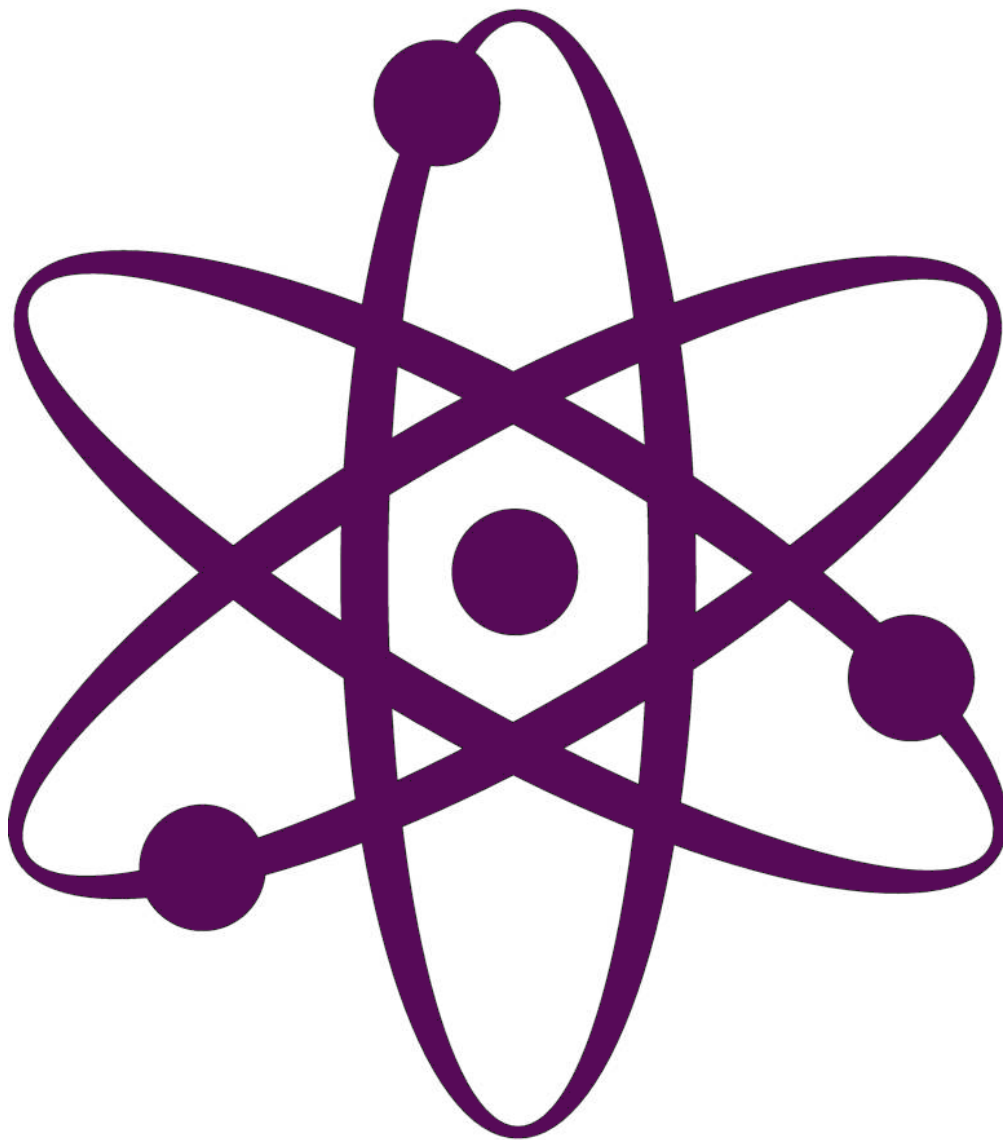


Maturitní otázky z Fyziky

- Tajemství úspěchu v životě není dělat, co se nám líbí, ale nalézat zalíbení v tom, co děláme – *T. A. Edison*



Obsah

1. Kinematika hmotného bodu: 4 – 5
2. Dynamika hmotného bodu: 6 – 7
3. Práce a energie: 8 – 9
4. Mechanika tuhého tělesa: 10 – 11
5. Gravitační pole: 12 – 13
6. Hydro a aeromechanika: 14 – 17
7. Základy molekulové fyziky a termodynamiky: 18 – 21
8. Děje v plynech: 22 – 25
9. Vlastnosti pevných látek: 26 – 27
10. Vlastnosti kapalin: 28 – 31
11. Mechanické kmity: 32 – 35
12. Vlnění a akustika: 36 – 41
13. Elektrostatika: 42 – 45
14. Elektrický proud v kovech: 46 – 49
15. Elektrický proud v polovodičích: 50 – 53
16. Elektrický proud v kapalinách, plynech a vakuu: 54 – 59
17. Stacionární magnetické pole: 60 – 63
18. Nestacionární magnetické pole: 64 – 65
19. Střídavý proud: 66 – 69
20. Elektromagnetické kmity a vlny: 70 – 73
21. Geometrická optika: 74 – 83
22. Fyzikální optika: 84 – 87
23. Kvantová fyzika: 88 – 91
24. Fyzika atomového obalu: 92 – 95
25. Jaderná fyzika: 96 – 101

1. Kinematika hmotného bodu

- popisuje pohyb, nehledá příčiny
- **hmotný bod** = myšlenkový model, zastupuje těleso, když nezáleží na jeho rozměrech a tvaru, má stejnou hmotnost
- klid a pohyb tělesa je relativní, záleží na volbě vztažné soustavy
- **trajektorie** = čára, kterou hmotný bod při pohybu opisuje
- podle trajektorie rozlišujeme pohyb přímočarý a křivočarý
- s – dráha, délka trajektorie
- průměrná rychlost je podíl celkové dráhy a celkového času
- okamžitá rychlost má směr tečny k trajektorii

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

- podle okamžité rychlosti rozlišujeme pohyb rovnoměrný a nerovnoměrný

Rovnoměrný přímočarý pohyb

- rychlost je konstantní

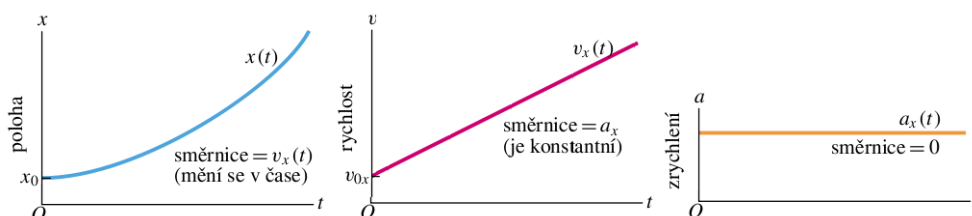
$$s = vt$$

Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb

- zrychlení je konstantní

$$v = at = \sqrt{2as}$$

$$s = \frac{1}{2}at^2$$



Obrázek 1: Grafy závislostí polohy, rychlosti a zrychlení na čase.

Zpomalování

- zrychlení je záporné

Volný pád

- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – tíhové zrychlení
- všechna tělesa padají ve vakuu stejně rychle

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

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

Pohyb po kružnici

- periodický pohyb

$$\varphi = \frac{s}{r}$$

- φ – úhel v radiánech

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

- ω – úhlová rychlost

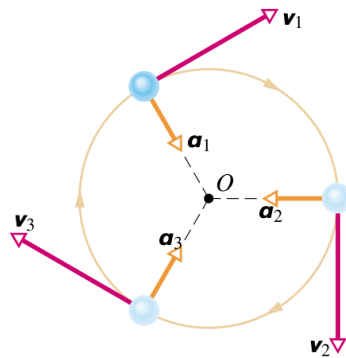
$$T = \frac{1}{f}$$

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

$$v = \frac{ds}{dt} = r \frac{d\varphi}{dt} = r\omega = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f$$

- dostředivé zrychlení

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



Obrázek 2: Pohyb po kružnici.

2. Dynamika hmotného bodu

- studuje příčiny pohybu
- příčinou pohybu je působení síly (vzájemným přímým stykem, silovým polem)
- účinek síly je deformační, nebo pohybový
- **izolované těleso** = model tělesa, na které nepůsobí žádná síla, nebo je jejich výslednice nulová

Newtonovy pohybové zákony

Zákon setrvačnosti:

Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není nuceno vnějšími silami tento stav změnit.

- platí v inerciálních vztažných soustavách
- **inerciální vztažná soustava** = soustava, ve které platí zákon setrvačnosti
- každá soustava, která je vůči inerciální soustavě v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, je také inerciální

Zákon síly:

Velikost zrychlení hmotného bodu je přímo úměrná velikosti výslednice sil působících na hmotný bod a nepřímo úměrná hmotnosti hmotného bodu:

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

Směr zrychlení je shodný se směrem výslednice sil.

- \vec{p} – hybnost

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

- 1. věta impulsová

$$m\vec{v} = \vec{F}t$$

- zákon zachování hybnosti: *Celková hybnost izolované soustavy těles je konstantní.*

Zákon akce a reakce:

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

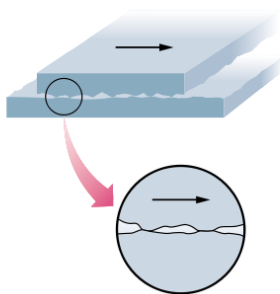
Smykové tření

- působí proti směru pohybu
- nezávisí na obsahu stykových ploch, ani na rychlosti

$$F_t = f F_n$$

Valivý odpor

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



Obrázek 3: Tření je způsobeno nerovnostmi na povrchu těles.

Dostředivá síla

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

Inerciální vztažné soustavy

- platí v nich Galileiho princip relativity:

Zákony mechaniky jsou stejné ve všech inerciálních soustavách.

Rovnice, které je vyjadřují mají stejný tvar.

Neinerciální vztažné soustavy

- soustavy, které se vzhledem k inerciální soustavě pohybují se zrychlením
- neplatí v nich zákon setrvačnosti
- na těleso působí setrvačná síla

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

- otáčející se vztažná soustava je neinerciální, má dostředivé zrychlení
- působí setrvačná odstředivá síla

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

3. Práce a energie

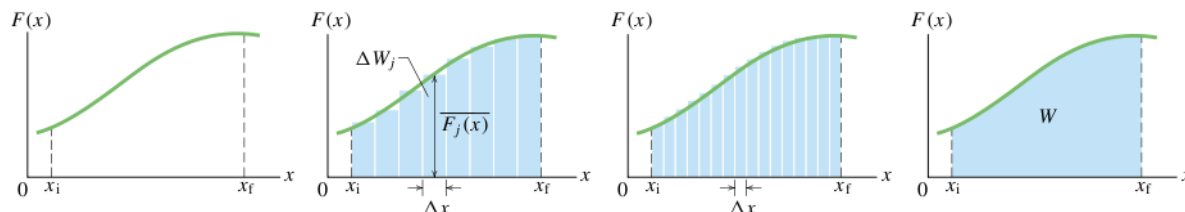
Mechanická práce

- práci koná síla rovnoběžná s trajektorií
- pokud je působící síla konstantní

$$W = Fs$$

- obecně (je-li vektor síly rovnoběžný se směrovým vektorem)

$$W = \int F(x)dx$$



Obrázek 4: Práce je obsah plochy pod křivkou v grafu závislosti síly na poloze.

Mechanická energie

- součet celkové kinetické a potenciální energie tělesa

$$E = E_k + E_p$$

Kinetická energie

- je závislá na volbě vztažné soustavy

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Potenciální energie

- mají ji tělesa nacházející se v silových polích nebo pružně deformovatelná
- pro praxi je důležitá tíhová potenciální energie
- musíme zvolit nulovou hladinu tíhové potenciální energie, vzhledem k ní:

$$E_p = mgh$$

Zákon zachování energie

Při všech dějích v izolované soustavě těles se mění jedna forma energie na jinou nebo přechází energie z jednoho tělesa na druhé, celková energie soustavy se však nemění.

Výkon a účinnost

- výkon = vykonaná práce/čas

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{Fvdt}{dt} = Fv$$

- příkon = dodaná energie/čas

$$P_0 = \frac{dE}{dt}$$

- účinnost = výkon/příkon

$$\eta = \frac{P}{P_0}$$

Ráz těles

- nepružný ráz – tělesa se po srážce spojí, platí ZZH

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = v(m_1 + m_2)$$

- neplatí zákon zach. mech. energie, část se spotřebuje na deformaci těles a část se přemění v jejich vnitřní energii
- dokonale pružný ráz – tělesa se deformují krátkou chvíli, poté se odrazí a potenciální energie pružnosti se opět změní na kinetickou energii
- platí ZZH

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2$$

- platí zákon zachování mechanické energie

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2$$

4. Mechanika tuhého tělesa

- **tuhé těleso** = myšlenkový model, jeho tvar ani objem se působením síly nemění
- složený pohyb = posuvný pohyb (translace) + otáčivý pohyb (rotace)

Moment síly

- otáčivý účinek síly závisí na velikosti síly, jejím směru a poloze jejího působíště

$$M = Fd$$

- d – rameno síly, kolmá vzdálenost vektorové přímky síly od osy otáčení
- směr momentu síly se určí podle pravidla pravé ruky

Skládání rovnoběžných sil

- graficky: síly vyměníme, jednu otočíme a v průniku spojnice konců šipek a začátků šipek leží umístění výsledné síly
- součet momentů síly původních sil se rovná momentu síly výsledné

$$x_T = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

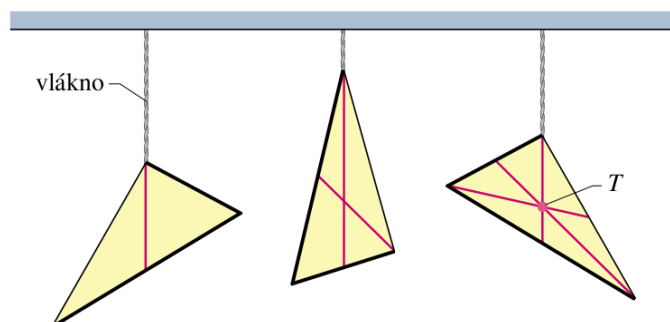
Moment dvojice sil

- dvě stejně velké síly opačného směru nelze nahradit jednou silou, jejich výslednice je nulová
- jejich otáčivý účinek

$$D = M_1 - M_2 = F(x + d) - Fx = Fd$$

Těžiště tuhého tělesa

- působíště tíhové síly působící v homogenním tíhovém poli
- **stabilní rovnovážná poloha** – těžiště tělesa, které je půs. malé síly vychýleno ze SRP, je nad těž. tělesa ve SRP
- **labilní rovnovážná poloha** – těžiště tělesa, které je půs. malé síly vychýleno z LRP, je pod těžištěm tělesa v LRP
- **indiferentní rovnovážná poloha** – těžiště tělesa, které je působením malé síly vychýleno z IRP, je na stejné úrovni jako těžiště tělesa v IRP
- **stabilita tělesa** – určuje ji práce, kterou je nutno vykonat, aby se těleso dostalo ze SRP do LRP



Obrázek 5: Možnost, jak zjistit těžiště tuhého tělesa.

Kinetická energie tuhého tělesa

- při posuvném pohybu

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

- při otáčivém pohybu

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \dots + \frac{1}{2}m_nv_n^2 = \\ &= \frac{1}{2}m_1r_1^2\omega^2 + \frac{1}{2}m_2r_2^2\omega^2 + \dots + \frac{1}{2}m_nr_n^2\omega^2 = \\ &= \frac{1}{2}\omega^2(m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \dots + m_nr_n^2) \\ J &= m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \dots + m_nr_n^2 \end{aligned}$$

- J – moment setrvačnosti

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

- celková kinetická energie

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

- J_0 dutého válce = mR^2
- J_0 plného válce = $\frac{1}{2}mR^2$
- J_0 plné koule = $\frac{2}{5}mR^2$
- J_0 tenké tyče = $\frac{1}{12}ml^2$

5. Gravitační pole

Newtonův gravitační zákon

Každá dvě tělesa se navzájem přitahují stejně velkými silami opačného směru.

Velikost gravitační síly pro dvě stejnorodá tělesa tvaru koule je přímo úměrná součinu jejich hmotností a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti jejich středů:

$$F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ – gravitační konstanta
- gravitační zrychlení v centrálním gravitačním poli Země

$$a_g = \kappa \frac{M_Z}{(R_Z + h)^2}$$

- gravitační zrychlení v homogenním gravitačním poli Země ($h \rightarrow 0$)

$$a_g = \kappa \frac{M_Z}{R_Z^2}$$

Tíhová síla

- vektorový součet gravitační a setrvačné odstředivé síly

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

- $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ – normální tíhové zrychlení

Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země

Svislý vrh vzhůru

$$v = v_0 - gt$$

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

- maximální výška (rychlost je nulová)

$$v_0 - g t_h = 0$$

$$t_h = \frac{v_0}{g}$$

$$h = v_0 t_h - \frac{1}{2} g t_h^2 = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}$$

Vodorovný vrh

$$x = v_0 t$$

$$y = h - \frac{1}{2} g t^2$$

- délka vrhu (ypsilonová souřadnice je nulová)

$$h - \frac{1}{2} g t_d^2 = 0$$

$$t_d = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$d = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Šikmý vrh vzhůru

- α – elevační úhel

$$x = v_0 t \cos \alpha$$

$$y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2$$

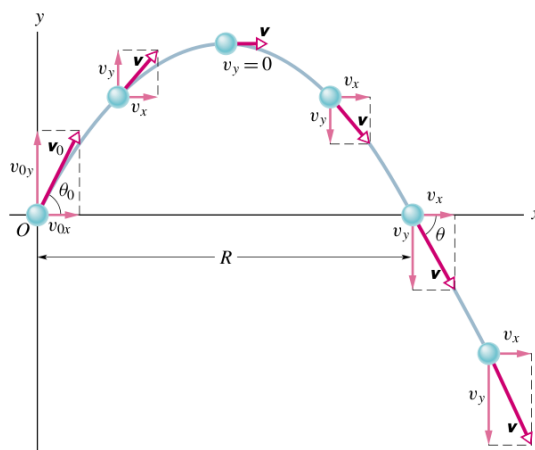
- délka vrhu (ypsilonová souřadnice je nulová)

$$v_0 t_d \sin \alpha - \frac{1}{2} g t_d^2 = 0$$

$$t_d = \frac{2 v_0 \sin \alpha}{g}$$

$$d = \frac{2 v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

- elevační úhel pro maximální délku vrhu při dané rychlosti je 45°



Obrázek 6: Šikmý vrh vzhůru.

Pohyby těles v centrálním gravitačním poli Země

- aby družice opsala kružnici, musí mít počáteční rychlost v_k (kruhová rychlost, 1. kosmická rychlost)

$$F_g = F_d$$

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

$$v_k = \sqrt{\frac{\kappa M_Z}{(R_Z + h)}} \doteq \sqrt{\frac{\kappa M_Z}{R_Z}} = \sqrt{a_g R_Z}$$

- $v_k = 7,9 \text{ km/s}$

$$T = \frac{2\pi R_Z}{v_k}$$

- $T \doteq 84,4 \text{ min}$

- aby raketa opustila grav. pole Země, musí mít počáteční rychlost v_p (parabolická, úniková, 2. kosmická rychlost)

$$v_p = v_k \sqrt{2}$$

- $v_p = 11,2 \text{ km/s}$

6. Hydro a aeromechanika

- kapaliny + plyny = tekutiny
- tekutost – snadná vzájemná pohyblivost částic, nemají stálý tvar
- **ideální kapalina** – dokonale nestlačitelná, dokonale tekutá, bez vnitřního tření
- **ideální plyn** – dokonale stlačitelný, dokonale tekutý, bez vnitřního tření

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

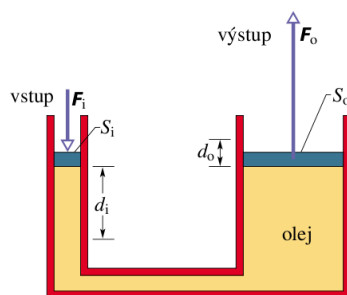
- p – tlak
- měří se manometrem

Pascalův zákon

Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalně těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.

- aplikace: hydraulická a pneumatická zařízení

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



Obrázek 7: Schéma hydraulického zařízení.

Hydrostatický tlak

$$p_h = \frac{F_h}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{hS\rho g}{S} = h\rho g$$

- nezávisí na tvaru nádoby – hydrostatické paradoxon
- spojené nádoby s kapalinami různé hustoty

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$$

Atmosférický tlak

- obdoba hydrostatického tlaku, ale hustota vzduchu se s výškou mění
- Torricelliho pokus

$$p_a = p_h = h\rho g$$

- $h = 0,76$ m
- $\rho = 13\,600$ kg/m³
- $p_a = 10^5$ Pa
- $p_n = 1013,25$ hPa – normální atmosférický tlak
- měří se barometrem, aneroidem – kovový tlakoměr

Archimédův zákon

Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou, jejíž velikost se rovná tíze kapaliny tělesem vytlačené.

- rozdíl hydrostatického tlaku v horní a dolní části tělesa

$$F_{vz} = (h + a)\rho g S - h\rho g S = a\rho g S = \rho V g$$

- těleso klesá: $F_G > F_{vz}$
- těleso se volně vznáší: $F_G = F_{vz}$
- těleso stoupá: $F_G < F_{vz}$ a ustálí se na volné hladině

$$\frac{V'}{V} = \frac{\rho_t}{\rho}$$

- V' – objem ponořené části tělesa

Proudění (ideálních) kapalin a plynů

- ustálené, stacionární proudění – rychlost je konstantní v čase
- **proudnice** = myšlená čára, jejíž tečna v libovolném bodě má směr rychlosti pohybující se částice

$$Q_V = \frac{V}{t}$$

- Q_V – objemový průtok
- měří se vodoměrem, plynoměrem

$$V = Svt$$

$$Q_V = Sv$$

Rovnice kontinuity, spojitosti toku

- objemový průtok je konstantní:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

Bernoulliho rovnice

- součet kinetické a potenciální energie kapaliny zůstává konstantní (ZZE)

$$E_k + E_p = konst.$$

$$\frac{1}{2}\rho V v^2 + pV = konst.$$

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

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

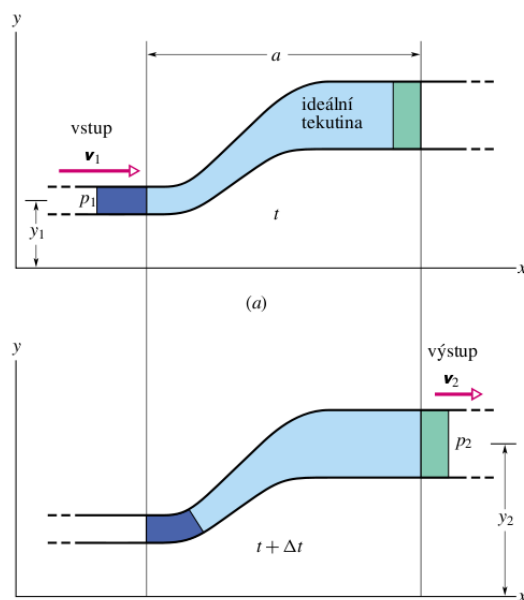
- hydrodynamické paradoxon – tlak klesne pod hodnotu tlaku atmosférického a do trubice je nasáván vzduch
- rychlost výtoku kapaliny z nádoby (nepočítáme s klesající hladinou):

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = p_h = h\rho g$$

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

$$t_d = \sqrt{\frac{2h_z}{g}}$$

$$d = 2\sqrt{hh_z}$$



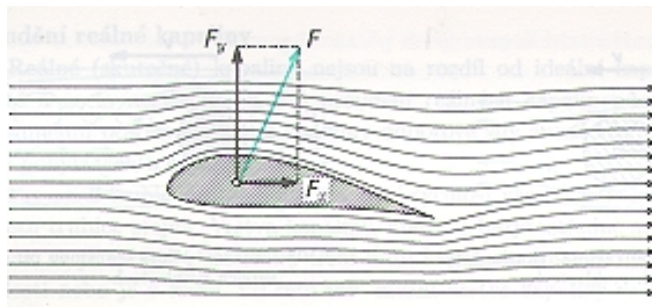
Obrázek 8: Kapalina má v širším potrubí menší rychlost.

