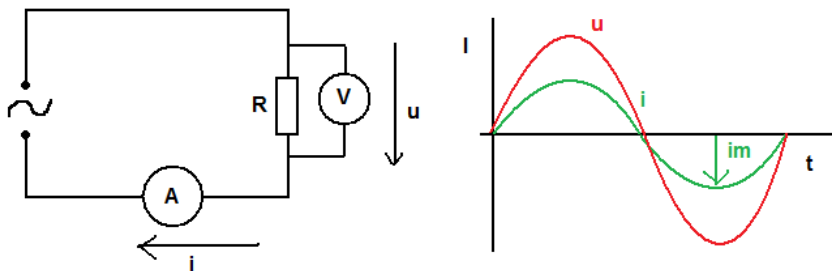
Pro znázornění fázového rozdílu používáme časové a zejména fázorové diagramy.

### Obvod střídavého proudu s odporem

$$X_R = R$$

Nejjednodušší střídavý obvod s odporem je tvořen rezistorem, který má pouze odpor  $R$ .

Po připojení obvodu ke zdroji střídavého napětí jím bude procházet střídavý proud, jehož okamžitá hodnota je dána vztahem:



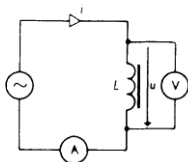
$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cdot \sin \omega t = I_m \cdot \sin \omega t$$



Pro jednoduchý obvod střídavého proudu s odporem platí Ohmův zákon stejně jako pro obvod se stejnosměrným proudem. Odpor rezistoru (R) je v obvodu střídavého proudu stejný jako v obvodu stejnosměrného proudu. Odpor v obvodech střídavého proudu nazýváme též **rezistence ( $X_R$ )** obvodu s odporem mají obě veličiny stejnou fázi a jejich fázový rozdíl:  $\Delta\varphi = 0$

### Obvod střídavého proudu s indukčností

$$X_L = \frac{U_m}{I_m} = \omega \cdot L$$



Tento obvod je tvořen cívkou, která má pouze indukčnost L. Střídavý proud procházející vinutím cívky vytváří časově proměnné magnetické pole, které způsobuje, že se v cívce indukuje napětí, které má opačnou polaritu než napětí zdroje.

V důsledku toho proud v obvodu nabývá amplitudy později než napětí → proud se zpožďuje za napětím a vzniká záporný fázový rozdíl  $\Delta\varphi = -\pi/2$  rad

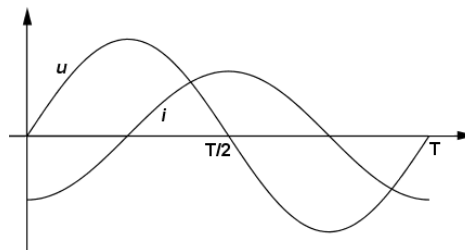
Pro okamžitou hodnotu proudu v obvodu platí:

$$i = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Velikost napětí, které se v cívce indukuje závisí na frekvenci → cívka se chová jako odpor, jehož velikost se s rostoucí frekvencí zvětšuje. Velikost indukovaného napětí závisí tedy na vlastní indukčnosti cívky – čím větší je indukčnost, tím větší je odpor cívky.

Na rozdíl od rezistoru však v cívce nedochází k přeměně energie střídavého proudu na teplo, v cívce pouze vzniká a zaniká magnetické pole a to se projevuje fázovým rozdílem napětí a proudu v obvodu. Obvod střídavého proudu s indukčností charakterizujeme veličinou **induktance ( $[X_L] = \text{ohm}$ )**.

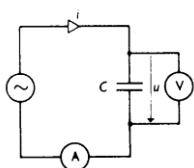
V technické praxi se k dosažení velkých induktancí používají tlumivky.



### Obvod střídavého proudu s kapacitou

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

Tento obvod je tvořen kondenzátorem, který má pouze kapacitu C



Kondenzátor připojený ke zdroji střídavého napětí se periodicky nabíjí a vybíjí. Mezi deskami kondenzátoru proud neprochází, mění se pouze intenzita elektrického pole a dielektrikum se střídavě polarizuje. Nabíjecí proud kondenzátoru je největší, pokud je kondenzátor nenabitý (napětí mezi jeho deskami je nulové).

Je-li kondenzátor nabitý na maximální napětí  $U_m$ , prochází obvodem nulový proud. Díky tomu v obvodu střídavého proudu s kapacitou proud předbíhá napětí a vzniká tak fázový rozdíl  $\Delta\varphi = \pi/2$

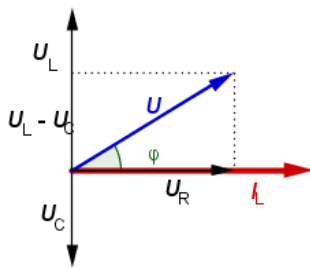
Pro okamžitou hodnotu proudu v obvodu platí:

$$i = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

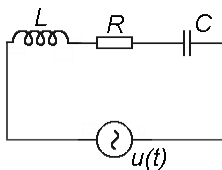
Obvod střídavého proudu charakterizuje veličina **kapacitance ( $[X_C] = \text{ohm}$ )**

S rostoucí frekvencí střídavého proudu se hodnota kapacitance snižuje.

### Složený obvod střídavého proudu



Obvody střídavého proudu mají v praxi odpor, indukčnost i kapacitu, což ovlivňuje vlastnosti těchto obvodů. Obvody s více parametry (R, L, C) nazýváme **složené obvody** střídavého proudu.



Nejjednodušším složeným obvodem je obvod s odporem, indukčností a kapacitou v prvcích zapojených za sebou – tzn. **sériový RLC obvod**.

Všemi prvky obvodu prochází stejný proud, ale napětí na jednotlivých prvcích se liší velikostí i fázovým posunem.

Pro amplitudu výsledného napětí platí:  $U_m^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$

Protože mezi amplitudou napětí a proudu platí:

$$U_R = R \cdot I_m$$

$$U_L = \omega \cdot L \cdot I_m$$

$$U_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m$$

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

Pro fázový posun napětí a proudu  $\varphi$  platí:  $\tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$

Sériový RLC obvod jako celek charakterizuje jediný parametr, který nazýváme **impedance** ( $[Z] = \text{ohm}$ )

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

Kromě impedance zavádíme též veličinu **reaktance** ( $[X] = \text{ohm}$ )

$$X = X_L - X_C$$

Charakterizuje tu část střídavého obvodu, kde se elektromagnetická energie nemění na teplo, ale pouze na energii elektrického a magnetického pole. Zavedením reaktance se zjednoduší odvozené vztahy:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \tan \varphi = \frac{X}{R}$$

Je-li indukance obvodu střídavého proudu stejně velká jako jeho kapacitance, je impedance rovna odporu a proud v obvodu dosahuje maximální hodnoty. Tento případ označujeme jako **rezonance střídavého obvodu**. Příslušnou frekvenci, při níž dochází k rezonanci nazýváme **rezonanční frekvence**.

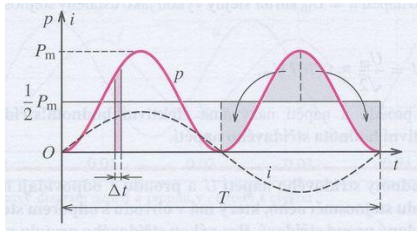
$$X_L = X_C \quad \rightarrow \quad Z = 0$$

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad \rightarrow \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \rightarrow \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

### Výkon střídavého proudu s odporem

Výkon stejnosměrného proudu je dán vztahem  $P = UI \rightarrow$  analogicky je okamžitá hodnota výkonu střídavého proudu dána vztahem:  $p = ui$

Pro obvod, který má pouze odpor  $R$  je napětí a proud ve fázi a platí:  $p = ui = Ri^2 = RI_m^2 \cdot \sin^2 \omega t$   
 $p = P_m \cdot \sin^2 \omega t$



Okamžitá hodnota výkonu se mění s dvojnásobnou frekvencí než proud. Abychom mohli určit střední hodnotu výkonu, musíme znát celkovou práci (tzn. energii, která se v odporu změní na teplo) střídavého proudu za periodu  $T$ .

Za velmi krátkou dobu  $\Delta t$  vykoná střídavý proud elementární práci  $\Delta W = p \cdot \Delta t \rightarrow$  celková práce je rovna obsahu plochy ohraničené křivkou grafu okamžitého výkonu a časovou osou. Tato plocha je stejná jako

obsah obdélníku se stranami  $T$  a  $P_m/2$

$$W = \frac{P_m}{2} \cdot T = \frac{1}{2} R \cdot I_m^2 \cdot T$$

Pro střední výkon střídavého proudu platí:  $\bar{P} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} R I_m^2$

Harmonický průběh střídavého proudu o amplitudě  $I_m$  má tedy stejný střední výkon jako stejnosměrný proud  $I_{ef}$  a platí:

$$R I_{ef}^2 = \frac{1}{2} R I_m^2 \rightarrow I_{ef} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_m$$

$I_{ef}$  ... efektivní hodnota proudu

Obdobnou úvahou dospějeme k závěru, že v obvodu s odporem má střídavý proud o napětí  $u = U_m \cdot \sin \omega t$

stejný výkon, jako stejnosměrný proud o napětí  $U_{ef}$   $U_{ef} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot U_m$

**Efektivní hodnota střídavého proudu** je hodnota stejnosměrného proudu, který má v obvodu s odporem stejný výkon jako daný proud střídavý.

**Efektivní hodnota střídavého napětí** je hodnota stejnosměrného napětí, které má v obvodu s odporem stejný výkon jako dané střídavé napětí.

Efektivní hodnoty střídavého napětí a proudu ukazují také měřicí přístroje v obvodech střídavého proudu. Pro výkon střídavého proudu v obvodu s odporem platí:

$$P = U_{ef} \cdot I_{ef}$$

### Výkon střídavého proudu v obvodu s impedancí

Ve střídavém obvodu, který má kromě odporu i indukčnost a kapacitu, je výkon střídavého proudu ovlivněn fázovým rozdílem mezi napětím a proudem v obvodu. Na odporu se přeměňuje elektrická energie zdroje na teplo, na cívce na energii magnetického pole a na kondenzátoru na energii elektrického pole. Tyto dva děje nejsou spojeny s konáním užitečné práce.

Čím větší je fázový rozdíl mezi napětím a proudem v obvodu, tím menší je užitečný neboli **činný výkon** střídavého proudu:

$$P = \frac{1}{2} R I_m^2 = \frac{1}{2} R I_m \cdot \frac{U_m}{Z} = \frac{1}{2} \sqrt{2} U_{ef} \cdot \sqrt{2} I_{ef} \cdot \frac{R}{Z} = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \frac{R}{Z} = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi$$

$P_\zeta = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi$   $P_\zeta$  ... činný výkon,  $\varphi$  ... fázový posun mezi  $u$  a  $i$ ,  $\cos \varphi$  ... **účinník** (určuje účinnost přenosu energie ze zdroje střídavého napětí do spotřebiče)

**Činný výkon** odpovídá té části elektrické energie dodané zdrojem, která se v obvodu za jednotku času mění v teplo nebo užitečnou práci.

**Jalový výkon** odpovídá té části elektrické energie dodané zdrojem, která se v obvodu za jednotku času mění v elektrické nebo magnetické pole  $\rightarrow$  tato energie neúčinně kmitá mezi zdrojem a spotřebičem  $P_j =$

$$U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin \varphi$$

**Zdánlivý výkon** je součet činného a jalového výkonu

$$P_z = U_{ef} \cdot I_{ef}$$

Při konstrukci elektrických strojů a zařízení musíme dbát na to, aby účinník byl co největší. Proto např. k elektromotorům s velkou indukčností připojujeme tzv. *kompensační kondenzátory*. Účinník u elektrických strojů pak počítáme jako podíl činného a zdánlivého výkonu.

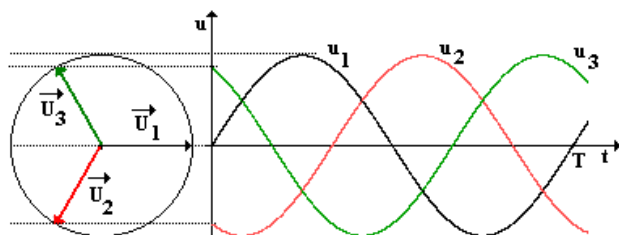
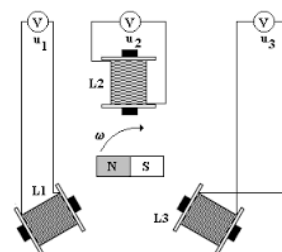
$$\cos \varphi = \frac{P_c}{P_z}$$

## Střídavý proud v energetice

Energetika je důležitým odvětvím hospodářství a zabývá se výrobou a přenosem elektrické energie. Primárními zdroji elektrické energie je uhlí, jaderné palivo a voda v přehradách. Dále pak ropa, zemní plyn, vítr, sluneční záření a biomasa. Přeměna energie primárních zdrojů se uskutečňuje v elektrárnách, kde pracují generátory střídavého napětí, které nazýváme alternátory.

## Generátor střídavého proudu

Základním principem generátoru střídavého proudu je elektromagnetická indukce a vznik elektrického napětí v cívkách v časově proměnném magnetickém poli. Buď se otáčí cívka v magnetickém poli, nebo se otáčí zdroj magnetického pole v prostoru mezi stacionárními cívkami. V elektrárnách se používá druhý princip tzn., že otáčivý pohyb koná elektromagnet, který tvoří rotor alternátoru. Střídavé napětí se indukuje v soustavě cívek, kterou nazýváme



stator. Tato

konstrukce umožňuje odvádět proud z alternátoru pevnými svorkami a vznikají tak menší ztráty. Stator trojfázového alternátoru je tvořen třemi cívkami, jejichž osy svírají navzájem úhly 120°. Uprostřed mezi cívkami se otáčí elektromagnet. Na obvodu tohoto elektromagnetu jsou vyfrézovány

drážky a do nich vloženo tzv. *budící vinutí*. Tímto vinutím prochází proud z generátoru stejnosměrného napětí, který se nazývá budič.

Pro okamžité hodnoty napětí indukovaného v jednotlivých cívkách platí:  $u_1 = U_m \cdot \sin \omega t$

$$u_2 = U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$u_3 = U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)$$

Rotory alternátorů se obvykle otáčejí s frekvencí 50 Hz. Alternátor je obvykle spojen s hřídelí hnací turbíny. Celé ústrojí se pak nazývá **turbogenerátor**.

## Trojfázová soustava střídavého napětí

Tři fázově posunutá napětí z alternátoru bychom mohli rozvádět šesti vodiči. V praxi se však používají sítě, kde jsou některé vodiče vhodně propojeny. Trojfázová soustava střídavého napětí je založena na poznatku, že součet okamžitých hodnot střídavých napětí indukovaných na cívkách je stále nulový:  $u_1 + u_2 + u_3 = 0 \text{ V}$

Díky tomuto poznatku lze spojit jeden konec každé z cívek do společného uzlu (0). K tomuto uzlu pak připojíme tzv. nulovací vodič (N) a k druhým koncům cívek tzv. fázové vodiče (L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>).

