

# Opakovací kurz fyziky

Mgr. Tomáš Náhlík Ph.D.

Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích

24. ledna 2022

# Soustava SI – Veličiny a jednotky

## Fyzikální veličina

- Zápis:
  - Obecně:  $X = \{X\}[X]$
  - Příklad:  $F = \{10\}[N]$
  - Fyzikální veličina –  $F$  – co měříme, počítáme. . .
  - Číselná hodnota – 10 – kolik toho je – kvantitativní znak
  - Jednotka –  $N$  – v čem měříme – kvalitativní znak
- Určena číselnou hodnotou a jednotkou (číslo bez jednotky nemá smysl, pozor na bezrozměrné veličiny)

# Soustava SI – Veličiny a jednotky

## Soustava SI

- 7 základních jednotek, odvozené jednotky, násobky a díly jednotek

Veličina	Značka	Základní jednotka	Značka
délka	l, s, d	metr	m
hmotnost	m	kilogram	kg
čas	t	sekunda	s
elektrický proud	I	ampér	A
termodynamická teplota	T	kelvin	K
látkové množství	n	mol	mol
svítivost	I	kandela	cd

# Soustava SI – Veličiny a jednotky

- Násobky a díly jednotek

Násobky			Díly		
Název	Zkratka	Hodnota	Název	Zkratka	Hodnota
jotta	Y	$10^{24}$	yokto	y	$10^{-24}$
zetta	Z	$10^{21}$	zepto	z	$10^{-21}$
exa	E	$10^{18}$	atto	a	$10^{-18}$
peta	P	$10^{15}$	femto	f	$10^{-15}$
tera	T	$10^{12}$	piko	p	$10^{-12}$
giga	G	$10^9$	nano	n	$10^{-9}$
mega	M	$10^6$	mikro	$\mu$	$10^{-6}$
kilo	k	$10^3$	mili	m	$10^{-3}$

- Další násobky a díly:  
hekto – h –  $10^2$ ; deka – da –  $10^1$   
deci – d –  $10^{-2}$ ; centi – c –  $10^{-1}$

# Soustava SI – Veličiny a jednotky

## Soustava SI

- Odvozené fyzikální veličiny a jednotky
  - Ze základních jednotek SI na základě definičních vztahů
  - Příklad:  
$$v = \frac{s}{t} = \frac{[m]}{[s]} \Rightarrow [v] = \frac{m}{s} = m \cdot s^{-1}$$
$$F = m \cdot a = [kg] \cdot [m \cdot s^{-2}] \Rightarrow [F] = kg \cdot m \cdot s^{-2} = N$$
- Doplnkové jednotky
  - radián – rad – jednotka rovinného úhlu
  - steradián – srad – jednotka prostorového úhlu
- Vedlejší jednotky – nepatří do soustavy SI
  - Čas – minuta, hodina, den, rok
  - Objem – litr –  $1l = 1dm^3 = 10^{-3}m^3$
  - Hmotnost – tuna –  $1t = 1000kg$

# Soustava SI – Veličiny a jednotky

## Skalární a vektorové veličiny

- Skalární fyzikální veličina – **skaláry** – jednoznačně určena číselnou hodnotou a jednotkou
  - čas, hmotnost, teplota. . .
- Vektorové fyzikální veličiny – **vektory** – určeny číselnou hodnotou, jednotkou a **směrem** (obvykle se označují šipkou nad značkou fyzikální veličiny –  $\vec{F}$ )
  - síla, rychlost, zrychlení. . .
- Vektorové výpočty
  - Vektorový součet, rozdíl
  - Vektorový součin – výsledek je vektor kolmý na oba původní vektory
$$c = a \times b; c = |a| \cdot |b| \sin \alpha$$
  - Skalární součin – výsledek je skalár
$$c = a \cdot b; c = |a| \cdot |b| \cos \alpha$$

# Kinematika

## Kinematika

- Studuje pohyby těles nikoli příčiny
- Základní pojmy
  - Hmotný bod – model tělesa, nemá rozměry, má hmotnost
  - Vztažná soustava (těleso) – soustava (těleso) vůči, které zkoumáme pohybový stav tělesa
  - Soustava souřadnic – kartézské souřadnice, polární souřadnice, sférické souřadnice, cylindrické souřadnice
- Kinematický popis
  - Poloha – polohový vektor  $\vec{r}$ , dráha  $s$
  - Rychlost –  $\vec{v}$
  - Zrychlení –  $\vec{a}$

## Základní dělení pohybu

- Podle tvaru trajektorie
  - Přímočarý –  $\vec{v}$  má stále stejný směr
  - Křivočarý –  $\vec{v}$  mění směr, je tečnou ke křivce trajektorie
- Podle velikosti vektoru okamžité rychlosti
  - Rovnoměrný – velikost rychlosti se nemění,  $|v| = konst.$ ,  $|a_t| = 0$
  - Nerovnoměrný – velikost rychlosti se mění,  $|v| \neq konst.$ ,  $|a_t| \neq 0$

# Kinematika

## Kinematické veličiny

- Dráha  $s$  – délka trajektorie ( = množina všech bodů, jimiž HB prochází)
- Rychlost  $\vec{v}$  – změna polohy za jednotku času
  - Okamžitá rychlost –  $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$  pro  $\Delta t \rightarrow 0$
  - Průměrná rychlost –  $v_p = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{\Delta t}$
- Zrychlení  $\vec{a}$  – změna  $\vec{v}$  za jednotku času
  - Okamžité –  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , pro  $t \rightarrow 0$
  - Tečné –  $a_t$  – změna velikosti rychlosti, stejný nebo opačný směr k vektoru okamžité rychlosti
  - Normálové –  $a_n$  – změna směru vektoru rychlosti, kolmý k vektoru okamžité rychlosti

# Kinematika

## Pohyb

- Rovnoměrný

$$a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, a_n = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s-s_0}{t-t_0} = \textit{konst.},$$

$$s = s_0 + vt$$

- Rovnoměrně zrychlený

$$v = v_0 + a_t t, s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_t t^2$$

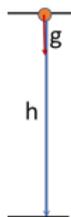
- Rovnoměrně zpomalený

$$v = v_0 - a_t t, s = s_0 + v_0 t - \frac{1}{2} a_t t^2$$

# Kinematika

## Volný pád

- Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb bez počáteční rychlosti
- Pohyb v tíhovém poli Země ve vakuu (bez odporu vzduchu)
- Zrychlení  $a_t = g = 9,81ms^{-2} \doteq 10ms^{-2}$
- Tíhové zrychlení  $g$  směřuje vždy svisle dolů
- $v = gt$ ,  $s = \frac{1}{2}gt^2$
- Rychlost volného pádu nezávisí na hmotnosti tělesa



Obrázek 1: Volný pád

## Skládání pohybů

- Princip nezávislosti pohybů  
Koná-li těleso dva nebo více pohybů po dobu  $t$ , je jeho výsledná poloha taková, jako kdyby konal tyto pohyby postupně v libovolném pořadí, každý po dobu  $t$ .
- Složený pohyb lze rozložit a zkoumat každý pohyb zvlášť
- Příklady: Vodorovný vrh, šikmý vrh, loďka na řece, člověk v pohybujícím se vozidle

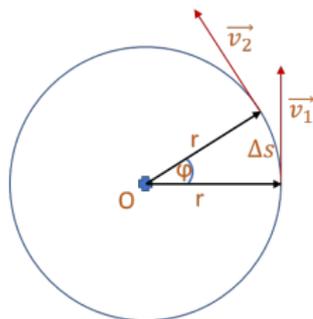
# Kinematika

## Pohyb po kružnici

- Rovnoměrný pohyb

Pohyb ve stále stejné vzdálenosti od osy otáčení

Velikost rychlosti  $v = konst.$ , mění se jeho směr (má směr tečny ke kružnici) Obr. 2,  $|v_1| = |v_2|$



Obrázek 2: Pohyb po kružnici

# Kinematika

## Popis pohybu po kružnici

- Polohový vektor  $\vec{r}$
- Úhel (úhlová dráha)  $\varphi$ , měřený v radiánech,  $\varphi = \frac{\Delta s}{r}$
- Úhlová rychlost  $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ , pro  $t \rightarrow 0$ ,  $[\omega] = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
- Perioda (oběžná doba)  $T$  – za jak dlouho bod opíše celou kružnici (úhel  $360^\circ = 2\pi \text{rad}$ )
- Frekvence  $f$  – počet opakování za 1s  
 $f = \frac{1}{T}$ ,  $[f] = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$
- $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
- $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{r\Delta\varphi}{\Delta t} = r \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = r \cdot \omega$

## Pohyb po kružnici

- Zrychlení  $a$   
Lze rozložit do dvou směrů
  - Dostředivé  $a_d$  – směr do bodu otáčení, mění směr vektoru rychlosti
  - Tečné  $a_t$  – ve směru tečny ke kružnici, mění velikost vektoru rychlosti
- Dostředivé vs. odstředivé zrychlení – stejně velká, mají opačný směr, nelze je kreslit do jednoho obrázku, dostředivé zrychlení se nachází v inerciální soustavě, odstředivé zrychlení v neinerciální soustavě

## Porovnání popisů pohybu

- Dráha:  $s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$
- Úhlová dráha:  $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \varepsilon t^2$
- Obvodová (dráhová) rychlost:  $v = v_0 + a_t t$
- Úhlová rychlost:  $\omega = \omega_0 + \varepsilon t_0$
- Zrychlení:  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ ,  $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$ ,  $a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ ,  $a_n = a_d = \frac{v^2}{r}$
- Úhlové zrychlení:  $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$

# Dynamika

## Dynamika

- Studuje příčiny pohybu – proč a za jakých podmínek se tělesa pohybují
- Základní veličina – síla  $\vec{F}$ ,  $[F] = N = kg \cdot m \cdot s^{-2}$   
Projevuje se při vzájemném působení těles (při kontaktu i prostřednictvím silových polí)  
Projev účinku – deformace, změna pohybového stavu
- Základní zákony dynamiky – Newtonovy pohybové zákony

# Dynamika

## Síly působící na soustavu těles

- Vnitřní – síly, kterými na sebe působí tělesa uvnitř soustavy, nemění pohybový stav soustavy (celková hybnost soustavy se nemění)
- Vnější – síly působící na tělesa soustavy nebo na celou soustavu, mohou měnit pohybový stav soustavy, pokud výslednice vnějších sil není nulová

## Síly podle vykonané práce

- Konzervativní – vykonaná práce nezávisí na cestě, ale jen na počáteční a koncové poloze
- Disipativní – práce závisí na cestě a je vždy nenulová, část mechanické energie se mění na teplo (tření, deformace)

## Newtonovy pohybové zákony

- I. pohybový zákon – zákon setrvačnosti
  - Těleso setrvává v klidu nebo pohybu rovnoměrném přímočarém, pokud není nuceno vnějšími silami tento svůj stav změnit.
  - Setrvačnost – vlastnost hmotných těles, které se snaží setrvat ve stavu před vnějším fyzikálním působením, jedná se o odpor tělesa vůči změně jeho rychlosti
  - Inerciální vztažná soustava – izolované těleso setrvává v klidu nebo rovnoměrné pohybu přímočarém (platí Newtonovy pohybové zákony)
  - Neinerciální vztažná soustava – pohybuje se se zrychlením (neplatí zákon síly ani setrvačnosti)
  - Izolovaná soustava – nepůsobí žádné vnější síly, neinteraguje s okolím

# Dynamika

## Galileiho princip relativity

- Zákony mechaniky jsou stejné ve všech inerciálních vztažných soustavách. Mechanickými pokusy nelze rozlišit inerciální soustavy.

Hybnost  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ ,  $[p] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

- Charakterizuje pohybový stav tělesa.
- Z hybnosti lze usuzovat na účinky při nárazu

## Zákon zachování hybnosti

- Celková hybnost izolované soustavy se vzájemným silovým působením nemění
- $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{konst.}$

## II. pohybový zákon – zákon síly

- V inerciální vztažné soustavě je podíl změny hybnosti a času, za který ke změně došlo, roven výsledné vnější síle.
- $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ ,  $[F] = N$
- Pro  $m = konst.$  lze psát  $\vec{F} = m \vec{a}$
- $\Delta \vec{p} = \vec{F} \cdot \Delta t$
- $\vec{F} \cdot \Delta t$  – časový účinek síly – Impuls síly  $\vec{I}$ ,  $[I] = N \cdot s$   
Změna hybnosti závisí nejen na velikosti síly, ale i na době jejího působení

## III. pohybový zákon – zákon akce a reakce

- Dvě tělesa na sebe navzájem působí stejně velkými silami opačného směru. Síly akce  $\vec{F}_1$  a reakce  $\vec{F}_2$  současně vznikají a zanikají.
- $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$
- Síly akce a reakce se ve svém výsledném působení neruší, protože každá působí na jiné těleso.