Proudění reálné kapaliny

- proti pohybu působí vnitřní tření – zvyšuje teplotu kapaliny
- proudění laminární × turbulentní
- při obtékání působí na těleso odporová síla daná Newtonovým vztahem:

$$F = \frac{1}{2} C_{\rho} S v^2$$

- C je závislé na tvaru tělesa
- aerodynamický tvar – křídla letadel
- na horní straně proudí vzduch větší rychlostí → je tam menší tlak – působí aerodynamická vztlaková síla
- platí pro menší nebo střední rychlosti, pro větší se odpor zvětšuje se 3. mocninou rychlosti



Obrázek 9: Aerodynamický tvar křídel letadla vyvolává vztlakovou sílu.

7. Základy molekulové fyziky a termodynamiky

Kinetická teorie látek

Látky kteréhokoli skupenství se skládají z částic.

- částice – atomy, molekuly, ionty (10^{-10} m)
- nespojitá (diskrétní) struktura látky

Částice se v látkách neustále a neuspořádaně (chaoticky) pohybují.

- částice vykonávají posuvný, otáčivý nebo kmitavý pohyb (tepelný pohyb)
- všechny směry jsou u tělesa v klidu stejně pravděpodobné
- důkazy tepelného pohybu: difúze, Brownův pohyb, tlak plynu...
- **difúze** = samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice jiné látky
- **Brownův pohyb** = neustálý neuspořádaný pohyb v kapalině
- s rostoucí teplotou roste i střední rychlost částice

Částice na sebe navzájem působí silami,

tyto síly jsou při malých vzdálenostech odpuzivé, při větších vzdálenostech přitažlivé.

- původ v elektrických silách (jádro +, elektronový obal −)
- důkazy přitažlivých sil: soudržnost, pevnost, přilnavost
- r_0 – rovnovážná poloha, určuje strukturu molekul
- vazebná energie je rovna práci potřebné k rozrušení vazby

Modely látek různých skupenství

Plynná látka

- velká střední vzdálenost mezi mol. vzhledem k jejich velikosti → přitažlivé síly mezi mol. jsou zanedbatelné
- posuvný, otáčivý a kmitavý pohyb

$$E_p < E_k$$

Pevná látka

- amorfni × krystalická látka
- střední vzdálenost přibližně stejně velká, jako velikost molekul – určitý tvar i objem
- kmitavý pohyb kolem rovnovážných poloh

$$E_p > E_k$$

Kapalná látka

- střední vzdálenost přibližně stejně velká jako velikost molekul, vazba není tak silná jako u pevné látky
- kmitavý pohyb kolem rovnovážné polohy, která se s časem mění
- tekutá, nezachovává svůj tvar

$$E_p \doteq E_k$$

Plazma

- soustava elektricky nabitých a neutrálních částic
- příklad: plamen, blesk, plazma mezihvězdného prostoru a hvězd
- vzniká také při elektrických výbojích v plynech

Rovnovážný stav soustavy

- stavové veličiny: teplota, tlak, objem, vnitřní energie, ...
- **izolovaná soustava** = soustava, u níž nedochází k výměně energie ani částic s okolím
- adiabaticky izolovaná soustava – nedochází k tepelné výměně
- **rovnovážný stav** = stav s největší pravděpodobností výskytu, stavové veličiny zůstávají konstantní
- rovnovážný děj – když soustava prochází řadou po sobě následujících rovnovážných stavů (probíhá pomalu)
- nerovnovážný děj – skutečný

Teplota

- tělesa, která jsou při vzájemném dotyku v rovnovážném stavu, mají stejnou teplotu
- měří se teploměry: kapalinový, plynový, bimetalový, odporový, termoelektrický, radiační (pyrometr)
- trojný bod vody = led, voda, sytá vodní pára
- $T_r = 273,16 \text{ K} = 0 \text{ °C}$

Vnitřní energie

- U – součet celkové kinetické a potenciální energie všech částic
- ke změně vnitřní energie dochází konáním práce, nebo tepelnou výměnou
- Q [J] – teplo odevzdané teplejším tělesem a přijaté studenějším
- C [J/K] – tepelná kapacita

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

- c [J/Kkg] – měrná tepelná kapacita

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}$$

$$Q = cm\Delta T$$

Kalorimetrická rovnice

- vychází ze ZZE
- když se vyrovnávají teploty dvou těles v izolované soustavě platí:

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t - t_2)$$

První termodynamický zákon

- ΔU – přírůstek vnitřní energie soustavy
- W – práce vykonaná vnějšími silami působícími na soustavu
- Q – teplo dodané soustavě okolím

$$\Delta U = W + Q$$

- W' – práce vykonaná soustavou

$$W = -W'$$

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

- adiabatický děj – děj, při kterém nedochází k tepelné výměně
- přenos energie lze uskutečnit vedením, zářením, nebo prouděním

Molární veličiny

- $m_u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg – atomová hmotnostní jednotka, hmotnost dvanáctiny hmotnosti atomu $^{12}_6\text{C}$
- A_r – relativní atomová hmotnost, číslo, které udává kolikrát je prvek těžší než m_u

$$A_r(X) = \frac{m_x}{m_u}$$

- M_r – relativní mol. hmotnost, číslo, které udává kolikrát je mol. těžší než m_u , součet A_r všech atomů v mol.

$$M_r(XY) = \frac{m_{xy}}{m_u}$$

- M [kg/mol] – molární hmotnost, hmotnost jednoho molu látky, číselně rovna M_r

$$M = M_r \cdot 10^{-3}$$

- n [mol] – 1 mol = množství látky, ve kterém je stejný počet molekul, jako je atomů uhlíku v 12ti gramech $^{12}_6\text{C}$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} = \frac{V}{V_M}$$

- N – počet molekul
- $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol – Avogadrova konstanta, počet molekul v jednom molu látky
- $V_M = 22,41 \cdot 10^{-3}$ m³/mol – molární objem za daných podmínek ($p = 1013$ hPa, $T = 273,15$ K)
- N_V [1/m³] – hustota molekul

$$N_V = \frac{N}{V}$$

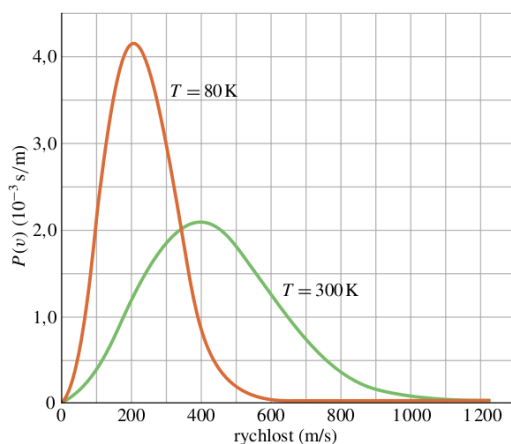
8. Děje v plynech

Ideální plyn

- rozměry molekul ideálního plynu jsou v porovnání se střední vzdáleností molekul od sebe zanedbatelně malé
- molekuly ideálního plynu na sebe mimo vzájemných srážek navzájem silově nepůsobí
- vzájemné srážky molekul ideálního plynu a srážky těchto molekul se stěnou nádoby jsou dokonale pružné

Střední kvadratická rychlost

- rozdělení molekul plynu podle rychlostí – [Lammertův pokus](#)



Obrázek 10: Rozdělení molekul plynu podle rychlostí.

- celková kinetická energie

$$E_k = \frac{1}{2} m_0 (\Delta N_1 v_1^2 + \Delta N_2 v_2^2 + \dots + \Delta N_i v_i^2)$$

- v_k – stř. kvadratická rychlost = rychlost, kterou by se pohybovaly všechny mol. a kinetická energie by se nezměnila

$$N \frac{1}{2} m_0 v_k^2 = \frac{1}{2} m_0 (\Delta N_1 v_1^2 + \Delta N_2 v_2^2 + \dots + \Delta N_i v_i^2)$$

$$v_k^2 = \frac{\Delta N_1 v_1^2 + \Delta N_2 v_2^2 + \dots + \Delta N_i v_i^2}{N} = v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_i^2$$

- střední kinetická energie

$$E_0 = \frac{1}{2} m_0 v_k^2 = \frac{3}{2} kT$$

- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K – Boltzmannova konstanta

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

- střední tlak plynu

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

Stavová rovnice

- dosazením střední kvadratické rychlosti do základní rovnice pro tlak plynu dostáváme

$$pV = NkT$$

$$pV = nN_AkT$$

- $R = N_Ak = 8,31 \text{ J/(kg mol)}$ – molární plynová konstanta

$$pV = nRT$$

- pokud se nemění hmotnost plynu platí

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

Děje v plynech

Izotermický děj

- teplota plynu je konstantní
- **Boylův–Mariottův zákon**

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

- **izoterma** – graf vyjadřující tlak plynu jako funkci jeho objemu při izotermickém ději

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

- $\Delta U = 0$ – nemění se teplota, vnitřní energie zůstává konstantní

$$Q = W'$$

- plyn koná práci

Izochorický děj

- objem plynu je konstantní
- **Charlesův zákon**

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

- **izochora** – graf vyjadřující tlak plynu jako funkci jeho objemu při izochorickém ději

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

- $W' = 0$ – nemění se objem, plyn nekoná práci

$$Q = \Delta U$$

$$\Delta U = c_V m \Delta T$$

- c_V – měrná tepelná kapacita plynu za stálého objemu

Izobarický děj

- tlak plynu je konstantní
- Gay-Lussacův zákon

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

- izobara – graf vyjadřující tlak plynu jako funkci jeho objemu při izobarickém ději

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

- plyn zvyšuje svou teplotu a zároveň koná práci

$$\Delta U = c_p m \Delta T$$

- c_p – měrná tepelná kapacita plynu za stálého objemu ($c_p > c_v$)

Adiabatický děj

- nedochází k tepelné výměně s okolím
- adiabatická expanze:

$$\Delta U = W'$$

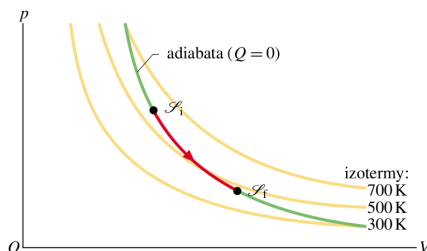
- adiabatická komprese:

$$\Delta U = W$$

- Poissonův zákon

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

- $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ – Poissonova konstanta (jednoatomové molekuly: $\frac{5}{3}$, dvouatomové molekuly: $\frac{7}{5}$)
- adiabata – graf vyjadřující tlak plynu jako funkci jeho objemu při adiabatickém ději



Obrázek 11: Adiabata klesá vždy rychleji než izoterma.

Kruhový děj

- práce plynu při konstantním tlaku (izobarický děj)

$$W' = p\Delta V$$

- obecně

$$W' = \int p(V) dV$$

- kruhový děj – konečný stav soustavy je totožný s počátečním
- ohřívač – těleso, od kterého látka přijme teplo Q_1
- chladič – těleso, kterému látka předá teplo Q_2
- práce vykonaná při kruhovém ději:

$$W' = Q_1 - Q_2$$

$$\eta = \frac{w'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Druhý termodynamický zákon

*Není možné sestavit periodicky pracující tepelný stroj,
který by jen přijímal teplo od určitého tělesa (ohříváče) a vykonával stejně velkou práci.*

- kdyby neplatil tento zákon, bylo by možné sestavit perpetuum mobile druhého druhu ($\eta = 100\%$)
- perpetuum mobile prvního druhu ($\eta > 100\%$)
- ekvivalentní vyjádření:

*Při tepelné výměně těleso o vyšší teplotě nemůže samovolně
přijímat teplo od tělesa o nižší teplotě.*

Carnotův cyklus

1. fáze – izotermická expanze

- sníží se tlak, zvětší se objem
- plyn vykoná práci:

$$W' = Q$$

- Q_o – teplo dodané ohříváčem

2. fáze – adiabatická expanze

- sníží se tlak, zvětší se objem, sníží se teplota
- plyn vykoná práci:

$$W' = \Delta U$$

3. fáze – izotermická komprese

- zvýší se tlak, zmenší se objem
- na plynu je konána práce:

$$W = Q$$

- Q_{ch} – teplo přijaté chladičem

4. fáze – adiabatická komprese

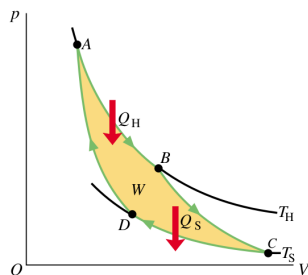
- zvýší se tlak, zvětší se objem, zvětší se teplota
- na plynu je konána práce:

$$W = \Delta U$$

- účinnost Carnotova cyklu:

$$\eta = \frac{W'}{Q_o} = \frac{Q_o - Q_{ch}}{Q_o} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- tepelné stroje – založené na Carnotově cyklu
- motory parní (parní stroj, parní turbína) × motory spalovací (plynová turbína, vznětový a zážehový motor, ...)



Obrázek 12: PV diagram Carnotova cyklu.

9. Vlastnosti pevných látek

- pokud na ně nepůsobí vnější síla, zachovávají svůj tvar
- **krystalické látky** – pravidelné uspořádání částic
 - * monokrystaly (sůl, diamant) – dalekodosahové uspořádání, anizotropie – fyzikální vlastnosti závislé na směru
 - * polykrystaly (kovy) – velké množství drobných krystalů, izotropie – stejné vlastnosti ve všech směrech
- **amorfní látky** (sklo, pryskyřice) – krátkodosahové uspořádání

Krystalová mřížka

- vzniká spojením základních (elementárních) buněk krystalu
- a = mřížkový parametr, délka hrany
- dokonale pravidelné uspořádání – ideální krystal

Poruchy krystalové mřížky

1. **vakance** – částice v mřížce chybí
2. **intersticiální poloha částice** – částice není na svém místě
3. **příměsi** – částice nahrazena částicí jiné látky, nebo jiná látka v intersticiální poloze

Vazby v krystalech

Iontová vazba

- krystaly alkalických halogenidů
- tvrdé, vysoká teplota tání
- křehké a štěpné podél rovin kolmých na hrany základní buňky
- za běžných teplot dobré elektrické izolanty, při vyšších teplotách vodivé
- pro viditelné světlo většinou propustné

Vodíková vazba

- vodíkový můstek
- v krystalech ledu, častá v organických látkách

Kovová vazba

- měď, železo, hliník, wolfram, ...
- mřížka z kladných iontů, mezi nimiž se se pohybují valenční elektrony (elektronový plyn)
- dobrá tepelná a elektrická vodivost
- povrchový lesk, neprůhledné, nejsou štěpné
- některé mají dobrou kujnost a tažnost

Kovalentní vazba

- směrová vazba diamantu, germania, křemíku, ...
- tvrdé, vysoká teplota tání, nerozpustné v běžných rozpouštědlech
- elektrické izolanty, nebo polovodiče

Van der Waalsova vazba

- slabá vazba stabilní jen za velmi nízkých teplot
- jód, chlor, kyslík, vodík, organické sloučeniny
- molekulové krystaly – měkké, nízká teplota tání

Deformace pevného tělesa

- změna rozměrů, tvaru nebo objemu způsobená vnějšími silami
- zmizí, když síly přestanou působit – pružná (elastická) deformace
- přetrvává i když síly přestanou působit – tvárná (plastická) deformace
- deformace tahem/tlakem – dvě síly opačného směru působící v jedné přímce
- deformace ohybem – jedna síla kolmá na podélnou osu
- deformace smykem – dvě síly opačného směru působící na horní a dolní podstavu
- deformace kroucením – na konce tělesa působí dvojice sil, které mají opačný moment síly

Hookův zákon

- $F_p = F$ – síla pružnosti (síla, která působí na těleso při deformaci tahem)

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

- σ_n – normálové napětí
- σ_u – mez úměrnosti, největší hodnota napětí, pro které platí Hookův zákon
- σ_E – mez pružnosti, největší hodnota napětí, pro které je deformace tahem ještě pružná
- σ_k – mez kluzu
- σ_p – mez pevnosti, největší hodnota napětí, pro které nedojde k porušení soudržnosti materiálu

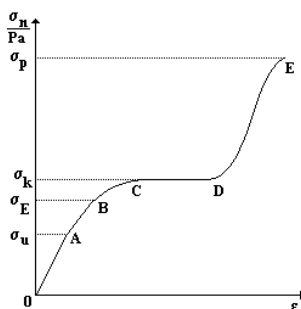
$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

- ϵ – relativní prodloužení

Normálové napětí je přímo úměrné relativnímu prodloužení.

$$\sigma_n = E\epsilon$$

- E – modul pružnosti v tahu



Obrázek 13: Křivka deformace pevného tělesa.

Teplotní roztažnost

- při změně teploty se mění rozměry tělesa
- délková teplotní roztažnost:

$$\Delta l = \alpha l_1 \Delta T$$

- α [1/K] – teplotní součinitel délkové roztažnosti

$$l = l_1 [1 + \alpha \Delta T]$$

- objemová teplotní roztažnost:

$$V = V_1 [1 + \beta \Delta T]$$

- $\beta \doteq 3\alpha$ [1/K] – teplotní součinitel objemové roztažnosti

10. Vlastnosti kapalin

- krátkodosahové uspořádání molekul
- z vyšší teplotou se zlepšuje tekutost

Povrchová vrstva

- **sféra molekulového působení** = koule opsaná kolem molekuly o takovém poloměru r_m , aby síly, kterými na tuto molekulu působí molekuly ležící mimo tuto kouli, byly zanedbatelné (10^{-9})
- **povrchová vrstva kapaliny** = vrstva molekul, jejichž vzdálenost od volného povrchu kapaliny je menší než r_m
- na molekuly v povrchové vrstvě působí sousední mol. výslednou přitažlivou silou, která má směr dovnitř kapaliny
- **povrchová energie** – molekuly v povrchové vrstvě mají větší pot. energii, je nutné vykonat práci, aby se tam dostali
- kapalina má snahu zaujmout takový tvar, aby její povrch byl co nejmenší

Povrchové napětí

- F – povrchová síla má směr tečny k ploše (mýdlová blána v rámečku)
- l – délka okraje povrchové blány, na který působí povrchová síla kolmo

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

- povrchové napětí je závislé na teplotě kapaliny

Kapilární tlak

- kapalina smáčí stěny nádoby, když: $0 \leq \vartheta < \frac{\pi}{2}$
- kapalina nesmáčí stěny nádoby, když: $\frac{\pi}{2} < \vartheta \leq \pi$
- pod zakřiveným povrchem vzniká **kapilární tlak**
- pro kulatý tvar povrchu

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

- tenká kulatá bublina má dva povrchy

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

- **kapilarita** = kapilární elevace (kapaliny smáčející stěny) + kapilární deprese (kapaliny nesmáčející stěny)
- pro výšku při kapilární elevaci platí

$$h_{og} = \frac{2\sigma}{R}$$

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

Teplotní roztažnost

- objemová teplotní roztažnost (pro nepříliš velký rozdíl teplot)

$$V \doteq V_1(1 + \beta \Delta T)$$

- β [1/K] – teplotní součinitel objemové roztažnosti
- pro větší teplotní rozdíly

$$V = V_1(1 + \beta_1 \Delta T + \beta_2 \Delta T^2)$$

- změna hustoty kapaliny

$$\varrho = \varrho_1 \frac{(1 - \beta \Delta T)}{1 - \beta^2 \Delta T^2} \doteq \varrho_1(1 - \beta \Delta T)$$

- $\beta^2 \Delta T^2$ – zanedbatelně malý člen
- **anomálie vody** – při změně teploty z 0°C na 4°C (maximální hustota) se zmenšuje objem

Změny skupenství látek

- závisí na okolním tlaku

Tání

- pevná látka → kapalná látka
- L_t – skupenské teplo tání, teplo, které přijme pevné těleso, aby se změnilo na kapalinu
- l_t – měrné skupenské teplo tání

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

Tuhnutí

- kapalná látka → pevná látka
- skupenské teplo tuhnutí = skupenské teplo tání

Sublimace

- pevná látka → plynná látka
- L_s – skupenské teplo sublimace, teplo, které přijme pevné těleso, aby se změnilo na plyn
- l_s – měrné skupenské teplo sublimace

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

Desublimace

- plynná látka → pevná látka
- skupenské teplo desublimace = skupenské teplo sublimace

Vypařování

- kapalná látka → plynná látka
- L_v – skupenské teplo varu, teplo, které přijme kapalina, aby se změnila na plyn
- l_v – měrné skupenské teplo varu

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

- se zvyšujícím tlakem se zvyšuje teplota varu

Zkapalnění

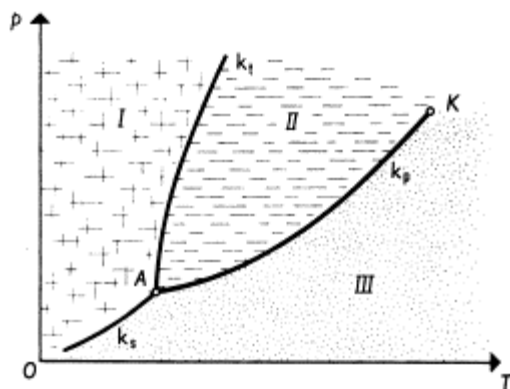
- plynná látka → kapalná látka
- skupenské teplo kondenzační = skupenské teplo varu

Sytá pára

- je v rovnovážném stavu se svou kapalinou v uzavřené nádobě
- tlak syté páry nezávisí na objemu, zvětšuje se s rostoucí teplotou
- **křivka syté páry** – graf závislosti tlaku na teplotě
- **kritická teplota** (T_k) – hustota kapaliny je rovna hustotě syté páry

Fázový diagram

- závislost tlaku a teploty, určuje skupenství látky
- **křivka syté páry** (k_p) – rovnovážné stavy kapalné a plynné látky
- **křivka tání** (k_t) – rovnovážné stavy pevné a kapalné látky
- **křivka sublimace** (k_s) – rovnovážné stavy pevné a plynné látky
- **kritický bod** (K) – znázorňuje kritický stav látky
- **trojný bod** (A) – rovnovážný stav pevné, kapalné a plynné látky
- oblast I – pevné skupenství
- oblast II – kapalné skupenství
- oblast III – plynné skupenství



Obrázek 14: Fázový diagram.

