

**STŘEDNÍ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ, OSTRAVA,
NA JÍZDÁRNĚ 30, p. o.**

FYZIKA

Mgr. Světlana MAJOVÁ

2006

OBSAH

1. ÚVOD DO STUDIA FYZIKY	5
1.1. Hmota	5
1.2. Struktura látek.....	5
1.3. Fyzikální veličiny a jejich jednotky.....	5
1.4. Skalární a vektorové veličiny	7
2. MECHANIKA	8
2.1. Kinematika.....	8
2.1.1. Relativnost klidu a pohybu.....	8
2.1.2. Základní pojmy a veličiny potřebné pro popis pohybu.....	8
2.1.3. Rovnoměrný přímočarý pohyb.....	9
2.1.4. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb	10
2.1.5. Volný pád	12
2.1.6. Rovnoměrný pohyb po kružnici.....	13
2.1.7. Příklady – Kinematika.....	14
2.2. Dynamika.....	17
2.2.1. Setrvačnost	17
2.2.2. Newtonovy pohybové zákony	17
2.2.3. Zákon zachování hybnosti.....	18
2.2.4. Inerciální a neinerciální vztažné soustavy.....	19
2.2.5. Dostředivá a odstředivá síla	20
2.2.6. Odporové síly	21
2.2.7. Příklady – Dynamika.....	22
3. MOLEKULOVÁ FYZIKA A TERMIKA	24
3.1. Základní pojmy a zákonitosti molekulové fyziky a termiky	24
3.1.1. Kinetická teorie látek	24
3.1.2. Termodynamická soustava.....	24
3.1.3. Vnitřní energie soustavy. I.termodynamický zákon.....	24
3.1.4. Teplota a teplo.....	25

3.1.5.	Měrná tepelná kapacita.....	26
3.1.6.	Přenos tepla	28
3.1.7.	Kalorimetrická rovnice.....	28
3.1.8.	Příklady – zákonitosti mol. Fyziky a termiky	30
3.2.	Struktura pevných látek	31
3.2.1.	Ideální krystalová mřížka	32
3.2.2.	Poruchy krystalové mřížky.....	33
3.2.3.	Deformace pevných látek.....	34
3.2.4.	Normálové napětí	34
3.2.5.	Hookův zákon	35
3.2.6.	Trhací diagram	36
3.2.7.	Teplotní roztažnost.....	36
3.2.8.	Příklady – Struktura pevných látek	38
3.3.	Struktura kapalin.....	39
3.3.1.	Povrchová energie a povrchové napětí.....	39
3.3.2.	Kapilarita.....	41
3.3.3.	Teplotní roztažnost kapalin	42
3.3.4.	Příklady – Struktura kapalin.....	43
3.4.	Struktura a vlastnosti plynů	44
3.4.1.	Rychlost, energie a tlak molekul ideálního plynu	45
3.4.2.	Stavová rovnice pro ideální plyn.....	46
3.4.3.	Tepelné děje v plynech.....	47
3.4.4.	Příklady – Stavová rovnice, tepelné děje v plynech.....	50
4.	MECHANICKÉ KMITÁNÍ A VLNĚNÍ.....	51
4.1.	Kmitání	51
4.1.1.	Kmitavý pohyb, veličiny popisující kmitavý pohyb	51
4.1.2.	Základní a obecná rovnice harmonického pohybu.....	52
4.1.3.	Dynamika harmonického pohybu	54
4.1.4.	Kyvadlo	55

4.1.5.	Tlumené a netlumené kmity. Rezonance	56
4.1.6.	Příklady – Kmitání	57
4.2.	Akustika	58
4.2.1.	Šíření zvuku.....	59
4.2.2.	Zvukové jevy	59
4.2.3.	Vlastnosti zvuku	60
4.2.4.	Základy fyziologické akustiky	61
4.2.5.	Příklady - Akustika.....	61
5.	OPTIKA	63
5.1.	Vlnová a kvantová optika	63
5.1.1.	Vývoj názorů na podstatu světla	63
5.1.2.	Charakteristiky světla jako vlnění	64
5.1.3.	Druhy elektromagnetického vlnění	65
5.1.4.	Jevy na rozhraní dvou prostředí	66
5.1.5.	Příklady	69
5.1.6.	Interference světla	69
5.1.7.	Ohyb světla (difrakce).....	71
5.1.8.	Polarizace světla.....	71
5.1.9.	Fotoelektrický jev.....	71
6.	ATOMOVÁ FYZIKA	74
6.1.	Modely atomů.....	74
6.2.	Jevy probíhající v elektronovém obalu atomu	75
6.3.	Atomové jádro	76
6.4.	Síly působící v jádře	76
6.5.	Hmotnostní schodek	76
6.6.	Radioaktivita.....	77
6.7.	Radioaktivní záření.....	77
6.8.	Posunovací zákony	78
6.9.	Jaderné reakce.....	78

6.10.	Elementární částice	80
-------	---------------------------	----

1. ÚVOD DO STUDIA FYZIKY

Fyzika je jedna z mnoha přírodních věd. Její název je odvozen z řeckého slova fysis, které znamená přírodu. Původně se fyzika zabývala všemi přírodními jevy. S prohlubováním poznatků se však od ní oddělovaly jiné přírodní vědy (biologie, chemie, mineralogie, geologie, astronomie, astrofyzika aj.)

Obsahem fyziky je studium nejobecnějších vlastností, stavů a změn hmotných objektů

1.1. Hmota

Základním pojmem fyziky, ale také filozofie je hmota. Hmota je vše, co nás obklopuje a existuje nezávisle na naší vůli.

Hmota se vyskytuje ve dvou formách:

- a) **látka** – o její existenci se můžeme přesvědčit svými smysly
- b) **pole** – projevuje se silovými účinky (gravitační, elektrostatické atd.)

Obě formy hmoty jsou v neustálém pohybu. Hmotné objekty existují v prostoru a čase.

1.2. Struktura látek

Látka se obvykle vyskytuje ve formě fyzikálních těles. Fyzikální těleso je ohraničená látka, u které lze určit objem.

Látky mají svou strukturu (vnitřní stavbu). Základními stavebními částicemi látek jsou atomy, molekuly a ionty. Atomy obsahují elementární částice – protony, neutrony a elektrony. Počet protonů určuje o jaký prvek jde. U elektricky neutrálního atomu se rovná počet protonů v jádře počtu elektronů v obalu. Podrobněji se budeme zabývat strukturou atomu v atomové fyzice.

Částice nevyplňují prostor tělesa spojitě. Jsou mezi nimi vždy mezery, jejichž velikost závisí na druhu a skupenství látky a také na vnějších podmínkách (tlak, teplota)

Mikročástice jsou v neustálém pohybu.

Mezi částicemi působí přitažlivé a odpuzivé síly.

Podrobněji se budeme zabývat strukturou látek v molekulové fyzice.

1.3. Fyzikální veličiny a jejich jednotky

Fyzikálními veličinami nazýváme ty vlastnosti hmotných objektů, které můžeme měřit a číselně vyjadřovat. Každá fyzikální veličina má svůj jednoznačný zápis.

Příklad: $m = 50 \cdot \text{kg}$, kde m je značka veličiny, množství vlastnosti (kvantita) je vždy vyjádřeno číslem a násobena příslušnou jednotkou, která udává typ vlastnosti (kvalitu)

Soustava SI je mezinárodní soustava jednotek používaná v oblasti vědy, techniky a obchodu. Jednotky jsou rozděleny do tří základních skupin:

- 1) **Základní jednotky** – velikost sedmi základních jednotek je dána konvenční mezinárodní dohodou:

jednotka	značka	veličina
metr	m	délka
kilogram	kg	hmotnost
sekunda	s	čas
ampér	A	elektrický proud
kelvin	K	termodynamická teplota
mol	mol	látkové množství
kandela	cd	svítivost

- 2) **Doplňkové jednotky**

jednotka	značka	veličina
radián	rad	rovinný úhel
steradián	sr	prostorový úhel

- 3) **Odvozené jednotky** jsou odvozeny ze základních a doplňkových jednotek

Dělíme je do tří skupin:

- a) **Hlavní jednotky** jsou odvozeny ze základních a doplňkových jednotek pomocí matematicko-fyzikálních vztahů.

Např. jednotka hustoty ze vztahu $\rho = \frac{m}{V}$ [kg·m⁻³]

jednotka hybnosti ze vztahu $p = m \cdot v$ [kg·m·s⁻¹]

Pro převážnou většinu odvození se dostáváme ke složitějším výpočtům:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{v}{t} \quad [\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

Název jednotky $\rightarrow [N] = [\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \leftarrow$ rozměr jednotky

Rozměr jednotky je součin mocnin základních jednotek, který dostaneme pomocí příslušných fyzikálních vztahů.

Název jednotky je používán v praxi místo složitých rozměrů.