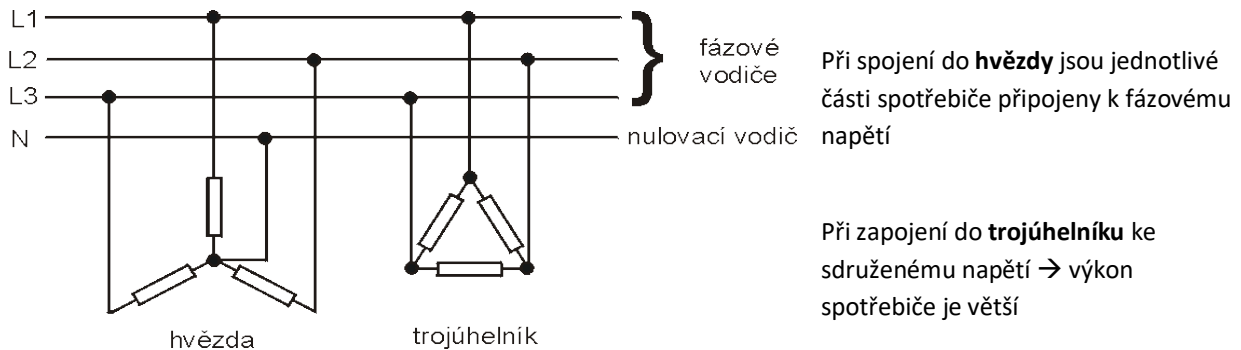
**Fázová napětí** je napětí mezi fázovými vodiči a nulovacím vodičem (230 V)

**Sdružené napětí** je napětí mezi dvěma fázovými vodiči (400 V)

- efektivní hodnota sdruženého napětí je  $\sqrt{3}$ -krát větší než efektivní hodnota sdruženého napětí

Spotřebitelská síť je konstruována tak, aby jednotlivé fázové vodiče byly připojenými spotřebiči zatíženy přibližně rovnoměrně. V případě rovnoměrného zatížení fázových vodičů prochází nulovacím vodičem nulový proud  $i_n = i_1 + i_2 + i_3$ . V praxi není proud  $i_n$  nulový, ale vždy má mnohem menší hodnotu než proud ve fázových vodičích.

Spotřebiče konstruované pro větší výkon (např. elektromotory pro míchačky, pily apod.) se připojují současně ke všem fázovým vodičům. Elektrický obvod těchto spotřebičů má 3 stejné části zapojené buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku.



### Elektromotor na trojfázový proud

= zařízení, ve kterém se elektrická energie přeměňuje na energii mechanickou. Je založen na pohybu vodičů s proudem v magnetickém poli, které je obvykle buzeno proudem ve vinutí statoru. Trojfázový elektromotor má dvě části:

- 1. STATOR** – je obdobné konstrukce jako stator alternátoru (soustava 3 cívek s úhlem mezi osami  $120^\circ$ )
- 2. KOTVA** = válec zhotovený z ocelových plechů s drážkami, ve kterých je uloženo vinutí
  - v čelech rotoru jsou vodiče spojeny prstenci → vinutí má podobu klece – tzv. **klecové vinutí**
  - vodiče kotvy jsou navzájem spojeny → tento druh označujeme jako **motor s kotvou nakrátko**
  - ke kotvě nevedou žádné přívodní vodiče

Přivedeme-li do cívek statoru střídavý proud, vytvoří se v prostoru mezi nimi časově proměnné magnetické pole – tzv. **točivé magnetické pole**. V kotvě se díky elektromagnetické indukci indukují poměrně velké proudy, které způsobí vznik magnetické síly a ta uvede rotor do otáčivého pohybu.

Kdybychom do točivého magnetického pole vložili kotvu v podobě magnetu, bude se otáčet synchronně se stejnou frekvencí, jakou má točivé magnetické pole. Na tomto principu pracují **synchronní elektromotory**. Kotva trojfázového elektromotoru se na rozdíl od toho otáčí vždy s menší frekvencí – tzn. asynchronně a elektromotory tohoto druhu tedy nazýváme **asynchronní elektromotory**.

Veličina, která charakterizuje chod asynchronního elektromotoru se nazývá **skluz** :  $s = \frac{f_p - f_r}{f_p} [\%]$

$f_p$  ... frekvence točivého pole

$f_r$  ... frekvence otáčení rotoru

### Transformátor

= zařízení, které umožňuje zvyšovat nebo snižovat hodnotu střídavého napětí.

Je založen na principu elektromagnetické indukce a podle konstrukce rozlišujeme transformátory:

#### JEDNOFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

Jsou tvořeny dvěma cívkami na společném jádře z magneticky měkké oceli.

**primární cívka** = cívka, do které přivádíme střídavé napětí

**sekundární cívka** = cívka, ze které odvádíme transformované napětí

Připojíme-li primární cívku ke zdroji střídavého napětí  $u_1$ , bude jí procházet střídavý proud  $i_1$ , který v jádře transformátoru vytvoří proměnné magnetické pole, v jehož důsledku se bude v závitech druhé cívky indukovat

napětí, pro jehož velikost platí:

$$u_1 = -N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$u_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Má-li primární cívka zanedbatelný odpor, má indukované napětí  $u_1$  stejnou velikost jako napětí zdroje, ale opačnou fázi. Pro poměr efektivních hodnot indukovaných napětí dostáváme tzv. *rovnici transformátoru*:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = k \quad k > 1 \dots \text{transformace nahoru; } k < 1 \dots \text{transformace dolů}$$

Podle zákona zachování energie musí být příkon transformátoru  $p_1$  na primární cívce (pokud zanedbáváme ztráty) roven výkonu  $p_2$  v sekundární části. Proud se tedy transformují v obráceném poměru počtu závitů – tzn. při vyšším sekundárním napětí můžeme z transformátoru odebrat menší proud a naopak .

$$p_1 = p_2$$

$$u_1 i_1 = u_2 i_2$$

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{i_1}{i_2}$$

Rovnice transformátoru v této podobě platí, pouze pokud neuvažujeme ztráty, které vznikají přeměnou elektrické energie na vnitřní energii vinutí a jádra transformátoru. Ve skutečnosti je účinnost malých transformátorů 90-95% a velkých až 98%. Jednofázové transformátory používáme např. v rozhlasových a televizních přijímačích, nabíječkách, apod.

### TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

Používají se k transformaci třífázového napětí v energetice. Jejich jádro má 3 magnetické větve a každá z nich má vlastní primární a sekundární vinutí. Transformátory pro velké výkony se při práci značně zahřívají, a proto je musíme při použití chladit (např. v olejové lázni).

### **Přenos elektrické energie**

Rozvod elektrické energie se uskutečňuje pomocí přenosové soustavy. Při přenosu dochází ke ztrátám přenášeného výkonu o hodnotu  $P=RI^2$ . Abychom ztráty minimalizovali, uskutečňujeme přenos při co nejvyšším napětí, kdy vedením prochází menší proud.

dílkový přenos (VVN) ... 110kV, 220kV, 400kV

blízký přenos (VN) ... 22kV

v místě (NN) ... 3x400V / 230V

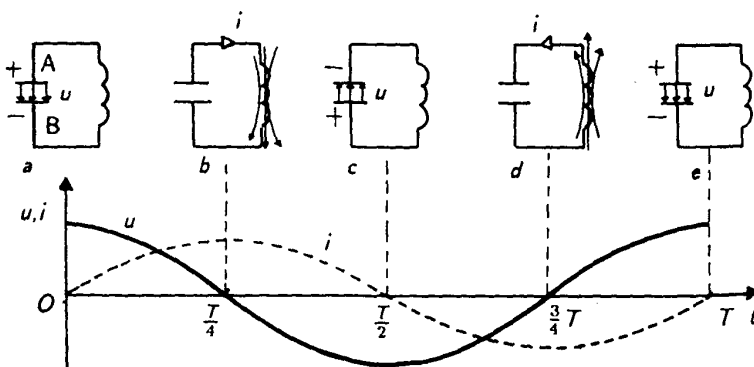
## Maturitní otázka č. 23 – Elektromagnetické kmitání a vlnění

Střídavá napětí a proudy mají časový průběh závislý na funkci sinus/cosinus obdobně jako okamžitá výchylka při kmitání mechanického oscilátoru. Proto střídavé napětí a proudy označujeme jako elektromagnetické kmitání. Jejich zdrojem mohou být nejen alternátory v elektrárnách, ale i různé jiné typy elektromagnetických oscilátorů.

Stejně jako při kmitání mechanického oscilátoru, které probíhá s periodou vlastního kmitání  $T_0$  a kde dochází k přeměněm  $E_p$  pružiny v  $E_k$  závaží a naopak, dochází i u elektromagnetického kmitání k přeměněm energie elektrického pole v energii magnetického pole a naopak. Periodu vlastního kmitání elektromagnetického oscilátoru určují jeho parametry.

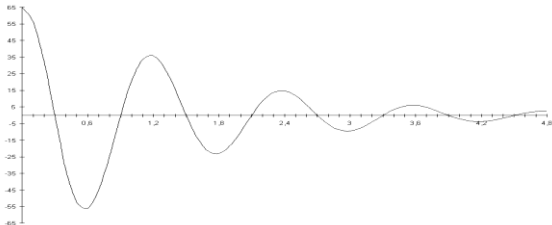
$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

m ... hmotnost tělesa; k ... tuhost pružiny



Nabijeme-li kondenzátor, vytvoří se mezi jeho deskami elektrického pole. Po připojení nabitého kondenzátoru k cívce začne oscilačním obvodem procházet proud, kondenzátor se vybíjí a energie jeho elektrického pole se zmenšuje. Současně se v okolí cívky dívky procházejícímu proudem vytváří magnetické pole a energie elektrického pole kondenzátoru se mění v energii magnetického pole cívky. Za  $\frac{1}{4}$  periody

se kondenzátor vybije, proud v obvodu dosáhne maximální hodnoty a začne se zmenšovat. Zmenšování proudu vede ke vzniku indukovaného napětí opačného směru a obvodem začne procházet indukovaný proud opačné polarity, kterým se kondenzátor znovu nabíjí.



Časové diagramy napětí a proudu jsou fázově posunuty o  $\pi/2$  rad. Pokud oscilačnímu obvodu nedodáváme energii, tak se amplitudy napětí a proudu vlivem odporu v oscilačním obvodu snižují a díky tomu je elektromagnetické kmitání oscilačního obvodu tlumené.

Kmitání mechanického a elektromagnetického oscilátoru popisujeme analogicky:

MECHANICKÝ	ELEKTRICKÝ
Výchylka ( $y$ )	Náboj (Q)
Rychlost ( $v$ )	Proud
Potenciální energie ( $E_p$ )	Elektrická energie ( $E_e$ )
Kinetická energie ( $E_k$ )	Magnetická energie ( $E_m$ )
Síla (F)	Napětí (U)
Hmotnost (m)	Indukčnost (L)
Tuhost pružiny (k)	Kapacita <sup>-1</sup> (1/C)

### Vlastní kmitání

Perioda kmitání oscilačního obvodu, jehož odpor můžeme zanedbat, je určena pouze parametry tohoto obvodu – tzn. indukčností a kapacitou. Takové kmitání označujeme jako **vlastní kmitání** elektromagnetického oscilátoru. Střídavý proud prochází jak kondenzátorem, tak cívkou a napětí na kondenzátoru je stejné jako napětí na cívce.

$$u_C = u_L$$

$$X_C \cdot i_C = X_L \cdot i_L$$

$$\frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \text{ tzv. Thompsonův vztah}$$

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

Napětí kondenzátoru v počátečním okamžiku nemá vliv na periodu vlastního kmitání (ta závisí pouze na parametrech L a C), ale určuje amplitudu napětí elektromagnetického kmitání.

Pro okamžitou hodnotu napětí a proudu platí:

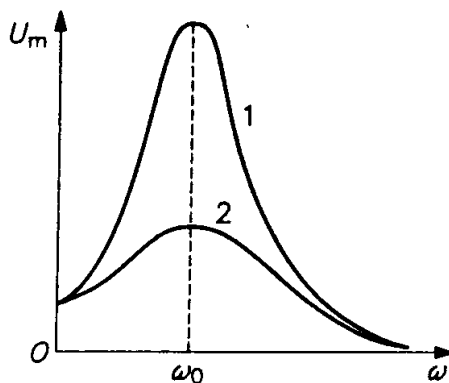
$$u = U_m \cdot \cos \omega_0 t$$

$$i = I_m \cdot \sin \omega_0 t$$

### Nucené kmitání

Při vlastním kmitání vždy dochází ke ztrátám energie a jedná se o kmitání tlumené. Netlumené harmonické kmitání elektromagnetického oscilátoru vznikne tehdy, jsou-li ztráty energie nahrazovány v průběhu celé periody – tzn. je-li oscilátor připojen ke zdroji harmonického napětí.

Připojením elektromagnetického oscilátoru ke zdroji harmonického napětí vzniká v oscilátoru nucené kmitání, které je netlumené. Oscilátor pak kmitá s frekvencí připojeného zdroje, která nezávisí na parametrech oscilačního obvodu.



Je-li frekvence nuceného kmitání rovna vlastní frekvenci oscilačního obvodu ( $f=f_0$ ), nastává **rezonance**. Závislost amplitudy napětí na frekvenci vyjadřuje rezonanční křivka, která je při malém tlumení úzká a s velkou hodnotou amplitudy ( $U_m$ ) a při větším tlumení je křivka širší a nižší.

Rezonance se používá např. při ladění rozhlasových nebo televizních přijímačů. Elektromagnetické kmitání je vynucováno malým napětím z antény a při ladění se mění parametry oscilačního obvodu tak, aby byl v rezonanci s frekvencí, ve které vysílá příslušná stanice.

### Elektromagnetické vlnění

Obdobně jako je mechanický oscilátor zdrojem mechanického vlnění (např. kmitající struna  $\rightarrow$  zvuk), je elektromagnetický oscilátor zdrojem elektromagnetického vlnění.

**Elektromagnetické vlnění** je děj, při němž se elektromagnetické kmitání šíří prostředím. Zdrojem vlnění může být např. rozhlasový vysílač, mobilní telefon, atom látky vydávající světlo



Elektromagnetické vlnění se prostředím šíří stejnou rychlostí jako světlo, které je jedním z druhů elektromagnetického vlnění. Rychlost šíření tohoto vlnění vzduchem je přibližně  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Charakter elektromagnetického vlnění má i střídavé napětí přenášené od zdroje ke spotřebiči. Okamžitá hodnota napětí ve vodiči závisí nejenom na čase  $t$ , ale i na vzdálenosti od zdroje ( $x$ ). Do bodu ve vzdálenosti  $x$  dospěje okamžitá hodnota napětí o dobu  $\tau = x/c$  později. Pro hodnotu napětí ve vzdálenosti  $x$  od zdroje tedy platí:

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

$$u = U_m \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{c} \right) \right]$$

$$u = U_m \cdot \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{cT} \right) \right]$$

$$u = U_m \cdot \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$$

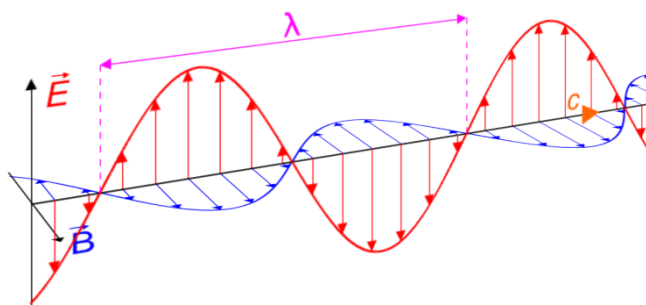
Vzdálenost, do které dospěje elektromagnetické vlnění za dobu jedné periody ( $T$ ) nazýváme **vlnová délka** zn.  $\lambda$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

Pokud se vedením šíří elektromagnetické vlnění o frekvenci 50 Hz, je jeho vlnová délka 6000km. Rozměry běžných elektrických obvodů jsou vzhledem k této vlnové délce zanedbatelné a děje ve vedení můžeme považovat za kmitání (všechny body vedení od zdroje ke spotřebiči mají v daném okamžiku stejnou fázi napětí). Vlnový charakter elektromagnetického vlnění se projevuje až v soustavách, jejichž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou daného vlnění. V běžných přenosových soustavách tedy musí jít o vlnění vysokofrekvenční.