## Smykové a valivé tření

- Třecí síly  $\vec{F}_t$  – vznikají při pohybu tělesa v látkovém prostředí nebo po povrchu jiných těles a mají původ v nerovnosti styčných ploch a v jejich deformaci
- Smykové tření – třecí síla působící na stykové ploše těles, má opačný směr než rychlost tělesa
- $\vec{F}_t = f \cdot \vec{F}_N$ , kde  $f$  je součinitel smykového tření a  $\vec{F}_N$  je normálová síla působící kolmo do podložky
- Součinitel klidového tření  $f_0$ ,  $f_0 > f$
- Valivý odpor  $F_v = \xi \frac{F_N}{R}$ ,  $F_v \ll F_t$

## Dostředivá síla

- Křivočarý pohyb  $\Rightarrow$  mění se směr  $\vec{v} \Rightarrow$  těleso má dostředivé zrychlení  $\vec{a}_d$
- $\vec{F}_d = m \cdot \vec{a}_d = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$
- Realizována vzájemným působením těles nebo tělesa a silového pole – tyč, provázek, gravitační pole, magnetické pole...

# Mechanická práce, energie, výkon, příkon, účinnost

Mechanická práce  $W$ ,  $[W] = J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$

- $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$ , kde  $\alpha$  je úhel mezi směrem síly a trajektorií tělesa
- Práce jako dráhový účinek síly
- Další jednotka práce –  $kWh$  – kilowathodina – vychází ze vzorce pro výkon
- $1J = 1W \cdot 1s \Rightarrow 1kWh = 3,6 \cdot 10^6 J$

# Mechanická práce, energie, výkon, příkon, účinnost

Mechanická energie  $E$ ,  $[E] = J$

- Kinetická energie  $E_k$

Skalární veličina, charakterizuje pohybový stav hmotného bodu (tělesa) vzhledem ke zvolené vztažné soustavě,  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

- Potenciální energie  $E_p$

Popisuje působení pole na hmotný bod (těleso)

Tíhová potenciální energie - energie v tíhovém poli Země,

$$E_p = mgh$$

Závisí na volbě nulové hladiny  $E_p$

Velikost změny energie (vykonaná práce) nezávisí na tvaru ani délce trajektorie

- Potenciální energie pružnosti

Mají ji tělesa, která po deformaci vnějšími silami získají působením vnitřních sil původní tvar.

# Mechanická práce, energie, výkon, příkon, účinnost

## Zákon zachování mechanické energie

- Součet kinetické a potenciální energie nazýváme mechanická energie tělesa.  $E = E_k + E_p$
- Při mechanických dějích v izolované soustavě se mění kinetická energie v potenciální a naopak, celková mechanická energie je však konstantní.

## Zobecněný zákon zachování energie

- Celková energie izolované soustavy se nemění.
- energii nelze ani vyrobit, ani zničit, lze jen přeměnit jeden druh energie v jiný.

# Mechanická práce, energie, výkon, příkon, účinnost

Výkon  $P$ ,  $[P] = W$

- Vyjadřuje rychlost s jakou se koná práce
- Okamžitý výkon:  $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$ , pro  $t \rightarrow 0$
- Průměrný výkon:  $P_p = \frac{W}{t}$
- Jiné vyjádření:  $P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = F \cdot v$

Příkon  $P_0$

- Vyjadřuje, jak rychle do daného zařízení přichází energie z okolí.

Účinnost  $\eta$ , bezrozměrná veličina, udává se v procentech

- $\eta = \frac{\text{výkon}}{\text{příkon}} = \frac{P}{P_0}$
- Vždy menší než 1!

# Mechanika tuhého tělesa

## Tuhé těleso

- Fyzikální model tělesa, jehož rozměry nelze zanedbat
- Dokonale tuhé těleso – působením vnějších sil nemění svůj tvar
- Pohyb tuhého tělesa
  - Posuvný – trajektorie všech bodů tělesa je shodná
  - Otáčivý – trajektorie všech bodů jsou kružnice se stejným středem
  - Složený – posuvný + otáčivý

# Mechanika tuhého tělesa

Moment síly  $\vec{M}$  vzhledem k ose otáčení  $O$

- $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ ,  $[M] = N \cdot m$
- $M = F \cdot r \cdot \sin \alpha$ , kde  $\alpha$  je úhel mezi vektory  $\vec{r}$  a  $\vec{F}$
- $M = F \cdot d$ , kde  $d$  je rameno síly
- Směr vektoru  $\vec{M}$  určíme pomocí pravidla pravé ruky – Položíme-li pravou ruku na obvod tělesa tak, aby prsty ukazovaly směr otáčení, vztyčený palec ukazuje směr momentu síly.
- Znaménková dohoda:  $M > 0$  jestliže se těleso otáčí proti směru pohybu hodinových ručiček

Momentová věta

- Otáčivý účinek několika sil působících na těleso se ruší, je-li součet jejich momentů vzhledem k ose otáčení nulový.

# Mechanika tuhého tělesa

## Těžiště

- Působíště výslednice všech tíhových sil  $\vec{F}_G$  působících na jednotlivé hmotné body

## Rovnovážné polohy

- Stálá (stabilní) – po vychýlení se těleso vrací, má nejnižší  $E_p$ , těleso je nejnižší poloze
- Vratká (labilní) – těleso (těžiště) je v nejvyšší poloze,  $E_p$  je maximální
- Volná (indiferentní) – po vychýlení se výška těžiště nemění,  $E_p$  je konstantní

# Mechanika tuhého tělesa

## Jednoduché stroje

- Páka – jednozvratná, dvojjzvratná
- Kladka – pevná, volná, kladkostroj
- Kolo na hřídeli
- Nakloněná rovina, klín, šroub

# Mechanika tuhého tělesa

## Kinetická energie rotujícího tělesa

- Je součtem kinetických všech částic, závisí na poloměru kružnic (obvodová rychlost) a hmotnosti
- Moment setrvačnosti  $J$ ,  $[J] = \text{kg} \cdot \text{m}^2$  – fyzikální veličina popisující rozložení hmoty vzhledem k ose otáčení, ekvivalentem hmotnosti pro rotační pohyb
- Volná osa – osa otáčení procházející těžištěm, není namáhána setrvačnými silami
- Setrvačnick – těleso otáčející se kolem volné osy s velkým momentem setrvačnosti

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Gravitace

- Přitažlivá síla, kterou na sebe vzájemně působí všechna tělesa
- Newtonův gravitační zákon  
Dva hmotné body o hmotnostech  $m_1$  a  $m_2$ , jejichž vzdálenost je  $r$ , se přitahují stejně velkými gravitačními silami  $F_g$  a  $-F_g$ , opačného směru.

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \text{ kde } G \text{ nebo } \kappa \text{ je gravitační konstanta,}$$
$$G = \kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

## Intenzita gravitačního pole

- Pro porovnání silového působení na různých místech gravitačního pole
- $\vec{K} = \frac{\vec{F}_g}{m}$ ,  $[K] = \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Centrální (radiální) gravitační pole

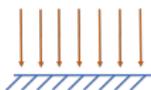
- Vektor intenzity gravitačního pole  $\vec{K}$  směřuje do středu pole



Obrázek 3: Centrální gravitační pole

## Homogenní gravitační pole

- Vektor intenzity gravitačního pole  $\vec{K}$  je v všech místech pole stejný.

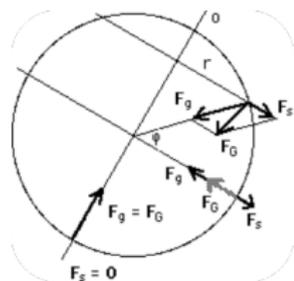


Obrázek 4: Homogenní gravitační pole

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Gravitační vs. tíhové pole

- Tíhové pole vzniká složením odstředivé síly a síly gravitační



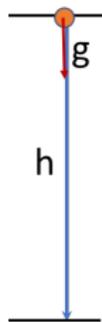
Obrázek 5: Gravitační a tíhové pole

- $F_G = F_g + F_o = m \cdot g$ , kde  $g$  je tíhové zrychlení,  
 $g = 9,81 m \cdot s^{-2} \doteq 10 m \cdot s^{-2}$

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

Pohyby v homogenním gravitačním poli

- Volný pád – nejjednodušší pohyb s nulovou počáteční rychlostí a zrychlením  $g$ , viz. kapitola Kinematika



Obrázek 6: Volný pád

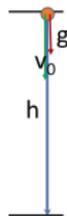
# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Pohyby v homogenním gravitačním poli

- Svislý vrh
  - Vzhůru – směrem vzhůru zpomalený pohyb s počáteční rychlostí  $v_0$  a zpomalením  $g$ , poté volný pád z nejvyššího dosaženého bodu,  $h = \frac{v_0^2}{2g}$ ,  $t_{\uparrow} = \frac{v_0}{g}$
  - Dolů – zrychlený pohyb se zrychlením  $g$  a počáteční rychlostí  $v_0$



Obrázek 7: Svislý vrh vzhůru

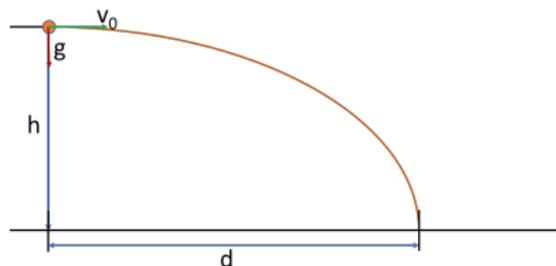


Obrázek 8: Svislý vrh dolů

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Pohyby centrálním gravitačním poli

- Vodorovný vrh
  - Složený pohyb – ve vodorovném směru rovnoměrný pohyb s rychlosti  $v_0$ , ve svislém rovnoměrně zrychlený se zrychlením  $g$
  - $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ ,  $d = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$



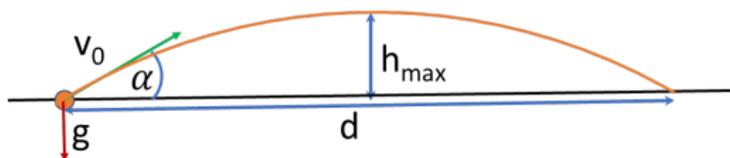
Obrázek 9: Vodorovný vrh

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Pohyby centrálním gravitačním poli

- Šikmý vrh

- Složený pohyb – ve svislém směru jde o svislý vrh s počáteční rychlostí  $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$ , ve vodorovném o rovnoměrný pohyb s rychlostí  $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$
- $t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$ ,  $d = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$ ,  $h_{max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$

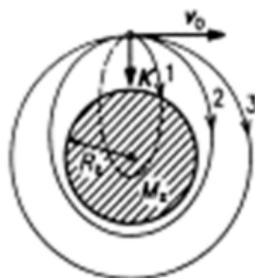


Obrázek 10: Šikmý vrh

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Pohyby centrálním gravitačním poli

- Pohyb v centrálním gravitačním poli je závislý na velikosti počáteční rychlosti.
  - 1  $v_0$  velmi malá – vodorovný vrh, trajektorie je částí elipsy
  - 2  $v_0$  je větší – těleso opíše celou elipsu
  - 3  $v_0 = v_k$  – kruhová rychlost, I. kosmická rychlost – těleso se pohybuje po kružnici při povrchu Země

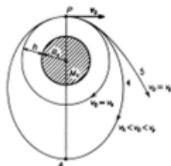


Obrázek 11: Pohyb v centrálním gravitačním poli

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Pohyby centrálním gravitačním poli

- Pohyb v centrálním gravitačním poli je závislý na velikosti počáteční rychlosti.
  - 1  $v_0 > v_k$  – trajektorie se protahuje na elipsu
  - 2  $v_0 = \sqrt{2} \cdot v_k = v_p$  – parabolická (úniková) rychlost, II. kosmická – trajektorie se z elipsy mění na parabolu, těleso opouští gravitační pole Země
  - 3  $v_0$  ještě vzroste – hyperbolická rychlost, III. kosmická – těleso opouští gravitační pole Slunce