- b) **Násobky a díly** základních, hlavních a vedlejších jednotek tvoříme pomocí soustavy předpon, abychom zjednodušili (zkrátili) zápis.

název předpony		značka	násobek
tera	T		10^{12}
giga	G		10^9
mega	M		10^6
kilo	k		10^3
mili	m		10^{-3}
mikro	μ		10^{-6}
nano	n		10^{-9}
piko	p		10^{-12}

- c) **Vedlejší jednotky** jsou takové, které podle pravidelného odvozování do soustavy SI nepatří (litr, tuna, hektar, úhlová minuta apod.). Zvláštní postavení mezi nimi mají jednotky času (minuta, hodina). Zachovalo se u nich starověké babylónské dělení v šedesátkové soustavě.

1.4. Skalární a vektorové veličiny

Fyzikální veličiny dělíme do dvou skupin:

Skalární fyzikální veličiny (skaláry) jsou takové, k jejichž jednoznačnému určení stačí znát jejich číselnou hodnotu. Patří zde hmotnost, čas, tlak, teplota, energie atd.

Vektorové fyzikální veličiny (vektory) jsou takové vlastnosti hmotných objektů, k jejichž jednoznačnému určení nestačí znát pouze jejich velikost, ale musíme zadat i jejich směr a orientaci. Mezi vektory patří síla, rychlost, zrychlení, hybnost, intenzita elektrického pole aj. V textu poznáme vektorovou veličinu podle tučně vytištěné značky nebo šipky umístěné nad její značkou: **F** nebo $\vec{F}$.

Vektory znázorňujeme graficky orientovanou úsečkou. Vektorová přímka udává směr (svislý, vodorovný apod.), šipka určuje orientaci (doleva nebo doprava) a délka úsečky velikost vektoru.

2. MECHANIKA

Mechanika pojednává o nejjednodušší formě pohybu – mechanickém pohybu neboli přemísťování těles v prostoru a čase. Podle skupenství zkoumaných těles můžeme mechaniku dělit na **mechaniku tuhého tělesa** a **mechaniku tekutin**. Z jiného hlediska můžeme mechaniku rozdělit na **kinematiku**, která se zabývá popisem pohybu bez ohledu na příčiny a na **dynamiku**, která zkoumá příčiny pohybu.

2.1. Kinematika

2.1.1. Relativnost klidu a pohybu

Pozorujeme-li tělesa kolem sebe, vidíme, že některá jsou v klidu a jiná se pohybují. Zaparkovaný automobil jsme označili za klidný proto, že se nemění jeho poloha vzhledem k okolním budovám a stromům, obecně k zemskému povrchu. Spolu se Zemí se však otáčí kolem osy a obíhá kolem Slunce. **Klid je vždy relativní**. Označíme-li některé těleso za klidné, musíme vždy uvést, vzhledem ke kterým tělesům je v klidu. Absolutní klid neexistuje. Všechna tělesa ve vesmíru jsou v neustálém pohybu.

Pohybuje-li se těleso, mění se jeho poloha vzhledem k jiným tělesům. **Pohyb je také relativní**. Chceme-li popsat pohyb tělesa, musíme zvolit soustavu těles, která jsou navzájem v klidu a vzhledem k nimž se těleso pohybuje.

Vztažná soustava je soustava těles vzhledem k nimž vztahujeme klid a pohyb tělesa.

Nejčastěji volíme za vztažnou soustavu zemský povrch.

2.1.2. Základní pojmy a veličiny potřebné pro popis pohybu

Hmotný bod je model tělesa, u kterého zanedbáváme jeho rozměry, ale jeho hmotnost je zachována.

S podobným zjednodušením se ve fyzice setkáváme často. Skutečné těleso se nahrazuje myšlenkovým modelem, u něhož uvažujeme jen ty vlastnosti, které jsou důležité pro popis daného fyzikálního děje, kdežto ostatní vlastnosti zanedbáváme.

Trajektorie je množina bodů, kterými těleso při pohybu projde.

Pro popis pohybů potřebujeme tyto fyzikální veličiny:

Dráha	- s [m]	úhel otočení	- φ [rad]
čas	- t [s]	úhlová rychlost	- ω [rad·s ⁻¹]
rychlost	- v [m·s ⁻¹]	frekvence	- f [Hz]
zrychlení	- a [m·s ⁻²]	perioda	- T [s]

Veškeré pohyby lze dělit podle dvou hledisek:

- 1) Podle trajektorie (dráhy)
 - a) přímočaré
 - b) křivočaré
- 2) Podle rychlosti
 - a) rovnoměrné (rychlost je konstantní)
 - b) nerovnoměrné (rychlost se mění)

2.1.3. Rovnoměrný přímočarý pohyb

je pohyb všech těles pohybujících se stálým směrem tak, že za stejné libovolné časové intervaly urazí vždy stejnou vzdálenost.

Rychlost je vektorová fyzikální veličina, která udává, jakou dráhu urazí těleso za jednotku času (za jednu sekundu).

$$v = \frac{s}{t} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Rychlost bývá často vyjádřena v $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Při řešení příkladů ji musíme vždy převést na jednotku $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$1 = \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}} = \frac{1}{3,6} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

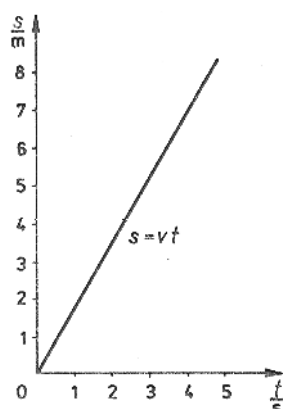
Okamžitá rychlost znamená rychlost, kterou má hmotný bod v daném časovém okamžiku na daném místě trajektorie. Má vždy směr tečny k trajektorii pohybu v daném místě.

U rovnoměrného přímočarého pohybu se okamžitá rychlost nemění.

Dráha rovnoměrného přímočarého pohybu závisí přímo úměrně na čase.

Těleso má v čase $t = 0 \text{ s}$ rychlost $v = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

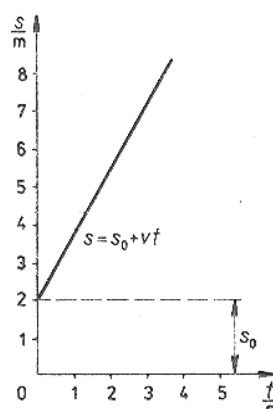
$$s = v \cdot t$$



Obrázek 1

Těleso má v čase 0 s rychlost v_0

$$s = v_0 + v \cdot t$$



Obrázek 2

2.1.4. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb

V praxi se často setkáváme s přímočarými nerovnoměrnými pohyby, tj. takovými jejichž rychlost se mění. Veličina, která charakterizuje časovou změnu rychlosti se nazývá zrychlení.

Zrychlení je vektorová fyzikální veličina, která udává, oč se změní rychlost za jednotku času.

$$a = \frac{\Delta v}{t} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

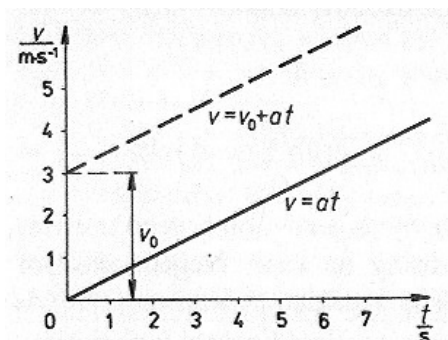
Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb (RZP) koná každé těleso, které pohybuje po přímce s konstantním zrychlením

Okamžitá rychlost RZP závisí přímo úměrně na čase a vypočteme ji ze vztahů:

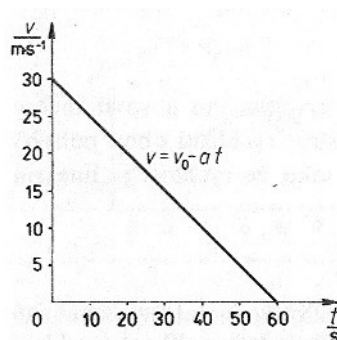
$v = a \cdot t$ v případě, že počáteční nebo konečná rychlost je nulová (Obrázek 3)

$v = v_0 + a \cdot t$ v případě, že těleso má počáteční rychlost v_0 a rovnoměrně zrychluje (Obrázek 3)

$v = v_0 - a \cdot t$ v případě, že těleso má počáteční rychlost v_0 a rovnoměrně zpomaluje (Obrázek 4)



Obrázek 3



Obrázek 4

Dráha RZP závisí na druhé mocnině času a vypočteme ji ze vztahů :

$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ v případě, že počáteční nebo konečná rychlost je nulová

$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ v případě, že se těleso pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem rychlostí v_0 a pak začne rovnoměrně zrychlovat

$s = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ v případě, že se těleso pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem rychlostí v_0 a pak začne rovnoměrně zpomalovat

PŘÍKLAD : Vlak se rozjel z nádraží a ve vzdálenosti 1 km dosáhl rychlosti 72 km.h⁻¹.

Vypočtete zrychlení vlaku a dobu, za kterou dosáhl této rychlosti.

Řešení $s = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$

$$v = 72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$a = ? \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$t = ? \text{ s}$$

Jedná se o rovnoměrně zrychlený pohyb s nulovou počáteční rychlostí.

Pozor!!! Pro výpočet času NEMŮŽEME použít vztah $s = v \cdot t$, ten platí pouze pro rovnoměrný přímočarý pohyb.