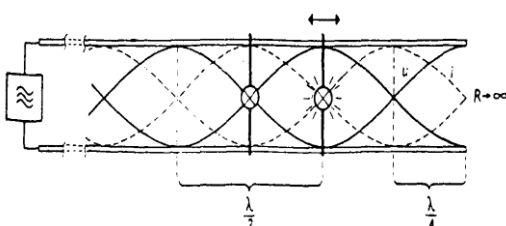
### Elektromagnetická vlna

Je-li dvou vodičové vedení připojeno ke zdroji harmonického napětí, je mezi vodiči proměnné napětí, jehož okamžitá hodnota je daná výše uvedeným vztahem. Díky tomu náboj vodičů není rozložen rovnoměrně a mezi vodiči vzniká elektrické pole s nerovnoměrným rozložením siločar.



Hodnoty intenzity elektrického pole podél vedení můžeme vyjádřit pomocí sinusoidy v rovině kolmé na směr šíření vlnění. Současně s elektrickým polem vzniká kolem vedení časově proměnné magnetické pole, jehož vektor magnetické indukce  $B$  je kolmý jak na vektor intenzity elektrického pole, tak i na směr šíření vlnění.

Při přenosu elektromagnetické energie dvou vodičovým vedením, vzniká mezi vodiči časově proměnné silové pole – elektromagnetické pole. Energie tedy není přenášena samotnými vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi. Pokud na konci vedení nedojde k pohlcení veškeré elektromagnetické energie, nastává zde odraz vlnění. Odražená vlna se pak skládá s vlněním postupujícím a vzniká **stojaté vlnění**.

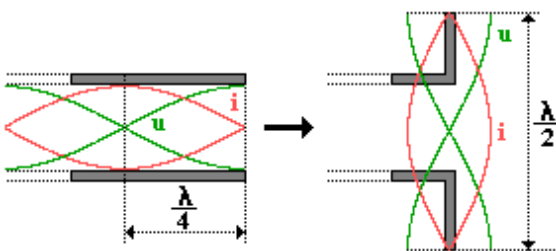


Není-li k vedení připojen žádný spotřebič, dosahuje napětí na konci vedení největší hodnoty (tj. napětí na prázdko) a proud hodnoty nulové. Díky tomu ve vedení vzniká fázový posun napětí a proudu o  $\pi/2$  rad. Na konci vedení vzniká kmitná napětí a uzel proudu, ve vzdálenosti  $1/4$  vlnové délky od konce vedení naopak uzel napětí a kmitná proudu.

Ve stojaté elektromagnetické vlně dochází periodicky k přeměně energie elektrického pole mezi vodiči na energii magnetického pole a naopak. Mezi časově proměnnými vektory intenzity elektrického pole a magnetické indukce je fázový rozdíl  $\pi/2$  rad.

### Elektromagnetický dipól

Energie elektromagnetického vlnění, která se šíří dvou vodičovým vedením je převážně soustředěna mezi vodiči. Ve sdělovací technice potřebujeme, aby se tato energie šířila do vnějšího prostoru.



Tuto funkci plní ve vysílači **anténa**, kterou označujeme jako **elektromagnetický dipól**. Ten vznikne tak, že konce dvou vodičového vedení o délce  $\lambda/4$  rozevřeme kolmo do směru šíření vlnění. V odchýlených částech vedení vznikají proudy, které mají v každém okamžiku souhlasný směr a magnetické pole tak může zasahovat do celého okolního prostoru.

Napětí na koncích vodiče dosahuje periodicky největší hodnoty a vzniká elektrické pole, které rovněž zasahuje do okolí. Tímto způsobem vzniká zařízení, sloužící k vyzařování elektromagnetické energie do prostoru. Protože má délku rovnou  $1/2$  vlnové délky vyzařovaného vlnění, nazýváme jej též **půlvlnný dipól**. Termín dipól vystihuje tu skutečnost, že se každá jeho polovina nabíjí periodicky kladně nebo záporně.

### Vlastnosti elektromagnetického vlnění

Elektromagnetické vlnění je příčné vlnění se dvěma navzájem neoddělitelnými složkami (elektrickou  $E$  a magnetickou  $B$ ). Pokud se směr vektoru intenzity  $E$  a indukce  $B$  nemění, jde o **lineárně polarizovanou vlnu**. Vektor intenzity elektrického pole lineárně polarizovaného vlnění leží v rovině dipólu a vektor magnetické indukce v rovině kolmé k dipólu.

Při kolmém dopadu na vodivou překážku se elektromagnetické vlnění odráží zpět k vysílači, odražená vlna interferuje s postupující vlnou mezi dipólem a překážkou vzniká stojaté vlnění. Vznik stojatého vlnění se využívá při konstrukci anténních signálů pro dálkový přenos elektromagnetického vlnění (rozhlas, TV, mobily, radary, ...).

Při dopadu na vodivou překážku pod určitým úhlem se elektromagnetické vlnění odráží podle **zákona odrazu**. Ten platí tím přesněji, čím je vlnová délka vlnění kratší. Jsou-li rozměry vodivé překážky srovnatelné s vlnovou délkou vlnění, proniká elektromagnetické vlnění díky ohybu i do prostoru za překážkou.

Při interferenci dvou vlnění s dráhovým rozdílem rovným sudému počtu půlvln, dochází k zesílení, při dráhovém rozdílu rovnému lichému počtu půlvln, dochází k zeslabení vlnění.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

Ve vakuu se elektromagnetické vlnění šíří rychlostí světla. V každém jiném prostředí je rychlost šíření menší (např. voda má  $\epsilon_r = 81$  a  $\mu_r = 1 \rightarrow v_{\text{h}_2\text{o}} = c/9$ ). Frekvence elektromagnetického vlnění se v prostředí nemění ( $\lambda = vT = c/f$ )  $\rightarrow v$  prostředí se mění vlnová délka. Tzn. že ve vodě má vlnění stejnou frekvenci, ale 9-krát menší rychlost a vlnovou délku než ve vakuu.

Vlastnosti elektromagnetického vlnění se projevují především při šíření vln v prostoru.

Pro rozhlas se používají dlouhé vlny ( $\lambda \approx \text{km}$ ), střední vlny, krátké vlny a velmi krátké vlny. Televizní vysílání se uskutečňuje na velmi krátkých vlnách a pro družicový příjem se používají dokonce centimetrové vlny. U dlouhých a středních vln se výrazně uplatňuje ohyb vlnění kolem zemského povrchu  $\rightarrow$  jejich příjem je možný i za rozměrnými překážkami a členitostmi terénu. Pro příjem velmi krátkých vln je nutná přibližně přímá

viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Při šíření krátkých vln se využívá jejich odrazu od ionosféry. Protože stav ionosféry se mění například i vlivem slunečního záření, mění se i podmínky šíření krátkých vln.

Na přímočarém šíření elektromagnetického vlnění a na jeho odrazu od vodivých překážek je založena **radiolokace**, což je určování polohy různých objektů v prostoru pomocí radarů (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging).

### Přenos informací elektromagnetickým vlněním

Problematikou přenosu informací se zabývá samostatný technický obor – **sdělovací technika**. K přenosu informací slouží sdělovací soustava, která předává informaci od zdroje (mikrofon) k příjemci (reproduktor) prostřednictvím sdělovacího vedení (telefonní linky) nebo pomocí elektromagnetického vlnění, které se šíří volným prostorem (rozhlas, TV, mobil).

Pro přenos zprávy pomocí elektromagnetického vlnění potřebujeme vysílač, přijímač a převodník zprávy na signál, který je výhodnější k přenosu (tzn. zakódovat). Vysílač je zdrojem elektromagnetických kmitů vysoké frekvence, které jsou v modulátoru modulovány akustickým signálem nízké frekvence. Ve vysílačích pro rozhlasové účely se používají dva druhy modulace:

**a. amplitudová (AM)** – nízkofrekvenčním signálem se mění amplituda vysokofrekvenčních kmitů; dlouhé, střední a krátké vlny

**b. frekvenční (FM)** – amplituda nosných kmitů zůstává konstantní a mění se pouze jejich frekvence; velmi krátké vlny

Televizní signál se skládá ze dvou složek – obrazové (AM) a zvukové (FM). Obě složky jsou přenášeny odděleně. Pro přenos barevného obrazu se používá tzv. RGB systém – tzn. že se informace o obrazu skládá ze třech složek – červené (R), zelené (G) a modré (B).

## Maturitní otázka č. 24 – Paprsková optika

V historii vznikly dvě protichůdné teorie vysvětlující podstatu světla:

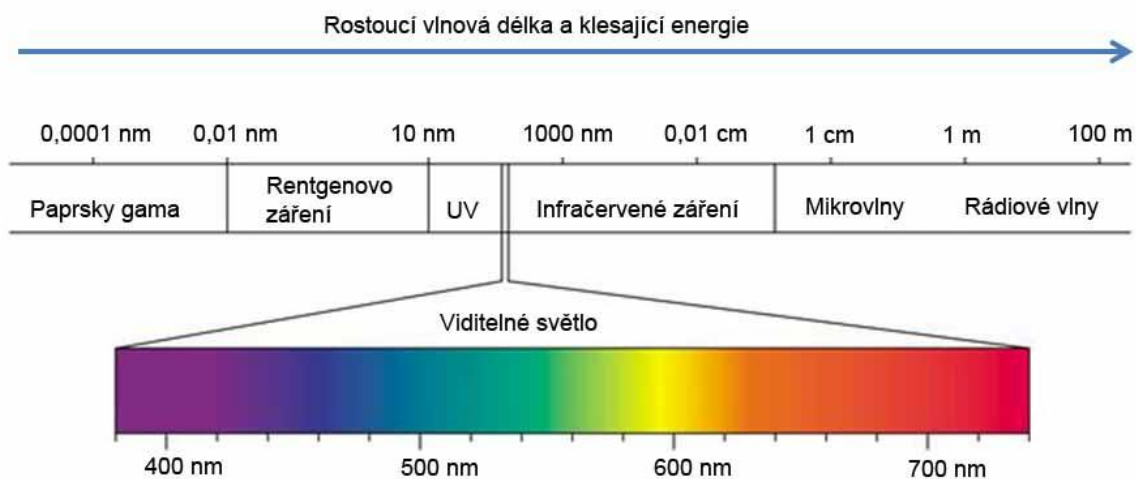
**a) částicová/geometrická/paprsková (korpuskulární)** – světlo je proud částic (důkazem je fotoelektrický jev a Comptonův jev); Isaac Newton

**b) vlnová** – světlo je mechanické vlnění (důkazem je např. lom nebo ohyb světla); Ch. Huygens

Tento rozpor vyřešila až moderní kvantová fyzika, která vysvětluje světlo jako proud fotonů

**foton** = objekt mikrosvěta, který má vlastnosti vlny i částice, ale není ani jedno z toho

Z hlediska fyziologického charakterizujeme **světlo** jako **elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami od 390nm do 760nm**, které ve zdravém lidském oku vyvolává fyziologický vjem vidění.



Obr. Elektromagnetické spektrum

Rychlost šíření světla ve vakuu je stejná jako rychlost šíření elektromagnetického vlnění, má hodnotu přibližně  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a je významnou fyzikální konstantou (zn.  $c$ )

Světla o různých frekvencích resp. vlnových délkách vyvolávají v lidském oku rozdílné vjemy (barvy).

### Šíření světla

V různých látkách se světlo šíří rychlostmi, které jsou vždy menší než rychlost jeho šíření ve vakuu. Při průchodu do jiného prostředí se mění rychlost šíření a vlnová délka světla, nemění se frekvence.

**Světelné zdroje** jsou tělesa, které vyzařují světlo.

**Optické prostředí** je prostředí, ve kterém se světlo šíří

1) **průhledné** – nedochází v něm k rozptylu světla (vzduch, světlo)

2) **průsvitné** – světlo prochází prostředím, ale částečně se v něm rozptyluje (mléčné sklo)

3) **neprůhledné** – světlo neprochází = dochází k pohlcení nebo odrazu (zeď)

**stejnorodé** = má v celém svém objemu stejné optické vlastnosti

**izotropní** = rychlost šíření světla je ve všech směrech stejná

**anizotropní** = rychlost šíření světla závisí na směru šíření (krystal křemene)

**Vlnoplochy** jsou všechny body prostoru, do kterých dospěje světlo z bodového zdroje v určitém čase

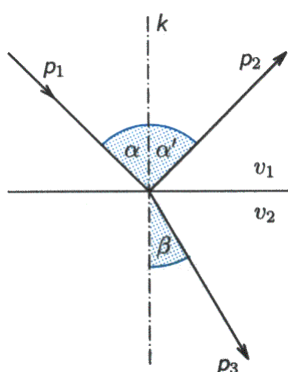
**Světelný paprsek** je kolmice na plochu v libovolném jejím bodě, které vychází z bodového zdroje

Základní zákony geometrické/paprskové optiky:

1. Princip přímočarého šíření světla  
- světlo se v homogenním a izotropním prostředí šíří podle přímek (tzv. paprsků)
2. Zákon nezávislosti chodu světelných paprsků  
- pokud se paprsky protínají, tak se navzájem nijak neruší
3. Zákon odrazu
4. Zákon lomu

## Odraz a lom světla

Odraz a lom světla se řídí stejnými poznatky jako odraz a lom mechanického vlnění.



$\alpha$  ... úhel dopadu

$\alpha'$  ... úhel odrazu

$\beta$  ... úhel lomu

**Zákon odrazu:**

Světlo se od rozhraní odráží tak, že odražený paprsek leží v rovině dopadu a úhel odrazu je roven úhlu dopadu.

$$\alpha = \alpha'$$

**Fermatův princip:** Světlo se šíří z bodu A do bodu B po takové trajektorii, po které je doba šíření nejkratší.

**Zákon lomu** (tzv. Schnellův zákon):

Poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu se rovná poměru rychlostí šíření světla v jednotlivých prostředích. Lomený paprsek leží v rovině dopadu.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = r$$

$r$  ... relativní index lomu rozhraní

Abychom mohli snadněji charakterizovat jednotlivá optická prostředí, zavádíme fyzikální veličinu **index lomu prostředí**  $n$

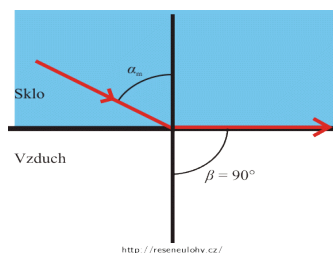
$$n = \frac{c}{v}$$

→ poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je roven obrácenému poměru indexů lomu jednotlivých prostředí

**opticky řidší prostředí** – světlo se šíří rychleji

**opticky hustší prostředí** – světlo se šíří pomaleji

## Úplný (totální) odraz světla



Pokud přechází světlo z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, nastává lom od kolmice a úhel lomu je větší než úhel dopadu. To znamená, že při určitém úhlu dopadu ( $\alpha_m$  ... **mezní úhel**) bude úhel lomu  $90^\circ$  a při všech úhlech dopadu větších než tento úhel již světlo do druhého prostředí vůbec neprochází a nastává obraz světla.

**Úplný odraz světla** je jev, kdy při úhlech dopadu větších než je mezní úhel, nenastává lom a světlo se odráží. Tento jev se využívá i u tzv. **odrazného**

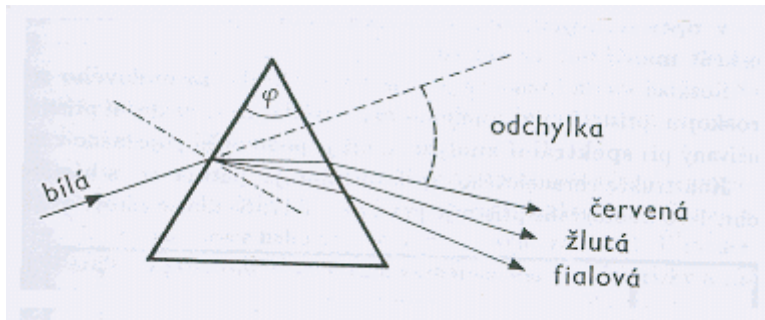
**hranolu**, který se používá ke změně směru chodu paprsků v optických přístrojích (triedr, mikroskop).