Obrázek 12: Pohyb v centrálním gravitačním poli

# Gravitace, gravitační vs. tíhové pole

## Keplerovy zákony

- I. Keplerův zákon – zákon oběžných drah – popisuje tvar trajektorie planety  
Planety se pohybují kolem Slunce po elipsách málo odlišných od kružnic, v jejichž společném ohnisku je Slunce.
- II. Keplerův zákon – zákon oběžných rychlostí  
Obsahy ploch opsaných průvodičem planety ze jednotku času jsou konstantní.
- III. Keplerův zákon – zákon oběžných dob  
Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin hlavních poloos jejich trajektorií.  
$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$
- Jsou obecně platné pro libovolné těleso v jakémkoli centrálním gravitačním poli

# Mechanika tekutin

Tekutiny – souhrnný název pro kapaliny a plyny

Kapaliny

- proměnný tvar (tvar nádoby)
- stálý objem
- velmi málo stlačitelné

Plyny

- nemají stálý tvar (tvar nádoby), ani objem (vyplní veškerý prostor, který mají k dispozici)
- snadno stlačitelné

Společná vlastnost – tekutost

Viskozita – vnitřní tření, příčina různé tekutosti

# Mechanika tekutin

## Modely tekutin

### Ideální kapalina

- bez vnitřního tření
- nestlačitelná  
⇒ dokonale tekutá

### Ideální plyn

- bez vnitřního tření
- dokonale stlačitelný

# Mechanika tekutin

## Tlak v kapalinách a plynech

- charakterizuje stav tekutiny v klidu

- $p = \frac{F}{S}$ ,  $[p] = N \cdot m^{-2} = Pa$

- Vyvolaný vnější silou – Pascalův zákon

Tlak vyvolaný vnější silou působící na povrch kapaliny je ve všech místech a ve všech směrech kapalného tělesa stejný.

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

Tlak vyvolaný tíhovou silou – hydrostatický tlak

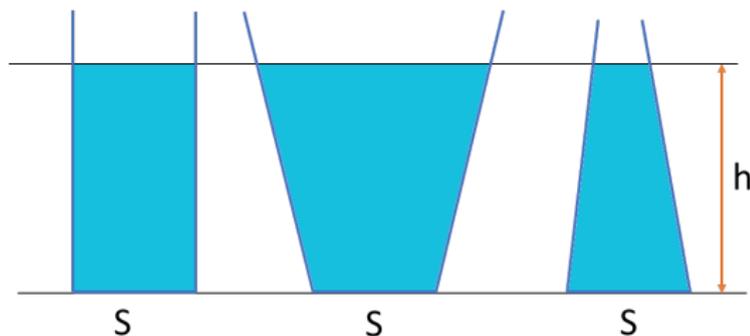
$$p_h = \frac{F_h}{S} = \frac{mg}{s} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S} = h\rho g$$

Hydrostatický tlaková síla –  $F_h = hS\rho g$

# Mechanika tekutin

## Hydrostatické paradoxon

- Velikost hydrostatické tlakové síly nezávisí na tvaru a celkovém objemu kapaliny v nádobě
- Závisí na hloubce a na ploše, na kterou působí



Obrázek 13: Hydrostatické paradoxon

# Mechanika tekutin

## Tlak vyvolaný tíhou vzduchu

- Atmosférická (aerostatická) tlaková síla – síla vyvolaná tíhou vzduchu
- Atmosférický tlak – nelze počítat stejně jako u kapaliny, protože plyn je stlačitelný  
Na každých  $100m$  klesne atmosférický tlak o cca.  $1,3kPa$
- Normální atmosférický tlak –  
 $p_a = 1013,25hPa = 1,01325 \cdot 10^5 Pa$
- Měření atmosférického tlaku – barometry  
 $1000mb$  (milibar) =  $1000hPa$ ,  
 $760mm Hg = 760torr = 1013,25hPa$

# Mechanika tekutin

## Vztlaková síla v tekutinách

- Na každé těleso ponořené do tekutiny působí vztlaková síla, která ho nadlehčuje
- Archimedův zákon – odvozen ze vztlakové síly  
Těleso ponořené do tekutiny je nadlehčováno vztlakovou silou, jejíž velikost se rovná tíze tekutiny stejného objemu, jako je objem ponořeného tělesa.  
 $F_{vz} = V\rho g$ , kde  $V$  je objem ponořeného tělesa,  $\rho$  je hustota tekutiny a  $g$  je tíhové zrychlení
- Využití: horkovzdušné balóny, vzducholodě, ponorky, ryby. . .

# Mechanika tekutin

## Proudění kapalin a plynů – hydrodynamika, aerodynamika

- Proudění
  - U částic převažuje pohyb v jednom směru
  - Stálá rychlost  $v$  – ustálené (stacionární) proudění
- Proudnice
  - Trajektorie částic proudící tekutiny
  - Navzájem se neprotínají, každým bodem prochází pouze jedna proudnice
  - Tečna v libovolném bodě má směr rychlosti
- Proudová trubice
  - Všechny proudnice procházející určitou uzavřenou křivkou
- Proudové vlákno
  - Kapalina vymezená proudovou trubicí
  - U ideální kapaliny – rychlost všech částic v průřezu proudového vlákna je stejná

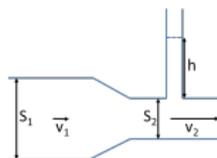
# Mechanika tekutin

## Rovnice kontinuity

- Pro kapaliny:  $Q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{konst.}$ , kde  $Q_V$  je objemový průtok,  $[Q_V] = m^3 s^{-1}$ ,  $Q_V = S \cdot v$
- Pro plyny:  $Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \text{konst.}$ , kde  $Q_m$  je hmotnostní tok (plyny jsou stlačitelné, nutné nahradit objem hmotností, která se nemění),  $[Q_m] = kg \cdot s^{-1}$ ,  $Q_m = S \cdot v \cdot \rho$

## Bernoulliho rovnice

- Zákon zachování energie pro proudící kapalinu
- $p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + h_1\rho g = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + h_2\rho g$



Obrázek 14: Bernoulliho rovnice

# Mechanika tekutin

## Bernoulliho rovnice

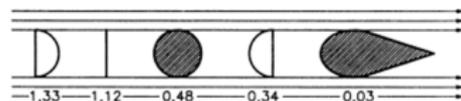
- Pokud se zúží trubice, zvýší se rychlost proudění a sníží se tlak.
- Důsledek: Hydrodynamické (aerodynamické) paradoxon – při velkém zúžení trubice, může hodnota tlaku klesnout až pod hodnotu atmosférického tlaku, vznikne podtlak a dojde tak k nasávání

# Mechanika tekutin

## Obtékání těles reálnou tekutinou

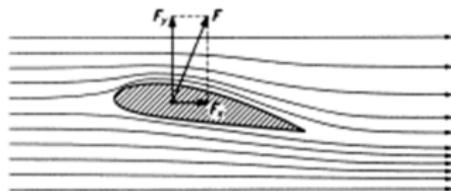
- U reálných tekutin vzniká odporová síla – hydrodynamická, aerodynamická
- Velikost odporové síly závisí na rychlosti, hustotě prostředí, velikosti a tvaru tělesa a jeho povrchu

Aerodynamická odporová síla



Obrázek 15: Koeficient odporu vzduchu

Vztlaková síla – princip letadel těžších než vzduch



Obrázek 16: Vztlaková síla

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Kinetická teorie látek

- 3 experimentálně ověřené poznatky
  - 1 Látka kteréhokoli skupenství se skládá z částic (molekul, atomů, iontů). Struktura látky je nespojitá.
  - 2 Částice se v látkách neustále a neuspořádaně pohybují (tepelný pohyb).  
Brownův pohyb, difúze, tlak plynu. . .
  - 3 Částice na sebe navzájem působí přitažlivými a odpudivými silami. Velikost síly závisí na vzdálenosti mezi částicemi.  
 $r < r_0$  – síly odpudivé  
 $r > r_0$  – síly přitažlivé  
 $r_0 \doteq 1 \cdot 10^{-10} m$

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Kinetická teorie látek

- Nelze popisovat každou částici zvlášť
- Popis pomocí statistické fyziky

## Popis částic

- Klidová hmotnost atomu  $m_a$
- Klidová hmotnost molekuly  $m_m$
- Atomová hmotnostní konstanta  $m_u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- Relativní atomová hmotnost  $A_r = \frac{m_a}{m_u}$
- Relativní molekulová hmotnost  $M_r = \frac{m_m}{m_u}$ ,  $M_r = \sum_1^n A_n$

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Popis soustavy částic

- Látkové množství  $n = \frac{N}{N_A}$ ,  $[n] = \text{mol}$ ,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$  – Avogadrova konstanta
- Molární hmotnost  $M_m = \frac{m}{n}$
- Molární objem  $V_m = \frac{V}{n}$

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Termodynamická soustava

- Skupina těles, jejichž stav zkoumáme
- Část prostoru a její látková náplň
  - 1 Otevřená – propouští látku i energii
  - 2 Uzavřená – nepropouští látku, propouští energii
  - 3 Izolovaná – nepropouští látku ani energii
- Stavové veličiny – fyzikální veličiny charakterizující stav soustavy (např.: teplota, tlak plynu, objem, hustota. . . )

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Termodynamický děj

- změna stavu termodynamické soustavy, změna stavových veličin (ne nutně všech)
- Rovnovážný stav – pokud není soustava ovlivňována okolím, pak přejde po určité době do stavu termodynamické rovnováhy, kdy se nemění stavové veličiny
- Rovnovážný děj – probíhá velmi pomalu, soustava prochází řadou na sebe navazujících rovnovážných stavů
- Vratný děj – děj, který může probíhat oběma směry, v případě opačného směru se soustava i okolí vrátí do původních podmínek

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Teplo

- Celková energie soustavy se skládá z mechanické a vnitřní energie. Celková mechanická energie je součet kinetické (posuvné i rotační), potenciální energie a energie pružnosti (elasticity) soustavy.

Vnitřní energie  $U$  se skládá z energie jednotlivých částic.

$$E = E_m + U, \text{ kde } E_m = E_k + E_p + E_e$$

- Změna vnitřní energie
  - Konáním práce
    - Tělesa působící na soustavu konají práci – vnitřní energie soustavy vzroste
    - Soustava koná práci – vnitřní energie soustavy klesá
  - Tepelnou výměnou – změna vnitřní energie, aniž by se konala práce – předání tepla

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Teplo

- Charakterizuje děj, nikoli stav
- Dějová veličina

## Nultá věta termodynamiky

- Dvě tělesa jsou v tepelné rovnováze právě tehdy, když mají stejné teploty.

## Teplota

- Fyzikální veličina charakterizující stav tělesa
- Určuje směr tepelné výměny mezi tělesy
- Měření
  - Je využíván fyzikální děj, který se mění s teplotou (délková nebo objemová roztažnost, elektrický odpor. . . )
  - Teplotní stupnice – Celsiova, Termodynamická, Fahrenheitova

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Teplotní stupnice

- Referenční body, počet dílků

## Celsiova stupnice – $t$

- $0^{\circ}\text{C}$  – teplota tání ledu
- $100^{\circ}\text{C}$  – teplota varu vody

## Termodynamická teplota – $T$

- Teplota trojného bodu vody  $273,16\text{K}$
- Velikost dílku stejná jako u Celsiovy stupnice

## Fahrenheitova stupnice

- Užívaná např. v USA
- $32^{\circ}\text{F}$  – bod tání ledu
- $212^{\circ}\text{F}$  – bod varu vody

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Stanovení tepla $Q$

- Těleso o hmotnosti  $m$  přijme teplo  $Q$  při tepelné výměně, nenastane-li současně změna skupenství (fáze), zvýší se teplota o  $\Delta t$
- Tělesa stejných hmotností, ale z různých materiálů, při přijmutí stejného tepla  $Q$ , mají různé výsledné teploty  $t \Rightarrow$  existuje materiálová konstanta  $c$
- $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$ , kde  $c$  je měrná tepelná kapacita
- $c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}$  – množství tepla, které přijme  $1\text{kg}$  látky, aby se teplota zvýšila o  $1^\circ\text{C}$

# Molekulová fyzika a termodynamika

## Kalorimetrická rovnice

- Vyjadřuje zákon zachování energie při tepelné výměně
- Teplo odevzdané = teplo přijaté
- $m_1 \cdot c_1 \cdot (t_1 - t) = m_2 \cdot c_2 \cdot (t - t_2)$
- Neuvažujeme ztráty způsobené únikem tepla do okolí. Soustava je dokonale tepelně izolovaná.