Použijeme vztah pro výpočet dráhy rovnoměrně zrychleného pohybu a vztah pro výpočet zrychlení:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

$$a = \frac{v}{t}$$

Dosadíme za zrychlení do vztahu pro výpočet dráhy a po úpravě dostaneme:

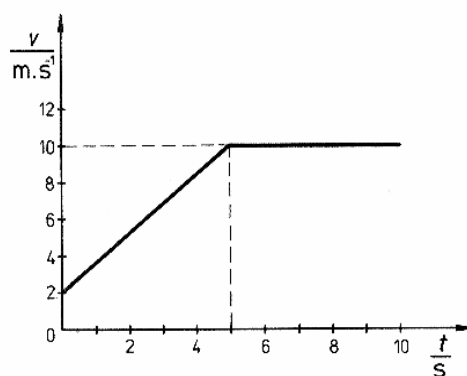
$$s = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \quad \text{odtud} \quad t = \frac{2 \cdot s}{v} \quad \text{po dosazení} \quad \{t\} = \frac{2 \cdot 1000}{20} \quad t = 100 \cdot \text{s}$$

$$\text{dosadíme vypočtený čas do vztahu pro výpočet zrychlení} \quad a = \frac{20}{100} \quad a = 0,2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Vlak dosáhl této rychlosti za 100 s a pohyboval se se zrychlením 0,2·m·s⁻²

PŘÍKLAD: Na obrázku 5 je graf závislosti velikosti rychlosti automobilu na čase. Určete:

- počáteční rychlost automobilu
- zrychlení automobilu v prvních 5 sekundách
- dráhu, kterou ujede auto za prvních 5s pohybu
- dráhu, kterou automobil urazí za prvních 10 s



Obrázek 5

Řešení:

- a) Počáteční rychlost je rychlost v čase
- $t = 0$
- s,

tedy $v_0 = 2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

- b) Zrychlení udává, o č se změnil rychlost za jednotku času
- $v_0 = 2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

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

$$\Delta v = v - v_0 \quad a = \frac{\Delta v}{t} \quad \text{dosadíme} \quad a = \frac{8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{5 \text{ s}} = 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\Delta v = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Zrychlení automobilu v prvních 5 sekundách je $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

- c)
- $t = 5$
- s

$$a = 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad s_1 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad \text{dosadíme} \quad s_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot (5 \cdot \text{s})^2 = 20 \text{ s}$$

$$s_1 = ? \text{ m}$$

Za prvních 5 s ujede automobil dráhu 20 m.

- d)
- $v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- ,
- $s_1 = 20 \text{ m}$
- ,
- $t = 5$
- s

$$s = s_1 + s_2$$

Dráha, kterou auto ujelo v prvních 5 s je $s_1 = 20 \text{ m}$. Druhých 5 s se pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem a dráhu vypočteme $s_2 = v \cdot t$ tedy $s_2 = 50 \text{ m}$.

Celková dráha je 70 m.

2.1.5. Volný pád

Volný pád je zvláštní případ rovnoměrně zrychleného pohybu s nulovou počáteční rychlostí.

Konají jej všechna tělesa volně upuštěná v okolí Země.

Okamžitou rychlost volného pádu vypočteme ze vztahu $v = g \cdot t$

Konstanta **g** se nazývá **tíhové zrychlení a** v našich zeměpisných šířkách má hodnotu $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. V příkladech obvykle počítáme se zaokrouhlenou hodnotou $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Výšku volného pádu vypočteme ze vztahu: $h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$

PŘÍKLAD: Kámen padá volným pádem do propasti hluboké 80 m. Jak dlouho bude padat a jakou rychlostí dopadne?

Řešení : $h = 80 \text{ m}$

$$g = 10 \text{ m.s}^{-2}$$

$$= ? \text{ s}$$

$$= ? \text{ m.s}^{-1}$$

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad \text{odtud} \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{dosadíme} \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 80 \text{ m}}{10 \text{ m.s}^{-2}}} \quad t = 4 \text{ s}$$

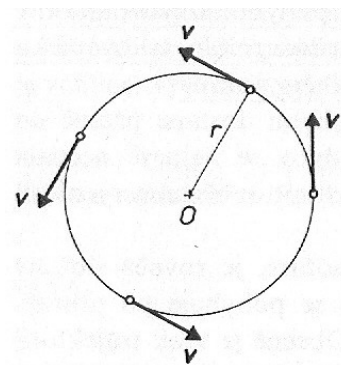
$$v = g \cdot t \quad \text{po dosazení číselných hodnot} \quad v = 40 \text{ m.s}^{-1}$$

Kámen bude padat 4 s a dopadne rychlostí 40 m.s^{-1} .

2.1.6. Rovnoměrný pohyb po kružnici

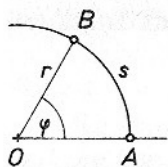
je nejjednodušším křivočarým pohybem. Trajektorie je kružnice, velikost rychlosti je konstantní. Směr rychlosti se neustále mění - rychlost má v každém bodě trajektorie směr tečny ke kružnici, po které se bod pohybuje (Obrázek 6)

Rovnoměrný pohyb po kružnici je periodický pohyb. Doba, za kterou hmotný bod opíše celou kružnici se nazývá **perioda** T [s]. Počet oběhů za jednotku času (za sekundu) se nazývá **frekvence** f [Hz].



Obrázek 6

Mezi frekvencí a periodou platí vztah: $f = \frac{1}{T}$



Obrázek 7

Spojnice středu kružnice s pohybujícím se bodem OA se nazývá **průvodič** hmotného bodu. Délka průvodiče je rovna poloměru kružnice r (Obrázek 7)

Za dobu t se hmotný bod přesune rovnoměrným pohybem z bodu A do bodu B a urazí dráhu s , která se rovná délce kruhového oblouku AB. Za tutéž dobu t opíše průvodič středový úhel φ .

Popis pohybu pomocí dráhy s [m]

Obvodová rychlost v udává jakou dráhu urazí hmotný bod po obvodu kružnice za jednotku času.

$$v = \frac{s}{t} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Za jednu periodu opíše hmotný bod celou kružnici a urazí dráhu $s = 2 \cdot \pi \cdot r$

Po dosazení $s = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$

Popis pohybu pomocí úhlu otočení φ [rad]

Úhlová rychlost ω udává o jaký úhel se otočí průvodič hmotného bodu za jednotku času.

$$\omega = \frac{\varphi}{t} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Za jednu periodu opíše průvodič hmotného bodu plný úhel $\varphi = 2 \cdot \pi$

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

Z výše uvedených vztahů vyplývá že mezi obvodovou a úhlovou rychlostí platí :

$$v = r \cdot \omega$$

Pomocí frekvence vyjádříme obvodovou rychlost: $v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f$

Pomocí frekvence vyjádříme úhlovou rychlost: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

PŘÍKLAD : Porovnejte úhlovou rychlost hodinové ručičky a naší Země kolem její osy.

Řešení : Pro výpočet úhlové rychlosti platí vztah $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$

Hodinová ručička oběhne ciferník za 12 hodin, tedy $T_1 = 43\,200 \text{ s}$ $\omega_1 = 0,000\,145 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Země se otočí kolem své osy za 24 hodin, tedy $T_2 = 86\,400 \text{ s}$ $\omega_2 = 0,000\,073 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Perioda hodinové ručičky je dvakrát menší a z výše uvedeného vztahu vyplývá, že úhlová rychlost ručičky bude dvakrát větší než úhlová rychlost, kterou se otáčí Země kolem osy.

2.1.7. Příklady – Kinematika

1) Traktor jel 20 min rychlostí $3,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 25 min rychlostí $5,15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 120 min rychlostí $6,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a 10 min rychlostí $9,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Vypočtěte průměrnou rychlost traktoru.
[6,34 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]

2) Nákladní automobil o délce 6 m jede rychlostí $66 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a předjíždí jej motocykl jedoucí rychlostí $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jak velkou dráhu urazí motocykl při předjíždění, jestliže předjíždění začíná 16 m za automobilem a končí 18 m před ním?
[480 m]

