

Maturitní otázky z fyziky

Adam Krška

Obsah

1 Kinematika hmotného bodu	11
1.1 Druhy pohybů	11
1.1.1 Dle trajektorie	11
1.1.2 Dle rychlosti	12
2 Dynamika	12
2.1 Síla	12
2.2 Interakce těles	13
2.2.1 Gravitace	13
2.2.2 Elektromagnetická síla	13
2.2.3 Slabé interakce	13
2.2.4 Silné interakce	14
2.3 Newtonovy zákony	14
2.3.1 První Newtonův zákon – zákon setrvačnosti	14
2.3.2 Druhý Newtonův zákon – zákon síly	14
2.3.3 Třetí Newtonův zákon – zákon akce a reakce	14
2.4 Hybnost	14
2.4.1 Zákon zachování hybnosti	15
2.4.2 Zákon zachování momentu hybnosti	15
2.5 Druhy sil	15
2.5.1 Dostředivá síla	15
2.5.2 Odstředivá síla	15
2.5.3 Setrvačná síla	16
2.5.4 Třecí síla	16
3 Druhy energie a jejich vzájemná přeměny. Zákony zachování	16
3.1 Mechanická práce	16
3.2 Mechanická energie	16
3.2.1 Kinetická energie	17
3.2.2 Potenciální energie	17
3.3 Zákony zachování	18
3.3.1 Zákon zachování mechanické energie	18
3.3.2 Zákon zachování energie	19
3.4 Perpetuum mobile	19
3.4.1 První typ	19
3.4.2 Druhý typ	19
3.5 Využití přeměny energie	19
4 Mechanika tuhého tělesa	19
4.1 Tuhé těleso	19
4.2 Moment síly	19
4.2.1 Dvojice sil	20
4.2.2 Momentová věta	20
4.3 Skládání sil	20
4.3.1 Rovnoběžné síly na společné vektorové přímce	21
4.3.2 Různoběžné síly	21
4.3.3 Rovnoběžné síly ležící na různých vektorových přímkách	22
4.4 Otáčivý pohyb	22
4.4.1 Moment setrvačnosti	24
4.5 Rovnovážné polohy	24
4.5.1 Stabilní poloha	24

4.5.2	Labilní poloha	24
4.5.3	Indiferentní poloha	24
4.6	Jednoduché stroje	24
4.6.1	Páka	25
4.6.2	Kladka	25
4.6.3	Nakloněná rovina	25
5	Mechanika kapalin a plynů	25
5.1	Vlastnosti	25
5.1.1	Ideální tekutina	25
5.2	Tlak	26
5.2.1	Tlak tříhové síly	26
5.2.2	Vnější síla – Pascalův zákon	26
5.2.3	Vztlaková síla	27
5.3	Proudění tekutin	27
5.3.1	Rovnice spojitosti	28
5.3.2	Bernoulliho rovnice	28
5.3.3	Skutečné proudění	29
5.4	Odporová síla	29
5.4.1	Fyzika letu	30
6	Gravitační pole a pohyb těles v tomto poli	30
6.1	Gravitační pole	30
6.1.1	Gravitační síla	30
6.1.2	Intenzita gravitačního pole	31
6.1.3	Gravitační zrychlení	31
6.1.4	Tříhová síla a zrychlení	31
6.2	Typy dle tvaru	32
6.2.1	Radiální	32
6.2.2	Homogenní	32
6.3	Pohyb v homogenním gravitačním poli	33
6.3.1	Volný pád	33
6.3.2	Svislý vrh vzhůru	33
6.3.3	Svislý vrh dolů	33
6.3.4	Vodorovný vrh	33
6.3.5	Šikmý vrh	34
6.4	Pohyb v radiálním gravitačním poli	35
6.4.1	Pohyb po kružnici	35
6.4.2	První kosmická rychlosť	35
6.4.3	Druhá kosmická rychlosť	36
6.4.4	Třetí kosmická rychlosť	36
7	Sluneční soustava, Keplerovy zákony	36
7.1	Modely sluneční soustavy	36
7.1.1	Geocentrismus	36
7.1.2	Heliocentrismus	36
7.2	Slunce	37
7.2.1	Fyzikální vlastnosti	37
7.3	Planety sluneční soustavy	37
7.3.1	Merkur	37
7.3.2	Venuše	37
7.3.3	Země	38
7.3.4	Mars	38
7.3.5	Jupiter	38

7.3.6	Saturn	38
7.3.7	Uran	38
7.3.8	Neptun	39
7.4	Další objekty sluneční soustavy	39
7.4.1	Trpasličí planety	39
7.4.2	Komety	39
7.4.3	Planetky	39
7.4.4	Měsíc / přirozený satelit	39
7.5	Vesmírné jednotky	40
7.5.1	Astronomická jednotka	40
7.5.2	Světelný rok	40
7.5.3	Parsec	40
7.6	Keplerovy zákony	40
7.6.1	První Keplerův zákon	41
7.6.2	Druhý Keplerův zákon	41
7.6.3	Třetí Keplerův zákon	41
8	Základní poznatky molekulové fyziky a termodynamiky	42
8.1	Kinetická teorie stavby látek	42
8.1.1	Důkazy neuspořádaného pohybu	42
8.2	Síly mezi částicemi	43
8.3	Energie častic	43
8.3.1	Vazebná energie	43
8.3.2	Kinetická energie	43
8.4	Vzájemné působení častic	44
8.4.1	Pevné látky	44
8.4.2	Kapalné látky	44
8.4.3	Plynné látky	44
8.4.4	Plazma	46
8.5	Stav soustavy	46
8.5.1	Soustavy	46
8.5.2	Rovnovážný stav soustavy	46
8.6	Termodynamická teplota	46
8.6.1	Teploměr	46
9	Vnitřní energie, práce, teplo	47
9.1	Vnitřní energie	47
9.1.1	Změny vnitřní energie	47
9.2	Teplo	48
9.2.1	1. termodynamický zákon	48
9.2.2	Kalorimetrická rovnice	48
10	Struktura a vlastnosti plynného skupenství	49
10.1	Mechanické vlastnosti	49
10.1.1	Ideální plyn	49
10.2	Stav plynu	49
10.2.1	Stavové veličiny	49
10.2.2	Stavová rovnice	49
10.3	Děje v ideálním plynu	49
10.3.1	Izotermický	49
10.3.2	Izochorický	50
10.3.3	Izobarický	50
10.3.4	Adiabatický	51
10.3.5	Kruhový	51

10.4 Druhý termodynamický zákon	52
10.5 Plyn při nízkém a vysokém tlaku	52
10.5.1 Nízký tlak	52
10.5.2 Vysoký tlaku	53
10.6 Tepelné motory	53
10.6.1 Parní stroj	53
10.6.2 Turbíny	53
10.6.3 Zážehové motory	54
11 Struktura a vlastnosti pevných látek	54
11.1 Mechanické vlastnosti	54
11.1.1 Struktura látek	54
11.1.2 Izotropie	54
11.1.3 Poruchy mřížky	55
11.2 Typy vazeb	56
11.2.1 Iontová	56
11.2.2 Kovová	56
11.2.3 Kovalentní	56
11.2.4 Vodíková (vodíkový můstek)	56
11.2.5 Van der Waalsova	56
11.3 Deformace	56
11.3.1 Deformace působením sil	57
11.3.2 Hookův zákon	57
11.3.3 Teplotní roztažnost	58
12 Struktura a vlastnosti kapalin	58
12.1 Mechanické vlastnosti	58
12.1.1 Ideální kapalina	58
12.2 Povrchová vrstva	58
12.2.1 Povrchová síla	59
12.2.2 Povrchové napětí	59
12.3 Jevy na rozhraní prostředí	60
12.3.1 Síly působící na molekuly	60
12.3.2 Stykový úhel	60
12.3.3 Kapilární tlak	61
12.4 Kapilární jevy (Kapilarita)	61
12.4.1 Praxe	61
12.5 Objemová roztažnost	62
12.5.1 Anomálie vody	62
13 Změny skupenství	62
13.1 Typy změn skupenství	62
13.2 Energetické změny	63
13.2.1 Skupenské teplo	63
13.2.2 Měrné skupenské teplo	63
13.3 Fázový diagram	63
13.4 Pára	65
13.4.1 Sytá pára	65
13.4.2 Přehřátá pára	65

14 Mechanické kmitání	65
14.1 Kinematika kmitavého pohybu	65
14.1.1 Veličiny	65
14.1.2 Poloha tělesa při kmitavém pohybu	66
14.1.3 Rychlosť kmitavého pohybu	66
14.1.4 Zrychlení kmitavého pohybu	67
14.1.5 Skládání kmitů	67
14.2 Dynamika kmitavého pohybu	67
14.2.1 Pružina	68
14.2.2 Kyvadlo	68
14.3 Rezonance	69
14.4 Energie kmitání	70
14.4.1 Pružina	70
14.4.2 Kyvadlo	70
15 Mechanické vlnění	71
15.1 Rovnice postupného vlnění	71
15.2 Interference	71
15.3 Odraz	72
15.4 Stojaté vlnění	72
15.5 Huygensův princip	75
15.6 Zvuk	75
16 Elektrické pole	76
16.1 Elektrický náboj	76
16.2 Coulombův zákon	76
16.3 Intenzita el. pole	76
16.3.1 Tvar elektrické pole	77
16.4 Elektrický potenciál	77
16.4.1 Elektrické napětí	78
16.5 Práce v el. poli	78
16.6 Elektrická kapacita	78
16.6.1 Kondenzátor	78
16.7 Látky v elektrickém poli	79
16.7.1 Vodiče	79
16.7.2 Izolanty	79
17 Vznik elektrického proud, elektrický proud v kovech	80
17.1 Elektrický proud	80
17.1.1 Podmínky vzniku	80
17.2 Elektrická vodivost kovů	80
17.3 Ohmův zákon	80
17.4 Elektrický odpor	80
17.4.1 Zapojení rezistorů	81
17.4.2 Supravodivost	82
17.4.3 Termoelektrický jev	82
17.5 Kirchhoffovy zákony	82
17.5.1 První Kirchhoffův zákon	82
17.5.2 Druhý Kirchhoffův zákon	83
17.6 Práce a výkon el. proudu	83
17.6.1 Elektrická práce	83
17.6.2 Elektrický výkon	84
17.6.3 Účinnost	84

18 Elektrický proud v polovodičích	84
18.1 Elektron-díra	84
18.2 Vlastní vodivost	85
18.3 Příměsová vodivost	85
18.4 PN přechod – Dioda	85
18.4.1 Závěrný směr	86
18.4.2 Propustný směr	86
18.5 Využití polovodičů	86
18.6 Tranzistory	86
18.6.1 Bipolární tranzistory	86
18.6.2 Unipolární tranzistory	86
19 Elektrický proud v elektrolytech, plynech a ve vakuu	87
19.1 Elektrolytický vodič	87
19.1.1 Disociace	87
19.1.2 Faradayovy zákony elektrolýzy	87
19.1.3 Galvanický článek	88
19.1.4 Využití	89
19.2 Výboj plynu	90
19.2.1 Elektrický výboj	90
19.2.2 Výboj podle doby trvání	91
19.2.3 Využití	91
19.3 Proud ve vakuu	91
19.3.1 Elektronka	91
20 Stacionární a nestacionární magnetické pole	91
20.1 Magnetické pole	91
20.1.1 Stacionární mag. pole	92
20.1.2 Nestacionární mag. pole	92
20.1.3 Ampérovo pravidlo pravé ruky	92
20.2 Magnetická indukce	92
20.2.1 Nabité částice v mag. poli	92
20.2.2 Působení mag. pole na vodič	94
20.2.3 Magnetické pole paralelních vodičů	94
20.3 Vytváření magnetického pole	95
20.3.1 Přímý vodič	95
20.3.2 Cívky	95
20.4 Magnetický indukční tok	95
20.5 Energie magnetického pole cívky	95
20.6 Magnetické vlastnosti látek	96
20.6.1 Permeabilita	96
20.6.2 Diamagnetické látky	96
20.6.3 Paramagnetické látky	96
20.6.4 Feromagnetické látky	96
20.6.5 (Magnetické) hystereze	96
20.7 Elektromagnetická indukce	97
20.7.1 Indukčnost	97
20.7.2 Vlastní indukce	97
20.8 Foucaultovy proudy	97

21 Strídavý elektrický proud	98
21.1 Součástky v obvodu se střídavým napětím	98
21.1.1 Rezistor	98
21.1.2 Cívka	98
21.1.3 Kondenzátor	99
21.2 RLC Obvod	99
21.2.1 Sériový RLC obvod	99
21.2.2 Impedance	100
21.2.3 Fázový posun	100
21.2.4 Resonance sériového RLC obvodu	100
21.3 Hodnoty střídavého proudu	100
21.3.1 Efektivní hodnota proudu	100
21.3.2 Efektivní hodnota napětí	100
21.3.3 Výkon	101
21.4 Zařízení střídavého proudu	101
21.4.1 Alternátor	101
21.4.2 Třífázový generátor (třífázový alternátor)	101
21.4.3 Transformátor	101
21.4.4 Třífázová soustava střídavého napětí	103
22 Elektromagnetické vlnění	103
22.1 Maxwellova teorie	103
22.1.1 První Maxwellova rovnice	104
22.1.2 Druhá Maxwellova rovnice	104
22.1.3 Třetí Maxwellova rovnice	105
22.1.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice	105
22.2 Elektromagnetický oscilátor	105
22.2.1 Nejjednodušší oscilátor	105
22.3 Vlastnosti elektrického vlnění	106
22.3.1 Parametry elmag. vlny	107
22.4 Vlastní a nucené kmitání elmag. vln	107
22.4.1 Vlastní kmitání	107
22.4.2 Nucené kmitání	107
22.5 Elektromagnetický dipól	107
22.6 Šíření elektromagnetických vln	108
22.6.1 Typy elektrických vln	108
23 Světlo, vlnové vlastnosti světla	109
23.1 Základní pojmy	111
23.1.1 Optické prostředí	111
23.1.2 Světelný zdroj	111
23.1.3 Rychlosť světla	111
23.2 Zákony a principy	111
23.2.1 Zákon přímočáreho šíření světla	111
23.2.2 Princip nezávislosti světelných paprsků	112
23.2.3 Zákon odrazu	112
23.2.4 Snellův zákon (zákon lomu)	112
23.3 Rozklad světla	113
23.4 Interference světla	114
23.4.1 Interference na tenké vrstvě	114
23.5 Ohyb světla na dvojštěrbině, mřížce	114
23.5.1 Dvojštěrbina	116
23.5.2 Mřížka	116
23.6 Polarizace světla	117

23.6.1 Druhy polarizace	117
23.6.2 Zdroje	117
24 Optické soustavy a optická zobrazení	117
24.1 Základní pojmy	118
24.1.1 Obraz	118
24.1.2 Ohnisko	118
24.1.3 Střed křivosti	118
24.1.4 Zobrazovací rovnice	118
24.1.5 Konvence znamének a značení	119
24.1.6 Významné paprsky	119
24.2 Zobrazení zrcadlem	119
24.2.1 Rovinné zrcadlo	119
24.2.2 Vypuklé zrcadlo	119
24.2.3 Duté zrcadlo	120
24.3 Zobrazení čočkou	120
24.3.1 Spojka	120
24.3.2 Rozptylka	120
24.4 Oko jako optická soustava	120
24.4.1 Rohovka	120
24.4.2 Čočka	122
24.4.3 Sklivec	122
24.4.4 Sítnice	122
24.4.5 Vady oka	122
24.4.6 Zorný úhel	123
24.5 Paraxiální prostor	123
24.6 Optické přístroje	123
24.6.1 Lupa	123
24.6.2 Mikroskop	123
24.6.3 Dalekohled	124
25 Základní pojmy kvantové fyziky	124
25.1 Planckova kvantová hypotéza	124
25.2 Absolutně černé těleso	125
25.2.1 Wienův posunovací zákon	125
25.3 Fotoelektrický jev	125
25.3.1 Druhy fotoefektu	126
25.4 Comptonův jev	126
25.5 Vlastnosti fotonů	126
25.6 Korpuskulárně vlnový dualismus	126
25.7 Huygensův princip	127
25.7.1 Dvouštěrbinový experiment	127
25.8 Popis částic v mikrosvětě	128
25.8.1 Heisenbergův princip neurčitosti	128
25.8.2 Vlnová funkce	128
25.9 Laser	128
26 Elektronový obal atomu, atomové jádro, elementární částice	129
26.1 Atomová vs Jaderná fyzika	129
26.2 Vlastnosti atomu	129
26.3 Modely atomu	129
26.3.1 Thomsonův (pudinkový) model	129
26.3.2 Ruthefordův model	129
26.3.3 Bohrův model	129

26.3.4 Kvantově mechanický model	129
26.4 Kvantová čísla	130
26.4.1 Hlavní kvantové číslo – n	130
26.4.2 Vedlejší kvantové číslo – l	130
26.4.3 Magnetické číslo – m	130
26.4.4 Spinové číslo – s	130
26.5 Pauliho vylučovací princip	130
26.6 Elementární částice	131
26.6.1 Fermiony	131
26.6.2 Bosony	131
26.7 Jaderná fyzika	131
26.7.1 Radioaktivita	131
26.7.2 Poločas rozpadu	132
26.7.3 Jaderné reakce	133

1 Kinematika hmotného bodu

- kinematika – část fyziky zabývající se pohybem, avšak ne jeho příčinami
- sledování polohy, rychlosti, zrychlení atd.
- veličiny
 - vektor – veličina o směru a velikosti
 - skalár – pouze rozměr / jedno číslo
- mechanický pohyb
 - pohyb, při kterém se mění poloha
 - vyjádřeno vždy v relaci k jinému tělesu – vztažné soustavy
 - hmotný bod – bezrozměrný bod v prostoru s určitou hmotností, approximace těles
- trajektorie – křivka pohybu tělesa (přímka, parabola, kružnice...)
- dráha – délka trajektorie uražena za určitý čas
- rychlosť – změna dráhy v čase

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

- zrychlení – změna rychlosti v čase

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

1.1 Druhy pohybů

1.1.1 Dle trajektorie

Přímočarý

- pohyb po přímce, směr vektoru rychlosti se nemění

Křivočarý

- pohyb po jakoli zakřivené trajektorii (kružnice, šroubovice, otáčení...)

Pohyb po kružnici

- speciální případ křivočarého pohybu
- trajektorií kružnice
- poloha hmotného bodu určena průvodičem
- $r = \text{konst}$
- úhlová dráha φ , $[\varphi] = \text{rad}$ – úhel opsaný průvodičem
- délka oblouku $s = r\varphi$
- úhlová rychlosť ω , $[\omega] = \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ – změna úhlu $\Delta\varphi$ opsána za čas Δt

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \Rightarrow \omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

- obvodová rychlosť v , $[v] = \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – rychlosť tělesa po obvodu

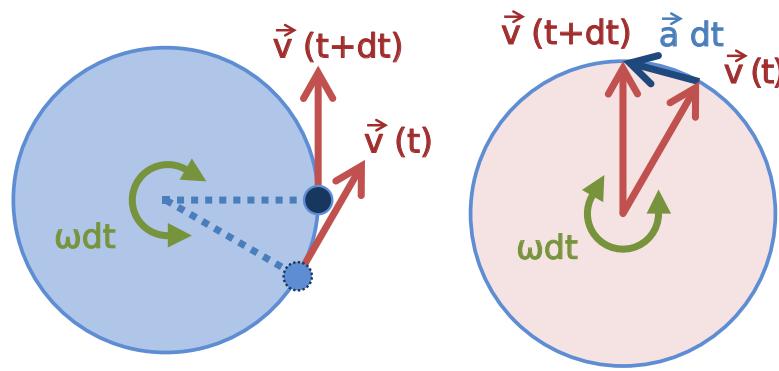
$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{d(\varphi r)}{dt} = \omega r$$

- perioda T , $[T] = \text{s}$ – čas, za který se bod dostane do původní polohy

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

- frekvence f , $[f] = \text{s}^{-1}$ – počet zopakování periody za jednotku času; převrácená hodnota periody

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi r}$$



Obr. 1.1: Znázornění pohybu po kružnici

1.1.2 Dle rychlosti

Rovnoměrný pohyb

- těleso za stejné časové úseky urazí stejnou dráhu
- velikost rychlosti je konstantní
- dráha lineárně roste

$$s(t) = vt + s_0$$

Nerovnoměrný pohyb

- těleso za stejné časové úseky urazí různou dráhu
- $v \neq \text{konst}$
- grafem dráhy libovolná křivka

Rovnoměrný zrychlený pohyb

- nerovnoměrný pohyb, ovšem s konstantní změnou rychlosti – zrychlení a
- rychlosť v čase lineární

$$v(t) = at + v_0$$

- grafem dráhy kvadratická funkce
 - počáteční podmínky nulové

$$s(t) = \int_0^t v(t) dt = \int_0^t at dt = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}vt$$

– počáteční podmínky nenulové

$$s(t) = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

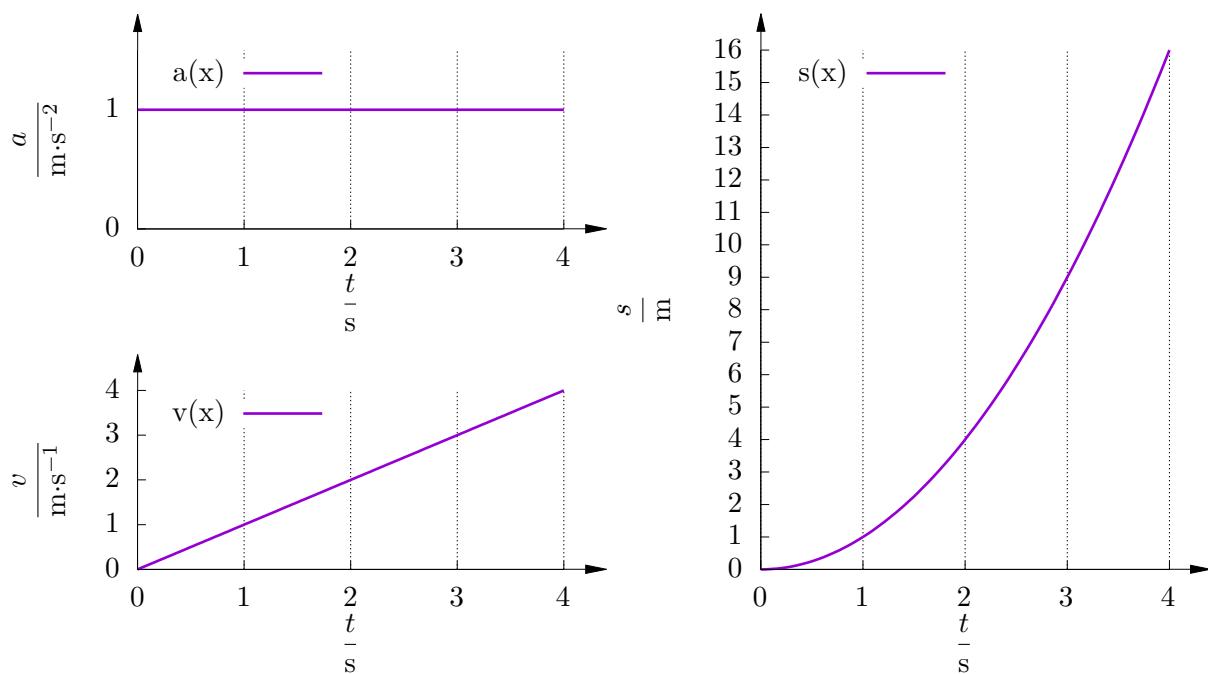
- zpomalený pohyb – rychlosť tělesa se snižuje, zpomalování

2 Dynamika

- část mechaniky, zabývající se příčinami pohybu těles

2.1 Síla

- značka \mathbf{F} , $[F] = \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- vektorová veličina, míra vzájemného působení těles
- přímé měření siloměrem
- deformační a pohybové účinky



Obr. 1.2: Graf dráhy, rychlosti a zrychlení rovnoměrně zrychleného pohybu

2.2 Interakce těles

- umožňují popsat všechny známé způsoby vzájemného silového působení částic a pole
- 4 základní síly
 - gravitace
 - elektromagnetická síla
 - slabá jaderná síla / slabé interakce
 - silná jaderná síla / silné interakce
- ostatní působení možno vyjádřit jako výsledek působení základní sil

2.2.1 Gravitace

- nej slabší interakce, nej delší dosah
- univerzální působení na všechny látky a energie
- úměrná hmotnosti těles a klesá s kvadrátem vzdálenosti
- nej větší význam v makro-úrovni: pád těles, pohyb planet, černé díry...
- teoretickým nosičem graviton (nicméně nepotvrzen)

2.2.2 Elektromagnetická síla

- působení mezi elektricky nabitémi částicemi
- tělesa v klidu – elektrostatická síla
- tělesa v pohybu – kombinace elektrické a magnetické síly
- relativně silná; od laserů a rozhlasu až po strukturu atomu kovů a duhu
- popsán Maxwellovými rovnicemi
- nosičem fotony

2.2.3 Slabé interakce

- působení na leptony a kvarky, jediná síla působící na neutrino (při zanedbání neměřitelné gravitační síly)
- umožňuje interakce leptonů a kvarků
- nosiči bosony W^\pm a Z

2.2.4 Silné interakce

- drží nukleony a kvarky u sebe v jádřech atomů
- udrží protony u sebe i přes elektromagnetické odpuzování
- nosiči gluony

2.3 Newtonovy zákony

- popis vztahu mezi pohybem těles a působícími silami v inerciální vztažné soustavě

2.3.1 První Newtonův zákon – zákon setrváčnosti

- „*Jestliže na těleso nepůsobí žádné vnější síly, nebo výslednice sil je 0, pak těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.*“
- pokud na těleso nepůsobí síla nebo výslednice je nulová, pohybuje se těleso bez zrychlení
- inerciální vztažná soustava – izolovaná tělesa zůstávají v klidu / rovnoměrném přímočarém pohybu (platí I. Newtonův zákon)
- neinerciální vztažná soustava – neplatí I. NZ, tělesa zrychlují i bez působení sil

2.3.2 Druhý Newtonův zákon – zákon síly

- „*Jestliže na těleso působí síla, pak se těleso pohybuje zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa.*“
- obecněji – síla je rovna časové změně hybnosti

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = m\dot{\mathbf{v}} + m\ddot{\mathbf{v}}$$

- za předpokladu neměnné hmotnosti $m = \text{konst}$ lze zjednodušit na

$$\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{v}} = m\mathbf{a}$$

- síla je příčinou změny pohybu

2.3.3 Třetí Newtonův zákon – zákon akce a reakce

- „*Proti každé akci vždy působí stejná reakce; jinak: vzájemná působení dvou těles jsou vždy stejně velká a míří na opačné strany.*“
- každá akce vyvolává stejně velkou opačnou reakci

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

- souhlasení se zákonem zachování hybnosti

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad \mathbf{F} = \Delta\mathbf{p}$$

$$\Delta\mathbf{p}_{12} = -\Delta\mathbf{p}_{21}$$

$$\Delta\mathbf{p}_{12} + \Delta\mathbf{p}_{21} = 0 \Rightarrow \text{Celková hybnost se zachovává}$$

- příklad – zpětný ráz při střelbě

2.4 Hybnost

- značka \mathbf{p} , $[\mathbf{p}] = \text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- míra pohybu tělesa
- součin hmotnosti a rychlosti tělesa

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

- rovna impulsu síly (\mathbf{I} , $[\mathbf{I}] = \text{Ns}$) – časovému účinku síly

$$\mathbf{p} = \mathbf{I} = \mathbf{F}\Delta t$$

2.4.1 Zákon zachování hybnosti

- celková hybnost všech těles v izolované soustavě se zachovává

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i = \mathbf{p} = \text{konst}$$

- příklad – při spalování paliva unikají tryskou plyny vysokou rychlostí → pohyb rakety opačným směrem
- souvislost s III. NZ
- důležité při výpočtech pružných a nepružných srážek

2.4.2 Zákon zachování momentu hybnosti

- moment hybnosti – \mathbf{L} , $[\mathbf{L}] = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
 - součin hybnosti a průvodíče hybnosti $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$
 - moment síly – derivace momentu hybnosti $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt$
- zachování momentu hybnosti – v izolované soustavě se hodnota momentu hybnosti nemění

$$L = \text{konst}$$

- význam při rotačním pohybu tělesa

2.5 Druhy sil

- druhy sil
 - odporová síla
 - vztlaková síla
 - tření
 - dostředivá a odstředivá
 - setrvačná
 - van der Waalsovy síly
- druhy silových polí
 - gravitační pole – gravitační síla
 - elektromagnetické pole – elektrická a magnetická síla

2.5.1 Dostředivá síla

- síla působící na těleso při rotačním pohybu
- působí směrem do středu křivosti

$$F = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r$$

- způsobuje dostředivé zrychlení
- způsobuje změnu směru vektoru rychlosti → zakřivení trajektorie → pohyb po kružnici

2.5.2 Odstředivá síla

- 2 typy – reakce na dostředivou sílu nebo setrvačná odstředivá síla; obvykle mluvíme od druhém případu
- síla působící od středu křivosti
- zaváděna v neinerciální vztažné soustavě, není způsobena žádnou reálnou sílou
- stejná velikost jako dostředivá síla
- způsobena setrvačností tělesa při pohybu rovně a působením dostředivé síly

2.5.3 Setrvačná síla

- síla působící proti směru pohybu
- v neinerciální vztažné soustavě
- nemá původ, pouze účinek
- Eulerova síla, odstředivá síla, Coriolisova síla

2.5.4 Třecí síla

- smyková třecí síla – síla působící proti pohybu mezi dvěma styčnými plochami těles
- nezáleží na styčné ploše, pouze na normálové síle F_N a činiteli smykového tření f

$$F_t = f F_N$$

- koeficient tření závislý na druzích povrchů, zjištován experimentálně
- typy
 - tření v klidu / statické tření – tření vyvinuto na těleso v klidu
 - tření za pohybu – tření působící proti směru pohybu, menší než statické tření
- další typy
 - turbulentní tření – u kapalin
 - valivý odpor

Valivý odpor / valivé tření

- tření způsobeno valením po povrchu

$$F_t = \xi \frac{F_N}{r}$$

- ξ – koeficient valivého odporu
- r – poloměr valení

3 Druhy energie a jejich vzájemná přeměny. Zákony zachování

3.1 Mechanická práce

- značka W , $[W] = \text{J} = \text{Nm} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- skalární veličina
- síla koná práci, pokud se jejím důsledkem pohybuje těleso
- při konstantní síle F rovnoběžné se směrem pohybu je práce vykonána po dráze s

$$W = Fs$$

- obecný tvar

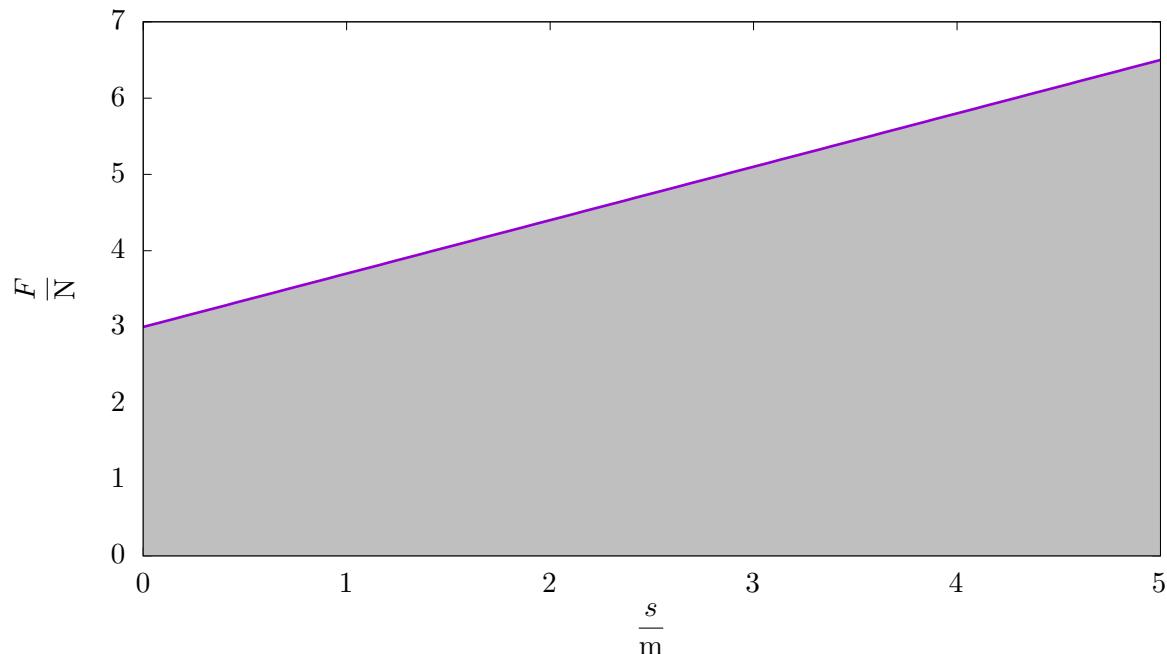
$$W = \int_C \mathbf{F}(s) \, ds$$

- C – křivka trajektorie

3.2 Mechanická energie

- značka E , $[E] = \text{J}$
- skalární veličina
- míra schopnosti tělesa konat mechanickou práci
- energie uložena v rámci tělesa v mnoha podobách
 - kinetická energie – energie pohybu
 - potenciální energie – těleso v silových polích jiných těles
 - * tělová potenciální energie – silové pole Země
 - potenciální energie pružnosti – natažení/stlačení

- (při nulových ztrátách) $\Delta E = W$
- pracovní diagram – graf závislosti síly na dráze
 - integrálem práce



Obr. 3.1: Pracovní diagram

3.2.1 Kinetická energie

- energie uchována v pohybu tělesa
- nezávislá na směru rychlosti, pouze na velikosti
- rychlosť relativná k ostatným tělesům → kinetická energie relativná ke vztažné soustavě

Odvození

$$\begin{aligned}
 E_k &= W = Fs & E_k &= W = \int_0 F ds \\
 E_k &= ma \cdot \frac{1}{2}at^2 & E_k &= \int_0 ma ds = m \int_0 \frac{dv}{dt} ds \\
 E_k &= \frac{1}{2}ma^2t^2 & E_k &= m \int_0 \frac{ds}{dt} dv = m \int_0 v dv \\
 E_k &= \frac{1}{2}mv^2 & E_k &= \frac{1}{2}mv^2
 \end{aligned}$$

3.2.2 Potenciální energie

- energie, kterou má těleso v potenciálovém poli
- gravitační/tíhová potenciální energie, PE pružnosti, tlaková PE...
- změna PE – práce vykonána proti silovému poli

$$\Delta E_p = -W$$

Tíhová potenciální energie

- potenciální energie blízko povrchu země způsobená tíhou těles
- změna potenciální energie

$$\Delta E_p = -W = -\mathbf{F}s = -(-F) \cdot s = mgs = mg\Delta h$$

- celková potenciální energie

$$E_p = mgh$$

Potenciální energie pružnosti

- energie uložena v natažení/zkrácení pružiny

$$\begin{aligned}\Delta E_p &= W = \mathbf{F}s = \int_0^t \mathbf{F}v \, dt \\ \Delta E_p &= \int_0^t kyv_y \, dt \\ \Delta E_p &= \int_0^t ky \frac{dy}{dt} \, dt = \int_{y(0)}^{y(t)} ky \, dy \\ \Delta E_p &= \frac{1}{2}ky^2\end{aligned}$$

Gravitační potenciální energie

- energie tělesa v radiálním gravitačním poli tělesa
- změna gravitační potenciální energie (kladný směr od tělesa)

$$\begin{aligned}\Delta E_p &= -W = -\int_{r_1}^{r_2} -F_g \, dr \\ \Delta E_p &= \int_{r_1}^{r_2} G \frac{mM}{r^2} \, dr \\ \Delta E_p &= GmM \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} \, dr \\ \Delta E_p &= GmM \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_1}^{r_2} \\ \Delta E_p &= -GmM \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)\end{aligned}$$

- celková potenciální energie – záporná práce přenesení tělesa z nekonečna do vzdálenosti R

$$\begin{aligned}E_p &= -\int_{\infty}^R -F_g \, dr \\ E_p &= GmM \left[-\frac{1}{R} \right]_{\infty}^r \\ E_p &= GmM \left(-\frac{1}{R} + \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{1}{r} \right) \\ E_p &= -\frac{GmM}{R}\end{aligned}$$

3.3 Zákony zachování

3.3.1 Zákon zachování mechanické energie

- jestliže těleso nepodléhá účinkům okolí, pak mechanická energie (součet potenciální a kinetické) je konstantní

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

3.3.2 Zákon zachování energie

- „Celková energie izolované soustavy zůstává konstantní při všech dějích, které v ní probíhají.“
- energie nevzniká ani nezaniká, vždy se pouze přeměňuje na jinou formu
- celková energie izolované soustavy zůstává konstantní
- obecná formulace – první termodynamická věta
- příklad: přeměna kinetické energie na teplo z důvodu tření

3.4 Perpetuum mobile

- stroj konající práci bez vnější energie
- účinnost dosáhne nebo přesáhne 100 %
- nerealistické, porušuje termodynamické zákony a zákony zachování

3.4.1 První typ

- produkuje nejméně tolik energie, kolik samo spotřebuje
- může pracovat neomezeně dlouho
- porušuje první termodynamický zákon

3.4.2 Druhý typ

- generuje mechanickou energii z tepla
- neporušuje I. TZ, ale porušuje II. termodynamický zákon (teplo se přesouvá z teplejšího do studenějšího)
- obvykle pouze jeden zásobník tepla, samovolně chlazen bez přesunu tepla

3.5 Využití přeměny energie

- energetika
 - výroba elektrické energie z mechanické, tepelné nebo jaderné
 - uložení energie – přecerpávání vody ($E_k \leftrightarrow E_p$), setrvačník
- průmysl – motory – spalování paliva pro mechanickou energii
- hospodářství, obyčejný život...