Vodní páry v atmosféře

- absolutní vlhkost vzduchu, podíl hmotnosti vodních par v určitém objemu vzduchu

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

- relativní vlhkost vzduchu, podíl absolutní vlhkosti a hustoty syté vodní páry za dané teploty

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_m} \cdot 100\%$$

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100\%$$

- p_s – tlak syté vodní páry za dané teploty

11. Mechanické kmity

- **mechanický oscilátor** = zařízení, které bez vnějšího působení kmitá kolem rovnovážné polohy
- **kmit** = periodicky se opakující část kmitavého pohybu
- **kyv** = polovina kmitu
- perioda (T) – doba kmitu
- frekvence (f) – počet kmitů za sekundu

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

Harmonický pohyb

- zvláštní případ periodického kmitavého pohybu
- grafem závislosti výchylky na čase je graf funkce sinus
- kmitavému pohybu odpovídá průmět rovnoměrného pohybu po kružnici do svislé roviny
- okamžitá výchylka:

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

- ω [rad/s] – úhlová frekvence

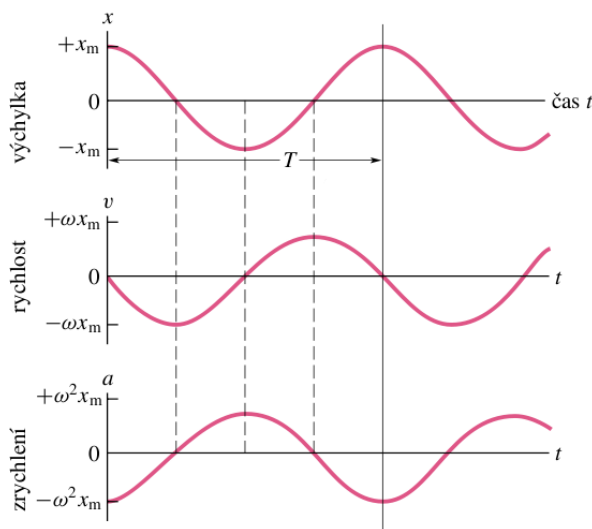
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

- okamžitá rychlost:

$$\dot{y} = v = \omega y_m \cos(\omega t) = v_m \cos(\omega t)$$

- okamžité zrychlení:

$$\ddot{y} = a = -\omega^2 y_m \sin(\omega t) = -a_m \sin(\omega t) = -\omega^2 y$$



Obrázek 15: Grafy závislostí výchylky, rychlosti a zrychlení na čase.

- když těleso není na počátku pohybu v rovnovážné poloze

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

- φ [rad] – počáteční fáze
- fázový rozdíl dvou kmitání se stejnou frekvencí

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

- $\Delta\varphi = 2k\pi$ rad – stejná fáze
- $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi$ rad – opačná fáze

Skládání kmitů

- okamžitá výchylka složeného kmitání:

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n$$

- skládáním dvou harmonických kmitů o stejné úhlové frekvenci vzniká harmonické kmitání
- když $\omega_1 = \omega_2$, skládáme kmity ve fázorovém diagramu
- když $\omega_1 \neq \omega_2$, vzniká (neizochronické) neharmonické složené kmitání
- když $\omega_1 \rightarrow \omega_2$, vznikají **rázy**
- amplituda rázů se mění s frekvencí

$$f = f_2 - f_1$$

Pohybová rovnice harmonického kmitavého pohybu

- vychází z 2. Newtonova zákona

$$F = ma = -m\omega^2 y$$

Mechanický oscilátor

- závaží na pružině

$$l = l_0 + \Delta l$$

- l_0 – délka nezátížené pružiny

$$F_p = k\Delta l$$

- k – tuhost pružiny

- po zavěšení závaží pro rovnovážnou polohu platí:

$$F_G = F_p$$

$$mg = k\Delta l$$

- uvedeme-li oscilátor do kmitavého pohybu, výsledná síla je pak

$$\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_G$$

$$F = k(\Delta l - y) - mg$$

$$F = -ky$$

- výsledná síla míří vždy do rovnovážné polohy a je příčinou kmitavého pohybu

$$-ky = -m\omega^2 y$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- úhlová frekvence závisí pouze na parametrech oscilátoru

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Matematické kyvadlo

- hmotný bod na nehmotném vlákně
- Christian Huygens – kyvadlové hodiny (1675)
- $\alpha < 5^\circ$ – úhel, který svírá vlákno se svislicí, kruhový oblouk můžeme považovat za úsečku

$$\sin \alpha = \frac{F}{F_G} = \frac{y'}{l} \doteq \frac{y}{l}$$

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

- výsledná síla míří vždy do rovnovážné polohy

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

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

- úhlová frekvence závisí pouze na délce vlákna

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Energie oscilátoru

- dochází k periodickým přeměnám kinetické energie na potenciální a zpět
- v bodech obratu je potenciální energie maximální a kinetická energie nulová
- potenciální energie pružiny = práce, která se musí vykonat, aby se natáhla

$$E_p = \frac{1}{2}ky^2$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

- celková energie je součtem potenciální a kinetické energie

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2}ky^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$E = \frac{1}{2}ky_m^2 = \frac{1}{2}mv_m^2$$

Tlumené kmitání

- odpor prostředí utlumuje kmitý
- reálné kmitání je vždy tlumené
- tlumení snižuje amplitudu a zvětšuje periodu kmitání
- maximální amplituda klesá exponenciálně

Nucené kmitání

- vnější síla vyvolává kmitavý pohyb
- nahrazováním ztrát energie vzniká netlumené kmitání
- lze rozkmitat i tělesa, která nejsou za normálních podmínek oscilátory
- vnější síla se musí harmonicky měnit s časem

$$F = F_m \sin(\omega t)$$

- oscilátor kmitá s frekvencí vnějšího působení
- vlastnosti oscilátoru neovlivňují frekvenci, ale amplitudu ano
- **nezachovává se energie**

Rezonance

- **rezonanční křivka** – rezonance je maximální, když frekvence nucených kmitů je shodná s frekvencí vlastního kmitání oscilátoru, dochází k rezonanci

$$f \approx f_0$$

- **rezační zesílení** – největší hodnoty dosahují nucené kmity s rezonanční frekvencí
- využití: hudební nástroje, reproduktory, točivé stroje – nežádoucí → tlumiče
- oscilátor + rezonátor – kmitání rezonátoru tlumí kmity oscilátoru a naopak (přenos energie)
- těsná, nebo volná vazba – podle toho, jak rychle se přenáší energie

12. Vlnění a akustika

Mechanické vlnění

- např. vlny na vodě, zvuk
- vzruch se šíří od zdroje kmitání **pružným prostředím**
- nepřenáší se hmota, ale energie ano
- **postupné vlnění** = vlnění, které se dál šíří prostředím, nikde se neodráží
 - * **příčné** – jednotlivé body kmitají kolmo na směr šíření vlny (vlny na vodě)
 - * **podélné** – jednotlivé body kmitají ve směru šíření vlny (zvuk, obilí ve větru)

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

- λ – vlnová délka, vzdálenost, kterou vlnění urazí za periodu, vzdálenost dvou bodů, které kmitají ve fázi
- v – fázová rychlost, rychlost šíření vlnění

Rovnice postupného vlnění

- každý bod kmitá se stejnou periodou jako zdroj, mají jinou fázi

$$y_Z = y_m \sin(\omega t)$$

$$y = y_m \sin[\omega(t - \tau)]$$

$$\tau = \frac{x}{v}$$

- τ – zpoždění

$$y = y_m \sin[\omega(t - \frac{x}{v})]$$

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

- **rovnice postupného vlnění** – výchylka bodu vzdáleného x od zdroje

$$y = y_m \sin[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})]$$

- φ – fáze vlnění

$$\varphi = 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})$$

Interference

- skládání (když mají stejnou frekvenci, tak ve fázorovém diagramu)

$$y_1 = y_{m1} \sin[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda})]$$

$$y_2 = y_{m2} \sin[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda})]$$

- **fázový rozdíl** – rozdíl fází dvou vlnění

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}) - 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}) = 2\pi\frac{x_1 - x_2}{\lambda} = 2\pi\frac{d}{\lambda}$$

- d – vzdálenost zdrojů vlnění

- maximální = **konstruktivní**: $\Delta\varphi = 2k\pi$

$$2\pi \frac{d}{\lambda} = 2k\pi$$

$$d = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2}$$

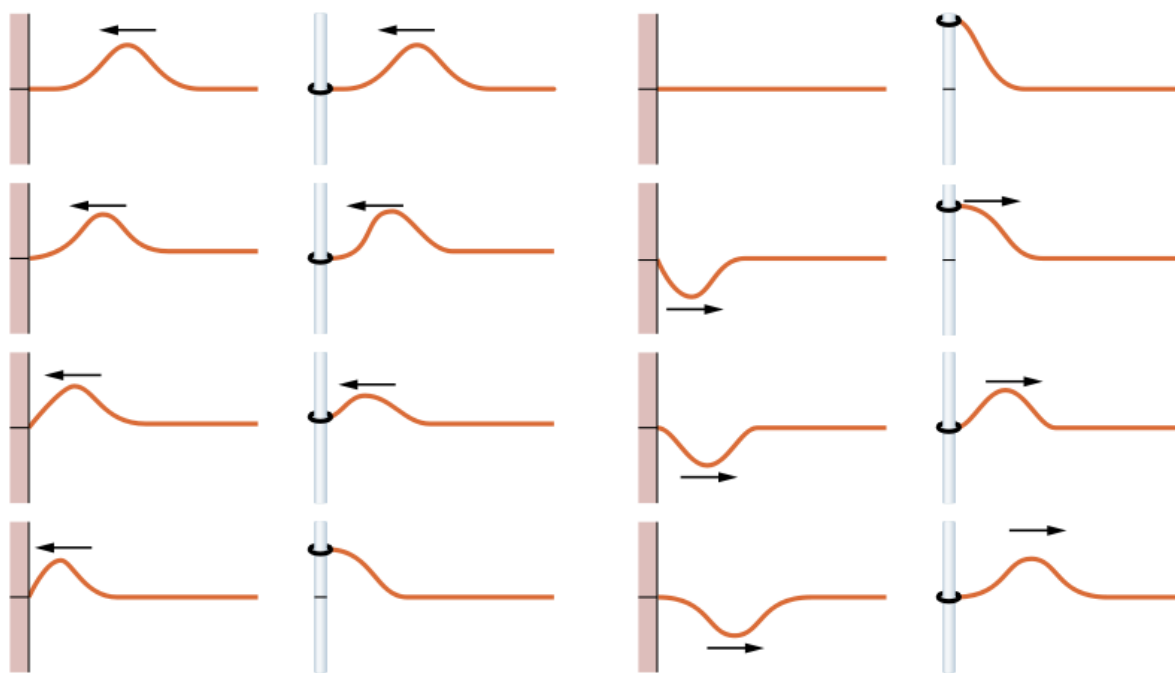
- minimální = **destruktivní**: $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi$

$$2\pi \frac{d}{\lambda} = (2k + 1)\pi$$

$$d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Odraz vlnění

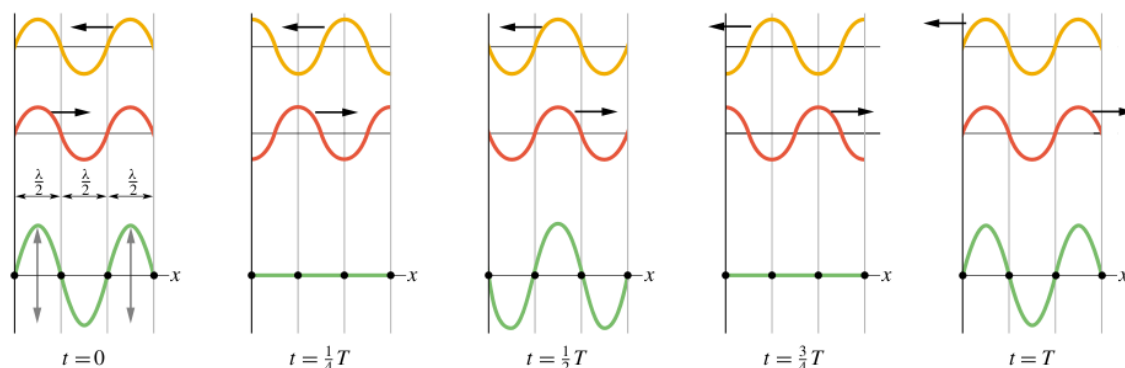
- na okraji pružného prostředí se vlnění odrazí
- **pevný konec** – opačná fáze
- **volný konec** – stejná fáze



Obrázek 16: Odraz vlnění na pevném a na volném konci.

Stojaté vlnění

- interferencí přímého a stojatého vlnění vzniká stojaté vlnění
- **kmitny** = body kmitající s největší amplitudou, vzdálené od sebe $\frac{\lambda}{2}$
- **uzly** = body, které jsou neustále v klidu, vzdálené od sebe $\frac{\lambda}{2}$
- vzdálenost kmiten a uzlů je $\frac{\lambda}{4}$
- **nepřenáší se energie** – pouze se periodicky mění potenciální energie pružnosti v kinetickou energii hmotných bodů



Obrázek 17: Vznik stojatého vlnění.

Chvění mechanických soustav

- pružná tělesa
- dva upevněné konce – uzly (struna)

$$l = k \frac{\lambda}{2}$$

$$f_k = k f_z$$

- f_z – základní frekvence

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

- f_k – vyšší harmonické frekvence
- upevnění uprostřed (tyč) – kmitny na koncích, vzniká pouze při lichých násobcích základní frekvence

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

$$f_k = (k+1)f_z$$

- jeden upevněný konec – liché násobky základní frekvence

$$f_z = \frac{v}{4l}$$

$$f_k = (k+1)f_z$$

- při chvění pružných desek vznikají **Chladniho obrazce**

Vlnění v izotropním prostředí

- homogenní prostředí – stejnorodé, ve všech místech má stejné vlastnosti
- **izotropní prostředí** – stejné vlastnosti ve všech směrech
- **vlnoplocha** = spojnice bodů, které mají stejnou fázi (soustředné kružnice okolo bodového zdroje – v rovině)
- Huygensův princip

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.

Zákon odrazu

Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α :

$$\alpha = \alpha'$$

Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Snellův zákon lomu

- odvození z Huygensova principu

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

- při přechodu z prostředí s větší rychlostí vlnění – lom ke kolmici
- při přechodu z prostředí s menší rychlostí vlnění – lom od kolmice
- lomený paprsek zůstává v rovině dopadu
- **totální reflexe** = úplný odraz – při lomu od kolmice, všechny paprsky se odráží

$$\sin \alpha_m = \frac{v_1}{v_2}$$

- α_m – mezní úhel ($\beta = 90^\circ$)
- využití: optické vlákno, endoskop

Ohyb vlnění

- difrakce
- vlnění se šíří i za překážkou, podstatou je Huygensův princip
- ohyb je tím výraznější, čím větší je vlnová délka
- zvuk ($\lambda = 10^{-1}$ m) – slyšíme i za překážkou
- světlo ($\lambda = 10^{-7}$ m) – za překážkou vzniká stín

Akustika

- zabývá se zvukem
- **zvuk** = podélné mechanické vlnění, vzniká při chvění pružných těles

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

- $v \doteq 340$ m/s $\doteq 1200$ km/h = 1 mach – rychlost zvuku, je závislá na teplotě okolí (ve stupních Celsia)

$$v_t = (331 + 0,61 \cdot \{t\})$$

- **infrazvuk** ($f < 16$ Hz), **ultrazvuk** ($f > 16$ kHz), lidské ucho vnímá 6 Hz – 16 kHz
- periodické zvuky = hudební zvuky, pokud mají harmonický průběh – jednoduché tóny, jinak – složené tóny
- čím delší vlnová délka, tím hlubší tón

Hlasitost a intenzita zvuku

- hlasitost je subjektivní a závisí na citlivosti sluchu (největší pro frekvence 700 Hz – 6 kHz)

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

- I – intenzita zvuku
- $I_0 = 10^{-12}$ W/m² – práh slyšení
- $I_B = 1$ W/m² – práh bolesti
- velký rozsah, proto je vhodné použít logaritmickou stupnici

$$L_\omega = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- L_ω – hlasitost zvuku
- $L_{\omega 0} = 0$ dB – práh slyšení
- $L_{\omega B} = 120$ dB – práh bolesti

Ultrazvuk

- frekvence nad 16 kHz
- méně pohlcován materiálem, dobře se odráží (méně ovlivněno ohybem)
- využití: gynekologie, defektoskopie, čištění, netopýři, delfini

Infrazvuk

- frekvence pod 16 Hz
- dobře se šíří ve vodě
- využití: velryby, ryby, medúzy

Dopplerův jev

- vzniká při pohybu zdroje (Z), nebo pozorovatele (P) (posluchače) vlnění
- platí pro podzvukové rychlosti
- využití: radary

1. Z v klidu, P se přibližuje rychlostí $u \rightarrow$ vyšší tón

$$f_Z = \frac{v}{\lambda}$$

$$f_P = \frac{v+u}{\lambda} = \frac{v+u}{v} f_Z = \left(1 + \frac{u}{v}\right) f_Z > f_Z$$

2. Z v klidu, P se vzdaluje rychlostí $u \rightarrow$ nižší tón

$$f_Z = \frac{v}{\lambda}$$

$$f_P = \frac{v-u}{\lambda} = \frac{v-u}{v} f_Z = \left(1 - \frac{u}{v}\right) f_Z < f_Z$$

3. P v klidu, Z se přibližuje rychlostí $u \rightarrow$ vyšší tón

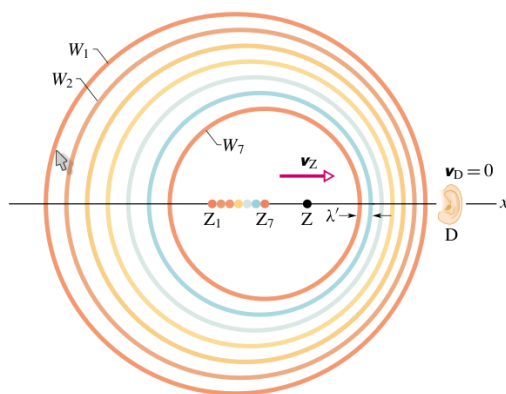
$$\lambda = \frac{v-u}{f_Z}$$

$$f_P = \frac{v}{v-u} f_Z > f_Z$$

4. P v klidu, Z se vzdaluje rychlostí $u \rightarrow$ nižší tón

$$\lambda = \frac{v+u}{f_Z}$$

$$f_P = \frac{v}{v+u} f_Z < f_Z$$



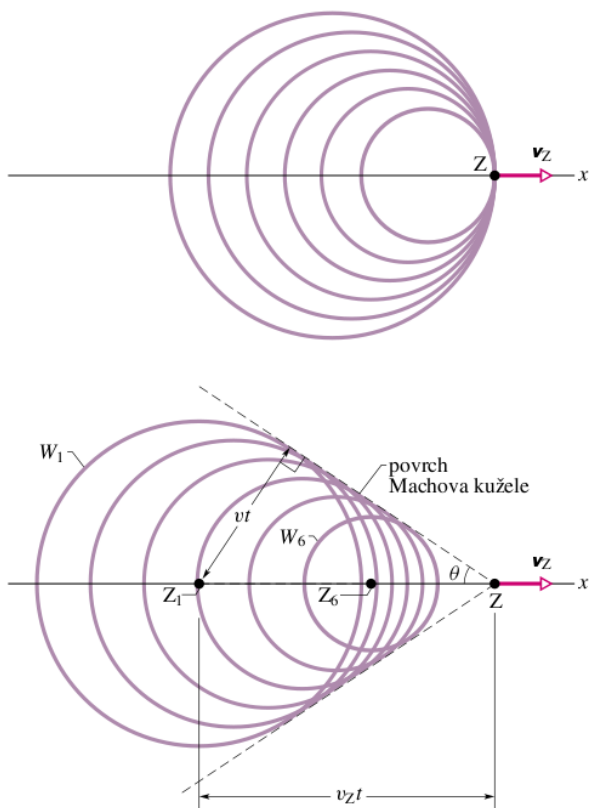
Obrázek 18: Dopplerův jev pro přibližující se zdroj.

Rázová vlna

- při nadzvukových rychlostech se za zdrojem vlnění tvoří rázová vlna a vytváří **Machův kužel**

$$\sin \theta = \frac{vt}{v_Z t} = \frac{v}{v_Z}$$

- θ – Machův úhel
- $\frac{v}{v_Z}$ – Machovo číslo, udává, kolikrát se pohybuje zdroj rychleji než zvuk



Obrázek 19: Rázová vlna vznikající při nadzvukové rychlosti zdroje vlnění.

13. Elektrostatika

Elektický náboj

- ”elektrón” – jantar
- elektrický náboj je kvantovaný (kladný \times záporný)
- **elementární náboj** (e) – kladný náboj protonu, nebo záporný náboj elektronu

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$$

- $C = A \cdot s$
- zákon zachování elektrického náboje: *Celkový elektrický náboj se v izolované soustavě nemění.*
- **izolanty** – elektrony pevně vázané na atomy
- **vodiče** – elektrony pohyblivé (elektronový plyn v kovech)

Coulombův zákon

- **bodové náboje** – rozměry zeletizovaných těles jsou zanedbatelné ve srovnání s jejich vzdálenostmi

Velikost sil, kterými na sebe působí dva bodové náboje, je přímo úměrná absolutní hodnotě součinu jejich velikostí a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdáleností:

$$F_e = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$$

Náboje stejného znaménka se odpuzují. Náboje opačného znaménka se přitahují.

- $k \doteq 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ – konstanta úměrnosti

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$ – permitivita vakua
- $\epsilon_r \geq 1$ – relativní permitivita
- dielektrikum – izolující látkové prostředí

Intenzita

- radiální elektrické pole = pole kolem bodového elektrického náboje

$$E = \frac{F_e}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2}$$

- směr intenzity je stejný jako směr síly působící v daném bodě na kladný náboj
- **síločáry** = myšlené čáry, jejichž tečny v každém bodě mají směr intenzity
- homogenní elektrické pole – vektor intenzity má všude stejný směr a velikost (např. mezi nabitými deskami)

Potenciál

- práce potřebná k přenesení elementárního náboje z daného místa do místa s nulovým potenciálem (nekonečno, nebo místo vodivě spojené se zemí)
- práce v homogenním elektrickém poli:

$$W = F_e d = Eqd$$

- napětí:

$$U = \frac{W}{Q} = Ed$$

- napětí mezi dvěma body je rozdíl potenciálů:

$$U_{AB} = \frac{E_{pA}}{q} - \frac{E_{pB}}{q} = \varphi_A - \varphi_B$$

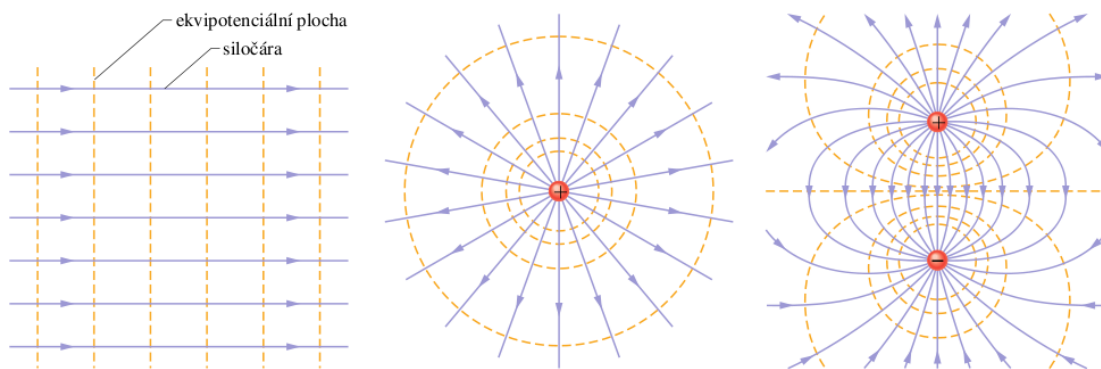
- potenciál:

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

- potenciál v radiálním poli:

$$\varphi = \frac{E_p}{q} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Qq}{r}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r}$$

- ekvipotenciální hladiny = hladiny se stejným potenciálem



Obrázek 20: Elektrické pole.