- 3) Letadlo poprašující rostlinné porosty uletí po větru dráhu 1 km za 10 s a proti větru za 12 s. Určete rychlost letadla v klidném vzduchu a rychlost větru.
[91,6 m·s⁻¹ ; 8,4 m·s⁻¹]
- 4) Jakou rychlostí dopadl na zem výsadkář, jestliže s otevřeným padákem klesal rovnoměrným pohybem rychlostí 5 m·s⁻¹ a rychlost větru v horizontálním směru vzhledem k zemi byla 8 m·s⁻¹?
[9,4 m·s⁻¹]
- 5) Cyklista, jehož počáteční rychlost $v_0 = 8 \text{ m·s}^{-1}$, urazí rovnoměrně zrychleným pohybem za dobu 10 s dráhu 120 m. Jaké je jeho zrychlení ?
[0,8 m·s⁻¹]
- 6) Trolejbus zmírní rovnoměrným bržděním rychlost z 48 km·h⁻¹ na 12 km·h⁻¹ za dobu 5 s. Jak velkou dráhu při brždění urazil?
[42 m]
- 7) Při havarijním brždění dosáhne automobil záporného zrychlení $a = -5,15 \text{ m·s}^{-2}$.
a) Za jak dlouho zastaví řidič jedoucí rychlostí 120 km·h⁻¹?
b) Jak velkou dráhu při brždění ujede řidič, jehož reakční doba je 0,72 s ?
[6,47 s ; 131 m]
- 8) Reaktivní letadlo při přistávání dosahuje záporného zrychlení až -8 m·s^{-2} . Určete maximální přistávací rychlost, je-li dojezdová dráha 1 800 m dlouhá. Jak dlouhou dobu trvá přistání ?
[169 m·s⁻¹ ; 21 s]
- 9) Jakou rychlostí dopadne olověný brok vystřelený vzduchovkou do výšky 220 m ?
[66,3 m·s⁻¹]
- 10) Jak vysoko musíme zvednout parního kladivo bucharu, aby při volném pádu získalo konečnou rychlost 5,5 m·s⁻¹? Kolik úderů vykoná buchar za 1 minutu, jestliže zvedání kladiva trvá třikrát déle než jeho pád ?
[1,51 m ; 27]
- 11) Letadlo letí rychlostí 540 km·h⁻¹. Vrtule při jedné otáčce vykoná posuvný pohyb po dráze 4,8 m. Vypočtete úhlovou rychlost vrtule.
[196 rad·s⁻¹]

12) Centrifuga pro výcvik kosmonautů dosáhla frekvence otáčení 0,6 Hz. Poloměr otáčení je 7 m. Jaké přetížení bylo dosaženo ?

[10 g]

2.2. Dynamika

Dynamika je součást mechaniky, která se zabývá příčinami pohybu. Příčinou všech pohybů je vzájemné působení mezi tělesy nebo jejich částmi. Číselně vyjadřuje velikost působení fyzikální vektorová veličina síla $\mathbf{F}$ [N].

Tělesa na sebe mohou působit přímo (dotykem) nebo nepřímo (prostřednictvím fyzikálního pole).

Síla může mít na těleso dva účinky:

- 1) dynamický (pohybový)
- 2) statický (deformační)

Při silovém působení se projevují oba dva účinky, ale jeden převládá.

2.2.1. Setrvačnost

je vlastnost těles zachovat si svůj pohybový stav (klid nebo rychlost). Číselně ji popisujeme pomocí fyzikální veličiny hybnost. Hybnost charakterizuje pohybový stav tělesa a je dána součinem hmotnosti a rychlosti tělesa.

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

2.2.2. Newtonovy pohybové zákony

Dynamické účinky síly podrobně studovali přírodovědci již v 17. století. Provedli řadu pozorování a pokusů a dospěli tak k objevení zákonů objasňujících mechanické pohyby těles. Výsledky tehdejšího zkoumání shrnul anglický učenec Isaac Newton do tří základních zákonů.

I) Newtonův zákon – zákon setrvačnosti:

Hybnost tělesa se nemění, pokud na něj nepůsobí jiné těleso silou. $\Delta p = 0$

II) Newtonův zákon – zákon síly:

Velikost zrychlení, které uděluje síla $\mathbf{F}$ tělesu o hmotnosti m , je přímo úměrná velikosti $\mathbf{F}$ této síly (při téže hmotnosti tělesa) a nepřímo úměrná hmotnosti m tělesa (při téže působící síle).

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

Ze zákona síly můžeme vyjádřit velikost síly $F = m \cdot a$ a definovat jednotku síly:

Newton je síla, která uděluje tělesu o hmotnosti 1 kg zrychlení $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Druhý pohybový zákon je jeden z nejdůležitějších zákonů mechaniky, vysvětluje podstatu všech změn pohybového stavu těles a má v praxi řadu **důsledků**:

- 1) Kolikrát větší silou působíme, tolikrát se zvětší zrychlení, což se projeví tolikrát větší změnou hybnosti.
- 2) Kolikrát větší je hmotnost tělesa, které uvádíme touto silou do pohybu, tolikrát menší je jeho zrychlení, což má za následek tolikrát menší změnu hybnosti. Hmotnost tělesa je mírou setrvačnosti tělesa a nazýváme ji setrvačná hmotnost.
- 3) Je-li $\mathbf{F} = 0$, pak $\mathbf{a} = 0$. Nepůsobí-li na těleso žádná síla nebo je-li výslednice sil, kterými na ně působí ostatní tělesa nulová, koná těleso rovnoměrný přímočarý pohyb.
- 4) Je-li $\mathbf{F} = \text{konst.}$, pak $\mathbf{a} = \text{konst.}$ Je-li výslednice sil, kterými na těleso působí jiná tělesa, stálá, koná těleso rovnoměrně zrychlený pohyb.

III) Newtonův zákon – zákon akce a reakce

Každá akce vyvolá stejně velkou reakci opačného směru. $|\mathbf{F}_1| = |-\mathbf{F}_2|$

Protože akce a reakce jsou síly, které působí na dvě různá tělesa, ve svých účincích na tělesa se neruší. Protože současně vznikají a současně zanikají, není rozhodující, kterou z nich nazveme akce a kterou reakce, ale většinou označujeme za akci sílu, která je příčinou vzniku reakce. Např.: usednu-li na židli, působím na ni silou (akce) a stejně velkou silou opačného směru působí židle na mne (reakce).

2.2.3. Zákon zachování hybnosti

Jsou-li dvě tělesa uvedena z klidu do pohybu jen vzájemným silovým působením (akcí a reakcí), zůstává součet jejich hybností nulový.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$$

Působí-li na sebe dvě tělesa jen akcí a reakcí, součet jejich hybností se nemění.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = \text{konst.}$$

V praxi pomocí zákona zachování hybnosti a akce a reakce vysvětlujeme činnost různých zařízení, která mají význam v dopravě (raketové motory), v energetice (reaktivní turbíny) ve vojenské technice (zpětný náraz při výstřelu).

PŘÍKLAD : Střela o hmotnosti 20 g proletěla hlavní pušky o hmotnosti 4 kg za 0,01 s, čímž získala rychlost $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak velká je rychlost pušky při zpětném nárazu? Jak velká síla na střelu působila?

Řešení: $m_1 = 20 \text{ g} = 0,02 \text{ kg}$

$$m_2 = 4 \text{ kg}$$

$$v_1 = 400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$t = 0,01 \text{ s}$$

$$v_2 = ? \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0 \quad \text{odtud } v_2 = -\frac{m_1 v_1}{m_2} \quad v_2 = \frac{0,02 \text{ kg} \cdot 400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{4 \text{ kg}} = -2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$F = m \cdot a \quad F = m \cdot \frac{v_1}{t} \quad F = 0,02 \text{ kg} \cdot \frac{400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,01 \text{ s}} = 800 \text{ N}$$

Rychlost pušky při zpětném rázu je $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (znaménko- má význam opačného směru k původní rychlosti). Na střelu působila síla 800 N.

2.2.4. Inerciální a neinerciální vztažné soustavy

Vztažné soustavy, vzhledem k nimž popisujeme pohyb dělíme do dvou skupin:

- 1) **Inerciální soustavy**, jsou soustavy, které jsou v klidu nebo rovnoměrně přímočarém pohybu. Ve všech takových soustavách vypadají fyzikální děje stejně a platí v nich Newtonovy zákony a zákony klasické mechaniky v nezměněném tvaru.
- 2) **Neinerciální vztažné soustavy** jsou soustavy, které se pohybují vzhledem k inerciálním vztažným soustavám zrychleně, zpomaleně nebo křivočáře. Zrychlení tělesa v neinerciální vztažné soustavě (cestující v brzdícím autobuse) není vyvoláno žádným silovým působením jiného tělesa (neplatí pro něj druhý Newtonův zákon), ale přisuzujeme ho zdánlivé tzv. setrvačné síle. Velikost setrvačné síly vypočteme jako součin hmotnosti tělesa a zrychlení soustavy. Setrvačná síla má opačný směr než zrychlení soustavy.

$$F_s = -m \cdot a$$

PŘÍKLAD: Jak velkou silou působí tělo kosmonauta o hmotnosti 80 kg na sedadlo v kabině kosmické lodi, která vystupuje vzhůru se zrychlením $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$?

Řešení: Kosmonaut působí na sedadlo silou, která se rovná součtu tíhy kosmonauta a setrvačné síly.

$$m = 80 \text{ kg}$$

$$g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$a = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$F = ? \text{ N}$$

$$F = G \cdot F_s \quad F = m \cdot g + m \cdot a \quad F = 80 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} + 80 \text{ kg} \cdot 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 4800 \text{ N}$$

Tělo kosmonauta působí na sedadlo silou 4800 N.