4 Mechanika tuhého tělesa

4.1 Tuhé těleso

- ideální těleso
- model použit v případech nemožnosti nahrazení hmotným bodem
 - nezle zanedbat rozměry tělesa
- objem a tvar neměnné – zanedbání deformace
 - neměnné vzdálenosti mezi částicemi
- síla má pouze rotační a translační účinky
- možno approximovat soustavou hmotných bodů

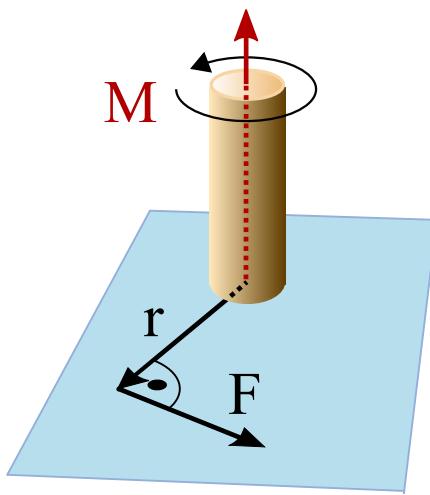
4.2 Moment síly

- značka \mathbf{M} , $[M] = \text{Nm}$
- míra otáčivého účinku síly
- součin síly \mathbf{F} a jejího průvodiče (ramene síly) \mathbf{r}

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

$$M = rF$$

- směr určen pomocí pravidla pravé ruky
- momentový bod – bod vůči kterému určujeme moment síly
 - nemusí ležet na ose otáčení, ale je to výhodné



Obr. 4.1: Moment síly v ose otáčení

4.2.1 Dvojice sil

- značení \mathbf{D}
- současné působení stejně velkých sil opačného směru v různých místech ($F = F_1 = F_2$)
- vektory neleží na jedné přímce
- výsledný moment síly roven součtu jednotlivých momentů sil

$$\begin{aligned} D &= M_1 + M_2 \\ D &= F_1 r_1 + F_2 r_2 \\ D &= F(r_1 + r_2) \\ D &= Fd \end{aligned}$$

– d – vzdálenost působišť sil F_1 a F_2

4.2.2 Momentová věta

- „Algebraický součet statických momentů všech sil v soustavě k libovolně zvolenému momentovému středu je roven statickému momentu výslednice této soustavy a k témuž středu.“

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n M_i &= M_R \\ \sum_{i=1}^n F_i r_i &= F_R r_R \end{aligned}$$

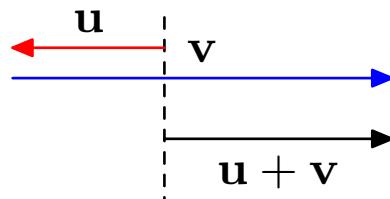
- specifikace skládání sil a jejich momentů

4.3 Skládání sil

- sčítání vektorů sil

4.3.1 Rovnoběžné síly na společné vektorové přímce

- výsledná hodnota rovna součtu hodnot sil, opačné síly mají zápornou velikost



Obr. 4.2: Skládání sil na sobě, z důvodu přehlednosti uvedeny pod sebou

4.3.2 Různoběžné síly

- síly nemají stejný směr
- nutno vektorově sečít → výsledný vektor síly

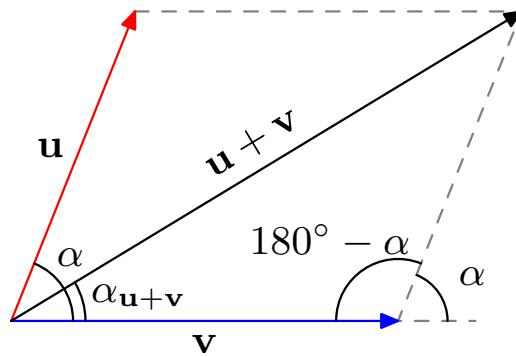
Stejné působiště

- výslednice má stejné působiště, jako ostatní síly
- výslednice vektorový součet ostatních sil
- graficky – doplnění na lichoběžních
- numericky
 - sinova v cosinova věta

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos(180^\circ - \alpha)} = \\ &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos(\alpha)} \\ \sin \alpha_F &= \frac{F_2}{F_1} \sin \alpha \end{aligned}$$

– rozložení na x a y složku

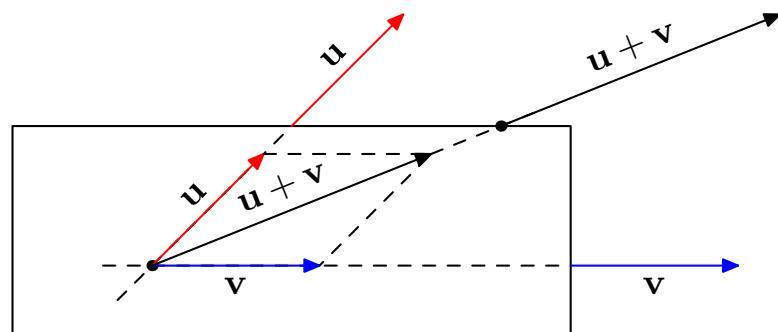
$$\begin{aligned} F_{x_n} &= F_n \cos \alpha_n & F_{y_n} &= F_n \sin \alpha_n \\ F_x &= \sum_{i=1}^n F_{x_i} & F_y &= \sum_{i=1}^n F_{y_i} \end{aligned}$$



Obr. 4.3: Skládání sil ve stejném působišti

Různá působiště

- skládání podobné jako při stejném působišti
- nutno nejdříve převést síly do společného působiště

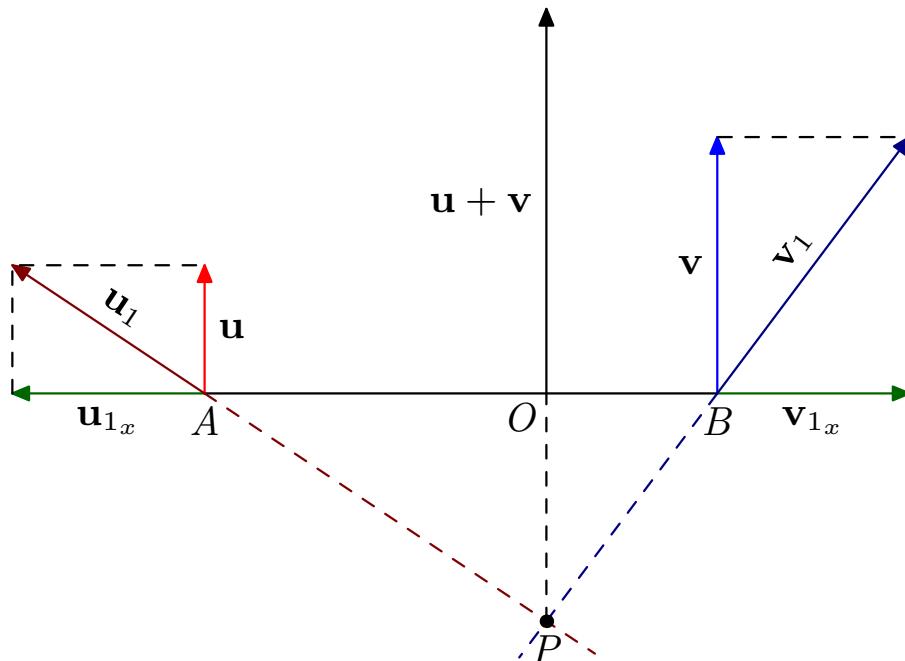


Obr. 4.4: Skládání sil v různých působištích

4

4.3.3 Rovnoběžné síly ležící na různých vektorových přímkách

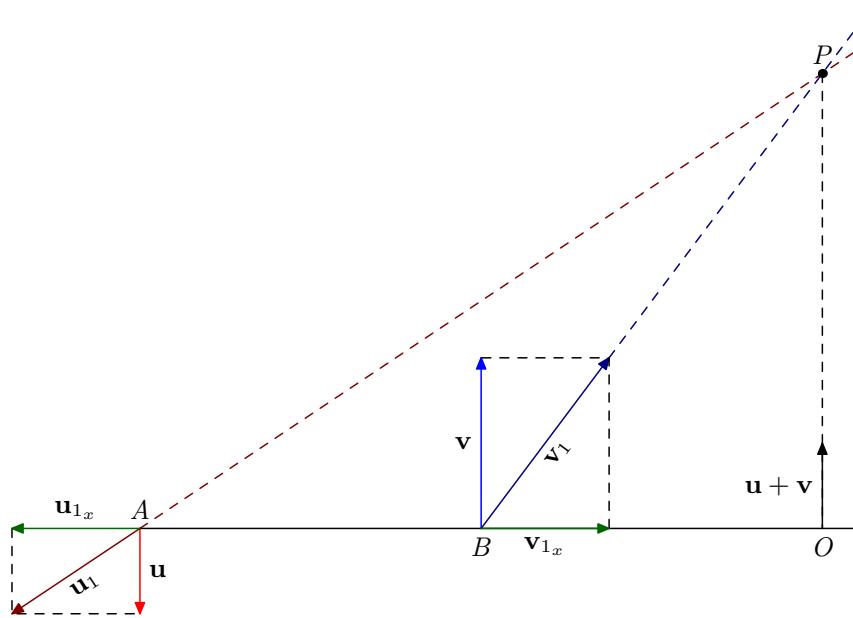
- fyzikální postup
 - ke každé síle přidáme kolmou složku, stejně velké, navzájem opačné → celková působící síla je stále nulová
 - pomocí těchto sil (\mathbf{u}_{1_x} a \mathbf{v}_{1_x}) rozložíme původní síly (na u_1 a v_1)
 - dále postup stejný jako při různoběžných silách
- geometrická finta
 - vektory sil prohodíme
 - jeden vektor převrátíme
 - protnutí spojnice konců vektorů sil a základny – působiště konečné síly
- velikost konečné síly rovna součtu velikostí jednotlivých sil



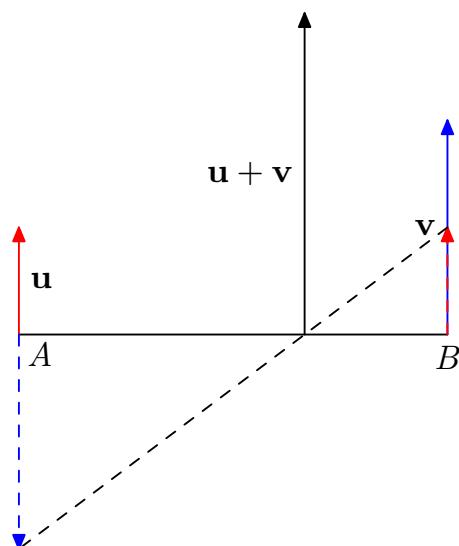
Obr. 4.5: Skládání rovnoběžných sil v různých působištích

4.4 Otáčivý pohyb

- typ pohybu tuhého tělesa
- otáčení všech bodů okolo společné osy otáčení stejnou úhlovou rychlostí
- trajektoriemi kružnice



Obr. 4.6: Skládání opačných rovnoběžných sil v různých působištích



Obr. 4.7: Skládání rovnoběžných sil v různých působištích pomocí geometrické finty

- kinetická energie otáčení

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i r_i^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \frac{1}{2} J \omega^2$$

– J – moment setrvačnosti

- úhlové zrychlení vyvoláno momentem síly – druhá impulzová věta

$$\begin{aligned} J\varepsilon &= \sum M \\ \varepsilon &= \frac{1}{J} \sum M \end{aligned}$$

4

4.4.1 Moment setrvačnosti

- značka J , $[J] = \text{kg}\cdot\text{m}^2$
- míra setrvačnosti tělesa
- pro každý tvar tělesa odlišné → určeno pouze pro základní, pro ostatní potřeba integrace
 - tyč $ml^2/12$
 - koule $2mr^2/5$
 - válec $mr^2/2$
 - tenká obrub mr^2

4.5 Rovnovážné polohy

- snaha tělesa mít co nejmenší energii

4.5.1 Stabilní poloha

- zvýšení energie vychýlením
- po vychýlení se těleso vrátí do původní polohy
- kulička v důlku, kyvadlo

4.5.2 Labilní poloha

- „vratká poloha“
- po vychýlení z polohy se odchylka stále zvyšuje – snižování energie
- těleso se nevrátí do této polohy
- kulička na kopečku

4.5.3 Indiferentní poloha

- „volná poloha“
- vychýlením se výslednice sil ani výsledný moment síly nemění
- potenciální energie zůstává konstantní
- těleso si najde novou polohu, kterou již nemění
- kulička na rovné desce

4.6 Jednoduché stroje

- využití otáčivých účinků
- přenášení síly a mechanického pohybu z jednoho tělesa na druhé
- zmenšení potřebné fyzické námahy pro vykonání práce
- principy
 - rovnováha momentů sil (otáčení okolo pevné osy) – páka, kladka, kolo na hřídeli
 - rovnováha sil – nakloněná rovina, klín, šroub

4.6.1 Páka

- princip rovnováhy momentů sil
 - dále od osy otáčení menší síla, ale delší rameno – stejná práce a moment síly
- jednozvratná páka – osa otáčení na konci páky, síly působí na jedné straně
- dvojzvratná páka – osa otáčení mezi působícími sílami
- využití – zmenšení potřebné síly pro úkon

4.6.2 Kladka

- pevná kladka – „dvojzvratná páka“, která pouze mění směr síly
 - pevně upevněná, během práce se nepohybuje
- volná kladka – „jednozvratná páka“
 - ramena r a $2r$

$$\begin{aligned} M_1 &= M_2 \\ F_1 r &= F_2 2r \\ F_2 &= \frac{1}{2} F_1 \end{aligned}$$

- dělí působící sílu na dvě stejně velké složky → při tuhnutí za pouze jeden konec působíme pouze poloviční sílou
- pohybuje se při práci
- více kladek – kladkostroj

4.6.3 Nakloněná rovina

- rozklad tělové síly F_G na normálovou F_n a tečnou složku F_t
- zrychlování tělesa směrem po nakloněné rovině silou F_t
- zmenšení potřebné síly pro vykonání práce

5 Mechanika kapalin a plynů

5.1 Vlastnosti

- tekutina – kapaliny a plyny
 - jsou tekuté – změna tvaru podle nádoby, pohyblivé, neschopné udržet tvar
- kapaliny
 - částice blíže sobě → působí na sebe silami, avšak neudrží tvar
 - volná hladina
 - téměř nestlačitelné
 - stálý objem
- plyny
 - volný pohyb částic
 - stlačitelný → nestálý objem

5.1.1 Ideální tekutina

- prakticky neexistující
- dokonalá tekutost, nemá vnitřní odpor
- ideální kapalina – dokonale nestlačitelná
- ideální plyn – dokonale stlačitelný; částice na sebe nepůsobí (kromě srážek)

5.2 Tlak

- značka p , $[p] = \text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
- normálová síla působící na jednotku plochy

$$p = \frac{F}{S} \quad \Rightarrow \quad p = \frac{d\mathbf{F}_N}{d\mathbf{S}}$$

- tlaková síla $F = pS$
- v kapalinách způsoben těhovou nebo vnější silou

5.2.1 Tlak těhové síly

- těhová síla kapaliny \rightarrow hydrostatická tlaková síla $F_h \rightarrow$ hydrostatický tlak p_h

$$p = \frac{F_G}{S} = \frac{V\rho g}{S} = \frac{hS\rho g}{S} = h\rho g$$

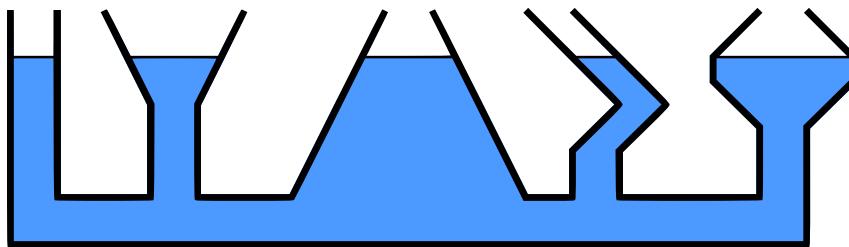
- nezávisí na objemu nebo tvaru kapaliny, ale pouze na výšce sloupce tekutiny – *hydrostatický paradoxon*

Spojené nádoby

- při spojení dvou nádob naplněných kapalinou
- stejná kapaliny – jednotlivé hladiny ve stejných výškách
- rozdílné kapaliny – vyrovnaní hydrostatických tlaků

$$h_1\rho_1g = h_2\rho_2g$$

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



Obr. 5.1: Nákres spojených nádob a hydrostatického paradoxonu

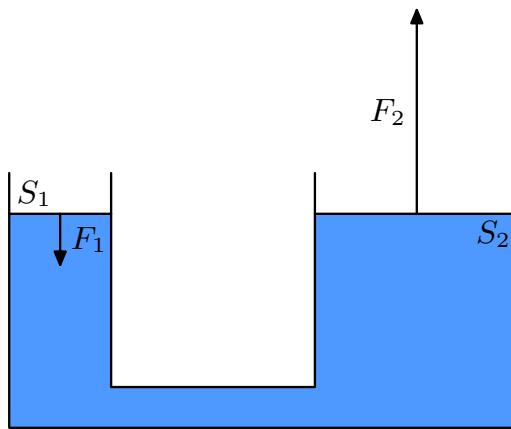
5.2.2 Vnější síla – Pascalův zákon

- „Jestliže na kapalinu v uzavřené nádobě působí vnější tlaková síla, pak tlak v každém místě kapaliny vzroste o stejnou hodnotu.“
- tlak v každém místě kapaliny stejný \rightarrow při zvětšení plochy možno získat větší sílu

$$p = \text{konst} \quad \Rightarrow \quad F \sim S$$

Hydraulická zařízení

- využití Pascalova zákonu
- propojené nádoby o různých objemech/plochách
- malá síla vyvinuta na malou plochu \rightarrow velká síla vyvíjena na velkou plochu
- brzdy, pedály, hydraulický lis, zvedáky, hydraulické písty, ...



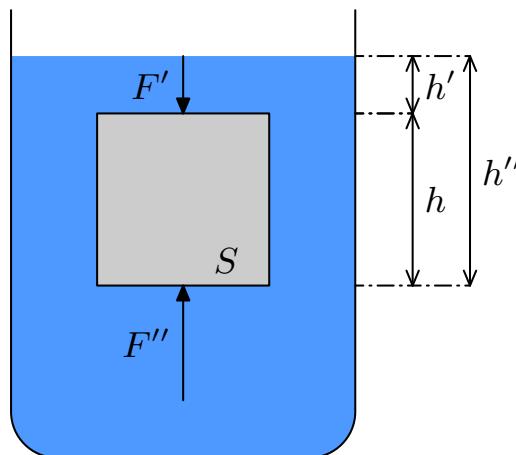
Obr. 5.2: Nákres Pascalova zákona

5.2.3 Vztaková síla

- síla nadnášející těleso v tekutině
- způsobena rozdílem hydrostatického tlaku nad a pod tělesem

$$\begin{aligned}F_{vz} &= F'' - F' \\F_{vz} &= Sp'' - Sp' \\F_{vz} &= S\rho gh'' - S\rho gh' \\F_{vz} &= S\rho g(h'' - h') \\F_{vz} &= S\rho gh \\F_{vz} &= V\rho g\end{aligned}$$

- působení síly proti tříhové síle směrem nahoru – $F = F_G - F_{vz}$
- formulováno Archimédovým zákonem – „Těleso ponorené do tekutiny, které je v klidu, je nadlehčováno silou rovnající se tříce tekutiny stejného objemu, jako je ponorená část tělesa.“



Obr. 5.3: Síly působící na těleso v tekutině

5.3 Proudění tekutin

- pohyb tekutiny
- neuspořádaný pohyb částic a zároveň posun ve směru proudění
- proudění tekutiny z místa vyššího tlaku do místa nižšího tlaku
- vzorce – předpoklad ideální tekutiny
- hydrodynamika, aerodynamika
- znázorněno pomyslnými čarami – proudnice

5.3.1 Rovnice spojitosti

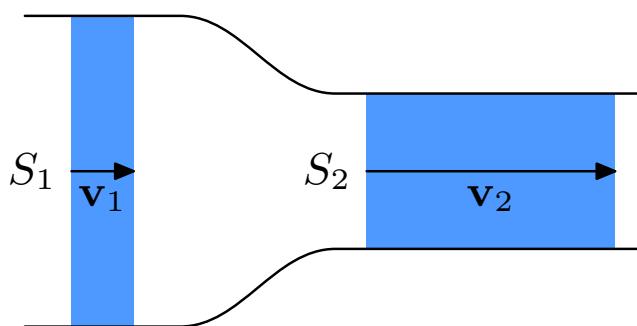
- také rovnice kontinuity
- speciální případ zákonu zachování hmotnosti při proudění kapaliny trubicí

Nestlačitelné kapaliny

- zachování objemového průtoku $Q_V = \text{konst}$

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 \\ \frac{m_1}{t\rho} &= \frac{m_2}{t\rho} \\ Q_1 &= Q_2 \\ S_1 v_1 &= S_2 v_2 \\ \frac{v_1}{v_2} &= \frac{S_2}{S_1} \end{aligned}$$

- čím menší průřez, tím vyšší rychlosť proudění kapaliny



Obr. 5.4: Spojitost proudění nestlačitelné kapaliny

Stlačitelné kapaliny / plyny

- zachování hmotnostního průtoku $Q_m = \text{konst}$

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_2 \\ S_1 v_1 \rho_1 &= S_2 v_2 \rho_2 \end{aligned}$$

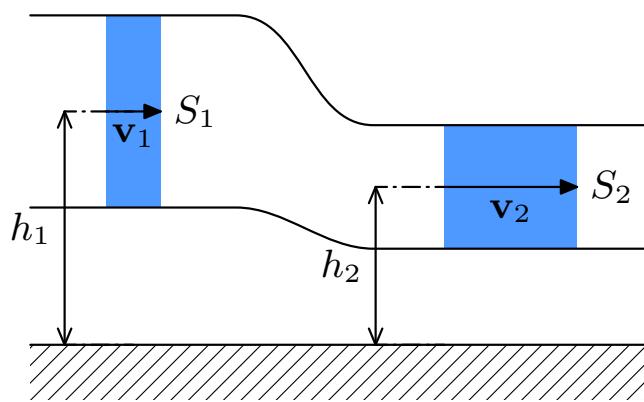
5.3.2 Bernoulliho rovnice

- odvodil Daniel Bernoulli
- zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho u(\mathbf{x}) = \text{konst} \quad (\text{obecný tvar})$$

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho g h = \text{konst} \quad (\text{homogenní těhové pole})$$

- energie přepočtena na objemovou jednotku kapaliny
- $\rho v^2/2$ – dynamický/kinetický tlak – objemová hustota kinetické energie
- p – tlaková potenciální energie
- $\rho u(\mathbf{x}) = \rho g h$ – potenciální energii objemové jednotky kapaliny v silovém poli vnější konzervativní síly (těhové pole)



Obr. 5.5: Proudění kapaliny dle Bernoulliho rovnice

Torricelliho vzorec

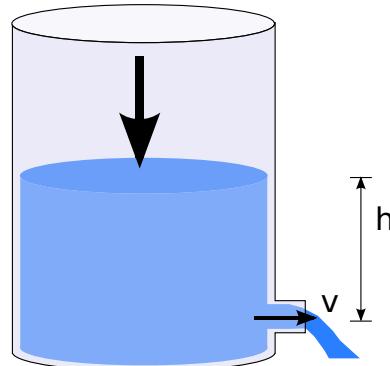
- vztah pro výtokovou rychlosť kapaliny při vytékání malým otvorem z nádoby s hladinou ve výšce h

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

- stejná rychlosť, jakou by mělo těleso při dopadu při volném pádu
- možno odvodit z Bernoulliho vzorce

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

- pokles hladiny zanedbatelný $v_1 = 0$
- malý rozdíl výšek – tlak konstantní $p_2 = p_1$
- $h = h_1 - h_2$



Obr. 5.6: Vytékání kapaliny z nádoby dle torricelliho vzorce

5.3.3 Skutečné proudění

- neplatí dokonale předchozí vzorce
- kapalina má vnitřní tření a viskozitu
- pohyb kapalinu u stěn pomaleji – mezní vrstva
- laminární proudění – pohyb částic jedním směrem, nedochází k výrům
- turbulentní proudění – vytváření výrů, neuspořádaný pohyb
- ztrácení energie důvodem tření

5.4 Odpорová síla

- při obtékání tělesa tekutinou
- u reálných tekutin vznik odporové síly důsledkem vnitřního tření
 - kapaliny – hydrodynamická odpornost

- plyny – aerodynamická odporová síla
- určení velikosti pomocí Newtonova vzorce

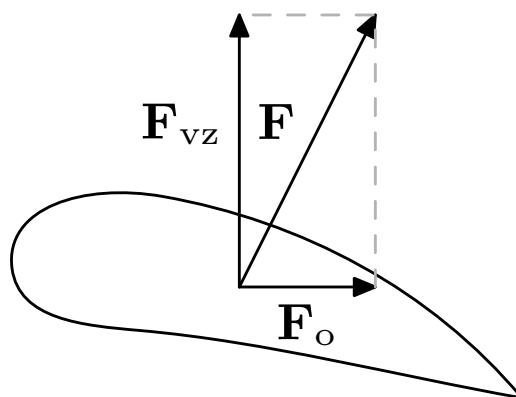
$$F = \frac{1}{2} C S \rho v^2$$
 - C – součinitel odporu; závislý na tvaru tělesa
 - S – příčný průřez tělesa
 - ρ – hustota tekutiny
 - v – rychlosť tělesa
- síla působí ve směru opačném rychlosti
- nesymetrické těleso – směr odporové síly odchýlen
 - využití např. křídla letadel

5.4.1 Fyzika letu

- aerodynamický tvar křídel – vyšší rychlosť proudění nad křídlem, menší pod křídlem
 - z Bernoulliho rovnice → nad křídlem podtlak vzhledem k atmosférickému tlaku, pod křídlem přetlak
- vytváření vztlakové aerodynamické síly

$$F_{vz} = \frac{1}{2} C_{vz} S \rho v^2 \quad (\text{pro rychlosť menší rychlosť zvuku})$$

– C_{vz} – součinitel vztlaku



Obr. 5.7: Působení sil na křídlo letadla

6 Gravitační pole a pohyb těles v tomto poli

6.1 Gravitační pole

- vzájemné přitažlivé silové působení těles
- zdrojem pole všechna tělesa
- gravitace – nejslabší síla

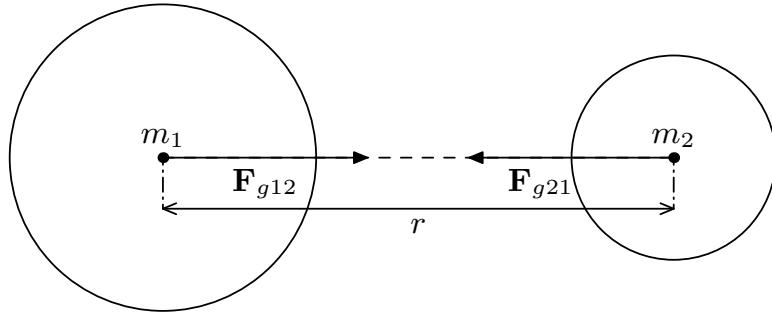
6.1.1 Gravitační síla

- značka \mathbf{F}_g , $[\mathbf{F}_g] = \text{N}$
- přitahování každých dvou těles na sebe (např. kámen a Země)
- leží na spojnici těžíšť
- poprvé popsána Isaacem Newtonem (17. stol.) → Newtonův gravitační zákon

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

$$\mathbf{F}_g = G \frac{m_1 m_2}{|\mathbf{r}|^2} \hat{\mathbf{r}}$$

- $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ – gravitační konstanta (staré značení κ)
- $m_1, m_2/m, M$ – hmotnost prvního a druhého tělesa
- \mathbf{r} – průvodí vzdálenosti těles; $\hat{\mathbf{r}}$ – normovaný vektor
- stejná síla působí na obě tělesa, ale v opačných směrech



6.1.2 Intenzita gravitačního pole

- značka \mathbf{K} , $[\mathbf{K}] = \text{N}\cdot\text{kg}^{-1} = \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
- veličina popisující gravitační pole
- podíl gravitační síly, která v daném místě působí na hmotný bod, a hmotnosti daného bodu

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

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{F}_g}{m} = G \frac{M}{|\mathbf{r}|^2} \hat{\mathbf{r}}$$

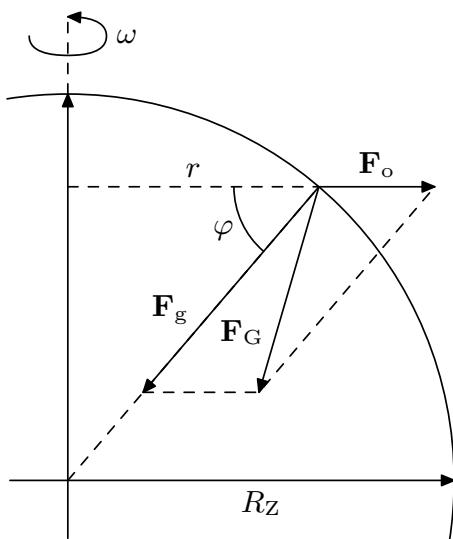
- gravitační síla normovaná na jednotku hmotnosti
- představuje zrychlení působící na všechna tělesa
- shodný směr s vektorem gravitační síly

6.1.3 Gravitační zrychlení

- značka \mathbf{a}_g , $[\mathbf{a}_g] = \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
 - zrychlení udávané gravitačním polem směrem ke středu pole
 - rovno intenzitě gravitačního pole
- $\mathbf{a}_g = \mathbf{K}$
- nezávislé na hmotnosti tělesa

6.1.4 Tíhová síla a zrychlení

- tíhová síla \mathbf{F}_G – výslednice sil působících na těleso na povrchu Země
 - započítána gravitační síla, ale i odstředivá či gravitační síla ostatních vesmírných těles
 - působiště v těžišti
- tíha \mathbf{G}
 - působení tělesa v tíhovém poli Země na jiná tělesa
 - projevení jako tlaková síla → působiště v bodě dotyku
- tíhové zrychlení \mathbf{g}
 - způsobeno tíhovou silou
 - různé pro pozice na Zemi (hlavní závislost na zeměpisné šířce)
 - experimentálně měřeno



Obr. 6.1: Skládání gravitační a odstředivé síly do těhové na povrchu Země

6.2 Typy dle tvaru

6.2.1 Radiální

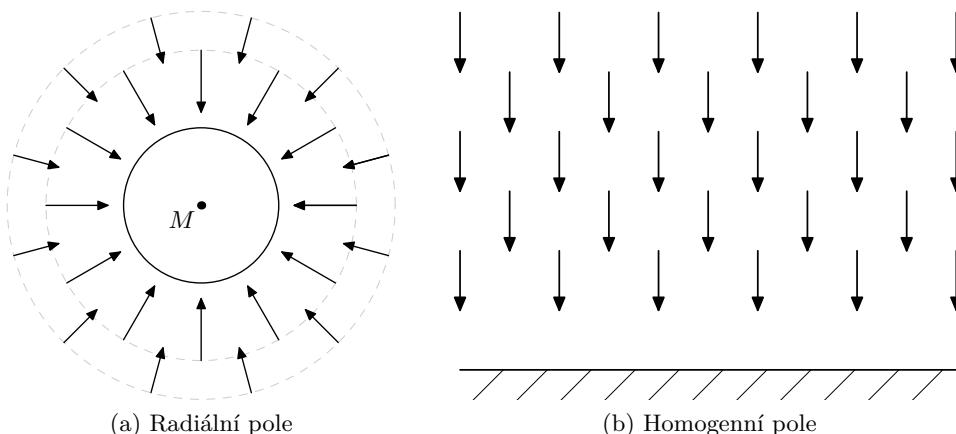
- gravitační síla/intenzita mířící do jednoho středu
- středově symetrické do všech směrů
- možnost spojit místa se stejnou intenzitou pomocí kružnic
- intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti od středu
- gravitační pole Země

$$K = G \frac{M_Z}{(R_Z + h)^2}$$

- M_Z – hmotnost Země
- R_Z – poloměr Země

6.2.2 Homogenní

- trajektorie vzhledem k rozměrům Země velice malá a blízko \rightarrow pole lze považovat za homogenní
- zjednodušení radiálního pole
- na všech místech stejný gravitační intenzita \mathbf{K}



Obr. 6.2: Vektorově znázorněno gravitační pole

6.3 Pohyb v homogenním gravitačním poli

- působení konstantní těhové síly na těleso → změna trajektorie těhovým zrychlením

6.3.1 Volný pád

- nejjednodušší pohyb v těhovém poli Země
- nulová počáteční rychlosť i dráha
- zrychlování tělesa směrem k zemi zrychlením \mathbf{g}

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

6.3.2 Svislý vrh vzhůru

- vržení tělesa s počáteční rychlosťí v_0 svisle vzhůru
- působení \mathbf{g} proti směru pohybu
- trajektorií přímka
- okamžitá výška y :

$$y = v_0t - \frac{1}{2}gt^2$$

- maximální výška h – těleso zpomalí na nulu (zrychlení dorovná počáteční rychlosť)

$$\begin{aligned} v_0 &= gt_h \quad \Rightarrow \quad t_h = \frac{v_0}{g} \\ h &= v_0t_h - \frac{1}{2}gt_h^2 = \frac{v_0^2}{2g} \end{aligned}$$

- stejné zrychlení nahoru i dolů ⇒ stejná dráha a stejná počáteční a konečná rychlosť

6.3.3 Svislý vrh dolů

- vržení tělesa s počáteční rychlosťí v_0 svisle dolů z počáteční výšky h
- působení \mathbf{g} ve směru pohybu
- trajektorií přímka
- okamžitá výška y :

$$y = h - \left(v_0t + \frac{1}{2}gt^2 \right)$$

6.3.4 Vodorovný vrh

- vržení tělesa s počáteční rychlosťí v_0 ve vodorovném směru z počáteční výšky h
- výsledek složení volného pádu ve svislém směru a rovnoměrného přímočarého pohybu ve vodorovném směru
- trajektorií parabola
- okamžité souřadnice bodu

$$\begin{aligned} x &= v_0t \\ y &= h - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned}$$

- doba pádu závislá na dosažení země na y -ové ose

$$\begin{aligned} y &= 0 \\ h &= \frac{1}{2}gt_d^2 \\ t_d &= \sqrt{\frac{2h}{g}} \end{aligned}$$

- maximální vzdálenost doletu d

$$x = v_0 t$$

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

6.3.5 Šikmý vrh

- vržení tělesa s počáteční rychlostí v_0 pod úhlem α
- skládání přímočarého pohybu a svislého vrhu
- nenulová vodorovná v_{x_0} a svislá v_{y_0} rychlosť

$$v_{x_0} = v_0 \cos \alpha$$

$$v_{y_0} = v_0 \sin \alpha$$

- okamžitá rychlosť v_x neměnná a v_y ovlivněna zrychlením g

$$v_x = v_{x_0} = v_0 \cos \alpha$$

$$v_y = v_{y_0} - gt = v_0 \sin \alpha - gt$$

- okamžité souřadnice bodu – parametrické vyjádření trajektorie

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

$$y = v_{y_0} t - \frac{1}{2} g t^2 = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2$$

- rovnice trajektorie

$$\begin{aligned} x &= v_0 t \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \\ y &= v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2 \\ y &= v_0 \sin \alpha \frac{x}{v_0 \cos \alpha} - \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)^2 \\ y &= x \tan \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \end{aligned}$$

- doba letu – v_y dosáhne hodnoty¹ v_{y_0} , ale opačného směru

$$\begin{aligned} v_y &= -v_{y_0} \\ v_0 \sin \alpha - gt_d &= -v_0 \sin \alpha \\ gt_d &= 2v_0 \sin \alpha \\ t_d &= \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \end{aligned}$$

- maximální délka doletu d

$$d = v_{x_0} t_d = v_0 \cos \alpha \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

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

¹Ze zákona zachování energie ji při dosažení stejné výškové hladiny, tedy $y = 0$, musí mít stejnou.

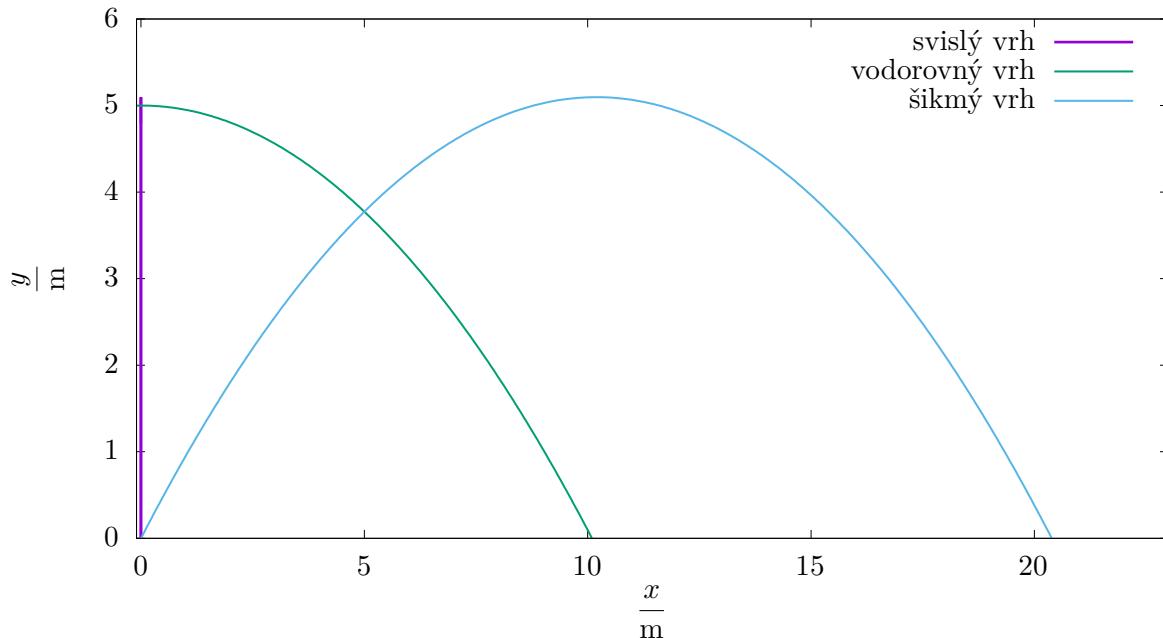
- maximální výška

$$v_y = 0 = v_0 \sin \alpha - gt_{\max}$$

$$t_{\max} = \frac{v_0 t \sin \alpha}{g}$$

$$h_{\max} = v_0 t_{\max} \sin \alpha - \frac{1}{2} g t_{\max}^2$$

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin \alpha}{2g}$$



Obr. 6.3: Trajektorie vrhů

6

6.4 Pohyb v radiálním gravitačním poli

- nutno uvažovat proměnnou intenzitu \mathbf{K} a gravitační zrychlení a_g

6.4.1 Pohyb po kružnici

- při vektoru \mathbf{v} kolmém na \mathbf{K} – pohyb tělesa po kružnici
- dostředivá síla F_d zastoupena gravitační sílou F_g

$$F_d = F_g$$

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

– $r = R_Z + h$ – poloměr oběhu (poloměr Země + výška letu)

6.4.2 První kosmická rychlosť

- *kruhová rychlosť*
- minimální rychlosť pro oběh tělesa okolo Země

- oběh po kružnici v gravitačním poli Země o poloměru Země

$$v_k = \sqrt{\frac{GM}{R_Z}} = \sqrt{\frac{6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \cdot 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,371 \cdot 10^6 \text{ kg}}} \\ v_k \doteq 7,907 \cdot 10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \doteq 7,9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$$

6.4.3 Druhá kosmická rychlosť

- *úniková rychlosť* nebo *parabolická rychlosť*
- rychlosť potřebná pro únik z gravitačního pole Země
- pohyb po parabolické trajektorii
- velikost

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = v_k\sqrt{2} = 11,186 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$$

- odvození ze zákona zachování energie $E_1 = E_2$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_p^2 + \left(-G\frac{mM}{r}\right) &= 0 \\ v_p^2 - 2G\frac{M}{r} &= 0 \\ v_p &= \sqrt{\frac{2GM}{r}} \end{aligned}$$

- při úniku má těleso kinetickou e. E_{p_1} a gravitační potenciální² e. E_{k_1}
 – v nekonečnu má těleso kinetickou i potenciální energii nulovou

6.4.4 Třetí kosmická rychlosť

- *hyperbolická rychlosť*
- rychlosť potřebná pro opuštění sluneční soustavy po hyperbolické trajektorii
- stejný vzorec jako pro druhou kosmickou rychlosť s hodnotami pro hmotnost Slunce a vzdálenost Země-Slunce

$$v_3 = \sqrt{\frac{2GM_S}{r_{ZS}}} = 42,1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$$

- při využití rychlosti Země potřeba zrychlit pouze o $v'_3 = v_3 - v_Z = 42,1 - 29,7$

7 Sluneční soustava, Keplerovy zákony

7.1 Modely sluneční soustavy

7.1.1 Geocentrismus

- názor, že Země je středem vesmíru / sluneční soustavy; planety obíhají okolo ní
- zastaralý názor, zformulovaným Aristotelem, upřesněno Ptolemaiem
- podporován církví
- po objevení v 17. století nahrazeno heliocentrismem

7.1.2 Heliocentrismus

- model Sluneční soustavy se Sluncem ve středu
- 16. stol – Mikuláš Koperník, Galileo Galilei

²Ta je rozdílná od klasické potenciálu e. v těžovém poli. V nekonečnu má hodnotu 0.