Pole kolem nabitě vodivé koule

- plošná hustota náboje:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S} = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

- u nepravidelných těles se náboj soustřeďuje na hrotech, hranách a výčnělcích
- v okolí nabitě koule o poloměru R vzniká stejné radiální pole, jako kdyby byl náboj soustředěný v jejím středu
- velikost intenzity vně koule:

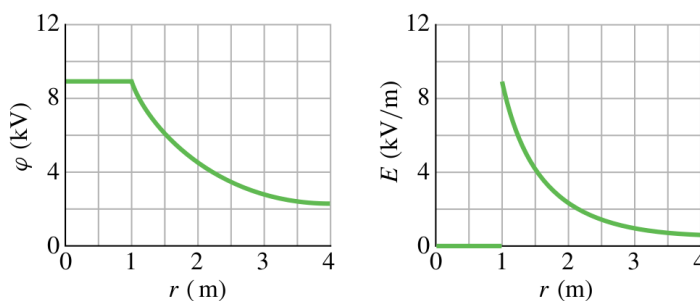
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2}$$

- intenzita uvnitř koule je nulová, potenciál je proto stejný jako na povrchu:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{R}$$

- intenzita na povrchu koule:

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



Obrázek 21: Potenciál a intenzita elektrického pole v okolí nabité koule.

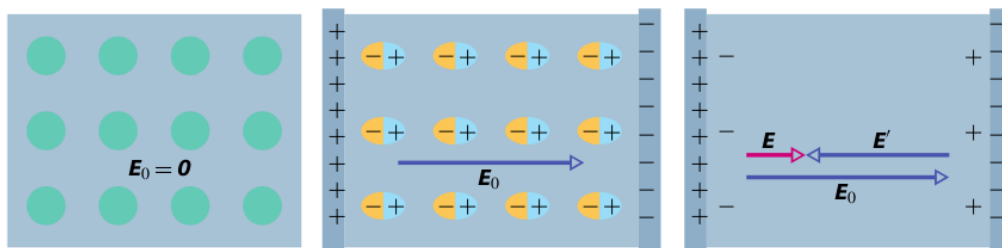
Vodiče v elektrickém poli

- když vložíme kovový vodič do elektrického pole, vznikne dočasně elektrické pole i uvnitř vodiče
- způsobí pohyb volných elektronů k povrchu vodiče, kde siločáry vstupují do vodiče
- [elektrostatická indukce](#)
- indukované náboje od sebe můžeme oddělit rozdělením vodiče

Izolanty v elektrickém poli

- izolanty = dielektrika
- z atomů a molekul se stávají elektrické dipóly → [atomová polarizace dielektrika](#)
- dipóly se usměrňují → [orientační polarizace dielektrika](#)
- na povrchu vzniká tenká vrstva kladných/záporných nábojů, nelze je ale oddělit
- vytváří vnitřní elektrické pole s intenzitou E' namířenou proti intenzitě vnějšího pole E_0
- relativní permitivita dielektrika:

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E}$$



Obrázek 22: Polarizace dielektrika vnějším elektrickým polem.

Kapacita kondenzátoru

- připojíme-li osamocený vodič ke zdroji napětí, získá stejný potenciál
- napětí je přímo úměrné potenciálu

$$Q = C\varphi$$

- C [F] – kapacita vodiče
- kapacita kulového vodiče:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R$$

- kapacita deskového kondenzátoru bez dielektrika:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$$

$$Q = \frac{\epsilon_0 S}{d} U$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

- kapacita deskového kondenzátoru s dielektrikem:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \epsilon_r C_0$$

Spojování kondenzátorů

- paralelní zapojení:

$$Q = Q_1 + Q_2 = UC_1 + UC_2 = U(C_1 + C_2) = UC$$

$$C = C_1 + C_2$$

- sériové zapojení:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) = \frac{Q}{C}$$

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

Energie kondenzátoru

- při nabíjení a vybíjení kondenzátoru se koná práce
- nabitý kondenzátor má energii:

$$W = E_C = \frac{1}{2} UQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CU^2$$

- aplikace: blesk do foťáku, blesk, defibrilátor, ...

14. Elektrický proud v kovech

Vznik elektrického proudu

- zdroj napětí se připojí k vodiči, vybíjení a nabíjení kondenzátoru
- **elektrický proud** – uspořádaný pohyb volných elektricky nabitých částic
- směr proudu: $+$ \rightarrow $-$ (dohoda)
- v kovech přenáší náboj volné elektrony, v elektrolytech ionty, ...

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

- okamžitá hodnota proudu:

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

- měří se ampérmetrem
- trvalý elektrický proud – stálý rozdíl potenciálů mezi svorkami zdroje (svorkové napětí)

Elektrický zdroj

- vnější část obvodu spotřebovává práci:

$$W = UQ$$

- uvnitř zdroje konají práci neelektrické síly (mechanické, chemické, ...):

$$W_Z = U_e Q$$

- U_e – elektromotorické napětí zdroje
- U_0 – svorkové napětí nezatíženého zdroje, napětí naprázdno

$$U_0 = U_e$$

- práce neelektrostatických sil se částečně spotřebuje uvnitř zdroje

$$W = UQ < W_Z = U_e Q$$

- svorkové napětí nezatíženého zdroje je menší než elektromotorické napětí

$$U < U_e$$

Ohmův zákon

- graf závislosti proudu na napětí = **voltampérová charakteristika**
- když se nemění teplota:

Proud je přímo úměrný napětí.

$$U = IR$$

- R [Ω] – elektrický odpor

$$I = GU$$

- G [S] – elektrická vodivost

Odpor vodiče

- odpor závisí na délce, průměru a teplotě

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

- ρ [Ωm] – měrný elektrický odpor
- s rostoucí teplotou vodiče, roste jeho odpor

$$R = R_1(1 + \alpha\Delta T)$$

- α – teplotní součinitel elektrického odporu

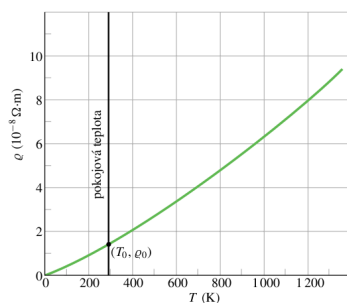
Elektrický proud v kovovém vodiči

- elektrony slabě vázané v atomech – elektronový plyn

$$\Delta Q = Sv\Delta t N_V e$$

$$I = SvN_V e$$

- při teplotách blízkých absolutní nule nastává supravodivost (odpor je neměřitelný)



Obrázek 23: Závislost odporu měděného vodiče na teplotě.

Spojování rezistorů

- sériové zapojení:

$$U = U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) = UR$$

$$R = R_1 + R_2$$

- paralelní zapojení:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{U}{R}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

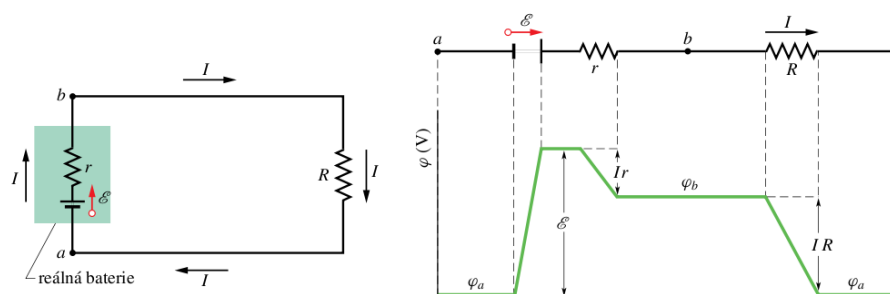
Ohmův zákon pro uzavřený obvod

- **ideální zdroj** = zdroj s konstantním napětím U , nezávislým na proudu
- reálný zdroj má vnitřní odpor
- chová se jako ideální zdroj a sériově zapojený rezistor o odporu R_i (vnitřní odpor)

$$U_e = U + IR_i$$

- **zatěžovací charakteristika zdroje** = závislost svorkového napětí na odebíraném proudu
- zkratový proud (napětí je nulové):

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



Obrázek 24: Reálný zdroj lze nahradit ideálním zdrojem a sériově připojeným vnitřním odporem R_i .

Elektrické zdroje

Galvanický článek

- chemická reakce vodivých elektrod s vodivou kapalinou (elektrolytem)
- jednoduchý galvanický článek = 2 různé plechy (Cu + Zn) v bramboře/citrónu/...

Fotoelektrický článek (fotočlánek)

- využití energie světla dopadajícího na destičku polovodiče
- sluneční baterie v kalkulačkách, umělé družice

Termoelektrický článek

- spojením dvou různých kovových vodičů do uzavřeného obvodu přejde část elektronů z jednoho do druhého
- vzniká malé kontaktní napětí závislé na teplotě
- v obvodu jsou dva, pokud jeden zahřejeme, obvodem prochází proud

Kirchhoffovy zákony

- řešení složitějších elektrických sítí
- **uzel** = místo spojení nejméně tří vodičů
- **větev** = vodivé spojení dvou uzlů
- nejdříve zvolíme směr proudu ve větvích a pak sestavíme rovnice vyplývající z KZ

1. Kirchhoffův zákon

- důsledek zákona zachování náboje

Algebraický součet proudů v uzlu je nulový.

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$$

2. Kirchhoffův zákon

- celkový součet změn potenciálu v uzavřené smyčce je nulový

Součet úbytku napětí na rezistorech je v uzavřené smyčce stejný jako součet elektromotorických napětí zdrojů.

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 + \dots + R_n I_n = U_{e1} + U_{e2} + \dots + U_{en}$$

Práce a výkon stejnosměrného proudu

- při přenášení náboje se koná práce:

$$W = UQ$$

- pokud je proud konstantní:

$$Q = It$$

$$W = UIt = RI^2t = \frac{U^2}{R}t$$

- **Joule–Lenzův zákon**: když nedochází k jiným přeměnám energie, celková práce se přemění na Jouleovo teplo

$$W = Q_J$$

$$UIt = cm\Delta T$$

- výkon elektrického proudu P [W]:

$$P = \frac{W}{t} = UI$$

- účinnost:

$$\eta = \frac{W}{W_Z} = \frac{U}{U_e} = \frac{R}{R + R_i}$$

- výkon je maximální, když proud má poloviční velikost jako zkratový proud

$$P = UI = (U_e - R_i I)I = U_e I - R_i I^2$$

$$P' = U_e - 2R_i I = 0$$

$$I = \frac{U_e}{2R_i} = \frac{I_k}{2}$$

- odpor musí mít velikost vnitřního odporu zdroje

$$\frac{U_e}{R + R_i} = \frac{U_e}{2R_i}$$

$$R = R_i$$

- velikost maximálního výkonu:

$$P_{max} = R_i \left(\frac{U_e}{2R_i} \right)^2 = \frac{U_e^2}{4R_i}$$

- účinnost je 50%

15. Elektrický proud v polovodičích

- větší měrný elektrický odpor než kovy, menší než izolanty
- elektrické vlastnosti výrazně závisí na teplotě, dopadajícím záření a nebo příměsích
- polokovy, nejčastěji křemík (Si)
- **termistor** – teplotně závislý rezistor, regulace teploty, stabilizace elektrických obvodů
- **fotorezistor** – odpor závislý na osvětlení, regulace osvětlení

Vlastní vodivost

- vyvolaná tepelným pohybem a nebo zářením
- tepelným pohybem dochází k přerušení vazeb
- **generace** – vznik páru "elektron – díra"
- **rekombinace** – zánik páru "elektron – díra"
- díry a elektrony se pohybují – elektrony přeskakují na prázdná místa
- připojíme-li polovodič ke zdroji napětí – uspořádaný pohyb (díry $\rightarrow -$, elektrony $\rightarrow +$)
- **vnitřní fotoelektrický jev** = dopadající záření vyrazí elektron
- v čistém polovodiči: hustota děr = hustota elektronů
- roste s rostoucí teplotou \rightarrow zmenšuje se odpor

Příměsová vodivost

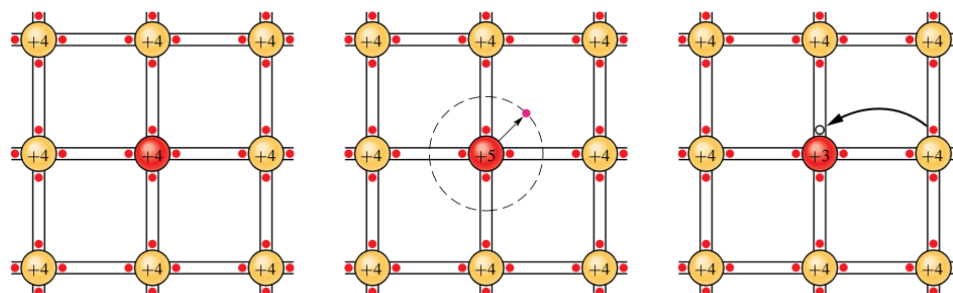
- vodivost výrazně ovlivní i nepatrné množství příměsí
- cizími atomy nahradíme atomy čistého krystalu bez narušení krystalové vazby

Polovodič typu N

- Si + pětímocný prvek (P, As, Sb) – kladné donory
- převládá elektronová vodivost
- nositelem náboje jsou negativní částice

Polovodič typu P

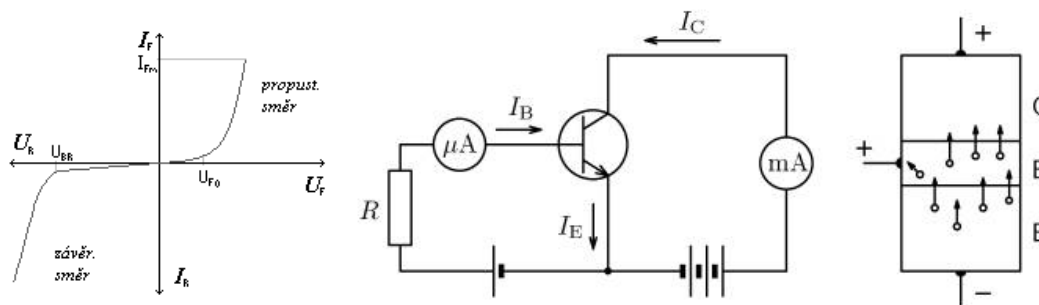
- Si + třímocný prvek (B, Al, Ga, In) – záporné akceptory
- převládá děrová vodivost
- nositelem náboje jsou pozitivní částice



Obrázek 25: Krystalová mřížka křemíku narušená pětímocným a třímocným prvkem.

Polovodičová dioda

- jeden PN přechod
- anoda u polovodiče typu P, katoda u polovodiče typu N
- **diodový jev** = závislost vodivosti na polaritě připojeného napětí
- propustný směr $P \rightarrow N$, nepropustný (závěrný) směr $N \rightarrow P$
- na rozhraní díry a elektrony rekombinují, převládá působení nepohyblivých iontů
- vzniká **hradlová vrstva** silná $1 - 10 \mu\text{m}$
- záporný náboj v P a kladný v N brání dalšímu pronikání náboje
- propustný směr – elektrické pole potlačí pole hradlové vrstvy \rightarrow prochází proud
- závěrný směr – elektrické pole zvětší hradlovou vrstvu \rightarrow neprochází proud
- U_{F0} – prahové napětí, protékající proud začíná exponenciálně růst
- U_{BR} – průrazné napětí, prudký růst proudu zničí diodu
- I_m – maximální proud při trvalém zatížení
- Zenerova dioda – po překročení průrazného napětí může procházet proud
- U_Z – Zenerovo napětí



Obrázek 26: Voltampérové charakteristika diody a zapojení tranzistoru.

Tranzistor

- dva PN přechody – NPN (PNP)
- kolektor (C) + báze (B) + emitor (E)

$$C > E > B$$

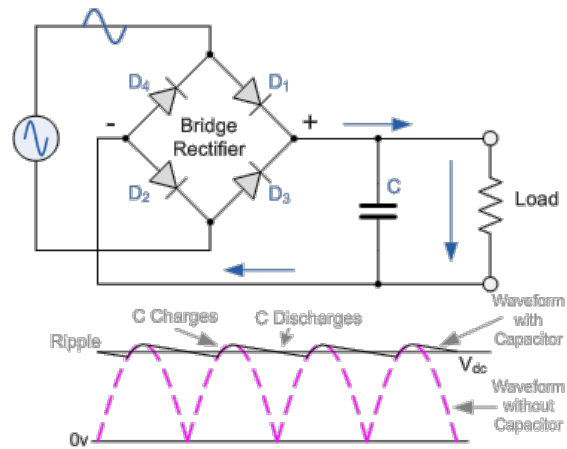
- **tranzistorový jev** = malé napětí vzbuzuje v obvodu B proud, který je přič. mnohem většího proudu v obvodu C
- přechod z báze do emitoru je propustný – proud teče
- když není připojené bázevé napětí, proud neteče, protože NP přechod je závěrný
- pohyb elektronů až do N a na rozhraní rekombinují s dírami
- B má malý objem (málo děr) – e^- nemohou rekombinovat a jsou přitaženy do C silným kladným potenciálem
- začne procházet elektronový proud

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

- β – proudový zesilovací činitel (při konstantním napětí v obvodu kolektoru)

Polovodičový usměrňovač

- jednocestný usměrňovač – dioda v obvodu
- dvoucestný usměrňovač – Grätzovo zapojení diod
- omezení pulsace napětí – paralelní připojení kondenzátoru



Obrázek 27: Grätzovo zapojení diod.

16. Elektrický proud v kapalinách, plynech a vakuu

Elektrolýza

- destilovaná voda nevede proud, protože nemá žádné nosiče elektronů
- **elektrolyt** – kapalná látka, která vede elektrický proud
- ve vodě rozpustím $NaCl \rightarrow$ elektrolytická disociace na ionty $Na^+ + Cl^-$
- galvanické pokovování, leptání, elektrometalurgie
- pokovování mědí:

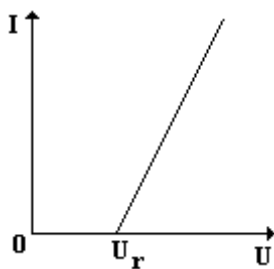
- * elektrolyt – síran měďnatý



- * Cu^{2+} ke katodě (C) – přijme $2 e^-$ a vyloučí se na katodě
- * SO_4^{2-} k anodě (Cu) – sloučí se s Cu z anody a rozpustí se
- * anoda se rozpouští a katoda se pokovuje
- * koncentrace roztoku roste konstantně
- odpor elektrolytu klesá s teplotou

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

- l – vzdálenost anody a katody



Obrázek 28: Voltampérová charakteristika elektrolytu.

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

- U_r – rozkladné napětí, poté proud lineárně roste s napětím
- při ponoření elektrod do elektrolytu vzniká elektrická dvojvrstva – **polarizace elektrod**
- aby procházel proud musí se překonat polarizační napětí

Hofmannův přístroj

- elektrody – platina
- elektrolyt – zředěná kyselina sírová



- $2H^+$ ke katodě – přijmou $2 e^-$ a vyloučí se na katodě
- SO_4^{2-} k anodě – odevzdá $2 e^-$ a vyloučí se kyslík



- koncentrace roztoku se zvyšuje, množství vody klesá

Faradayovy zákony

- na katodě se vždy vylučuje vodík, nebo kov

$$N = \frac{Q}{eZ}$$

- Z – počet elektronů potřebných k uvolnění jednoho atomu

$$m_0 = \frac{M_m}{N_A}$$

$$m = Nm_0 = \frac{M_m}{N_A e Z} Q$$

1. Faradayův zákon

Hmotnost vyloučené látky je přímo úměrná náboji, který prošel elektrolytem.

$$m = AQ = AIt$$

- A – elektrochemický ekvivalent látky

2. Faradayův zákon

Elektrolytický ekvivalent látky vypočteme, jestliže její molární hmotnost vydělíme Faradayovou konstantou a počtem elektronů potřebných k vyloučení jedné molekuly.

$$A = \frac{M_m}{FZ}$$

Látková množství různých látek vyloučených při elektrolýze týmž nábojem jsou chemicky ekvivalentní.

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

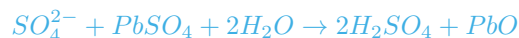
- mohou se navzájem nahradit v chemické součenině nebo se mohou beze zbytku sloučit
- $F = N_A e = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$ – Faradyova konstanta

Suchý článek

- galvanický článek
- elektrody – zinková nádobka a uhlíková tyčinka obklopená směsí burelu (MnO_2) a koks
- elektrolyt – roztok salmiaku (NH_4Cl) zahustěný škrobem
- připojíme-li proud, Zi se rozpouští, na katodě vzniká vodík a s burelem reaguje za vzniku vody
- zabraňuje se polarizaci elektrody
- nevratný proces
- $U_e = 1,5 \text{ V}$

Akumulátor

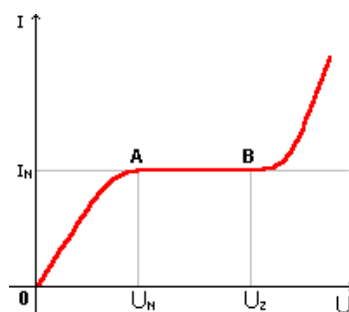
- galvanický článek založený na polarizaci elektrod
- nejrozšířenější je olověný, používaný v automobilech
- elektrody – olovené
- elektrolyt – roztok kyseliny sírové
- na elektrodách se po ponoření do kyseliny vytvoří slabá vrstva $PbSO_4$
- při nabíjení vzniká na katodě olovo a na anodě oxid olovnatý



- když se spotřebuje síran olovnatý, vylučuje se na katodě vodík a na anodě kyslík
- poté proces obrátíme
- $U_e = 2 \text{ V}$
- v praxi se sériově zapojují, aby měly větší napětí
- **kapacita akumulátoru** [A·h] – celkový náboj, který může akumulátor vydat při vybíjení

Výboj v plynech

- plyn je za normálních podmínek dobrý izolant
- musí vzniknout volné nosiče náboje – elektrony, ionty
- **ionizace** – vyražení valenčního elektronu z atomu = generace
- ionizátor – plamen, UV záření, rentgen, radioaktivní záření
- proud v plynu = **výboj**
- **nesamostatný výboj** – když ionizátor přestane působit, proud přestane procházet



Obrázek 29: Voltampérová charakteristika plynu.