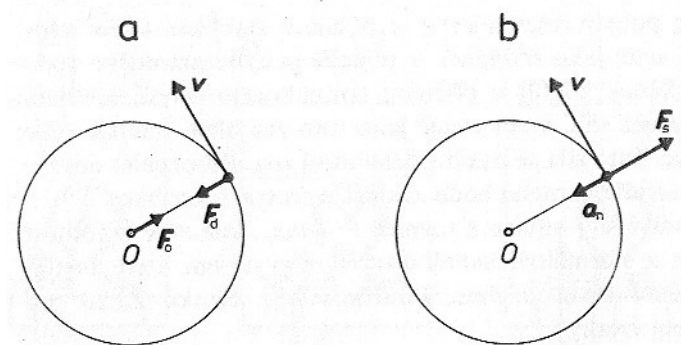
2.2.5. Dostředivá a odstředivá síla

Podle druhého pohybového zákona je příčinou zrychlení vždy síla, tělesa která má stejný směr jako zrychlení. V případě pohybu hmotného bodu po kružnici je příčinou normálového zrychlení síla, která stejně jako toto zrychlení směřuje stále do středu kružnice. Nazývá se dostředivá síla. Působením dostředivé síly se trajektorie hmotného bodu zakřivuje do tvaru kružnice. Velikost dostředivé síly je dána vztahem:

$$F = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad \text{nebo} \quad F = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

Sledujme kuličku připevněnou na pevném vlákně a konající rovnoměrný pohyb po kružnici.

Vzhledem k inerciální soustavě popíšeme pohyb takto: pevný bod 0 působí na kuličku prostřednictvím vlákna dostředivou silou F_d . Podle třetího pohybového zákona kulička současně působí na pevný bod 0 opět prostřednictvím napjatého vlákna stejně velkou odstředivou silou F_o opačného směru (Obrázek 9a). Pro velikost odstředivé síly platí stejné vztahy jako pro velikost síly dostředivé.



Obrázek 8

Vzhledem k neinerciální vztažné soustavě popíšeme pohyb následovně: Kulička je vzhledem k vztažné soustavě, která se otáčí kolem bodu 0 stejnou úhlovou rychlostí jako průvodič kuličky, v klidu. Celá soustava se pohybuje vzhledem k povrchu Země s dostředivým zrychlením $\mathbf{a}_n$. Na kuličku působí setrvačná síla $\mathbf{F}_s$ opačného směru, než je zrychlení soustavy (Obrázek 9b).

PŘÍKLAD: Jakou maximální rychlostí může vjet auto o hmotnosti 1 t do zatáčky o poloměru 50 m? Součinitel smykového tření mezi vozovkou a pneumatikami $\mu = 0,2$.

Řešení: Povrch vozovky působí na pneumatiky dostředivou silou, která je vyvolána vznikem třecí síly mezi vozovkou a pneumatikami. Pokud zanikne dostředivá síla (vlivem kluzkého povrchu), zanikne síla odstředivá, kterou působí pneumatiky na povrch vozovky a auto se bude pohybovat ve směru původní rychlosti bez ohledu na zakřivení zatáčky (smyk).

$$g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$F_t \geq F_0$$

$$m = 1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$$

$$\mu \cdot m \cdot g \geq m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$r = 50 \text{ m}$$

$$\mu \cdot g \cdot r \geq v^2$$

$$\mu = 0,2$$

$$v \leq \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$$

$$v = ? \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Po dosazení číselných hodnot

$$v \leq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Auto může vjet do zatáčky maximální rychlostí $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.2.6. Odporové síly

Odporové síly, jsou síly, které působí proti pohybu těles, čímž jejich pohyb brzdí.

- 1) **Smykové tření** vzniká tehdy, posouváme-li těleso po povrchu jiného tělesa. Příčinou vzniku třecí síly jsou nerovnosti na stykových plochách obou těles, které do sebe zapadají a obrušují se. Třecí síla se může projevit i u velmi hladkých stykových ploch, protože částice povrchových vrstev obou těles se k sobě přiblíží tak, že na sebe působí přitažlivými silami.

Velikost třecí síly závisí na a) drsnosti styčných ploch (součinitel smykového tření μ)

b) na přitlačné síle $\mathbf{F}_n$

$$F_t = \mu \cdot F_n$$

Pokud posouváme těleso po vodorovné podložce rovná se

přítlačná síla

$$\text{tíhové síle } F_G = m \cdot g$$

- 2) **Valivý odpor** vzniká vždy, když se pevné těleso kruhového průřezu valí (kutálí) po pevné podložce. Působením přitlačné síly mezi tělesem a podložkou se deformuje těleso i podložka. Deformace podložky vyvolává sílu F_v , působící na těleso proti směru jeho pohybu.

Velikost odporové síly F_v závisí na a) materiálech, z nichž je těleso a podložka (valivého

odporu ξ)

b) na velikosti přitlačné síly

c) na poloměru tělesa

$$F_v = \xi \cdot \frac{Fn}{r}$$

2.2.7. Příklady – Dynamika

- 1) Automobil o hmotnosti 1 tuna se rozjíždí z klidu a nabude za 40 s rychlosti $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
 - a) Jak velkou sílu vyvíjel motor automobilu ?
 - b) Jakou vzdálenost při tom urazil ? Odporové síly zanedbejte.

[500 N; 400 m]
- 2) Jaká je hmotnost rakety, která osáhne při tažné síle motoru 320 kN za 2,5 min od startu rychlosti $6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$?
[8 tun]
- 3) Výsadkář padá se zavřeným padákem rychlostí $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při otevření padáku se jeho rychlost rovnoměrně snížila za 2 s na $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hmotnost výsadkáře je 70 kg. Určete největší tahovou sílu působící na lana padáku.
[1 930 N]
- 4) Letadlu startujícímu z mateřské letadlové lodi je katapultovacím zařízením udělena rychlost $180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jak velká stálá síla působí během startu na letadlo, je-li hmotnost letadla 15 tun a délka rozjezdové dráhy 25 m ?
[750 kN]
- 5) Jak velkou silou působí lokomotiva na vlak o hmotnosti 400 tun, který jede po vodorovné rovině, jestliže se jeho rychlost zvětšila za dobu 2 min z $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ na $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$? odporové síly zanedbejte.
[50 kN]

- 6) Chlapec vyskočil z loďky na břeh jezera a loďka za 4 s odplavala 3 m od břehu.
Hmotnost loďky je 200 kg a hmotnost chlapce je 50 kg.
- Jak velká byla rychlost chlapce při výskoku ?
 - Do jaké vzdálenosti od břehu by za 4 s loďka odplavala, kdyby byla zatížena nákladem o hmotnosti 200 kg ?
- [3 m·s⁻¹; 1,5 m]
- 7) Těžní klec o hmotnosti 2 tuny má při pohybu směrem vzhůru dosáhnout z klidu za dobu 5 s rychlosti 8 m·s⁻¹. Jaké je zatížení lana ?
- [23,2 kN]
- 8) Při akrobatickém leteckém cvičení opisuje letadlo při rychlosti 360 km·h⁻¹ trajektorii tvaru kružnice o poloměru 400 m ve svislé rovině. Jak velkou tlakovou silou působí letec o hmotnosti 80 kg na sedadlo v nejnižším a nejvyšším bodě trajektorie ?
- [1 200 N; 2 800 N]
- 9) Jak velkého odstředivého zrychlení se dosahuje u ultracentrifugy při frekvenci otáčení 500 Hz a průměru rotoru 12 mm?
- [59 200 m·s⁻²]
- 10) Bednu o hmotnosti 40 kg udržujeme na vodorovné rovině v rovnoměrném přímočarém pohybu silou, která se rovná $\frac{1}{5}$ tíhy bedny.
- Určete součinitel smykového tření,
 - velikost třecí síly, postaví-li se na bednu chlapec o hmotnosti 50 kg.
- [0,2; 180 N]
- 11) Jakou hmotnost má kmen stromu, který je vlečen traktorem rovnoměrným pohybem po vodorovné zemi silou 4 200 N? Součinitel smykového tření je 0,6.
- [700 kg]

3. MOLEKULOVÁ FYZIKA A TERMIKA

3.1. Základní pojmy a zákonitosti molekulové fyziky a termiky

3.1.1. Kinetická teorie látek

Molekulová fyzika je součástí fyziky, která se zabývá zkoumáním látek z hlediska jejich vnitřní struktury, tedy postavením a pohybem mikročástic v látkách.

Základem molekulové fyziky je **kinetická teorie látek**, která vznikla koncem 19.století a je založena na třech experimentálně ověřených poznatcích:

- 1) Látka kteréhokoliv skupenství se skládá z částic (atomy, molekuly, ionty).
- 2) Částice se v látkách neustále neuspořádaně pohybují, když látka jako celek je v klidu.
- 3) Částice na sebe navzájem působí přitažlivými a odpuzivými silami.

O nepřetržitém neuspořádaném pohybu mikročástic svědčí nepřímo mnohé jevy pozorované především u tekutin. Patří zde Brownův pohyb, difúze a osmóza.

Brownovým pohybem nazýváme pohyb částic v tekutině. Objevil jej anglický botanik R. Brown pozorováním pylových zrn rozptýlených ve vodě. Vysvětlujeme jej jako důsledek četných nárazů molekul tekutiny na sledovanou částici.

Difúze je samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice jiné látky. **Osmóza** je důležitá pro výživu organismů. Jedná se o pronikání částic tekutiny přes polopropustnou blánu.

3.1.2. Termodynamická soustava

Pojmem termodynamická soustava označujeme těleso nebo skupinu těles, kterou zkoumáme z hlediska její mikrostruktury.