Na úplném odrazu světla jsou založena **optická vlákna**, která se používají zejména ve sdělovací technice. Jeho střední část má větší index lomu než obvodová vrstva a proto se světelný paprsek na obvodu úplně odráží a světlo se šíří po trajektorii dané tvarem vlákna

**Refraktometr** je přístroj pro určování indexu lomu látek (na základě měření mezního úhlu).

### Jevy spojené s odrazem a lomem

1. Optické vlákno
2. Rozkladný hranol

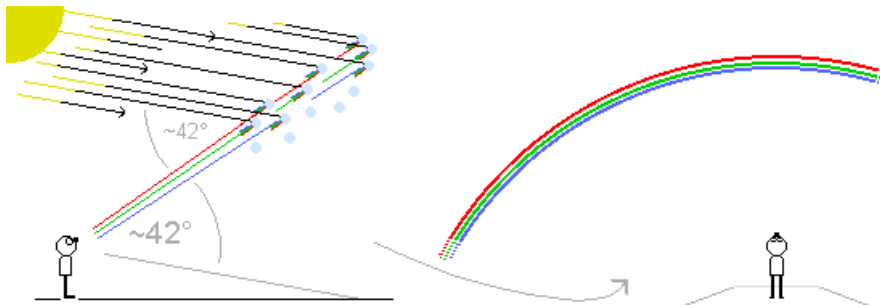


**Disperze světla** je rozklad bílého světla na jednotlivé složky, díky různé rychlosti šíření závislé na frekvenci.

K disperzi se používá **odrazný hranol**.

Díky disperzi světla závisí na frekvenci světla i index lomu dané látky – pro červenou barvu má látka nejmenší index lomu, pro fialovou největší. **Monochromatické světlo** je světlo, které má pouze jednu frekvenci vlnění. Běžné denní světlo je směs monochromatických světél různých barev.

3. Fata morgána
4. Duha



5. Zdánlivá hloubka

## Maturitní otázka č. 27 – Optické soustavy a optické zobrazování

**Optická soustava** je soustava optických prostředí a jejich rozhraní, která mění směr chodu světelných paprsků.  
**Optické zobrazování** je postup, kterým získáváme optické obrazy předmětů.

Geometrická (paprsková) optika zkoumá optická zobrazování a vychází ze čtyř základních principů

1. princip přímočarého šíření světla
2. princip nezávislosti chodu světelných paprsků
3. zákon lomu
4. zákon odrazu

Světelné paprsky dopadají do oka a vytvářejí obraz předmětu, ze kterého vycházejí. Obrazy mohou být dvojího druhu:

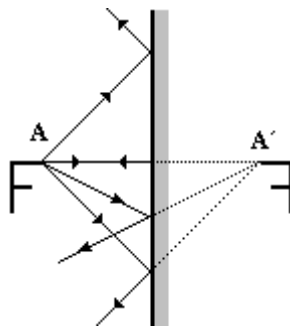
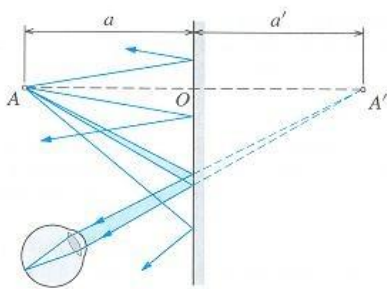
- a) skutečné (reálné)** – vytvářeny **sbíhavým svazkem paprsků**, které můžeme zachytit na stínítku
- vzniká skutečný obraz
  - např.: projektor, promítačka
- b) neskutečné (zdánlivé)** – vytvářeny **rozbíhavým svazkem paprsků**, které nemůžeme zachytit na stínítku
- oko je vnímá, jakoby vycházely z jednoho bodu
  - na rozdíl od skutečného obrazu jimi neprochází paprsky ani světelná energie
  - obraz vidíme, ale jde o klam
  - např.: zrcadlo

### Zobrazení rovinným zrcadlem

Jde o rovinnou plochu, která odrazí alespoň 90% dopadajícího světla (vodní hladina, vyleštěný kov...), použití ve fotoaparátech apod.

Pro běžná zrcadla se pokryje sklo tenkou vrstvou kovu, ovšem na tomto zrcadle vznikne dvojitý optický odraz (část světla se odrazí už od skla), proto se ve fotoaparátech nebo dalekohledech využít nedá.

Způsobuje **zdánlivý odraz**.

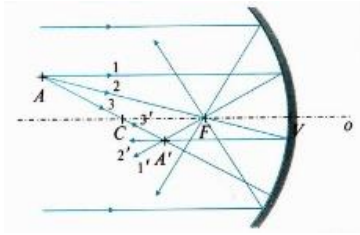


### Zobrazení kulovým zrcadlem

**Kulové (sférické) zrcadlo** je zrcadlo tvořené částí kulové plochy

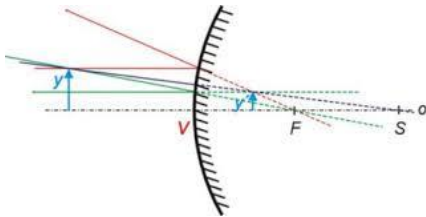
**Duté kulové zrcadlo** = světlo se odráží od vnitřní části kulové plochy

- *užití:* zrcadlový dalekohled, sluneční elektrárny, světlomety (rotačně-parabolická zrcadla)



**Vypouklé kulové zrcadlo** = světlo se odráží od vnější části kulové plochy

- *užití:* na nepřehledných křižovatkách, v autech (mrtvý úhel)



**S ...optický střed zrcadla** (střed kulové zrcadlící plochy)

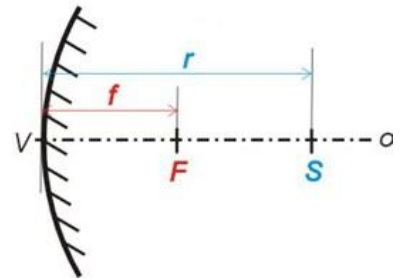
**o ... optická osazrcadla** (přímka vedená optickým středem a ohniskem)

**V ... vrchol zrcadla** (průnik optické osy a části kulové plochy)

**F ... ohnisko** (místo obrazu bodu, který leží nekonečně daleko před zrcadlem)

**f ... ohnisková vzdálenost** (vzdálenost vrcholu zrcadla od jeho ohniska  $|VF| = |FS|$ )

**r ... poloměr křivosti** (vzdálenost vrcholu zrcadla od optického středu,  $r = 2f = |VS|$ )



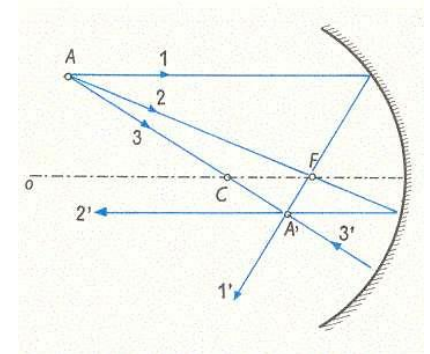
Nejpřesnější zobrazení vzniká paprsky, které svírají s osou velmi malé úhly (tzv. **paraxiální paprsky**)

**Paraxiální prostor** je okolí optické osy, kde se šíří paraxiální paprsky (tzv. Gaussův prostor).

Při určování obrazů používáme tři významné paprsky:

1. paprsek, který **prochází optickým středem** nebo míří do optického středu  
- odráží se v opačném směru
2. paprsek, který **prochází ohniskem** nebo míří do ohniska  
- odráží se rovnoběžně s optickou osou
3. paprsek, který je **rovnoběžný s optickou osou**  
- odráží se směrem do ohniska

Využíváme také poznatek, že bod ležící na optické ose se zobrazí opět na optickou osu.



Zobrazení dutým zrcadlem

	Vzdálenost		Velikost obrazu
	předmětu	obrazu	
1	$a > r$	$r > a' > f$	$ y'  <  y $
2	$a = r$	$a' = r$	$ y'  =  y $
3	$r > a > f$	$a' > r$	$ y'  >  y $
4	$a = f$	$a' \rightarrow \infty$	$ y'  \rightarrow \infty$
5	$a < f$	$0 < a' < \infty$	$ y'  >  y $

Zobrazení vypuklým zrcadlem

6	$\infty > a > 0$	$a' < 0$	$ y'  <  y $
---	------------------	----------	--------------

### Zobrazovací rovnice kulového zrcadla

a ... předměťová vzdálenost

a' ... obrazová vzdálenost

y ... výška předmětu

y' ... výška obrazu

Z ... příčné zvětšení



$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a}$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

Protože zobrazovací rovnice platí pro dutá i vypouklá zrcadla, je třeba dodržovat znaménkovou konvenci.

ZNAMÉNKOVÁ KONVENCE		
	KLADNÉ	ZÁPORNÉ
f	Duté zrcadlo (skutečné ohnisko)	Vypouklé zrcadlo (zdánlivé ohnisko)
a	Předmět je před zrcadlem	----- (nelze)
a'	Obraz je před zrcadlem (skutečný obraz)	Obraz je za zrcadlem (zdánlivý obraz)
y	Předmět leží nad optickou osou	Předmět leží pod optickou osou

Jinak řečeno: Vše před zrcadlem bereme **kladně**.  
 Vše za zrcadlem bereme **záporně**.  
 Výška předmětu se bere **kladně** nad osou a **záporně** pod osou.  
 Výška obrazu se bere **kladně** nad osou a **záporně** pod osou.

$Z > 0$  obraz je vzpřímený  
 $Z < 0$  obraz je převrácený  
 $Z > 1$  obraz je zvětšený  
 $Z < 1$  obraz je zmenšený

## Čočky

Zatímco zrcadla využívají ke změně směru šíření světelných paprsků odrazu světla, v čočkách se využívá ke změně směru šíření světelných paprsků jejich lom. Čočky jsou obvykle zhotoveny z průhledného skla. Jejich tvar může být různý, přičemž jedna strana je buď rovinná nebo kulová (tj. vypouklá nebo vydutá).

**Tenké čočky** jsou čočky se zanedbatelnou tloušťkou; budeme je uvažovat při našem zobrazování.

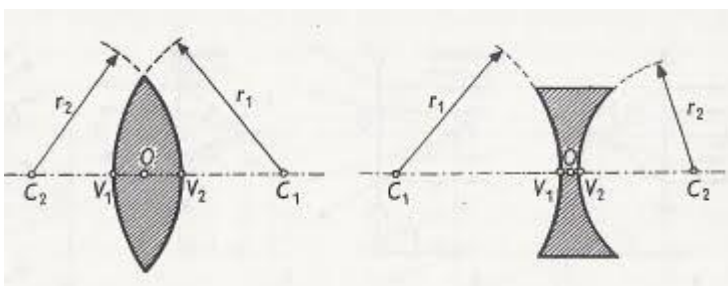
$r_1, r_2 \dots$  poloměry křivosti kulových ploch

$C_1, C_2 \dots$  středy křivosti kulových ploch

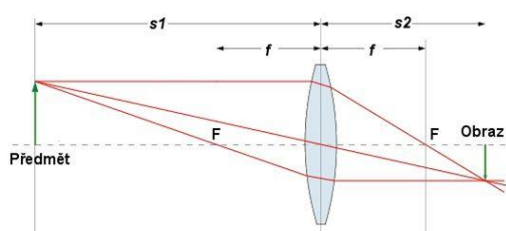
$C_1C_2 \dots$  optická osa

$V_1, V_2 \dots$  vrcholy ploch

Z hlediska způsobu zobrazení se čočky dělí na:



## SPOJNÉ ČOČKY (SPOJKY)



Ze svazku paprsků rovnoběžných s optickou osou vytváří **sbíhavý svazek**. Ve středu čočky jsou silnější než na okrajích.

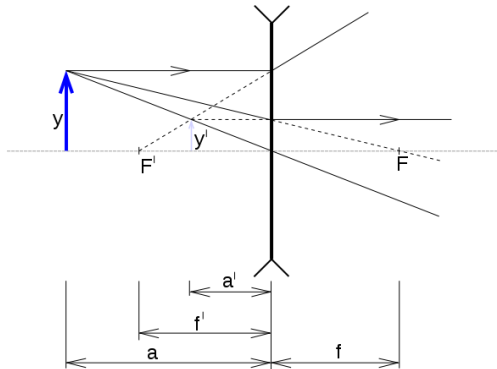
F ... předměťové ohnisko

F' ... obrazové ohnisko

**Předmětový prostor** je prostor, ve kterém je umístěn předmět, z tohoto směru vstupují do čočky světelné paprsky.

**Obrazový prostor** je prostor, ve kterém leží skutečný obraz; do tohoto směru vystupují z čočky světelné paprsky. Rovnoběžné paprsky se protínají ve **skutečném obrazovém ohnisku**, které leží v obrazovém prostoru.

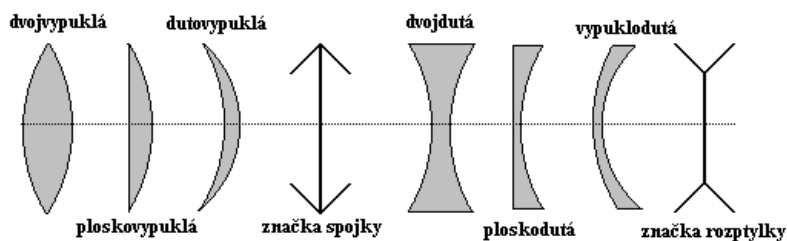
### ROZPTYLNÉ ČOČKY (ROZPTYLKY)



Ze svazku paprsků rovnoběžných s optickou osou vytváří **rozbíhavý svazek paprsků**. Ve středu čočky jsou tenčí než na koncích.

Rovnoběžné paprsky se **zdánlivě** protínají v **neskutečném obrazovém ohnisku**, které se nachází v předmětovém prostoru.

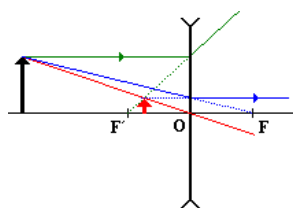
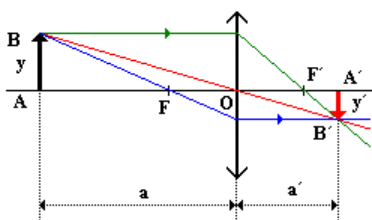
### DĚLENÍ ČOČEK



### Zobrazení čočkami

Při určování polohy a charakteristik opět využíváme trojici významných paprsků:

1. paprsek, procházející optickým středem čočky → nemění se směr šíření
2. paprsek, rovnoběžný s optickou osou → láme se do/z obrazového ohniska
3. paprsek před dopadem směřující se předmětového ohniska → láme se rovnoběžně s optickou osou



### Zobrazovací rovnice čočky

$$Z = -\frac{a'}{a} = \frac{y'}{y}$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

ZNAMÉNKOVÁ KONVENCE		
	KLADNÉ	ZÁPORNÉ
f	SPOJKY	ROZPTYLKY
a'	Obraz v obrazovém prostoru	Obraz v předmětovém prostoru
Z	Přímý obraz	Obrácený obraz

Pro výpočet ohniskové vzdálenosti čočky platí vztah:

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$n_1$ ... index lomu prostředí okolo čočky (většinou vzduch,  $n=1$ )

$n_2$ ... index lomu materiálu čočky (většinou sklo,  $n=1,5$ )

$r_1, r_2$ ... poloměry křivosti 1. a 2. hraniční plochy čočky

$r > 0$  ... vypouklá čočka

$r < 0$  ... dutá čočka

$r \rightarrow \infty$  ... ploská čočka ( $1/\infty = 0$ )

**Optická mohutnost** je fyzikální veličina, která vyjadřuje zakřivení čočky [ $\varphi$ ] =  $D$

Převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti.