- I_N – oblast nasycení
- U_Z – zápalné napětí
- **oblast nasycení** – ionizátor uvolní konečný počet iontů a elektronů → přenesou vlastní náboj
- ionty a elektrony jsou napětím urychlovány
- při zvětšování napětí se elektrony urychlí natolik, že při nárazu na molekulu vyvolají novou ionizaci
- **samostatný výboj** – probíhá nezávisle na vnějším ionizátoru
- **plazma** = vysoce ionizovaný plyn při samostatném výboji

Samostatný výboj v plynu

Obloukový výboj

- dvě uhlíkové elektrody se zahřejí dotykem a pak oddálí
- vysoká teplota způsobí ionizaci vzduchu, vede k nesamostatnému výboji, který vyvolá samostatný výboj
- velký proud, relativně malé napětí
- lampy (vysokotlaké), obloukové sváření

Jiskrový výboj

- krátká doba trvání
- vysoké napětí, velký proud
- lavinová ionizace způsobená intenzitou pole mezi elektrodami
- zdroj není schopen trvale dodávat proud
- doprovázen zvukovou vlnou (praskání až ohlušující rána)
- blesk – vyrovnává napětí mezi dvěma mraky nebo mrakem a zemí (10^9 V, 10^5 A)

Koróna

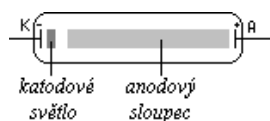
- trsovitý výboj v nehomogenním elektrickém poli okolo drátů, hran a hrotů
- intenzita je dostatečná jen v nejbližším okolí
- způsobuje ztráty na vedení vysokého napětí za zvýšené vlhkosti

Doutnavý výboj

- probíhá za sníženého tlaku ve výbojové trubici
- nízká teplota elektrod, malý proud
- **katodové doutnavé světlo**, **anodový sloupec**
- kontrolní světla

Výbojová trubice

- uvnitř zředěný plyn – snížený tlak
- zvětší se střední volná dráha elektronu – má čas dostatečně se urychlit
- samostatný výboj, lavinová ionizace
- **Ruhmkorffův induktor** = zdroj vysokonapěťových stejnosměrných impulsů s vysokou frekvencí
- nejdříve doutnavý výboj u katody a anodový sloupec
- snižujeme-li tlak (100 Pa), rozšiřuje se anodový sloupec
- nakonec svítí nádoba (UV + RTG) – převládlo katodové záření (1 Pa)
- elektrony vylétávají z katody a dopadají na stěny nádoby



Obrázek 30: Výbojová trubice.

Katodové a kanálové záření

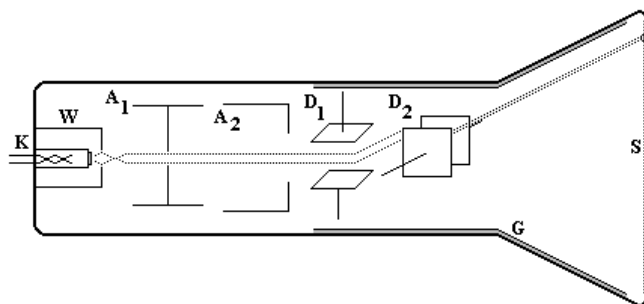
Katodové

- proud elektronů
- prochází otvorem v anodě
- tepelné účinky – nárazem do anody ji zahřívá
- elektrony dopadající na stěny skleněné trubice se brzdí a vyzařují světlo (UV \times RTG podle rychlosti elektronů)
- elektrony dopadající na polovodič zvětšují oblastní vodivost
- vedlo k objevu a zkoumání elektronů

Kanálové

- proud kladných iontů vznikajících v plynu ionizací
- otvor v katodě = kanál
- tepelné účinky
- fotografický materiál
- můžu ho vychýlit elektrickou a magnetickou silou
- umožnilo studium prvků, zjištění hmotnosti atomů, objev izotopů

Obrazová elektronka

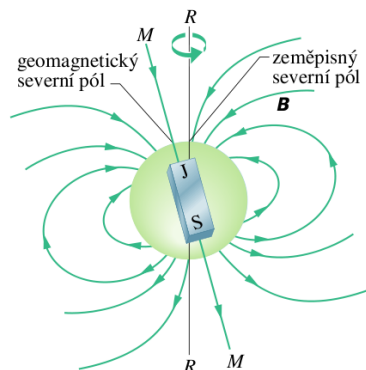


Obrázek 31: Schéma obrazové elektronky.

- K – rozžhavená katoda uvolňuje elektrony tepelnou emisí
- W = Wehnerův válec – mylým otvorem v řídicí elektrodě prochází elektrony
- A_1, A_2 – anody urychlují elektrony
- D_1, D_2 – vychylovací destičky určí místo dopadu
- S – elektrony dopadají na stínítko a vznikne svízící stopa
- dlouhé – elektrony se musí dostatečně urychlit
- zakřivené – všechny elektrony musí urazit stejnou dráhu
- v TV jsou místo vychylovacích destiček cívký
- osciloskop – časový průběh napětí
- tlak 10^{-4} Pa – skoro vakuum

17. Stacionární magnetické pole

- stacionární = neměnné v čase
- kompas ukazuje jižní magnetický pól na severu
- trvalé magnety kolem sebe vytvářejí magnetické pole působící na *Fe, Co, Ni*
- neexistuje magnetický monopol (vždy sever (N) a jih (S))
- **magnetické indukční čáry** = myšlené čáry ukazující směr působení síly na magnetu, orientované od N k S, uzavřené
- **pole** = forma hmoty, která zprostředkovává silové působení mezi zdrojem a tělesem, na které působí, popisuje silové působení magnetu v prostoru, vírové



Obrázek 32: Osa zemského magnetického dipólu svírá s osou rotace Země 11°.

Magnetické pole vodiče s proudem

- když vodičem prochází proud stává se magnetem (H. Ch. Ørsted – 1820)
- magnetické indukční čáry tvoří soustředné kruhy, resp. válce
- **Ampérovo pravidlo pravé ruky**

Naznačíme-li uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu, prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.

- homogenní magnetické pole – rovnoběžné indukční čáry
- pro magnetickou indukci (B [T]) v okolí nekonečně dlouhého s nekonečně tenkého vodiče platí:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi d}$$

- d – kolmá vzdálenost od vodiče
- μ – permeabilita prostředí

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ – permeabilita vakua
- μ_r – relativní permeabilita prostředí

Vodič v magnetickém poli

- na vodič v magnetickém poli působí magnetická síla
- je dána vtahem (**Ampérův zákon**):

$$\vec{F}_m = l(\vec{I} \times \vec{B})$$

- (vektorový součin)

$$F_m = I B \sin \alpha$$

- Flemingovo pravidlo levé ruky

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

Vzájemné silové působení dvou rovnoběžných vodičů

- pokud je proud souhlasně orientovaný, vodiče se přitahují, v opačném případě se odpuzují
- dosazením vztahu pro velikost magnetické indukce v okolí vodiče do Ampérova zákona dostáváme

$$F_m = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} l$$

- definice ampéru

Ampér je stálý proud, který při průchodu dvěma přímnými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného průřezu vzdálenými od sebe jeden metr ve vakuu vyvolá mezi vodiči sílu o velikosti $2 \cdot 10^{-7}$ N na jeden metr délky vodiče.

Magnetické pole cívky

- magnetická indukce uprostřed jednoho závitu je dána vztahem:

$$B = \frac{\mu I}{2r}$$

- solenoid = dlouhá tenká cívka, uvnitř je homogenní pole
- velikost magnetické indukce uvnitř solenoidu:

$$B = \mu \frac{NI}{l}$$

$$d = \frac{l}{N}$$

- d – průměr vodiče

Nabité částice v magnetickém poli

- magnetická síla zakřivuje dráhu elektronů

$$I = \frac{|Q|}{t} = \frac{Ne v}{l}$$

$$\vec{F}_m = l(\vec{I} \times \vec{B}) = Ne(\vec{v} \times \vec{B}) = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$F_m = qvB \sin \alpha$$

- poloměr kruhové dráhy elektronu, když je jeho rychlost kolmá k indukci:

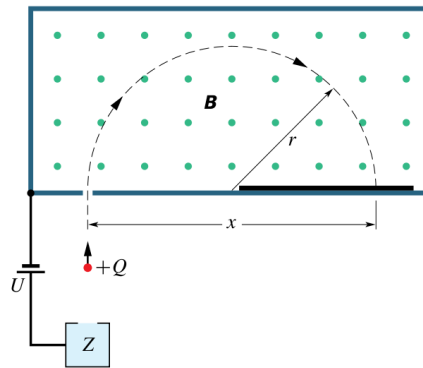
$$F_m = F_d$$

$$evB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{eB}$$

- nabitá částice pohybující se se zrychlením vyzařuje (ztrácí energii)
- využití: hmotnostní spektrograf
- pohybuje-li se částice zároveň v magnetickém i elektrickém poli, výslednice sil je Lorentzova síla

$$F_L = F_e + F_m = qE + q(v \times b)$$



Obrázek 33: Schéma hmotnostního spektrografu.

Magnetické vlastnosti látek

Diamagnetické látky

- $\mu_r < 1$ (jen trochu)
- diamagnetické atomy
- mírně zeslabují magnetické pole
- vzácné plyny, Cu , Au , Hg

Paramagnetické látky

- $\mu_r > 1$ (jen trochu)
- paramagnetické atomy
- mírně zesilují magnetické pole
- Na , K , Al
- mají vlastní magnetické pole
- teoreticky by šlo uspořádat atomy vnějším magnetickým polem
- zesílilo by se tak vnitřní magnetické pole látky, ale brání v tom tepelný pohyb

Feromagnetické látky

- $\mu_r > 1$
- paramagnetické atomy uspořádané tak, že zesilují magnetické pole
- Fe , Co , Ni
- lze zesílit vnějším magnetem \rightarrow magnetování látky
- jádra cívek v elektromagnetech, transformátorech, elektrických strojích, ..
- magnetují pouze, když jsou materiály v krystalickém stavu – vlastnost struktury látky
- **Currierova teplota** = teplota, při které feromagnetické látky ztrácí své vlastnosti a stávají se paramagnetickými
- **ferimagnetické látky**
 - * sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů
 - * mnohem větší elektrický odpor než ostatní feromagnetické látky
 - * jádra cívek ve vysokofrekvenčních obvodech, permanentní magnety

Magnetické materiály v technické praxi

- **elektromagnet** = cívka navinutá na feromagnetickém jádře
- magneticky tvrdý materiál – po přerušení proudu v cívce nezaniká mag. pole, remanentní magnetická indukce B_r
- magnetický měkký materiál – malá hodnota B_r (jádra cívek, kde se proud rychle mění)

Elektromagnetické relé

- když obvodem začne procházet proud, kotva se přitáhne k jádru cívky a sepne pružné kontakty
- stačí malý proud, menší, než který prochází obvodem ovládaného zařízení
- elektromotor, klimatizace, spojení telefonních stanic

Magnetický záznam signálu

- trvalé zmagnetování vrstvy feromagnetika
- záznamová hlava = cívka s jádrem složeným z plíšků uspořádaných do prstence (přerušený)
- pod cívkou v místě štěrbin se pohybuje nosič záznamu, který je vystupujícími indukčními čárami zmagnetizován
- proud procházející cívkou odpovídá zaznamenanému signálu
- reprodukce probíhá opačně pomocí snímací hlavy
- kazety, diskety, ...

18. Nestacionární magnetické pole

- nestacionární = proměnné v čase
- vektor intenzity nemá stálou velikost nebo směr
- zdrojem může být:
 - * pohybující se vodič
 - * vodič s časově proměnným proudem
 - * pohybující se permanentní magnet nebo elektromagnet

Elektromagnetická indukce

- **elektromagnetická indukce** = jev, kdy nestacionární magnetické pole indukuje (vyvolává) elektrické pole
- indukované elektrické pole – vírové (uzavřené siločáry)
- **magnetický indukční tok** (Φ [Wb]) – určuje, kolik siločar vstupuje do dané plochy

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

- α – úhel, který svírá vektor intenzity s normálovým vektorem plochy
- otáčel-li se v homogenním magnetickém poli rovinný závit kolem osy ležící v rovině závitu úhlovou rychlostí ω

$$\Phi = BS \cos \omega t$$

Faradayův zákon elektromagnetické indukce

- zjistil v roce 1831 pokusy s cívkami

Změnil-li se magnetický indukční tok uzavřeným vodičem za dobu dt o $d\Phi$, indukuje se ve vodiči elektromotorické napětí, jehož střední hodnota je:

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\dot{\Phi}$$

- (derivace magnetického indukčního toku podle času)
- napětí v otáčejícím se závitě (střídavé napětí)

$$u_i = -\dot{\Phi} = -(BS \cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

- napětí mezi dvěma konci vodiče délky l pohybujícího se rychlostí v v magnetickém poli s mag. indukcí B

$$U_i = El = vBl$$

Lenzův zákon

- změna magnetického indukčního toku indukuje ve vodiči indukovaný elektrický proud

$$I_i = \frac{U_i}{R}$$

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

- **Foucaultovy vířivé proudy** – vyvolává je nestacionární magnetické pole v okolí neferomagnetického kovu
- tlumení kmitů – energie kmitavého pohybu se přemění v energii indukovaných proudů

Vlastní indukce

- žárovka v obvodu s cívkou se rozsvítí později, než žárovka v obvodu s odporem
- příčinou je indukované elektrické pole, které působí proti elektrickému poli zdroje

$$\Phi = LI$$

- L [H] – indukčnost cívky

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

- pro magnetickou indukci cívky platí

$$B = \mu \frac{NI}{l}$$

- dosadíme-li ji do vzorce, dostáváme

$$U_i = -\frac{\mu \frac{N^2 S}{l} \Delta I}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

- porovnáním zjistíme tento vztah pro indukčnost cívky

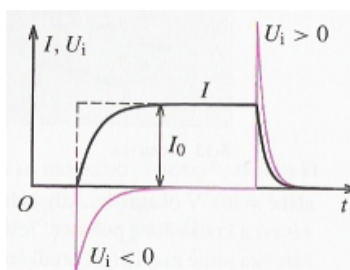
$$L = \mu \frac{N^2 S}{l}$$

Přechodové jevy

- při náhlé změně napětí
- v obvodu s rezistorem stoupně proud okamžitě na ustálenou hodnotu $I_0 = \frac{U_e}{R}$
- v obvodu s cívkou vlivem indukčnosti cívky vzniká **indukované napětí**

$$I_0 = \frac{U_e + U_i}{R} = \frac{U_e - L \frac{\Delta I}{\Delta t}}{R}$$

- obdobný přechodný děj nastane i při rozpojení obvodu



Obrázek 34: Při náhlé změně napětí se proud v obvodu s cívkou mění s určitým časovým zpožděním.

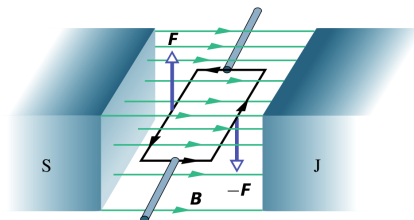
- aby vznikl v cívce proud, je potřeba vykonat práci k překonání indukovaného napětí
- současně vzniká magnetické pole cívky a vykonaná práce odpovídá energii vytvořeného magnetického pole

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

- platí pro cívku bez jádra, přibližně i pro cívku s otevřeným jádrem

19. Střídavý proud

- cívka se otáčí v magnetickém poli



Obrázek 35: Vznik střídavého proudu otáčením smyčky v magnetickém poli.

- magnet se otáčí v okolí cívky

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

- střídavý proud má taky harmonický průběh

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

Odpor v obvodu střídavého proudu

- R – rezistance, stejná jako odpor v obvodu stejnosměrného proudu

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

- $\varphi = 0$ – fázový rozdíl

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

Kondenzátor v obvodu střídavého proudu

- X_C – kapacitance, zdánlivý odpor kondenzátoru

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

- $\varphi = \frac{\pi}{2}$ – fázový rozdíl, proud předbíhá napětí

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

Cívka v obvodu střídavého proudu

- X_L – indukance, zdánlivý odpor cívky

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

- $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ – fázový rozdíl, proud se zpožďuje za napětím

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

RL obvod

- reálná cívka se chová jako ideální cívka a sériově zapojený odpor
- indukance a rezistance svírají pravý úhel (vektory) → sečteme pomocí pythagorovy věty

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

- Z – impedance

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R}$$

RLC obvod

- celkový odpor složeného obvodu charakterizuje impedance a fázový rozdíl

$$U_m = I_m Z$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

- pokud se indukance rovná kapacitanci, dochází k rezonanci
- celková impedance obvodu je pak rovna pouze odporu

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

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

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

- f_0 – rezonanční frekvence

Výkon střídavého proudu

- výkon v obvodu s odporem

$$p = ui = Ri^2 = RI_m^2 \sin^2 \omega t$$

$$P_m = RI_m^2$$

- podle vzorce pro $\sin \frac{x}{2}$ odvodíme:

$$p = P_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right)$$

- práce za periodu je integrál výkonu podle času

$$W = \int_0^T p \, dt = \int_0^T P_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) dt = \left[\frac{P_m}{2} \left(t - \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right) \right]_0^T$$

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

$$W = \frac{P_m}{2} T = \frac{1}{2} I_m^2 R T$$

- střední hodnota výkonu

$$\bar{P} = \frac{W}{T} = \frac{P_m}{2} = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

- harmonický střídavý proud má stejný střední výkon jako stejnosměrný proud I_e

$$I_e^2 R = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

- I_e – **efektivní hodnota** střídavého proudu (lze označit i I)

$$U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

- U_e – **efektivní hodnota** střídavého napětí (lze označit i U)

- výkon v **obvodu s impedancí**

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

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 R = \frac{1}{2} I_m \frac{U_m}{Z} R = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \frac{R}{Z} = UI \frac{R}{Z} = UI \cos \varphi$$

- P – činný výkon, užitečný výkon, který přístroj uvolňuje
- $\cos \varphi$ – účinník

$$P_Q = UI \sin \varphi$$

- P_Q – jalový výkon, výkon, který se přeměňuje uvnitř přístroje, nejde využít

Alternátor (trojfázový)

- generátor střídavého proudu
- použití v elektrárnách (všech kromě sluneční)
- **rotor** = otáčející se elektromagnet
- **stator** = soustava cívek, ve kterých se indukuje napětí
- indukovaná napětí jsou posunuta o třetinu

$$u_1 = U_1 \sin(\omega t)$$

$$u_2 = U_2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$u_3 = U_3 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

- $f = 50$ Hz – běžná spotřebitelská síť

Trojfázová soustava

- z alternátoru vedou tři fázové vodiče a jeden nulovací (součet všech napětí je nulový)
- U_F – **fázové napětí**, mezi fázovým a nulovacím vodičem

$$\vec{U}_S = \vec{U}_F - \vec{U}_F$$

$$U_S = 2U_F \cdot \sin \frac{\pi}{6} = \sqrt{3}U_F$$

- U_S – **sdrúžené napětí**, mezi dvěma fázovými vodiči
- zásuvka – fáze v levé díře, rovnoměrné zatížení
- spotřebiče konstruované na větší výkon se připojují současně ke všem fázovým vodičům
- **spojení do hvězdy** – jednotlivé části spotřebiče připojeny k fázovému napětí
- **spojení do trojúhelníku** – jednotlivé části spotřebiče připojeny k sdrúženému napětí → větší výkon

Trojfázový asynchronní elektromotor

- **stator** = soustava tří cívek, ke kterým je připojeno třífázové napětí
- **rotor** = klecové vinutí z neferomagnetického materiálu, kotva na krátko
- uvnitř statoru vzniká točivé magnetické pole
- kotva se roztočí s menší frekvencí (f_r), než jakou má točivé magnetické pole (f_p)

$$s = \frac{f_p - f_r}{f_p}$$

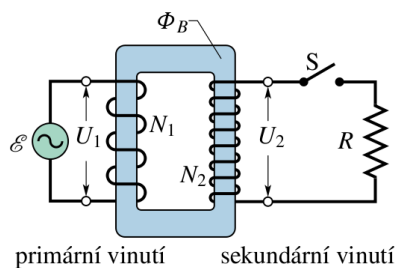
- s – skluz
- nevýhody: potřeba třífázového napětí, nelze měnit otáčky
- výhody: snadná konstrukce, bezporuchovost, dlouhá životnost

Transformátor

- přeměna velikosti střídavého napětí
- 2 cívky na společném jádře z magneticky měkkého materiálu (Faradayův zákon elektromagnetické indukce)

$$u_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$



Obrázek 36: Schéma jednofázového transformátoru.

- rovnice transformátoru

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

- k – transformační poměr
- $k > 1$ – transformace nahoru
- $k < 1$ – transformace dolů
- ze zákona zachování energie vyplývá

$$P_1 = P_2$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

- čím větší transformátor, tím větší účinnost
- jednofázový × třífázový
- přenos energie při vyšším napětím omezuje ztráty (menší proud)
- ztrátový výkon:

$$P = RI^2$$

20. Elektromagnetické kmity a vlny

Elektromagnetický oscilátor

- energie elektrického pole se periodicky přeměňuje na energii magnetického pole
- **oscilační obvod** = LC obvod
- energie kondenzátoru ($\frac{1}{2}CU^2$) se periodicky přeměňuje na energii cívky ($\frac{1}{2}LI^2$)
 1. kondenzátor se vybíjí a procházející proud vytváří magnetické pole v cívkce
 2. kondenzátor se vybije, ale cívka indukuje proud jdoucí stejným směrem (snaží se udržet současný stav)
 3. kondenzátor se nabije s opačnou polaritou, vše se opakuje
- **vlastní kmitání** elektromagnetického oscilátoru – perioda je určena jen parametry L a C

$$U_C = U_L$$

$$X_C I = X_L I$$

$$\frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- ω_0 – uhlová frekvence vlastního kmitání
- **Thomsonův vztah**

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$$

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

- počáteční napětí kondenzátoru nemá vliv na periodu kmitání, ovlivňuje pouze amplitudu

$$u = U_m \cos \omega_0 t$$

$$i = I_m \cos(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}) = I_m \sin \omega_0 t$$

- kmity reálného oscilátoru jsou vždy tlumené, energie se ztrácí na odporu vodičů a cívky \rightarrow RLC obvod
- tlumení má vliv i na frekvenci \rightarrow tlumené kmitání není harmonické

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

- δ – součinitel tlumení

$$\delta = \frac{R}{2L}$$

- **nucené kmitání** vzniká připojením zdroje harmonického napětí k elektromagnetickému oscilátoru
- oscilátor kmitá s frekvencí připojeného zdroje
- **rezonance** – pokud je frekvence zdroje rovna vlastní frekvenci oscilátoru, amplituda je největší
- paralelní RLC – při rezonanci má největší impedanci

Elektromagnetické vlnění

- zdrojem je elektromagnetický oscilátor, přenáší se dvěma vodiči ke spotřebiči
- pokud má zdroj nízkou frekvenci, jedná se o kmitání – velikost vedení je zanedbatelná vůči vlnové délce
- při vysokých frekvencích je nutné počítat s časovým posunem – vlnění
- **rovnice postupného elektromagnetického vlnění**

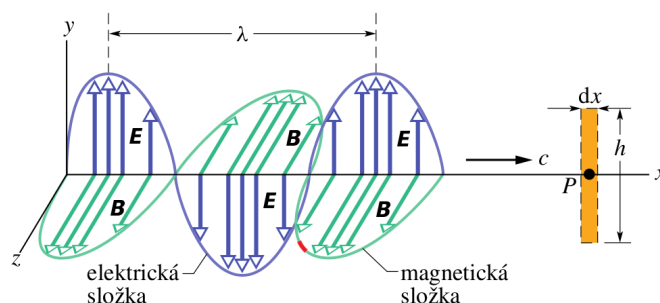
$$u = U_m \sin \omega(t - \tau) = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{cT} \right) = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

- $c = 2,997923 \cdot 10^8$ m/s $\doteq 3 \cdot 10^8$ m/s – rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu
- dvou vodičové vedení lze považovat za řadu spojených LC obvodů

Elektromagnetická vlna

- náboj ve vodiči není rozložen rovnoměrně, různá intenzita elektrického pole podle funkce sinus
- kolem vodiče vzniká magnetické pole, magnetická indukce se mění podle sinusoidy
- vektor magnetické indukce je kolmý k vektoru elektrické intenzity

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{c}$$

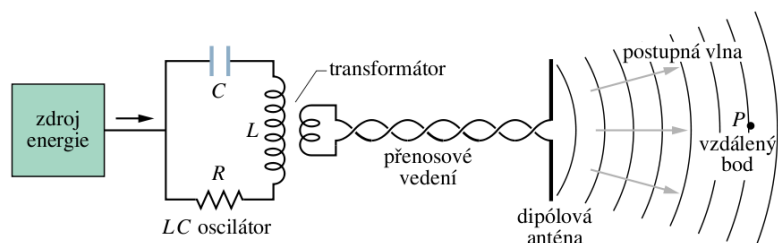


Obrázek 37: Elektrická složka je kolmá k magnetické složce.