# Změny skupenství

## Změna skupenství

- Tání – pevná látka  $\Rightarrow$  kapalina
- Vypařování – kapalina  $\Rightarrow$  plyn
- Kondenzace – plyn  $\Rightarrow$  kapalina
- Tuhnutí – kapalina  $\Rightarrow$  pevná látka
- Sublimace – pevná látka  $\Rightarrow$  plyn
- Desublimace – plyn  $\Rightarrow$  pevná látka
- Pro změnu skupenství je potřeba přijmout/odevzdat další teplo
- Změna skupenství probíhá při teplotě fázového přechodu (teplota tání, teplota vypařování). Pozor na amorfnní látky – vosk, asfalt... – změna skupenství probíhá v určitém rozsahu teplot

# Změny skupenství

## Tání/tuhnutí

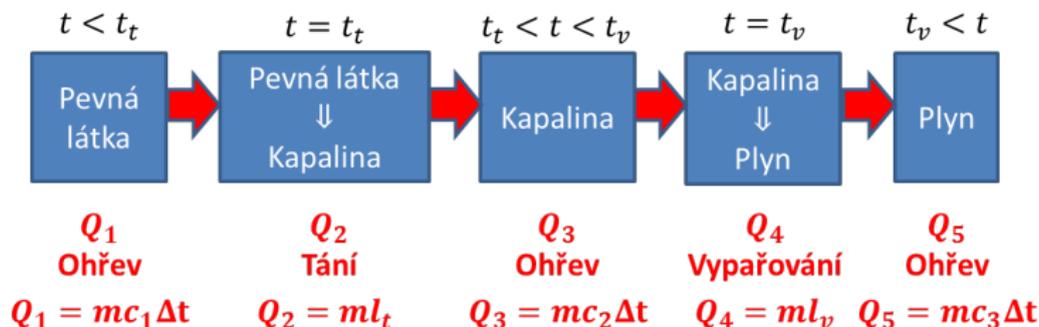
- $l_t$  – skupenské teplo tání, popisuje kolik tepla musíme dodat/odebrat 1 kg látky, aby změnila své skupenství (roztála/ztuhla)
- $Q = m \cdot l_t$

## Vypařování/kondenzace

- $l_v$  – skupenské teplo vypařování, popisuje kolik tepla musíme dodat/odebrat 1 kg látky, aby změnila své skupenství (vypařila se/zkondenzovala)
- $Q = m \cdot l_v$

# Teplo a změny skupenství

## Kalorimetrická rovnice



Obrázek 17: Kalorimetrie

- $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$ , pokud těleso projde všemi fázemi, jak je naznačeno na obrázku 17

# Kalorimetrie

## Kalorimetrie

- Teplo  $Q$  je forma energie
- Pro změnu skupenství nebo teploty lze využít libovolnou energii
- Např.: Letící střela narazí na desku – Kinetická energie střely se změzí na teplo

# Struktura a vlastnosti plynů

## Ideální plyn

- Model plynu
- Vlastnosti IP:
  - 1 Částice mají zanedbatelné rozměry a stejnou hmotnost  $m$
  - 2 Vzájemné srážky částic a nárazy na stěnu nádoby jsou dokonale pružné
  - 3 Částice na sebe navzájem silově nepůsobí
- Vnitřní energie  $U$  IP odpovídá kinetické energii  $E_k$  neuspořádaného pohybu všech částic
- IP odpovídá reálnému plynu při vysokých teplotách a nízkých tlacích

# Struktura a vlastnosti plynů

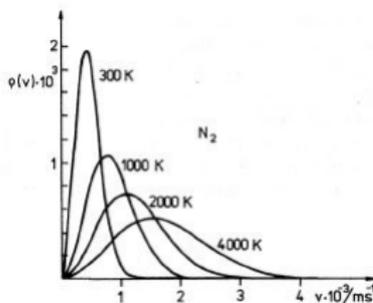
## I. Termodynamický zákon

- Změna vnitřní energie soustavy  $\Delta U$  je rovna součtu práce  $W$  vykonané okolními tělesy působícími na soustavu silami a tepla  $Q$  odevzdaného okolními tělesy soustavě.  $\Delta U = W + Q$

# Struktura a vlastnosti plynů

## Rychlost částic

- Částice plynu nemají stejnou rychlost – rozdělení rychlostí odpovídá Maxwellovu rozdělení



Obrázek 18: Maxwellovo rozdělení rychlostí

- Nejvyšší body v grafu –  $v_p$  – nejpravděpodobnější rychlost –

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

# Struktura a vlastnosti plynů

## Rychlosti částic

- Střední kvadratická rychlost  $v_k$  – rychlost, kterou by musely mít všechny částice, aby celková kinetická energie zůstala zachovaná
- $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ , kde  $k$  je Boltzmannova konstanta
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
- Kinetická energie jedné částice:  $E_0 = \frac{1}{2}m_0 \cdot v_k^2 = \frac{1}{2}m_0 \frac{3kT}{m_0} = \frac{3}{2}kT$
- Kinetická energie  $E_0$  jedné částice IP je přímo úměrná termodynamické teplotě  $T$

U částic plynu převažuje kinetická energie nad potenciální  $\Rightarrow$  částice se ochotně pohybují, plyn zaujme veškerý prostor, který má k dispozici  $\Rightarrow$  plyny nemají vlastní tvar ani objem (vždy podle nádoby), jsou lehce stlačitelné

# Struktura a vlastnosti plynů

## Tlak plynu

- Projevem nárazů částic na stěnu nádoby
- $p = \frac{F}{S}$
- $p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_k^2 = \frac{1}{3} \rho v_k^2$ , kde  $N$  je počet částic a  $V$  je objem plynu

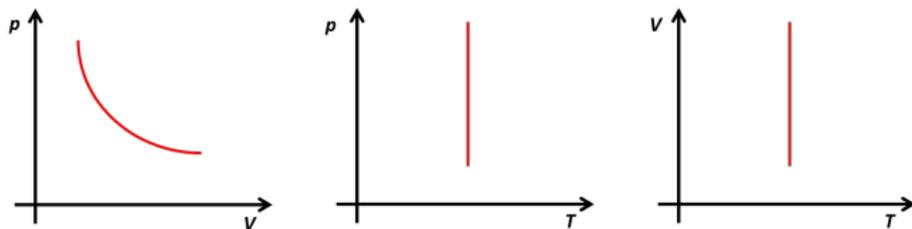
## Stavová rovnice IP

- Vyjadřuje vztah mezi stavovými veličinami:  $p$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $N$  (případně  $n$  a  $m$ )
- $p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_k^2 \Rightarrow p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \cdot m_0 \frac{3kT}{m_0} \Rightarrow p \cdot V = N \cdot k \cdot T$
- $n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M_m}$
- Další vyjádření stavové rovnice:  $pV = nRT$ ,  $pV = \frac{m}{M_m} RT$ ,  
 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = konst.$ , při  $N = konst.$

# Děje v plynech

## Izotermický děj

- $T = konst.$ , plyn nemění teplotu
- $pV = konst$ , Boyle-Mariottův zákon  $p_1 V_1 = p_2 V_2$



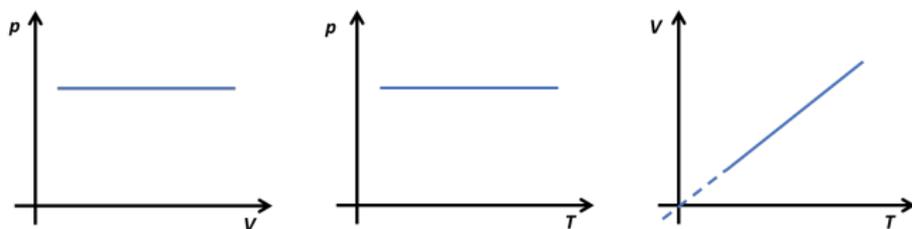
Obrázek 19: Stavové diagramy ( $pV$ ,  $pT$ ,  $VT$ ) – izoterma

- $T = konst. \Rightarrow \Delta U = 0, 0 = W + Q \Rightarrow Q = -W$

# Děje v plynech

## Izobarický děj

- $p = konst.$ , plyn nemění objem
- $\frac{V}{T} = konst.$ , Gay-Lussacův zákon  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$



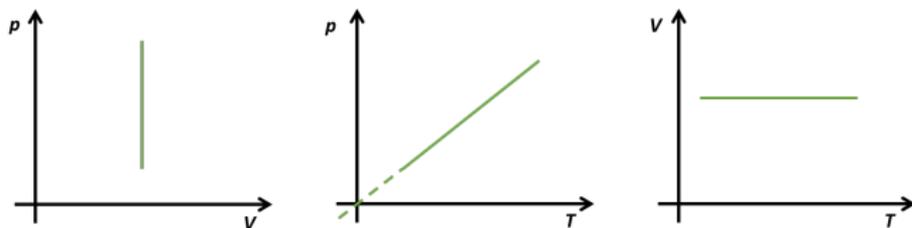
Obrázek 20: Stavové diagramy ( $pV$ ,  $pT$ ,  $VT$ ) – izobara

- $\Delta U = Q + W$ ,  $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ , kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku

# Děje v plynech

## Izochorický děj

- $V = konst.$ , plyn nemění objem (nekoná práci)
- $\frac{p}{T} = konst.$ , Charlesův zákon  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$



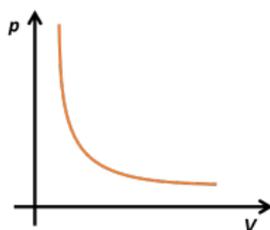
Obrázek 21: Stavové diagramy ( $pV$ ,  $pT$ ,  $VT$ ) – izochora

- $\Delta U = Q$ ,  $Q = m \cdot c_V \cdot \Delta T$ , kde  $c_V$  je měrná tepelná kapacita při stálém objemu,  $c_p > c_V$

# Děje v plynech

## Adiabatický děj

- $Q = 0$ , soustava je tepelně izolovaná od okolí, nepřijímá (neodevzdává) žádné teplo
- $p \cdot V^\kappa = \text{konst.}$ , Poissonův zákon  $p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa$ ,  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$



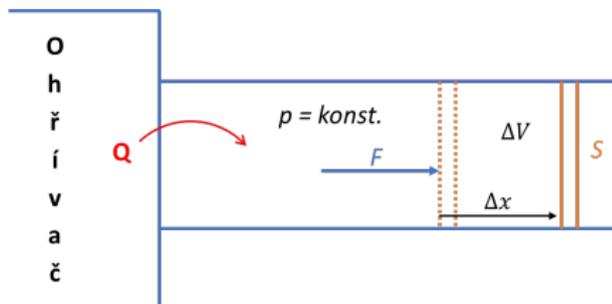
Obrázek 22: Stavové diagramy ( $pV$ ,  $pT$ ,  $VT$ ) – adiabata

- Adiabata je strmější než izoterma
- $\Delta U = W$ ,  $\kappa = \frac{c_p}{c_v} > 1$

# Děje v plynech

## Práce plynu

- Při expanzi koná práci plyn, při kompresi okolí (vnější síly)



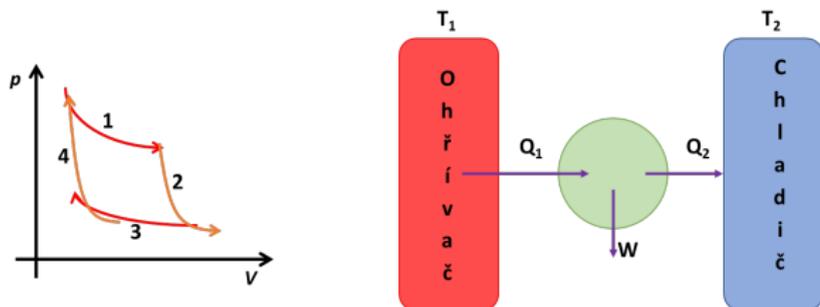
Obrázek 23: Práce plynu při izobarickém ději

- $F = p \cdot S$
- $W = F \cdot \Delta x = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot (V_2 - V_1) = p \cdot \Delta V$
- Plyn koná práci pouze mění-li svůj objem.