7.2 Slunce

- hvězda ve středu sluneční soustavy
- nejbližší hvězda Zemi
- koule žhavého plazmatu
 - produkce energie jadernou fúzí
- 99,8 % hmotnosti sluneční soustavy
- hlavně vodík (73 %) a hélium (25 %), dále O₂, C, Ne, Fe
- stáří $4,6 \cdot 10^9$ let

7.2.1 Fyzikální vlastnosti

- hmotnost $1,9885 \cdot 10^{30}$ kg
- vzdálenost 1 au = 149 597 870 700 m
- průměr 1 392 020 km
- povrchová teplota 5 780 K
- zářivý výkon $3,827 \cdot 10^{26}$ W

7.3 Planety sluneční soustavy

- planeta
 - těleso obíhající okolo Slunce
 - má dostatečnou hmotnost, aby ji její gravitační síly zformovaly do přibližně kulového tvaru (tj. nachází se v hydrostatické rovnováze),
 - dominantní v zóně své oběžné dráhy (tj. vyčistila svou gravitací okolí vlastní oběžné dráhy od jiných těles),
 - není družicí (měsícem) jiného tělesa.
- 8 planet sluneční soustavy
 - terestické / kamenné
 - * Merkur
 - * Venuše
 - * Země
 - * Mars
 - plynní obři
 - * Jupiter
 - * Saturn
 - * Uran
 - * Neptun

7.3.1 Merkur

- Slunci nejbližší a nejmenší planeta
- nemá měsíc
- oběžná dráha nejbližší Slunci (0,378 au) – perioda oběhu $T \doteq 88$ d
- povrch erodován kráter, podobný Měsíčnímu povrchu
- velké rozdíly teplot $\langle -180^\circ\text{C}, 430^\circ\text{C} \rangle$
- chybí atmosféra

7.3.2 Venuše

- pojmenovaná po římské bohyni lásky
- nemá měsíce
- nejmenší výstřednost eliptické dráhy
- druhá nejbližší Slunci (0,723 au)
- perioda oběhu $T = 224,7$ d

- možno vidět pouhým okem ze Země – „večernice“/„jitřenka“
 - po Slunci a Měsíci nejjasnějším objektem na obloze
- hustá oblačnost, nejhustší atmosféra z kamenných planet (převážně CO₂)
- silný skleníkový efekt → nejteplejší planeta SS (460 °C, 500 °C)

7.3.3 Země

- největší terestická planeta
- jediná planeta s potvrzeným výskytem života
- jeden satelit – Měsíc
- oběh s periodou $T = 365,15$ d ve vzdálenosti 1 au
- dynamický povrch (litosféra)
- nedokonalá koule (na rovníku rozšířené)
- pevné jádro, polotekuté vnější jádro, plášt, zemská kůra
- má magnetosféru
- přítomnost kapalné vody (asi 71 % povrchu)

7.3.4 Mars

- druhá nejmenší planeta po Merkuru
- pevný povrch pokrytý impaktními krátery, vysokými sopkami, hlubokými kaňony atd.
- dva měsíce – Phobos a Deimos
- oběh s periodou $T \doteq 687$ d ve vzdálenosti 1,523 au
- velký počet vyslaných sond a vozítek na zkoumání

7

7.3.5 Jupiter

- největší planeta sluneční soustavy
- plynný obr, nemá pevný povrch
- 79 měsíců
- oběh s periodou $T = 4\,332,6$ d ve vzdálenosti 5,203 au
- třetí nejjasnější objekt na noční obloze
- slabé prstence okolo planety
- atmosféra rozčleněna v závislosti na planetární šířce, velké množství bouří
- složení převážně vodík, hélium a organické sloučeniny

7.3.6 Saturn

- druhá největší planeta SS
- 60 měsíců, největší Titan
- oběh s periodou $T = 10\,757,7$ d ve vzdálenosti 9,537 au
- stejně jako Jupiter nemá pevný povrch, pouze hustá atmosféra
- jediná planeta s menší střední hustotou než voda
- znám mohutnými planetárními prstenci

7.3.7 Uran

- společně s Neptunem tzv. ledový obr
- 27 měsíců
- oběh s periodou $T = 30\,708,2$ d ve vzdálenosti 19,191 au
- atmosféra hlavně vodík a hélium, dále voda, čpavek, metan, uhlovodíky...
 - nejchladnější ve SS (≈ 49 K)
- planetární prstence
- rotační osa téměř v rovině s oběhem okolo Slunce

7.3.8 Neptun

- podobný Uranu
- nejvzdálenější planeta
- oběh s periodou $T = 60\,190$ d ve vzdálenosti 30,069 au
- skvrny v atmosféře podobných skvrnám na Jupiteru
- metan v atmosféře → modrá barva

7.4 Další objekty sluneční soustavy

7.4.1 Trpasličí planety

- definice
 - obíhají okolo Slunce
 - má dostatečnou hmotnost, aby jeho gravitace překonala vnitřní síly a dosáhl hydrostatické rovnováhy
 - během svého vývoje nepročistil své okolí, aby se stal v dané zóně dominantní (na rozdíl od planet)
 - není satelitem
- „malé planety“
- Ceres, Pluto, Haumea, Makemake, Eris
- kromě Cerery všechno plutoidy (trpasličí planeta za dráhou Neptunu)
- Pluto kdysi vedeno jako planeta; v roce 2006 na shromáždění Mezinárodní astronomické unie v Praze pře definovaná planeta → Pluto trpasličí planetou

7.4.2 Komety

- malé těleso podobné planetce
- z ledu (CO_2 , metan, voda) a prachu
- oběh po velmi excentrických drahách kolem Slunce
- některé se vracejí pravidelně a často (jednou za několik let až staletí)
 - Halleyova, Hale-Boppova, Kohoutková kometa

7.4.3 Planetky

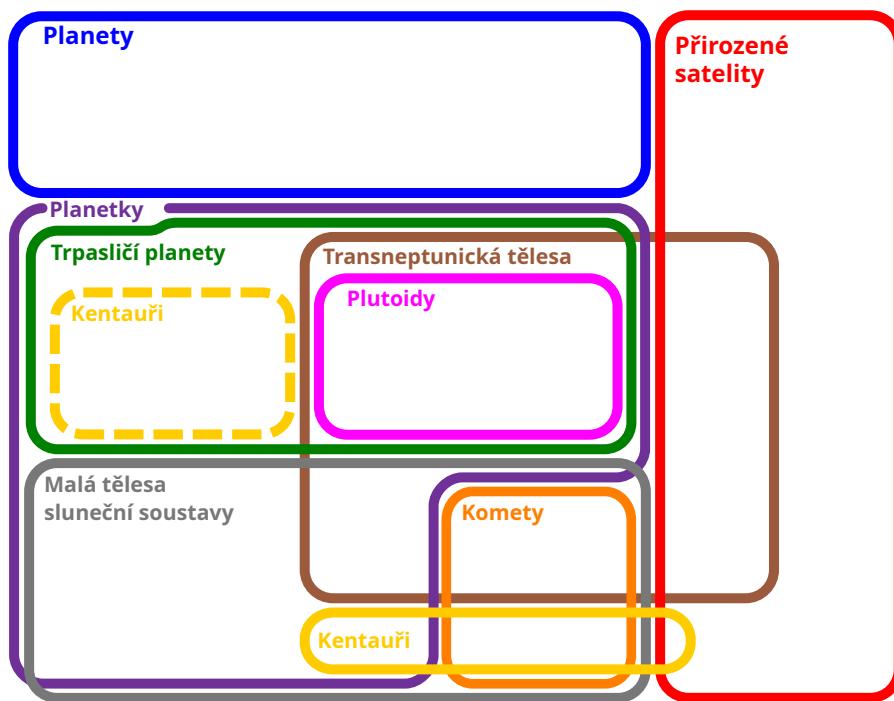
- malé těleso obíhající okolo Slunce
- malá hmotnost → nepravidelný tvar
- výskyt hlavně v hlavním pásu (prostor mezi Marsem a Jupiterem) či v páse za Neptunem

Meteoroidy

- speciální případ planetky
- velikost menší než 100 m

7.4.4 Měsíc / přirozený satelit

- kosmické těleso přirozeného původu
- pohyb se po oběžné dráze kolem jiného většího vesmírného tělesa (planeta, trpasličí planeta, planetka)
- dodnes 182 měsíců, z toho 9 kolem trpasličích planet
- velký počet u plynných obrů, malé počty u terestických planet



Obr. 7.1: Vennův diagram objektu ve sluneční soustavě

7

7.5 Vesmírné jednotky

7.5.1 Astronomická jednotka

- značka au
- jednotka vzdálenosti, vyjadřuje vzdálenost mezi Sluncem a Zemí
- $1 \text{ au} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$
- měření vzdálenosti těles v rámci sluneční soustavy

7.5.2 Světelný rok

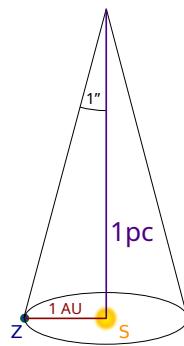
- značka ly
- vzdálenost, kterou světlo urazí za jeden rok
- $1 \text{ ly} \approx 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx 63\,241 \text{ au}$

7.5.3 Parsec

- značka pc
- vzdálenost, ze které má 1 au úhlový rozměr jedné vteřiny
- $1 \text{ pc} = 1 \text{ au} / \tg 1'' \approx 206\,265 \text{ au} \approx 3,262 \text{ ly} \approx 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$
- měření velký vzdáleností mimo sluneční soustavu
- v odborné literatuře více preferován než-li světelný rok

7.6 Keplerovy zákony

- zákony popisující pohyb planet ve sluneční soustavě, resp. pohyb těles v centrálních silových polích
- zformulovány Johannesem Keplerem na počátku 17. století



Obr. 7.2: Geometrické odvození parsecu

7.6.1 První Keplerův zákon

- „Planety obíhají kolem Slunce po eliptických drahách (přesněji trajektoriích), v jejichž jednom společném ohnisku je Slunce.“

7.6.2 Druhý Keplerův zákon

- „Obsahy ploch opsaných průvodicem planety (spojující planety a Slunce) za stejný čas jsou stejně velké.“
- odvození
 - přírůstek plochy $d\mathbf{S}$ je plocha pravoúhlého trojúhelníku o stranách \mathbf{r} a $d\mathbf{r}$

$$dS = \frac{1}{2}(\mathbf{r} \times d\mathbf{r})$$

– plošná rychlosť \mathbf{w} – změna opsané plochy v čase

$$\mathbf{w} = \frac{d\mathbf{S}}{dt} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = \frac{1}{2}(\mathbf{r} \times \mathbf{v})$$

– pro moment hybnosti platí $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ a $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) = 2m\mathbf{w}$$

– ze zákona zachování momentu hybnosti

$$\mathbf{L} = \text{konst} \wedge m = \text{konst} \rightarrow \mathbf{w} = \text{konst}$$

7.6.3 Třetí Keplerův zákon

- „Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet je stejný jako poměr třetích mocnin délek jejich hlavních poloos (středních vzdáleností těchto planet od Slunce).“

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

- odvození
 - inerciální soustava spojená se Sluncem, kruhové dráhy planet

$$\begin{aligned} F_g &= F_d \\ G \frac{mM}{r^2} &= \frac{mv^2}{r} \\ v^2 &= GM \frac{1}{r} \end{aligned}$$

* M – hmotnost Slunce

- * r – vzdálenost planety a Slunce
- planeta urazí obvod kružnice za čas T rychlostí v

$$\begin{aligned}vT &= 2\pi r \\v^2 T^2 &= 4\pi^2 r^2 \\G \frac{M}{r} T^2 &= 4\pi^2 r^2 \\T^2 &= \frac{4\pi^2}{GM} r^3\end{aligned}$$

- v případu dvou planet můžeme konstantu porovnat → získáme tvar 3. KZ

8 Základní poznatky molekulové fyziky a termodynamiky

- metody molekulové fyziky a termodynamiky
 - makroskopický pohled
 - * pozorování těles a dějů
 - * neuvážení jednotlivých částicích, uvážení jen rozměrů těles
 - termodynamická metoda
 - * pozorování tepelných jevů
 - * založeno na zákonu zachování a přeměny energie
 - * neuvažujeme čisticové složení látky z molekul, atomů
 - statistická metoda
 - * zabývá se strukturou látek
 - * odvětví molekulové fyziky

8.1 Kinetická teorie stavby látek

- látka složena z častic
- částice v neustálém a neuspořádaném pohybu
 - posuvný pohyb (plyny)
 - otáčivý pohyb (molekuly plynů)
 - kmitavý pohyb (pevné a kapalné látky)
- vzájemné působení častic silami
 - malé vzdálenosti – odpudivé
 - velké vzdálenosti – přitažlivé
- částice v pohybu → kinetická energie
- plyn – narážení častic do stěn nádoby → tlak / tlaková síla

8.1.1 Důkazy neuspořádaného pohybu

Difúze

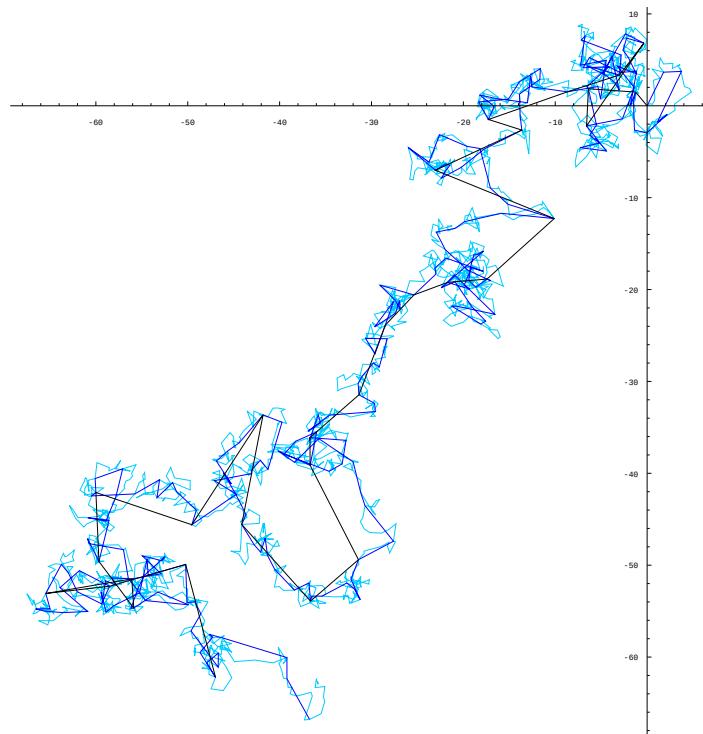
- samovolné pronikání častic jedné látky mezi částice druhé látky
- vyšší teplota → rychlejší difúze → vyšší rychlosť častic

Osmóza

- samovolný pohyb častic roztoku přes polopropustnou membránu
- přesun média z místa malé koncentrace do místa velké koncentrace → vyrovnání koncentrací
- důležitá v biologických systémech

Brownův pohyb

- náhodný pohyb mikroskopických částic v plynu nebo kapalině
- částice náhodně posouvány nárazy částicemi látky
- rozptyl částic z jednoho místa náhodnými směry – zvyšování entropie



8

Obr. 8.1: Znázornění Brownova pohybu

8.2 Síly mezi částicemi

- vzájemná interakce elektronových obalů a atomových jader
- tzv. **vazebné sily**
- malá vzdálenost ($r < r_0$) – prudké zvyšování odpudivé síly částic
- rovnovážná poloha ($r_0 \approx 0,01 \text{ nm} - r_0 \approx 0,1 \text{ nm}$) – místo vyrovnání odpudivé a přitažlivé síly
- velká vzdálenost ($r > r_0$) – přitažlivá síla, se vzdáleností klesá, projevení do vzdálenosti asi $\approx 1 \text{ nm}$

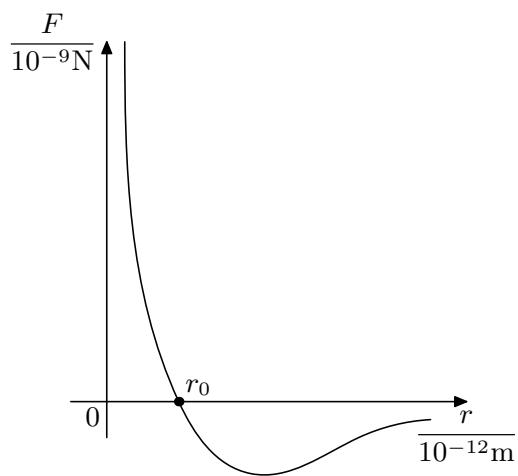
8.3 Energie částic

8.3.1 Vazebná energie

- rovno práci potřebné pro rozdelení částic ve vazbě
- potenciální energie vazby
- způsobena vazebními silami

8.3.2 Kinetická energie

- kinetická energie pohybující se částice
- při pohybu či kmitání
- rostoucí s rostoucí teplotou



Obr. 8.2: Graf závislosti síly na vzdálenosti

8.4 Vzájemné působení částic

8.4.1 Pevné látky

- pevné uspořádání částic pomocí vazeb
 - pravidelné – krystalické látky
 - nepravidelné – amorfní látky
 - střední vzdálenosti částic velmi malé
 - kmitání částic okolo rovnovážných poloh – s teplotou roste amplituda
 - potenciální energie částic větší než kinetická energie

Typy vazeb

- iontová
 - způsobena elektrostatickou silou častic
 - mezi elektropozitivním a elektronegativním prvkem
 - vodíková – vodíkové můstky, např. mezi krystaly ledu
 - kovová – způsobeno uvolněnými valenčními elektrony
 - kovalentní – sdílení valenčních elektronů
 - van der Waalsova
 - slabá vazba elektrické povahy
 - převážně při nízkých teplotách
 - I, Cl, O, H, organické sloučeniny, krystaly s velkou relativní hmotností

8.4.2 Kapalné látky

- částic více pohyblivé jak u pevných látek, ale méně než u plynů
 - kmitání kolem časově proměnných rovnovážných poloh
 - vnější síla → přesun částic ve směru sily → tekutost
 - potenciální energie srovnatelná s kinetickou energií

8.4.3 Plynné látky

- volný pohyb částic
 - zanedbatelné přitažlivé síly
 - nemají rovnovážné polohy
 - vykonávání tepelného pohybu – posuvný pohyb různými rychlostmi a různých velikostech a směrech
 - změna rychlosti částic srážkou

- růst střední rychlosti molekul s teplotou
- potenciální energie mnohem menší, než kinetická

Rychlosti částic

- velikost rychlosti částice může dosahovat hodnot od 0 do nekonečna → nelze určit kinetickou energii jedné částice
- popis pomocí rychlostí vycházejících z Maxwellovy rozdělovací funkce
 - určení pravděpodobnosti dané rychlosti pro danou částici

Nejpravděpodobnější rychlosť

- hodnota rychlosti s největší pravděpodobností
- v bodě $\frac{df}{dv} = 0$

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

- $k = 1,380\,649 \cdot 10^{23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ – Boltzmannova konstanta
- T – termodynamická teplota
- m – hmotnost jedné částice/molekuly

Střední rychlosť

- průměr rychlostí všech molekul

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

Střední kvadratická rychlosť

- aritmetický průměr kvadrátu rychlostí všech častic

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m}$$

- používáno při určení střední energie molekuly nebo tlaku plynu

Efektivní rychlosť

- odmocnina střední kvadratické rychlosti

$$v_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

8

Vnitřní energie plynu

- celková kinetická energie všech častic

$$E_k = \frac{1}{2}m\overline{v^2} \cdot N = \frac{1}{2}m \cdot \frac{3kT}{m} \cdot N = \frac{3}{2}kTN$$

- N – počet častic

- střední hodnota kinetické energie jedné částice

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2}kT$$

- celková vnitřní energie

$$U = E_k = \frac{3}{2}kTN = \frac{3}{2}kT \cdot nN_A = \frac{3}{2}nRt$$

- n – látkové množství

- $R \doteq 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ – plynová konstanta

8.4.4 Plazma

- soustava elektricky nabitéch částic (iontů, volných elektronů, a neutrálních částic)
- při vysokých teplotách možnost složení pouze z elektronů a jader
- vysoká energie částic

8.5 Stav soustavy

- popsán stavovými veličinami – teplota, objem, tlak, hmotnost...
- další popis stavu – chemické složení, skupenství, uspořádání částic...
- termodynamická soustava – zkoumaná skupina těles (plyn ve válcu s pístem, voda a pára...)
- stavová změna soustavy – při interakci s okolím; přechod mezi stavů → změna stavových veličin

8.5.1 Soustavy

Izolovaná soustava

- nedochází k výměně energie ani částic s okolím
- děje probíhají pouze v rámci soustavy
- idealizovaný případ, reálně nedosažitelný
- termoska s čajem, kalorimetrum...

Uzavřená a otevřená soustava

- uzavřená – dochází k výměně energie, nedochází k výměně částic; hrnec s poklicí
- otevřená – výměna energie i částic s okolím; hrnek s čajem

8

Adiabaticky izolovaná soustava

- nedochází k tepelné výměně
- sifonová láhev

8.5.2 Rovnovážný stav soustavy

- neměnný stav soustavy
- setrvávající stav při neměnných vnějších vlivech
- konstantní stavové veličiny
- rovnovážný děj – procházení soustavy mezi řadou na sebe navazujících rovnovážných stavů

8.6 Termodynamická teplota

- veličina vyjadřující energii systému
- vnímaní člověkem jako studené/teplé

8.6.1 Tepmomér

- zařízení měřící teplotu
- nepřímé měření – měření objemu kapaliny, tlak plynu...
- měření teploty v různých stupnicích
 - Celsiova stupnice
 - * jednotka stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$)
 - * $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – bod tání ledu; $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – bod vypařování vody
 - * obvyklé značení t
 - Kelvinova stupnice
 - * rozestupy stupňů stejné jako u Celsiových
 - * 0 K – částice bez pohybu, nekmitají, nulová kinetická energie
 - * $0\text{ K} = 273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$

* značení T

Typy

- kapalinové
 - roztahování kapaliny
 - použitelné pouze při určitých intervalech teplot
 - rtut, líh
- plynové
 - změna tlaku/objemu plynu při zahřívání
 - široký interval teplot
- bimetalové
 - rozdílná tepelná roztažnost dvou kovových plátků
 - orientační měření teploty
- odporové
 - měření elektrického odporu polovodiče
 - měření pomocí Wheatstonova můstku či děliče napětí
- termoelektrické
 - měření termoelektrického jevu na termočlánku
- radiační
 - založeny na zákonu o tepelném záření
 - měření vysokých teplot

9 Vnitřní energie, práce, teplo

9.1 Vnitřní energie

- značka U , $[U] = \text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- souhrn energií všech vnitřních částic tělesa
 - hlavní složky – kinetická (pohyb a kmitání) a potenciální energie částic
 - další složky – energie elektrická, chemická, jaderná...
- celková kinetická a potenciální energie nezahrnuta

9.1.1 Změny vnitřní energie

- nekonstantní – může se měnit

Konáním práce

- konání práce působením vnějších sil
 - změna objemu nebo tlaku soustavy
 - tření těles
- obrábění kovů, stlačování plynů, mletí látek, pád meteoru
- tepelné motory – vnitřní energie paliva → mechanická práce

Tepelnou výměnou

- přesun energie z teplejšího tělesa do chladnějšího
 - srážky částic na rozhraní – výměna energie
 - zářením a pohlcováním záření tělesy
- výměna tepla

9.2 Teplo

- značka Q , $[Q] = \text{J}$
- termodynamická veličina vyjadřující změnu vnitřní energie – tepelnou výměnou nebo konáním práce

9.2.1 1. termodynamický zákon

- „*Přírůstek vnitřní energie soustavy se rovná součtu práce W vykonané okolními tělesy působícími na soustavu určitými silami a tepla Q odevzdaného okolními tělesy soustavě.*“

$$\Delta U = W + Q$$

- těleso koná práci a předává energie okolí ($W < 0, Q < 0$) → snížení vnitřní energie ($\Delta U < 0$)
- okolí koná práci a předává energii tělesu ($W > 0, Q > 0$) → zvýšení vnitřní energie ($\Delta U > 0$)
- formulace zákonu zachování energie
- energie nevzniká, pouze se mění její forma
- adiabatický děj
 - $Q = 0 \Rightarrow \Delta U = W$
 - změna vnitřní energie způsobena pouze vykonanou prací
- tepelná výměna
 - $W = 0 \Rightarrow \Delta U = Q$
 - změna vnitřní energie způsobena pouze výměnou tepelné energie

9.2.2 Kalorimetrická rovnice

- popis míry tepla při změně teploty tělesa za stejného skupenství

$$Q = mc\Delta t$$

- m – hmotnost tělesa
- c – měrná tepelná kapacita
- Δt – rozdíl počáteční a koncové teploty

- využití při zkoumání výsledné teploty dvou těles s rozdílnou počáteční teplotou (např. horká kovová kulička ve vodě)
 - ZZE: $Q_{\text{přijaté}} = Q_{\text{odevzdané}}$

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_2 \\ m_1 c_1 \Delta t_1 &= m_2 c_2 \Delta t_2 \\ m_1 c_1 (t - t_1) &= m_2 c_2 (t_2 - t) \end{aligned}$$

- * t_1, t_2 – počáteční teplota studeného a teplého tělesa
- * t – výsledná teplota

- měření v kalorimetrech

Měrná tepelná kapacita

- značka c , $[c] = \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
- veličina vyjadřující potřebnou energie pro ohřátí 1 kg látky o 1 K
- pro každou látku odlišná
- určována experimentálně

Tepelná kapacita

- značka C , $[C] = \text{J}\cdot\text{K}^{-1} = \text{J}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
- veličina vyjadřující potřebnou energie pro ohřátí látky o 1 K

$$Q = C\Delta t$$

- nezávislá ne hmotnosti, pouze na teplotě
- specifická pro dané těleso
- užitečná např. při počítání kalorimetrických rovnic bez zanedbání kalorimetru

10 Struktura a vlastnosti plynného skupenství

10.1 Mechanické vlastnosti

- snadno stlačitelné
- zaobírají objem a tvar nádoby
- tekuté
- neuspořádaný pohyb částic

10.1.1 Ideální plyn

- ideální model plynu použitý pro modely, v reálu neexistuje, blíží se za velké teploty a nízkého tlaku
- rozměry molekul vzhledem ke vzdálenosti molekul zanedbatelně malé
- molekuly na sebe kromě srážek nepůsobí silami → potenciální energie soustavy nulová → vnitřní energie dána pouze kinetickou e.
- dokonale pružné srážky se stěnami nádoby

10.2 Stav plynu

10.2.1 Stavové veličiny

- vyjadřující stav plynu
- objem V , $[V] = \text{m}^3$ – prostor zabrán plynem
- tlak p , $[p] = \text{Pa} = \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ – síla plynů působící na jednotku plochy stěny
- teplota T , $[T] = \text{K}$ – tepelný stav plynu
- látkové množství n , $[n] = \text{mol}$ – počet elementárních jedinců specifikovaných Avogradrovou konstantou

10.2.2 Stavová rovnice

- vztah mezi stavovými veličinami při rovnovážném stavu

$$pV = nRT$$

- $R \doteq 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ – molární plynová konstanta
- při neměnném množství plynu

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

10.3 Děje v ideálním plynu

10.3.1 Izotermický

- děj, kdy zůstává teplota konstantní – mění se pouze tlak a objem

- součin tlaku a objemu konstantní

$$T_1 = T_2 \Rightarrow nRT = \text{konst}$$

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

- grafem izoterma
- teplota konstantní → vnitřní energie zůstává stejná
- teplo přijaté plynem koná práci

10.3.2 Izochorický

- děj za konstantního objemu

$$\frac{p}{T} = \frac{nR}{V} = \text{konst}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

- grafem izochora
- tlak přímo úměrný teplotě
- stálý objem → nekoná práci
- přijaté teplo přeměněno na vnitřní energii

10.3.3 Izobarický

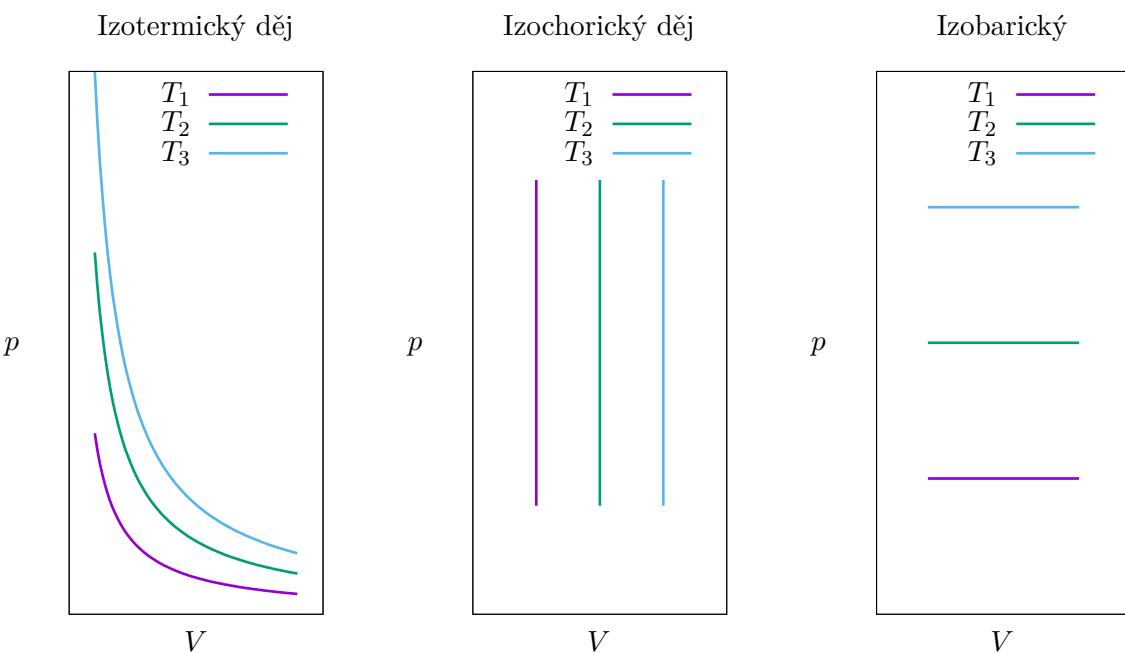
- děj za konstantního tlaku

$$\frac{V}{T} = \frac{nR}{p} = \text{konst}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

- grafem izobara
- přijaté teplo rovno součtu změny vnitřní energie a vykonané práce

10



Obr. 10.1: pV diagramy dějů

10.3.4 Adiabatický

- neprobíhá tepelná výměna s okolím ($Q = 0$) \Rightarrow změna vnitřní energie způsobena prací ($\Delta U = W$)
- většinou velmi rychlé děje – nestihne dojít k výměně tepla
- působení síly na píst → konání práce sílou → zvýšení vnitřní energie \rightarrow zvýšení teploty
- rozpínání plynu / roztahování pístu → plyn koná práci → snížení vnitřní energie \rightarrow snížení teploty
- grafem adiabata
- platí Poissonův zákon

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

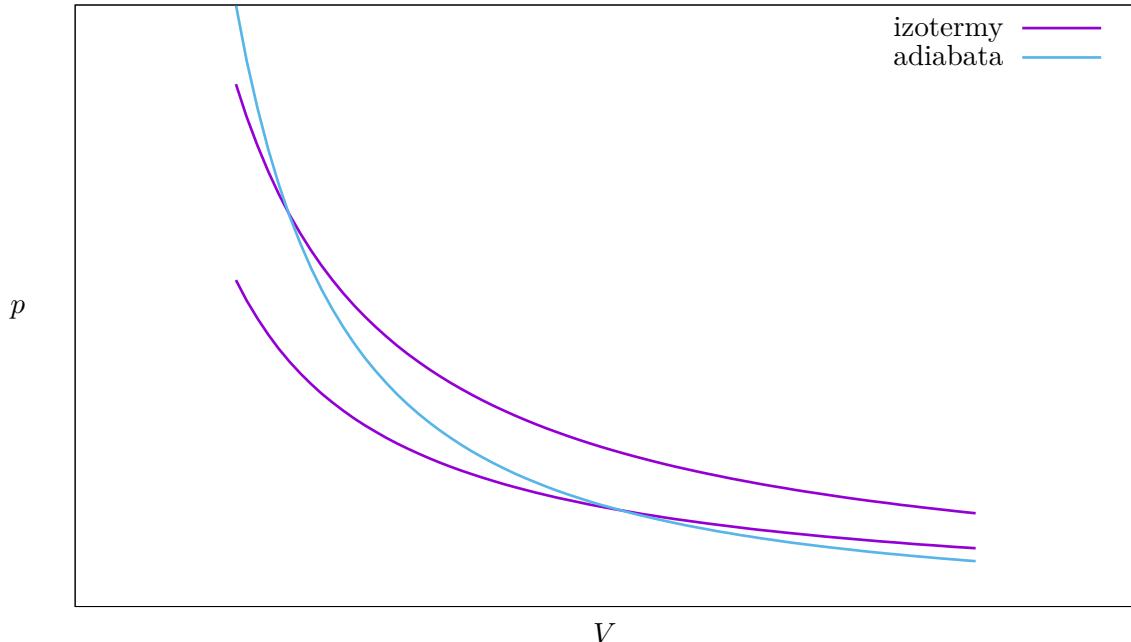
$$\kappa = \frac{c_p}{c_V}$$

– κ – Poissonova konstanta

– c_p, c_V – měrná tepelná kapacita plynu při stálém tlaku a objemu

– $c_p > c_V \Rightarrow \kappa > 1$

- jednoatomární plyn – $\kappa = 5/3$; dvouatomární plyn – $\kappa = 7/5$
- izoterma – $pV^1 = \text{konst}$; adiabata – $pV^\kappa = \text{konst}, \kappa > 1$



Obr. 10.2: pV diagram adiabatického dějě

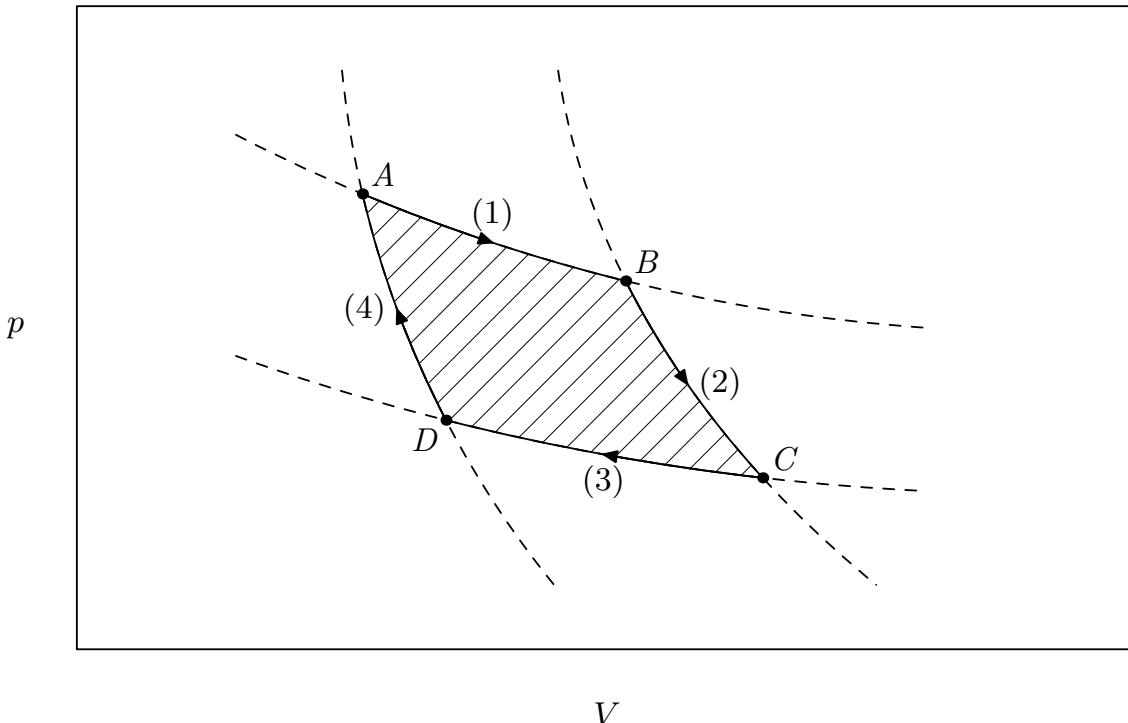
10

10.3.5 Kruhový

- schopnost práce tepelného stroje pouze při vrácení plynu do původního stavu
- pV diagram uzavřená křivka (např. graf 10.3)
 - $A \rightarrow B$ – izotermické expanze
 - $B \rightarrow C$ – adiabatická expanze
 - $C \rightarrow D$ – izotermické komprese
 - $D \rightarrow A$ – adiabatická komprese
- vykonaná práce plynu – plocha uzavřené křivky
 - 1, 2 – plyn koná práci
 - 3, 4 – okolí koná práci
- výsledná práce rovna rozdílu práce plynu a prostředí (plochy pod křivkou $A \rightarrow B \rightarrow C$ a $C \rightarrow D \rightarrow A$)

- počáteční a koncový stav stejný – mezi vnitřní energie mezi cykly nulová ($\Delta U = 0$)
- přijímání tepla Q_1 od ohříváče, předávání tepla Q_2 chladiči
 - celkové teplo $Q = Q_1 - Q_2$
 - 1. termodynamický zákon – $Q = W'$ dodaný rozdíl tepla roven vykonané práci
- účinnost η – podíl vykonané práce a dodaného tepla

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



Obr. 10.3: Diagram kruhového děje (Carnotův cyklus)

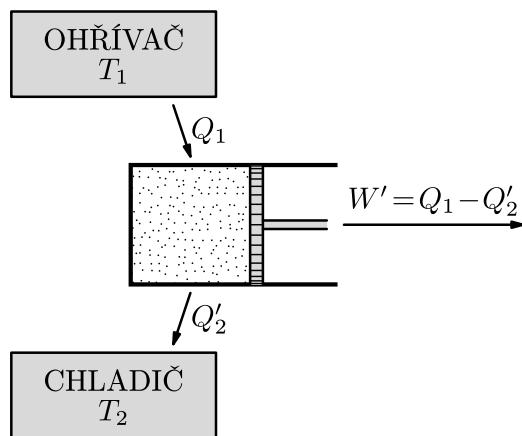
10.4 Druhý termodynamický zákon

- „Není možné sestrojit periodicky pracující tepelný stroj, který by jen přijímal teplo od určitého tělesa (ohříváče) a měnil by je v ekvivalentní práci (tj. vykonával stejně velkou práci).“
- tepelný stroj vždy musí ochlazovat jedno těleso a zároveň ohřívat druhé
- nelze všechno přijaté teplo přeměnit na práci
- účinnost stroje nikdy nedosáhne $\eta = 100\%$

10.5 Plyn při nízkém a vysokém tlaku

10.5.1 Nízký tlak

- zmenšení hustoty molekul → zvětšení střední volné dráhy l
 - délka přímočarého úseku mezi dvěma srážkami
- střední volná dráha molekuly λ
 - aritmetický průměr středních volných dráh všech molekul
 - statistická veličina
 - nepřímo úměrná tlaku
- pokles střední srážkové frekvence z
 - počet srážek za jednotku času
- velmi nízké tlaky (10^{-5} Pa) – střední volná dráha větší než rozměry nádoby – téměř nedochází ke srážkám



Obr. 10.4: Schéma tepelného stroje

10.5.2 Vysoký tlak

- zvýšení hustoty molekul → zmenšení střední volné dráhy λ
- nelze zanedbat přitažlivé síly a vlastní objem molekul
- dostatečně vysoký tlak a dostatečně nízká teplota – vazby mezi molekulami; zkapalnění

10.6 Tepelné motory

- stroje přeměňující vnitřní energii na mechanickou energie
- typy
 - parní motory – pára, získání mimo vlastní motor
 - spalovací motory – plyn vzniklý při hoření paliva, vznik uvnitř motoru

Tepelný motor	η_{\max}	η	Poznámka
parní stroj lokomotivy	0,35	0,09 - 0,15	účinnost parních motorů lze zvýšit užitím přehřáté páry
parní turbína	0,60	0,25 - 0,35	
plynová turbína	0,55	0,22 - 0,37	
čtyřdobý zážehový motor	0,65	0,20 - 0,33	
vznětový motor	0,73	0,30 - 0,42	vzduch se zahřívá již kompresí a poté spalováním nafty
raketový motor	0,75	0,50	vysoká účinnost je dána tím, že $T_1 = 4\,000\text{ K}$

Tab. 10.1: Porovnání typů tepelných motorů

10

10.6.1 Parní stroj

- historický význam
- vznik 1769 – James Watt → prudký rozvoj techniky
- používán do 60. let 20. stol.
- pálení uhlí → ohřívání vodní páry → pohyb pístu

10.6.2 Turbíny

- roztáčení vícestupňové turbíny pomocí par nebo plynů pod vysokým tlakem
- roztočení turbíny → ochlazení plynu

10.6.3 Zážehové motory

- spalování benzínových par a vzduchu uvnitř komor → expanze plynu → pohyb pístu
- převod posuvného pohybu na rotační

Čtyřdobý zážehový motor

- 4 fáze – sání, komprese, výbuch, výfuk plynů
- auta, letadla, generátory...
- možnost regulace přívodu paliva

Dvoudobý motor

- pouze 2 fáze; sání a komprese dohromady a výbuch a výfuk dohromady
- jednodušší, ale méně efektivní
- menší vozidla, malé přenosné zařízení (sekačky, pily...)

11 Struktura a vlastnosti pevných látek

11.1 Mechanické vlastnosti

- pružnost – schopnost vratné deformace
- tvárnost – schopnost nevratné deformace
- pevnost – odolnost vůči trvalému porušení celistvosti – napětí nutné k porušení
- houževnatost – odolnost vůči trvalému porušení celistvosti – práce nutné k porušení

11.1.1 Struktura látek

Krystalické

- částice (atomy, molekuly, ionty) pravidelně uspořádány v mřížce
- pravidelný geometrický tvar – krystalické mřížky
 - trojklonná, jednoklonná, kosočtverečná, čtverečná, krychlová, šesterečná (hexagonální), klenková
- monokrystal
 - periodický v celém objemu
 - diamant, křemen, kamenná sůl
- polykrystyl
 - mnoho zrn, uspořádání uvnitř zrn pravidelné
 - vzájemná poloha zrn náhodná
 - většina látek, např. kovy

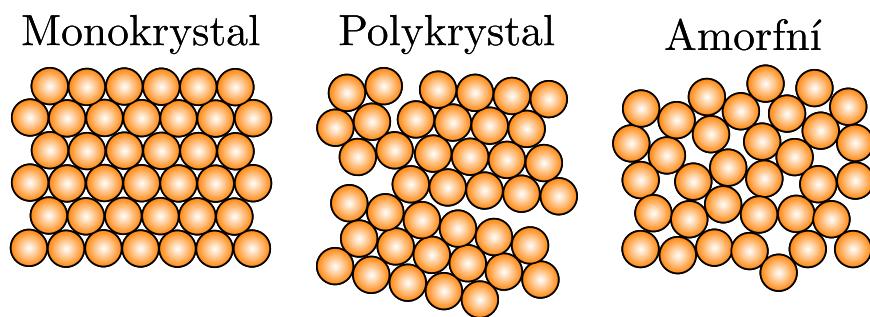
11

Amorfni

- periodické uspořádání do 10^{-8} m, na větších vzdálenostech pravidelnost porušena
- → neperiodické uspořádání
- sklo, pryskyřice, polymery, vosk, asfalt

11.1.2 Izotropie

- závislost vlastností látek na směru



Obr. 11.1: Uspořádání částic v pevných látkách

Izotropní látky

- ve všech směr stejné vlastnosti
- polykryštaly a amorfni látky

Anizotropní látky

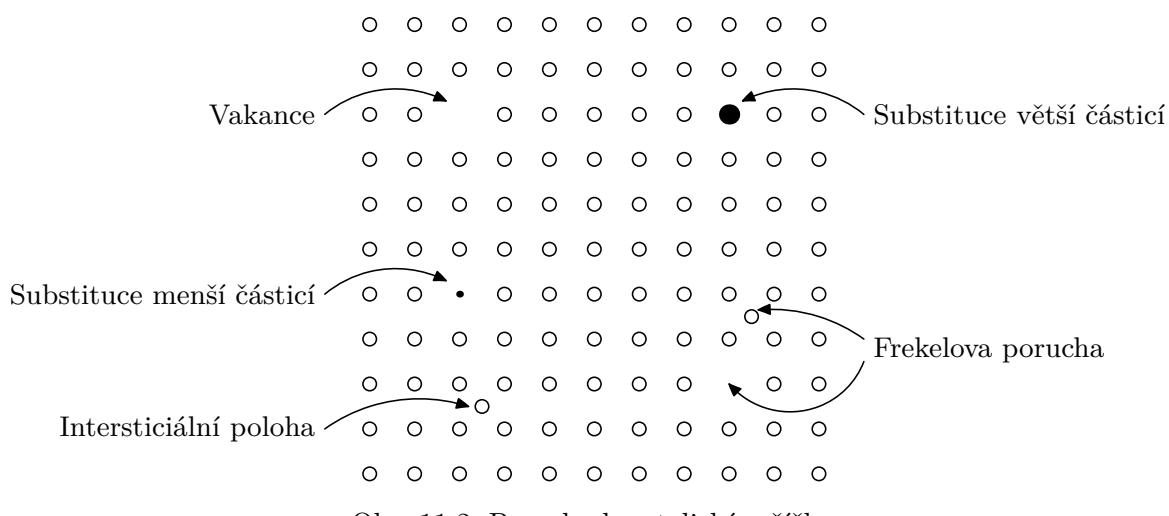
- některé fyzikální vlastnosti závisí na směru
- monokryštaly

11.1.3 Poruchy mřížky

- odchylky od pravidelného rozložení
- bodové poruchy – poruchy mřížky pouze v jednom bodě
- čárové poruchy – porucha podél linie
- objemové poruchy – porucha ve větším objemu

Bodové poruchy

- vakance – prázdné místo v mřížce
- intersticiální poloha – částice navíc mimo mřížku
- substituční porucha – vyměnění částice za jinou (nečistoty)
- Frekelova porucha – částice opustí původní polohu (tvoříc vakanci) a přejde na novou (do intersticiální polohy)



Obr. 11.2: Poruchy krystalické mřížky

11.2 Typy vazeb

- vazby – váží k sobě částice krystalové mřížky

11.2.1 Iontová

- mezi elektropozitivním a elektronegativním prvkem
- pomocí elektronů
- jeden atom odevzdá elektron (\rightarrow kationt) a druhý atom jej příjme (\rightarrow aniont)
- přitahování elektrostatickou silou
- tvrdé, vysoká teplota tání
- křehké, štěpné podél rovin kolmých na hrany
- běžně izolanty, při vyšších teplotách vodiče
- pro světlo propustné

11.2.2 Kovová

- uvolnění valenčních elektronů do prostoru
- volný pohyb mezi kationty kovových atomů
- neprůhledné, dobře vodivé

11.2.3 Kovalentní

- sdílení valenčních elektronů sousedních atomů
- elektrony patří oběma elektronům
- směrová (pod úhlem) a nasycená
- vazby atomů stejných prvků (H_2 , Cl_2 , O_2 , ...) či jiných sloučenin (CH_4 , H_2O , HNO_3 , ...)
- tvrdé, vysoká teplota tání, nerozpustné v ředitelích, izolanty nebo polovodiče

11.2.4 Vodíková (vodíkový můstek)

- nevazebná interakce
- vodík + elektronegativní prvek – atom s volným elektronovým párem
- voda, nukleonové kyseliny

11.2.5 Van der Waalsova

- slabá vazby
- elektrické povahy
- typicky krystaly inertních prvků
- při nízkých teplotách, při velkých relativních hmotnostech i pokojová teplota (parafín)
- měkké, nízká teplota tání

11

11.3 Deformace

- změna rozměrů, tvaru a objemu tělesa z důvodu vnějších vlivů (síla, teplota...)
- pružná (elastická)
 - dočasná/vratná deformace
 - přestanou působit vnější vlivy, deformace zmizí
 - prodloužení pružiny, prohnutí desky
- tvárná (plastická)
 - stálá
 - přetrvává i po skončení vnějšího vlivu
 - kování, válcování, přílišné natáhnutí pružiny...