- mezi vodiči vzniká proměnné elektromagnetické silové pole
- pokud na konci vedení dochází k odrazu, vzniká stojaté vlnění
- na konci je kmitná napětí a uzel proudu (vedení je rozpojeno, proud je neustále nulový)

Elektromagnetický dipól

- ohneme konce vodiče délky $\frac{\lambda}{4}$ kolmo k vedení
- vzniká elektromagnetické pole, které se šíří do okolí
- **půlvlnný dipól** – jeho délka je polovina vlnové délky
- používá se jako anténa u vysílačů i přijímačů
- **polarizace vlnění** – elektrická složka v rovině dipólu, magnetická v rovině kolmé k dipólu



Obrázek 38: Vznik elektromagnetického pole, které se šíří do prostoru.

Šíření elektromagnetického vlnění

- ohyb, odraz, interference elektromagnetického vlnění – stejné jako u jiných vlnění
- rychlost šíření vlnění v prostředí

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

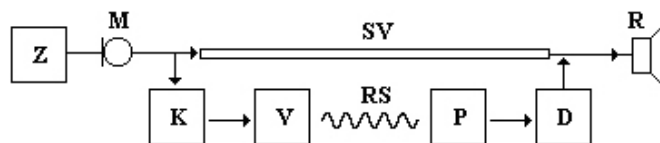
- ϵ_r – relativní permitivita
- μ_r – relativní permeabilita
- dlouhé a střední vlny (rádiové) lze přenášet po povrchu, využívá se ohyb kolem překážek
- krátké a velmi krátké vlny (rádiové a televizní) vyžadují přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem
- u krátkých vln se využívá odrazu od ionosféry – kvalita závisí na počasí
- **RADAR** (RADio Detecting And Ranging) – radiolokátory založené na odrazu vlnění od vodivých překážek

Maxwellovy rovnice

- složité diferenciální rovnice
 1. změna elektrického pole vytváří magnetické pole
 2. změna magnetického pole vytváří elektrické pole
 3. elektrické pole je zřídlové
 4. magnetické pole je vírové
- vzniká elektromagnetické pole
- elektromagnetická interakce – vzájemné působení hmotných objektů

Sdělovací soustava

- slouží k přenosu informací
- pokud je zdrojem zprávy zvuk, použijeme **mikrofon** (elektrodynamický, uhlíkový, kondenzátorový, ...)
- mechanické kmitání se v něm přemění na elektrické – lze přenášet na velké vzdálenosti
- **kodeř** přemění elektromagnetický signál na signál vhodnější k přenosu (modulace)
- přenos se může uskutečnit buď **sdělovacím vedením**, nebo bezdrátově pomocí vysílače a přijímače
- **dekodér** signál změní na původní a **reproduktor** znovu vytvoří zvuk



Obrázek 39: Schéma sdělovací soustavy.

Vysílač

- **oscilátor** vytvoří elektromagnetické kmity s nosnou frekvencí
- v **modulátoru** dochází k modulaci nosné a akustické nízkofrekvenční vlny
- **amplitudová modulace** – mění amplitudu nosné vlny podle akustické vlny, snazší, horší kvalita (DV, SV, KV)
- **frekvenční modulace** – mění se frekvence nosných kmitů (VKV), složitější, kvalitnější
- výsledný signál se zesílí a **anténou** je vyzařen do prostoru (stožár = půlvlnný dipól)
- televize: obrazová složka – amplitudová modulace, zvuková složka – frekvenční modulace

Přijímač

- signál je přijat **anténou** – půlvlnný dipól
- **laditelný oscilační obvod** naladíme na frekvenci nosné vlny přijímaného signálu
- dochází k rezonančnímu zesílení signálu, který je ještě dále zesílen **vysokofrekvenčním zesilovačem**
- **demodulátor** oddělí akustický signál od nosné vlny
- akustický signál je zesílen **nízkofrekvenčním zesilovačem** a přiveden do **reproduktoru**

21. Geometrická optika

- **optika** – zkoumá vlastnosti světla
- **světlo** – speciální druh elektromagnetického vlnění ($\lambda \in (390 \text{ nm}; 760 \text{ nm})$)
- λ – vlnová délka = vzdálenost, kterou urazí světlo za periodu T

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ – rychlost světla ve vakuu

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n}$$

$$n = \frac{c}{v}$$

- n – index lomu ($n > 1$)
- monochromatické (monofrekvenční) světlo – světlo o určité frekvenci
- polychromatické světlo – bílé světlo
- **geometrická optika** – zkoumá vlastnosti světla, když je λ zanedbatelná vůči rozměrům předmětu a optické dráze
- platí **princip nezávislosti chodu paprsků** – paprsky se vzájemně neovlivňují
- optická soustava: oko, mikroskop, brýle, dalekohled, objektiv fotoaparátu, kamery
- při zobrazování vzniká obraz:
 - * skutečný – sbíhavé paprsky, dá se chytit na stínítku
 - * neskutečný – rozbíhavé paprsky

Optická prostředí

- na rozhraní dvou prostředí se část světla odrazí a část projde
- **průhledné prostředí** – většina světla projde
 - * homogenní (stejnorodé) – stejné všude
 - * izotropní – stejné ve všech směrech
 - * anizotropní – např. krystaly
- **průsvitné prostředí** = disperzní, část projde a část se odrazí, dochází k rozptylu světla
- **neprůhledné prostředí** – většina světla se odrazí (nebo pohltí, absorbuje)
- na rozhraní se mění vlnová délka, nikoli frekvence

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$

Huygensův princip

Každý bod vlnoplochy je zdrojem elementárního vlnění, které se šíří v elementárních vlnoplochách.

Výsledná vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obálkou elementárních vlnoploch.

V ostatních bodech se vlnění vyruší interferencí.

- platí pro izotropní prostředí
- **světelný paprsek** – v každém okamžiku kolmý na vlnoplochu

Zákon odrazu

Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α :

$$\alpha = \alpha'$$

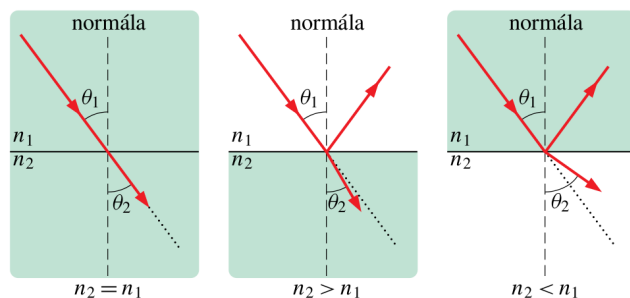
Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Snellův zákon lomu

- odvození z Huygensova principu

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

- při přechodu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí – lom ke kolmici
- při přechodu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí – lom od kolmice
- lomený paprsek zůstává v rovině dopadu

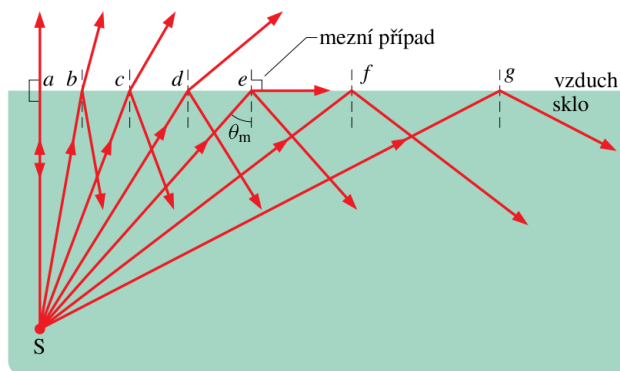


Obrázek 40: Na rozhraní dvou prostředí se světelný paprsek láme podle zákona lomu.

- **totální reflexe** = úplný odraz – při lomu od kolmice, všechny paprsky se odrazí

$$\alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$$

- α_m – mezní úhel ($\beta = 90^\circ$)
- využití: optické vlákno, endoskop

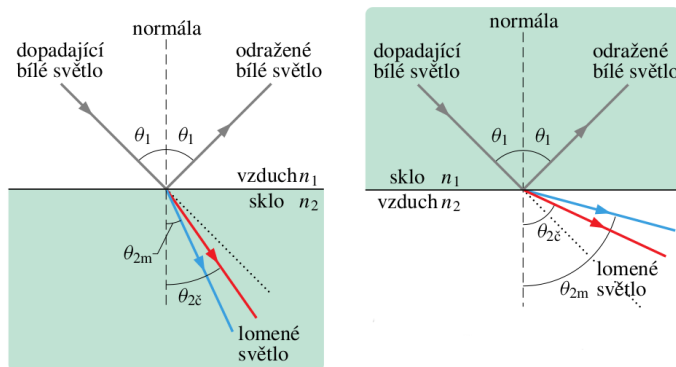


Obrázek 41: Při totální reflexi se všeskeré dopadající světlo odrazí.

Disperze světla

- rozložení světla na barevné složky (červená – oranžová – žlutá – zelená – modrá – fialová)
- k zvýraznění se používá optický hranol
- využití: hranolový spektroskop
- index lomu závisí na frekvenci ($f_2 > f_1 \rightarrow n_2 > n_1$)
- na rozhraní se mění vlnová délka, nikoli frekvence

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$



Obrázek 42: Chromatická disperze světla při přechodu mezi prostředími.

Rovinné zrcadlo

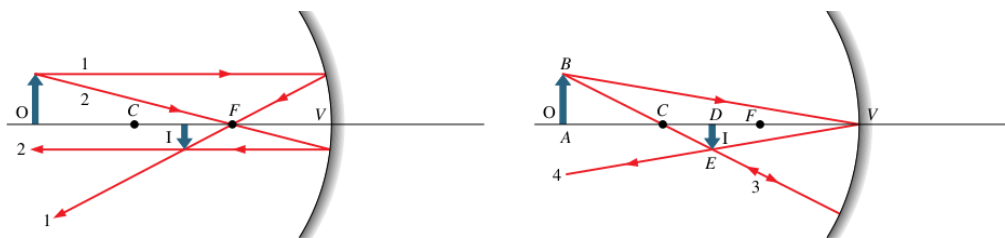
- zrcadlo – hliníková folie chráněná sklem
- obraz: přímý, stranově převrácený, neskutečný (zdánlivý), věrný

Kulová zrcadla

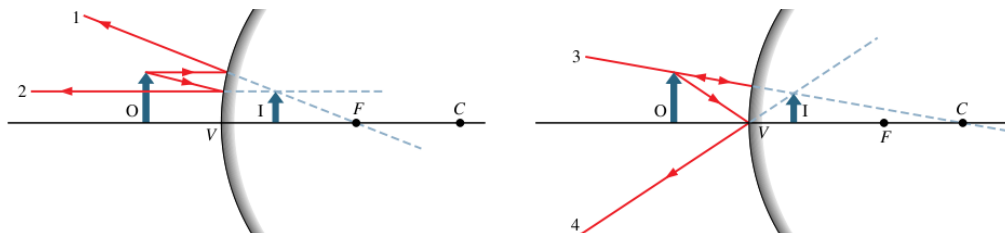
- V – vrchol zrcadla
- F – ohnisko
- C – střed křivosti
- r – poloměr křivosti
- f – ohnisková vzdálenost

$$|CF| = |FV| = \frac{r}{2} = f$$

- **paraxiální paprsky** – paprsky blízké optické ose (svírají s optickou osou velmi malý úhel a dopadají na zrcadlo v blízkosti vrcholu)
- znaménková konvence:
 - * vše před zrcadlem – kladné (duté zrcadlo – $f, r > 0$)
 - * vše za zrcadlem – záporné (vypuklé zrcadlo – $f, r < 0$)

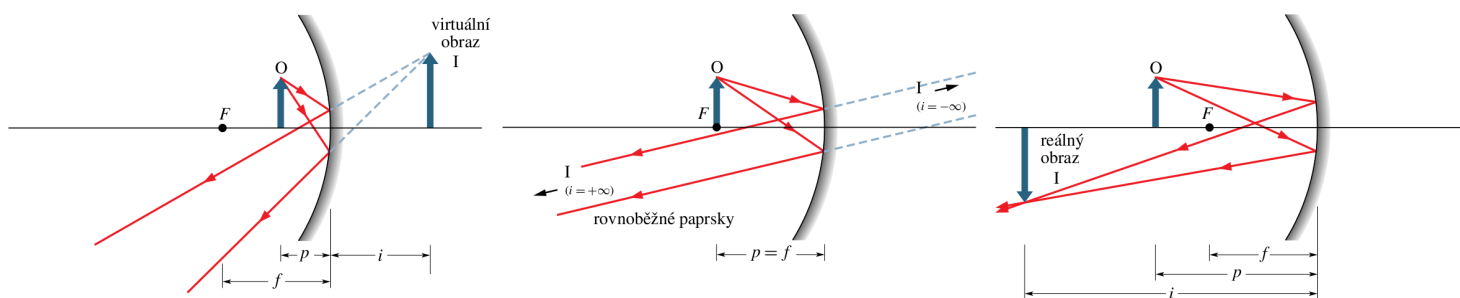


Obrázek 43: Význačné paprsky při zobrazení dutým zrcadlem.



Obrázek 44: Význačné paprsky při zobrazení vypuklým zrcadlem.

	DUTÉ					VYPUKLÉ
	$a > 2f$ $2f > a' > f$ $Z \in (-1; 0)$	$a = 2f$ $a' = 2f$ $Z = -1$	$2f > a > f$ $a' > 2f$ $Z \in (-\infty; -1)$	$a = f$	$f > a > 0$ $a < 0$ $Z \in (1; \infty)$	$a > 0$ $a' < 0$ $Z \in (0; 1)$
obraz	skutečný zmenšený nepřímý	skutečný věrný nepřímý	skutečný zvětšený nepřímý	žádný	neskutečný zvětšený přímý	neskutečný zmenšený přímý



Obrázek 45: Zobrazení dutým zrcadlem.

- svazek rovnoběžných paprsků dopadajících na duté zrcadlo vytvoří obraz v ohniskové rovině
- **kulová vada zrcadla** – paprsky rovnoběžné s optickou osou se neodrazí přesně do ohniska
- korekce: parabolická zrcadla (přijímače satelitního vysílání)
- Z – příčné zvětšení

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

Zobrazovací rovnice

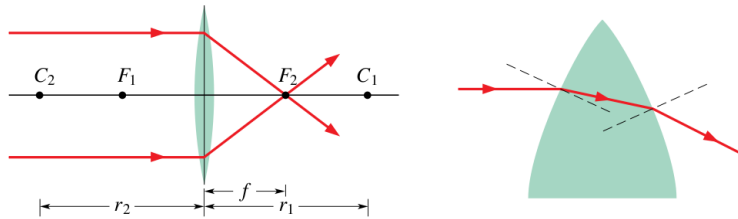
- platí pouze přibližně kvůli kulové vadě zrcadla (pro čočky kvůli otvorové vadě čoček)

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

Čočky

– spojky (mají skutečná ohniska):

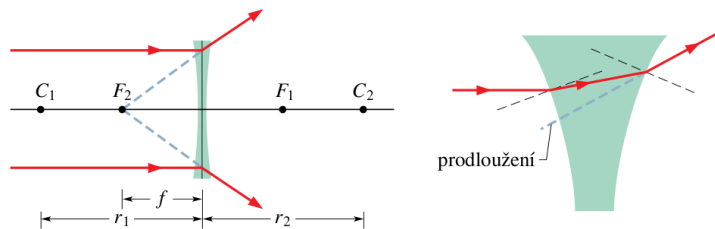
- * dvojbypuklá ($r_1 > 0, r_2 > 0$)
- * ploskovypuklá ($r_1 > 0, r_2 = \infty$)
- * dutovypuklá ($r_1 > 0, r_2 < 0$)



Obrázek 46: Spojná čočka.

– rozptylky (mají neskutečná ohniska):

- * dvoudutá ($r_1 < 0, r_2 < 0$)
- * ploskodutá ($r_1 < 0, r_2 = -\infty$)
- * vypuklodutá ($r_2 < 0, r_2 > 0$)



Obrázek 47: Rozptylná čočka.

– tenká čočka – aproximace normální čočky ($V_1 \doteq O \doteq V_2$)

– znaménková konvence

- * obraz za čočkou – $a' > 0$
- * obraz před čočkou – $a' < 0$

– φ [D] – optická mohutnost (spojky: $\varphi > 0$, rozptylky: $\varphi < 0$)

$$\varphi = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

– n_1 – index lomu prostředí

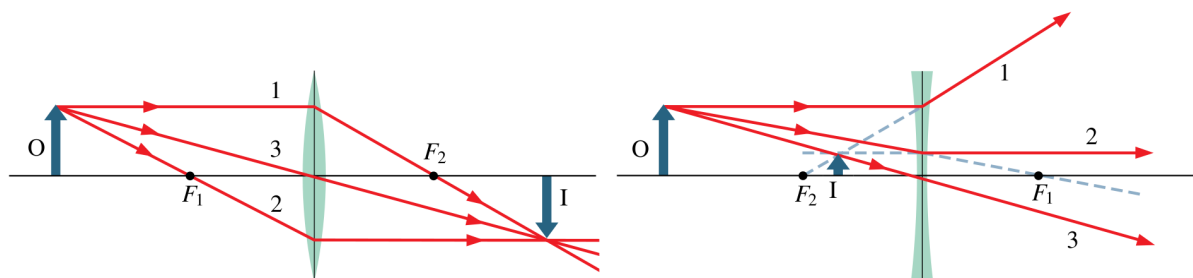
– n_2 – index lomu čočky

– otvorová vada čoček – paprsky rovnoběžné s optickou osou se neprotínají přesně v ohnisku

– korekce: jiný výbrus čoček

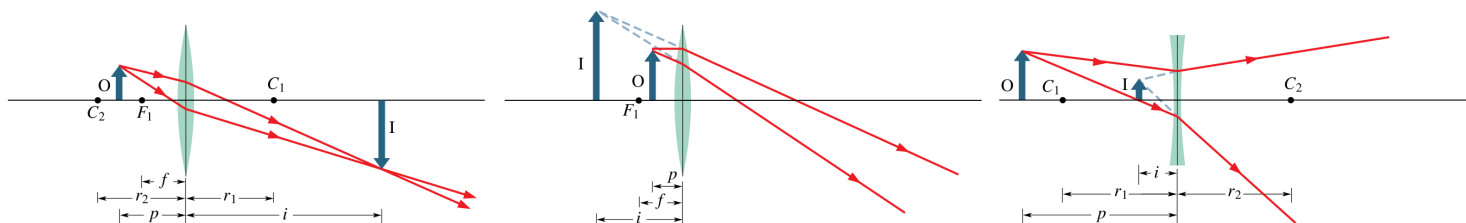
– chromatická vada čoček – na světelných okrajích vzniká spektrum v důsledku disperze světla

– korekce: soustava čoček z různých skel



Obrázek 48: Význačné paprsky při zobrazení spojkou a rozptylkou.

	SPOJKA					ROZPTYLKA
	$a > 2f$ $2f > a' > f$ $Z \in (-1; 0)$	$a = 2f$ $a' = 2f$ $Z = -1$	$2f > a > f$ $a' > 2f$ $Z \in (-\infty; -1)$	$a = f$	$f > a > 0$ $a < 0$ $Z \in (1; \infty)$	$a > 0$ $a' < 0$ $Z \in (0; 1)$
obraz	skutečný zmenšený nepřímý	skutečný věrný nepřímý	skutečný zvětšený nepřímý	žádný	neskutečný zvětšený přímý	neskutečný zmenšený přímý



Obrázek 49: Zobrazení spojkou a rozptylkou.

Oko

- spojná optická soustava s měnitelnou ohniskovou vzdáleností
- pomocí oční čočky ($\varphi = 10 \text{ D}$) a rohovky ($\varphi = 40 \text{ D}$) vytváří obraz na sítnici
- buňky citlivé na světlo: **tyčinky** – intenzita světla, **čípky** – rozeznávání barev
- obraz: skutečný, zmenšený, převrácený
- **žlutá skvna** – místo nejostřejšího vidění
- **slepá skvna** – chybí tyčinky a čípky, místo výstupu zrakového nervu
- zaostřování: změna optické mohutnosti čočky
- **minimální akomodace** – zaostření na daleký bod
- **maximální akomodace** – zaostření na blízký bod
- $d = 25 \text{ cm}$ – konvenční zraková vzdálenost
- **krátkozrakost** – daleký bod v konečné vzdálenosti, blízký bod blíže k oku
- korekce: rozptylka
- **dalekozrakost** – daleký bod v nekonečnu, blízký bod dále od oka
- korekce: spojka
- osvětlení sítnice částečně řídí otvor v duhovce, zornice – clona
- zřetelné vidění vyžaduje, aby zrakový vjem trval určitou dobu
- setrvačnost zrakového vjemu – využívá se při filmové projekci (24 snímků/s)
- **rozlišovací schopnost oka** – dána minimální zorným úhlem, při kterém ještě dokážeme rozeznat dva různé body
- $\tau_{min} = 1'$

Lupa

- spojka (u oka)

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\tan \tau'}{\tan \tau} = \frac{\frac{y}{a}}{\frac{y}{d}} = \frac{d}{a}$$

- γ – úhlové zvětšení
- τ – zorný úhel, když je předmět v konvenční zrakové vzdálenosti
- τ' – zorný úhel obrazu a předmětu při použití lupy
- pro menší úhly platí:

$$\alpha \doteq \tan \alpha$$

- **minimální akomodace** – ostrím na nekonečno

$$a' = -\infty$$

$$a = f$$

$$\gamma = \frac{d}{f} = d\varphi = 0,25\varphi$$

- **maximální akomodace** – ostrím na blízký bod

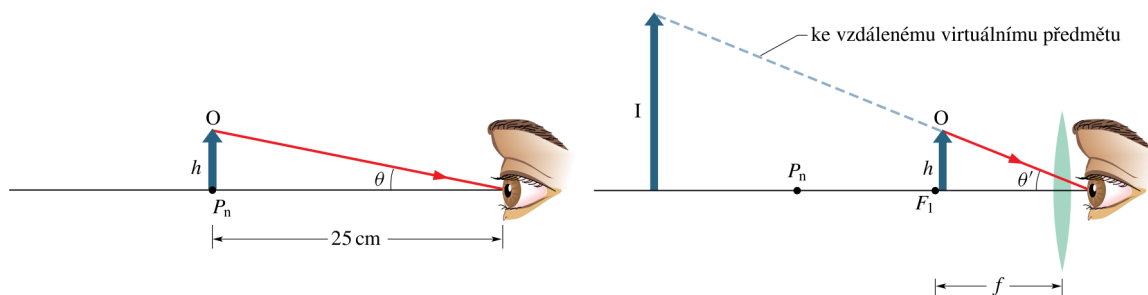
$$a' = -d$$

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

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

$$\gamma = \frac{d(f+d)}{df} = \frac{f+d}{f} = 1 + \frac{d}{f} = 1 + 0,25\varphi$$

- $\gamma \leq 6$ – pak už se projevují vady čoček
- obraz: přímý, neskutečný, zvětšený



Obrázek 50: Zobrazení lupou.