# Děje v plynech

## Cyklický (kruhový) děj

- Termodynamický děj, při kterém se pracovní látka vrátí do výchozího stavu. V  $pV$  diagramu je znázorněn uzavřenou křivkou
- Carnotův cyklus
  - Skládá se ze dvou izotermických (1, 3) a dvou adiabatických dějů (2, 4)



Obrázek 24: Carnotův cyklus

# Děje v plynech

## Cyklický (kruhový) děj

- Carnotův cyklus

- Děj 1 – izotermická expanze
- Děj 2 – adiabatická expanze
- Děj 3 – izotermická komprese
- Děj 4 – adiabatická komprese
- $W = Q_1 - Q_2$
- Účinnost:  $\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1$
- $\eta < 1$ , (menší než 100%)
- Aby účinnost byla 100% –  $T_2 = 0K$ , stroj by nesměl odevzdávat žádné teplo a přijaté teplo by měnil pouze na práci.

# Struktura a vlastnosti plynů

## II. Termodynamický zákon

- Nelze sestrojít periodicky pracující stroj, který by jen přijímal teplo do určitého tělesa (ohřívače) a vykonával stejně velkou práci.
- Při tepelné výměně nemůže těleso s vyšší teplotou samovolně přijímat teplo od tělesa s nižší teplotou.

## III. Termodynamický zákon

- Konečným počtem ochlazovacích kroků nelze dosáhnout teploty absolutní nuly  $0K$

# Struktura a vlastnosti kapalin

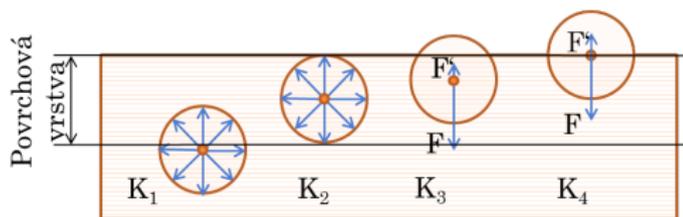
## Kapaliny

- Molekuly kapalin kmitají kolem rovnovážných poloh
- Rovnovážné polohy se rychle mění, neboť molekuly s větší kinetickou energií se vymaňují z vlivu silového pole sousedních molekul
- Krátkodosahové působení molekul – molekula působí na další molekuly jen v omezeném (blízkém) okolí (sféra vlivu). Přitažlivé síly mezi molekulami rychle klesají se vzrůstající vzdáleností. V určité vzdálenosti  $r_m$  je lze zanedbat.

# Struktura a vlastnosti kapalin

## Povrchová vrstva

- Tvořena molekulami ve vzdálenosti od povrchu menší než  $r_m$



Obrázek 25: Povrchová vrstva

- $K_1, K_2$  – molekula leží uvnitř kapaliny, výsledné silové působení je 0
- $K_3, K_4$  – silové působení plynu nad kapalinou je menší než přitažlivá síla kapaliny,  $F' \ll F$

# Struktura a vlastnosti kapalin

## Povrchová energie

- Energie nutná k překonání přitažlivých sil kapaliny, k přesunutí molekuly uvnitř kapaliny do povrchové vrstvy
- $E = \sigma S$ , kde  $\sigma$  je povrchové napětí

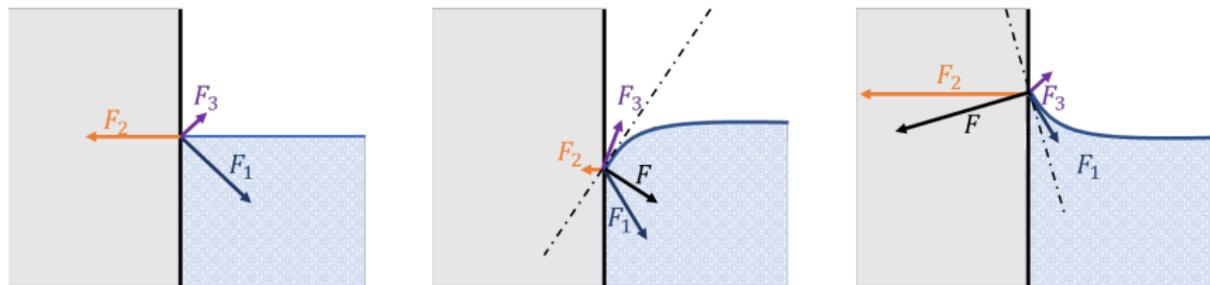
## Povrchové napětí

- Efekt, při kterém se povrch kapaliny chová jako pružná blána
- $\sigma = \frac{F}{l}$ , kde  $F$  je povrchová síla a  $l$  je délka okraje povrchové blány
- $[\sigma] = J \cdot m^{-2} = N \cdot m^{-1}$

Nepůsobí-li na kapalinu vnější síly, přejde do rovnovážného stavu, ve kterém má minimální potenciální energii – zaujme tvar koule (nejmenší povrch při daném objemu)

# Struktura a vlastnosti kapalin

## Styk se stěnou nádoby



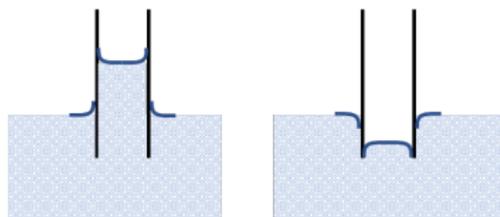
Obrázek 26: Styk kapaliny se stěnou nádoby

- $F_1$  – přitažlivá síla kapaliny;  $F_2$  – přitažlivá síla stěny;  $F_3$  – přitažlivá síla prostředí nad kapalinou;  $F$  – výsledná síla
- Kapalina nesmáčí stěnu, jestliže dominuje síla  $F_1$
- Kapalina smáčí stěnu, jestliže síla  $F_2$  je největší

# Struktura a vlastnosti kapalin

## Kapilarita

- Souvisí se smáčivostí stěn
- Jev, kdy v úzké trubici (kapiláře) dochází k vytvoření prohnuté hladiny a jejímu vystoupení (elevace) nebo poklesu (deprese) vůči hladině mimo trubici



Obrázek 27: Kapilární elevace a deprese

## Kapilární tlak

$$\bullet p_k = \frac{F}{S} = \frac{\sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{\pi \cdot r^2} = \frac{2\sigma}{r}, p_k = p_h \Rightarrow \frac{2\sigma}{r} = h\rho g \Rightarrow h = \frac{2\sigma}{r\rho g}$$

# Struktura a vlastnosti kapalin

## Pevné látky

- Krystalické – dalekodosahové uspořádání, částice umístěné v pravidelné mřížce, monokrystalické a polykrystalické
- Amorfni – krátkodosahové uspořádání, nepravidelné umístění částic v prostoru, připomínají kapaliny (vosk, asphalt. . . )

## Vazby v krystalové mřížce a vlastnosti látek

- Iontová – snadno štěpitelné, vysoká teplota tání, elektrické i tepelné izolanty, většinou průhledné
- Kovová – kujné a tažné, dobré vodiče tepla i elektřiny, neprůhledné
- Kovalentní – velmi tvrdé, vysoká teplota tání, elektrické izolanty nebo polovodiče
- Molekulová – měkké, nízká teplota tání

# Struktura a vlastnosti pevných látek

## Teplotní roztažnost

- Délková
  - S rostoucí teplotou se zvětšuje délka pevné látky (dochází k posunu rovnovážných poloh kolem kterých částice kmitají)
  - $l = l_1 + \Delta l = l_1 + \alpha l_1 \Delta t = l_1 (1 + \alpha \Delta t)$
  - $\alpha$  je součinitel délkové teplotní roztažnosti,  $[\alpha] = K^{-1}$
- Objemová
  - S rostoucí teplotou se zvětšuje objem pevné látky (dochází k posunu rovnovážných poloh kolem kterých částice kmitají)
  - Aplikace délkové roztažnosti do všech 3 souřadnicových os
  - $V = V_1 (1 + \beta \Delta t)$
  - $\beta$  je součinitel objemové teplotní roztažnosti,  $\beta = 3\alpha$
  - Změna hustoty:  $\rho \doteq \rho_1 (1 - \beta \Delta t)$

# Struktura a vlastnosti pevných látek

## Deformace pevných látek

- Tahem
- Tlakem
- Ohybem
- Smykem
- Kroucením

## Normálové napětí

- $\sigma_N = \frac{F_p}{S}$ ,  $[\sigma_N] = Pa$

## Relativní prodloužení

- $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_1}$

## Hookův zákon pružnosti

- $\sigma_N = E \cdot \varepsilon$ , kde  $E$  je modul pružnosti v tahu

## Prodloužení při pružné deformaci

- $\Delta l = \frac{F_p l_1}{ES}$

# Mechanické kmitání

## Kmitavý pohyb

- Periodický pohyb, při němž těleso pravidelně prochází rovnovážnou polohou
- Mechanický oscilátor – těleso, které může volně kmitat bez vnějšího působení
- Kyvadlo, těleso na pružině. . .
- Harmonické kmity – časový průběh má sinusový průběh
- Kmit – pohyb, který vykoná těleso za dobu jedné periody  $T$
- Analogie s pohybem po kružnici – Perioda  $T$ ,  $[T] = s$  – nejkratší doba, po které se pohyb opakuje; Frekvence  $f$ ,  $[f] = s^{-1} = Hz$  – počet opakování za jednu sekundu

# Kmitání

## Kinematický popis

- Okamžitá výchylka:  $y = y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$
- Okamžitá rychlost:  $v = y_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$
- Zrychlení:  
 $a = -y_m \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 \cdot y_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 \cdot y$
- Úhlová frekvence:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

## Dynamický popis

- Síla:  $F = m \cdot a = m \cdot (-\omega^2 \cdot y) = -m \cdot \omega^2 \cdot y$
- Síla v každém okamžiku směřuje do rovnovážné polohy

# Kmitání

## Pružinový oscilátor

- Parametry: hmotnost  $m$ ; tuhost  $k$ ,  $k = \frac{-F}{y}$
- $F = -ky$
- $-ky = -m\omega^2 y \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$
- Úhlová frekvence závisí jen na parametrech oscilátoru – kmitání se nazývá vlastní kmitání
- $\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ;  $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ;  $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$

## Matematické kyvadlo

- Pro  $\alpha < 5^\circ$  platí:  $\sin \alpha = \frac{y}{l}$
- $F = \frac{m \cdot g}{l} y$
- $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ ;  $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ;  $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$

# Kmitání

## Energie mechanického oscilátoru

- Potenciální energie (energie pružnosti):  $E_p = W = \frac{1}{2}ky^2$ , kde  $k = m \cdot \omega^2$ , pak  $E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 y^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 y_m^2 \sin^2(\omega t)$
- Kinetická energie:  $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}my_m^2\omega^2 \cos^2(\omega t)$
- Celková mechanická energie:  $E = E_k + E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 y_m^2 = konst.$

# Kmitání

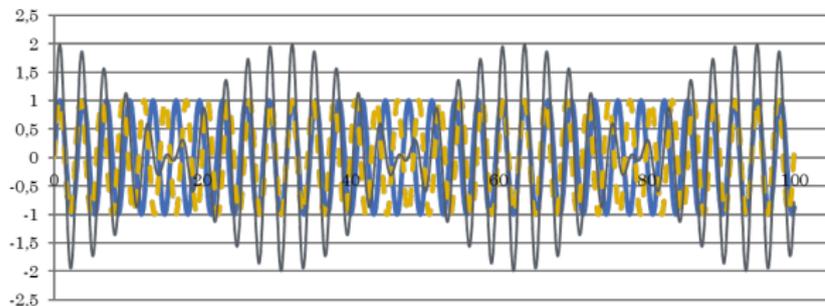
## Skládání kmitání

- Koná-li hmotný bod více harmonických pohybů
- Výsledná výchylka je součtem jednotlivých výchylek – Princip superpozice
- $y = y_1 + y_2 + \dots + y_n$
- Zvláštní případy pro izochronní kmity
  - Zesílení – fázový posun  $\Delta\varphi = 0 + 2k\pi$
  - Zeslabení – fázový posun  $\Delta\varphi = \pi + 2k\pi$ , výchylky se odečtou, v krajním případě se kmitání vyruší