11.3.1 Deformace působením sil

- tahem
 - působení dvou stejně velkých sil v jedné přímce ven z tělesa
 - roztahování tělesa
 - lano jeřábu, kladky...
- tlakem
 - působení dvou stejně velkých sil dovnitř tělesa
 - smrštění tělesa
 - pilíře mostu, nosníky domu, nosné sloupy...
- ohybem
 - působení síly kolmo k podélné ose
 - dolní vrstvy deformovány tahem, vrchní tlakem, zachování střední vrstvy
 - prohnutí tělesa
 - tyč mezi dvěma podpěrnými body, most mezi sloupy, polička...
- smykem
 - působení dvou sil na spodní a horní podstavu tělesa
 - síly v rozdílných rovinách
 - vzájemné posunutí vrstev
 - šroub, nýt
- krutem
 - dvě dvojce sil na podstavách, stejné momenty sil opačného směru
 - vzájemné otáčení vrstev
 - hřídele, šrouby při utahování, vrtání...

11.3.2 Hookův zákon

- zákon pro pružnou deformaci
- pro malá prodloužení a deformace
- prodloužení tělesa při deformaci tahem a tlakem

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \Rightarrow \sigma = \varepsilon E$$

- $\varepsilon = \Delta l/l$ – relativní prodloužení/zkrácení tělesa
- σ – mechanické napětí
- E – modul pružnosti v tahu (Youngův modul)

- alternativní tvar

$$F = -kx$$

- F – působící síla
- k – konstanta pružnosti
- x – prodloužení
- relativní prodloužení
 - značka ε , $[\varepsilon] = 1$ (bezrozměrné)
 - popisuje relativní prodloužení tělesa při působení síly
- mechanické napětí
 - značka σ , $[\sigma] = \text{Pa}$
 - míra vnitřní síly na jednotku plochy

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

- popis stavu silového namáhání tělesa
- modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
 - značka E , $[E] = \text{Pa}$
 - míra prodloužení v závislosti na mechanickém napětí
 - vlastnost tělesa – konstantní, pro každý materiál rozdílná hodnota
 - konstrukční ocel (210 GPa), beton (35 GPa), monokrystalický diamant (820 GPa – 1 250 GPa)

11.3.3 Teplotní roztažnost

- změny rozměrů tělesa z důvodu změny teploty
- natahování drátů, zvětšení pístu v motoru

Délková roztažnost

- tepelné roztahnutí do délky
 - převážně u dlouhých těles – tyče, dráty, trubice...
 - popis změny délky v závislosti na změně teplotě
- $$\Delta l = l\alpha\Delta t$$
- l – původní délka
 - $\alpha, [\alpha = \text{K}^{-1}]$ – teplotní součinitel délkové roztažnosti
* závislý na teplotě, pro malé Δt approximace na konstantní
 - nová délka po změně teploty

$$l' = l + \Delta l = l + l\alpha\Delta t = l(1 + \alpha\Delta t)$$

- využití – měření teploty – bimetalové teploměry, termostaty, požární hlásiče...

Objemová roztažnost

- způsobeno délkovou roztažností do všech směrů

$$V' \approx V(1 + \beta\Delta t)$$

- $\beta = 3\alpha, [\beta = \text{K}^{-1}]$ – teplotní součinitel objemové roztažnosti
- platí jako approximace (zanedbání členů vyšších mocnin β)

12 Struktura a vlastnosti kapalin

12.1 Mechanické vlastnosti

- přechod mezi kapalinami a plyny
- ideální kapalina nestlačitelná, reálná velice málo stlačitelná
- tekuté
- zaujetí tvaru nádoby, vyrovnaní hladiny do roviny
- kmitání částic okolo proměnných rovnovážných poloh

12.1.1 Ideální kapalina

- nestlačitelná
- dokonale tekutá
- nulová viskozita – bez vnitřního tření

12.2 Povrchová vrstva

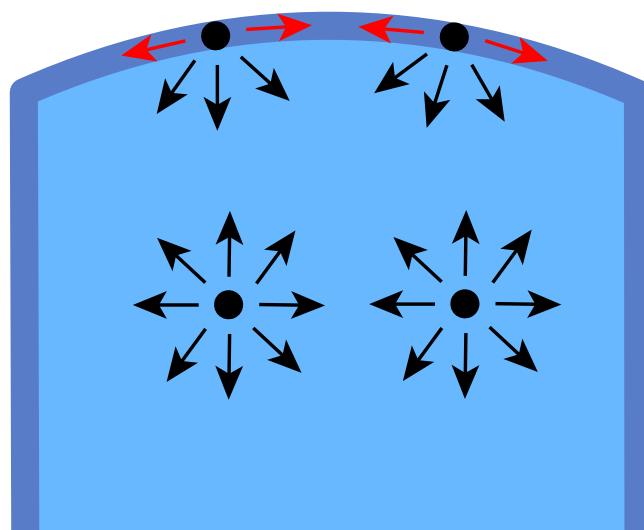
- vzájemné působení částic přitažlivými silami
 - sféra molekulového působení – sféra působení molekul ($\sim 1 \text{ nm}$), vliv molekul mimo lze zanedbat
- molekula uvnitř kapaliny – působení sil všemi směry, nulová výslednice
- molekula u povrchu (vzdálenost k povrchu menší než sféra působení) – výslednice sil směrem do kapaliny
 - zanedbávání přitahování molekul plynu
 - → **povrchová vrstva kapalin**

- povrchová energie E
 - potenciální energie molekul v povrchová vrstvě
 - práce potřebná pro přes molekuly do povrchové vrstvy

$$E = S\sigma$$

- * S – plocha volného povrchu kapaliny
- * σ – povrchové napětí

- snaha minimalizovat povrch a maximalizovat objem – minimalizace povrchové energie
 - nejlepší tvar koule → kapky mlhy, rosy...



Obr. 12.1: Síly povrchové vrstvy kapaliny

12.2.1 Povrchová síla

- síla povrchu kapaliny
- tečná na povrch směřující do kapaliny
- síla tvarující kapky do koule

12.2.2 Povrchové napětí

- značka σ , $[\sigma] = \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
- vlastnost povrchu kapaliny držet při sobě a zmenšovat povrch
- míra síly na jednotku délky obvodu

$$\sigma = \frac{dF}{dl}$$

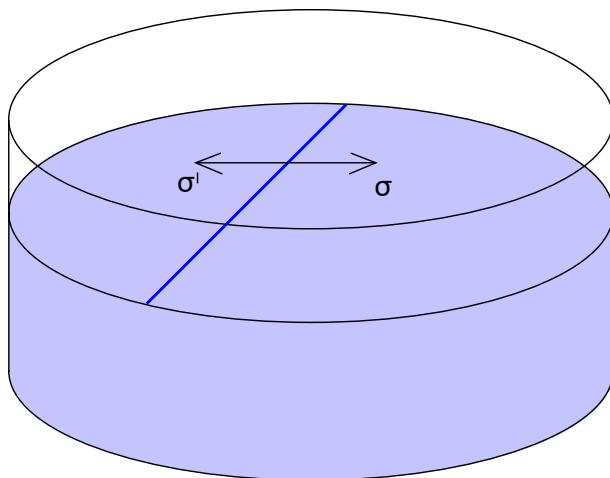
- vyplněný objem (hladina, kapka...) možno zjednodušit

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

- speciální případ – povrchová vrstva z obou stran (bublina, blána)

$$\sigma = \frac{F}{2l}$$

- po obvodu dvě blány → působení dvojnásobné síly



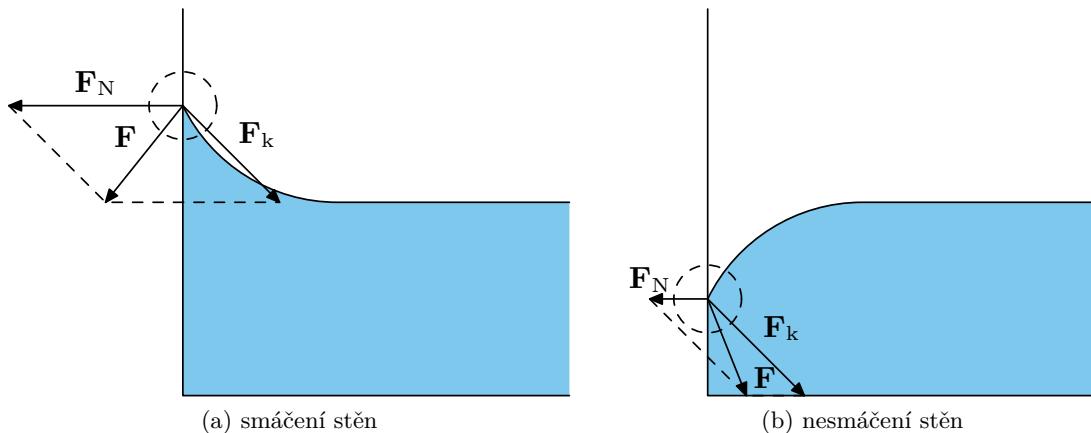
Obr. 12.2: Znázornění povrchového napětí

12.3 Jevy na rozhraní prostředí

- jevy na rozhraní kapaliny, pevné látky a plynu u stěn nádoby
 - dutý povrch (voda, líh...) – smáčení stěn
 - vypuklý povrch (rtuť) – nesmáčení stěn

12.3.1 Síly působící na molekuly

- přitažlivá síla molekul stěny F_N
 - kolmá na stěnu nádoby
- přitažlivá síla molekul kapaliny F_k
- přitažlivá síla molekul plynu F_p
- těhová síla F_G
- $F_k, F_N \gg F_G, F_p \Rightarrow$ zanedbání F_G a F_p
- výslednice F_k a F_N tvoří tvar kapaliny u stěny

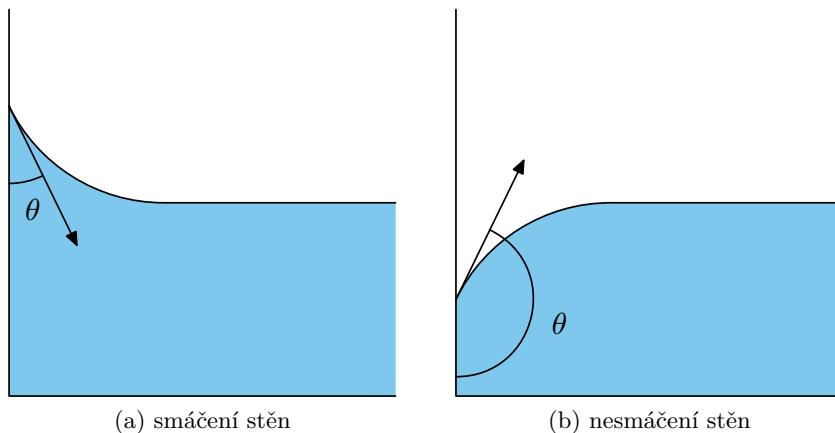


Obr. 12.3: Skládání sil na molekulách

12.3.2 Stykový úhel

- úhel stěny a kapaliny
- $\theta = 0$ – kapalina dokonale smáčí stěny nádoby
- $\theta = \pi$ – kapalina dokonale nesmáčí stěny nádoby
- $\theta \in (0, \pi/2) \cup (\pi/2, \pi)$ – skutečná (reálná) kapalina

- $\theta = \pi/2$ – povrch kapaliny nezakřivený



Obr. 12.4: Stykový úhel kapaliny se stěnou

12.3.3 Kapilární tlak

- tlak výslednice sil molekuly

$$p_k = \frac{F \cos \theta}{S}$$

- F – výslednice sil
- S – kolmý průměr povrchu kapaliny (vždy kruh)
- $\cos \theta$ – vertikální složka F

- závislý na zakřivení

$$p_k = \frac{\sigma l \cos \theta}{\pi r^2} = \frac{2\sigma \pi r \cos \theta}{\pi r^2} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$$

- r poloměr zakřivené plochy

12.4 Kapilární jevy (Kapilarita)

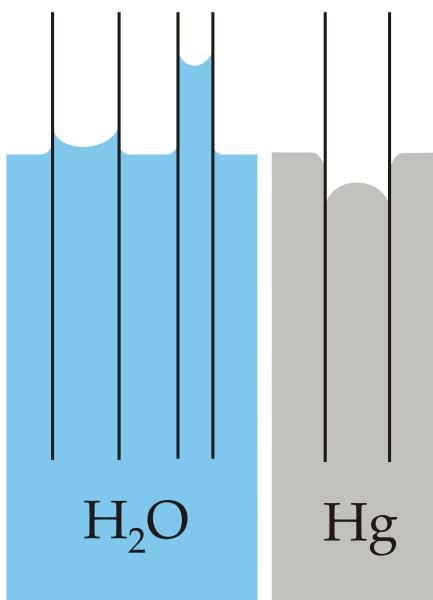
- jevy kapaliny při rozhraní s úzkou trubicí
- kapilární elevace – u smáčivých kapalin, vrchol na hladinou kapaliny
- kapilární deprese – u nesmáčivých kapalin, vrchol pod hladinou kapaliny
- změna výška hladiny způsobena tlakem – vyrovnání hydrostatického a kapilárního tlaku

$$\begin{aligned} p_h &= p_k \\ h\rho g &= \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \\ h &= \frac{2\sigma \cos \theta}{r \rho g} \end{aligned}$$

12

12.4.1 Praxe

- vzlínání vody
- pohyb vody na povrch půdy
- rostlinky – nasávání a rozvod vody
- pájení
- savé utěrky



Obr. 12.5: Kapilární elevace a deprese

12.5 Objemová roztažnost

- změna objemu objemu v závislosti na změně teploty

$$\Delta V = \beta \Delta T$$

$$V = V_0(1 + \beta \Delta T)$$

- platí pouze pro nízké rozdíly teplot
- β – teplotní součinitel objemové roztažnosti

- změna hustoty

$$\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T)$$

– zvětšení objemu, zachování hmotnosti \Rightarrow snížení hustoty

- využití – kapalinové teploměry (rtuť, líh, voda)

12.5.1 Anomálie vody

- podle vzorce – při zahřívání od 0 °C do 100 °C lineární klesání hustoty
- ve skutečnosti – maximální hustota okolo 4 °C (3,98 °C)
 - při zahřívání od 0 °C do 4 °C – zmenšování objemu
 - při zahřívání od 4 °C do 100 °C – zvětšování objemu
- výskyt – dna rybníků v zimě, směrem k hladině chladnější voda

13 Změny skupenství

- fyzikální děj změny skupenství látky
- změna vnitřní energie látky – změna kinetické a potenciální energie částic
- vykonání děje při teplotě tání/tuhnutí/vypařování/kondenzace/sublimace/desublimace
- teplota závislá na okolním tlaku, tabulkové hodnoty normálních teplot uváděny za normálního tlaku

13.1 Typy změn skupenství

- tání – pevné \rightarrow kapalné
- tuhnutí – kapalné \rightarrow pevné

- vypařování (var) – kapalné → plynné
- kondenzace – plynné → kapalné
- sublimace – pevné → plynné
- desublimace – plynné → pevné

13.2 Energetické změny

13.2.1 Skupenské teplo

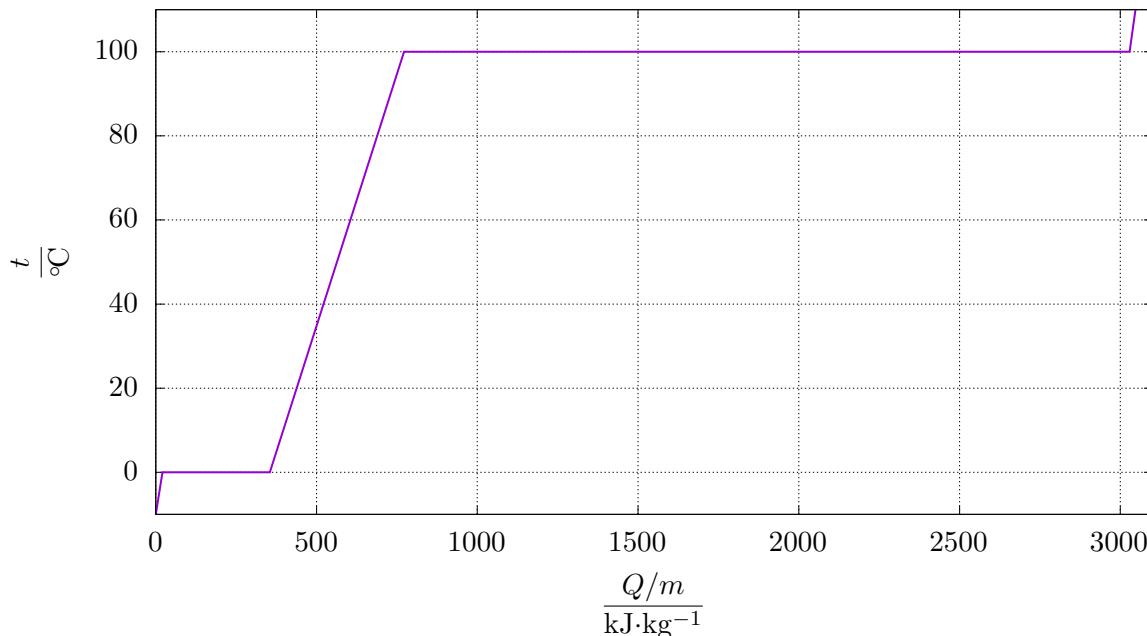
- značka L , $[L] = \text{J}$
- celkové teplo potřebné na skupenskou změnu
- teplo využito pro skupenskou přeměnu → při ději teplota konstantní
- přijímání tepla při změně pevná látka → kapalina → plyn; odevzdání tepla při opačném procesu
- pro opačné procesy (např. tání–tuhnutí) hodnota skupenského tepla stejná
- skupenské teplo tání a tuhnutí L_t , vypařování a kondenzace L_v , sublimace a desublimace L_s

13.2.2 Měrné skupenské teplo

- značka l , $[l] = \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
- skupenské teplo na jednotku hmotnosti

$$l = \frac{L}{m} \quad \Rightarrow \quad L = lm$$

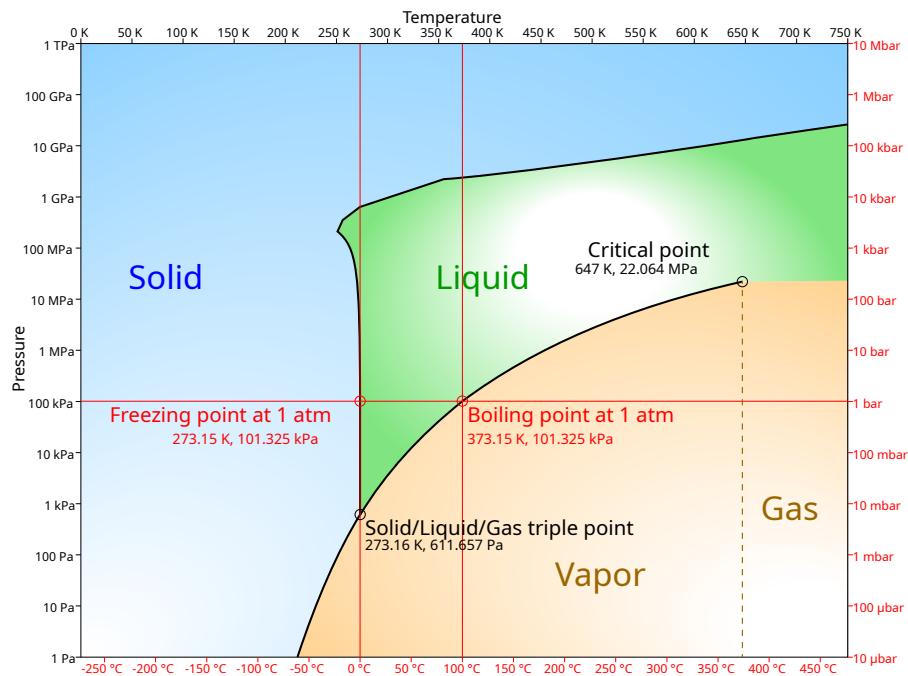
- měrné skupenské teplo tání/tuhnutí/vypařování...
- různé hodnoty pro různé procesy a látky



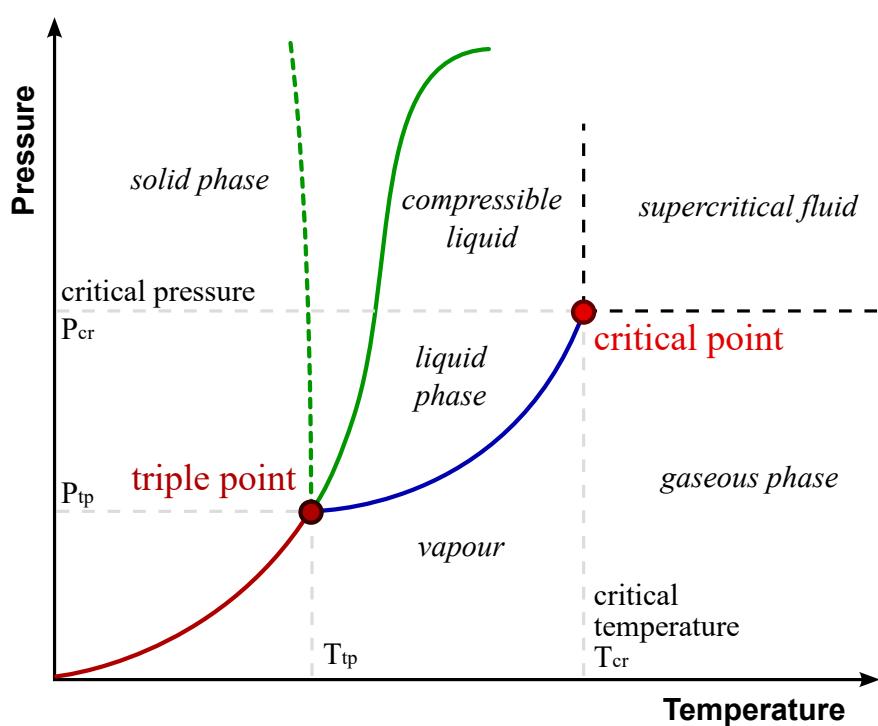
Obr. 13.1: Teplotní křivka zahřívání vody

13.3 Fázový diagram

- diagram popisující skupenství látky za různých teplot a tlaků



Obr. 13.2: Fázový diagram vody



Obr. 13.3: Fázový diagram pro různá skupenství

13.4 Pára

13.4.1 Sytá pára

- vyrovnání vypařování kapaliny z povrchu a zpětná kondenzace
- stálý tlak i teplota
- povrch chladnoucí kávy, PET láhev s minerálkou...
- tlak nezávislý na objemu
 - izotermické zvětšení/zmenšení objemu → odpaření/kondenzace páry → dorovnání tlaku
 - neplatí stavová rovnice pro ideální plyn
- růst tlaku s teplotou – křivka syté páry
 - kritická teplota – hustota páry a vody stejná, při teplotách vyšší neexistuje kapalina
 - růst teploty varu s tlakem

13.4.2 Přehřátá pára

- zahřátí syté páry bez přítomnosti kapaliny
- nižší tlak a hustota než sytá pára
- bližší vlastnosti ideálního plynu
- přibližná platnost stavové rovnice pro velmi zahřáté páry

14 Mechanické kmitání

- změna veličiny s opakováním nebo její tendencí
- srdce, ušní bubínek, kyvadlo, rádiové vlny, zvuk...
- **mechanický oscilátor** – volně kmitající zařízení, bez vlivu okolí
 1. kmitání tělesa na pružině – kmitání způsobeno pružností
 2. kyvadlo – kmitání způsobeno těhou silou
- rovnovážná poloha – poloha, ve které jsou působící síly v rovnováze; minimální energie oscilátoru
- trajektorie – úsečka, část křivky
 - ve stejných časových intervalech různá dráha – nerovnoměrný pohyb
 - periodické opakování pohybu – rovnoměrný pohyb
- kmit T – část pohybu, kdy se těleso dostane do stejného stavu (polohy, rychlosti, zrychlení...)
- kyv τ – polovina doby kmitu, navrácení do rovnovážné polohy ale s opačnou rychlostí

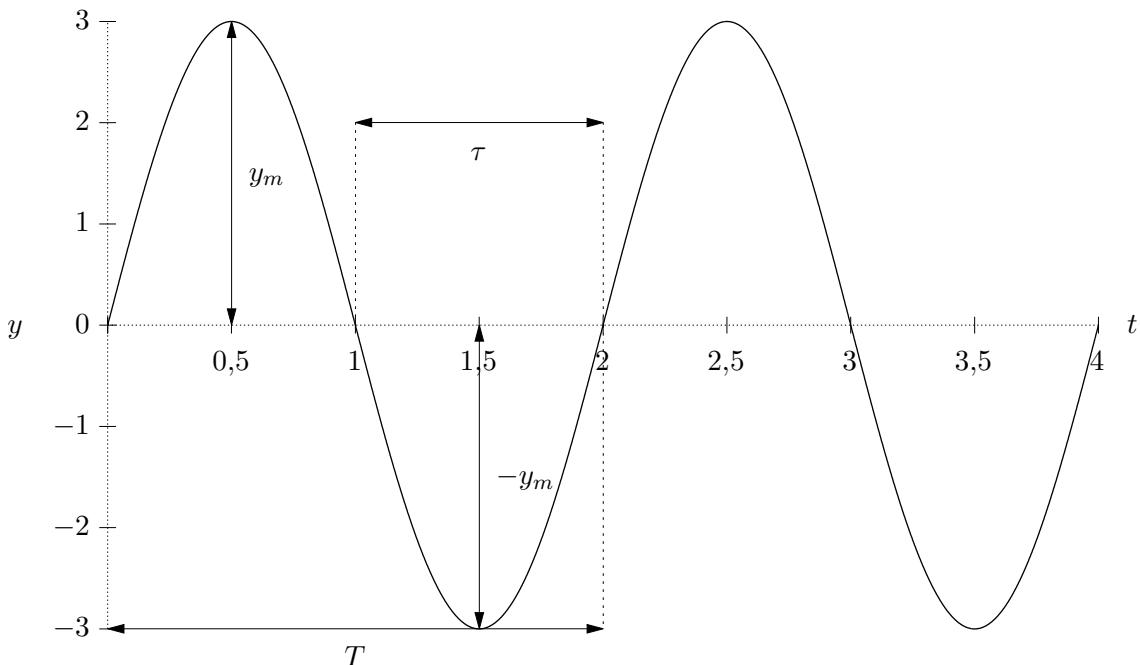
14.1 Kinematika kmitavého pohybu

- popis kmitání tělesa na pružině

14.1.1 Veličiny

- perioda $T, [T] = \text{s}$
 - čas navrácení do původního stavu
 - délka kmitu
- frekvence $f, [f] = \text{s}^{-1}$
 - počet zopakování periody za jednotku času
 - počet kmitů za jednotku času
 - převrácená hodnota periody
- okamžitá výchylka $y, [y] = \text{m}$
 - poloha mechanického oscilátoru na ose y
- amplituda kmitu (maximální výchylka) y_m – největší hodnota y
- fáze kmitavého pohybu $\varphi, [\varphi] = \text{rad}$
 - úhel, korelace s úhlovou dráhou při pohybu po kružnici
 - určuje ve které fázi pohybu se právě nachází
- úhlová frekvence $\omega, [\omega] = \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

- rychlosť kmitánia



Obr. 14.1: Graf výchylky v závislosti na čase

14.1.2 Poloha tělesa při kmitavém pohybu

- y -ovou složku pohybu možno popsat pomocí funkce sinus

$$y = y_m \sin \varphi$$

– sinus – hodnoty mezi 0 a 1 \Rightarrow nutno vynásobit y_m pro dosažení celého rozsahu hodnot
– φ – fáze kmitu vyjádřena jako úhel v kruhu

- rychlosť kmitánia ω – úhel za čas ($\omega = \varphi/t$) $\Rightarrow \varphi = \omega t$

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

- počáteční fázový posun φ_0

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

- 1 kmit – úhel $\varphi = 2\pi$ a čas T

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \Rightarrow \quad y = y_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = y_m \sin(2\pi ft)$$

14.1.3 Rychlosť kmitavého pohybu

- maximální při průchodu rovnovážnou polohou ($y = 0$), minimální v amplitudě ($y = \pm y_m$)
- odvození

$$\begin{aligned} v &= \dot{y} \\ v &= \frac{d}{dt} y_m \sin(\omega t) \\ v &= \omega y_m \cos(\omega t) \end{aligned}$$

– alternativní odvození z pohybu po kružnici

- maximální rychlosť $v_m = \omega y_m$

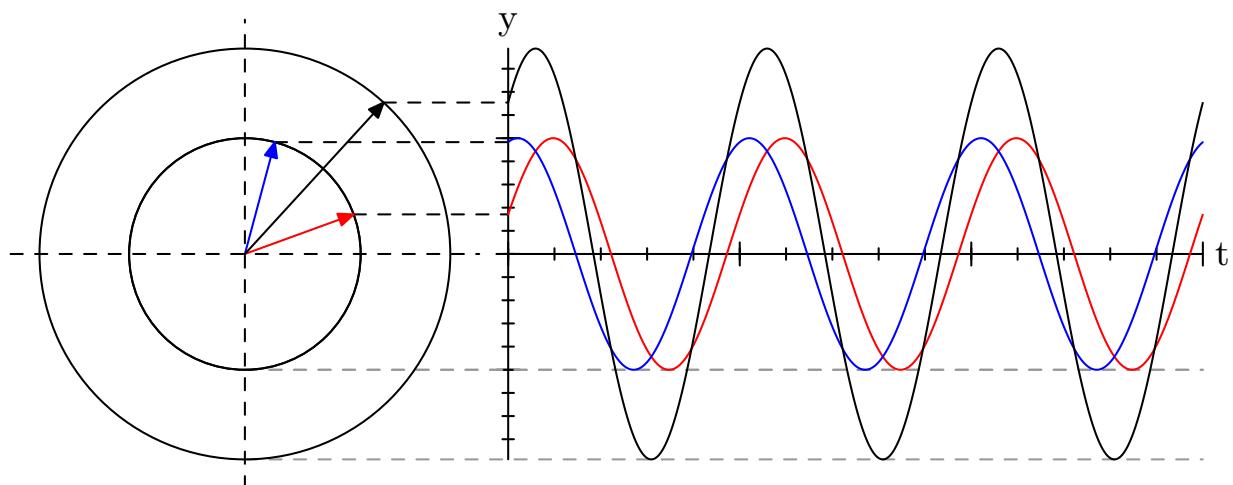
14.1.4 Zrychlení kmitavého pohybu

- směr vždy k rovnovážné poloze – opačné znaménko než okamžitá poloha y
- shodný se směrem působící síly
- maximální hodnota v maximální výchylce
- odvození

$$\begin{aligned} a &= \dot{v} \\ a &= \frac{d}{dt} \omega y_m \cos(\omega t) \\ a &= -\omega^2 y_m \sin(\omega t) = -\omega^2 y \end{aligned}$$

14.1.5 Skládání kmitů

- možno skládat několik kmitů do jednoho
- obecný případ ($\omega_1 \neq \omega_2$)
 - nejedná se o harmonické vlnění
 - výsledné kmitání získáno jako součet jednotlivých kmitání $y = y_1 + y_2$
- speciální případ – kmitání o stejně rychlost ($\omega_1 = \omega_2$)
 - výsledný fázor vektorových součtem všech fázorů
 - v souladu s principem superpozice (výslednice sil je rovna vektorovému součtu všech působících sil)
 - obecný případ – amplituda a fáze závisí na amplitudách, fázovém rozdílu a fázích jednotlivých kmitání
 - $\Delta\varphi = 0$ – vlny přesně na sobě – $y_m = y_{m1} + y_{m2}$
 - $\Delta\varphi = 180^\circ$ – vlny přesně od sebe – $y_m = y_{m1} - y_{m2}$



Obr. 14.2: Skládání vln stejné úhlové frekvence

14.2 Dynamika kmitavého pohybu

- příčinou kmitavého pohybu sílu
 - kyvadlo – tělová síla
 - pružina – síla pružnosti
- z II. Newtonova zákona – pohybová rovnice harmonického oscilátoru

$$F = ma = -m\omega^2 y = -m\omega^2 y_m \sin(\omega t)$$

14.2.1 Pružina

- síla pružnosti

$$F_p = k\Delta l$$

– k – tuhost pružiny

- rovnovážná poloha – vyrovnaní tělové síly a síly pružnosti

$$\begin{aligned} F_G &= F_p \\ mg &= k\Delta l \end{aligned}$$

- pohyb oscilátoru – výsledná síla rovna součtu tělové a pružné síly (kladný směr vzhůru)

$$\begin{aligned} F &= F_G - F_p \\ F &= -mg + k(\Delta l - y) \\ F &= -mg + k\Delta l - ky \\ F &= -ky \end{aligned}$$

– směr síly opačný směru protažení – směr vždy k rovnovážné poloze

- perioda a frekvence – z pohybové rovnice harmonického oscilátoru

$$\begin{aligned} -ky &= -m\omega^2 y \\ \omega &= \sqrt{\frac{k}{m}} \\ T &= \frac{2\pi}{\omega} \\ T &= 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \\ f &= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \end{aligned}$$

14.2.2 Kyvadlo

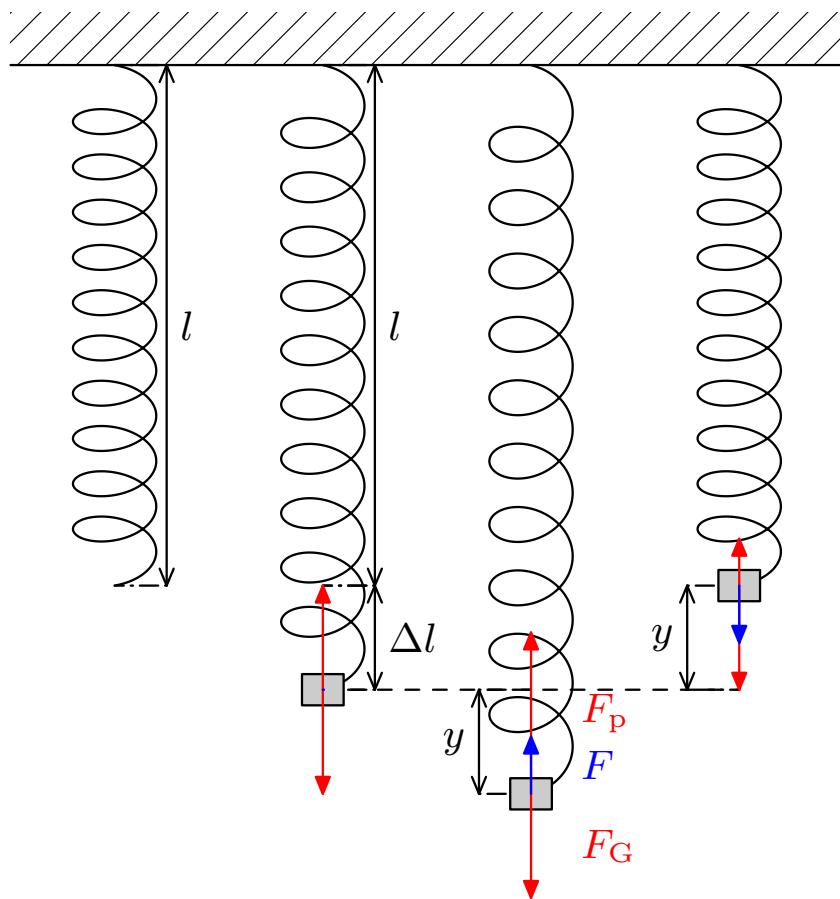
- několik typů kyvadel
 - matematické kyvadlo – hmotných bod na dlouhém závěsu, malá výchylka ($\alpha \approx \sin \alpha$)
 - fyzické kyvadlo – nutno započítat moment setrvačnosti, nelze approximovat úhel
 - kónické kyvadlo – při pohybu opisuje tvar kuželes, trajektorií kružnice
 - torzní kyvadlo – kmitání deformací kroucením vlákna nebo tyče
 - :
- dále approximace matematického kyvadla – horizontální výchylka rovna délce oblouku

$$\sin \alpha = \frac{y'}{l} \approx \frac{y}{l}$$

- zrychlení způsobeno složkou tělové síly kolmé k závěsu

$$F = -F_G \sin \alpha = -mg \frac{y}{l}$$

– záporný směr – síla orientována opačným směrem než vektor polohy y (či hodnota sinu)



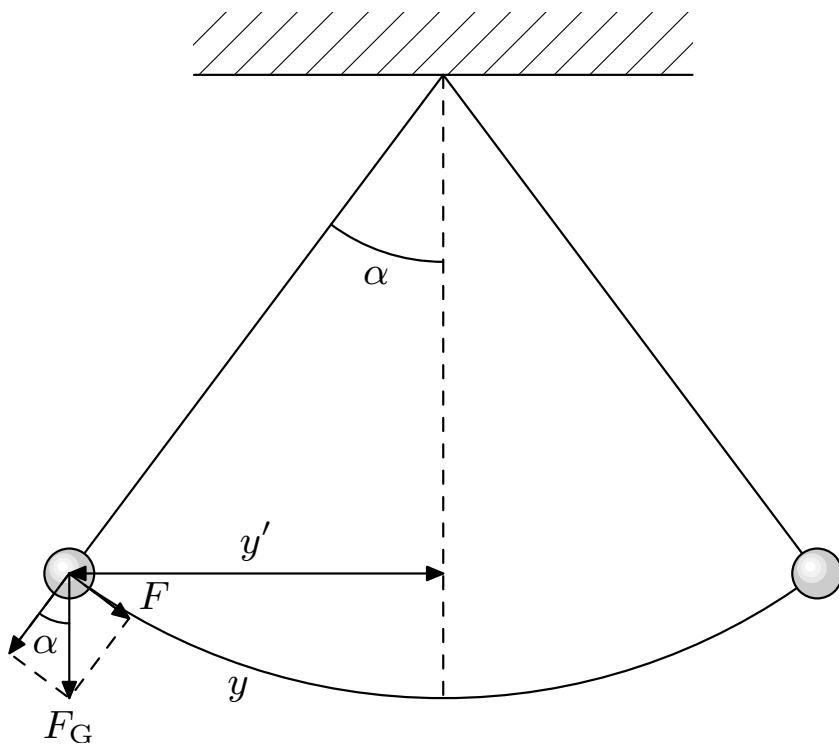
Obr. 14.3: Zavěšení závaží na pružinu

- perioda a frekvence – z pohybové rovnice harmonického oscilátoru

$$\begin{aligned}
 -mg\frac{y}{l} &= -m\omega^2 y \\
 \frac{g}{l} &= \omega^2 \\
 \omega &= \sqrt{\frac{g}{l}} \\
 T &= \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \\
 f &= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}
 \end{aligned}$$

14.3 Rezonance

- systému kmitat na větší amplitudě – více při určitých frekvencích než při ostatních frekvencích
 - rezonanční frekvence
- i malé síly mohou způsobovat velké amplitudy kmitů – uchovávání energie kmitání
- systém schopen jednoduše převádět energii mezi jejími podobami
- ztráty mezi cykly – útlum
 - malý útlum – rezonanční frekvence blíž k vlastní frekvenci
- několik typů – mechanická, akustická, elektrická, elektromagnetická...
- příklady
 - akustická rezonance hudebních nástrojů
 - rezonance skla při tření prstu po povrchu
 - rezonance antén (rádio, WiFi...) – selektivní příjem rádiových frekvencí



Obr. 14.4: Působení sil na kyvadlo

14.4 Energie kmitání

- periodická přeměna potenciální a kinetické energie
- celková energie kmitání vždy zachována
- bod v maximální výchylce – maximální potenciální energie
- průchod rovnovážnou polohou – maximální kinetická energie

14.4.1 Pružina

- nulová hladina v rovnovážné poloze, těleso v klidu – $E = 0$
- potenciální energie – energie kmitání způsobené vychýlením z rovnovážné polohy

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

- kinetická energie – energie pohybu závaží

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

- celková energie rovna maximální potenciální energie (kdy $E_k = 0$) a maximální kinetické energii ($E_p = 0$)

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

14.4.2 Kyvadlo

- potenciální energie zastoupena těhovou potenciální energií

$$E_p = mgh = mg(l - l \cos \alpha) = mgl(1 - \cos \alpha)$$

– $h = 0$ v rovnovážné poloze

- ostatní analogicky shodné s energií pružiny

15 Mechanické vlnění

- přenos kmitání pružným prostředím – přenos kmitání jedné částice na druhou vazebnými silami
- nepřenáší se látka, přenáší se energie
- zvuk, světlo, vlny na vodě...
- zdrojem vlnění mechanický oscilátor
- druhy vlnění
 - přičné vlnění
 - * kmitání v kolmém směru šíření vlnění (nahoru a dolů)
 - * např. struna hudebního nástroje, vlna na vodě...
 - podélné vlnění
 - * kmitání ve směru šíření vlnění (dopředu a dozadu)
 - * typicky stlačování a rozpínání (stlačování vzduchu)
 - * např. zvuk
- druhy dle přenosu energie
 - postupné vlnění – přenos energie prostředím
 - stojaté vlnění – nepřenos energie
- šíření vlny prostorem rychlostí v
- vlnová délka λ , $[\lambda] = \text{m}$ – délka jedné periody v prostoru

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

15.1 Rovnice postupného vlnění

- výchylka y v daném bodě závislá na čase t a vzdálenosti od zdroje x
- kmitání zdroje v bodě $x = 0$ (zádné opoždění)