Okamžitý stav každé soustavy charakterizujeme **stavovým veličinami**. Patří zde tlak p [Pa], objem V [m³], termodynamická teplota T [K], hmotnost m [kg], látkové množství n [mol].

Každá změna uvnitř soustavy je charakterizována změnou alespoň jedné stavové veličiny. Pokud se stavové veličiny nemění, neprobíhají změny skupenství ani chemické reakce, říkáme, že je soustava v **rovnovážném stavu**.

V termodynamice obvykle pracujeme s **izolovanými soustavami**, jejich hranice jsou buď skutečné nebo myšlené a nepřenáší se přes ně žádná energie.

3.1.3. Vnitřní energie soustavy. I. termodynamický zákon

Všechny mikročástice v termodynamické soustavě konají pohyb, mají tedy kinetickou energii a vzhledem k tomu, že současně zaujímají jistou polohu, mají energii potenciální.

Vnitřní energii soustavy U [J] rozumíme součet celkové kinetické energie neuspořádaně se pohybujících částic soustavy a celkové potenciální energie vzájemné polohy těchto částic.

$$U = E_k + E_p$$

Je-li termodynamická soustava izolovaná, vnitřní energie je konstantní.

Vnitřní energii můžeme **měnit dvěma způsoby**:

- 1) tepelnou výměnou
- 2) konáním mechanické práce

Na základě těchto poznatků byl zformulován první termodynamický zákon, který je zákonem zachování energie pro tepelné jevy. Vyjadřuje nemožnost sestavit perpetuum mobile prvního druhu, tj. zařízení, které by vykonávalo práci bez změny své energie nebo energie okolí.

1.TDZ: Změna vnitřní energie je dána součtem mechanické práce konané mezi soustavou a okolím a tepla, které přejde mezi soustavou a okolím.

$$\Delta U = W + Q$$

Pokud soustava přijme teplo od okolí, považujeme je za kladné	$Q >$
soustava odevzdá teplo	$Q < 0$
konají práci okolní tělesa působící silou na soustavu	$W > 0$
koná práci soustava (odevzdává energii okolí)	$W < 0$

PŘÍKLAD: Plyn uzavřený v nádobě s pohyblivým pístem přijme teplo 1,2 MJ a současně vykoná práci 900 kJ. Jak se změní vnitřní energie plynu?

Řešení:

Soustava přijme teplo	$Q = 1,2 \text{ MJ} = 1200 \text{ kJ}$
a zároveň koná práci:	$W = - 900 \text{ kJ}$
Změna vnitřní energie	$\Delta U = ? \text{ kJ}$

Podle 1. termodynamického zákona platí:

$$\Delta U = W + Q$$

Dosadíme číselné hodnoty:

$$\Delta U = -900 \text{ kJ} + 1200 \text{ kJ} = 300 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = 300 \text{ kJ}$$

Vnitřní energie plynu vzroste o 300 kJ.

3.1.4. Teplota a teplo

Teplota je stavová veličina, která charakterizuje okamžitý stav termodynamické soustavy.

Souvisí s pohybem mikročástic. Její hodnota se mění po proběhnutí energetické změny.

V praxi je u nás nejužívanější teplotní stupnicí **Celsiova teplotní stupnice**. Celsiovu teplotu značíme **t** a jednotkou je **°C**. Celsiova teplotní stupnice má dvě základní teploty: teplotu 0° C, tzv.bod mrazu, přiřazujeme rovnovážnému stavu vody a ledu a teplotu 100° C, tzv.bod varu, při kterém je v rovnovážném stavu voda a její sytá pára.

Při konstrukci Celsiovy teplotní stupnice, například u teploměrů s různou kapalinou se zjistilo, že stupnice jsou závislé na použité kapalině a na látce, ze které je baňka teploměru. Z této experimentálně zjištěné skutečnosti vyplynula nutnost zavést teplotní stupnici nezávislou na vlastnostech teplotoměrné látky. Tento požadavek splňuje tzv.

termodynamická teplotní stupnice sestavená na základě poznatků o účinnosti tepelných strojů.

Termodynamickou teplotu značíme **T** a její jednotkou je **kelvin K**. Termodynamická teplotní stupnice má jen jednu základní teplotu **T_r**, kterou přiřazujeme rovnovážnému stavu soustavy voda + led + sytá vodní pára. Tento rovnovážný stav se nazývá trojný bod vody a byla mu dohodou přiřazena teplota $T_r = 273,16 \text{ K}$.

Zatímco Celsiova teplota má i záporné hodnoty, což je také považováno za nevýhodné, nejmenší teplotou termodynamické teplotní stupnice je teplota 0 K, tzv. **absolutní nula**. Je to nejnižší dosažitelná teplota, při které by teoreticky nastala „tepelná smrt vesmíru“. Pro převod jednotek mezi oběma stupnicemi platí následující vztahy:

$$t = (\{T\} - 273,15) \text{ °C}$$

$$T = (\{t\} + 273,15) \text{ K}$$

kde {t} je číselná hodnota Celsiovy teploty a {T} je číselná hodnota termodynamické teploty

Teplo je fyzikální veličina, která souvisí s energetickými změnami v materiálu. Teplo je projev energie a na rozdíl od teploty necharakterizuje stav, ale průběh fyzikálního děje.

3.1.5. Měrná tepelná kapacita

K zahřátí stejného množství různých látek o stejný teplotní rozdíl je třeba dodat různé množství tepla. Je to způsobeno jednak různými typy stavebních částic, jednak různými typy vazebních sil mezi částicemi. Z tohoto důvodu zavádíme pojem měrná tepelná kapacita.

Měrná tepelná kapacita c je fyzikální veličina, která udává množství tepla, které musíme dodat jednomu kilogramu látky, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Měrná tepelná kapacita je materiálová konstanta, která má pro různé látky různou hodnotu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulkách. Malou měrnou kapacitu mají kovy a tato vlastnost usnadňuje jejich tepelné zpracování. Z běžně známých látek má největší měrnou tepelnou kapacitu voda: $c = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, proto se užívá jako chladicí kapalina např. u spalovacích motorů a rovněž je vhodná k přenosu vnitřní energie např. v ústředním topení, jaderných elektrárnách.

Tepelná kapacita C udává, jaké teplo musí těleso nebo soustava přijmout, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

PŘÍKLAD: Dělník zatluče do svislé stěny hřebík o hmotnosti 50 g a udeří 20krát kladivem o hmotnosti 0,5 kg. Konečná rychlost kladiva je $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak se zvýší teplota hřebíku za předpokladu, že se při této práci zvýší jeho vnitřní energie o 60 % dodané energie ?

Řešení:

$$m_1 = 50 \text{ g} = 0,05 \text{ kg}$$

$$m_2 = 0,5 \text{ kg}$$

$$v = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$c = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\Delta U = Q = 20 \cdot 0,6 E_k$$

$$\Delta T = ? [\text{K}]$$

Část kinetické energie kladiva (60 %) se po dvaceti úderech přemění ve vnitřní energii hřebíku (teplo).

$$20 \cdot 0,6 \cdot E_k = Q$$

$$20 \cdot 0,6 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v^2 = m_1 \cdot c \cdot \Delta T$$

Po úpravě dostaneme:

$$6 \cdot m_2 \cdot v^2 = m_1 \cdot c \cdot \Delta T$$

Odtud vyjádříme ΔT :

$$\Delta T = \frac{6 \cdot m_2 \cdot v^2}{m_1 \cdot c}$$

Dosadíme číselné hodnoty:

$$\Delta T = \frac{6 \cdot 0,5 \cdot 12^2}{0,005 \cdot 460}$$

Vypočteme hodnotu

$$\Delta T = 18,8 \text{ K.}$$

Teplota hřebíku vzroste asi o 18,8 K.

3.1.6. Přenos tepla

Přenos tepla (přenos vnitřní energie) je termín, kterým označujeme předávání tepelné energie mezi dvěma tělesy. Existují tři způsoby přenosu:

- a) **vedením**
- b) **prouděním**
- c) **zářením (sáláním)**

Vedením se teplo přenáší u pevných látek, kde existují mezi částicemi silné vazby, které nedovolují jejich velký pohyb. Těleso, v němž dochází k přenosu vnitřní energie, je přitom obvykle v klidu. Přenos se uskutečňuje vzájemnými srážkami mezi bezprostředně sousedícími částicemi. Teplo se přenáší z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě. Schopnost látky přenášet teplo vedením se nazývá **tepelná vodivost**. Ze všech látek mají nejlepší tepelnou vodivost kovy. Dobrá tepelná vodivost souvisí s dobrou elektrickou vodivostí, protože je rovněž zprostředkována volnými elektrony. Látky, které vedou špatně teplo se nazývají **tepelné izolanty**. Patří zde voda, plyny, sypké a pórovité látky (peří, textilie, písek, skelná vata). Tepelné izolanty mají velký význam ve stavebnictví v souvislosti s úsporami tepelné energie

Prouděním se přenáší teplo u tekutin, jejichž mikročástice se mohou v látce vzájemně přemísťovat, což je způsobeno existencí malých vazebních sil mezi částicemi. Podstata přirozeného proudění spočívá v tom, že zahříváme-li v tíhovém poli kapalinu nebo plyn, studenější tekutina, která má větší hustotu, klesá dolů a vytlačuje teplejší vrstvy tekutiny vzhůru. Proudící tekutina přitom přenáší energii z teplejších míst do míst studenějších. Pro rychlejší ohřátí nebo ochlazení látky se v technice často používá **nucené proudění**, které je vyvoláno vnějšími silami. Příkladem je ventilátor, etážové topení atd.