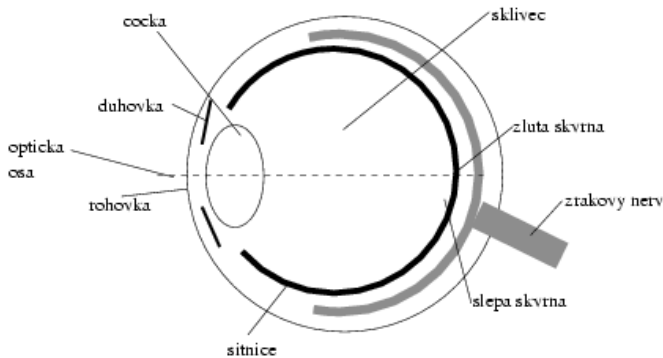
$$\varphi = \frac{1}{f}$$

SPOJKY: kladná optická mohutnost ( $f > 0$ )

ROZPTYLKY: záporná optická mohutnost ( $f < 0$ )

## Lidské oko

Z fyzikálního hlediska je lidské oko spojnou optickou soustavou s proměnnou ohniskovou vzdáleností.



(umožňují rozeznávat barvy)

**žlutá skvrna** = místo nejostřejšího vidění, je zde největší hustota tyčinek

**slepá skvrna** = místo, kde nevzniká zrakový vjem

**zornice** = v závislosti na intenzitě světla se rozšiřuje a smršťuje, čímž reguluje množství světla vstupujícího do oka

**ciliární svaly** = drží a napínají čočku → pomocí nich dochází ke změnám zakřivení optických ploch a tím i ke změně její ohniskové vzdálenosti (tzv. akomodace oka)

**sítnice** = dva druhy buněk citlivých na světlo – tyčinky (reagují na intenzitu světla) a čípky

Rozsah vzdáleností, na které se může oko akomodovat, je určen dvěma body na optické ose oční čočky:

**a) daleký bod** – minimální akomodace (tzn. minimální námaha)

- u zdravého člověka leží v nekonečnu

**b) blízký bod** – maximální akomodace (tzn. maximální námaha)

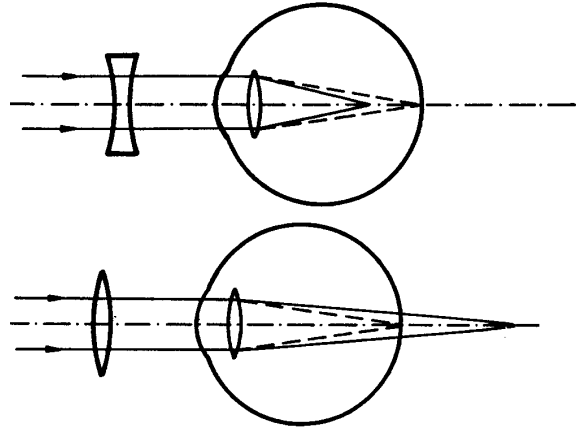
- u zdravého člověka může být i 15 cm

Optimální vzdáleností, ze které může zdravé lidské oko pozorovat předměty po delší dobu bez větší námahy, je přibližně 25 cm. Z tohoto důvodu byla pro výpočty tato vzdálenost dohodou stanovena jako blízký bod – nazýváme ji **konvenční zraková vzdálenost (d)**.

K tomu, abychom dokázali vnímat předmět, musíme ho pozorovat alespoň 0,1 s. Tzv. setrvačnosti zrakového vjemu využíváme při filmové projekci nebo televizního obrazu. Ten tvoří posloupnost jednotlivých statických obrázků, které jsou promítány rychle za sebou (24 snímků za sekundu) → lidské oko to vnímá jako plynulý děj.

### Vady oka

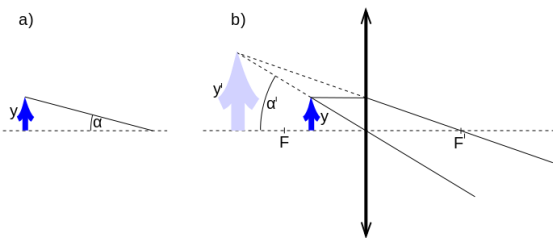
- 1) **KRÁTKOZRAKOST** – blízký bod se posouvá blíže k oku → obraz se vytváří před sítnicí
  - tato vada se koriguje pomocí brýlí s rozptylnými čočkami
- 2) **DALEKOZRAKOST** – blízký bod se posouvá dále od oka → obraz se vytváří za sítnicí
  - tato vada se koriguje pomocí brýlí se spojnými čočkami
- 3) **ŠEROSLEPOST** – nižší koncentrace tyčinek na sítnici
- 4) **BARVOSLEPOST** – nižší koncentrace čípků na sítnici



### Optické přístroje

Optické přístroje mění zorný úhel ( $\tau$ ), pod kterým pozorujeme určitý předmět.

#### LUPA



Nejjednodušší optický přístroj, který tvoří spojná čočka, pro kterou platí  $f > d$ . Předmět o výšce  $y$  se umístí do ohniska (případně těsně před ohnisko) → lupa vytváří zvětšený zdánlivý přímý obraz a poskytuje 6-12 násobné zvětšení.

$$\text{Úhlové zvětšení: } \gamma = \frac{\alpha'}{\alpha} \cong \frac{\tan \alpha'}{\tan \alpha} = \frac{\frac{y'}{f}}{\frac{y}{f}} = \frac{y'}{y} = \frac{d}{f}$$

#### MIKROSKOP

Slouží pro pozorování drobných předmětů z blízka. Pozorovaný předmět umístíme do malé vzdálenosti před předmětové ohnisko objektivu. Objektiv vytvoří skutečný, převrácený, zvětšený obraz, který pozorujeme okulárem jako lupou. U běžných mikroskopů lze běžně osáhnout 1000 násobného zvětšení.

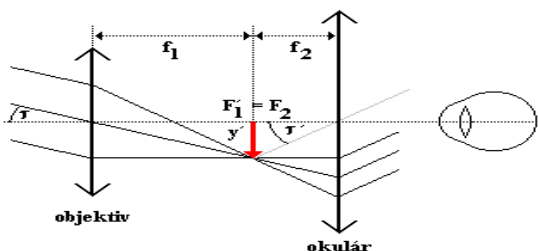
úhlové zvětšení = součin úhlového zvětšení objektivu a úhlového zvětšení okuláru  $\gamma = \frac{d}{f_1} * \frac{\Delta}{f_2}$

$\Delta$  ... optický interval = vzdálenost obrazového ohniska objektivu a předmětového ohniska okuláru  $|F_1'F_2|$

#### DALEKOHLED

**Refraktor** je dalekohled, který je tvořen soustavou čoček

Galileiho (Holandský) dalekohled: je tvořen spojkou (objektiv) s velkou ohniskovou vzdáleností a rozptylkou (okulár) s malou → obrazové ohnisko objektivu splývá s obrazovým ohniskem okuláru



Keplerův (hvězdářský) dalekohled: je tvořen dvěma spojkami – objektiv s velkou ohniskovou vzdáleností a okulár s malou → obrazové ohnisko objektivu splývá s předmětovým ohniskem okuláru

Triedr: dalekohled, tvořený soustavou dvou spojných čoček a dvou optických hranolů, které obraz odrazí čtyřikrát. Protože jsou hranoly vzájemně pootočené o  $90^\circ$ , původně převrácený obraz se narovná a navíc se prodlouží ohnisková vzdálenost a tím i zvětšení triedru. Triedr se vyrábí v binokulárním provedení.

**Reflektor** je dalekohled, který je kromě čoček tvořen i zrcadlem.

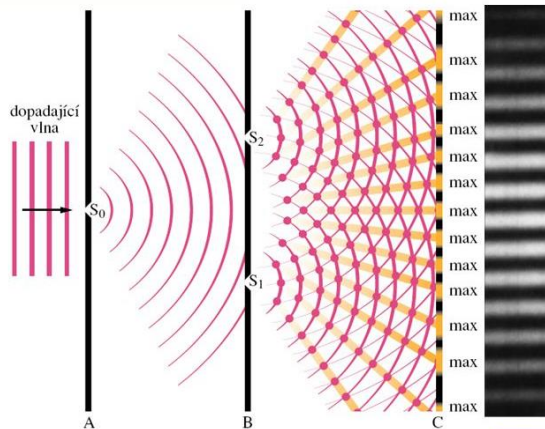
## Maturitní otázka č. 26 – Vlnová optika

Zabývá se jevy, ve kterých se projevuje vlnová povaha světla (elektromagnetická vlna)

Vlnová povaha světla se projevuje 3 způsoby:

- Interference
- Ohyb
- Polarizace

### Interference světla



#### Youngův pokus:

Ze zákona přímočarého šíření světla bychom očekávali, že se po průchodu světla dvojštěrbinou objeví na stínítku dvě světlé stopy v místech odpovídajících průchodu světla jednotlivými štěrbinami. Ve skutečnosti ale na stínítku vznikne soustava světlých a tmavých proužků, přičemž proužek s největší intenzitou světla leží v místě geometrického stínu odpovídajícího středu dvojštěrbiny.

Tento pokus vysvětlujeme tak, že se světelné vlny po průchodu jednotlivými štěrbinami skládají → světlé proužky odpovídají interferenčnímu zesílení, tmavé

proužky interferenčnímu zeslabení.

Aby vznikla pozorovatelná interference, musí se skládat koherentní světelné vlny.

**Koherentní vlnění** je vlnění, mající stejnou frekvenci a jejichž fázový rozdíl se s časem nemění.

Dráhový rozdíl:

- rovný **sudému** počtu půlvln → interferenční **zesílení (maximum)**  $\Delta l = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots$   
k ... řád interferenčního maxima/minima

- rovný **lichému** počtu půlvln → interferenční **zeslabení (minimum)**  $\Delta l = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots$   
k ... řád interferenčního maxima/minima

Interference vlnění je velmi dobře pozorovatelná na tenkých vrstvách (tloušťka  $\approx$  vlnové délce) – např. mýdlová blána, olejová skvrna. Vzhledem k tomu, že obvykle tyto tenké vrstvy pozorujeme v denním bílém světle, objevují se na nich barevné skvrny.

**Optická dráha**  $s$  je dráha, kterou by jinak stejné světlo urazilo ve vakuu

$$s = n \cdot l = \frac{c}{v} \cdot l = c \cdot t$$

Nejjednodušší tenkou vrstvou je vrstva *planparalelní* – vrstva ohraničená dvěma rovnoběžnými rovinami.

Dráhový rozdíl vlnění dopadající na tenkou vrstvu může vzniknout dvěma způsoby:

1. průchodem světla vrstvou – jestliže v daném prostředí světlo urazí dráhu
2. při odrazu světla na prostředí opticky hustším – fáze světelného vlnění se mění na opačnou a vzniká fázový rozdíl  $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$

Interference světla se používá při měření vlnové délky světla **Newtonovy skly**. Ta jsou tvořena soustavou skleněné desky a ploskovypuklé čočky s velkým poloměrem křivosti. V prostoru mezi skly vzniká tenká vzduchová vrstva proměnné výšky. Při osvětlení Newtonových skel dochází k interferenci světla na této tenké vzduchové vrstvě a v odraženém světle vznikne soustava soustředných interferenčních kruhů.

## Interference na tenké vrstvě

Osvětíme-li tenkou vrstvu monofrekvenčním světlem o vlnové délce  $\lambda$  a pozorujeme odražené paprsky, vidíme světlá a tmavá místa. Při interferenci může dojít k následujícím dvěma mezním situacím

1. **Odražené paprsky se setkávají se stejnou fází.** V místě setkání paprsků vznikne interferenční **maximum**. Pro interferenční maximum platí

$$2nd = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

kde  $d$  je tloušťka tenké vrstvy,  $n$  je index lomu světla ve vrstvě,  $k = 0, +1, +2, \dots$

2. **Odražené paprsky se setkávají s opačnou fází.** V místě setkání paprsků vznikne interferenční **minimum**. Pro Interferenční minimum platí

$$2nd = k\lambda$$

Nulté interferenční maximum ( $k = 0$ ) pro interferenci odraženého světla na tenké vrstvě závisí na tloušťce vrstvy a vlnové délce podle vztahu  $\lambda = 4nd$ ?????

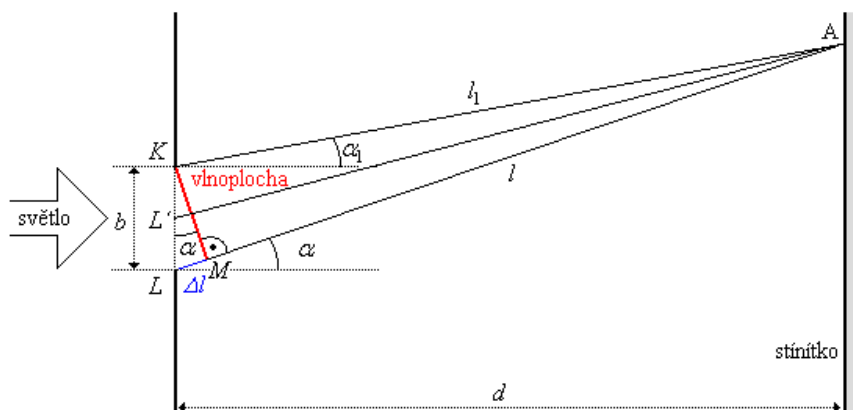
## Difrakce (ohyb) světla

**Difrakce** neboli **ohyb** vlnění je jev, při kterém se vlnění dostává i do oblasti geometrického stínu. Ohyb lze například pozorovat, když prochází světlo štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla. Za štěrbinou se na stínítku objeví difrakční neboli ohybové obrazce, tj. světlé a tmavé proužky různé šířky.

## Ohyb světla na optické mřížce

**Difrakční (optická) mřížka** je tvořena velkým počtem stejně širokých rovnoběžných štěrbin umístěných vedle sebe. Vzdálenost štěrbin  $b$  se nazývá **mřížková konstanta** nebo **perioda mřížky**. Ohybový obrazec vytvořený mřížkou má úzká interferenční maxima, ta jsou tím zřetelnější, čím je menší perioda mřížky. Při kolmém dopadu monofrekvenčního světla o vlnové délce  $\lambda$  na mřížku platí pro interferenční maxima podmínka

$$\sin \alpha = k \frac{\lambda}{b}$$



Ze vztahu pro interferenční maxima platí, že maximum nultého řádu je stejné pro všechny vlnové délky, maxima vyšších řádů jsou různá pro různé vlnové délky. Dopadá-li na mřížku bílé světlo, je maximum nultého řádu bílé. Maxima vyšších řádů jsou barevná, symetricky rozmístěná na obě strany od maxima nultého řádu. Blíže středu jsou maxima fialového světla, dále leží maxima červeného světla a mezi nimi jsou maxima ostatních barev.

## Polarizace světla

Světlo je postupné příčné elektromagnetické záření. Vektor intenzity elektrického pole  $E$  je vždy kolmý na směr šíření světla, ale v případě **nepolarizovaného světla** mění zcela nahodile svůj směr. V případě **lineárně polarizovaného světla** kmitá vektor  $E$  neustále v jedné rovině, tzv. **rovině kmitů**.