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

- bod ve vzdálenosti x opožděn oproti zdroji o čas t' , který bylo potřeba na to, aby se vlna do daného bodu rychlostí v dostala

$$\begin{aligned} t' &= \frac{x}{v} \\ y(x, t) &= y_m \sin \omega (t - t') \\ y(x, t) &= y_m \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) \\ y(x, t) &= y_m \sin 2\pi \left(\frac{1}{T} \cdot t - \frac{1}{T} \cdot \frac{x}{v} \right) \\ y(x, t) &= y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \\ \varphi_0 \neq 0 : y(x, t) &= y_m \sin \left(2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right) \end{aligned}$$

- fáze vlnění

$$\begin{aligned} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \\ \varphi_0 \neq 0 : 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \end{aligned}$$

15.2 Interference

- skládání dvou a více vlnění

- výsledná hodnota výchylky dána součtem výchylek jednotlivých vlnění

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n y_{m_i} \sin \left(2\pi \left(\frac{t}{T_i} - \frac{x}{\lambda_i} \right) + \varphi_{0_i} \right)$$

- speciální případ – vlnění mají stejnou vlnovou délku (frekvenci)
 - možno určit výsledný kmitavý pohyb jako superpozici kmitání dílčích vln
 - v obecných případech superpozice také platí, ale výsledný průvodce kmitání/vlnění se v čase mění
- fázový rozdíl vln

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= 2\pi \left(\frac{t}{T_1} - \frac{x_1}{\lambda_1} \right) + \varphi_{0_1} - 2\pi \left(\frac{t}{T_2} - \frac{x_2}{\lambda_2} \right) + \varphi_{0_2} \\ \Delta\varphi &= 2\pi \left(\frac{t}{T_1} - \frac{x_1}{\lambda_1} - \frac{t}{T_2} + \frac{x_2}{\lambda_2} \right) + \varphi_{0_1} + \varphi_{0_2} \\ \Delta\varphi &= 2\pi \frac{1}{\lambda} (x_2 - x_1) + \varphi_{0_1} + \varphi_{0_2} \\ \Delta\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} d + \varphi_{0_1} + \varphi_{0_2} \\ \varphi_{0_1} + \varphi_{0_2} &= 0 : \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d\end{aligned}$$

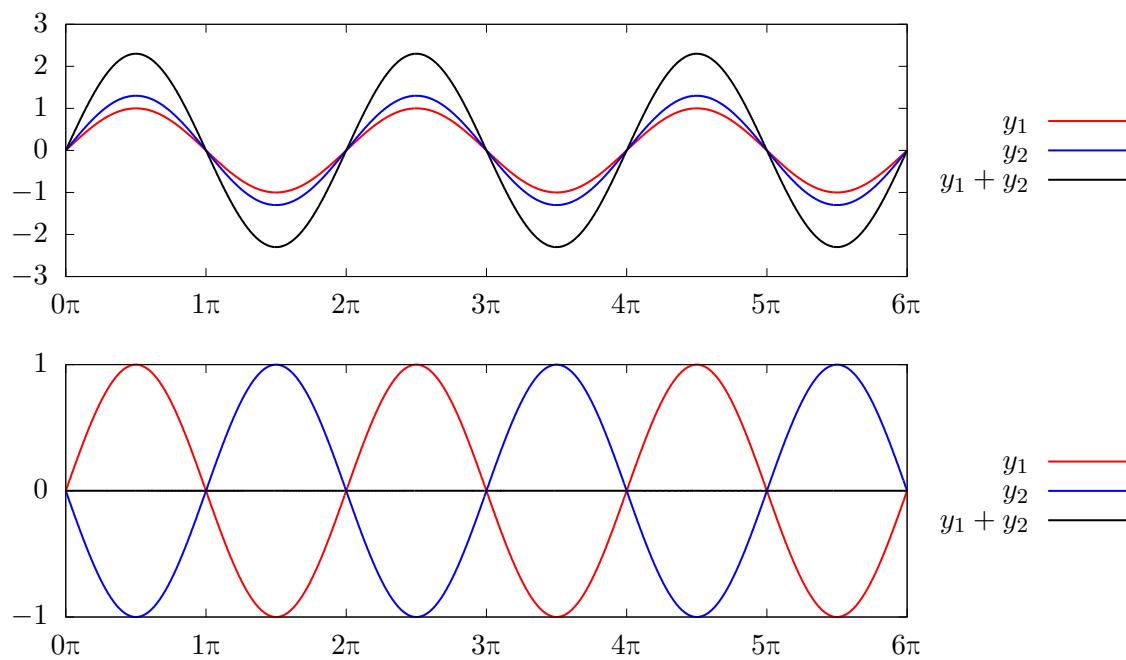
- x_1, x_2 – vzdálenost bodu vzhledem k prvnímu a druhému zdroji
- $\varphi_{0_1}, \varphi_{0_2}$ – počáteční fázové posuny vln
- d – vzájemná vzdálenost zdrojů
- speciální případ – fázový posun roven celému počtu půlvln
 - interferenční maximum
 - * každou druhá půlvlna
 - * $d = 2k\lambda/2 = k\lambda; k \in \mathbb{N}_0$
 - * vlny mají stejnou fázi ($\Delta\varphi = 0$)
 - * přesné sčítání vln a maxim ($y_m = y_{m_1} + y_{m_2}$)
 - interferenční minimum
 - * každá druhá půlvlna + 1 půlvlna
 - * $d = (2k+1)\lambda/2; k \in \mathbb{N}_0$
 - * vlny mají přesně opačnou fázi
 - * vzájemné odečítání vln a maxim ($y_m = y_{m_1} - y_{m_2}$)

15.3 Odraz

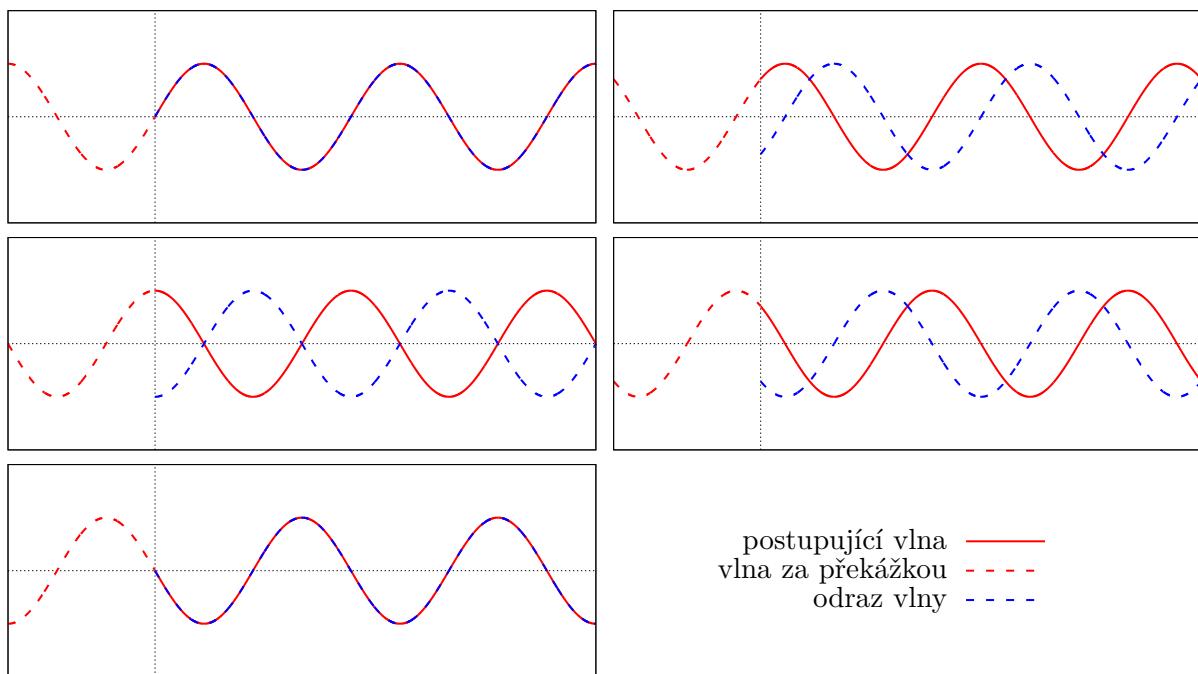
- odraz vlnění od konce řady bodů
- pevný konec
 - opačná fáze
- volný konec
 - stejná fáze

15.4 Stojaté vlnění

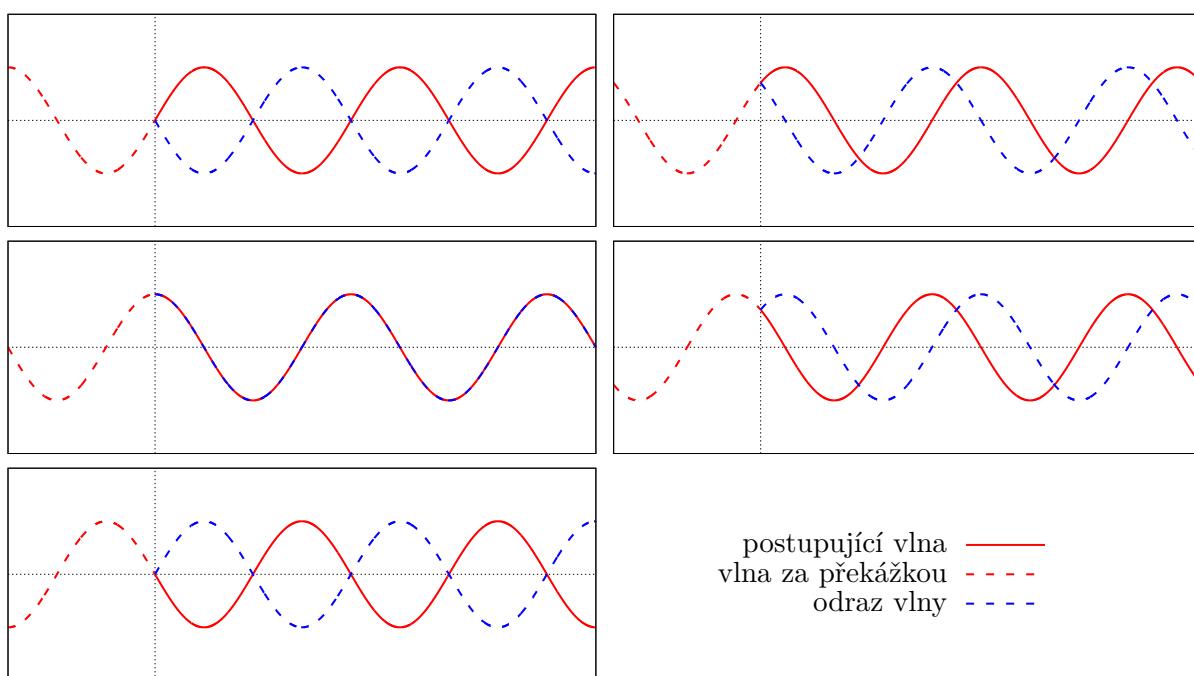
- vlnění nepostupuje prostorem, „stojí na místě“
- kmitání všech bodů se stejnou fází
- rozdílná maximální výchylka pro každý bod
- vznik interferencí postupného přímého vlnění a vlnění odraženého od pevného konce
- pouze mezi pevnými konci
- nekmitající místo – uzel; kmitající maximum – kmitna
- vzdálenost dvou uzlů nebo dvou kmiten rovna $\lambda/2$
- příklad – strunové nástroje



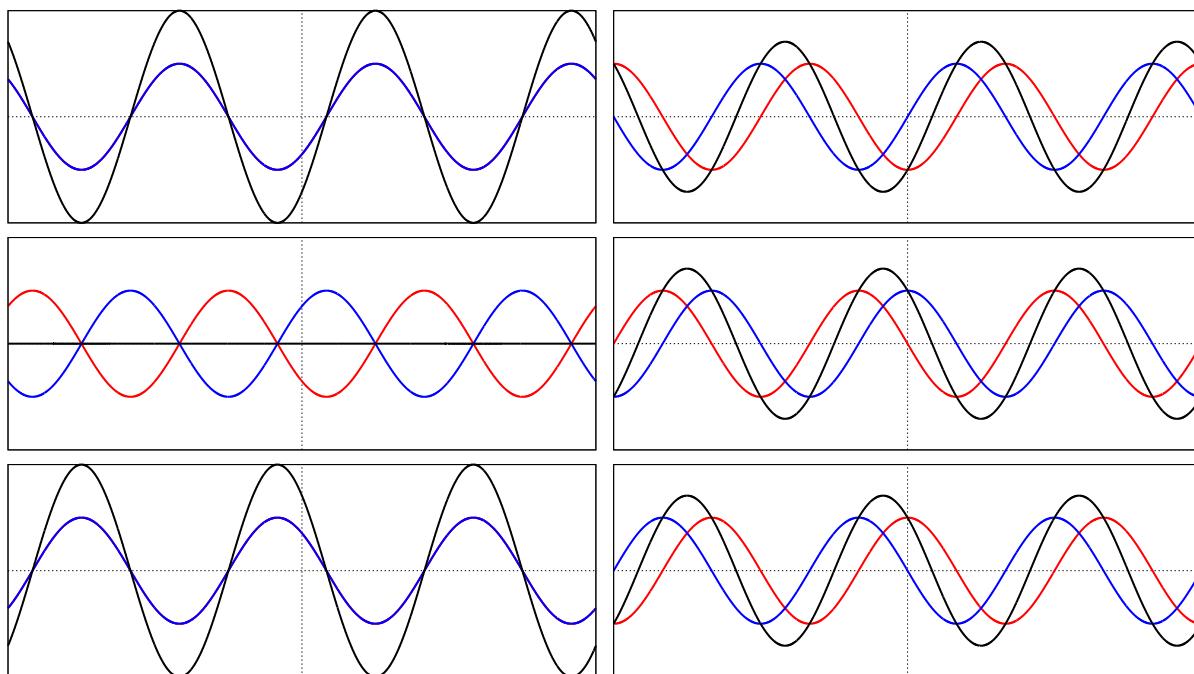
Obr. 15.1: Interferenční maximum a minimum vlnění



Obr. 15.2: Odraz vlny od pevného závěsu



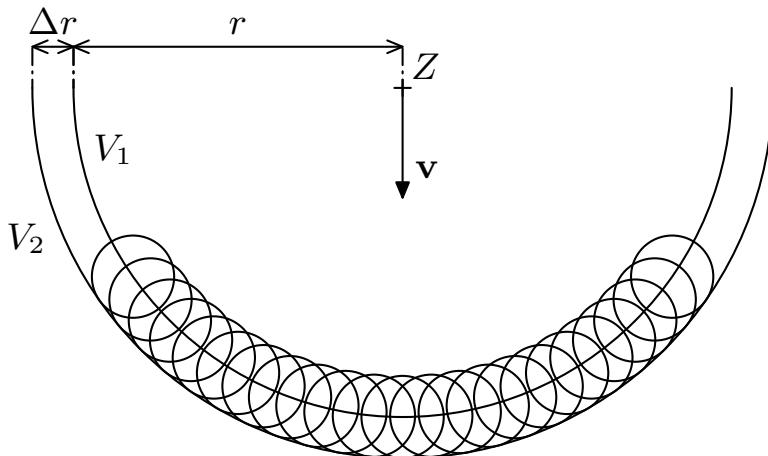
Obr. 15.3: Odraz vlny od volného závěsu



Obr. 15.4: Stojaté vlnění (pohyb červené vlny doprava a modré doleva)

15.5 Huygensův princip

- při šíření vlny prostorem (po rovině namísto přímky)
- „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“
- vlnoplocha – plocha kmitajících bodů se stejnou fází
- směr šíření vlny kolmý na vlnoplochu
- jednotlivé vlnoplochy spolu interferují a vytvářejí vnější vlnoplochu
- jestliže vlna narazí na štěrbinu, bude se štěrbina chovat jako nový zdroj vlny
- viz otázka 25.7



Obr. 15.5: Nákres Huygensova principu

15.6 Zvuk

- podélné vlnění šířící se (většinou) vzduchem
- vytvořen kmitáním jiných těles
- rozkmitání ušního bubínku – recepce zvuku
- amplituda vyjadřuje sílu/hlasitost zvuku, frekvence „výšku“ tónu
- rychlosť šíření zvuku ve vzduchu $v \approx 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- ultrazvuk
 - zvukové vlnění nad hranicí slyšitelnosti ($\approx 20 \text{ kHz}$)
 - využití – echolokace u zvířat, sonografie, stomatologie, zvlhčování vzduchu
- infrazvuk
 - zvuk pod hranicí slyšitelnosti ($\approx 20 \text{ Hz}$)
 - tlak v uších, bolestivé vnímání tělem, závratě
- ozvěna
 - odražení zvukové vlny od rozlehlé překážky a návrat k posluchači
 - vnímaní zvuku opožděně
 - možno slyšet vlnu a rozeznat i několikrát za sebou
 - využití – sonar, ultrasonografie
- dozvuk
 - doznívání zvuku ztrátami energie
 - na rozdíl od ozvěny nelze rozeznat jednotlivé vlny, splynutí v jedno
 - doba dozvuku – čas poklesnutí amplitudy zvuku o 60 dB
 - velký dozvuk – kostely, staré mohutné sály...

16 Elektrické pole

16.1 Elektrický náboj

- schopnost hmoty působit elektrickou silou a vytvářet elektromagnetické pole
- skalárna veličina
- značka Q , $[Q] = \text{C}$ (Coulomb), $C = \text{As}$ (Ampérsekunda)
 - $Q > 0$ – kladný náboj – protony
 - $Q = 0$ – neutrální nábor – neutrony
 - $Q < 0$ – záporný náboj – elektrony - možnost definovat jako

$$\Delta Q = \int i(t) dt$$

- $i(t)$ – okamžitý proud v čase
- platí zákon zachování elektrického náboje
- kvantovaný – hodnota vždy násobek elementárního náboje $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- možnost používat analogii s hmotností v klasické mechanice
- přitahování těles s různým nábojem, odpuzování těles se stejným nábojem

16.2 Coulombův zákon

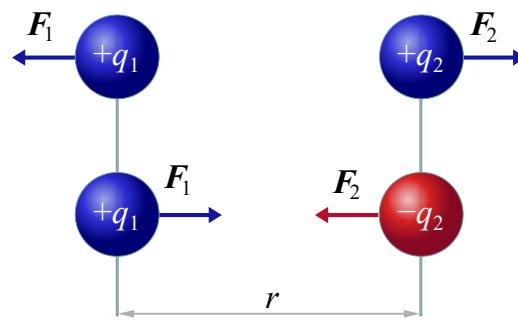
- zákon kvantitativně určující elektrickou sílu F_{el} mezi elektricky nabitémi tělesy
- elektrická síla je přímo závislá na nábojích obou těles a nepřímo úměrná kvadrátu jejich vzdálenosti

$$|\mathbf{F}_{\text{el}}| = k_e \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad \Rightarrow \quad |\mathbf{F}_{\text{el}}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

- $k_e = 8,988 \cdot 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}^{-2}$ – Coulombova konstanta – pro vakuum ($\epsilon_r = 1$)
- q_1 a q_2 – hodnoty nábojů
 - * souhlasné znaménko – síla působí směrem od druhého tělesa
 - * opačné znaménko – síla působí k druhému tělesu
- $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ – permitivita vakua
- ϵ_r – relativní permitivita prostředí, bezrozměrná veličina

- vektorová forma

$$\mathbf{F}_{\text{el}} = k_e \frac{q_1 q_2 \mathbf{r}}{\mathbf{r}^3}$$



$$|F_1| = |F_2| = k_e \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

Obr. 16.1: Coulombův zákon u nábojů

16.3 Intenzita el. pole

- značka E , $[E] = \text{N}\cdot\text{C}^{-1} = \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
- vektorová veličina popisující elektrické pole
- síla vztažena na jednotku náboje

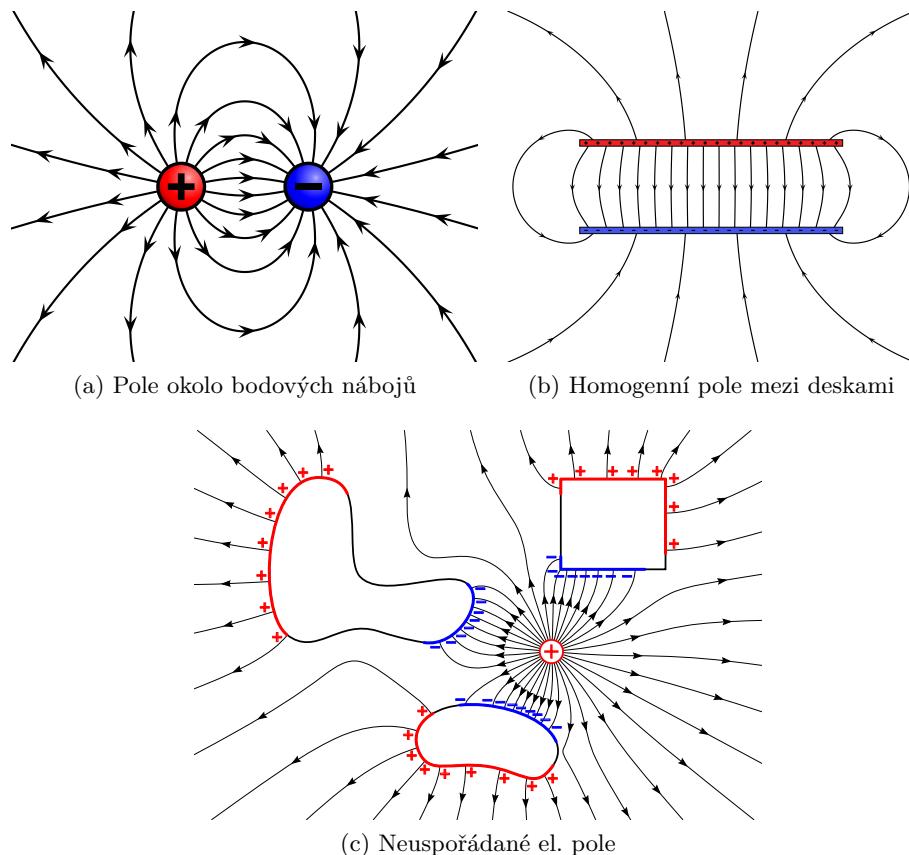
- v klasické mechanice lze přirovnat ke gravitačnímu zrychlení
- výpočet

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q} \text{ nebo } E = \frac{U}{l}$$

- U – napětí zdroje
- l – délka vodiče

16.3.1 Tvar elektrické pole

- znázorněn pomocí siločar – spojují stejné \mathbf{E}
 - směr z kladného do záporného náboje
- speciální případy
 - radiální pole – okolo jednoho náboje, sbíhání siločar do jednoho bodu
 - homogenní pole – mezi nabitémi deskami, rovné siločáry, pole všude stejné



Obr. 16.2: Různé příklady siločar elektrického pole

16.4 Elektrický potenciál

- potenciální energie jednotkového náboje v el. poli

$$\varphi = \frac{E_p}{Q} = \frac{W}{Q}$$

- značka φ , $[\varphi] = V$ (volt)
- zvětšování E_p v protisměru F_{el}
- možno přirovnat ke gravitačnímu potenciálu
- místa vodivě spojitá mají stejný potenciál

16.4.1 Elektrické napětí

- značka U , $[U] = V$
- rozdíl potenciálů mezi dvěma body
- $U = \Delta\varphi$

16.5 Práce v el. poli

- pole působí sílou na náboj -> náboj se pohybuje -> pole koná práci
- výpočet

$$dW = F \cdot ds \rightarrow W = Fs$$

- změna potenciální energie = práce

$$W = Fs = EQs = UQ$$

$$W = \Delta E_p = \Delta\varphi Q = UQ$$

16.6 Elektrická kapacita

- schopnost vodiče uložit elektrický náboj
- značka C , $[C] = F$ (farad)

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

- množství náboje na jednotku elektrického potenciálu

16.6.1 Kondenzátor

- elektrická součástka uchovávající náboj
- tvořen dvěma vodivými nabitémi deskami
 - 1. deska – φ_1 , 2. deska – φ_2
 - napětí – $\varphi_2 - \varphi_1 = U$
 - průměrný potenciál v poli – $\varphi = \frac{U}{2}$
- desky odděleny dielektrikem (izolantem)
- energie kondenzátoru

$$W = \varphi Q, \varphi = \frac{U}{2}, Q = CU \quad \Rightarrow \quad W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2$$

Zapojení

Sériové

- různá napětí na kondenzátorech, sčítají se
- nabíjení a vybíjení stejným proudem
- celková kapacita

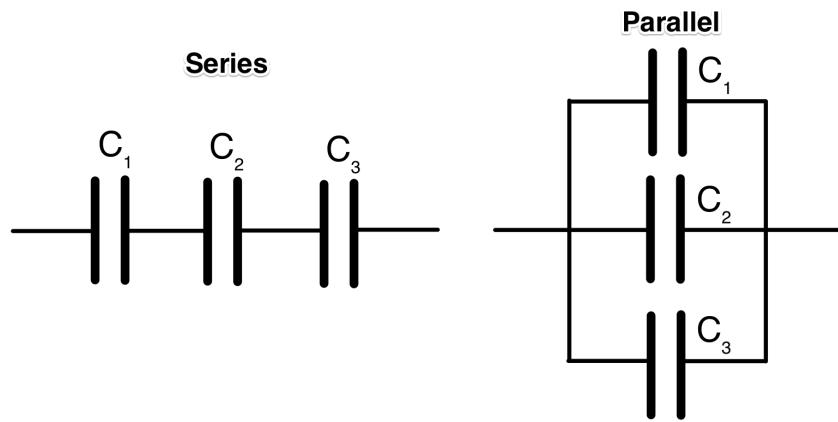
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Paralelní

- zvětšení plochy desek
- sčítání kapacit

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

- potenciály na obou stranách stejné → $U = \text{konst}$
- na kondenzátorech dílčí proudy
- dílčí proudy se sčítají – $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$



Obr. 16.3: Sériové a paralelní zapojení kondenzátorů

Využití

- uložení energie na rychlé využití – blesk fotoaparátu, defibrilátor
- stabilizace napětí, vyhlazení napěťových špiček
- odstranění stejnosměrné složky elektrického proudu
- počítačová paměť, časovače

16.7 Látky v elektrickém poli

16.7.1 Vodiče

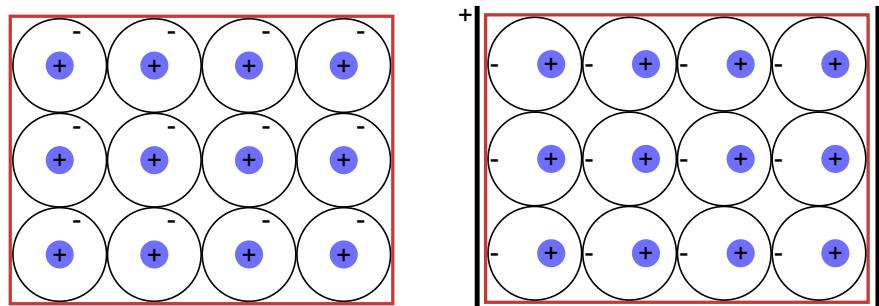
- elektrické pole E přesouvá elektrony ve vodiči
- na koncích se akumuluje elektrony → **indukuje** se náboj → **elektromagnetická indukce**
- vodič součástí uzavřeného obvodu → indukuje se elektrický proud

16.7.2 Izolanty

- nemají volné částice s nábojem, nevedou proud

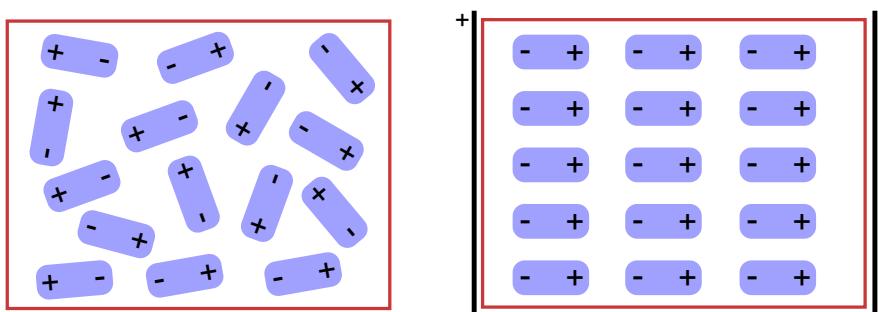
Polarizace dielektrika

- dielektrikum – izolant se schopností polarizace
- vložení dielektrika do elektrického pole
- polarita opačná polaritě vnějšího el. pole
- působením el. sil se náboj atomu/molekuly přesune na jednu stranu (jádra na jednu stranu, elektrony na druhou) – atomová polarizace



Obr. 16.4: Atomová polarizace dielektrika

- atomy/molekuly s elektrickými dipóly se natočí ve směru E – orientační polarizace



Obr. 16.5: Orientační polarizace

17 Vznik elektrického proud, elektrický proud v kovech

17.1 Elektrický proud

- značka I , jednotky A (ampér)
- proud nabitéh částic ze záporného konce (-) ke kladnému (+)
- domluvený směr od + k -

17.1.1 Podmínky vzniku

- přítomnost volných částic
 - volné elektrony
 - ionty
- přítomnost el. pole
 - udržení pomocí elektrického zdroje

17.2 Elektrická vodivost kovů

- přítomnost volných elektronů – nesou el. proud
- el. pole (např. baterie) – usměrňuje proud po hybu elektronů
- velikost el. proudu

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

17.3 Ohmův zákon

- pojmenován Georgem Ohmem
- vyjádření závislosti proudu na napětí pomocí veličiny odporu

$$I = \frac{U}{R}, \quad U = IR, \quad R = \frac{U}{I}$$

17.4 Elektrický odpor

- značka R , $[R] = \Omega$ (ohm)
- související veličina – el. vodivost
 - značka G , $[R] = \Omega^{-1}$
 - $G = 1/R \Rightarrow I = GU$
- impedance – el. odpor v případě střídavého proudu
- výpočet
 - z proudu a napětí

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

- z fyzikálních vlastností vodiče

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

* ρ – měrný elektrický odpor, závislý na materiálu a teplotě

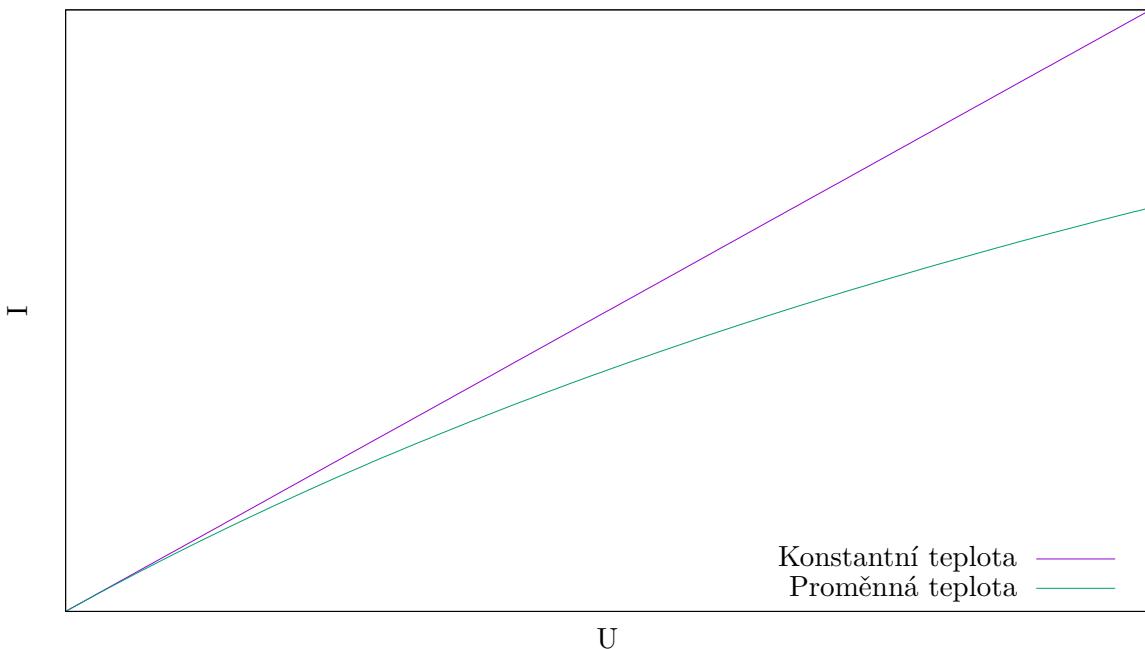
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

· α – teplotní součinitel odporu

* l – délka vodiče

* S – průřez vodiče

- rezistor – el. součástka pro vytvoření el. odporu
- rezistor s proměnnou hodnotou odporu – potenciometr nebo reostat
 - reostat – měnitelný odpor, má 2 vývody – jeden konec a jezdec
 - potenciometr – dělič napětí, 3 vývody – 2 konce a jezdec



Obr. 17.1: Voltapérová charakteristika kovů

17.4.1 Zapojení rezistorů

Sériově

- proud na všech rezistorech stejný
- celkové napětí rovno součtu parciálních napětí
- celkový odpor je součet parciálních odporů
-

$$U = U_1 + U_2 + \dots = IR_1 + IR_2 + \dots$$

$$\begin{aligned} \frac{U}{I} &= R_1 + R_2 + \dots \\ R &= R_1 + R_2 + \dots \end{aligned}$$

Paralelně

- napětí na všech rezistorech stejné
- celkový proud roven součtu parciálních proudů

- převrácená hodnota odporu je součet převrácených hodnot parciálních odporů
-

$$I = I_1 + I_2 + \dots = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots$$

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

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

17.4.2 Supravodivost

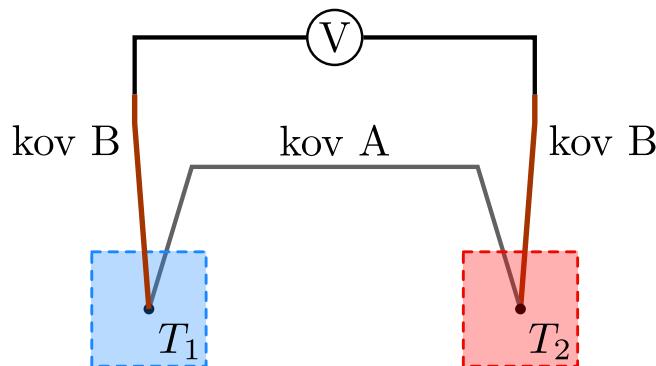
- stav téměř nulového odporu
- při velmi nízké teplotě
- elektrony spojeny do páru, nesrážejí se s krystalickou mřížkou kovu
- využití – silné magnety, přenos velmi vysoké energie, magnetická levitace

17.4.3 Termoelektrický jev

- vznik napětí při spojení dvou různých kovů a změně teploty spojů

$$U_e = \alpha \Delta T$$

- α – termoelektrický koeficient, závislý na materiálech
- zdroj elektrického napětí – *termočlánek*
 - využití – měření teplot, zdroj napětí



Obr. 17.2: Zapojení termočlánku

17.5 Kirchhoffovy zákony

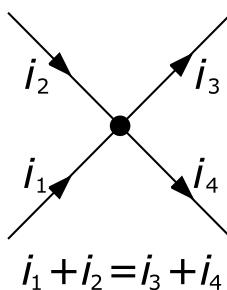
- zákony popisující elektrický obvod
- na principu zachování náboje a energie

17.5.1 První Kirchhoffův zákon

- „Algebraický součet proudů v uzlu je roven nule.“

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

- dohodnutý směr proudu
 - proud proudí do uzlu – kladný směr
 - proud proudí z uzlu – záporný směr



Obr. 17.3: Nákres proudů na uzlu

17.5.2 Druhý Kirchhoffův zákon

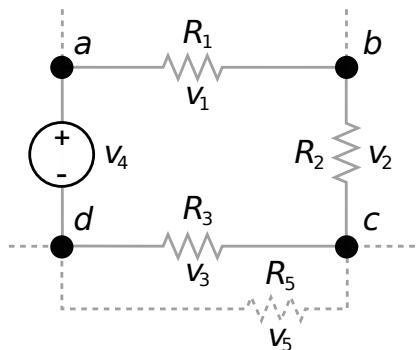
- „Algebraický součet napětí ve smyčce je roven nule.“ / „Součet elektromotorických napětí zdvojů ve smyčce je roven součtu úbytků napětí na spotřebičích“

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

$$\sum_{k=1}^n U_{e_n} = \sum_{k=1}^m \Delta U_k$$

- běžný případ – obvod se zdroji a rezistory

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



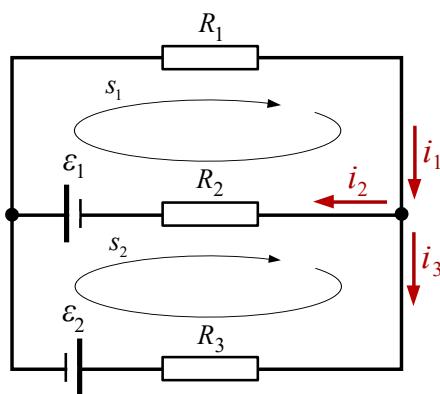
Obr. 17.4: Aplikace 2. KZ na část obvodu (na smyčku)

17.6 Práce a výkon el. proudu

17.6.1 Elektrická práce

- značka W , $[W] = J$ (joule)
- práce vykonána elektrickým proudem
- náboj v čase
-

$$W = Qt = UIt = Pt$$



Obr. 17.5: Nákres KZ při řešení el. obvodů

17.6.2 Elektrický výkon

- značka P , $[P] = W$ (watt)
- práce v čase
- okamžitá práce
-

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dUIt}{dt} = UI$$

17.6.3 Účinnost

- značka η , $[\eta] = \%$
 - podíl skutečně využité energie z dodané energie
 - zbytek ztráty – teplo, zvuk, světlo...
 -
- $$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{W}{W_0}$$
- P, W – vykonaná práce, výkon
 - P_0, W_0 – dodána práce, příkon

18 Elektrický proud v polovodičích

- materiály s větším el. odporem než vodiče, ale menším než izolanty
- klesající odpor s teplotou
- většina polovodičů krystalické látky polovodiče
 - prvky – Si, Ge, Se
 - sloučeniny – GaAs, PbS
- existence i amorfních polovodičů (některá skla)
- využití – el. součástky

18.1 Elektron-díra

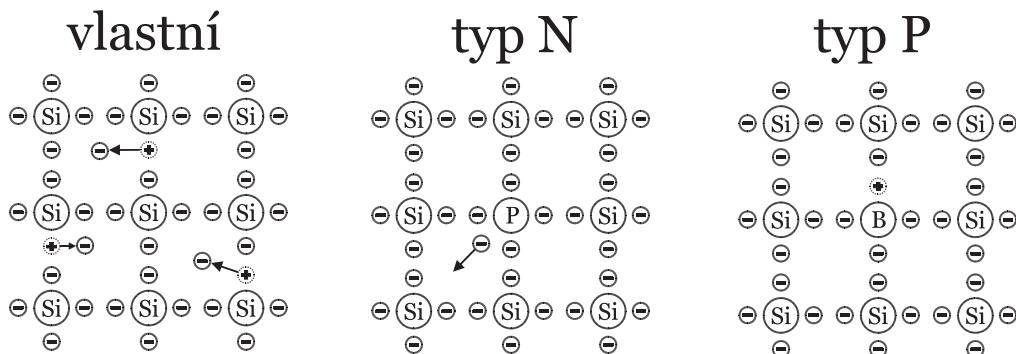
- pár elektronu a díry (prázdné místo nechané po odtržení elektronu od atomu)
- vznik – *generace* – přidání energie, odtržení elektronu z valenční vrstvy atomu, vznik elektron-díry
- zánik – *rekombinace* – elektron „spadne“ zpět do díry

18.2 Vlastní vodivost

- u čistých polovodičů
- připojení ke zdroji
 - vznik elektron-díry
 - pohyb elektronů ke kladnému pólu
 - elektron spadne do jiné díry
 - vznik nové elektron-díry
 - \Rightarrow zdánlivý pohyb děr k zápornému pólu

18.3 Příměsová vodivost

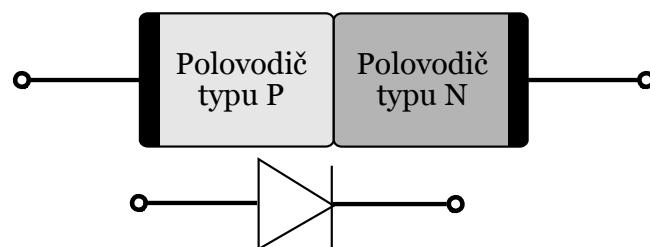
- u příměsových polovodičů
- některé atomy nahradíme jiným prvkem s odlišným počtem valenčních elektronů
 - do křemíku (4 valenční e^-) dáme fosfor (5 val. e^-)
 - * 1 elektron přebývá, malá potřebná energie k oddělení
 - * e^- vedou el. proud – *elektronová vodivost*
 - * polovodiče typu N (negative)
 - do křemíku (4 valenční e^-) dáme bór (3 val. e^-)
 - * 1 elektron chybí – díra
 - * díry vedou el. proud – *děrová vodivost*
 - * polovodiče typu P (positive)



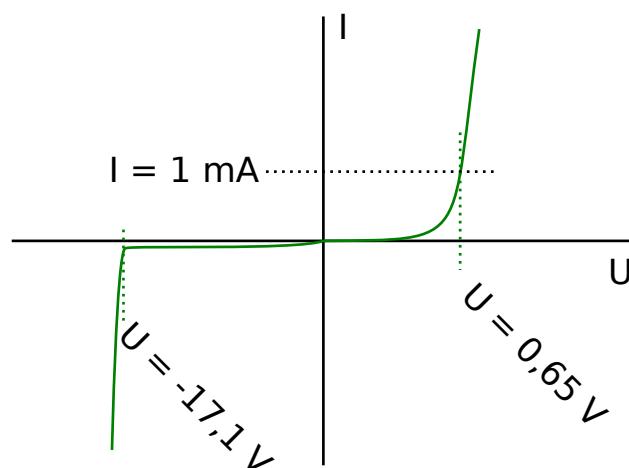
Obr. 18.1: Vlastní vodivost je spojena se vznikem páru elektron-díra, zatímco příměsi jiných prvků mohou způsobit přebytek nebo nedostatek elektronů.