# Kmitání

## Skládání neizochronních kmitů

- Skládání kmitů blízkých frekvencí – vznik rázů, frekvence rázů je rozdíl frekvencí obou kmitání

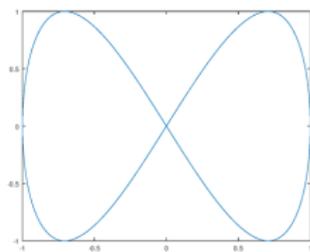


Obrázek 28: Skládání kmitů – rázy

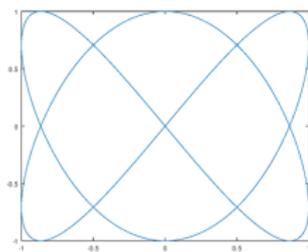
# Kmitání

## Skládání kolmých kmitů

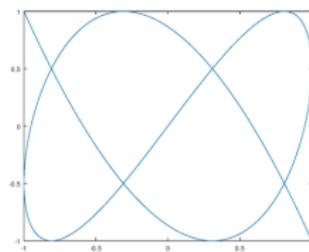
- Lissajousovy obrazce



**1:2**



**2:3**



**3:5**

**Obrázek 29:** Skládání kmitů – Lissajousovy obrazce (různé poměry frekvencí)

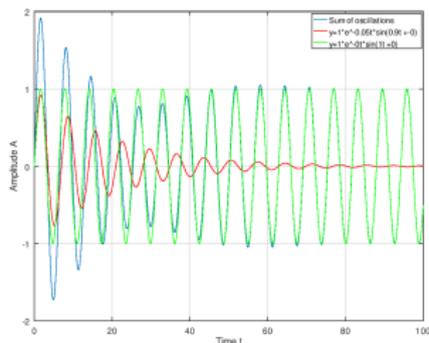
# Kmitání

## Tlumené kmitání

- Kmitání v reálném prostředí – Odporová síla prostředí

## Nucené kmitání

- Vnější budící síla – Tlumené kmity přebírají vlastnosti budící síly



**Obrázek 30:** Tlumené kmity – červené; Budící kmity – zelená; Výsledné kmity – modrá

# Vlnění

## Mechanické vlnění

- Vyskytuje se v prostředí s vazbou
- Rozkmitáním jedné částice se díky vazbě přenáší pohyb dál
- Šíření není spojeno s přenosem látky, jen energie

## Postupné vlnění

- Kmitání se přenáší postupně od zdroje
  - Příčné – Body kmitají kolmo na směr šíření
  - Podélné – Body kmitají ve směru šíření (body se zhušťují a zřed'ují)

## Mechanické vlnění – veličiny

- Fázová rychlost  $v$  – rychlost s jakou se šíří rozruch
- Vlnová délka  $\lambda$  – nejkratší vzdálenost dvou bodů se stejnou fází
- Perioda  $T$  – perioda kmitavého pohybu
- Frekvence  $f$  – frekvence kmitavého pohybu
- Úhlová rychlost (kruhová frekvence)  $\omega$  –  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
- $\lambda = v \cdot T$ ,  $T = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega}$

# Vlnění

## Rovnice postupného vlnění

- Popisuje okamžitou výchylku v každém bodě
- Funkce výchylky má dva parametry – polohu  $x$  a čas  $t$
- Zdroj (počáteční bod)  $Z$  koná kmitavý pohyb:  $y = y_m \sin(\omega \cdot t)$
- Bod  $A$  ve vzdálenosti  $x$  je opožděn o  $\tau = \frac{x}{v}$ ,  $y = y_m \sin(t - \tau)$
- $y = y_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v \cdot T}\right)\right] =$   
 $y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] = y_m \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$
- Fáze  $\varphi - \varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$ , pro  $t = 0$  je  $\varphi = 2\pi\frac{x}{\lambda}$

# Vlnění

## Interference vlnění

- Skládání vlnění
- Dospěje-li dvě a více vlnění do jednoho bodu, jejich výchylky se sečtou
- Nejjednodušší případ – dvě vlnění se stejnou vlnovou délkou, výchylkou amplitudy a postupující stejným směrem stejnou fázovou rychlostí
- $y = y_1 + y_2$ , kde  $y_1 = y_m \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) \right]$ ,  
 $y_2 = y_m \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \right]$
- $y = y_1 + y_2 = 2y_m \cos \left( \pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} \right) \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1 + x_2}{2\lambda} \right) \right]$
- Fázový rozdíl  $\Delta\varphi = 2\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = 2\pi \frac{d}{\lambda}$
- Výchylka  $y_m = 2y_m \cos \left( \pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} \right)$

# Vlnění

## Interference vlnění

- Výchylka  $y_m = 2y_m \cos\left(\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda}\right)$
- $x_2 - x_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow$  interferenční maximum
- $x_2 - x_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow$  interferenční minimum

## Stojaté vlnění

- Vzniká interferencí dvou stejných vlnění, která se pohybují proti sobě
- $y = y_1 + y_2$ , kde  $y_1 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right]$ ,  
 $y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x_2}{\lambda}\right)\right]$
- $y = y_1 + y_2 = 2y_m \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$

## Stojaté vlnění

- $y = y_1 + y_2 = 2y_m \cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right) \sin\left(2\pi\frac{t}{T}\right)$
- Výchylka je závislá pouze na poloze
- Fáze je závislá pouze na čase
- $\Rightarrow$  vlnění se nešíří  $\Rightarrow$  stojaté vlnění
- Kmitny – body kmitající s maximální výchylkou,  $|\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right)| = 1$
- Uzly – body s nulovou výchylkou,  $\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right) = 0$

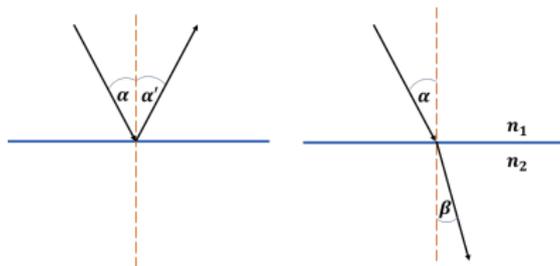
# Vlnění

## Zákon odrazu

- Úhel odrazu se rovná úhlu dopadu
- $\alpha = \alpha'$
- Odražený paprsek leží v rovině dopadu určené dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu.

## Zákon lomu

- $$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$



Obrázek 31: Odraz a lom vlnění

## Dopplerův jev

- Změna frekvence a vlnové délky oproti původním charakteristikám při vzájemném pohybu vysílače a přijímače
- Zdroj se pohybuje směrem k přijímači.  $f = f_0 \frac{v}{v - v_{s-r}}$ , kde  $v_{s-r}$  je relativní radiální rychlost zdroje vůči
- Zdroj se pohybuje směrem od přijímače.  $f = f_0 \frac{v}{v + v_{s-r}}$  pozorovateli
- Stacionární zdroj a pohyblivý přijímač.  $f = f_0 \left(1 + \frac{v_0}{v}\right)$
- Machovo číslo
- Machův kužel

# Elektřina a magnetismus

## Elektromagnetická interakce

- Základní fyzikální síla
- Působení mezi elektricky nabitými částicemi
- Působení prostřednictvím pole

## Elektrostatika

- Časově neproměnné elektrické pole

## Elektrický náboj $Q$

- $[Q] = C$ , základní jednotka SI
- Dva druhy – kladný, záporný
- Vždy vázaný na hmotnou částici.
- Základní (elementární) náboj –  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$

# Elektrostatika

## Coulombův zákon

- Popisuje silové působení mezi částicemi
- $F_e = k \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2}$ , kde pro vakuum  $k = 9 \cdot 10^9 N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$
- $k$  lze zapsat jako  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$ , kde  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} N^{-1} m^{-2} C^2$  je permitivita vakua a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita prostředí

## Intenzita elektrického pole

- Vektorová veličina,  $E = \frac{F_e}{q}$ ,  $[E] = N \cdot C^{-1} = V \cdot m^{-1}$
- Má směr síly, která v daném místě působí na kladný elektrický náboj

## Siločára

- Znázornění intenzity el. pole, myšlené čáry, spojitě, nikde se neprotínají, vycházejí z kladného a vstupují do záporného náboje, kolmé k povrchu nabitého tělesa, tečna určuje směr intenzity  $E$

# Elektřina a magnetismus

## Práce v elektrickém poli

- $W = F_e \cdot s \cdot \cos \alpha = E \cdot q \cdot s \cos \alpha$
- Práce  $W$  vykonaná elektrickou silou při přemístění náboje  $q$  z bodu  $A$  do bodu  $B$ , závisí pouze na poloze, nikoli na trajektorii.

## Potenciál, potenciální energie

- Jestliže se náboj pohybuje ve směru působení síly  $F_e$ , pak se jeho  $E_p$  snižuje
- Za místo s  $E_p = 0$  volíme zem, nebo uzemněný vodič
- Elektrický potenciál  $\varphi$  bodu  $A$ :  $\varphi = \frac{E_p}{q}$ ,  $[\varphi] = J \cdot C^{-1} = V$
- Elektrické napětí  $U$ : rozdíl potenciálů,  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ .  $[U] = V$

Práci lze tedy zapsat jako  $W = Q \cdot U$

# Elektřina a magnetismus

## Kapacita vodiče

- $C = \frac{Q}{\varphi}$ ,  $[C] = C \cdot V^{-1} = F$
- Závisí na tvaru a velikosti vodiče
- Kapacita kulového vodiče:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R} \Rightarrow Q = 4\pi\epsilon_0 R \varphi \Rightarrow C = 4\pi\epsilon_0 R$$

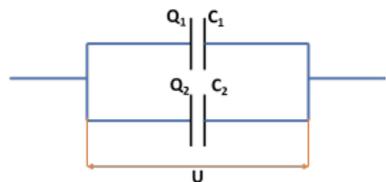
## Kondenzátor

- Soustava vodičů s vysokou kapacitou
- Deskový kondenzátor – dvě desky mezi nimiž je dielektrikum, kapacita deskového kondenzátoru:  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$ , kde  $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrika,  $S$  plocha překryvu desek,  $d$  vzdálenost desek
- Energie nabitého kondenzátoru:  $E = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}CU^2$

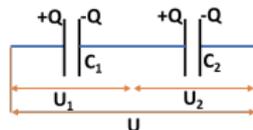
# Elektřina a magnetismus

## Spojení kondenzátorů

- Paralelní – vedle sebe: Napětí na kondenzátorech je stejné,  
 $C = C_1 + C_2$
- Sériové – za sebou: Na kondenzátorech je stejný náboj,  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$



Obrázek 32: Paralelní zapojení



Obrázek 33: Sériové zapojení

# Elektřina a magnetismus

## Elektrický proud

- Uspořádaný pohyb elektricky nabitých částic
- Příčinnou je elektrické pole ve vodiči
- Základní fyzikální veličina,  $I$ ,  $[I] = A$
- Přenesou-li nosiče náboje průřezem vodiče za dobu  $t$  celkový náboj  $\Delta Q$ , pak  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- Podmínky pro stejnosměrný konstantní proud: Uzavřený elektrický obvod, elektrický zdroj v obvodu.