Světlo lze polarizovat několika způsoby:

1. **polarizace světla odrazem a lomem** – Světlo se částečně polarizuje při odrazu. Při určitém úhlu dopadu, který se nazývá **Brewsterův úhel**, je odražené světlo zcela lineárně polarizované tak, že vektor  $E$  kmitá v rovině kolmé k rovině dopadu (rovnoběžně s rozhraním). Při lomu světla dochází k částečné polarizaci a  $E$  kmitá v rovině rovnoběžné s rovinou dopadu.
2. **polarizace světla polaroidem** (polarizačním filtrem neboli polarizátorem) – V praxi se k polarizaci používají speciální polarizační filtry, které jsou tvořeny rovnoběžnými dlouhými molekulami v průhledné umělé hmotě. Světlo, které necháme procházet polarizátorem, je zcela lineárně polarizované a rovina shodná s rovinou kmitů polarizovaného světla se nazývá polarizační rovina polarizátoru. Vložíme-li do cesty tomuto světlu druhý filtr (analyzátor), lze pozorovat, že při určitém natočení analyzátoru světlo prakticky neprochází.
3. **polarizace světla dvojlomem** – Světelný paprsek se na rozhraní s krystalem islandského vápence při tzv. dvojlomu rozdělí na dva paprsky: **řádný** a **mimořádný paprsek**, v důsledku anizotropie krystalu. Oba paprsky jsou lineárně polarizované, jejich směry polarizace (tj. roviny kmitů) jsou na sebe kolmé.

## Použití interference světla v praxi

1. *měření vlnové délky světla pomocí Newtonových skel*
2. *kontrola rovinných a kulových ploch čoček*
3. *protiodrazové (antireflexní) vrstvy*
4. *holografie*

## Využití polarizace

1. *zkoumání opticky aktivních látek* – opticky aktivní látky jsou látky, které jsou schopny stáčet rovinu polarizovaného světla
2. *zkoumání mechanického napětí v různých tělesech*
3. *ve fotoaparátech se používají polarizační filtry k odstranění nežádoucích paprsků*

## Optické spektrum

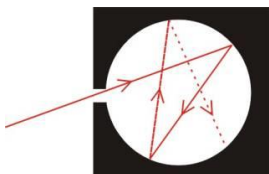
**Spojité spektrum** je spektrum, ve kterém jsou zastoupeny všechny barvy. Poskytuje je zahřátá látka.

**Čárové spektrum** neobsahuje souvislý pás barev, ale jenom čáry. Záleží na typu atomu, poskytují plyny -> **Spektrální analýza**.

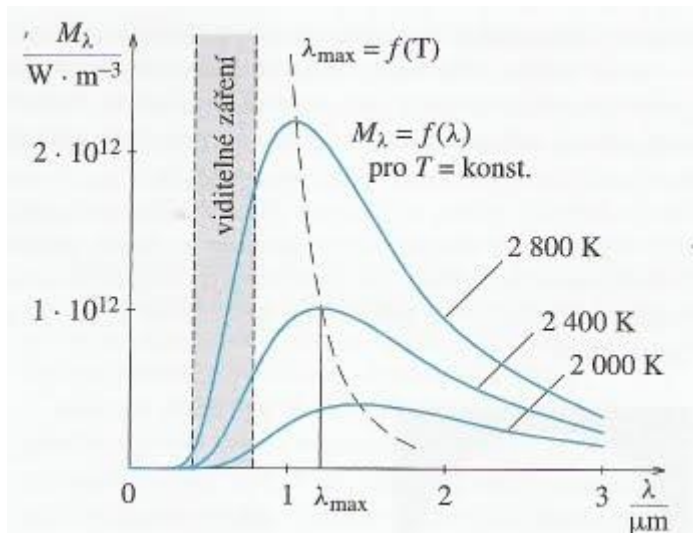
**Pásové spektrum** obsahuje několik pásů barev. Typické pro molekuly

## Záření černého tělesa

**Černé těleso** je těleso, které pohltí veškeré záření, které na něj dopadne a nic neodrazí.







S rostoucí teplotou se maximum vyzáření energie posunuje ke kratším vlnovým délkám.

Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$b$ ... konstanta,  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ km} ???$

Stefan-Boltzmannův zákon:

$$M_e = \sigma T^4$$

$M_e$ ... intenzita vyzáření, energie kterou vyzáří těleso o povrchu 1 metr čtverečný

$\sigma$ ... konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} ????$

## Barva

**Barva světla** je dána zastoupením jednotlivých frekvencí ve spektru

**Monochromatické světlo** je světlo, které má ve spektru pouze jednu barvu

**Barva předmětu** je taková, kterou předmět nepohlítí, ale odrazí

## Maturitní otázka č. 27 – Speciální teorie relativity

Principy této teorie zformuloval v roce 1905 německý fyzik **Albert Einstein**. Speciální teorie relativity zpřesnila význam pojmů používaných v klasické fyzice pro případ velkých rychlostí (tj. rychlostí blízkých se rychlosti světla ve vakuu). Při těchto rychlostech je chování fyzikálních objektů odlišné od chování při běžných rychlostech, a proto závěry speciální teorie relativity vypadají jako odporující zdravému rozumu. Ve skutečnosti však odporují pouze naší běžné zkušenosti, protože se celý život pohybujeme v prostředí, ve kterém jsou rychlosti hodně malé ve srovnání s rychlostí světla.

### Prostor a čas v klasické fyzice

1. Prostor je absolutní
2. Čas je absolutní
3. Délky jsou absolutní

### Základní principy speciální teorie relativity

Speciální teorie relativity začala vznikat, když vědci narazili na 2 problémy:

1. problém – Einstein přišel na to, že pozorovatel v inerciální vztažné soustavě nemůže zjistit, zda je v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.

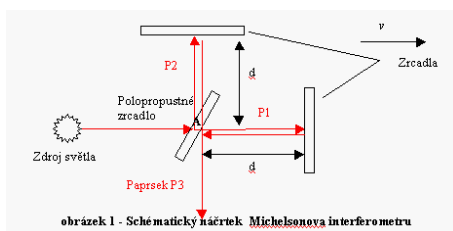
2. problém – určení rychlosti světla

- 1675 Römer dokázal, že rychlost světla je konečná a že se přibližně rovná  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- po určení rychlosti světla vědci zkoumali v jakém prostředí se touto rychlostí šíří → hledání **éteru**

(univerzální prostředí)

### Michelsonův pokus (umět nakreslit podle papírů)



Papřek 1 a 2 spolu interferují = papřek 3. Na detektoru, kam dopadá papřek 3, mělo nastávat interferenční MAX, ale nastávalo MIN.

Změřili časy papřků:

$$t_1 = t_1' + t_1'' = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{(c+v)} = \frac{l(c+v) + l(c-v)}{c^2 - v^2} = \frac{cl + vl + cl - vl}{c^2 - v^2} = \frac{2cl}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$t_2 = t_2' + t_2'' = 2t_2' = \frac{2l}{v_v} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

**Závěr:** experiment neodpovídá praxi

**Důsledky** – neexistence éteru

– nepotvrzení klasického principu skládání rychlostí

Speciální teorie relativity je založena na 2 základních postulátech:

**1. princip relativity** – Fyzikální zákony jsou ve všech inerciálních vztažných soustavách stejné (tzn. neexistuje fyzikální pokus, kterým bychom zjistili, zda je soustava v klidu, nebo v pohybu rovnoměrně přímočarém).

**2. princip konstantní rychlosti světla** – Rychlost světla ve vakuu je pro pozorovatele ze všech inerciálních soustav stejná.  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### Důsledky speciální teorie relativity

#### 1. Relativnost současnosti nesoumístných událostí

Princip konstantní rychlosti světla ve vakuu vede k tomu, že současnost dvou událostí je relativní → dvě události současné v jedné vztažné soustavě nemusí být současné v jiné vztažné soustavě.

Příkladem může být pozorování světla dopadajícího na stěny jedoucího vagonu:

a) pro pozorovatele uvnitř vagonu dopadne světlo na přední i zadní stěnu současně

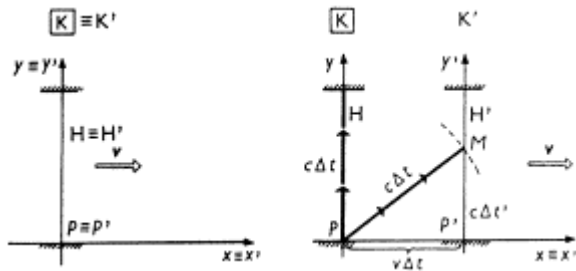
b) pro pozorovatele vně vagonu dopadne světlo nejdříve na zadní (která jde "naproti") a pak na přední stěnu

**současné události** = události, které nastanou ve stejném čase (→ relativní)

**soumístné události** = události, které nastanou na stejném místě prostoru

## 2. Dilatace času (dilatace = prodlužování)

Tento zdánlivě nelogický důsledek teorie relativity (resp. principu stálé rychlosti světla) se projevuje například tak, že hodiny, které se pohybují vzhledem k vztažné soustavě K, **zpomalují** svůj chod vzhledem k hodinám v soustavě K



$\Delta t_0$  ... vlastní čas = čas, který pozoruje pozorovatel, vůči

němuž se hodiny nepohybují

$\Delta t$  ... relativistický čas

$v$  ... rychlost hodin

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta t_0^2 + v^2 \Delta t^2$$

$$c^2 \Delta t^2 - v^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta t_0^2$$

$$\Delta t^2 (c^2 - v^2) = c^2 \Delta t_0^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{c^2 \Delta t_0^2}{c^2 - v^2}$$

$$\Delta t = \frac{\sqrt{c^2 \Delta t_0^2}}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

$$\Delta t = \frac{c \Delta t_0}{\sqrt{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pokud by se soustava  $K'$  pohybovala rychlostí větší než je rychlost světla ve vakuu, byl by čas  $\Delta t$  záporný → došlo by k porušení časového sledu. Princip konstantní rychlosti světla tedy musí platit, aby byl zachován **princip kauzality** (tzn., že příčina vždy předchází následku)

Čas se tedy opoždí a nejkratší čas naměří pozorovatel, který je v soustavě s hodinami.

## 3. Kontrakce délek (kontrakce = zkracování)

Pro pozorovatele v soustavě, vzhledem k níž se těleso pohybuje, je těleso kratší. Dá se dokázat, že se mění jen rozměry, které jsou **rovnoběžné** s vektorem rychlosti.

Dilatace času a kontrakce délek způsobily hluboké změny v chápání pojmu prostor a čas.

Einstein odvodil vztah pro dilataci času:

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

## 4. Relativistické skládání rychlostí

V klasické fyzice platí Newtonův zákon ( $\mathbf{u} = \mathbf{u}' \pm \mathbf{v}$ ). Tento vztah ale neplatí v relativistické fyzice. Albert Einstein odvodil obecnější relativistický zákon pro skládání rychlostí, který neumožňuje rychlost vyšší než je rychlost světla (pomocí transformačních rovnic).

Pro běžné rychlosti je jmenovatel zlomku téměř roven jedné → platí klasický vztah.

Rychlost šíření světla ve vakuu je mezní rychlostí šíření signálu → žádné těleso s nenulovou klidovou hmotností ji nemůže dosáhnout.

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{u}' \pm \mathbf{v}}{1 \pm \frac{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{v}}{c^2}}$$

## Základní pojmy relativistické dynamiky

### 1. Relativistická hmotnost

Síla je obecně rovna změně hybnosti za čas:

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}$$

V klasické mechanice je možná úprava tohoto vztahu:

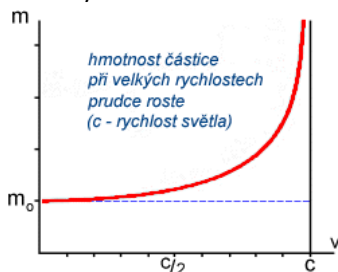
$$\mathbf{F} = \frac{m \Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = m \mathbf{a}$$

Při konstantní hmotnosti a konstantní působící síle by díky vztahu  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$  mohla rychlost tělesa dosáhnout libovolné velikosti, což však odporuje speciální teorii relativity. Z toho vyplývá, že hmotnost tělesa musí záviset na velikosti rychlosti tělesa vzhledem k dané vztažné soustavě a s rostoucí rychlostí musí hmotnost vzrůstat. Albert Einstein odvodil, že pro relativistickou hmotnost platí vztah:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Tento vztah byl experimentálně ověřen v urychlovačích elementárních částic.

Pro rychlost mnohem menší než rychlost světla ve vakuu závisí hmotnost na rychlosti velice málo. Pro rychlosti blízké rychlosti světla ve vakuu hmotnost roste nade všechny meze.



Zákon zachování hmotnosti má ve speciální teorii relativity následující tvar:  
*„Celková relativistická hmotnost izolované soustavy těles je při všech dějích probíhajících uvnitř této soustavy konstantní.“*

### 2. Relativistická hybnost

Relativistická hybnost je definována stejně jako hybnost v klasické mechanice:  $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$

Namísto neměnné klasické klidové hmotnosti musíme uvažovat hmotnost relativistickou, takže pro velikost hybnosti platí:

$$\mathbf{p} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \mathbf{v}$$

Zákon zachování hybnosti má v relativistické mechanice tvar: *„Celková relativistická hybnost izolované soustavy těles se při dějích probíhajících uvnitř této soustavy nemění.“*

## Souvislost hmotnosti a energie

V klasické mechanice neexistuje mezi hmotností tělesa a jeho energií žádná obecně platná souvislost. Speciální teorie relativity dochází k závěru, že hmotnost a energie jsou navzájem spjaty a tuto souvislost vyjadřuje vztah:

$$E = mc^2$$

Je-li těleso vzhledem k dané vztažné soustavě v klidu, má tzv. klidovou energii ( $E_0$ ):

$$E_0 = m_0c^2$$

Celkovou energii tělesa tak můžeme chápat jako součet klidové a kinetické energie:

$$E = E_0 + E_k$$

Také platí vztah:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

Pro rychlosti blížíící se rychlosti světla ve vakuu roste energie tělesa nade všechny meze → k urychlení tělesa na tuto rychlost by bylo zapotřebí nekonečně velké energie → žádné těleso s nenulovou klidovou hmotností (energií) nemůže dosáhnout rychlosti světla ve vakuu.

Důkazem souvislosti hmotnosti a energie je tzv. **hmotnostní defekt** při výrazně exotermních reakcích.

Je nesmyslné říkat, že hmotnost se mění v energii a naopak. Vztah  $E = mc^2$  vyjadřuje ekvivalenci hmotnosti a energie – tzn., že pokud má nějaký objekt určitou hmotnost, musí mít i odpovídající energii a naopak. Zákon zachování hmotnosti a energie tak splývají v jediný zákon

Zákon zachování energie má ve speciální teorii relativity má tvar:

*„Celková energie izolované soustavy je při dějích probíhajících uvnitř této soustavy konstantní.“*

## Experimentální ověření speciální teorie relativity

### 1. Relativistické skládání rychlostí – optické pokusy (Michelsonův pokus)

- pokusy se zářením  $\gamma$  částic = částice s nulovou hmotností, vysokou energií, vznikající při jaderných reakcích a pohybující se rychlostí světla

### 2. Dilatace času, Kontrakce délek

- miony jsou nestabilní částice se střední dobou života  $2 \cdot 10^{-6}$  s, vznikají při interakci kosmického záření s atmosférou ve výšce 30 km nad povrchem Země → přestože se pohybují rychlostí světla, neměli bychom je při povrchu Země zachytit. Přesto je ale detekujeme na mořské hladině

- v roce 1985 byl proveden laserový pokus, který ověřil dilataci času s přesností na 99,99996%

### 3. Relativistická hmotnost a hybnost

- důkazem je funkčnost urychlovačů elementárních částic

## Maturitní otázka č. 28 – Fyzika mikrosvětla

Rozměry atomu  $\approx 10^{-10}m$

Rozměry jádra  $\approx 10^{-15}m$

Hmotnost protonu  $\approx 10^{-27}kg$

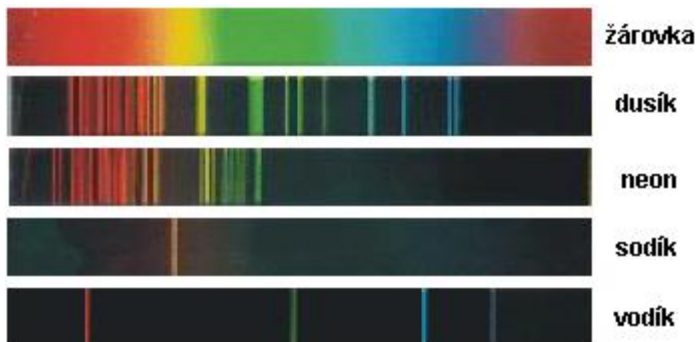
Hmotnost elektronu  $\approx 10^{-31}kg$

### Úvod do atomové fyziky

= pouze fyzika atomového obalu

### Energetické hladiny atomu vodíku

Klasické zahřáté těleso vyzařuje spojité elektromagnetické záření. Takto se ovšem nechovají plyny, které září čárovým spektrem.