18.4 PN přechod – Dioda

- spojení polovodiče typu P a typu N
- rozhraní polovodičů – PN přechod
 - dochází zde k rekombinaci – místo bez nositelů náboje
- propouští proud pouze jedním směrem
- el. součástka – *polovodičová dioda*



Obr. 18.2: PN přechod a schématické zakreslení polovodičové diody



Obr. 18.3: Voltampérová charakteristika lavinové diody

18.4.1 Závěrný směr

- zapojení PN přechodu, kdy neprochází proud
- typ P připojen na záporný pól zdroje, typ N připojen ke kladnému pólu zdroje
- díry i elektrony tlačeny od PN přechodu
- zvětšení oblasti bez nositelů náboje – neprochází proud

18.4.2 Propustný směr

- PN přechodem prochází proud
- typ P připojen na kladný pól zdroje, typ N připojen k zápornému pólu zdroje
- díry a elektrony tlačeny směrem k PN přechodu
- pokles el. odporu, přecházení e^- přes PN přechod – prochází proud

18.5 Využití polovodičů

- usměrnění proudu
- LED diody – světlo
- fotovoltaické články – výroba energie
- tranzistory – booleanová algebra v počítačích

18.6 Tranzistory

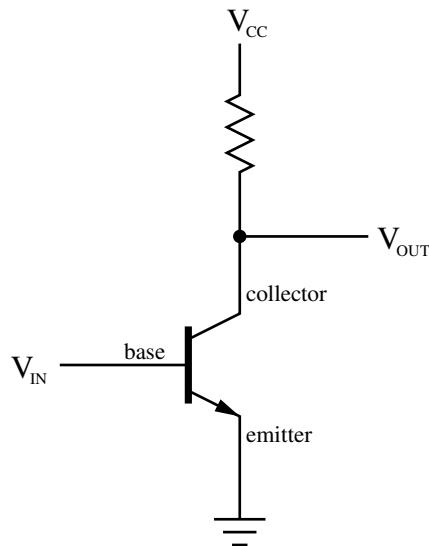
- 2 PN přechody – tranzistory typu NPN nebo PNP
- zesilovače, spínače, invertory, základ integrovaných obvodů (procesor, RAM...)
- dva typy – bipolární a unipolární
- minimálně 3 elektrody

18.6.1 Bipolární tranzistory

- kolektor (C/K), báze (B), emitor (E)
- hlavní proud protéká z kolektoru do emitoru
- řízení proudem do báze

18.6.2 Unipolární tranzistory

- source (S), gate (G), drain (D)
- proud ze source do drainu
- řízení napětím na gate



Obr. 18.4: Jednoduché zapojení bipolárního NPN tranzistoru jako spínače.

19 Elektrický proud v elektrolytech, plynech a ve vakuu

19.1 Elektrolytický vodič

- Elektrolyt – roztok/tavenina, která vede elektrický proud
- nosičem proudu ionty – vodiče II. řádu
- vodivost nižší než u kovů

19.1.1 Disociace

- proces *elektrolýza*
- štěpení molekul nebo komplexů
- rozpuštění iontových sloučenin v polárních rozpouštědlech
- opak disociace – rekombinace – slučování iontů zpět do molekul
- vznik více molekul, **iontů** (kationtů a aniontů) nebo radikálů
- disociace kyselin, zásad nebo solí

19.1.2 Faradayovy zákony elektrolýzy

- zákony popisující elektrolýzu

První Faradayův zákon

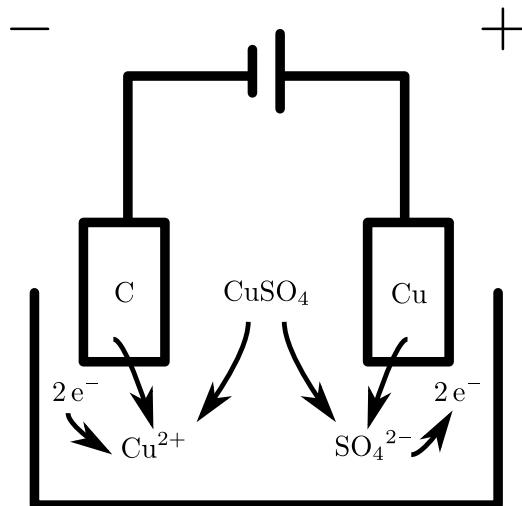
- hmotnost látky vyloučené na elektrodě přímo úměrná el. proudu I a čase t
-

$$m = AIt = AQ$$

- A – elektrolytický ekvivalent dané látky
- Q – elektrický náboj

Druhý Faradayův zákon

- látkové množství vyloučená stejným nábojem pro všechny látky stejné
- elektrolytický ekvivalent A přímo úměrný molární hmotnosti látky
- $$A = \frac{M_m}{Fz}$$
 - $F = 9,6485 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ – Faradayova konstanta
 - z - počet elektronů potřeba při vyloučení molekuly ($\text{Cu}^{2+} \Rightarrow z = 2$)

Obr. 19.1: Elektrolýza vodného roztoku CuSO_4

19.1.3 Galvanický článek

- chemický zdroj elektrického napětí
- zdroj stejnosměrného proudu, několik voltů
- využití ionizace
- vznik napětí z rozdílu potenciálů na elektrodách
 - el. potenciál důsledkem chem. reakce
 - * samovolné reakce
 - * reakce vyvolané el. proudem
- typy
 - primární články – jednorázové, reakce nevratná
 - sekundární články / akumulátory – znovupoužitelné, reakce vratná
- svorkové napětí nižší než celkové kvůli vnitřnímu odporu: $U = U_e - R_i I$
 - U_e – elektromotorické napětí

Stavba

- záporná elektroda – anoda
 - Zn, Li, Cd, hydridy kovů
- kladná elektroda – katoda
 - MnO_2 , NiO(OH) (oxid-hydroxid hlinitý), Ag_2O
- elektrolyt
 - roztoky alkalických hydroxidů (KOH), silné kyseliny nebo jejich soli

Elektrolytická polarizace

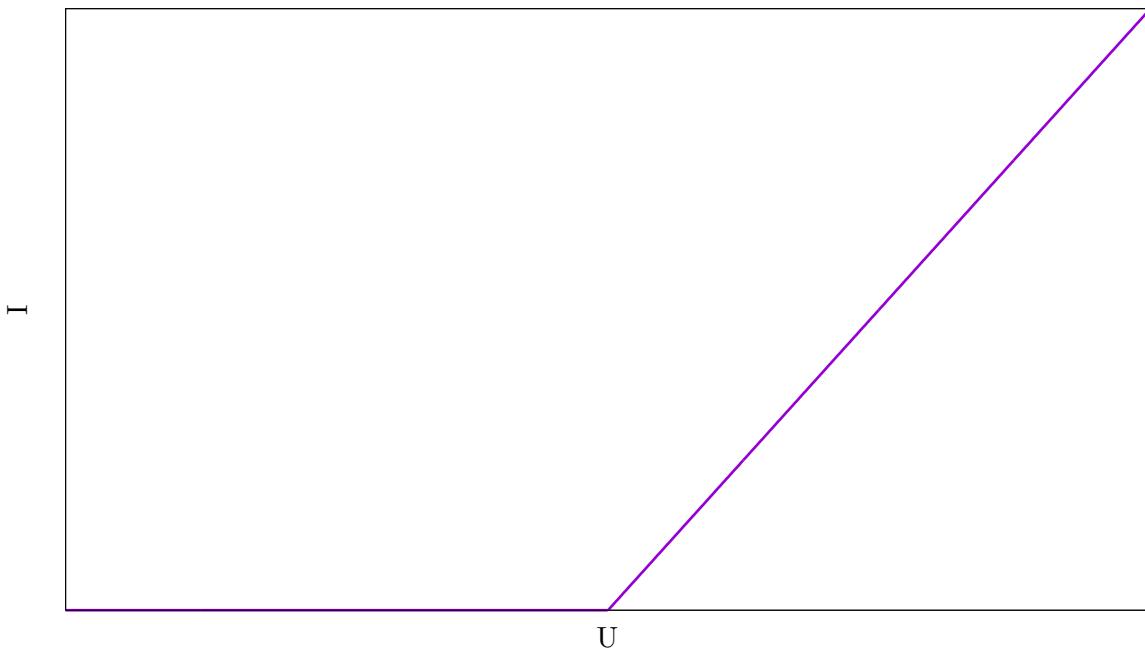
- vznik elektrické dvojvrstvy
 - uvolnění iontů z elektrody, ty zbylým nábojem přitahovány
 - vznik elektrického pole, brání vylučování iontů
 - elektroda se polarizovala
- vznik elektrického potenciálu
 - hodnota určena vzhledem k vodíkové elektrodě (u ní $\varphi = 0$)

Druhy

- existují různé druhy článků podle použitý materiálů
- jiné vlastnosti (náboj, výdrž, životnost...)

Název	Elektrody	Elektrolyt	Poznámka
Voltův článek	+ Cu, -Zn	H_2SO_4	první galvanický článek
zinko-uhlíkový článek (Leclancheův) článek	+ MnO_2 , -Zn	NH_4Cl	obyčejné baterie
alkalický článek	+ MnO_2 , -Zn	KOH lithiová sůl	nejběžnější
lithiový článek	+ MnO_2 , -Li	v organickém rozpuštědle	dlouhá životnost

Tab. 19.1: Různé druhy galvanických článků



Obr. 19.2: Voltampérová charakteristika roztoku

19.1.4 Využití

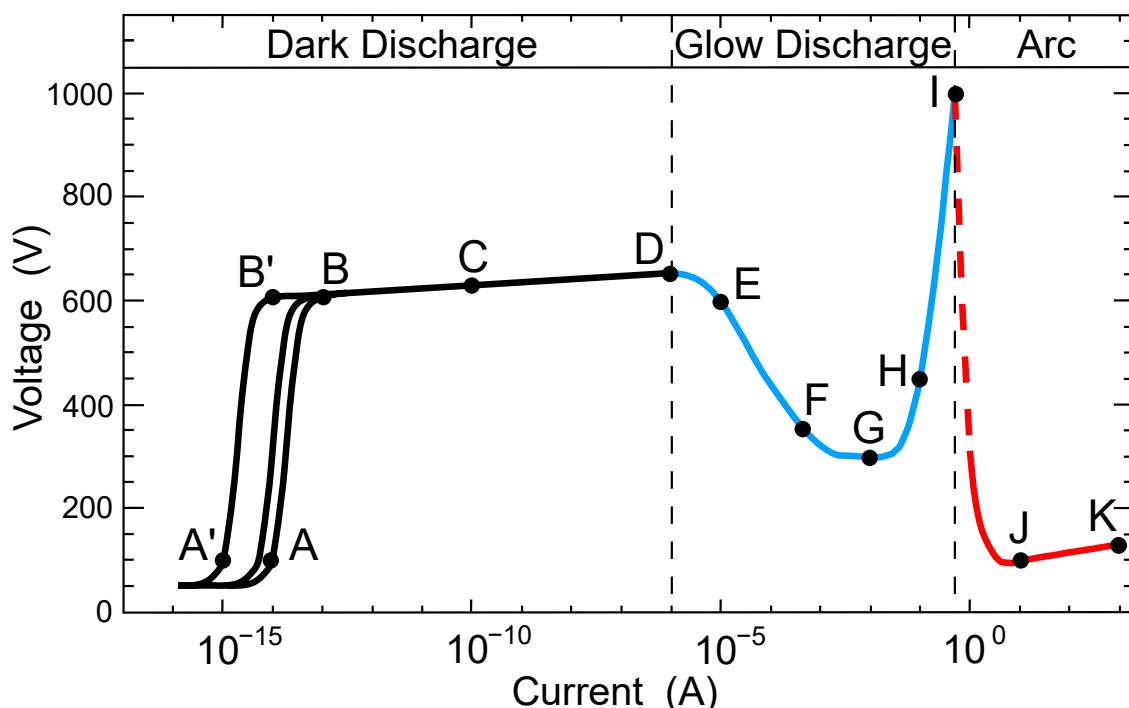
- elektrolýza
 - výroba prvků a sloučenin
 - rozklad chemických látek

- pokovování / čištění
- leptání
- galvanický článek
 - baterie (hodinky, senzory, kuchyňská váha...)
 - akumulátory (auto, telefony, notebooky, dobíjecí baterie...)

19.2 Výboj plynu

- nosičem proudu e^- a ionty
- plyn se stává vodivým *ionizací*
 - vnější zásah, vyražení elektronů z molekul plynu → volné elektrony a ionty
- opakem *rekombinace* – slučování elektronů a iontů
- plynem prochází proud – elektrický výboj

19



Obr. 19.3: Voltampérová charakteristika plynu

19.2.1 Elektrický výboj

- při ionizovaném plynu mezi elektrodami
 - elektrony(-) → anoda(+)
 - kationty(+) → katoda(-)

Nesamostatný výboj

- potřeba vnější ionizátor (ionizační komora, elektronky)

Samostatný výboj

- vytváří si vlastní ionty a elektrony
- není třeba ionizátor
- dodání zápalného napětí $U_z \rightarrow$ samovolné vyrážení elektronů z atomů → řetězová reakce → prudké zvýšení napětí

- dosažené dostatečné energie → *elektrický průraz*
 - z nesamostatného náboje se stává samostatný

19.2.2 Výboj podle doby trvání

- jiskrový výboj
 - krátké dosažení $U > U_z$, zdroj není schopen udržet, rychlé zhasnutí
 - blesk, zářehový motor
- obloukový výboj
 - dosažení a udržení $U > U_z$, vysoká teplota, dlouhé trvání
 - sváření, výbojky veřejného osvětlení
- koróna
 - trsovité výboj v nehomogenním poli
 - na hranách a hrotech
- doutnavý výboj
 - dlouhodobý výboj za sníženého tlaku plynu
 - ve výbojkách či zářivkách
 - barva výboje ovlivněna plynem vyplňujícím trubici

19.2.3 Využití

- sváření, řezání plazmou
- oblouková lampa v projektorech
- oblouková pec

19.3 Proud ve vakuu

- nositele náboje elektrony z elektrod
- použití skleněné trubice se dvěma elektrodami – *výbojka*
- nepozorujeme světlo, pouze slabé záření u katody
 - emise elektronů → katodové záření

19.3.1 Elektronka

- zařízení pracující na bázi proudu ve vakuu
- katoda, anoda, mřížka
- amplifikace napětí, vytváření záření...

20 Stacionární a nestacionární magnetické pole

20.1 Magnetické pole

- vektorové pole okolo pohybujícího se náboje nebo permanentního magnetu
- působení magnetické síly – přitahování, odpuzování, působení na el. náboje
- magnetické siločáry – uzavřené smyčky znázorňující magnetické pole
- vytvářeno magnety
 - permanentní magnety – stálé magnetické pole, nerosty
 - dočasný magnet – magnetický materiál pouze dočasně za určitého stavu
 - * působením permanentního magnetu – feromagnetické materiály magnetické při styku s permanentním magnetem
 - * elektromagnety – tvorba magnetického pole při průchodu el. proudem
- části magnetu
 - severní a jižní pól – (domluvený) začátek a konec magnetických siločár, přitahování nesouhlasných
 - netečné pásmu – střed magnetu, nepůsobení mag. síly

20.1.1 Stacionární mag. pole

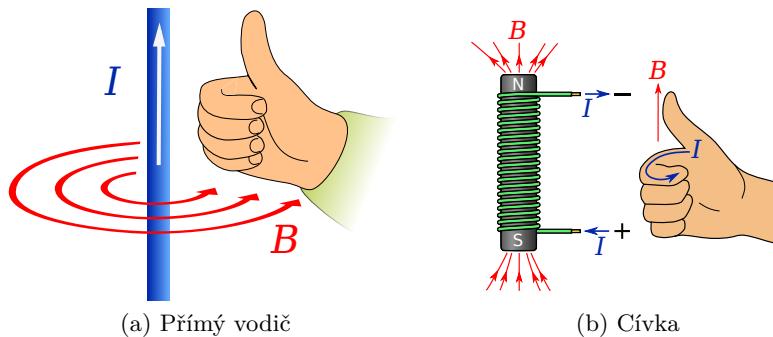
- neměnné v čase
- veličiny jej charakterizující konstantní
- zdroj – stacionární magnet, vodič s konstantní mag. polem

20.1.2 Nestacionární mag. pole

- proměnné vlastnosti v čase
- zdroj
 - pohybující se zdroj stacionárního mag. pole
 - vodič s proměnným proudem
- důvod elektromagnetické indukce

20.1.3 Ampérovo pravidlo pravé ruky

- pravidlo určující směr siločár mag. pole
- vodič
 - palec – směr proudu
 - prsty – směr siločár
- cívka
 - prsty – směr proudu
 - palec – směr siločár



Obr. 20.1: Ampérovo pravidlo pravé ruky

20.2 Magnetická indukce

- značka \vec{B} , jednotky T (tesla), další $\text{N}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
- vektorová veličina popisující silové účinky mag. pole
- tvoří vektorové pole
- směr mag. indukce popsán magnetickými siločárami

20.2.1 Nabité částice v mag. poli

- Lorenzova síla – síla působící na pohybující se nabité částici v mag. polem
- popis síly veličinou magnetické indukce
- obecný tvar

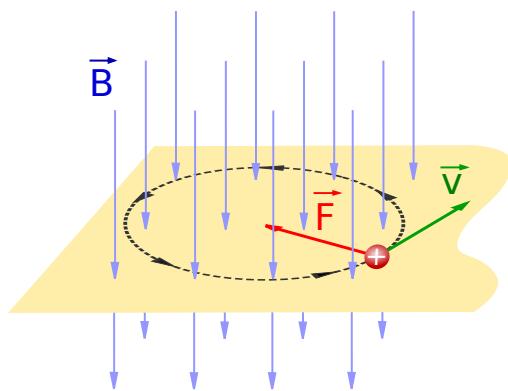
$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

- Q – náboj částice
- \vec{v} – vektor rychlosti částice

- zjednodušený tvar pro velikost F_m

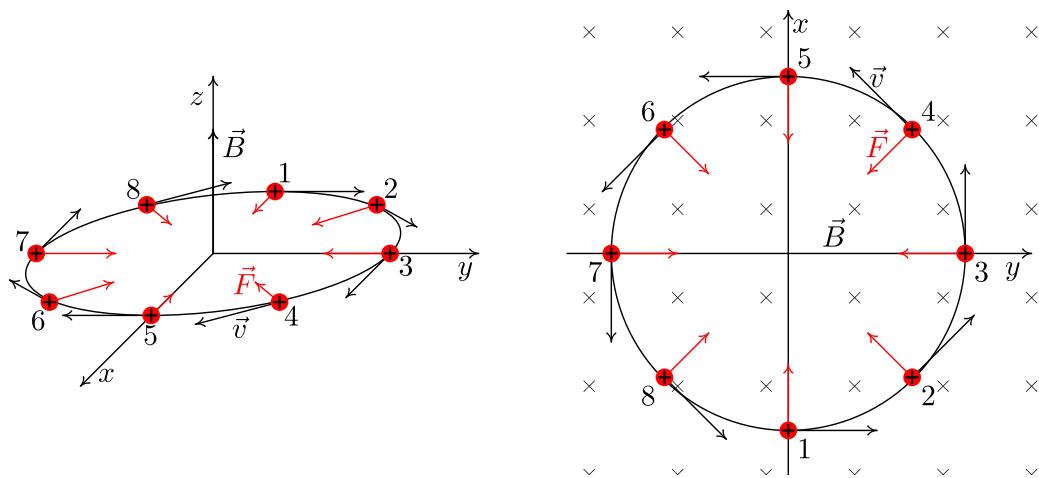
$$F_m = QvB \sin \alpha$$

- α – úhel \vec{v} a \vec{B}

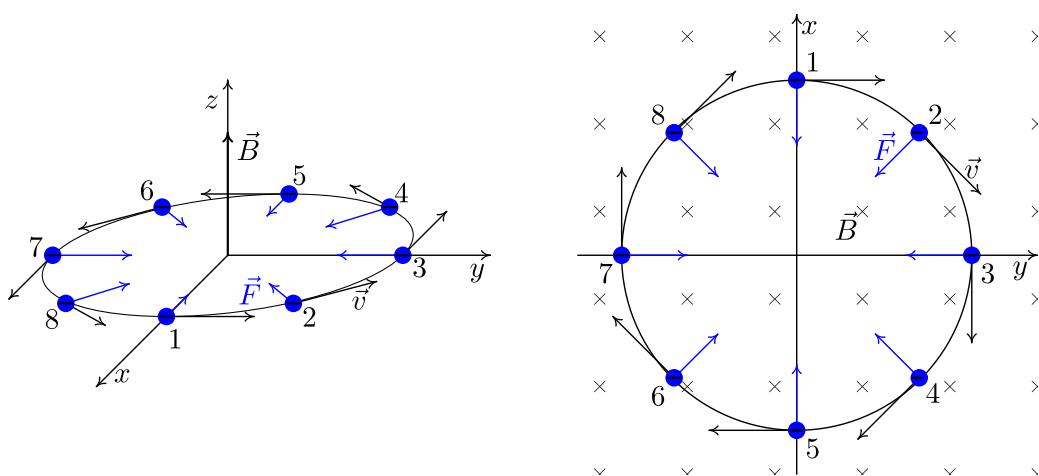


Obr. 20.2: Nákres situace nabité částice v mag. poli

20



Obr. 20.3: Pohyb kladně nabité částice v mag. poli



Obr. 20.4: Pohyb záporně nabité částice v mag. poli

20.2.2 Působení mag. pole na vodič

- mag. pole působí na vodič sílou
- výslednice působení magnetických sil na elektrony ve vodiči

$$F = BIl \sin \alpha$$

- l – délka vodiče v poli
- I – proud procházející vodičem
- α – úhel vodiče a \vec{B} , kolmé – $\alpha = 90^\circ$

- předpoklad homogenního mag. pole, respektive konstantní mag. indukce
- odvození

$$F = QvB \sin \alpha$$

$$F = Q \frac{l}{t} B \sin \alpha$$

$$F = \frac{Q}{t} l B \sin \alpha$$

$$F = IlB \sin \alpha$$

Považujme Q za celkový náboj, který projde vodičem délky l za čas t

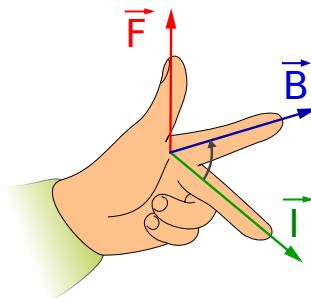
- odvození obecného tvaru

$$\begin{aligned}\vec{F} &= Q\vec{v} \times \vec{B} \quad \Rightarrow \quad d\vec{F} = dQ\vec{v} \times \vec{B} \\ d\vec{F} &= \frac{dQ}{dt} dt \vec{v} \times \vec{B} \\ d\vec{F} &= I dl \times \vec{B} \\ F &= I \int_k dl \times B\end{aligned}$$

- k – parametrická křivka vodiče

Flemingovo levé ruky

- prostředníček – směr proudu
- ukazováček – směr vektoru \vec{B}
- palec – směr \vec{F}_m



Obr. 20.5: Flemingovo pravidlo levé ruky

20.2.3 Magnetické pole paralelních vodičů

- vzájemné působení důvodem magnetických polí – působení magnetickou silou

- magnetické pole prvního vodiče působí na druhý vodič

$$F = BIl \cos \alpha \Rightarrow F = B_1 I_2 l$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d} \cdot I_2 l \\ F &= \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} l \end{aligned}$$

- stejný směr proudu – přitahování; rozdílný směr – odpuzování

20.3 Vytváření magnetického pole

20.3.1 Přímý vodič

- siločáry ve tvaru soustředných kružnic
- velikost indukce

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

- $\mu = \mu_0 \mu_r$ – permeabilita prostředí
- d – vzdálenost od vodiče

20

20.3.2 Cívky

- tvar pole shodný s tyčovým magnetem
- solenoid – průměr cívky mnohem menší než délka, pole uvnitř homogenní
- velikost indukce

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

- N – počet závitů
- l – délka cívky

20.4 Magnetický indukční tok

- taky *tok magnetické indukce*
- značka Φ (velké fí), jednotky Wb (weber)
 - také jednotky T·m²
- úhrnný tok magnetické indukce svislou plochou (míra počtu indukčních čar procházející plochou)

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \Rightarrow \Phi = BS \cos \alpha$$

- S – rovinná plocha
- α – úhel mezi \vec{B} a normálovými vektorem plochy

20.5 Energie magnetického pole cívky

- práce potřebná pro indukování proudu na cívce
- nutno překonat elektromotorické napětí na cívce $U_i = -L\Delta I/\Delta t$

$$\begin{aligned} \Delta E_m &= W = UQ = |U_i| I \Delta t = L \frac{\Delta I}{\Delta t} I \Delta t = \Phi \Delta I \\ dE &= \Phi dI \end{aligned}$$

- celková energie rovna ploše pod grafem závislosti magnetického indukčního toku na proudu

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{I_0} \Phi dI = \int_0^{I_0} LI dI \\ E &= \frac{1}{2} L I_0^2 \end{aligned}$$

20.6 Magnetické vlastnosti látek

- vytváření elementárního mag. pole elektronů
- součet polí → celkové pole
- celkové pole závislé na uspořádání elektronů

20.6.1 Permeabilita

- značka μ , jednotky $N \cdot A^{-2}$ nebo $H \cdot m^{-1}$ (henry na metr)
- účinek materiálu/prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole
- $$\mu = \frac{B}{H}$$
 - H – intenzita magnetického pole, jednotky $A \cdot m^{-1}$
 - * na rozdíl od indukce nebene v potaz vliv vázaných magnetických proudů
 - * vliv pouze vnějších magnetických polí
- permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$

20.6.2 Diamagnetické látky

- $\mu_r < 1$ - zeslabení externího mag. pole
- vzácné plyny, měď, rtuť, nekovové materiály, kapaliny, organické látky...

20.6.3 Paramagnetické látky

- $\mu_r > 1$ (mírně větší)-externí mag. pole → mírné zesílení + vytvoření vlastního
- mag. pole nelze uspořádat, bez vnějšího si jej neudrží
- hliník, sodík, draslík, platina, kyslík, uran, hořčík...

20.6.4 Feromagnetické látky

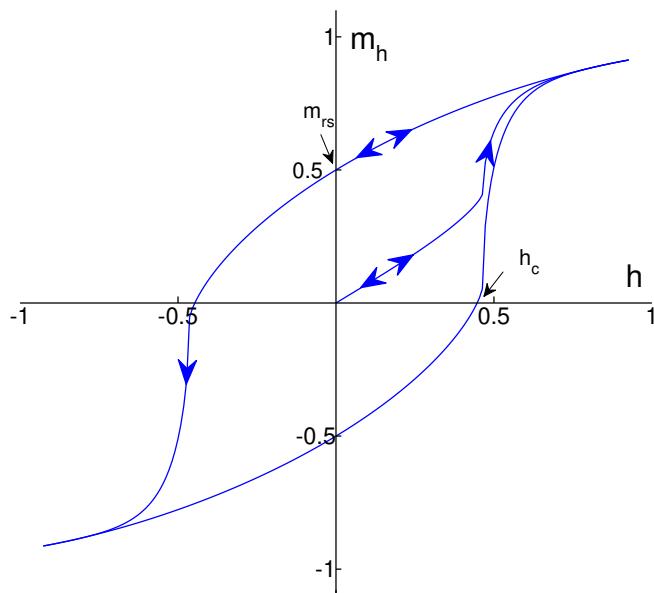
- $\mu_r \gg 1$
- značné zesílení mag. pole
- ztráta vlastní při určité teplotě (Curieova teplota)
 - chladnutí bez mag. pole → zničení struktury, přestává být magnetický
- železo, kobalt, nikl; hlavně v krystalech

Ferimagnetické látky (ferity)

- sloučeniny Fe_2O_3 a oxidy dalších kovů
- mnohem větší odpor než feromagnetické magnety
- v praxi široce používané

20.6.5 (Magnetické) hystereze

- *hystereze*
 - chování dynamického systému
 - výstupní veličina závislá nejen na proměnné, ale i na předchozím stavu
- magnetická hystereze – hysterezní křivka
 - uzavřená křivka magnetování
 - popis magnetizace materiálu v závislosti na intenzitě magnetického pole a předchozím stavu
 - užší křivka → jednodušší magnetizace/odmagnetování



Obr. 20.6: Magnetická hysterezní křivka

20.7 Elektromagnetická indukce

- vznik indukovaného elektrického pole vytvořeno nestacionárním mag. polem
- při změně mag. toku – deformace vodiče, průchod polem...
- Faradayův zákon elmag. indukce – udává velikost indukovaného napětí U_i

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- Lensův zákon – mag. pole vybuzené indukcí působí proti směru pohybu vnějšího pole

20.7.1 Indukčnost

- značka L , jednotky H (henry)
- schopnost
 - vodivých těles vytvářet mag. pole v závislosti na protékajícím proudu
 - indukovat napětí ve vodiči při změně mag. pole
- základní vlastnost cívek

20.7.2 Vlastní indukce

- indukované el. pole v uzavřeném vodiči při změně mag. pole v důsledku změny proudu na vodiči
- mag. tok úměrný el. proudu

$$\Phi = LI$$

- L – indukčnost
- indukované napětí

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

20.8 Foucaltovy proudy

- tzv. *vířivé proudy*
- vznik v plošných nebo objemových vodičích při změně mag. toku
- vznik opačné reakce – zeslabení mag. toku; největší zeslabení uprostřed průřezu
- využití

- stabilizace ručiček tachometru
- indukční brzda
- indukční vařiče, metalurgie – využití tepelných účinků
- indukční pece

21 Střídavý elektrický proud

- směr elektrického proudu v čase se mění
- průběhy
 - periodický – okamžité hodnoty proudu se v čase periodicky mění a opakují, lze popsat jednoduchou funkcí
 - neperiodický – okamžité hodnoty jsou náhodné, nelze určit následující hodnotu (např. šum)
- rovnice střídavého el. proudu

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi)$$

- i, u – okamžitá hodnota proudu a napětí
- I_m, U_m – maximální amplituda proudu a napětí
- $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ – úhlová rychlosť
- φ_0 – počáteční fáze napětí
- φ – fázový posun mezi proudem a napětím

21

21.1 Součástky v obvodu se střídavým napětím

21.1.1 Rezistor

- odpor rezistoru v obvodu střídavého napětí – resistance
- značka X_R , jednotky Ω (ohm)
- stejné chování jako při stejnosměrném proudu
- výpočet

$$i = X_R u \rightarrow X_R = R = \frac{u}{i} = \frac{U_m}{I_m}$$

- nevytváří fázový posun
- změna energie na teplo

21.1.2 Cívka

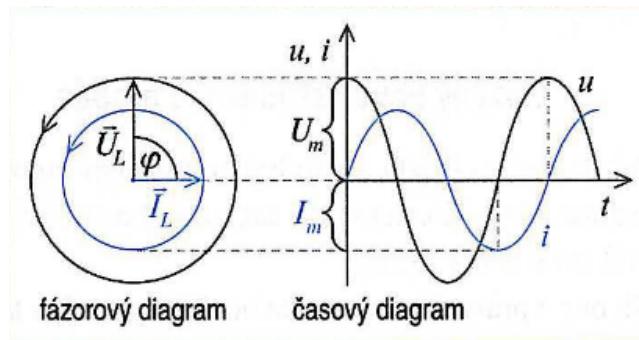
- induktance, značka X_L , jednotky Ω (ohm)

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

- L – indukčnost cívky
- platí Ohmův zákon
- při připojení na zdroj cívka vytváří elektromagnetické pole → vlastní indukce napětí $u_i = -L\Delta i/\Delta t$ s opačnou polaritou než $u \rightarrow u$ v maximu dříve než $i \rightarrow$ fázový posun

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

- proud zpožděn za napětím
- změna energie v magnetické pole



Obr. 21.1: Fázový diagram posunu z důvodu induktance

21.1.3 Kondenzátor

- kapacitance, značka X_C , jednotky Ω (ohm)

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

- platí Ohmův zákon

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

- záporný fázový posun – napětí zpožděné za proudem

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin \omega t \\ i &= I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \\ \varphi &= -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

- v obvodu střídavého proudu se chová jako prvek s odporem
 - lepší propustnost pro velké frekvence; špatná propustnost malých frekvencí
- přeměna energie na elektrické pole

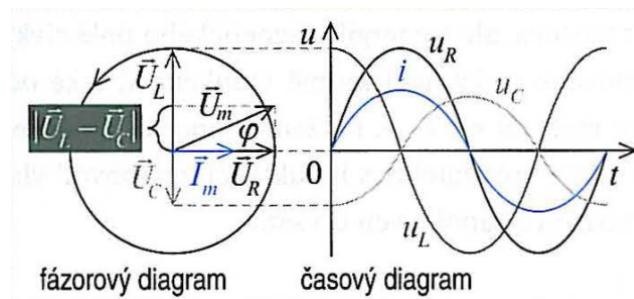
21.2 RLC Obvod

- RLC obvod – obvod složen z rezistoru R , cívky L a kondenzátoru C
 - zapojeny za sebou – sériový RLC obvod

21.2.1 Sériový RLC obvod

- $\bar{U}_R, \bar{U}_L, \bar{U}_C$ – fázory otáčející se v čase
 - \bar{U}_R – fázor rezistoru, stejná fáze jako \bar{I}_m
 - \bar{U}_L – fázor cívky, vektor posunut o 90°
 - \bar{U}_C – fázor kondenzátoru, vektor posunut o -90°
- U_{Rm}, U_{Lm}, U_{Cm} – amplitudy napětí
- výsledný fázor napětí roven součtu všech fázorů

$$\begin{aligned} U_m^2 &= U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2 \text{ (Pythagorova věta)} \\ U_m^2 &= (X_R I_m)^2 + (X_L I_m - X_C I_m)^2 \\ U_m^2 &= I_m^2 (X_R^2 + (X_L - X_C)^2) \\ U_m^2 &= I_m \sqrt{X_R^2 + (X_L - X_C)^2} \end{aligned}$$



21.2.2 Impedance

- $Z, [Z] = \Omega$
- veličina jednotně popisující RLC obvod

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

- komplexní veličina

21.2.3 Fázový posun

- značka φ , úhel
- posun napětí vůči proudu

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \varphi &= \frac{X_L - X_C}{X_R} \\ \cos \varphi &= \frac{X_R}{Z}\end{aligned}$$

21.2.4 Resonance sériového RLC obvodu

- nastává při $X_C = X_L$
- impedance je na minimální hodnotě $Z = X_R$
- fázový posun nulový
- proud nabývá maximální hodnoty
- rezonanční frekvence f_0

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

21.3 Hodnoty střídavého proudu

21.3.1 Efektivní hodnota proudu

- hodnota střídavého proudu odpovídající stejnosměrnému proudu
- proud, který má v obvodu s rezistorem stejný výkon jako střídavý proud $i = I_m \sin \omega t$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m$$

21.3.2 Efektivní hodnota napětí

- hodnota střídavého napětí odpovídající stejnosměrnému napětí
- napětí, které má v obvodu s rezistorem stejný výkon jako střídavé napětí $u = U_m \sin \omega t$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m$$

21.3.3 Výkon

Efektivní hodnota výkonu

- výpočet z efektivních hodnot proudu a napětí

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

- bez posunu fáze napětí

Střední hodnota

- průměrná hodnota výkonu při průběhu střídavého proudu

$$P = \frac{1}{2}U_m I_m = \frac{1}{2}RI_m^2$$

Činný výkon

- elektrická energie dodaná zdrojem změněna v užitečnou práci či teplo

$$P = UI \cos \varphi$$

– $\cos \varphi$ – účiník

- speciální případ pro RLC obvod s posunem fáze napětí

21

21.4 Zařízení střídavého proudu

21.4.1 Alternátor

- výroba střídavého napětí
- přeměna mechanické energie na elektrickou
- rotor – stálý magnet, otáčí se
- stator – vodič navinut v cívce s jádrem
- měnící se magnetické pole indukuje na statoru el. proud

21.4.2 Třífázový generátor (třífázový alternátor)

- výroba střídavého napětí
- stator – statická vnější část – 3 cívky
- rotor – otáčivá část – elektromagnet
- indukce střídavého napětí na každé cívce, napětí o třetinu fáze navzájem posunuty

$$u_1 = U_m \sin \omega t, u_2 = U_m \sin \left(\omega t + \frac{2}{3}\pi \right), u_3 = U_m \sin \left(\omega t + \frac{4}{3}\pi \right)$$

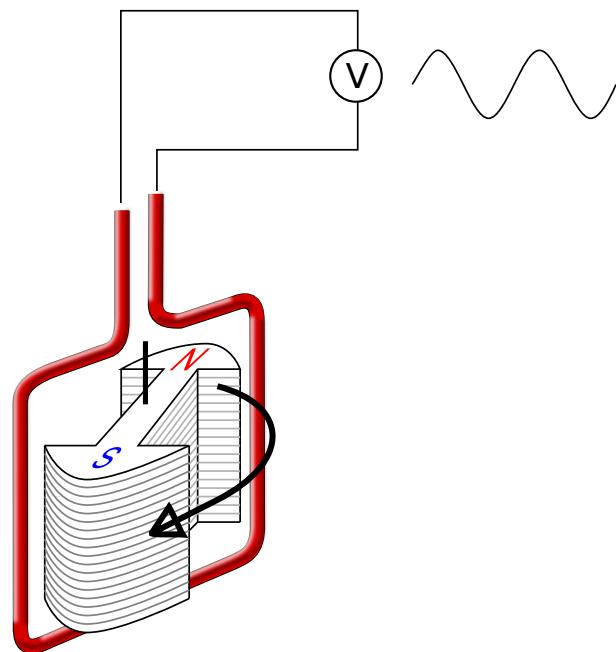
21.4.3 Transformátor

- změna napětí střídavého proudu
- energie zachována – při zvýšení napětí snížení proudu a naopak
- dvě cívky na společném jádře
 - primární cívka – přijímá vstupní napětí, vytváří elektromagneticke pole
 - sekundární cívka – indukování proudu na základě elektromagnetickeho pole
- napětí na cívách

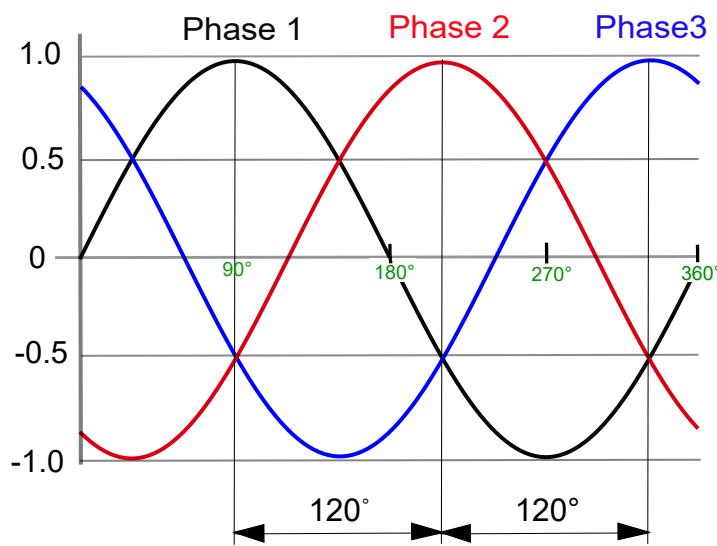
$$u = N \frac{d\Phi}{dt}$$

– Φ – magnetický tok

21



Obr. 21.2: Nákres jednoduchého alternátoru

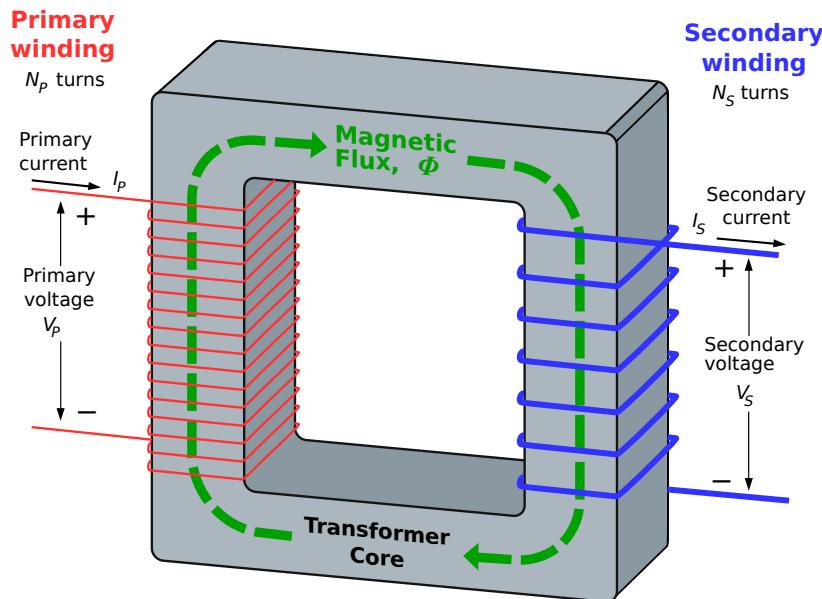


Obr. 21.3: Průběh tří fází generátoru

- transformační poměr

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{i_1}{i_2}$$

- $k > 1$ – zvýšení napětí
- $k = 1$ – napětí se nemění
- $k < 1$ – snížení napětí



Obr. 21.4: Nákres transformátoru

22

21.4.4 Třífázová soustava střídavého napětí

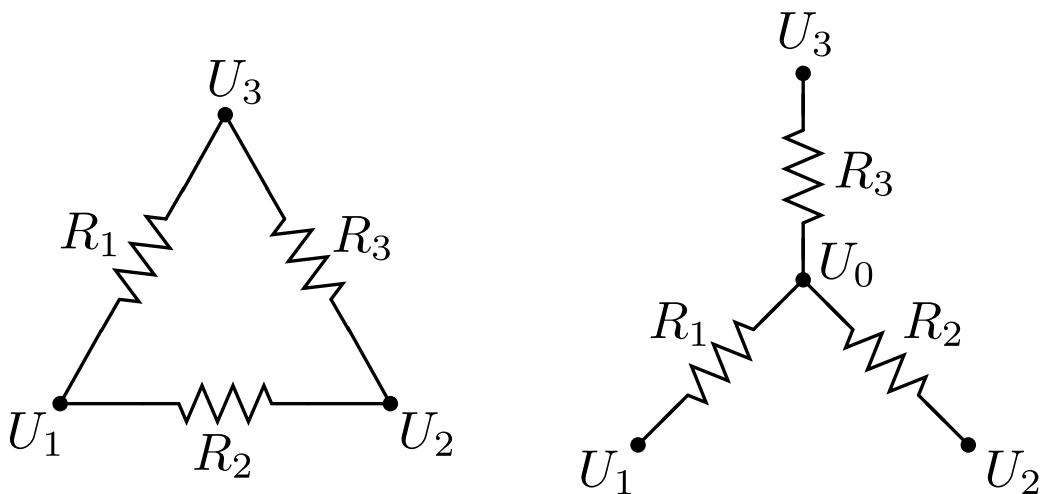
- součet okamžitých hodnot napětí fází $u_1 + u_2 + u_3 = 0$
- vodič z každé cívky spojen do uzlu – nulový potenciál – nulovací vodič
- druhé konce vyvedeny separátně – fázové vodiče
- napětí
 - fázové napětí – mezi fází a nulou – 230V
 - sdružená napětí – mezi fázemi, efektivní hodnota napětí $\sqrt{3}$ krát větší než efektivní hodnota napětí fáze – 398 V (400 V)
- zapojení
 - trojúhelník – na spotřebičích sdružená (vyšší) napětí, absence nulovacího vodiče
 - hvězda – na spotřebičích fázová napětí, nulovací vodič