Záření (sálání) se podstatně liší od předchozích dvou způsobů, tím že mezi teplejším a studenějším tělesem nemusí být látkové prostředí. Tepelná výměna mezi dvěma tělesy se uskutečňuje vyzařováním a pohlcováním elektromagnetického záření. Tímto způsobem přijímají Země, ostatní planety a družice energii ze Slunce.

3.1.7. Kalorimetrická rovnice

Pokud do tepelně izolované nádoby s kapalinou o teplotě T_2 vložíme těleso, jehož teplota je T_1 je větší než teplota kapaliny, probíhá mezi oběma tělesy tepelná výměna až do okamžiku, kdy se vytvoří rovnovážný stav, tzn. že teploty tělesa a kapaliny se vyrovnají na výslednou teplotu T , přičemž $T_2 < T < T_1$.

Tento jev popíšeme z hlediska zákona zachování energie následovně:

Při tepelné výměně odevzdá teplejší těleso kapalině teplo Q_1 , jehož velikost závisí na materiálu, ze kterého je (měrné tepelné kapacity), na jeho hmotnosti a teplotním rozdílu (o kolik se těleso ochladilo) $Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot (T_1 - T)$

Kapalina přijme teplo Q_2 , které závisí na její měrné tepelné kapacitě, na její hmotnosti a na tom, o kolik °C se ohřála, čili $Q_2 = c_2 \cdot m_2 \cdot (T - T_2)$

Ze zákona zachování energie vyplývá pro izolovanou soustavu, že úbytek vnitřní energie tělesa $\Delta U_1 = Q_1$ se rovná přírůstku vnitřní energie kapaliny $\Delta U_2 = Q_2$. Celková energie tělesa a kapaliny se přitom nemění.

Platí tedy:

$$Q_1 = Q_2$$

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

Výše uvedený vztah se nazývá kalorimetrická rovnice. Obsahuje 7 veličin, nichž můžeme kteroukoliv vypočítat, pokud jsou ostatní zadány (změřeny).

Při velmi přesných měřeních musíme zohlednit tu skutečnost, že teplo nepřijímá od teplejšího tělesa pouze kapalina, ale také nádoba s příslušenstvím (kalorimetr). Po vytvoření rovnovážného stavu platí pak kalorimetrická rovnice ve tvaru:

$$c_1 \cdot m_1 \cdot (T_1 - T) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T - T_2) + C \cdot (T - T_2)$$

kde C je tepelná kapacita kalorimetru

PŘÍKLAD: V kalorimetru o tepelné kapacitě $63 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ je olej o hmotnosti $0,25 \text{ kg}$ a teplotě 12°C . Do oleje ponoříme měděný předmět o hmotnosti $0,5 \text{ kg}$ a teplotě 100°C .

Výsledná teplota soustavy po dosažení teplotní rovnováhy je 33°C . Určete měrnou tepelnou kapacitu oleje.

Řešení: $C = 63 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$$c_1 = 383 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$m_1 = 0,5 \text{ kg}$$

$$t_1 = 100^\circ \text{C}$$

$$m_2 = 0,25 \text{ kg}$$

$$t_2 = 12^\circ \text{C}$$

$$t = 33^\circ \text{C}$$

$$c_2 = ? [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Teplotní rozdíl ve °C se číselně rovná teplotnímu rozdílu v K. Pokud k řešení fyzikálních úloh používáme vztahy, v nichž se vyskytuje teplotní rozdíl, nemusíme teplotu zadanou ve °C převádět na K.

Při zápisu fyzikálních veličin je třeba dbát na správné přidělení indexu. Dohodou je stanoveno, že hmotnost, měrná tepelná kapacita a teplota tělesa o větší teplotě se indexuje číslem 1 a vlastnosti kapaliny v kalorimetru (chladnějšího tělesa) číslem 2.

Pro výpočet použijeme tento tvar kalorimetrické rovnice:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T - T_2) + C \cdot (T - T_2)$$

Vyjádříme neznámou veličinu

$$c_2 = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T) - C \cdot (T - T_2)}{m_2 \cdot (T - T_2)}$$

Dosadíme číselné hodnoty

$$\{c_2\} = \frac{0,5 \cdot 383 \cdot (100 - 33) - 63 \cdot (33 - 12)}{0,25 \cdot (33 - 12)}$$

$$c_2 = 2\,200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Měrná tepelná kapacita oleje je přibližně 2 200 J.kg.K

3.1.8. Příklady – zákonitosti mol. Fyziky a termiky

- 1) Jaký je teplotní rozdíl mezi stavy popsanými teplotami $t = 300^\circ \text{C}$ a $T = 250 \text{ K}$?
[323,15 K]
- 2) Pět kuliček má stejný objem, jsou však vyrobeny z různých kovů: olova, mědi, železa, cínu a hliníku. Jestliže je zahřejeme na teplotu varu vody a položíme na desku z vosku nebo parafínu, ponoří se každá kulička do jiné hloubky. Určete výpočtem pořadí koulí podle hloubky ponoření.
[železo, měď, hliník, cín, olovo]
- 3) Jaké teplo je třeba, aby se měděné těleso v pájce o hmotnosti 150 g ohřálo z teploty 20°C na teplotu 420°C ?
[22,8 kJ]
- 4) Nákladní automobil o hmotnost 10 t jedoucí rychlostí $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ zastavil brzděním. Jaké teplo odvedou brzdy ?
[2 MJ]
- 5) Míč o hmotnosti 0,6 kg spadl z výše 10m a vyskočil do výše 2,5 m. Určete mechanickou energii, která se změnila v teplo.
[44 J]

- 6) Při soustružení se zvyšuje za každou minutu vnitřní energie soustavy výrobek- obráběcí nůž o 50 000 J. Proto je nutné soustavu ochlazovat chladicí kapalinou. Jaký objem chladicí kapaliny je třeba na jednu hodinu soustružení, je-li její hustota 980 kg.m^{-3} , měrná tepelná kapacita $4000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, počáteční teplota 20°C a konečná teplota nemá přestoupit 60°C ?

[19,1 l]

- 7) Určete hmotnost závaží, které bychom zvedli do výše 10 m rovnoměrným pohybem, kdybychom zcela využili energii, kterou dodá voda o hmotnosti 1 kg při ochlazení z teploty 100°C na 0°C .

[4270 kg]

- 8) V kalorimetru o tepelné kapacitě 100 J.K^{-1} je voda o hmotnosti 300 g a teplotě 20°C . Do vody ponoříme těleso z mědi o hmotnosti 100 g vyjmuté z vroucí vody za normálního tlaku. Určete výslednou teplotu po dosažení rovnovážného stavu. Měrná tepelná kapacita mědi je $383 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

[22,2 °C]

- 9) V kalorimetru je voda o hmotnosti 2 kg a teplotě 15°C . Do této vody nalijeme horkou vodu o hmotnosti 1 kg. Po dosažení teplotní rovnováhy je výsledná teplota soustavy 30°C . Jakou teplotu měla voda, jestliže neuvažujeme tepelnou kapacitu kalorimetru?

[60° C]

3.2. Struktura pevných látek

Pevné látky jsou ty látky, jejichž mikročástice mají vzhledem k sobě stálé postavení v důsledku působení velkých přitažlivých a odpudivých sil. Tělesa z pevných látek si proto zachovávají stálý objem a tvar.

Podle pravidelnosti rozmístění částic rozlišujeme dvě základní skupiny pevných látek:

- 1) **amorfní látky** – mikročástice v nich nejsou pravidelně uspořádány. Navenek můžeme tyto látky poznat podle miskovitého (lasturového) lomu. Mezi amorfní látky patří sklo, vosk, asfalt, pryskyřice. Uspořádání částic pouze na malou vzdálenost způsobuje, že amorfní látky jsou slabě tekuté
- 2) **krystalické látky** – mají mikročástice pravidelně uspořádány, což se projevuje rovnými lomnými plochami. Patří zde většina pevných látek, např. kovy, křemen, diamant, kamenná sůl.