Toho si všimnul i švýcarský fyzik Johann Jakob Balmer, který zkoumal spektrum vodíku. Jednotlivé frekvence, které odpovídají spektrálním čarám, sjednotil vzorcem:

$$f = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

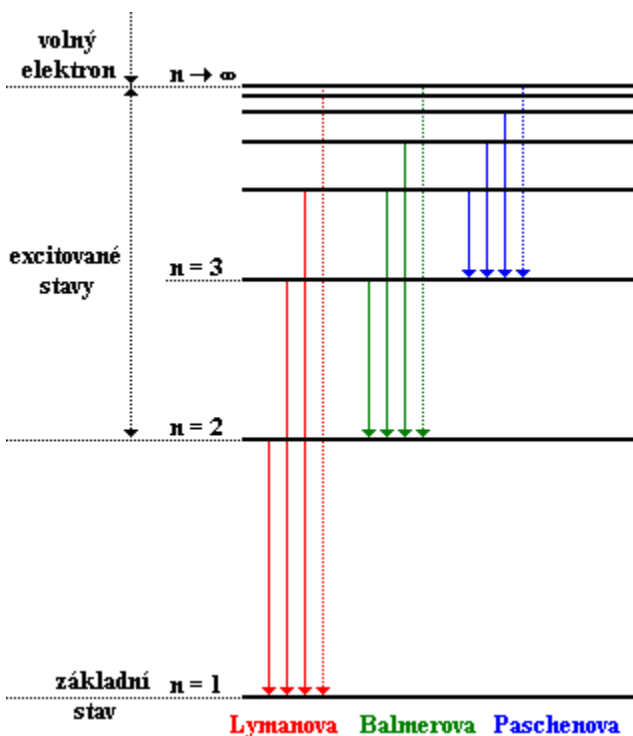
$$n = 1, 2, 3, \dots; m = 1, 2, 3, \dots; n > m$$

$$R \doteq 3,3 \cdot 10^{15} Hz \text{ (Rydbergova frekvence)}$$

Jde o to, že elektron může přecházet z jednotlivých energetických hladin (excitovat), a při tomto přechodu vyzáří nebo pohltí atom o **přesné** frekvenci, která určuje právě výslednou spektrální čáru.

Pro frekvenci těchto fotonů tedy platí stejný vztah, a za  $m$  a  $n$  se dosadí hodnoty jednotlivých energetických stavů, čísla  $m$  pak určují jednotlivé série spektrálních čar (pro  $m = 1$  Lymanova,  $m = 2$  Balmerova atd.)

$$f_{nm} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



Pro energii tohoto fotonu platí:

$$E = hf_{nm} = h \cdot R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = E_n - E_m$$

A pro energie jednotlivých energetických hladin:

$$E_n = -\frac{hR}{n^2}$$

Energie elektronů v atomu je tedy **záporná**. Pro  $n \rightarrow \infty$  platí, že  $E_n = 0 J$ .

V základním stavu má atom vodíku  $E = -13,6 eV$ . Ostatní stavy se nazývají excitované, ty nejsou stabilní a elektron tak spadne zpátky do základního stavu, přičemž vyzáří právě foton o určité frekvenci (princip výbojek). Atom může přijmout libovolné množství energie, ale pouze takové, které odpovídá rozdílu dvou energetických hladin. Pokud atom přijme větší energii než kterou má v základním stavu, elektron opustí obal a atom je tak **ionizován**.

### Modely atomu vodíku

Již ve starém Řecku vyslovil v 5. století p. n. l. Demokritos myšlenku, že hmota se skládá z množství dále nedělitelných částic, které nazval atomy.

Až na konci 19. století vyvrátil tuto myšlenku anglický fyzik J. J. Thompson, který objevil elektron. Ten má vlastnosti (záporného) elektrického náboje a jeho velikost je rovna *elementárnímu náboji*  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$  a hmotnost je téměř 2000x menší než hmotnost atomového jádra ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$ ).

Na základě tohoto objevu vytvořil tzv. **Thompsonův model atomu (puštinový model)** (1897), který předpokládal, že atom je tvořen rovnoměrně rozloženou kladně nabitou hmotou, ve které jsou (jako hrozinky v pudinku) rozptýleny záporně nabitě elektrony.

Tento model překonal na začátku 20. století Ernest Rutherford. Ten studoval rozptýl  $\alpha$ -částic (=jádra helia, která vznikají při radioaktivních přeměnách) na atomech zlata. Protože lehké elektrony nemohou trajektorii těžkých  $\alpha$ -částic ovlivnit a kladný náboj měl být v celém atomu rozprostřen rovnoměrně, měly se  $\alpha$ -částice rozptylovat jen nepatrně (maximálně 1-2°). Při experimentech však byly naměřeny mnohem větší odchylky (někdy až 90°). Jediným možným vysvětlením těchto experimentů je, že celý kladný náboj atomů a prakticky celá jeho hmotnost jsou soustředěny v malém jádru ve středu atomu, jehož rozměry ( $10^{-15} m$ ) jsou řádově 100 000x menší než rozměr celého atomu ( $10^{-10} m$ ) → objev atomového jádra.

Na základě Rutherfordova objevu atomového jádra vznikl tzv. **Rutherfordův model atomu (planetární model)** (1911). Těžké jádro mělo podobné postavení jako Slunce a elektrony kolem něj měly obíhat jako planety. Ani planetární model však nevyhovoval zákonům klasické fyziky. Podle nich by totiž elektrony při obíhání ztrácely vyzářováním svoji energii a za zlomek sekundy by dopadly do jádra. Atomy by nemohly být stabilní a jejich spektrum vyzářování by bylo spojité (tzn., že by vysílaly záření o libovolných frekvencích (vlnových délkách)). Ve skutečnosti však atomy vysílají záření pouze s určitými vlnovými délkami a vytvářejí čárová spektra.

Kvůli tomuto nedostatku vznikl o dva roky později díky dánskému fyzikovi Nielsu Bohrovi podobný model založený na podobném planetárním principu, pouze s menší „kvantovou úpravou“. Tzv. **Bohrův model atomu** (1913). Ten je založen na několika principech: Elektrony se pohybují po kružnicových trajektoriích (hladinách), na nichž nevyzařují žádné elektromagnetické záření a při přechodu z jedné hladiny na druhou elektron vyzáří (pohlí) právě 1 foton. Ale i tento model byl později překonán

### Kvantově mechanický model atomu vodíku

Pomocí klasické fyziky nelze vysvětlit stabilitu a kvantování energie atomu. Tyto jevy vysvětluje až kvantová

fyzika, která vychází z de Broglieho hypotézy o vlnových vlastnostech částic. Základní rovnici kvantové fyziky zformuloval Erwin Schrödinger a vyšel v ní z vlnových vlastností elektronu.

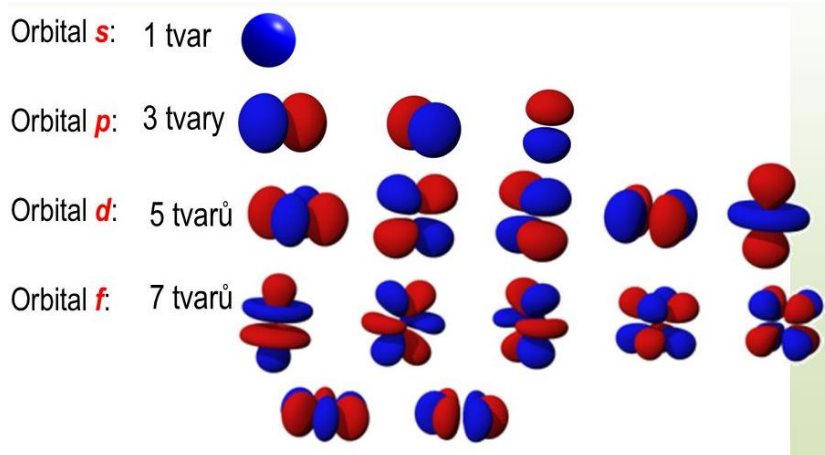
Jednotlivým stavům elektronu v atomu přiřadili stojaté vlny v trojrozměrném prostoru. Pro charakteristiku každé stojaté vlny v atomu vodíku je tedy potřeba určit 3 parametry rovnice – tzn. **tři kvantová čísla** (resp. 4):

1. Hlavní kvantové číslo ( $n$ );  $n = 1, 2, 3, \dots$ ; určuje  $E$  a velikost atomového orbitalu
2. Vedlejší kvantové fyziky ( $l$ );  $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ ; určuje tvar atomového orbitalu (nebo také: s, p, ...)
3. Magnetické kvantové číslo ( $m$ );  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ; určuje orientaci v prostoru
4. Magnetické spinové číslo ( $m_s$ );  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ ; určuje orientaci elektronu v magnetickém poli, nemá obdobu v makrosvětě

Každému hlavnímu kvantovému číslu tedy odpovídá celkem  $n^2$  stavů popsaných kvantovými čísly  $l, m$ .

Trojice kvantových čísel udává rozložení pravděpodobnosti výskytu elektronu v prostoru.

**Orbital** je oblast, ve které je pravděpodobnost výskytu elektronu v prostoru (alespoň 90%).



V atomu vodíku (a pouze v tomto atomu) závisí energie elektronu pouze na hlavním kvantovém čísle. Energie  $E_1$  elektronu v základním stavu má hodnotu  $-13,6$  eV.

Energie excitovaných stavů potom vypočítáme jako:

$$E_n = \frac{1}{n^2} E_1$$

### „Rozdělení částic“

Částice se dají rozdělit do dvou základních skupin:

- I. **Fermiony** = Částice, které podléhají Pauliho principu vylučnosti a jsou stavebními částicemi hmoty (vytvářejí struktury)
- II. **Bosony** = Částice, které nepodléhají Pauliho principu vylučnosti a nevytvářejí struktury. Jde o všechny částice vzájemného silového působení

### Pauliho vylučovací princip

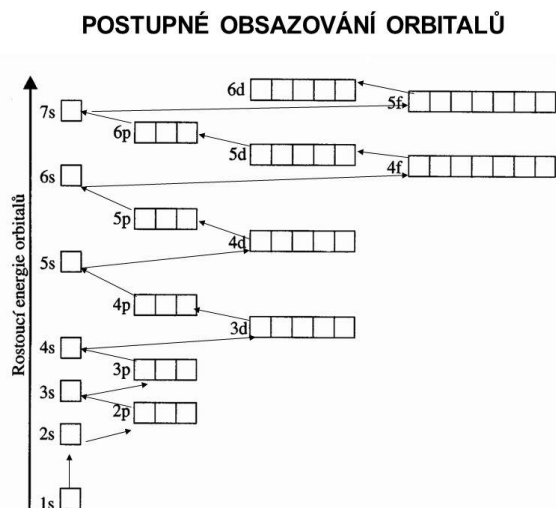
Atom vodíku obsahuje jediný elektron a tvoří jednoduchou soustavu. Atomy s větším počtem elektronů tvoří mnohem složitější soustavy a energie elektronu v nich nezávisí pouze na hlavním kvantovém čísle ( $n$ ), ale i na vedlejším kvantovém čísle ( $l$ ). Rozdělení energií jednotlivých elektronů v atomu popisuje Pauliho princip:

*Žádné 2 fermiony se nemohou v jednom systému vyskytovat ve stejném stavu.“*



Wolfgang Pauli při formulování svého principu předpokládal, že stav elektronu v atomu je určen čtyřmi kvantovými čísly (navíc se spinovým).

Hodnoty energie stacionárních stavů elektronů nazýváme též **energetické hladiny**. V základním stavu atomu obsahují elektrony hladiny s nejnižšími energiemi (ovšem v souladu s Pauliho principem). Stav, který se liší pouze hodnotou magnetického čísla, mají stejné energie. Kdyby Pauliho princip neplatil, měly by všechny elektrony v atomu nejnižší možnou hodnotu energie (byly by ve stavu 1s).



Elektron obsazuje orbitály tak, aby vzniklá soustava měla co nejmenší energii.

Ve spektroskopii je zvykem označovat jednotlivé stavy hlavním kvantovým číslem a vedlejším kvantovým číslem vyjadřovat písmeny (pro  $l$  v pořadí 0, 1, 2, 3, 4) s, p, d, f, g. Například zápis 3d odpovídá stavu s  $n=3$  a  $l=2$  apod. Rozdělení elektronů v atomu do jednotlivých do jednotlivých energetických hladin nazýváme **elektronová konfigurace**. Schéma energetických hladin elektronů tvoří následující posloupnost:

1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d 4p atd.

V chemii se navíc hlavní kvantová čísla označují jako: K, L, M, N,...

Protože chemické vlastnosti prvků velice těsně souvisí se strukturou elektronového obalu atomu, můžeme jednotlivé prvky na základě tohoto kritéria setřídít do periodické soustavy prvků.

## Chemické vazby

V chemii hlavní kvantová čísla označují **slupky**, a vedlejší **podslupky**.

Slupky s nejvyšším hlavním kvantovým číslem nazývají jako **valenční** a podílejí se na vzniku vazby (využívá se toho, že **elektrony jsou zaměnitelné**), ostatním se říká **vnitřní**.

**Vazební energie** = práce, kterou musíme dodat svázané soustavě, abychom ji rozštěpili na jednotlivé části.

**Energie soustavy je vždy nižší než jednotlivé atomy**. Soustavy se snaží přejít do stavu s nižší energií.

Všechny chemické děje spočívají na interakci elektronových obalů, všechny mají původ v elektromagnetických silách.

Máme 2 základní vazby:

### 1. Iontová

Když první prvek má ve valenční slupce 1 elektron, a druhému prvku právě 1 chybí (NaCl). Elektron je potom „společným vlastnictvím“ a způsobuje vazbu.

Spočítáním vlnové funkce zjistíme tvar orbitalu.

## 2. Kovalentní

Vzniká ve chvíli, kdy se přiblíží atomy na tolik, že se jejich orbitály překryjí a v této oblasti se elektrony opět stanou „společným vlastnictvím“.

Spočítáním vlnové funkce zjistíme tvar orbitalu.

## 3. Kovová

Jde o typ kovalentní vazby. O elektrony se dělí mnohem více atomů, elektron se pak může pohybovat všude a látka vede elektrický proud.

Spočítáním vlnové funkce zjistíme tvar orbitalu.

## Lasery

Je-li atom v excitovaném stavu s energií  $E_2$ , může při přechodu do základního stavu s energií  $E_1$  vyzářit foton.