22 Elektromagnetické vlnění

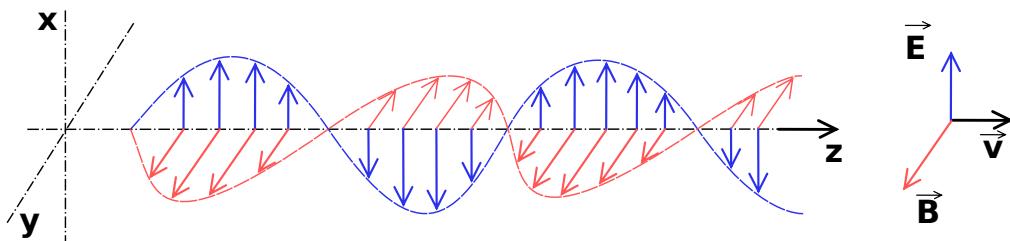
- šíření elektrického a magnetického pole prostorem
- oscilující elektrické a magnetické pole
- vlnoplocha z bodového zdroje – koule
- emitovaný částicemi s nábojem při zrychlení

22.1 Maxwellova teorie

- definována Jamesem Clerkem Maxwellem
- zkompletoval a doplnil známé rovnice o elektrickém a magnetickém poli
- došel k závěru, že světlo jsou elmag. vlny



Obr. 21.5: Zapojení trojúhelník-hvězda



Obr. 22.1: Šíření elektrického a magnetického pole

- obecné vyjádření elektromagnetického pole – jednoznačné vyjádření z proudu a náboje
- rozšíření informací: https://fykos.cz/_media/rocnik23/ulohy/pdf/serie23_4.pdf

22.1.1 První Maxwellova rovnice

- diferenciální tvar

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

– $\nabla \cdot$ – divergence (skalár vyjadřující tok vektorového pole), kdy

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

– ρ – hustota náboje

– ϵ_0 – permitivita vakua

- význam: jestliže se v prostoru nachází náboj ($\rho \neq 0$), potom je přítomno nenulové elektrické pole
- „elektrické pole vzniká v nábojích“

22.1.2 Druhá Maxwellova rovnice

- diferenciální tvar

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

- neexistují magnetické náboje
- magnetické pole nemá na rozdíl od elektrického žádná místa v prostoru, kde by vznikalo nebo zanikalo

22.1.3 Třetí Maxwellova rovnice

- diferenciální tvar

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

– $\nabla \times$ – rotace

- zákon elektromagnetické indukce
- parafráze Faradayova zákona
- „jestliže se někde mění magnetické pole v čase, vzniká elektrické“

22.1.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice

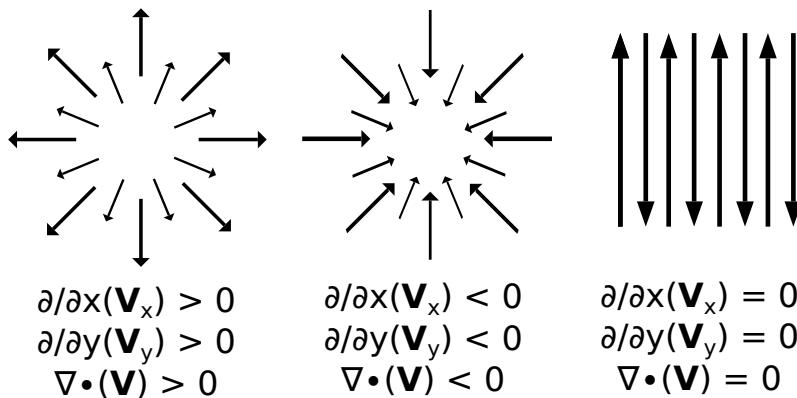
- diferenciální tvar

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

– j – vektor hustoty proudu

– μ_0 – permeabilita vakua

- „pokud někde teče proud nebo se mění magnetické pole, vznikne kolem něj magnetické pole“



Obr. 22.2: Vizualizace divergence

22.2 Elektromagnetický oscilátor

- elektrický obvod generující elektromagnetické vlnění
- přeměna elektrické energie na energii magnetickou a naopak

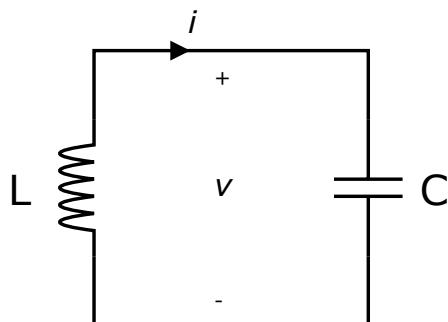
22.2.1 Nejjednodušší oscilátor

- LC obvod (L – indukčnost – cívka, C – kapacita – kondenzátor)
- dochází k rezonanci na rezonanční frekvenci

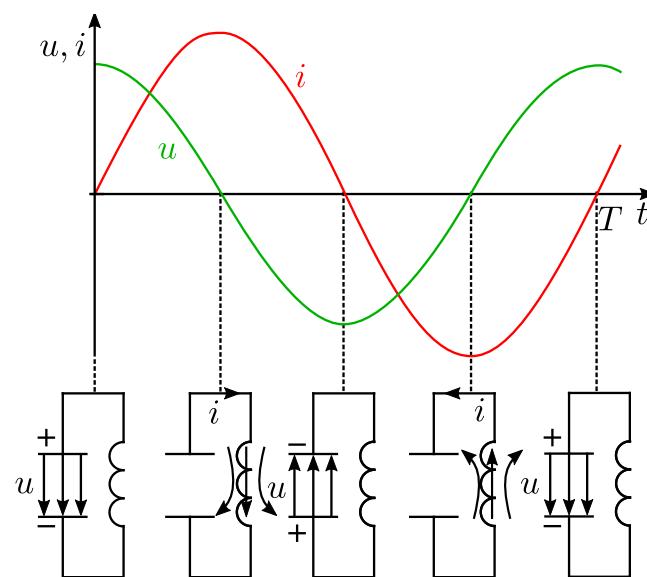
$$\begin{aligned} X_L &= X_C \\ \omega L &= \frac{1}{\omega C} \\ \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ f &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \end{aligned}$$

- iniciace LC oscilátoru – nabítí kondenzátoru
- průběh

- $t = 0$ – nabitý kondenzátor, začíná se vybíjet
- zvýšení proudu procházející cívkou, tvorba mag. pole – přeměna el. pole na mag. pole
- $t = T/4$ – kondenzátor vybit, $I = I_{\max}$, všechna energie v mag. poli
- zmenšování proudu → indukování napětí, procházení indukovaného proudu → nabíjení kondenzátoru
- $t = T/2$ – kondenzátor nabit, ovšem s opačnou polaritou
- opakování popsaného děje v druhé polovině periody s opačnou polaritou



Obr. 22.3: Nákres LC obvodu



Obr. 22.4: Průběh oscilace LC obvodu

22.3 Vlastnosti elektrického vlnění

- neoddělitelné oscilující elektrické a magnetické pole
- elektrické a magnetického pole navzájem kolmé, společně se směrem pohybu
- příčné vlnění
- vlny
 - postupná vlna – souhlasné váže **E** a **B**
 - stojatá vlna – fáze **E** a **B** posunuty o $\pi/2$
- platí zákony odrazu a ohybu
 - rozměry překážky $\leq \lambda$ → ohyb
 - rozměry překážky $> \lambda$ → za překážkou stín
- rychlosť šíření
 - ve vakuu – pohyb rychlostí světla $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- v prostředí

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

* ϵ_r, μ_r – relativní permitivita a permeabilita prostředí

22.3.1 Parametry elmag. vlny

- vlnová délka $\lambda, [\lambda] = \text{m}$
 - vzdálenost, kterou vlna urazí za jednu periodu / délka jedné periody
- perioda $T, [T] = \text{s}$
 - doba jedné periody
- frekvence $f, [f] = \text{Hz} = \text{s}^{-1}$
 - počet period za jednu sekundu
 -
- rychlosť šíření $v, [v] = \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
 -
- úhlová frekvence $\omega, [\omega] = \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
 - rychlosť kmitání vlny vyjádřeno jako úhlová rychlosť
 -
- okamžité elektrické a magnetické pole

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\max} \sin \omega t$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\max} \sin \omega t$$

22

22.4 Vlastní a nucené kmitání elmag. vln

22.4.1 Vlastní kmitání

- kmitání soustavy bez vnějšího zásahu
- po prvním nabití a odpoje LC obvod kmitá vlastním kmitáním
- ztráty energie → tlumené
 - soustava po čase kmitat přestane
- oscilace pouze vlastní frekvencí

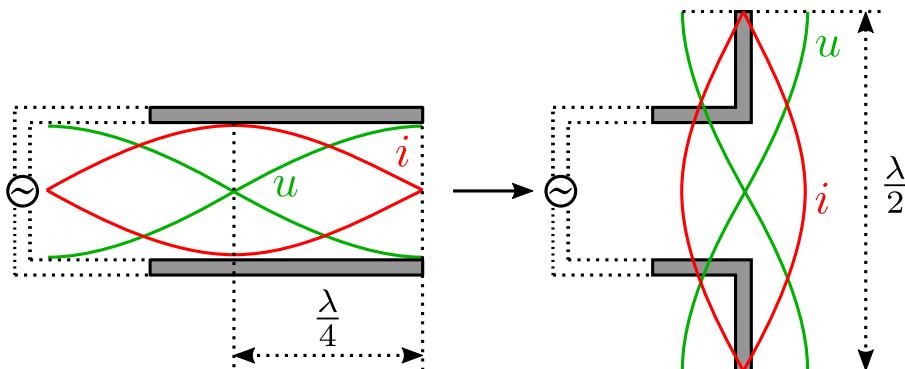
22.4.2 Nucené kmitání

- kmitání soustavy s vnějším zásahem
- dodávání síly/energie do systému
- kompenzace ztrát energie
- netlumené harmonické kmitání
- oscilace s frekvencí vnějšího působení

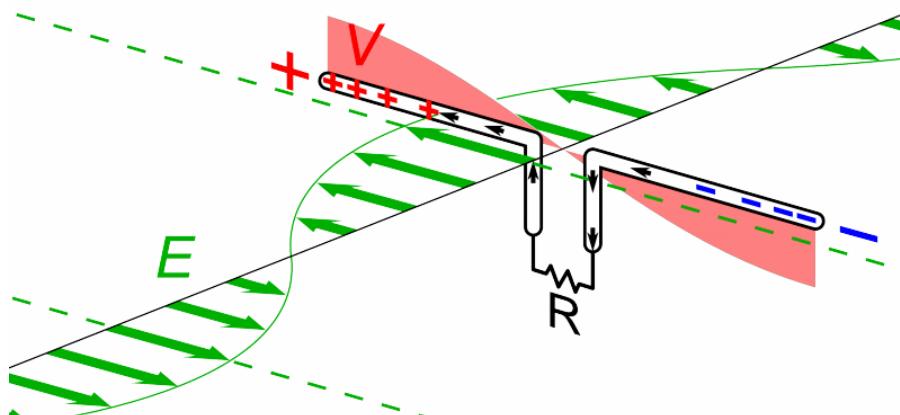
22.5 Elektromagnetický dipól

- zařízení se dvěma konci, na kterých se nachází opačný náboj o stejně velikosti
- rozevření konců rovnoběžných vodičů o délce $\lambda/4$ do směru kolmému vedení → půlvlnový dipól
- periodické dosažení maxima napětí na koncích vodiče → vznik elektrického pole
- vytváření elektromagnetického pole
 - elektrické siločáry v rovině dipólu
 - magnetické indukční vlny – soustředné kružnice v rovině kolmé dipólu

- využití – antény
 - vysílač – vyzařování vlnění do okolí, většina energie vyzařována ve směru kolmém k ose energie
 - přijímač – vznik nuceného kmitání, příjem signálu



Obr. 22.5: Vytvoření elektrického půlsvnového dipólu



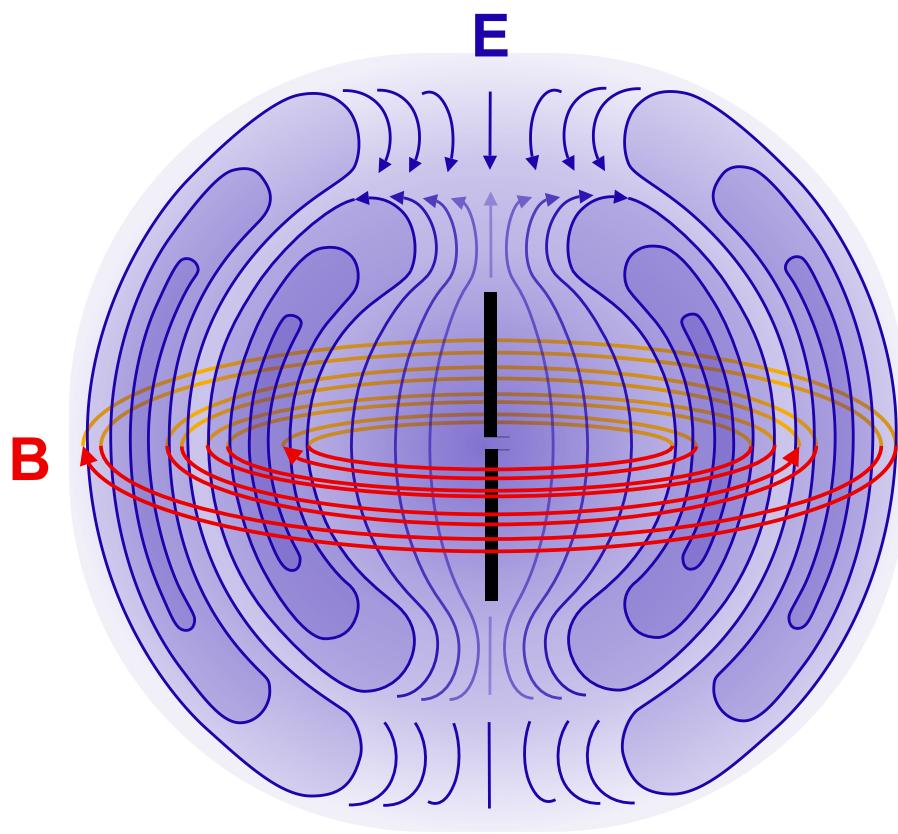
Obr. 22.6: Půlsvnový dipól jako anténa

22.6 Šíření elektromagnetických vln

- závislé na frekvenci / vlnové délce
- ohyb podél zemského povrchu
 - šíření přes velké překážky
 - dlouhé a střední vlny
 - velmi krátké vlny (rozhlas, televize) – nutná zachovat přímou cestu k vysílači
- ionosféra (60 km – 80 km)
 - volné elektrony a ionty – vodivá pro elmag. vlny
 - odražení některých krátkých vln
 - proměnlivé vlastnosti
- radiolokace – systémy sledující přímočaré šíření
 - radar – určování poloha rádiem (0,01 m – 0,5 m)
- šíření vedením – sériové zapojení LC obvodů

22.6.1 Typy elektrických vln

- gamma záření – γ
- rentgenové záření
 - HX = Hard X-rays



Obr. 22.7: Elektrické a magnetické pole dipólu

23

- SX = Soft X-Rays
- ultrafialové
 - EUV = Extreme-ultraviolet
 - NUV = Near-ultraviolet
- viditelné světlo
- infračervené
 - NIR = Near-infrared
 - MIR = Mid-infrared
 - FIR = Far-infrared
- mikrovlny
 - EHF = Extremely high frequency (microwaves)
 - SHF = Super-high frequency (microwaves)
- rádiové vlny
 - UHF = Ultrahigh frequency (radio waves)
 - VHF = Very high frequency (radio)
 - HF = High frequency (radio)
 - MF = Medium frequency (radio)
 - LF = Low frequency (radio)
 - VLF = Very low frequency (radio)
 - VF = Voice frequency
 - ULF = Ultra-low frequency (radio)
 - SLF = Super-low frequency (radio)
 - ELF = Extremely low frequency (radio)

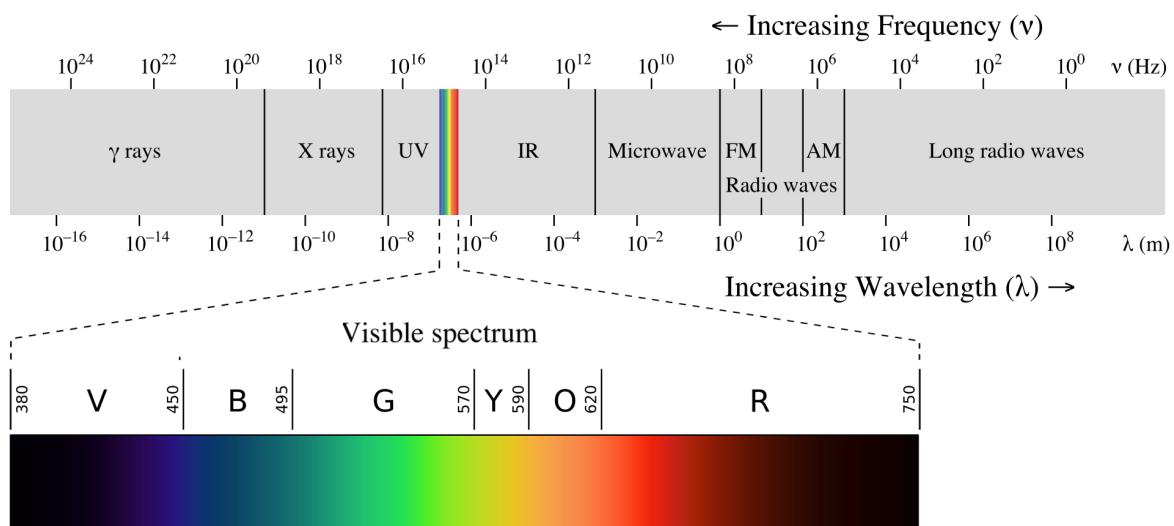
23 Světlo, vlnové vlastnosti světla

- speciální typ elmag. záření

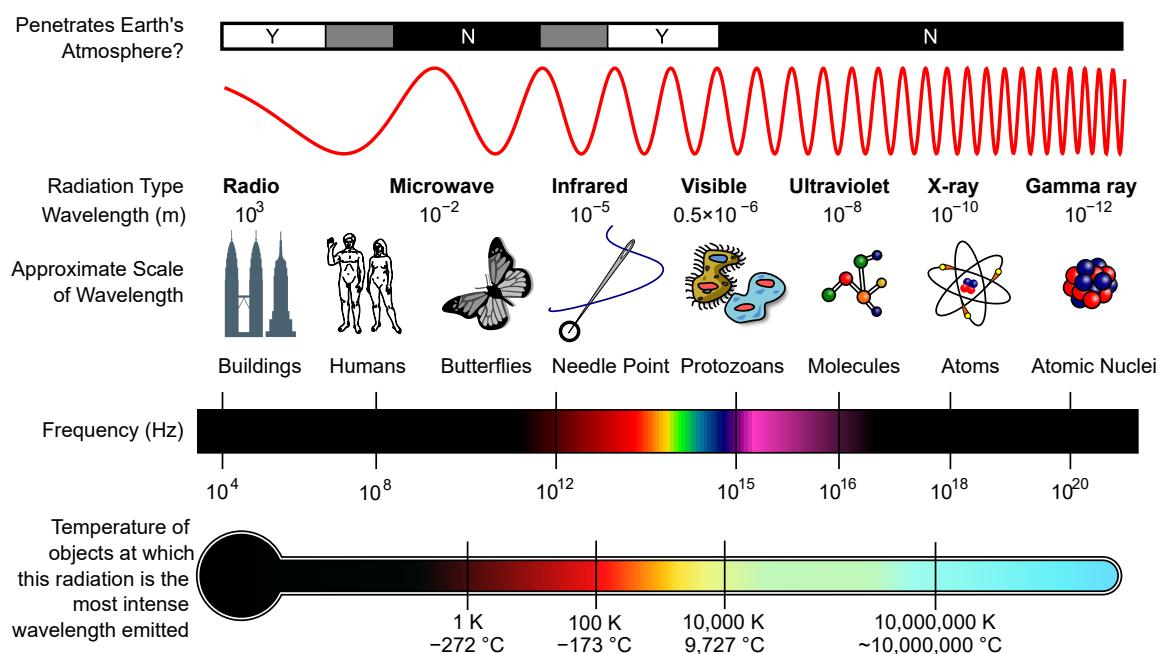
CLASS	FREQUENCY	WAVELENGTH	ENERGY
Y	300 EHz	1 pm	1.24 MeV
HX	30 EHz	10 pm	124 keV
SX	3 EHz	100 pm	12.4 keV
SX	300 PHz	1 nm	1.24 keV
EUV	30 PHz	10 nm	124 eV
NUV	3 PHz	100 nm	12.4 eV
NIR	300 THz	1 μ m	1.24 eV
NIR	30 THz	10 μ m	124 meV
MIR	3 THz	100 μ m	12.4 meV
FIR	300 GHz	1 mm	1.24 meV
EHF	30 GHz	1 cm	124 μ eV
SHF	3 GHz	1 dm	12.4 μ eV
UHF	300 MHz	1 m	1.24 μ eV
VHF	30 MHz	10 m	124 neV
HF	3 MHz	100 m	12.4 neV
MF	300 kHz	1 km	1.24 neV
LF	30 kHz	10 km	124 peV
VLF	3 kHz	100 km	12.4 peV
VF/ULF	300 Hz	1 Mm	1.24 peV
SLF	30 Hz	10 Mm	124 feV
ELF	3 Hz	100 Mm	12.4 feV

23

Obr. 22.8: Frekvence, vlnové délky a energie jednotlivých záření



Obr. 22.9: Elektromagnetické spektrum



Obr. 22.10: Porovnání velikostí elektromagnetických vln

- $3,9 \cdot 10^{14}\text{ Hz} - 7,9 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$
- $390\text{ nm} - 760\text{ nm}$

23.1 Základní pojmy

23.1.1 Optické prostředí

- prostředí šíření elmag. záření
- průhledné/průsvitné/neprůhledné, barevné/čiré, homogenní/nehomogenní, izotropní/anizotropní

23.1.2 Světelný zdroj

- zdroj elektromagnetické záření v rozmezí viditelného světla
- přírodní – kosmické (hvězdy), chemické (oheň), biologické (luminiscence), elektrické výboje (výboj, blesk)
- umělé – žárovky, zářivky, LED diody...
- bodové a plošné zářiče

23.1.3 Rychlosť světla

- rychlosť světla **ve vakuu**
- $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- univerzální fyzikální konstanta
- nejvyšší rychlosť, které lze dosáhnout

23.2 Zákony a principy

23.2.1 Zákon přímočarého šíření světla

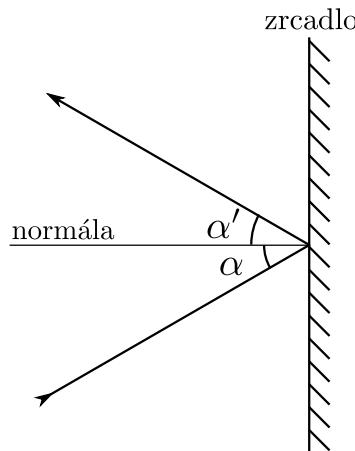
- v **homogenním** prostředí se svazek světla šíří **přímočaře**

23.2.2 Princip nezávislosti světelných paprsků

- jednotlivé světelné paprsky se navzájem při šíření neovlivňují
- při vzájemném protnutí navzájem neinteragují

23.2.3 Zákon odrazu

- „úhel odrazu je roven úhlu dopadu“
- úhel relativní k normálovému vektoru povrchu
- např. při úplném odrazu (α větší než kritický úhel), na zrcadle, ...
- částečně i na rozhraní prostředí



Obr. 23.1: Zákon odrazu

23

23.2.4 Snellův zákon (zákon lomu)

- popis šíření světla při přechodu přes rozhraní dvou různých prostředí
- poměr sinů úhlů je poměr rychlostí záření v jednotlivých prostředí

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

- dva druhy
 - lom ke kolmici – $\alpha > \beta$, $n_2 > n_1$
 - lom od kolmice – $\beta > \alpha$, $n_1 > n_2$

Index lomu

- bezrozměrná fyzikální veličina
- popis šíření světla v prostředí
- poměr rychlosti světla v prostředí a vakuu

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

- využití při výpočtu úhlů při lomu světla

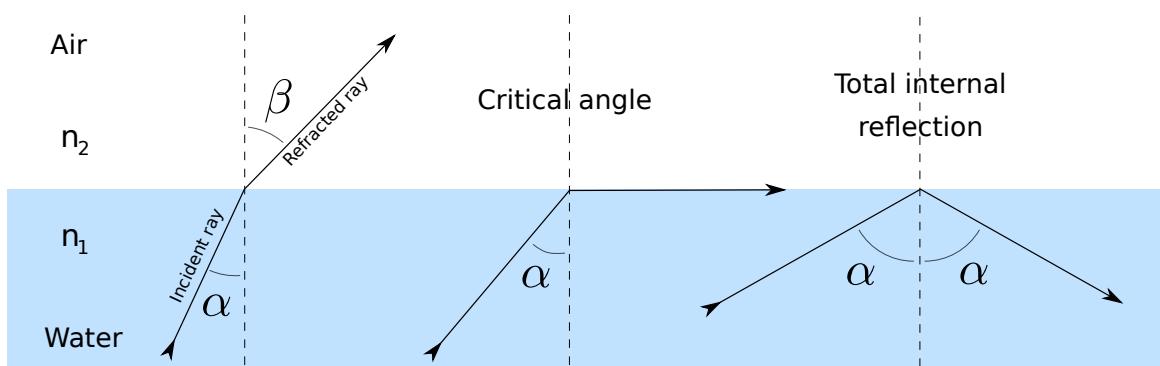
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \frac{\frac{1}{n_1}}{\frac{1}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

- různá hodnota pro každé prostředí, měřena experimentálně

Látka	index lomu
vakuum	1
vzduch	1,00026
led	1,31
voda	1,33
etanol	1,36
sklo	1,5 až 1,9

Tab. 23.1: Příklady hodnot n pro různé materiály**Mezní úhel α_m**

- jev při lomu od kolmice
- výsledný úhel lomu β roven 90°
- jestliže $\alpha > \alpha_m$, poté dochází k **úplnému odrazu**

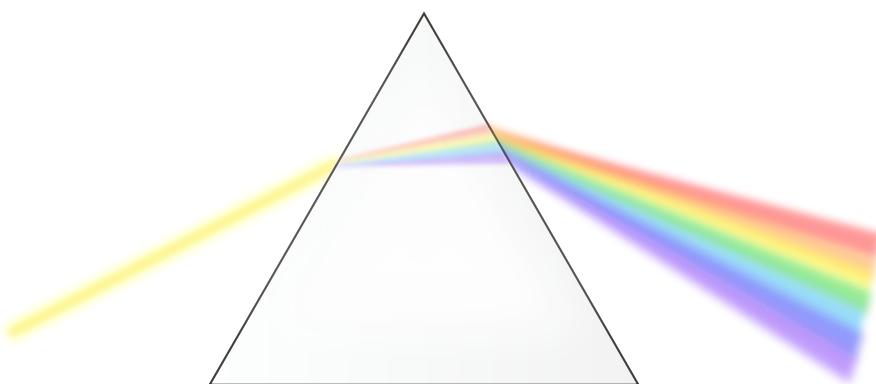


Obr. 23.2: Vyobrazení lomu světla, mezního úhlu a úplného odrazu

23

23.3 Rozklad světla

- bílé světlo – složeno z několika složek světla / barev
- různý ohyb jednotlivých složek na optickém rozhraní -> rozklad světla
 - červené světlo – nejmenší ohyb
 - fialové světlo – největší ohyb
 - vznik duhy
- rozklad světla na hranolu – objeveno Newtonem



Obr. 23.3: Rozklad světla na hranolu

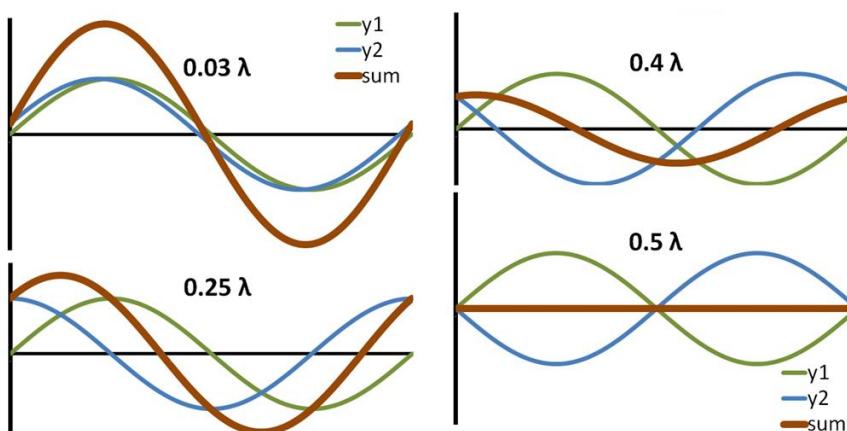
23.4 Interference světla

- vzájemné ovlivnění dvou světelných vln
- skládání vln do jedné
- dle posunu a frekvencí se navzájem zesilují nebo naopak zeslabují
- nejčastěji monochromatické světlo
- pozorovatelné u koherentního vlnění (stejné λ a f)
- interferenční maximum – dráhový rozdíl roven sudému počtu půlvln

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

- Δl – vlnová délka, k – přirozené číslo, λ – vlnová délka
- interferenční minimum – dráhový rozdíl roven lichému počtu půlvln

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



Obr. 23.4: Příklad interference

23.4.1 Interference na tenké vrstvě

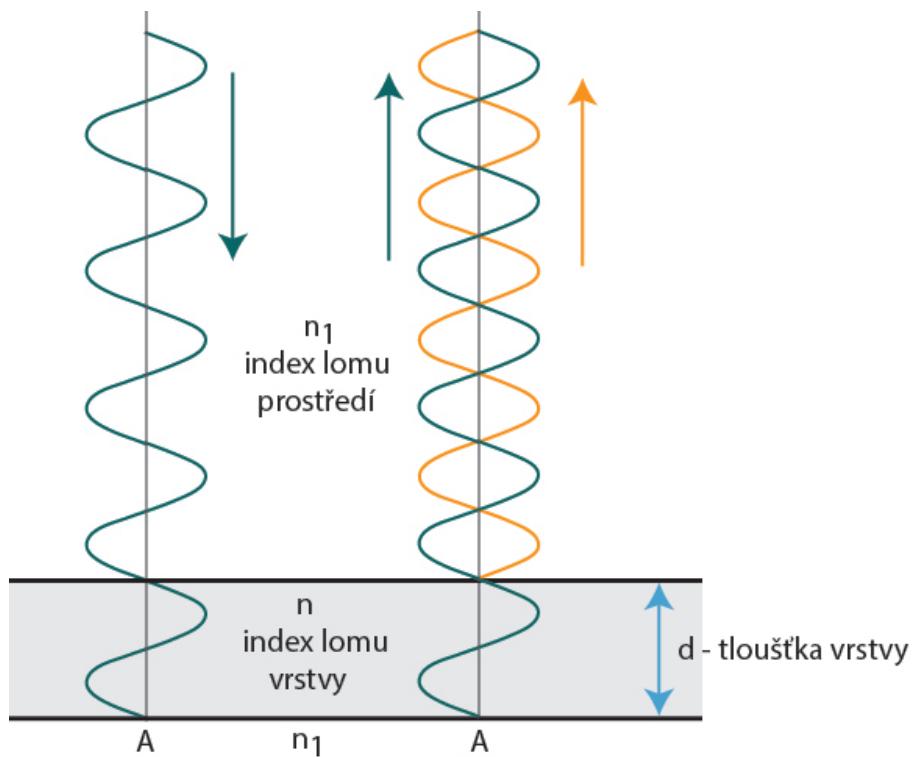
- tenká vrstva – mýdlová bublina, antireflexní vrstva na brýlích...
- část světla se odrazí na prvním rozhraní, část až na druhém

$$\Delta l = 2nd$$

- n – index lomu prostředí, d – tloušťka tenké vrstvy
- výsledně paprsky interferují
- změna fáze
 - dopad na rozhraní řidší-hustší – fáze se mění
 - dopad na rozhraní hustší-řidší – fáze se nemění

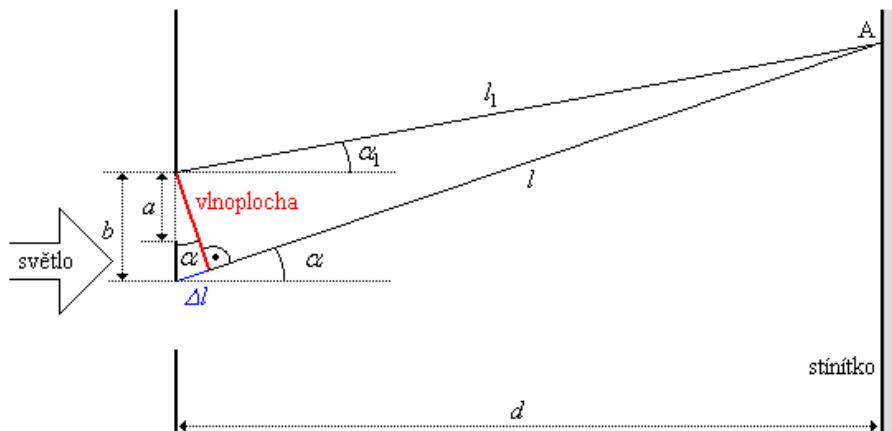
23.5 Ohyb světla na dvojštěrbině, mřížce

- ohyb světla způsoben malými otvory
- světlo dojde ke štěrbině – vznik vlnoplochy – štěrbina se chová jako zdroj
- interference světla
- podmínka maxima: $b \sin \alpha_k = k\lambda, k \in \mathbb{N}$



Obr. 23.5: Složení světla na tenké vrstvě

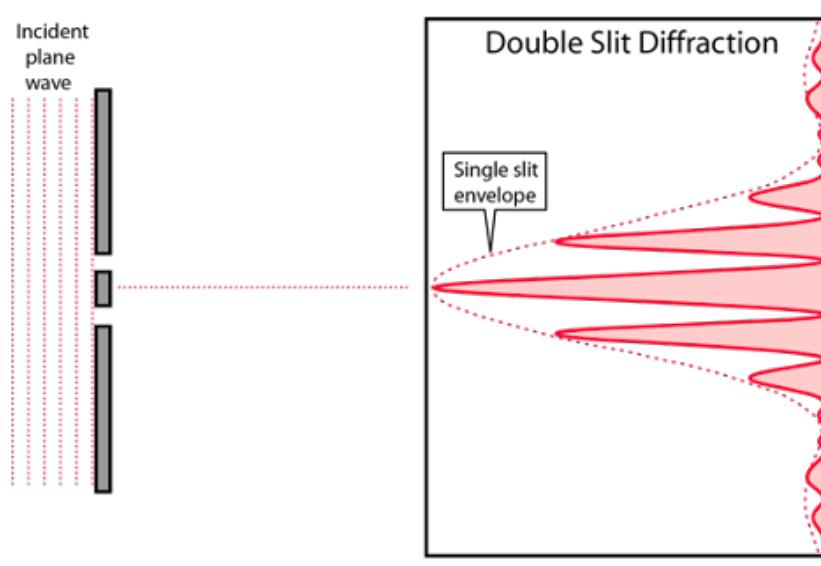
23



Obr. 23.6: Šíření paprsků světla na dvojštěrbině

23.5.1 Dvojštěrbina

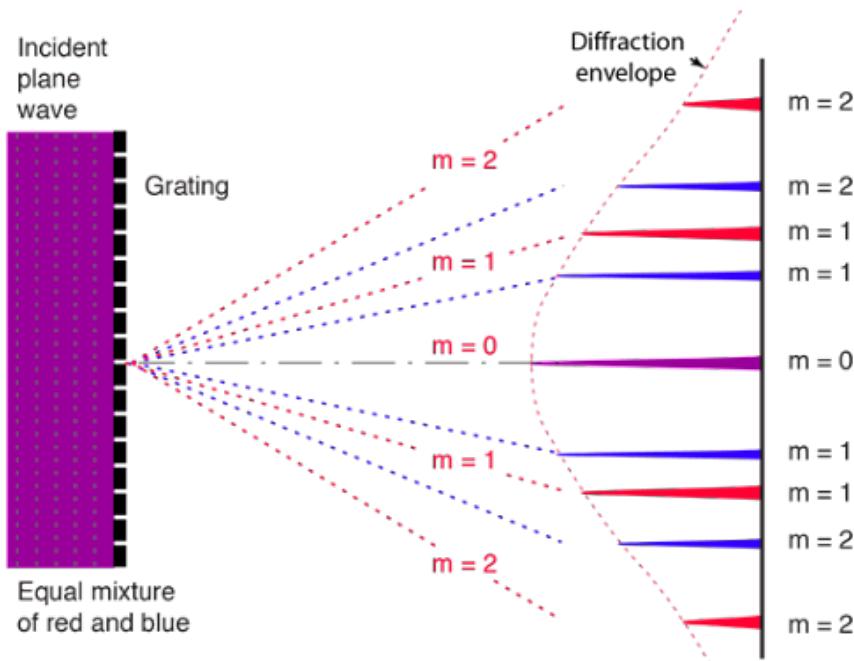
- interference světla ze dvou štěrbin



Obr. 23.7: Interference světelných vln na dvojštěrbině

23.5.2 Mřížka

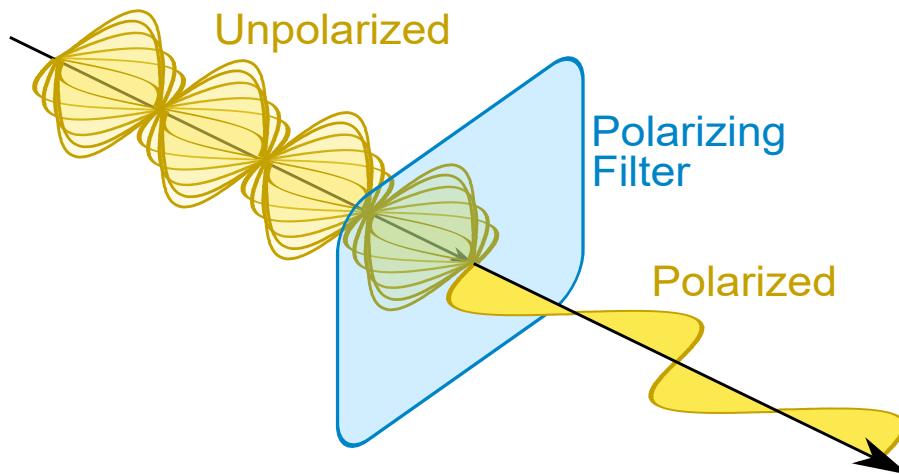
- velký počet štěrbin vedle sebe
- úzká interferenční maxima
- rozklad dopadajícího bílého světla v maximech na jednotlivé barevné složky
 - blíže k nultému maximu fialová, dále od něj červená



Obr. 23.8: Ohyb světla na mřížce

23.6 Polarizace světla

- světlo – elektromagnetické vlnění
 - kmitání vektoru elektromagnetické pole \mathbf{E}
 - k němu kolmý vektor magnetického pole \mathbf{B}
 - oba kolmé na směr pohybu
- nepolarizované záření – \mathbf{E} má náhodný směr/otočení
- polarizované světlo – všechny svazky světla \mathbf{E} mají stejný směr/otočení



Obr. 23.9: Příklad nepolarizovaného a polarizované světla

23.6.1 Druhy polarizace

- lineárně polarizované světlo
- kruhové polarizované
- elipticky polarizované

23.6.2 Zdroje

- odraz – při odrazu částečná polarizace, ovšem může nastat i úplná při specifickém úhlu
- lom – pouze částečná polarizace
- dvojlam
 - na anizotropních krystalech – index lomu závislý na směru paprsku
 - rozdělení paprsku na řádný (podléhá zákonům lomu) a mimořádný (nepodléhá zákonům lomu), oba polarizované
- polaroid
 - dovolí projít pouze jeden směr paprsku, ostatní pohltí

24

24 Optické soustavy a optická zobrazení

- souhrn věcí ovlivňující přechod paprsku a vytvářející obraz pozorovaného předmětu
 - lámavé/odrazové plochy
 - rozhraní prostředí
 - clony
- centrováná optická soustava – středy křivosti leží na jedné přímce

24.1 Základní pojmy

24.1.1 Obraz

- místo, kde se skutečně nebo zdánlivě protínají paprsky vycházející z jednotlivých bodů zobrazovaného předmětu

Vlastnosti

- zvětšení Z
 - velikost obrazu relativně k zobrazovanému předmětu
 - zmenšený / stejně velký / zvětšený ($|Z| < 1$, $|Z| = 1$, $|Z| > 1$)
 - $Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a}$
 - * y, y' – výška předmětu a obrazu
 - * a, a' – vzdálenost předmětu a obrazu čočky nebo zrcadla
- orientace
 - přímý ($Z > 0$) / převrácený ($Z < 0$) obraz - relativně k původní orientaci předmětu
- skutečný / zdánlivý obraz
 - skutečný – paprsky se sbíhají, lze zachytit na stínítku ($a' > 0$)
 - zdánlivý – paprsky se rozbehají, nelze zachytit na stínítku ($a' < 0$)

24.1.2 Ohnisko

- místo, kde se skutečně (spojka, duté zrcadlo) nebo zdánlivě³ (rozptylka, vypuklé zrcadlo) sbíhají paprsky původně rovnoběžné s optickou osou