Mikroskop

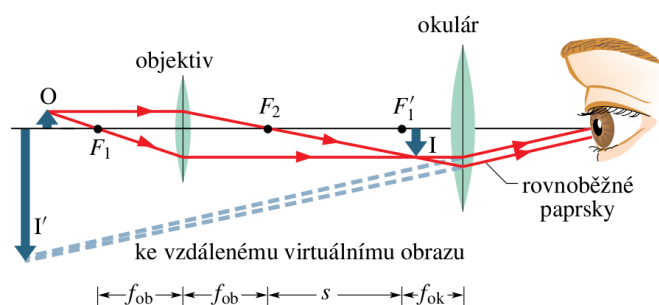
- zvětšení (až $2000\times$) zorného úhlu při pozorování velmi malých objektů
- 2 spojky – objektiv + okulár
- objektiv vytvoří zvětšený obraz v rovině ohniska okuláru

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\tan \tau'}{\tan \tau} = \frac{\frac{y'}{f_2}}{\frac{y}{f_1}} = \frac{dy'}{f_2 y} = \frac{d\Delta}{f_1 f_2}$$

- Δ – optický interval (15 – 20 cm)

$$Z = \frac{y'}{y} = \frac{\Delta}{f_1}$$

- vychází z podobnosti trojúhelníků
- obraz: zvětšený, nepřímý



Obrázek 51: Zobrazení mikroskopem.

Dalekohledy

- zvětšení rozného úhlu při pozorování velmi vzdálených objektů

Keplerův dalekohled

- obrazové ohnisko objektivu splývá s předměťovým ohniskem okuláru
- 2 spojky

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\tan \tau'}{\tan \tau} = \frac{\frac{y'}{f_2}}{\frac{y}{f_1}} = \frac{f_1}{f_2}$$

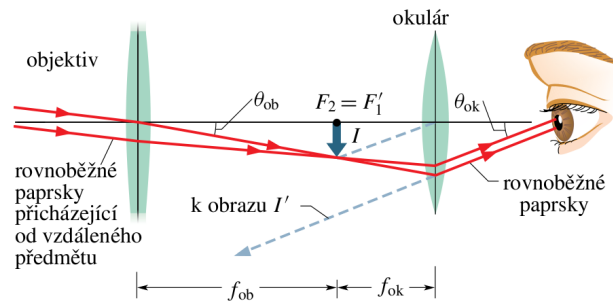
- obraz: zvětšený, nepřímý
- výhody: snadná konstrukce, lze umístit měřítko
- nevýhody: otvorová a chromatická vada

Galileův dalekohled

- obrazové ohnisko objektivu splývá s předměťovým ohniskem
- spojka + rozptylka

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\tan \tau'}{\tan \tau} = \frac{\frac{y'}{|f_2|}}{\frac{y}{f_1}} = \frac{f_1}{|f_2|}$$

- obraz: zvětšený, nepřímý
- výhody: kratší
- nevýhody: nelze umístit měřítko



Obrázek 52: Zobrazení Keplerovým dalekohledem

Triedr

- za objektiv se umístí dvojice odrazných hranolů
- výhody: kratší, přímý obraz

Newtonův dalekohled

- reflektor (odraz světla)
- Keplerův dalekohled, Galileův dalekohled, triedr – refraktory (založené na lomu světla, projevují se vady čoček)
- světlo se odrazí od parabolického zrcadla a pomocí rovinného zrcadla do okuláru
- mnohem lepší (Ondřejov)
- SUBARU – Mauna Kea ($r = 8,2$ m, $f = 15$ m, $m = 23$ t)
- Hubbelův teleskop – mimo atmosféru ($r = 2,4$ m, $h = 600$ km)

Snímací přístroje

- fotoaparát, kamera
- objektiv – spojná soustava
- kinofilmové políčko – 24×36 mm
- digitální fotoaparát – polovodičový snímač (pixel – 1 bod)

22. Fyzikální optika

- vlnové vlastnosti světla: interference, ohyb (difrakce), polarizace
- světlo = elektromagnetické vlnění, $\lambda \in (390 \text{ nm}; 760 \text{ nm})$

Interference

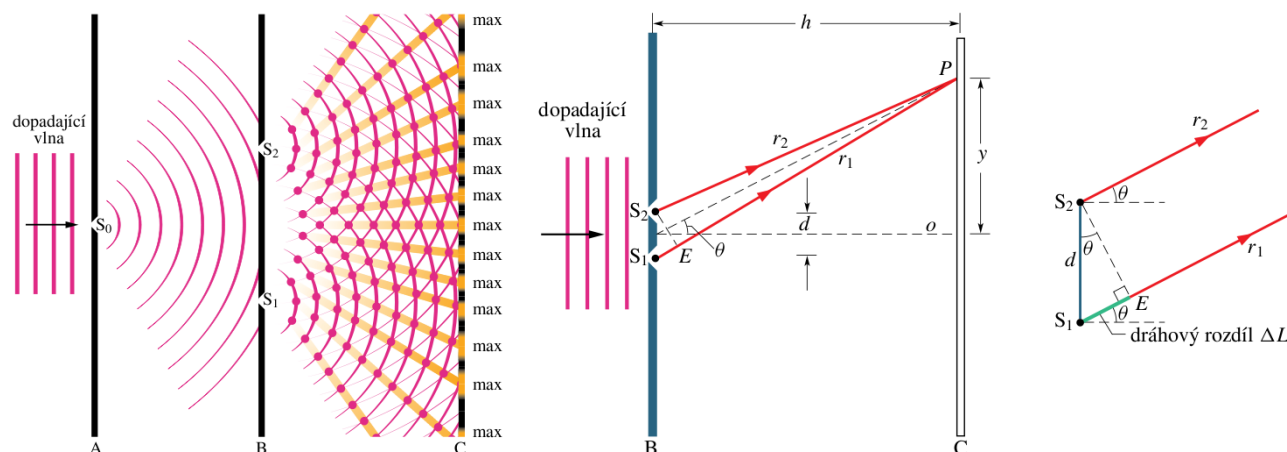
- skládání vlnění
- sčítají se okamžité hodnoty elektrické a magnetické složky
- **koherentní vlnění** = vlnění stejné frekvence, jejichž fázový rozdíl se v daném bodě s časem nemění
- v přirozených zdrojích světlo vzniká náhodnými přeměnami v atomech → nekoherentní světlo
- dráhový rozdíl musí být velmi malý, aby se interference projevila
- lépe se pozoruje u laserů – koherentní světlo
- **Youngův dvouštěrbínový pokus** – nerovnoměrné osvětlení stínítka → interferenční obrazec
- **interferenční maximum** – největší osvětlení

$$\Delta l = k\lambda$$

- **interferenční minimum** – nejmenší osvětlení

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

- k – řád interferenčního maxima/minima



Obrázek 53: Youngův pokus.

- šířka proužků je přímo úměrná vlnové délce a vzdálenosti od stínítka, nepřímo úměrná vzdálenosti štěrbin
- využití: interferometrie – určování dráhového rozdílu, vlnové délky; holografie

Interference na tenké vrstvě

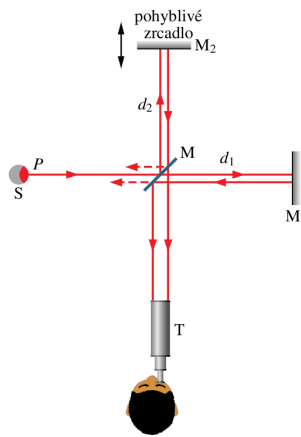
- duhové barvy na mýdlové bublině
- příčina: dvojnásobný odraz světla na horním a dolním rozhraní látky s odlišným indexem lomu
- **optická dráha** = dráha, kterou by za daný čas světlo urazilo ve vakuu

$$l = ns$$

- v případě tenké vrstvy tloušťky d je geometrický dráhový rozdíl:

$$\Delta s = 2d$$

$$\Delta l = 2nd$$



Obrázek 54: Pomocí Michelsonova interferometru bylo zjištěno, že rychlost světla nezávisí na pohybu vztažné soustavy.

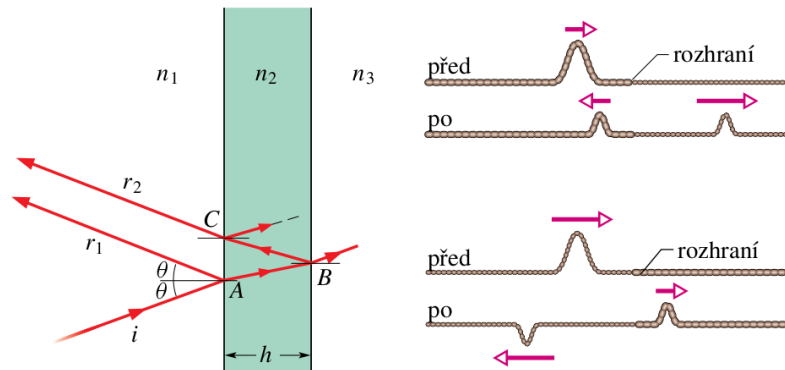
- při odrazu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí se mění fáze vlnění na opačnou
- při odrazu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí se fáze vlnění nemění
- podmínka pro interferenční maximum (řidší prostředí kolem hustšího)

$$\Delta l + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$\Delta l = 2nd = (2k - 1)\frac{\lambda}{2}$$

- podmínka pro interferenční minimum

$$\Delta l = 2nd = k\lambda$$



Obrázek 55: Interference na tenké vrstvě a odraz vlnění.

- dokonale rovinné rovnoběžné plochy + monofrekvenční světlo = světlá, nebo tmavá
- nedokonalostmi vzniká interferenční obrazec, při osvětlení bílým světlem je duhově zbarvený
- využití: antireflexní vrstvy na čočkách fotoaparátů, menší index lomu než čočka a tloušťka tak, aby vzniklo interferenční minimum – potlačí se odraz světla a zlepší se kvalita zobrazení
- **Newtonovy skla** – ploskovypuklá čočka na skleněné desce, vznikají **Newtonovy kroužky**

Difrakce

- ohyb vlnění, jehož podstatou je **Huygensův-Fresnelův princip** (Fresnel ho zobecnil pro jakákoli vlnění)

Každý bod vlnoplochy je zdrojem elementárního vlnění, které se šíří v elementárních vlnoplochách.

Výsledná vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obálkou elementárních vlnoploch.

V ostatních bodech se vlnění vyruší interferencí.

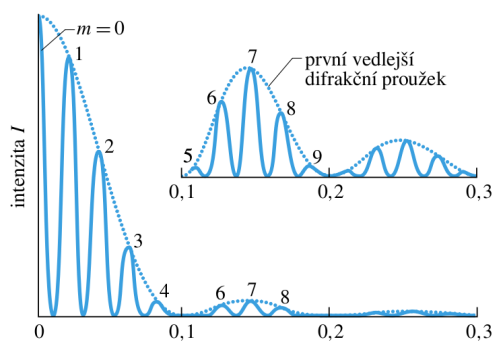
- ohyb je tím výraznější, čím větší je vlnová délka a čím užší je štěrba
- ohyb negativně ovlivňuje rozlišovací schopnost optických přístrojů
- v důsledku toho není hranice světla a stínu ostrá
- na hraně vzniká difrakční obrazec způsobený mnohonásobnou interferencí
- **ohyb na dvou štěrbinách** – dochází k interferenci světla z obou štěrbin

$$\Delta s = b \sin \alpha$$

- b – vzdálenost středů štěrbin
- α – úhel paprsků
- pro interferenční maximum dostáváme podmínku

$$b \sin \alpha = k \lambda$$

- k – řád difrakce



Obrázek 56: Rozložení intenzity osvětlení při difrakci na dvou štěrbinách.

- **difrakční mřížka** – soustava velkého počtu stejných rovnoběžných štěrbin, které jsou v malé vzdálenosti od sebe
- b – perioda mřížky (mřížková konstanta) = vzdálenost středů dvou sousedních štěrbin

Polarizace

- **nepolarizované světlo** – vektor intenzity \vec{E} je kolmý na směr šíření, ale mění směr
- **lineárně polarizované světlo** – vektor intenzity \vec{E} kmitá stále v jednom směru
- **polarizace světla odrazem** – \vec{E} kmitá v rovině dopadu, částečná, závisí na úhlu dopadu
- **polarizace světla dvojlomem** – paprsek dopadající na anizotropní krystal (např. islandský vápenec) se rozdělí na dva (řádný a mimořádný), jejichž \vec{E} jsou navzájem kolmé
- **polarizace světla absorpcí** – polarizačními filtry prochází pouze světlo, jehož \vec{E} má určitý směr, zbytek se pohltí
- polarizované světlo je okem nerozlišitelné, potřebujeme další polarizační filtr (analyzátor)
- polarimetrie – zkoumá opticky aktivní látky = látky, které mají schopnost stáčet rovinu polarizovaného světla
- fotoelasticimetrie – metoda zkoumání mechanického napětí v objektech
- LCD, CD

Fotometrie

- **svítivost** (I [cd]) – charakterizuje zdroj světla
- **světelný tok** (Φ [lm]) – energie vyzařená do prostoru za určitou dobu

$$\Phi = I\Omega$$

- Ω – prostorový úhel
- pro všesměrový izotropní zdroj platí

$$\Phi = 4\pi I$$

- **osvětlení** (E [lx]) – část světelného toku, který dopadá na plochu o obsahu S

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$$

- **Lambertův zákon**

$$\Omega = \frac{S \cos \varphi}{r^2}$$

$$\Phi = \frac{IS \cos \varphi}{r^2}$$

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varphi$$

- **radiometrie** – ostatní elektromagnetické záření
- **zářivost** (I_e [W/sr])
- **zářivý tok** (Φ [W])
- **intenzita ozáření** (E_e [W/m²])

23. Kvantová fyzika

- zabývá se mikrosvětlem
- struktura látky je diskrétní, skládá se z atomů
- velikost atomu: 10^{-10} , velikost atomového jádra: 10^{-15}
- $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Záření černého tělesa

- záření elektromagnetických vln má rychlost c

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- viditelné spektrum: 390 nm – 760 nm
- záření se může pohltit (vzroste vnitřní energie) nebo odrazit
- všechna záření vyzařují ze svého povrchu tepelné elektromagnetické záření
- vlnová délka se zkracuje s teplotou (500°C – IR, 900°C – červené, 1100°C – oranžové, 1300°C – žluté)
- žárovka = tepelné záření \times zářivka = výboj v plynu
- absolutně černé těleso = těleso, které veškeré dopadající záření pohltí a neustále tepelně vyzařuje
- vyzařuje na všech vlnových délkách, ale s různou intenzitou

$$M_e = \frac{P}{S}$$

- M_e – hustota vyzařování

$$M_\lambda = \frac{\Delta M_e}{\lambda}$$

- M_λ – spektrální hustota vyzařování
- charakterizuje, jak moc těleso vyzařuje záření dané vlnové délky
- v roce 1900 to teoreticky vysvětlil Max Planck s kvantovou hypotézou
- Wienův posunovací zákon

$$\lambda_{max} T = b$$

- $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$
- Stefan-Boltzmanův zákon

$$M_e = \sigma T^4$$

- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$

Kvantová hypotéza

- záření vydávané a pohlcované tělesem nemůže mít libovolnou energii
- je vydáváno a přijímáno v určitých dávkách, kvantech

$$E = hf$$

- $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ – Planckova konstanta

Fotoelektrický jev

- záření uvolňuje z povrchu elektrony
- vnější fotoelektrický jev – elektrony povrchem látky unikají, nastává fotoemise
- vnitřní fotoelektrický jev – dopadající záření zvyšuje vodivost polovodiče
- energie elektronů nezáleží na intenzitě záření, ale na jeho frekvenci
- pro každý kov existuje mezní frekvence f_0 , při které se elektrony začnou uvolňovat
- když je frekvence větší než f_0 , proud procházející obvodem je přímo úměrný intenzitě záření
- energie uvolněných elektronů roste lineárně s frekvencí dopadajícího záření
- energetická vlna se chová jako soubor částic, světelných kvant, které mají energii a hybnost
- foton = světelné kvantum

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- jeden foton předá energii jednomu elektronu
- energie se spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu (výstupní práce) a na jeho kinetickou energii

$$hf = W_v + E_k$$

- mezní frekvence (vlnová délka) uvolní elektron s nulovou kinetickou energií

$$f_0 = \frac{W_v}{h}$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{W_v}$$

- využití: solární elektrárny, fotosyntéza, fotorezistor, fotodiody, fotobuňka, polovodičový snímač obrazu

Comptonův jev

- rozptyl rentgenového záření na elektronech lze chápat jako pružnou srážku fotonu s elektronem
- foton při srážce odevzdá část své energie elektronu (E_e), ze zákona zachování energie pak plyne:

$$hf = hf' + E_e$$

$$f > f'$$

$$\lambda < \lambda'$$

- f' – frekvence po srážce
- λ' – vlnová délka po srážce
- ze zákona zachování hybnosti:

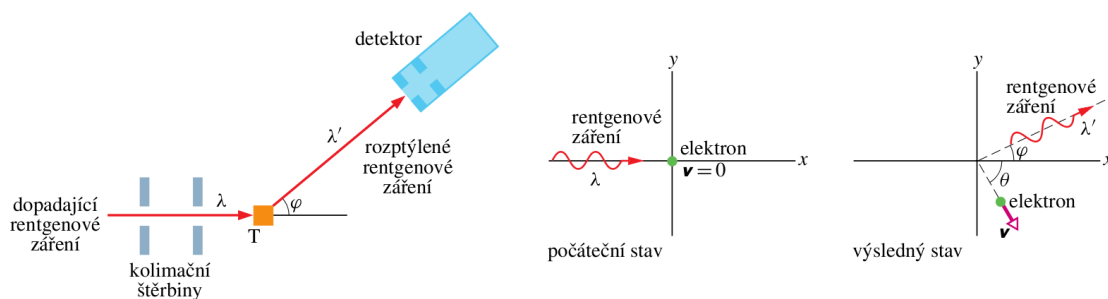
$$p = p' + p_e$$

$$\lambda' = \lambda - \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

- foton = elementární částice s nulovou klidovou hmotností

Vlnění nebo proud částic?

- obě možnosti: lom, odraz
- vlnění: interference (Youngův pokus se dvěma štěrbinami), difrakce (ohyb)
- proud částic: fotoelektrický jev, Comptonův jev
- korpuskulárně vlnový dualismus



Obrázek 57: Dopadající záření dodá energii elektronu.

De Broglieho vlny

- každé volně se pohybující částici přiřadíme frekvenci a vlnovou délku:

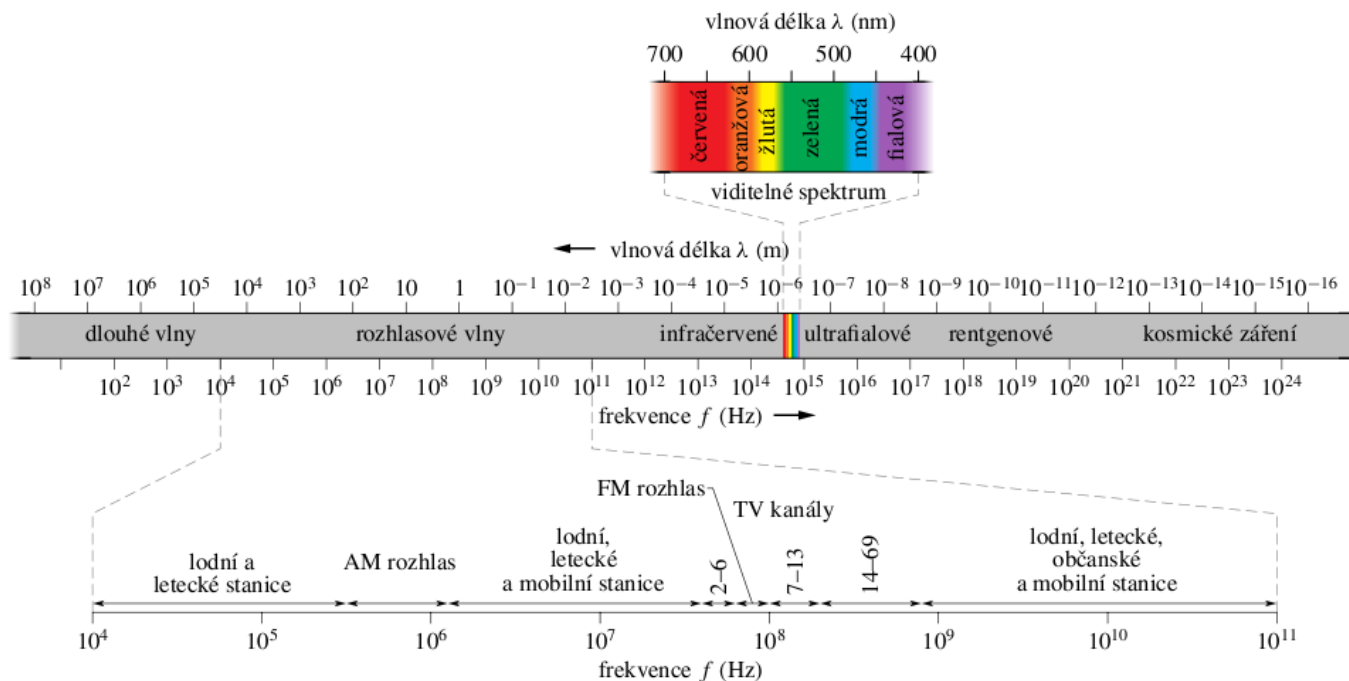
$$f = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

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

- m – relativistická hmotnost

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- částice mají vlnové vlastnosti, projevují se u elektronů, atomů, ...
- pravděpodobnostní charakter pohybu



Obrázek 58: Spektrum elektromagnetických vln.