# Elektřina a magnetismus

## Elektrický zdroj

- Zdroj elektrické energie
- Přeměňuje určitý druh energie na energii elektrickou
- Elektromotorické napětí  $U_e$  – napětí naprázdno, na nezátženém zdroji
- Svorkové napětí – napětí na zatíženém zdroji
- Vnitřní odpor zdroje – vlastní odpor zdroje
- Úbytek napětí na zdroji – Rozdíl mezi elektromotorickým a svorkovým napětím, říká jestli je zdroj tvrdý nebo měkký

# Elektřina a magnetismus

## Elektrický odpor

- Jak moc se vodič brání průchodu proudu
- Ohmův zákon:  $R = \frac{U}{I}$ ,  $[R] = V \cdot A^{-1} = \Omega$  (ohm)
- Závislost na materiálu a tvaru vodiče,  $R = \rho \frac{l}{S}$ , kde  $\rho$  je měrný odpor ( $[\rho] = \Omega \cdot m^{-1}$ ),  $l$  je délka,  $S$  průřez
- Závislost na teplotě,  $R = R_1 (1 + \alpha \Delta t)$ ,  $\alpha$  je součinitel elektrického odporu
- Převrácená hodnota vodivosti:  $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ ,  $[G] = S$  (siemens)
- Supravodivost – měrný elektrický odpor klesá k neměřitelným hodnotám

# Elektřina a magnetismus

Práce elektrického proudu

- $W = Q \cdot U = u \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{r} \cdot I$
- Joulovo teplo  $Q_J$  – při průchodu proudu el. vodičem se zvyšuje jeho vnitřní energie a tím i teplota.
- Pokud nedochází k jiným přeměnám el. energie, pak  $Q_J = W$

Výkon elektrického proudu

- $P = \frac{W}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$
- Účinnost:  $\eta = \frac{P}{P_0}$ , kde  $P$  je výkon a  $P_0$  je příkon

# Elektřina a magnetismus

## Kirchhoffovy zákony

- 1. Kirchhoffův zákon: Algebraický součet proudů v uzlu je roven 0. Proudů vstupujících do uzlu značíme kladně, vystupujících z uzlu záporně

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

- 2. Kirchhoffův zákon: Součet úbytků napětí na rezistorech ( $I \cdot R$ ) je v uzavřené smyčce roven součtu elektromotorických napětí zdrojů

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{j=1}^m U_{e_j}$$

# Elektřina a magnetismus

## Sériové zapojení

- $U = U_1 + U_2$
- $I = I_1 = I_2$
- $R = R_1 + R_2$
- $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
- $Q = Q_1 = Q_2$

## Paralelní zapojení

- $U = U_1 = U_2$
- $I = I_1 + I_2$
- $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
- $C = C_1 + C_2$
- $Q = Q_1 + Q_2$

# Elektřina a magnetismus

## Stacionární magnetické pole

- Charakteristické veličiny se s časem nemění
- Magnetická síla  $F_m$  – přitažlivá i odpudivá
- Magnetické indukční čáry – znázornění magnetického pole (podobně jako elektrické siločáry)
- Ampérovo pravidlo pravé ruky – Uchopíme-li vodič pravou rukou, vztyčený palec ukazuje směr proudu, pak prsty ukazují orientaci magnetický indukčních čar

# Elektřina a magnetismus

## Magnetická indukce $B$

- Charakterizuje magnetické pole
- $B = \frac{F_m}{l \cdot I \cdot \sin \alpha}$ ,  $[B] = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1} = T$  (tesla)
- Přímý vodič s proudem:  $B = \mu \frac{I}{2\pi d}$
- Střed kruhového závitu:  $B = \mu \frac{I}{2r}$
- Vnitřek dlouhé válcové cívky s  $N$  závity:  $B = \mu \frac{N \cdot I}{l}$
- $\mu$  je permeabilita prostředí,  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita

## Silové působení rovnoběžných vodičů s proudem

- $F_m = k \frac{l_1 \cdot l_2}{d} \cdot I = \frac{\mu}{2\pi} \frac{l_1 \cdot l_2}{d} \cdot I$
- Stejný směr proudu – vodiče se přitahují, opačný směr – vodiče se odpuzují

# Elektřina a magnetismus

Částice s nábojem v magnetickém poli

- Působící síla:  $F_m = B \cdot Q \cdot v$
- Pokud se náboj nepohybuje, síla je nulová
- Síla zakřivuje trajektorii částice
- Poloměr kruhové trajektorie pro elektron:

$$F_m = F_o \Rightarrow B \cdot e \cdot v = m_e \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m_e v}{eB}$$

Magnetický indukční tok

- Úhrnný tok magnetické indukce procházející určitou souvislou plochou, vyjadřuje kolik indukčních čar protíná danou plochu
- $\Phi = B \cdot S \cos \alpha$ ,  $[\Phi] = T \cdot m^2 = Wb$  (Weber)

# Elektřina a magnetismus

Nestacionární magnetické pole – elektromagnetická indukce

- Děje v nestacionárním mag. poli jsou vždy spojeny se vznikem indukovaného elektrického pole  $\Rightarrow$  nelze je oddělit  $\Rightarrow$  Elektromagnetické pole

Vlastnosti indukovaného el. pole.

- Buzeno proměnným mag. polem
- Siločáry jsou uzavřené křivky – indukované el. pole je vírové
- Nepotenciální pole

# Elektřina a magnetismus

## Faradayův zákon elektromagnetické indukce

- Indukované napětí je rovno záporně vzaté časové změně indukčního toku
- $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ,  $[U_i] = \frac{Wb}{s} = V$
- V uzavřeném obvodu:  $I_i = \frac{U_i}{R}$

## Lenzův zákon

- Indukovaný proud působí svými účinky proti změně, která ho vyvolala.

# Elektřina a magnetismus

## Vlastní indukce

- Vznik indukovaného el. pole ve vlastním obvodu jako následek změny proudu v tomto obvodu

Indukčnost  $L$ ,  $[L] = \frac{V \cdot s}{A} = \frac{Wb}{A} = H$  (Henry)

- $\Phi = L \cdot I$
- $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \Rightarrow L = -\frac{U_i \cdot \Delta t}{\Delta I}$

## Indukčnost cívky

- $L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l}$

## Energie magnetického pole cívky

- $E_m = \frac{1}{2} \Phi \cdot I = \frac{1}{2} L \cdot I^2$

# Elektřina a magnetismus

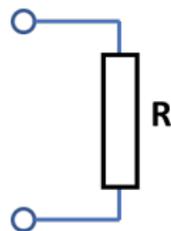
## Obvody střídavého proudu

- Střídavé napětí:  $u = U_m \cdot \sin \omega t$ 
  - $u$  – okamžitá hodnota napětí
  - $U_m$  – maximální hodnota napětí (amplituda napětí)
  - $\omega$  – úhlová frekvence
  - $\omega = 2\pi f$
- V alternátorech se indukuje střídavé napětí otáčením cívky v magnetickém poli (v elektrárnách  $f = 50\text{Hz}$ )

# Elektřina a magnetismus

## Obvod střídavého proudu R

- $u = U_m \cdot \sin \omega t$
- $i = I_m \sin \omega t$
- $R = \frac{U_m}{I_m}$
- $R$  – rezistance
- Napětí a proud jsou ve fázi

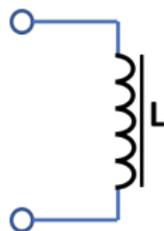


Obrázek 34: Obvod s rezistancí

# Elektřina a magnetismus

## Obvod střídavého proudu L

- $u = U_m \cdot \sin \omega t$
- $i = I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$
- $X_L = \frac{U_m}{I_m}$
- $X_L$  – indukance
- $X_L = \omega L$
- Napětí předbíhá proud o  $\frac{\pi}{2}$

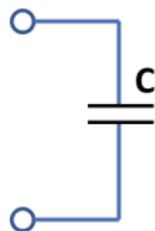


Obrázek 35: Obvod s indukancí

# Elektřina a magnetismus

## Obvod střídavého proudu C

- $u = U_m \cdot \sin \omega t$
- $i = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$
- $X_C = \frac{U_m}{I_m}$
- $X_C$  – kapacitance
- $X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$
- Proud předbíhá napětí o  $\frac{\pi}{2}$

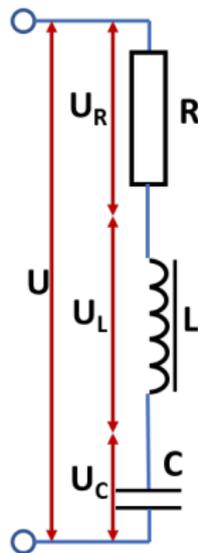


Obrázek 36: Obvod s kapacitancí

# Elektřina a magnetismus

## Obvod střídavého proudu RLC

- $i = I_m \sin \omega t$
- $U_m^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$
- $U_R = I_m \cdot R$ ,  $U_L = I_m \cdot X_L$ ,  
 $U_C = I_m \cdot X_C$
- $U_m = I_m \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
- $Z = \frac{U_m}{I_m}$
- $Z$  – impedance
- $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}$
- $\tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R}$

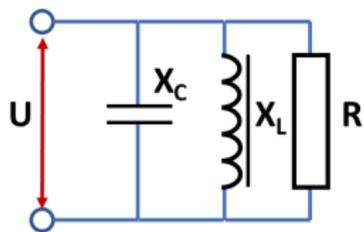


Obrázek 37: Obvod RLC

# Elektřina a magnetismus

## Obvod střídavého proudu RLC

- $u = U_m \sin \omega t$
- $I_m^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$
- $I_R = \frac{U_m}{R}$ ,  $I_C = \frac{U_m}{X_C}$ ,  $I_L = \frac{U_m}{X_L}$
- $I_m = U_m \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}$
- $I_m = U_m \cdot Y$
- $Y$  – admittance
- $Y = \frac{1}{Z}$
- $\tan \varphi = R \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$



Obrázek 38: Obvod RLC

# Elektřina a magnetismus

## Thomsonův vztah

- Spojením cívky a nabitého kondenzátoru vznikne oscilační obvod
- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$
- $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$
- $T_0 = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$

## Optika

- Zabývá se světlem a zákonitostmi jeho šíření, ději při vzájemném působení světla a látky.
- Dělení:
  - 1 Vlnová optika - studuje jevy, které potvrzují vlnovou povahu světla (disperze, interference, ohyb, polarizace . . . )
  - 2 Paprsková (geometrická) optika - zkoumá zobrazování optickými soustavami, řídí se 3 základními zákony (přímočaré šíření světla, zákon odrazu, zákon lomu)
  - 3 Kvantová optika - studuje zejména děje, při nichž dochází k interakci světla a látky

## Světlo

- Elektromagnetické vlnění
- Vnímáme zrakem
  - Frekvenční rozsah:  $7,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz} - 3,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
  - Vlnový rozsah:  $390 \text{ nm} - 770 \text{ nm}$
- Rychlost šíření ve vakuu:  
 $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- Rychlost šíření v prostředí, je vždy menší než rychlost světla ve vakuu
- Frekvence je dána zdrojem, nemění se při přechodu z jednoho prostředí do druhého.
- Vlnová délka:  $\lambda = \frac{c}{f}$



Obrázek 39: Maxwellova duha - spektrum elektromagnetického záření

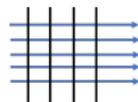
# Optika

## Šíření světla

- Optické prostředí
  - Průhledné - nedochází v něm k rozptylu světla
  - Průsvitné - dochází v něm k rozptylu světla
  - Neprůhledné - světlo pohlcuje, nebo na povrchu odráží
- Homogenní - stejné vlastnosti v každém místě
- Izotropní - stejné vlastnosti ve všech směrech (světlo se šíří všemi směry stejnou rychlostí)



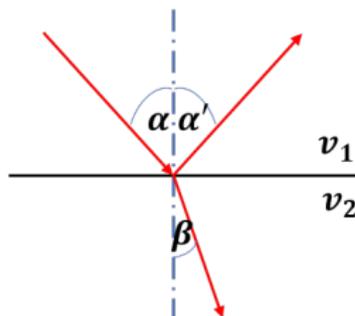
Obrázek 40: Kulová vlnoplocha - bodový zdroj



Obrázek 41: Rovinná vlnoplocha - rovinný zdroj

## Odraz a lom světla

- Jestliže paprsek dopadá na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi, tak se část odráží a část láme.