Ohnisková vzdálenost

- vzdálenost ohniska od čočky
- polovina poloměru křivosti
- značení: $f, [f] = \text{m}$

24

Optická mohutnost

- schopnost čočky koncentrovat světlo
- převrácená hodnota f
- značení: $\varphi, [\varphi] = \text{m}^{-1}$

24.1.3 Střed křivosti

- střed zakřivení čočky nebo zrcadla
- čočky a zrcadla tvořeny z části kulové plochy
- poloměr kulové plochy $r = \text{polomér křivosti}$

24.1.4 Zobrazovací rovnice

- rovnice udávající vztah vzdáleností při zobrazení

-

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

³za pomoci geometrického prodloužení paprsků

24.1.5 Konvence znamének a značení

- optická soustava kreslena zleva doprava
 - \Rightarrow doleva kladný směr, doprava záporný směr
- f před čočkou – kladné, f za čočkou – záporné
- vzdálenosti měřeny od středu čočky
- čočky
 - $a > 0$ před čočkou, $a < 0$ za čočkou - $a' < 0$ před čočkou, $a' > 0$ za čočkou
- zrcadla
 - $a, a' > 0$ před zrcadlem, $a, a' < 0$ za zrcadlem

24.1.6 Významné paprsky

- světelné paprsky používaný k dedukci obrazu objektu
- 3 paprsky
 - rovnoběžný s optickou osou – po ohybu/odrazu míří od ohniska
 - mířící do optického středu čočky/zrcadla – jeho trasa se nemění / odráží se dle zákona odrazu
 - mířící do ohniska před čočkou/zrcadlem – po ohybu/odrazu rovnoběžný s optickou osou

24.2 Zobrazení zrcadlem

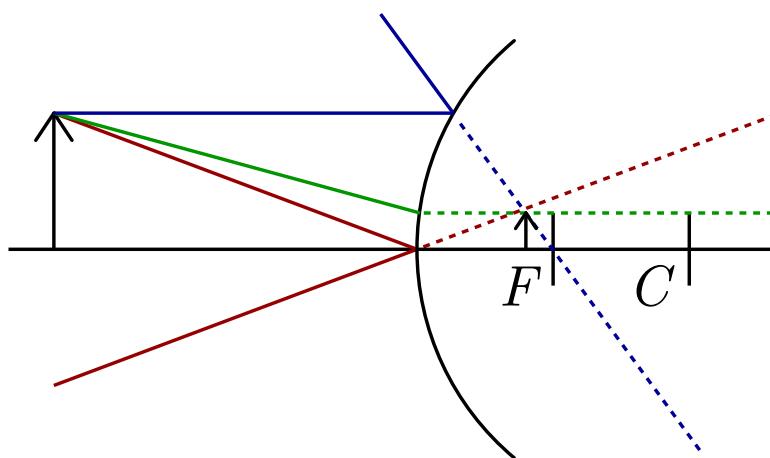
- zrcadlo – předmět odrážející světlo
- u kulových zrcadel – obraz nikdy není dokonalý, pouze u parabolických

24.2.1 Rovinné zrcadlo

- využití zákona odrazu
- $f \rightarrow \infty$
- stejně velký, přímý, zdánlivý obraz

24.2.2 Vypuklé zrcadlo

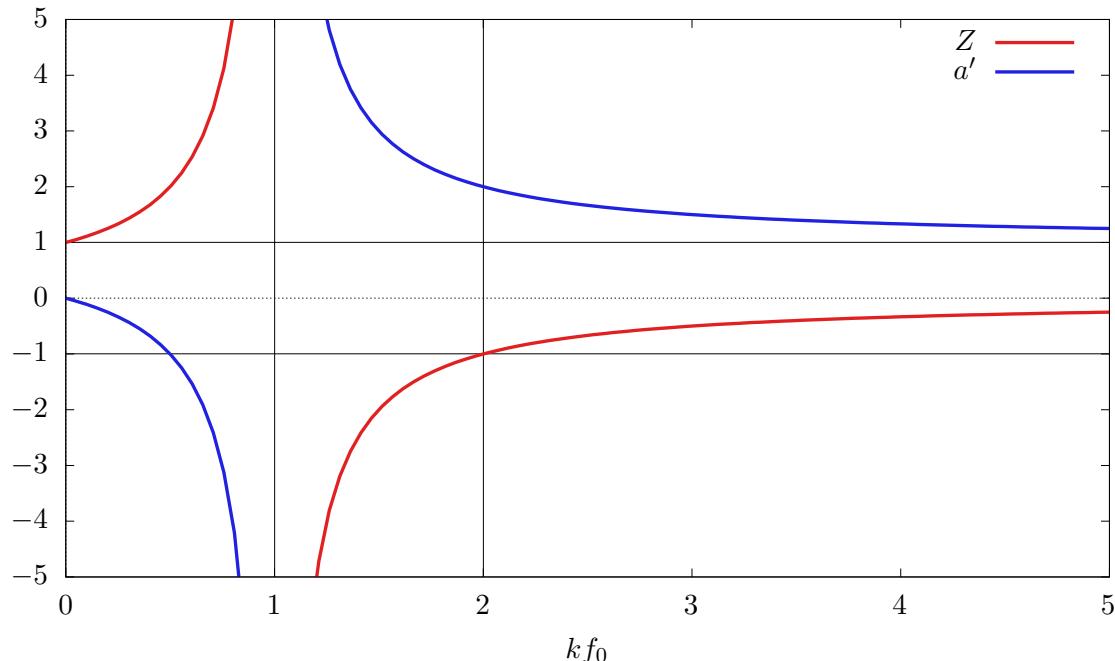
- odraz z vnějšku kulové plochy
- ohnisko za zrcadlem – záporná ohnisková vzdálenost
- obraz zmenšený, přímý, zdánlivý



Obr. 24.1: Vypuklé zrcadlo

24.2.3 Duté zrcadlo

- odraz ze vnitřku kulové plochy
- kladná ohnisková vzdálenost
- obraz závislý na poloze objektu
 - $0 < a < f$ – zvětšený, přímý, zdánlivý
 - $a = f$ – $|Z| \rightarrow \infty$ – obraz v nekonečnu
 - $f < a < 2f$ – zvětšený, převrácený, skutečný
 - $a = 2f$ – stejně velký, převrácený, skutečný
 - $a > 2f$ – zmenšený, převrácený, skutečný

Obr. 24.2: Hodnoty Z a a' v závislosti na $k f_0$; $k \in \mathbb{R}$, $f_0 = 1$

24.3 Zobrazení čočkou

24.3.1 Spojka

- zakřivuje světlo do ohniska
- kladná ohnisková vzdálenost – platí stejné pravidla jako u dutého zrcadla (sekce 24.2.3, graf 24.2)

24.3.2 Rozptylka

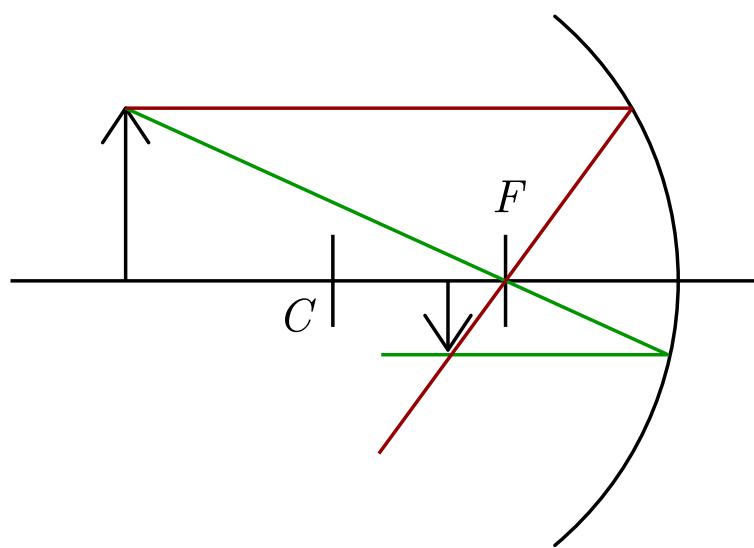
- rozptyluje paprsky směrem od ohniska
- záporná hodnota ohniskové vzdálenosti f
 - obraz vždy zmenšený, přímý, skutečný

24.4 Oko jako optická soustava

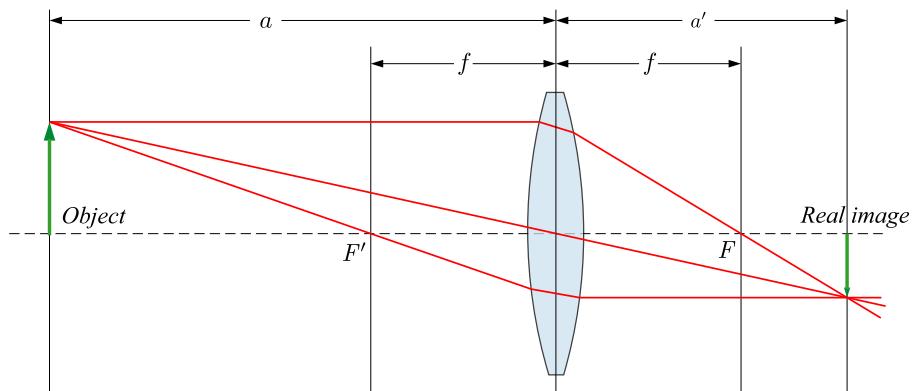
- oko – lidský orgán
- umí zaostřovat – měnit mohutnost

24.4.1 Rohovka

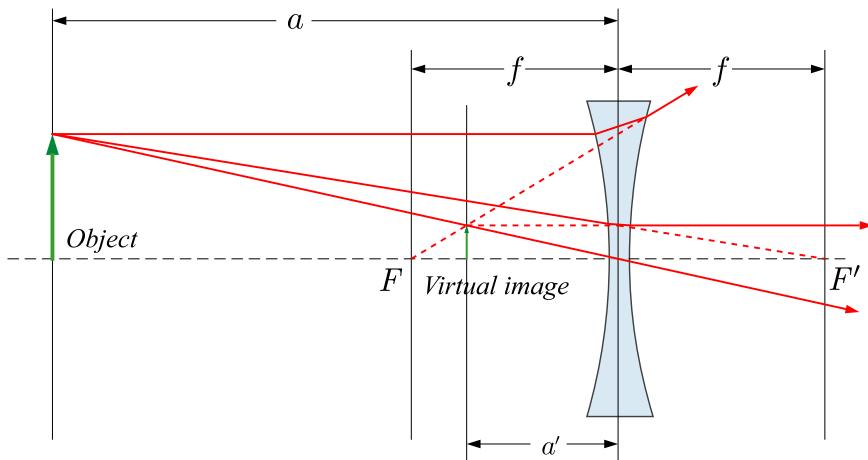
- umožňuje světlu dosáhnout sítnice
- práce na základě lomu světla



Obr. 24.3: Nákres dutého zrcadla



Obr. 24.4: Spojná čočka



Obr. 24.5: Rozptylná čočka

24.4.2 Čočka

- proměnlivá mohutnost – schopnost akomodace
- různé materiály – nemá jednotný index lomu
- ohyb světla do ohniska

Akomodace

- schopnost měnit optickou mohutnost
- čočka mění svojí šířku pomocí svalů
- čočka se přizpůsobuje, aby zaostřila – změnila ohnisko
- změna s věkem – ochabování svalů

Blízký a vzdálený bod

- nejbližší a nejvzdálenější bod, na který je možné zaostřit
- nejméně +1 cm; nejvzdálenější nekonečnost (pro zdravé oko)

Konvenční zraková vzdálenost

- vzdálenost, při které se oko nejméně namáhá
- ± 30 cm

24.4.3 Sklivec

- výplň oka
- rosolovitá hmota, připomínaje vodu
- průhledná, světlo jí prochází

24.4.4 Sítnice

- světločivné buňky – tyčinky (černobílé) a čípky (barvy)
- zrakový nerv – slepá skvrna – místo bez buněk
- žlutá skvrna – místo s nejvyšší koncentrací buněk
- zmenšený, převrácený, skutečný obraz

24.4.5 Vady oka

Krátkozrakost

- špatná schopnost vidět do dálky
- obraz před sítnicí
- korekce pomocí rozptylky

Dalekozrakost

- špatná schopnost vidět na blízko
- daleký bod v nekonečnu
- obraz za sítnicí
- korekce spojkou

Astigmatismus

- nerovnoměrné zakřivení oka
- různé optické zaostřování
- zaměňování znaků
- hlavně u dětí

Šilhavost

- špatná koordinace svalů

Sedý zákal

- člověk vidí "mlhu", lze vyléčit

Zelený zákal

- zvětšený oční tlak, neléčitelný

Barevné vady / barvoslepost

- čípky nevnímají dostatečně, špatně vidíme barvy

24.4.6 Zorný úhel

- úhel, který může lidské oko rozeznat
- 1 minuta

24.5 Paraxiální prostor

- prostor blízko optické osy
- nedochází zde k ovlivnění paprsků
- prochází přímočaře, bez dalších vlivů
- vyznačuje 3 význačné paprsky

24

24.6 Optické přístroje

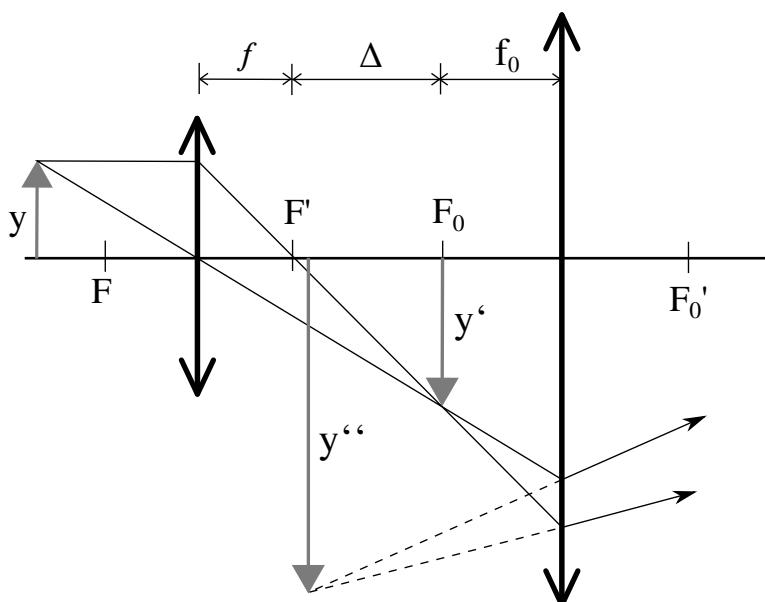
- přístroje, které využívají optickou soustavu pro své fungování

24.6.1 Lupa

- zvětšování malých předmětů (malý text, detaily, ...)
- pro a' typicky použita konvenční zraková vzdálenost d (± 25 cm)
- pro zvětšený a přímý obraz nutno $a < f$
- zvětšení $Z = -a'/a = d/f$
 - při správném značení je d záporné, tedy $Z > 0$
- maximální reálné zvětšení asi 1 500krát

24.6.2 Mikroskop

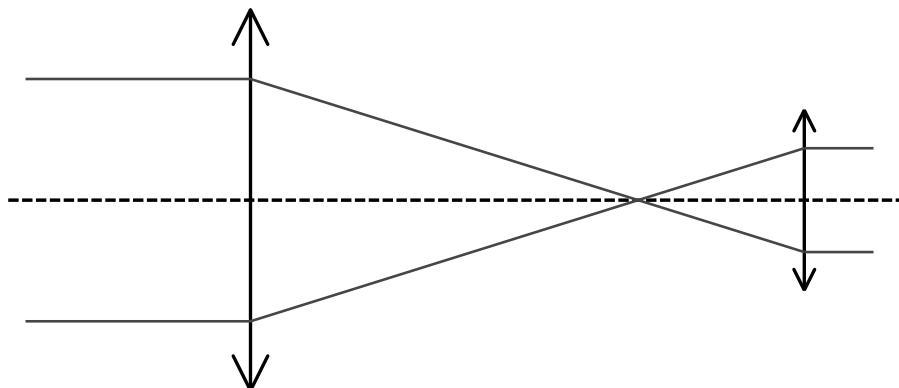
- zvětšování velice malých předmětů (buňky, malé organismy, ...)
- soustava více čoček
- obraz zvětšený, převrácený, skutečný
- příčné zvětšení $Z = \Delta/f$
 - optický interval mikroskopu $\Delta = |F'F_0|$ – vzdálenost mezi ohnisky objektivu a okuláru
- úhlové zvětšení $\gamma_2 = d/f_0$
- celkové zvětšení $\gamma = Z\gamma_2 = \Delta d/(f f_0)$



Obr. 24.6: Zobrazení předmětu mikroskopem, kde f a f_0 jsou ohniskové vzdálenosti, delta je optický interval mikroskopu; F , F' , F_0 , F'_0 značí ohniska, y je objekt a y' je skutečný obraz. Optická soustava mikroskopu se skládá ze dvou čoček. Objektiv funguje jako běžná spojna čočka, okulár jako lupa.

24.6.3 Dalekohled

- zvětšování velice vzdálených předmětů
- soustava čoček a v mnohdy i zrcadel
- mnoho různých typů
- úhlové zvětšení $\gamma = f/f_0$



Obr. 24.7: Nákres jednoduchého dalekohledu

25 Základní pojmy kvantové fyziky

- věda mikrosvěta
- malé rozměry (10^{-9} m, 10^{-24} s)

25.1 Planckova kvantová hypotéza

- záření se šíří nespojitě v **kvantech**
 - nejmenší jednotka energie elmag. záření
- energie kvanta úměrná frekvenci záření $E = hf$
 - Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s

- kvantum = **foton** – částice záření – pojmenováno později Albertem Einsteinem
- energie elmag. záření vždy násobek energie kvanta

25.2 Absolutně černé těleso

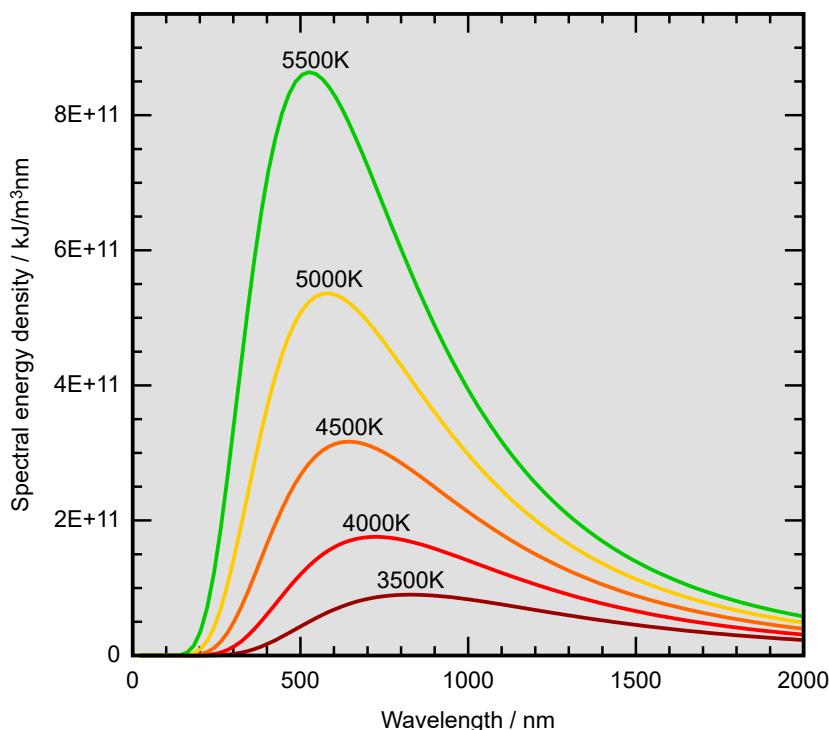
- ideální těleso pohlcující všechny vlnové délky
- ideální zářič, vyzařuje maximální množství energie
 - celková vyzářená energie závislá pouze na teplotě tělesa

25.2.1 Wienův posunovací zákon

- „V záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařovaná na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje“
- čím teplejší těleso, tím více vyzařuje záření o vyšších frekvencích / kratších vlnových délkách
-

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

kde $b = 2,898 \text{ mm}\cdot\text{K}$ je Wienova konstanta



25

Obr. 25.1: Nákres Wienova posunovacího zákona

25.3 Fotoelektrický jev

- elektrony emitované z látky (nejčastěji kovu) v důsledku absorpce elmag. záření
- energie kvanta (fotonu) předána elektronu, přeměna na:
 - vykování výstupní práce W
 - kinetickou energii elektronu E_k
- mezní frekvence f_0 – nejmenší frekvence potřebná pro uvolnění elektronu
 - $\Rightarrow W = hf_0$
-

$$hf = W + E_k \quad \Rightarrow \quad hf = hf_0 + E_k$$

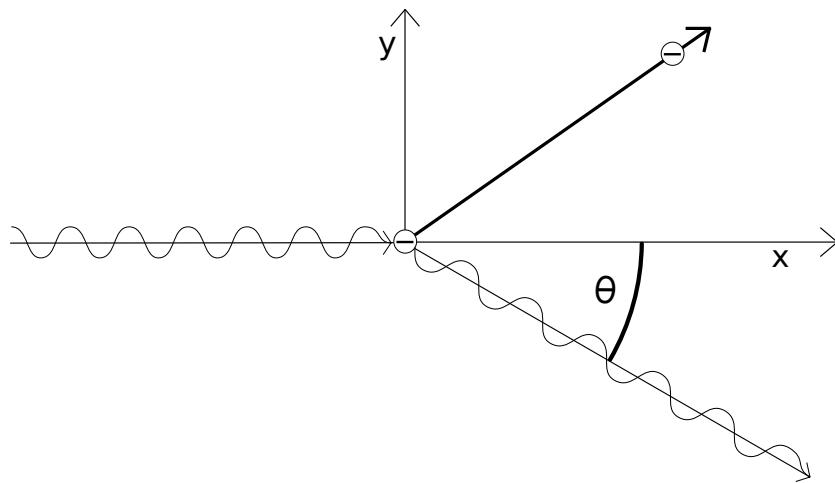
25.3.1 Druhy fotoefektu

Vnitřní fotoefekt uvolněné elektrony zůstávají uvnitř látky, nekonají výstupní energie W , zůstávají v ní jako vodivostní elektrony

Vnější fotoefekt jev na povrchu látky, elektrony uvolněny do okolí

25.4 Comptonův jev

- Arthur Holly Compton, 1923
- elektromagnetická vlna interahuje s atomem
- foton předá atomu část své energie → změna vlnové délky záření



Obr. 25.2: Nákres Comptonova jevu

25.5 Vlastnosti fotonů

- 25
- částice elektromagnetického záření
 - pohybují se rychlosťí světla $c \doteq 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
 - energie:
- $$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$
- hybnost:
 - vztah platící díky relativistickému vztahu pro energii $E = mc^2$

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

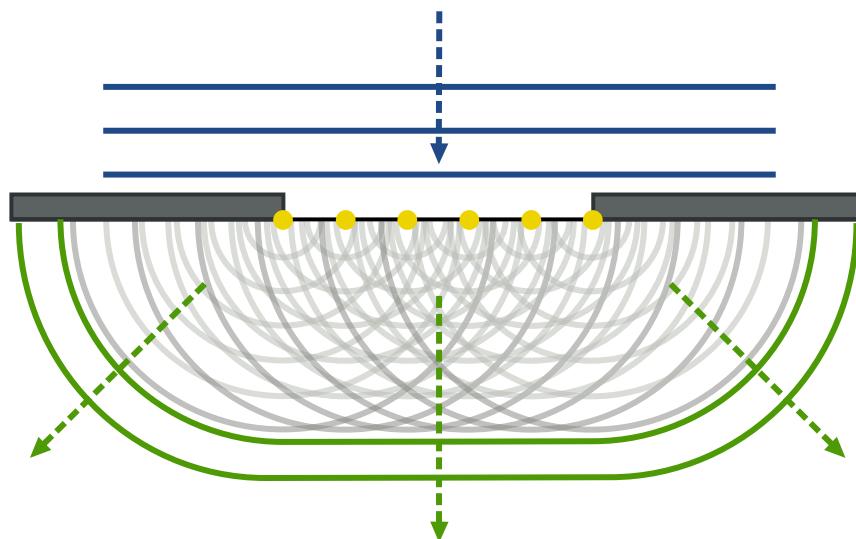
25.6 Korpuskulárně vlnový dualismus

- stejně jako vlna na vlastnosti částice, tak částice má vlastnosti vlny
- De Broglie – 1924 – „s každou částicí o hybnosti p je spojeno vlnění“ → *de Broglieovy vlny (hmotnostní vlny)*

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

25.7 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“
- vlnoplocha – plocha kmitajících bodů se stejnou fází
- jednotlivé vlnoplochy spolu interferují a vytvářejí vnější vlnoplochu
- jestliže vlna narazí na štěrbinu, bude se štěrbina chovat jako nový zdroj vlny
- viz otázka 15.5

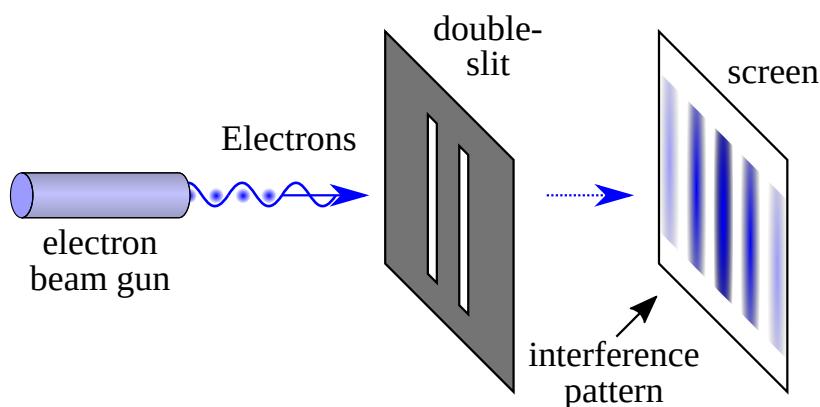


Obr. 25.3: Heygensův jev u štěrbiny

25.7.1 Dvouštěbinový experiment

25

- důkaz dualismu vlna a častic a Huygensova principu
- proud elektronů po průchodu dvěma štěbinami vykazuje interferenci → elektrony se chovají jako vlna



Obr. 25.4: Dvouštěbinový experiment

25.8 Popis částic v mikrosvětě

25.8.1 Heisenbergův princip neurčitosti

- čím přesněji znám jednu vlastnost, s tím menší přesností určím druhou

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Δx – neurčitost polohy
- Δp_x – neurčitost hybnosti
- $\hbar = h/2\pi$ – redukovaná Planckova konstanta

25.8.2 Vlnová funkce

- matematický popis kvantového stavu částice v izolovaném kvantovém systému
-

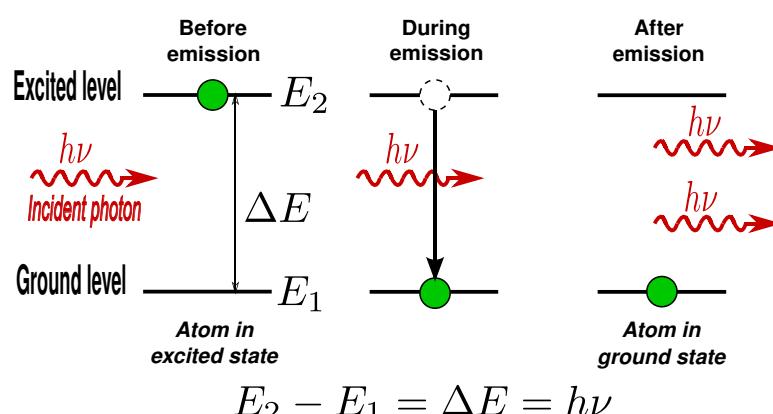
$$\Psi(x, y, z, t)$$

- odvozena ze Schrödingerovy rovnice
- pravděpodobnost naměření částice na daném místě nebo s danou hybností:

$$|\Psi(x, y, z, t)|^2$$

25.9 Laser

- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- monochromatický, koherentní, jednoduše ovladatelný a vysoce zaostřitelný zdroj světla
- atom absorbuje záření, excituje (elektron jde do vyššího energetického stavu / vyšší hladiny), elektron je vyražen z excitované hladiny fotonem, elektron se přesunuje do nižší hladiny a emituje foton
- využití
 - spektroskopie
 - komunikace (optická internetová vlákna, satelity)
 - řezání, sváření, vypalování
 - lidar, zaměřování cílů, navádění střel



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Obr. 25.5: Princip fungování LASERu

26 Elektronový obal atomu, atomové jádro, elementární částice

26.1 Atomová vs Jaderná fyzika

Atomová fyzika

- fyzika elektronového obalu
- zkoumá vlastnosti a pohyb elektronů v elektronovém obalu
- atomové jádro zůstává neměnné
- chemická energie v rádech jednotek elektronvoltů

Jaderná fyzika

- fyzika atomového jádra
- zkoumá pohyb částic uvnitř atomových jader a jejich přeměny
- energie v rádech megaelektronvoltů

26.2 Vlastnosti atomu

- jádro (většina hmotnosti) + elektronový obal
- elektricky neutrální
- částice
 - jádro
 - * proton - kladný náboj
 - * neutron - bez náboje
 - obal
 - * elektron - záporný náboj
- protonové číslo Z – počet protonů v jádře; nukleonové číslo A – počet nukleonů v jádře

26.3 Modely atomu

26.3.1 Thomsonův (pudinkový) model

- elektrony (záporné) poletují v "polívce" kladného náboje

26.3.2 Ruthefordův model

- "planetární model atomu", 1911
- velmi malé, hmotné jádro okolo kterého obíhají elektrony ($\approx 10\ 000r$ jádra)

26.3.3 Bohrův model

- 1913
- následník Ruthefordova modelu a předchůdce kvantově mechanického modelu
- elektrony se nachází v jednotlivých hladinách okolo jádra

26.3.4 Kvantově mechanický model

- zatím nejrealističtější popis atomu
- založen na kombinaci řady předpokladů
 - každá částice má vlnovou funkci (viz Korpuskulárně vlnový dualismus) → uvažujeme o elektronu jako o vlně
 - principu neurčitosti
 - v atomu existuje více než jedna energetická hladina → elektrony mají orbitaly
 - elektrony mají spin; elektrony ve stejném orbitalu mají odlišný spin

26.4 Kvantová čísla

- elektrony se pohybují v trojrozměrném prostoru po orbitalech
- nacházejí se zde s určitou pravděpodobností, jejich polohu a hybnost nelze s určitostí říct
- elektrony popsány pomocí 4 kvantových čísel

26.4.1 Hlavní kvantové číslo – n

- hlavní energie elektronu, popisuje velikost orbitalu
- $n \in \mathbb{N} - 1, 2, 3, \dots$ (praktické maximum 7 hladin)

26.4.2 Vedlejší kvantové číslo – l

- tvar orbitalu
- $l \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$
- popisováno písmeny (s, p, d, f, g, \dots)

26.4.3 Magnetické číslo – m

- orientace orbitalu v prostoru
- $m \in \{-l, -l+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l-1, l\}$

26.4.4 Spinové číslo – s

- vyjadřuje vnitřní moment hybnosti
- hodnota pevně daná, u elektronů $s = \pm \frac{1}{2}$

n	$\ell=0$ (s-Orbitale)		$\ell=1$ (p-Orbitale)				$\ell=2$ (d-Orbitale)						$\ell=3$ (f-Orbitale)					
	$m=0$	$m=0$	$m=0$	$m=1$	$m=-1$	$m=0$	$m=1$	$m=-1$	$m=2$	$m=-2$	$m=0$	$m=1$	$m=-1$	$m=2$	$m=-2$	$m=3$	$m=-3$	
1	●																	
2	●			●	●		●	●										
3	●			●	●		●	●	●	●		●	●	●	●			
4	●			●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

Obr. 26.1: Vyobrazení jednotlivých orbitalů elektronů

26.5 Pauliho vylučovací princip

- „Žádné dva nerozlišitelné fermiony nemohou být ve stejném kvantovém stavu“
- elektrony jsou fermiony \Rightarrow žádné dva elektrony v elektronovém obalu nemohou být ve stejném kvantovém stavu / alespoň jedno kvantové číslo se musí lišit

26.6 Elementární částice

- částice, která již není složená z jiných částic
- dělení
 - fermiony
 - bosony

26.6.1 Fermiony

- kvarty, antikvary, leptony, antileptony
- částice „hmoty“
- poločíselný spin ($\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \dots$)
- splňují Pauliho vylučovací princip

26.6.2 Bosony

- výměnné bosony a Higgsův boson
- částice „sil“, zajišťují interakce mezi fermiony
- celočíselný spin ($\pm 1, \pm 2, \dots$)
- nesplňují Pauliho vylučovací princip

three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
I	II	III	I	II	III	g	H
mass charge spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ top	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ antiup	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ anticharm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ antitop	0 0 1 gluon
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ bottom	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ antidown	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ antistrange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ antibottom	0 0 1 photon
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ tau	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ positron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ antimuon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ antitau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ tau neutrino	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ electron antineutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ muon antineutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ tau antineutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ 1 1 W^+ boson
							$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ -1 1 W^- boson
							GAUGE BOSONS SCALAR BOSONS

Obr. 26.2: Tabulka elementárních částic a jejich zařazení

26.7 Jaderná fyzika

- velikost atomu 10^{-15} m
- stabilita jádra udržována silnou jadernou silou

26.7.1 Radioaktivita

- přirozená a umělá
- schopnost některých jader vysílat záření, při kterém se jádro mění v jiné (nebo ztratí část své energie)

- objevení – 1846 – Henri Becquerel
- využití
 - medicína – diagnostika, léčba (např. chemoterapie)
 - diagnostika stáří materiálů a jejich složení
 - výroba elektrické energie
 - defektometrie
 - zemědělství

Alpha záření

- jádra ${}_2^4\text{He}$
- ionizační účinky
- malá pronikavost – zastaveno papírem
- velká hmotnost, rychlosť $10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Beta záření

- proud elektronů a pozitronů
- střední pronikavost – třeba alabal
- rychlosť téměř c , menší hmotnost než α

Gamma záření

- proud fotonů / elektromagnetické záření
- nemá el. náboj, nereaguje na elmag. pole
- vysoká pronikavost – olovo, 1 m betonu, voda
- nebezpečné – doprovázeno dalšími zářenimi

Neutronové záření

- proud neutronů
- těžké, pomalé
- bez náboje
- nelze odstínit, ochranou je vzdálenost

26.7.2 Poločas rozpadu

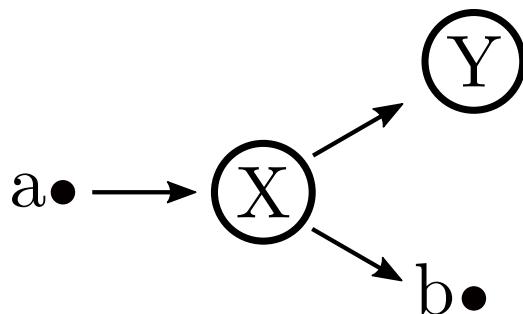
- funkce zhruba popisující zbývající počet částic z původního počtu v čase
 - radioaktivita je náhodný děj \Rightarrow nelze určit přesný počet
- $$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$
 - N – počet částic v čase t
 - N_0 – původní počet částic v čase $t = 0$
 - T – poločas rozpadu – doba, za kterou se rozpadne polovina částic
- hodnota aktivity A , $[A] = \text{Bq}$

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$
- popis pomocí rychlosti rozpadu λ

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad \Rightarrow \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

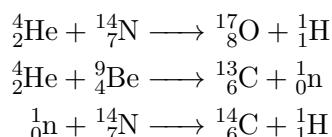
26.7.3 Jaderné reakce

- reakce, při kterých dochází ke změně jádra
- typy podle energie
 - endoenergetické reakce – přijímání energie
 - exoenergetické reakce – vylučování energie
- typy podle procesu
 - fúze - slučování jader
 - štěpení - rozdělení jader
- platí $a + X = Y + b$ (viz obr. 26.3)



Obr. 26.3: Štěpení jádra; a,b – částice; X,Y – jádra atomů

- příklady:



Seznam obrázků

1.1	Znázornění pohybu po kružnici	12
1.2	Graf dráhy, rychlosti a zrychlení rovnoměrně zrychleného pohybu	13
3.1	Pracovní diagram	17
4.1	Moment síly v ose otáčení	20
4.2	Skládání sil na sobě, z důvodu přehlednosti uvedeny pod sebou	21
4.3	Skládání sil ve stejném působišti	21
4.4	Skládání sil v různých působištích	22
4.5	Skládání rovnoběžných sil v různých působištích	22
4.6	Skládání opačných rovnoběžných sil v různých působištích	23
4.7	Skládání rovnoběžných sil v různých působištích pomocí geometrické finty	23
5.1	Nákres spojených nádob a hydrostatického paradoxu	26
5.2	Nákres Pascalova zákona	27
5.3	Síly působící na těleso v tekutině	27
5.4	Spojitost proudění nestlačitelné kapaliny	28
5.5	Proudění kapaliny dle Bernoulliho rovnice	29
5.6	Vytékání kapaliny z nádoby dle torricelliho vzorce	29
5.7	Působení sil na křídlo letadla	30
6.1	Skládání gravitační a odstředivé síly do tělesa na povrchu Země	32
6.2	Vektorově znázorněno gravitační pole	32
6.3	Trajektorie vrhů	35
7.1	Vennův diagram objektu ve sluneční soustavě	40
7.2	Geometrické odvození parsecu	41
8.1	Znázornění Brownova pohybu	43

8.2 Graf závislosti síly na vzdálenosti	44
10.1 pV diagramy dějů	50
10.2 pV diagram adiabatického děje	51
10.3 Diagram kruhového děje (Carnotův cyklus)	52
10.4 Schéma tepelného stroje	53
11.1 Uspořádání částic v pevných látkách	55
11.2 Poruchy krystalické mřížky	55
12.1 Síly povrchové vrstvy kapaliny	59
12.2 Znázornění povrchového napětí	60
12.3 Skládání sil na molekulách	60
12.4 Stykový úhel kapaliny se stěnou	61
12.5 Kapilární elevace a deprese	62
13.1 Teplotní křivka zahřívání vody	63
13.2 Fázový diagram vody	64
13.3 Fázový diagram pro různá skupenství	64
14.1 Graf výchylky v závislosti na čase	66
14.2 Skládání vln stejné úhlové frekvence	67
14.3 Zavěšení závaží na pružinu	69
14.4 Působení sil na kyvadlo	70
15.1 Interferenční maximum a minimum vlnění	73
15.2 Odraz vlny od pevného závěsu	73
15.3 Odraz vlny od volného závěsu	74
15.4 Stojaté vlnění	74
15.5 Nákres Huygensova principu	75
16.1 Coulombův zákon u nábojů	76
16.2 Různé příklady siločar elektrického pole	77
16.3 Sériové a paralelní zapojení kondenzátorů	79
16.4 Atomová polarizace dielektrika	79
16.5 Orientační polarizace	80
17.1 Voltampérová charakteristika kovů	81
17.2 Zapojení termočlánku	82
17.3 Nákres proudů na uzlu	83
17.4 Aplikace 2. KZ na část obvodu (na smyčku)	83
17.5 Nákres KZ při řešení el. obvodů	84
18.1 Vlastní vodivost a příměsi v polovodičích	85
18.2 PN přechod a schématické zakreslení polovodičové diody	85
18.3 Voltampérová charakteristika lavinové diody	86
18.4 Jednoduché zapojení bipolárního NPN tranzistoru jako spínače	87
19.1 Elektrolýza vodného roztoku CuSO_4	88
19.2 Voltampérová charakteristika roztoku	89
19.3 Voltampérová charakteristika plynu	90
20.1 Ampérovo pravidlo pravé ruky	92
20.2 Nákres situace nabité částice v mag. poli	93
20.3 Pohyb kladně nabité částice v mag. poli	93
20.4 Pohyb záporně nabité částice v mag. poli	93
20.5 Flemingovo pravidlo levé ruky	94
20.6 Magnetická hysterezní křivka	97
21.1 Fázový diagram posunu z důvodu induktance	99
21.2 Nákres jednoduchého alternátoru	102
21.3 Průběh tří fází generátoru	102
21.4 Nákres transformátoru	103
21.5 Zapojení trojúhelník-hvězda	104
22.1 Šíření elektrického a magnetického pole	104

22.2 Vizualizace divergence	105
22.3 Nákres LC obvodu	106
22.4 Průběh oscilace LC obvodu	106
22.5 Vytvoření elektrického půlvlnového dipólu	108
22.6 Půlvlnový dipól jako anténa	108
22.7 Elektrické a magnetické pole dipólu	109
22.8 Frekvence, vlnové délky a energie jednotlivých záření	110
22.9 Elektromagnetické spektrum	110
22.10 Porovnání velikostí elektromagnetických vln	111
23.1 Zákon odrazu	112
23.2 Vyobrazení lomu světla, mezního úhlu a úplného odrazu	113
23.3 Rozklad světla na hranolu	113
23.4 Příklad interference	114
23.5 Složení světla na tenké vrstvě	115
23.6 Šíření paprsků světla na dvojštěrbině	115
23.7 Interference světelných vln na dvojštěrbině	116
23.8 Ohyb světla na mřížce	116
23.9 Příklad nepolarizovaného a polarizovaného světla	117
24.1 Vypuklé zrcadlo	119
24.2 Hodnoty Z a a' v závislosti na $kf_0; k \in \mathbb{R}, f_0 = 1$	120
24.3 Nákres dutého zrcadla	121
24.4 Spojná čočka	121
24.5 Rozptylná čočka	121
24.6 Zobrazení předmětu mikroskopem	124
24.7 Nákres jednoduchého dalekohledu	124
25.1 Nákres Wienova posunovacího zákona	125
25.2 Nákres Comptonova jevu	126
25.3 Heygensův jev u štěrbiny	127
25.4 Dvouštěrbinový experiment	127
25.5 Princip fungování LASERu	128
26.1 Vyobrazení jednotlivých orbitalů elektronů	130
26.2 Tabulka elementárních částic a jejich zařazení	131
26.3 Štěpení jádra; a,b – částice; X,Y – jádra atomů	133

Seznam tabulek

10.1 Porovnání typů tepelných motorů	53
19.1 Různé druhy galvanických článků	89
23.1 Příklady hodnot n pro různé materiály	113