Přechod elektronu z vyššího do nižšího energetického stavu se současným vyzářením fotonu probíhá samovolně v náhodném okamžiku a nazývá se **spontánní emise**. Při tomto ději vyzařují jednotlivé atomy nekoordinovaně a vzniklé záření je nekoherentní (tímto způsobem září např. zahřátá tělesa)

Opačný proces, při kterém atom v nižším energetickém stavu pohltí foton odpovídající frekvence a přejde do vyššího energetického stavu, se nazývá **absorpce záření**.

Kromě spontánní emise a absorpce záření je možný ještě třetí proces, při kterém dopadne na atom foton odpovídající frekvence a přiměje ho k přechodu do nižšího energetického stavu, za vyzářením dalšího fotonu. Záření vysílané atomem pak má stejný směr a stejnou fázi jako záření, které přechod vyvolalo. Vysílané záření je koherentní s dopadajícím zářením, které se tímto zesiluje, a celý proces nazýváme **stimulovaná emise**.

Slovo laser je zkratkou z Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (= zesílení světla stimulovanou emisí záření).

Princip laseru spočívá v tom, že více stejných atomů dostaneme do vyššího energetického stavu a při expozici (ozáření) zářením s frekvencí splňující podmínku  $hf = E_2 - E_1$  vyvoláme stimulovanou emisi, která silně zvýší energii dopadajícího záření.

Laserový paprsek je vysoce monofrekvenční, přenáší velkou energii na malém prostoru a lze ho velmi dobře směřovat. Díky tomu se lasery používají v mikroelektronice, medicíně (oční chirurgie), holografii a informatice.

## Maturitní otázka č. 28 – Fyzika mikrosvětla

Rozměry atomu  $\approx 10^{-10}m$

Rozměry jádra  $\approx 10^{-15}m$

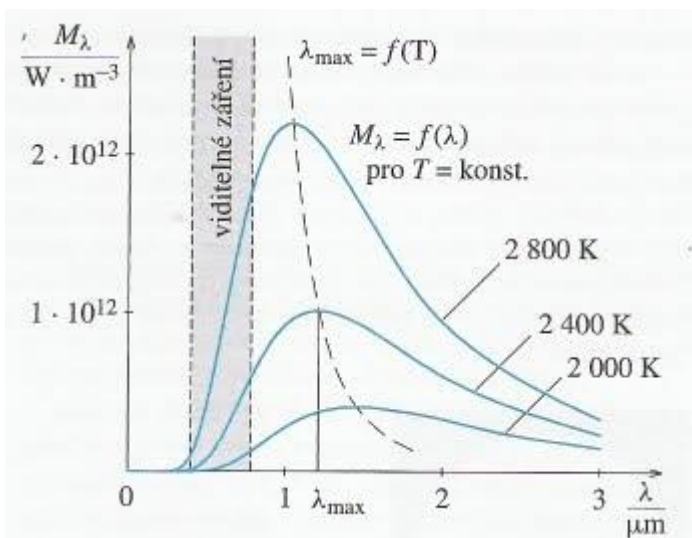
Hmotnost protonu  $\approx 10^{-27}kg$

Hmotnost elektronu  $\approx 10^{-31}kg$

### Úvod do kvantové fyziky

#### Problémy klasické fyziky

##### 1. UV katastrofa (=záření černého tělesa)



Nejblíže se k popisu křivky přiblížil Rayleigh:

$$E_{(f)} =$$

## Planckova kvantová hypotéza

Zformuloval ji německý fyzik Max Karl Ernst Ludwig Planck v roce 1900. Kvantová hypotéza říká, že energie elektromagnetického záření nemůže být libovolně malá, neboť je kvantována a její kvantum závisí na frekvenci záření. Energie takového kvanta záření je úměrná jeho frekvenci, přičemž konstantou úměrnosti je tzv.

**Planckova konstanta  $h$ .** Pro energii jednoho kvanta tedy platí:

$$E = hf$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

## Fotoelektrický jev (fotoefekt)

**Fotoelektrický jev** je děj, kdy se účinkem dopadajícího záření uvolňují z povrchu kovu elektrony.

Záření dopadající na povrch některých látek uvolňuje z jejich povrchu elektrony. Na základě představ klasické fyziky by se zdálo, že čím větší bude intenzita dopadajícího záření (tj. energie, dopadající na jednotku plochy za jednotku času), tím snadněji se budou elektrony uvolňovat a tím větší bude jejich energie.

Experimenty však dokázaly, že nezáleží na intenzitě dopadajícího záření, ale na jeho frekvenci. Pro každý kov totiž existuje určitá **mezní frekvence** ( $f_0$ ) a jí odpovídající **mezní vlnová délka** ( $\lambda_0$ ) taková, že elektrony se uvolňují pouze při této frekvenci a frekvencích vyšších. Na frekvenci také záleží energie vylétávajících elektronů. Je-li frekvence záření vyšší než mezní frekvence, je proud elektronů přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření.

Zákonitosti fotoelektrického jevu vysvětlil v roce 1905 Albert Einstein a využil při tom Planckovy kvantové hypotézy (NC 1921). Tato teorie vyplývá z představy, že energie záření není přenášena spojitě, ale skládá se z určitých porcí (kvant), které mohou být pohlceny nebo vyzářeny pouze jako celek. Tyto nejmenší a dále nedělitelné porce nazýváme **kvanta**.

Díky tomu můžeme elektromagnetickou vlnu chápat jako soubor částic (původně se jim říkalo světelná kvanta), z nichž každé má svou energii a hybnost. Tyto částice se neustále pohybují rychlostí světla, nelze je urychlit ani zpomalit a mají nulovou klidovou hmotnost. To ale znamená, že vlastně nejde o částice ve smyslu klasické fyziky, ale o objekt mikrosvětla, pro nějž v klasické fyzice neexistuje ekvivalent. Namísto Einsteinova termínu světelné kvantum v současnosti používáme označení **foton**.

Pro energii fotonu platí:

$$E = h \cdot f$$

Pro hybnost fotonu platí:

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

$$p = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Při fotoelektrickém jevu odevzdá každý foton celou svou energii jedinému elektronu z povrchu kovu. Část této energie se spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu (tzv. výstupní práce elektronu z kovu, zn.  $W_v$ ) a zbytek energie fotonu se přemění v kinetickou energii elektronu.

$$hf = W_v + E_k = W_v + \frac{1}{2}mv^2$$

$$f_0 = \frac{W_v}{h}$$

Pro frekvence menší než  $f_0$  je energie fotonu příliš malá na to, aby uvolnila elektron. Při frekvenci větší než  $f_0$  se ihned začnou elektrony z kovu uvolňovat a jejich počet bude záviset na počtu fotonů, které jsou k dispozici – tzn. intenzitě záření. Tato Einsteinova rovnice umožňuje experimentálně určit hodnotu Planckovy konstanty (měření závislosti  $E_k$  vylétujících elektronů na frekvenci dopadajícího záření)

V atomové fyzice udáváme energii často v elektronvoltech (zn. eV). Jeden elektronvolt je energie, kterou získá elektron urychlen potenciálovým napětím jeden volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Dopadající záření může buď uvolňovat elektron ven z kovu (tzv. **vnější fotoelektrický jev**) nebo může uvolňovat elektrony uvnitř polovodičového krystalu a zvyšovat tak jeho vodivost (tzv. **vnitřní fotoelektrický jev**). Toho se často využívá v technické praxi. Součástky z polovodičů, jejichž vodivost ovlivňuje osvětlení, se nazývají **fotorezistory a fotodiody**. Používají se zejména v **ovládacích mechanismech** (automatické dveře, spínače osvětlení apod.), **expozimetrech** (měřiče osvětlení při fotografování), **televizních kamerách, kopírovacích strojích** nebo **slunečních bateriích**.

### Comptonův jev

**Comptonův jev** je fyzikální děj, při kterém se po srážce záření s atomem (jeho elektronem), mění vlnová délka záření.

Je důkazem hypotézy o existenci světelných kvant, a tím i důkazem o částicovém (korpuskulárním) charakteru světla.

Americký fyzik Arthur Holly Compton při svých pokusech zkoumal rozptyl rentgenového záření na uhlíkové destičce (tj. interakci s atomy – elektrony uhlíku). Zjistil, že v rozptýleném záření existuje nejen záření s původní vlnovou délkou ( $\lambda$ ), ale i záření s větší vlnovou délkou ( $\lambda'$ ).

Z hlediska klasické fyziky by se vlnová délka ani frekvence záření měnit neměli. Zvětšení vlnové délky vysvětlila až fotonová hypotéza. Podle ní při srážce předává foton část své energie elektronu. Podle zákona zachování energie pak musí platit: energie fotonu před srážkou se rozdělí na energii předanou elektronu a energii fotonu po srážce

$$E_0 = E_e + E_1$$

$$hf = E_e + hf'$$

$$f > f' \quad \rightarrow \quad \lambda < \lambda'$$

Přijmeme-li hypotézu, že světlo je proudem částic, které nazýváme fotony, je zvětšení vlnové délky záření po interakci s fotony vysvětlitelné velmi snadno. Rozdíl vlnových délek ( $\lambda' - \lambda$ ) rozptýleného a dopadajícího fotonu závisí na úhlu rozptylu. Tato závislost vyplývá jednoznačně ze zákonů zachování hybnosti a energie pro srážku fotonu s elektronem → Comptonův jev je důkazem částicového charakteru světla.

### Vlnové vlastnosti částic

Francouzský fyzik **Louis de Broglie** (1924) rozšířil korpuskulárně vlnový dualismus i na další objekty mikrosvětla – protony, elektrony i tělesa z nich tvořená. Navrhl přiřadit každé volně se pohybující částici o energii  $E$  a hybnosti  $p$  vlnovou délku analogicky fotonům.

Tyto vztahy platí nejenom pro fotony s nulovou klidovou hmotností, ale i pro částice s nenulovou klidovou hmotností jako jsou elektrony nebo protony. De Broglieho hypotéza vedla k předpovědi, že i elektronové paprsky budou mít vlnové vlastnosti – bude na nich pozorována interference nebo difrakce → **de Broglieho vlnová délka**.

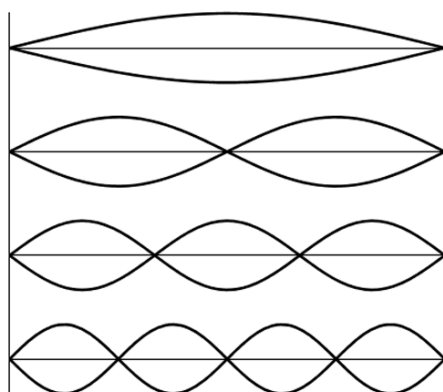
Tato předpověď byla experimentálně prokázána Clintonem Davissonem a Lesterem Gelmerem (USA, 1927). Odstřelovali krystal niklu elektrony a pomocí detektoru monitorovali dopad elektronů. Krystalová mřížka niklu se chovala jako difrakční mřížka ( $b \sim \lambda$ ) a vznikl difrakční obrazec → **částice je tedy chová i jako vlna.**

Tato vlna nemá fyzikální opodstatnění, jde pouze o matematický model.

$$\begin{aligned} E = hf & \rightarrow f = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} \\ p = \frac{h}{\lambda} & \rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \end{aligned}$$

Kde  $E$  se bere jako kinetická energie (klasická, nebo relativistická).

V důsledku na to fyzik **Max Born** zavedl tzv. **pravděpodobnostní interpretaci** = nic se nevlíní, pouze musíme opustit pohled, že něco je vlna nebo částice a zavádíme nový matematický popis.



$$\Delta w = |\Psi|^2 \cdot \Delta V$$

$\Psi_{(x,y,z,t)}$  ... komplexní vlnová funkce v prostoru

$\Delta w$  ... pravděpodobnost výskytu částice

$\Delta V$  ... objem

$$|\Psi|^2 = \frac{\Delta w}{\Delta V}$$

$|\Psi|^2$  ... hustota pravděpodobnosti výskytu částice

**Schrödinger:** popsal rovnici, která obsahuje vlnovou funkci a jejímž řešením lze nalézt rozložení pravděpodobnosti výskytu částice v prostoru (např. orbitaly)

**Heisenberg:** pracoval v Německu a nezávisle na Schrödingerovi zavedl tzv. **relaci neurčitosti** (buď známe rychlost částice, nebo její polohu)

$$\Delta p \cdot \Delta x = konst.$$

→ Každý model používá jiné podstaty a matematiky, ale oba modely mají stejné výsledky

### „částice v nekonečně hluboké potenciální jámě“

Jde o myšlenkový pokus, částice může být volná a může se jakkoliv pohybovat po úsečce  $L$  (zjednodušeně uvažujeme pouze jeden rozměr) a z této úsečky se nemůže nijak dostat (na její překonání potřebuje „nekonečně“ energie).

Pro tento případ se chová jako de Broglieho vlna, jelikož se pohybuje po úsečce, vzniká stojaté vlnění.

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}; n = 1, 2, 3 \dots$$

$$\lambda = \frac{2L}{n}$$

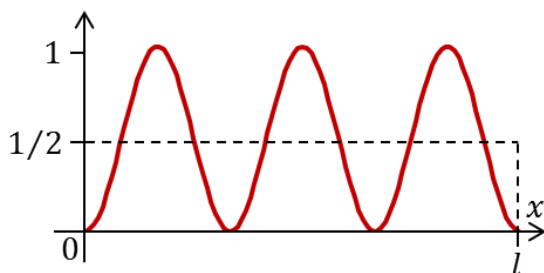
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{h}{2mL} \cdot n$$

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{h^2}{8mL^2} \cdot n^2$$

Každému stavu se říká **stacionární vztah**.

Výskyt částice je zároveň ovlivněn pravděpodobnostní  $|\Psi|^2$ :



V „uzlech“ se částice nevyskytuje nikdy, v kmitnách s největší pravděpodobností -> **kvantová teleportace**.

Částice se tedy pohybuje tak, že se v různých časech vyskytuje na různých místech.

Pokud se změní její energie, tak se pouze dostane do jiného stavu (podle vzorce). Tuto energii může přijmout (srážkou nebo zářením) nebo ztratit (vyzářit) pouze v určitých kvantech (ve formě fotonu), které odpovídá rozdílu 2 stavů -> **energetické hladiny**.

$$h \cdot f_{mn} = E_m - E_n$$

Pokud by se částice pohybovala v „konečně hluboké potenciální jámě“, je jistá pravděpodobnost, že částice tuto hladinu překoná, i když nemá dostatek energie -> **tunelový jev** (využití například u polovodičů)

### Korpuskulárně – vlnový dualismus

Při fotoelektrickém jevu a při Comptonovu jevu se světlo chová jako proud částic. Naproti tomu difrakce (ohyb), interference a polarizace svědčí o jeho vlnové povaze. Tzn., že fotony se někdy projevují jako částice a někdy jako vlny. Tento rozpor vzniká díky tomu, že se snažíme objekt mikrosvěta popsat pomocí klasické fyziky. Ve skutečnosti je foton objekt mikrosvěta, který má vlnové i částicové vlastnosti, ale není přitom ani vlnou ani částicí → pro popis objektu mikrosvěta nemůžeme mechanicky používat pojmy klasické fyziky.

Pokud bychom chtěli určit trajektorii fotonu při průchodu světla dvojštěrbínou, museli bychom určit, kterou ze štěrbin foton prošel. Přitom bychom už ale nedokázali vysvětlit vznik interferenčního obrazu → tzn. že namísto polohy nebo trajektorie můžeme ve fyzice mikrosvěta určovat pouze pravděpodobnost výskytu. Tuto pravděpodobnost nám určuje **Schrödingerova pravděpodobnostní funkce**.

Obecně lze říci, že se zkracováním vlnové délky se částicové vlastnosti fotonů projevují výrazněji.

### Princip korespondence

Princip korespondence nám říká, že aplikujeme-li zákony kvantové fyziky na makroobjekty, dávají nám stejné výsledky jako klasická fyzika