Obrázek 42: Odraz a lom světla při dopadu na rozhraní dvou prostředí

# Optika

## Odraz světla

- Paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem  $\alpha$  měřeným ke kolmici dopadu
- Dopadající paprsek a kolmice leží v jedné rovině - rovině dopadu
- Úhel odrazu nezávisí na frekvenci světla
- Zákon odrazu:  $\alpha = \alpha'$

## Lom světla

- Paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem  $\alpha$  měřeným ke kolmici dopadu
- Paprsek prochází do druhého prostředí pod úhlem  $\beta$
- Lom ke kolmici:  $\beta < \alpha$  - z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí ( $v_1 > v_2$ )
- Lom od kolmice:  $\beta > \alpha$  - z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí ( $v_1 < v_2$ )

## Lom světla

- Snellův zákon lomu:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$
- Úplný (totální) odraz
  - Při dopadu paprsku z opticky hustšího (s větším indexem lomu  $n$ ) prostředí na rozhraní s opticky řidším (menší index lomu  $n$ )
  - Paprsek přes rozhraní neprochází
  - Úhel dopadu je větší než mezní úhel
- Mezní úhel - úhel, kdy se paprsek láme podél rozhraní

## Disperze světla

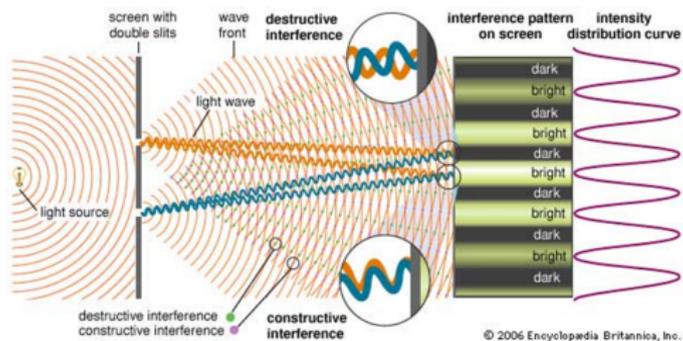
- Rychlost světla v prostředí o  $n > 1$  závisí na jeho frekvenci
- Paprsky různých barev (frekvencí) se lámou různě (nejvíce fialové, nejméně červené)
- Frekvence zůstává stejná, mění se vlnová délka a rychlost.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

## Interference (skládání)

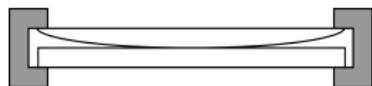
- Nejvýraznější projev vlnové povahy světla
- Stejný popis jako u mechanického vlnění
- Podmínka interference - koherentní paprsky (stejná frekvence, vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě je v čase konstantní)
- Optická dráha  $l$  - dráha, kterou by světlo urazilo ve vakuu,  $l = n \cdot s$ , kde  $s$  je dráha v prostředí s indexem lomu  $n$
- Interferenční maximum:  $\Delta l = n\Delta s = 2k \frac{\lambda}{2}$
- Interferenční minimum:  $\Delta l = n\Delta s = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$

## Youngův pokus

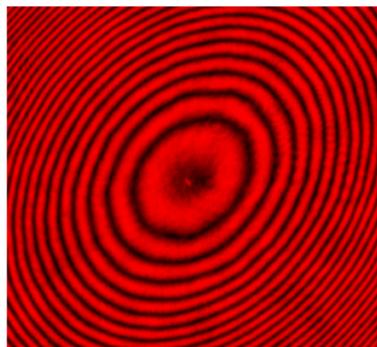


Obrázek 43: Youngův pokus

## Newtonova skla



Obrázek 44: Newtonova skla



Obrázek 45: Newtonovy kroužky

- V případě kolmého dopadu světla pro  $n = 1$ :  $\lambda = \frac{2r_k^2}{(2k-1)R}$ , kde  $R$  je poloměr křivosti čočky,  $k$  je pořadové číslo maxima a  $r$  je poloměr Newtonova kroužku

## Interference na tenké vrstvě

- Tenká vrstva o indexu lomu  $n$ , omezená dvěma rovnoběžnými rovinami ve vzdálenosti  $d$
- Světlo dopadá kolmo na tenkou vrstvu
- Odraz na horní rovině - změna fáze (odraz na pevném konci)
- Odraz na spodní rovině - se stejnou fází (odraz na volném konci)
- Dráhový rozdíl tedy je:  $\Delta l = 2nd + \frac{1}{2}\lambda$
- Interferenční maximum:  $\Delta l = 2k\frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2nd = (2k - 1)\frac{\lambda}{2}$

# Optika

## Ohyb (difrakce)

- Jev podmíněný vlnovými vlastnostmi světla - obraz se objevuje i v geometrickém stínu
- Na štěrbině o velikosti  $a$ :  $a \sin \alpha = k\lambda$
- Na dvou štěrbinách o velikosti  $a$  a vzdálenosti  $b$ :  $b \sin \alpha = k\lambda$
- Na mřížce:  $b$  je mřížková konstanta (vzdálenost vrypů), nulté maximum je bílé, na ostatních maximech lze pozorovat rozklad světla

## Polarizace

- Odrazem - Brewsterův (polarizační) úhel:  $\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$ , odražený a lomený paprsek svírají úhel  $90^\circ$
- Dvojlomem - Islandský vápenec
- Absorpcí - polaroid - různě pohlcuje různé polarizace světla

## Geometrická (paprsková) optika

- Zákony:
  - 1 Přímočaré šíření světla
  - 2 Nezávislost světelných paprsků
  - 3 Zákon odrazu
  - 4 Zákon lomu
- Optická soustava - uspořádání optických prostředí, které mění směr chodu paprsků
- Optické zobrazení - zobrazení předmětu pomocí optické soustavy
- Čočky, zrcadla (rovinná, kulová)

## Zobrazení zrcadlem

- Rovinné
- Kulové
  - ① Duté
  - ② Vypuklé

## Popis zrcadla

- Střed optické plochy –  $C$
- Optická osa zrcadla –  $o$
- Vrchol zrcadla –  $V$
- Poloměr křivosti –  $r$
- Ohnisko –  $F$
- Ohnisková vzdálenost –  $f$
- Předmětová vzdálenost –  $a$
- Obrazová vzdálenost –  $a'$

Paprsky používané pro konstrukci obrazu kulovým zrcadlem

- Paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou – odráží se do ohniska
- Paprsek jdoucí ohniskem (mířící do ohniska) – odráží se rovnoběžně s optickou osou
- Paprsek jsoucí středem optické plochy – odráží se zpět
- Paprsek jdoucí vrcholem zrcadla – odráží se pod stejným úhlem

# Optika

## Zobrazovací rovnice pro zrcadla

- $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$

## Příčné zvětšení

- $Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a}$

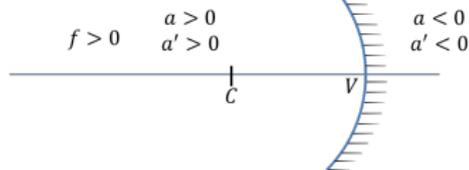
- $Z = -\frac{a'-f}{f} = -\frac{f}{a-f}$

## Znaménková konvence

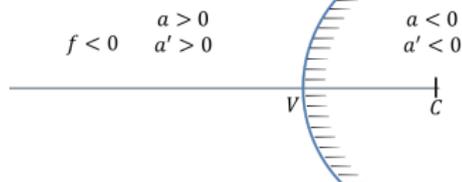
- $a, a', f > 0$  – před zrcadlem
- $a, a', f < 0$  – za zrcadlem
- $y, y' > 0$  – předmět (obraz) je nad optickou osou
- $Z < 0$  – obraz je převrácený
- $Z > 0$  – obraz je vzpřímený
- $|Z| < 1$  – obraz je zmenšený
- $|Z| > 1$  – obraz je zvětšený

# Optika

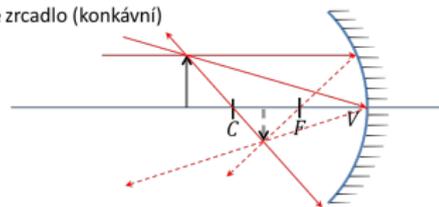
Vyduté zrcadlo (konkávní)



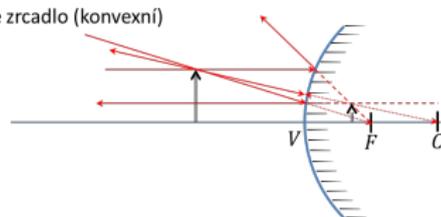
Vypuklé zrcadlo (konvexní)



Vyduté zrcadlo (konkávní)



Vypuklé zrcadlo (konvexní)



Obrázek 46: Veličiny pro popis kulového zrcadla

Obrázek 47: Zobrazení kulovým zrcadlem

## Vlastnosti obrazu

- Duté zrcadlo

- $a > 2f \rightarrow 2f > a' > f$  – obraz skutečný, převrácený zmenšený
- $a = 2f \rightarrow a' = 2f$  – obraz skutečný, převrácený, stejně velký
- $2f > a > f \rightarrow a' > 2f$  – obraz skutečný, převrácený, zvětšený
- $a < f \rightarrow -\infty < -a' < 0$  – obraz neskutečný, vzpřímený, zvětšený

- Vypuklé zrcadlo

- $\infty > a > 0 \rightarrow f < a' < 0$  – obraz neskutečný, vzpřímený, zmenšený

# Optika

## Zobrazení čočkou

- Spojka - nejširší v místě optické osy
- Rozptylka - nejtenčí v místě optické osy

## Popis čočky

- Středy optických ploch –  $C_1, C_2$
- Poloměry křivosti optických ploch –  $r_1, r_2$
- Vrcholy čočky –  $V_1, V_2$
- Optický střed čočky –  $O$
- Předmětový prostor
- Obrazový prostor
- Obrazové ohnisko  $F'$
- Obrazová ohnisková vzdálenost –  $f' = |F'O|$
- Předmětové ohnisko  $F$
- Předmětová ohnisková vzdálenost –  $f = |FO|$
- $\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$ , kde  $n_1$  je pro prostředí,  $n_2$  pro čočku

Paprsky používané pro konstrukci obrazu čočkou

- Paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou se láme do ohniska
- Paprsek jdoucí (směřující) předmětovým ohniskem se láme rovnoběžně s optickou osou
- Paprsek jdoucí optickým středem čočky se neláme

# Optika

## Zobrazovací rovnice pro čočky

- $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$

## Příčné zvětšení

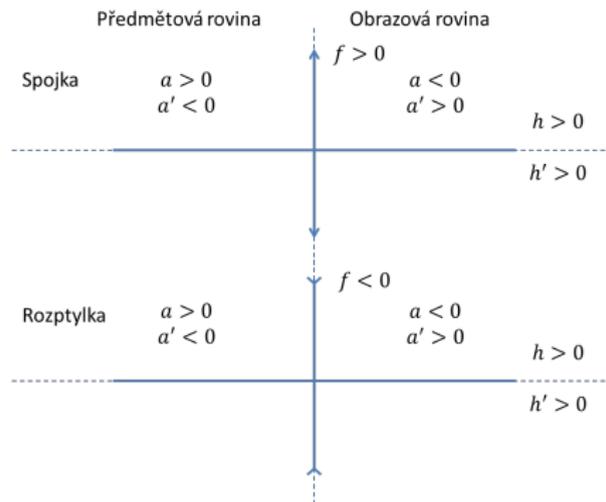
- $Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a}$

- $Z = -\frac{a'-f}{f} = -\frac{f}{a-f}$

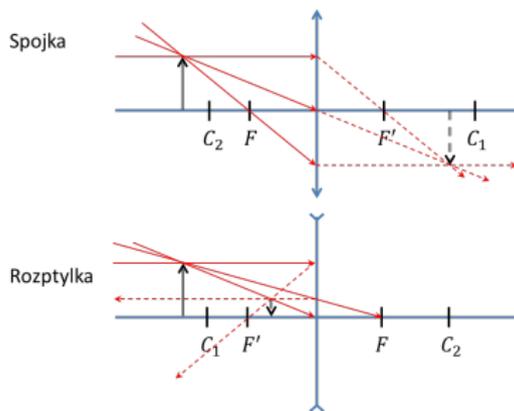
## Znaménková konvence

- $a > 0$  – před čočkou (v předmětovém prostoru)
- $a < 0$  – za čočkou (v obrazovém prostoru)
- $a' > 0$  – za čočkou
- $a' < 0$  – před čočkou
- $y, y' > 0$  – předmět (obraz) je nad optickou osou
- $Z < 0$  – obraz je převrácený
- $Z > 0$  – obraz je vzpřímený
- $|Z| < 1$  – obraz je zmenšený
- $|Z| > 1$  – obraz je zvětšený

# Optika



Obrázek 48: Veličiny pro popis čoček



Obrázek 49: Zobrazení čočkou

## Vlastnosti obrazu

- Spojka

- $a > 2f \rightarrow 2f > a' > f$  – obraz skutečný, převrácený zmenšený
- $a = 2f \rightarrow a' = 2f$  – obraz skutečný, převrácený, stejně velký
- $2f > a > f \rightarrow a' > 2f$  – obraz skutečný, převrácený, zvětšený
- $a < f \rightarrow -\infty < -a' < 0$  – obraz neskutečný, vzpřímený, zvětšený

- Rozptylka

- $\infty > a > 0 \rightarrow f < a' < 0$  – obraz neskutečný, vzpřímený, zmenšený