Elektromagnetické spektrum

- elektromagnetické záření obsahuje všechny vlnové délky
- **gama záření** ($< 124 \text{ pm}$) – vzniká při energetických přeměnách v atomovém obalu
- **rentgenové záření** ($100 \text{ pm} - 10 \text{ nm}$) – Röntgen, diagnostika
- zdrojem je trubice zvaná **rentgenka** – žhavená katoda emituje elektrony, které jsou velkým kladným potenciálem přitahovány k anodě z wolframu, dopadají na ni velkou rychlostí a při tom vzniká rentgenové záření
- **ultrafialové záření** ($10 \text{ nm} - 390 \text{ nm}$) – opalování, ve větší míře škodlivé (rakovina kůže)
- **viditelné spektrum** ($390 \text{ nm} - 760 \text{ nm}$)
- **infračervené záření** ($760 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$) – termovize, dálkové ovládání televize
- **mikrovlny** ($1 \text{ mm} - 1 \text{ cm}$) – mikrovlnná trouba, ohřev jídla
- **radiové vlny** ($1 \text{ mm} - 100\,000 \text{ km}$) – přenos informací pomocí rádiových vln

24. Fyzika atomového obalu

Pudingový model atomu

- 1897 – J. J. Thompson
- objeven elektron katodovým zářením
- kladný náboj je rozložen rovnoměrně v celém atomu
- elektrony jsou jako rozinky a pudingu

Planetární model atomu

- 1911 – E. Rutherford
- nechal pronikat kladné alfa částice zlatou fólií (lze vytepat až na tloušťku jednoho atomu)
- objev atomového jádra – malé a těžké
- elektrony obíhají kolem jádra jako planety kolem Slunce

Bohrův model atomu

- 1913 – N. Bohr
- elektrony můžou obíhat pouze po určitých drahách
- umožňuje skok z jedné energetické hladiny do druhé
- nabitá částice pohybující se se zrychlením vyzařuje, ztrácí energii
- atom by se zhroutil a atom vodíku by byl prochý

Sommerfeldův model atomu

- 1925 – Sommerfeld
- eliptická dráha elektronů místo kruhové
- hlavní a vedlejší kvantové číslo – hlavní a vedlejší poloosa elipsy

Kvantově mechanický model atomu

- 1923 – de Broglie, Schrödinger
- elektrony se nachází v orbitalech s pravděpodobností 95%
- bere v úvahu dualismus částic
- $n = 1, 2, 3, \dots$ – hlavní kvantové číslo, určuje energii atomu
- $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ – vedlejší kvantové číslo, určuje tvar orbitalu (+ energii atomu)
- $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ – magnetické kvantové číslo, určuje orientaci v prostoru
- $s = \pm \frac{1}{2}$ – spinové číslo, určuje směr rotace orbitalu
- **konzistentní teorie** – ověřena spoustou experimentů

Struktura atomového obalu

- stav elektronu je popsán čtyřmi kvantovými čísly
- **přincip nerozlišitelnosti částic** – všechny jsou naprosto stejné, nejde je rozlišit
- **Pauliho vylučovací princip** – žádné dva elektrony v jednom systému nemají stejná všechna kvantová čísla
- platí pro částice zvané **fermiony**
- neplatí pro částice zvané **bosony** (např. fotony) – nemohou vytvářet struktury
- přidáváme-li elektron, zaujme takové místo, aby energie atomu v základ. stavu byla nejnižší a nebyl narušen Pvp
- **elektronová konfigurace** = celková soustava elektronů vytvářejících atomový obal

Optická spektra

- spojité spektrum – souvislý pás spektrálních čar získaný například rozkladem bílého světla



- emisní spektrum – pouze spektrální čáry, atomy plynu



- absorpční spektrum – doplněk emisního spektra



- pásové spektrum – přerušované spektrální pásy, molekuly



Spektrum vodíku

- pro frekvence spektrálních čar vodíku platí:

$$f = R_f \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n > m$$

- $R_f = 3,290 \cdot 10^{15}$ Hz – Rydbergova frekvence
- $m = 1$ – Lymanova série (ultrafialové oblast)
- $m = 2$ – Balmerova série (viditelné spektrum)
- $m = 3$ – Paschenova série (infračervená oblast)
- $m = 4$ – Brackettova série
- $m = 5$ – Pfundova série
- částice může ztrácet nebo získávat energii jen po kvantech, pro vodík pak platí:

$$hf_{mn} = hR_f \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = E_m - E_n$$

- energetické hladiny vodíku mohou nabývat takovýchto hodnot ($n \in \mathbb{N}$):

$$E_n = -\frac{hR_f}{n^2}$$

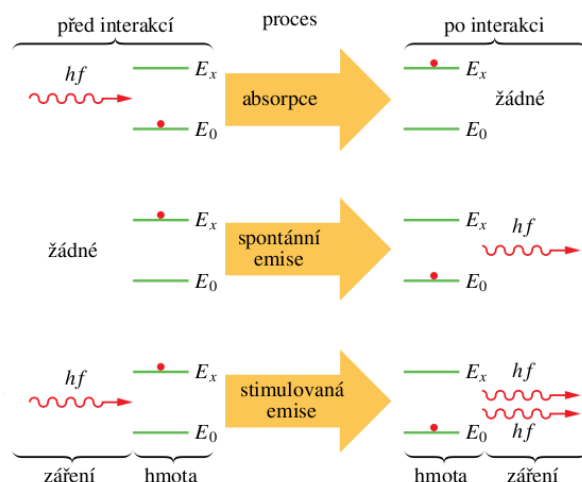
- záporné, protože atom je stabilní soustava a k jeho rozdělení potřebujeme energii
- **excitovaný stav** – vyšší energetická hladina
- **ionizace** – vytržení elektronu z atomu, $E \geq |E_1|$ – přebytečná energie = kinetická energie

Lasery

- při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu vyzáří atomy foton o energii

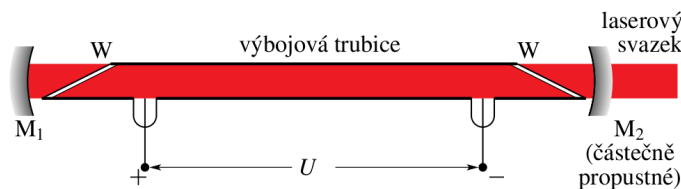
$$hf_{21} = E_2 - E_1$$

- **spontánní emise** – atom přejde samovolně do nižšího stavu, nekoordinované, nekoherentní záření
- **absorbce** – pohlcení atomu a přechod na vyšší energetickou hladinu
- **stimulovaná emise** – foton o frekvenci f_{21} dopadne na atom ve vyšším energetickém stavu – přejde do nižšího energetického stavu a vyzáří foton se stejnou frekvencí a fází jako původní foton



Obrázek 59: Reakce záření a atomu.

- více atomů na vyšší energetické hladině – převládá stimulovaná emise
- více atomů na nižší energetické hladině – převládá absorbce
- **polulační inverze** – dodaná energie způsobí, že je více atomů na vyšší energetické hladině
- **aktivní prostředí** – stav látky obohacené energií
- luminescence – spontánní, nahodilé vyzářování
- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- světelný paprsek v aktivním prostředí vyvolá lavinu přechodů
- vlastnosti: soustředěný, monochromatický, koherentní paprsek, velký výkon na malé ploše, velká frekvence pulsů
- využití: laser show, medicína, řezání, laserová myš, tiskárna, CD, DVD, optický kabel
- druhy: rubínový, plynový, pevnolátkový, neodýmový, polovodičový
- PALS – výkon 2,5 TW (1000 temelínů)



Obrázek 60: Schéma helium-neonového laseru.

25. Jaderná fyzika

Atomové jádro

- velmi malé (10^{-15}) v porovnání s velikostí atomu (10^{-10})
- skládá se z nukleonů (neutrony a protony)
- Z – protonové číslo (počet protonů v jádře)
- N – neutronové číslo (počet neutronů v jádře)

$$A = Z + N$$

- A – nukleonové (hmotnostní) číslo
- silné odpuzivé elektrostatické síly, aby bylo jádro stabilní, musí existovat přitažlivé **jaderné síly**
 1. jsou to přitažlivé síly velmi krátkého dosahu, na těchto vzdálenostech však překonávají odpuzivé elmg síly
 2. působí bez rozdílu na protony i neutrony
 3. projevují vlastnost nasycení, působí na malý počet okolních nukleonů
- velikost jádra je závislá na nukleonovém čísle

$$R = R_0 \sqrt[3]{A}$$

- $R_0 = 1,3 \cdot 10^{-15}$ m
- **kapkový model jádra** – jádro je kapkou velmi husté, těžko stlačitelné kapaliny (N. Bohr)
- hustota jádra je pro všechna jádra přibližně stejná (10^{17} kg/m³)

Vazebná energie

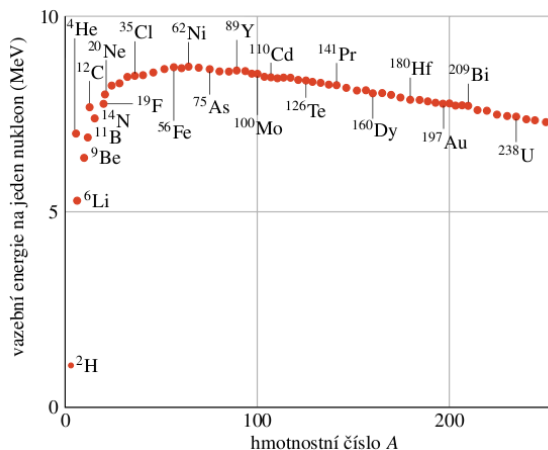
- práce potřebná k rozložení soustavy

$$E_v = (Zm_p + Nm_n - m_j)c^2$$

- $m_p = 1,672684 \cdot 10^{-27}$ kg – klidová hmotnost protonu
- $m_n = 1,674954 \cdot 10^{-27}$ kg – klidová hmotnost neutronu
- ($m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ kg – klidová hmotnost elektronu)
- m_j – klidová hmotnost jádra

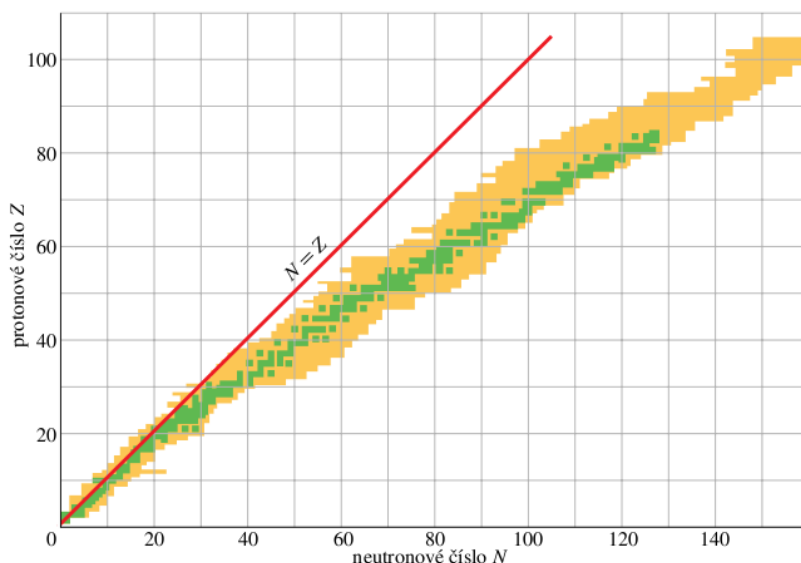
$$\epsilon_v = \frac{E_v}{A}$$

- ϵ_v – vazebná energie na jeden nukleon (největší pro $^{56}_{26}\text{Fe}$ – 8,79 MeV)



Obrázek 61: Vazebná energie na jeden nukleon je pro různá jádra rozdílná.

- spojováním (syntézou) lehkých jader se vytvářejí těžší, stabilnější jadra a uvolňuje se energie
- stěpením těžkých jader se vytváří lehčí, stabilnější jadra a uvolňuje se energie
- těžká jadra vznikají za mimořádných kosmických podmínek, například při výbuších supernov
- velmi stabilní jsou jadra, jejichž počet protonů a neutronů je dán **magickými čísly** (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126)
- jadra mají při malých Z přibližně stejný počet protonů a neutronů, později začínají mít neutrony převahu
- **slupkový model jádra** – nukleony zaujímají energetické hladiny a vyzařují fotony ($f \doteq 10^{19} - 10^{22}$ Hz)



Obrázek 62: Stabilní jadra mají přibližně stejný počet protonů a neutronů.

Radioaktivita

- radius = paprsek, activitas = aktivita
- schopnost některých atomových jader vysílat záření, takové jádro se může změnit na jiné, nebo alespoň ztratí část energie
- stabilní nuklidy \times **radionuklidy**
- 1896 – objev přirozené radioaktivity (A. H. Becquerel)
- existují 3 druhy radioaktivního záření – alfa, beta, gama

Alfa záření

- svazek rychle letících atomů helia
- pohltí se listem papíru
- alfa zářič je nebezpečný při vdechnutí či požití
- vychyluje se v elektrickém i magnetickém poli

Beta záření

- rychle letící elektrony
- pohltí se tenkým hliníkovým plechem
- vychyluje se v elektrickém i magnetickém poli, ale na opačnou stranu, než záření alfa
- uměle vytvořené radionuklidy mohou vyzařovat pozitrony (antičástice k elektronu), rozlišujeme záření β^+ a β^-

Gama záření

- elektromagnetické záření ($\lambda < 300 \text{ pm}$)
- nejpronikavější – pohltí se silnější vrstvou olova
- nevychyluje se v elektrickém ani magnetickém poli (fotony nemají elektrický náboj)
- silně ionizuje atomy a uvolňuje z látky nabitě částice v důsledku fotoelektrického jevu, Comptonova jevu a tvorby elektron-pozitronových párů

Neutronové záření

- proud rychle letících neutronů
- lze získat z neutronových zdrojů, ve kterých probíhají jaderné reakce za vzniku neutronů, nebo v jaderných reaktorech
- vysoká pronikavost, protože nenese elektrický náboj, neztrácí tudíž energii ionizací
- zpomalují se pouze pružnými srážkami s atomovými jádry a to tím výrazněji, čím je hmotnost jader blíže hmotnosti neutronu
- pohlcuje se pomocí materiálů obsahujících jádra vodíku a jiných lehkých prvků: voda, těžká voda, parafín, beton

Rozpadový zákon

- **aktivita** – počet radioaktivních přeměn za jednu sekundu
- počet jader radionuklidu se mění tak, že vždy po uplynutí nějaké doby klesne na polovinu

$$N(t) = N(0) \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

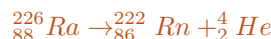
- T – poločas rozpadu

$$\frac{1}{2} = e^{-\ln 2}$$

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

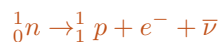
- λ – rozpadová konstanta
- **alfa rozpad** – protonové číslo klesne o 2, nukleonové o 4



- **beta rozpad** – protonové číslo se zvětší o 1 (β^-)/klesne o 1 (β^+), nukleonové se nezmění



- beta rozpadu podléhá i volný neutron



- **umělá radioaktivita** – ostřelováním jádra alfa částicemi vzniká nový prvek a neutron



- ostřelovat lze nabitými částicemi, neutrony, těžkými ionty
- **transurany** – radionuklidy s protonovým číslem větším než 92

Jaderná fúze

- slučování lehkých jader
- spojování svou jader vodíku na jádro deutéria



- probíhá na slunci, k získávání energie na Zemi se nehodí
- k technickému využití ve fúzních elektrárnách se předpokládá využití reakcí mezi deuteriem a tritiem



- případně reakce mezi dvěma jádru deuteria



- tritium je v přírodě vzácné, ve radioaktivní a dosti toxické, musí se získávat z lithia ozařováním neutrony
- aby mohlo dojít ke spojení jader, je nutné jádra urychlit a dodat jím tak **aktivační energii**
- **termojaderné reakce** – jádra jsou zahřívána na vysokou teplotu, látka je ve stavu plazmatu
- ve hvězdách je plazma udržováno grav. silami, aby byla reakce možná na Zemi, musí mít někdo geniální nápad

Jaderné štěpení

- těžká jádra lze rozštěpit zpomaleným neutronem



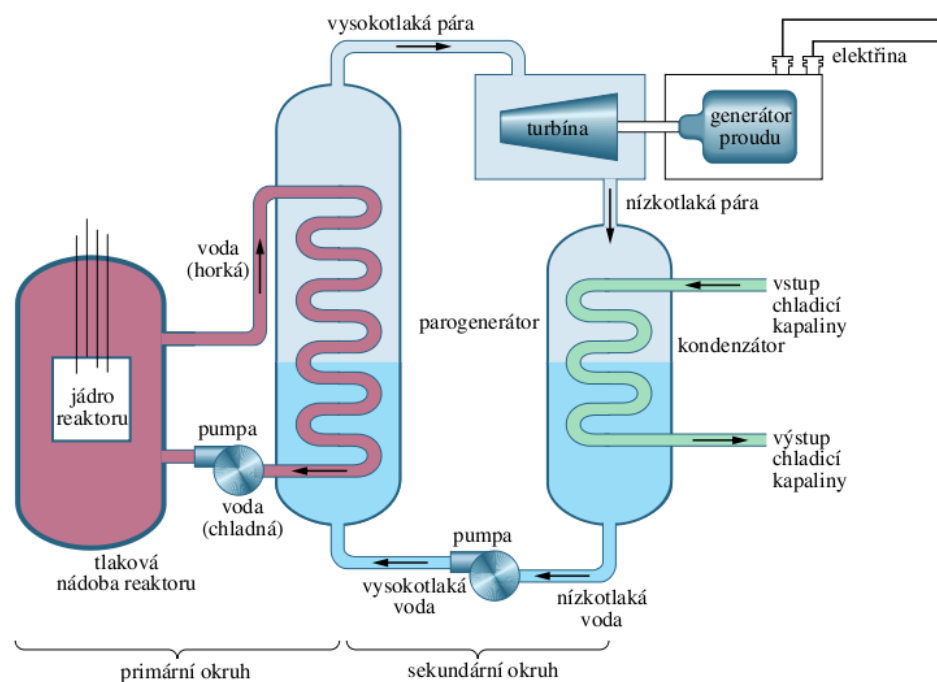
- je-li neutron pomalý, je pravděpodobnost zásahu jádra větší
- **moderátor** – látka sloužící ke zpomalování neutronů (voda, těžká voda, parafin, grafit, ...)
- **kritické množství** – množství štěpného materiálu potřebné k tomu, aby nastala **řetězová reakce**
- existují pouze 4 nuklidy, v nichž je možno uskutečnit jadernou reakci: uran 235 a 233, plutonium 239 a 241
- uran 235 lze těžit (0,72% v přírodním uranu 238) – jaderná energetika je založená na tomto nuklidu
- plutonium vyrobíme ozařováním uranu 238 a uran 233 ozařováním thoria 232 neutrony

Jaderné reaktory

- palivo – obohacený uran, v palivových tyčích
- moderátor – voda, těžká voda, grafit
- voda ohřívá v reaktoru proudí do parogenerátoru, kde ohřívá vodu v druhém okruhu
- tato pára už není radioaktivní a pohání turbínu
- využije asi 1/3 jaderné energie
- reaktor chráněn odolnou betonovou vrstvou

Jaderné elektrárny

- Jaslovské Bohunice (V1 a V2 po dvou reaktorech) – VVER (tlakovodní reaktory voroněžského typu)
- Dukovany (4 reaktory) – VVER
- Temelín (2 reaktory)
- rychlé množivé reaktory – vyrábí zároveň i další palivo, technicky náročnější
- havárie: Windscale, Anglie (1957), Three Mile Island, USA (1979), Černobyl, Ukrajina (1986)



Obrázek 63: Schéma jaderného reaktoru.

Termojaderná energetika

- plazma lze udržet a izolovat pomocí magnetického pole – tokamak (JET, ITER)
- řídké plazma, které je možné uchovat po dobu několika sekund
- jiná cesta – plazma vznikající na povrchu terče z pevné látky ozářením krátkými pulsy laseru, nebo svazků částic
- poměrně husté plazma, nicméně na velmi krátkou dobu
- nutné najít způsob, jak energii z plazmatu odvést

Využití radioaktivního záření

- jaderné záření se při průchodu látkou oslabuje – defektoskopie
- materiály vlivem záření mění své vlastnosti
- medicína – diagnostika, léčení zhoubných nádorů
- termočlánky využívající teplo uvolňované při radioaktivní přeměně
- měření stáří hornin a organických materiálů (uhlíková metoda)
- může způsobit změnu genetické informace

Detekce částic

- přímá – nabitá částice
- nepřímá – neutrální částice
- zkoumáme ionizační účinky
- ionizační komora – vyplněná plynem, prochází slabý elektrický proud
- ionizující záření zvětší protékající proud
- Geiger-Müllerův počítač – výboj v plynu probíhá mezi válcovou katodou a anodou z tenkého drátu
- mezi nimi je vysoké napětí – ionizující částice způsobí lavinovou ionizaci (samostatný výboj)
- scintilační sonda – detekce fotonů, dopadne-li foton na luminofor, zmenší se jeho frekvence

- **fotonásobič** – záření, které prošlo scintilační sondou dopadá na látku, ze které vyrazí elektron
- ten je přitahován elektrickým polem a postupně vyrazí další elektrony
- **Wilsonova mlžná komora** – zobrazí dráhu → lze zjistit rychlost
- přesycená pára kondenzuje při průchodu ionizující částice
- **polovodičové detektory** – založené na fotoefektu

Urychlovače částic

- elektrické pole urychluje
- magnetické pole zakřivuje trajektorii
- **lineární urychlovač** (SLAC) – řada válcových elektrod, které se zvětšují
- nevýhody: příliš dlouhý, jeden průlet – jedno urychlení, nemůžou se srážet
- **kruhový urychlovač** (LHC) – částice se pohybují po zakřivené dráze v magnetickém poli

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$\omega_c = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- ω_c – cyklotronová úhlová frekvence
- synchrotrony – proměnné magnetické pole způsobuje, že se částice mohou pohybovat po stále stejné dráze
- k dosažení větší energie se využívá **vstřícných svazků**

Systém částic

- **antičástice** – mají stejnou hmotnost, ale opačné znaménko elektrického náboje, magnetického momentu a některých kvantových čísel
- teoreticky předpovězeny relativistickou kvantovou teorií pohybu elektronu – P. Dirac
- **anihilace částic** – při srážce částice a antičástice, vzniká záření gama



- "nihil" = nic – nepřesné, úplné uvolnění energie (přeměna v částice s nulovou klidovou hmotností)
- foton gama se v blízkosti jádra může přeměnit v elektron-pozitronový pár
- **fermiony** – neceločíselný spin, podřizují se Pauliho vylučovacímu principu
- **bosony** – celočíselný spin
- **hadrony** – působí mezi sebou silnými jadernými silami
- **leptony** – působí mezi sebou slabými silami, fermiony (elektron, mion, tauon, neutrina)
- **mezony** – lehčí hadrony, bosony (pion, kaon, éta)
- **baryony** – těžší hadrony, fermiony (proton, neutron, hyperiony)
- hadrony se skládají z **kvarků** (up, down, charm, strange, truth, beauty) – vůně
- kvantové stavy – barvy
- mezon = kvark + antikvark
- hadrony = 3 kvarky