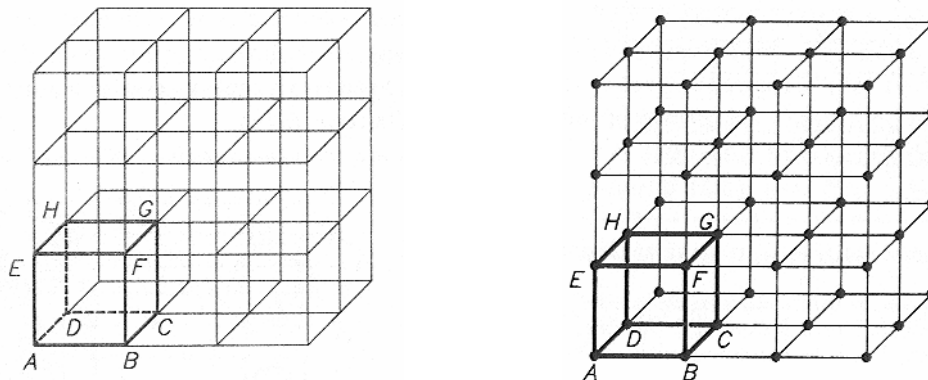
Podle pravidelnosti uspořádání dělíme krystalické látky do šesti krystalických soustav:

- trojklonná
- jednoklonná
- kosočtverečná
- čtverečná
- šesterečná
- krychlová

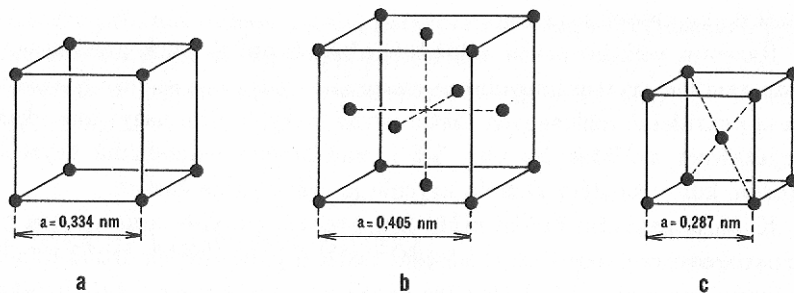
Prvky, které určují symetrii jsou střed, osa a rovina souměrnosti.

3.2.1. Ideální krystalová mřížka

Současné možnosti studia stavby krystalů potvrzují, že částice krystalické látky vytvářejí svým pravidelným uspořádáním krystalickou mřížku. Tuto skutečnost můžeme objasnit pomocí tzv. prostorové neboli **geometrické mřížky**, která je tvořena trojrozměrnou soustavou rovnoběžek (obr). Průsečíky přímek jsou tzv. **uzlové body**. Jestliže je v každém uzlovém bodě umístěna částice (atom, molekula nebo iont), nazýváme vzniklý útvar jednoduchou **ideální krystalovou mřížkou** (obr).



Krystal libovolných rozměrů získáme opakovaným posouváním tzv. **elementárních buněk** podél jejich prodloužených hran. Nejjednodušší elementární buňka má tvar krychle a mřížka vytvořená z těchto buněk se nazývá krychlová (kubická) krystalová mřížka. Podle rozložení částic v buňce rozlišujeme tři základní druhy elementárních buněk:



- a) **Primitivní (prostá) elementární buňka** má částice umístěny pouze ve vrcholech krychle. V přírodě se vyskytuje jen výjimečně.
- b) **Plošně centrovaná elementární buňka** má částice ve vrcholech a ve středech stěn krychle. Krystalovou mřížku tohoto typu mají např. kovy Al, Ni, Cu, Ag, Au.
- c) **Prostorově centrovaná elementární buňka** má částice ve vrcholech a ve středu krychle. Tuto strukturu mají např. kovy Li, Na, K, Cr.

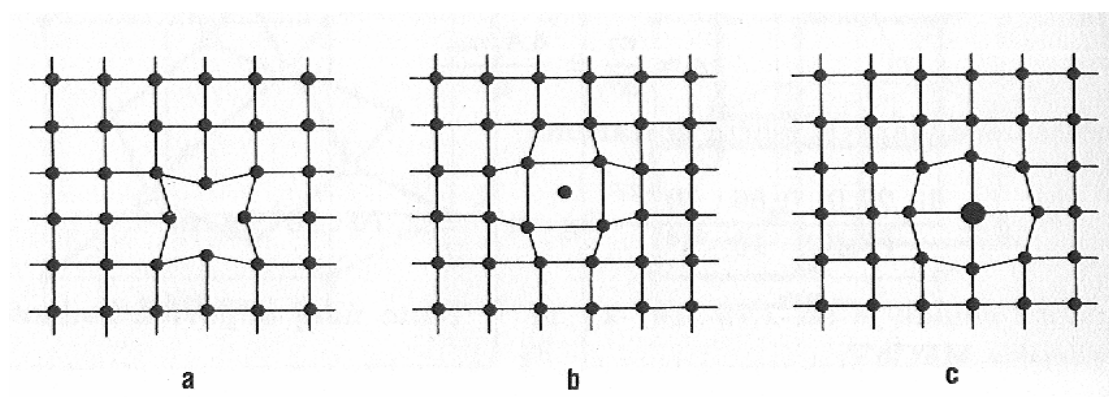
3.2.2. Poruchy krystalové mřížky

Dokonalá periodičnost s jakou se opakuje vždy stejné rozložení částic v ideální krystalové mřížce není splněna u reálných krystalů. Vyskytují se u nich poruchy.

Rozlišujeme tři druhy bodových poruch:

- 1) **Vakance** je porucha vyvolaná chybějícími částicemi v mřížce. Příčinou může být kmitavý pohyb částic, který způsobí, že se částice uvolní ze své rovnovážné polohy a místo zůstane neobsazeno. Vakance lze vytvořit ozářením krystalu neutrony nebo se vytvářejí při vzniku některých kovových slitin.
- 2) **Intersticiální poloha částice** (intersticiální znamená umístěná v mezeře) je bodová porucha, která se projevuje přítomností částice mimo pravidelný bod krystalové mřížky. Je-li touto částicí iont, přenáší při svém pohybu elektrický náboj a způsobuje elektrickou vodivost iontových krystalů. Tato porucha souvisí s vakancí.
- 3) **Příměsi** (nečistoty) jsou cizí částice, které se vyskytují v krystalu daného chemického složení. Tyto částice se mohou nacházet buď v intersticiální poloze nebo mohou nahradit vlastní částici mřížky. Příkladem prvního typu je snadná absorpce (vstřebání) atomů vodíku, uhlíku, kyslíku a dusíku v kovech. Např. počet a uspořádání atomů uhlíku v mřížce železa má vliv na vlastnosti různých druhů oceli. Příkladem druhého typu jsou atomy bóru nebo fosforu vpravené do čistého krystalu křemíku či germania. Tím se

podstatně zlepši elektrická vodivost látky (příměsové polovodiče).



3.2.3. Deformace pevných látek

Deformací rozumíme změnu tvaru tělesa způsobenou vnější silou.

Podle toho, jak látka na vnější sílu reagujeme rozlišujeme:

- 1) **látky pružné (elastické)** – jestliže na ně přestane působit deformační síla, vrací se tyto látky do původního tvaru
- 2) **látky nepružné (tvárné, plastické)** – jestliže na ně přestane působit vnější síla, zůstanou zdeformované
- 3) **látky křehké** – působí-li na ně vnější síla, může dojít k rozbití

Podle směru působení deformačních sil rozlišujeme 5 základních typů deformací:

tahem – dvě stejně velké síly opačného směru směřují ven z tělesa

tlakem – dvě stejně velké síly opačného směru směřují dovnitř tělesa

ohybem – vnější síla působí kolmo k podélné ose souměrnosti tělesa podepřeného na obou koncích

smykem – na horní a dolní podstavu působí opačné síly v rovinách podstav a způsobují posunutí jednotlivých vrstev tělesa

krutem – dvě stejné dvojice sil s opačnými momenty sil

V technické praxi se častěji vyskytují deformace složené z několika jednoduchých deformací.

3.2.4. Normálové napětí

Při pružné deformaci tahem se působením vnějších deformujících sil zvětšují vzdálenosti mezi částicemi. Jako reakce na vnější deformační síly začnou uvnitř tělesa působit síly pružnosti. V libovolném příčném řezu tělesa vzniká stav napjatosti, který charakterizuje veličina **normálové napětí** σ_n . Je definováno jako velikost síly pružnosti F_p působící kolmo na jednotkovou plochu příčného řezu.

$$\sigma_n = \frac{F_p}{S} \quad [\text{Pa}]$$

Je-li těleso deformované silami o velikost F v rovnovážném stavu (tj. v klidu nebo rovnoměrném přímočarém pohybu) $F_p = F$.

PŘÍKLAD : Klec osobního výtahu nesou tři ocelová lana, z nichž každé má průměr 1 cm. Vypočtete průměrné napětí jednoho lana, je-li celková tíha klece 5 kN.

Řešení : $d = 1 \text{ cm}$

$$r = 0,5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F = 5 \text{ kN} = 5\,000 \text{ N}$$

$$n = 3$$

$$\sigma_n = ? [\text{Pa}]$$

Průřez lana tvoří kruh o obsahu $S = \pi \cdot r^2$

Normálové napětí vypočteme ze vztahu $\sigma_n = \frac{F}{n \cdot S}$

$$5\,000 \text{ N}$$

Dosadíme číselné hodnoty : $\sigma_n = \frac{5\,000 \text{ N}}{3 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}$

$$\sigma_n = 21,2 \text{ MPa}$$

Průměrné napětí jednoho lana je asi 21,2 MPa.

3.2.5. Hookův zákon

je matematické vyjádření změny tvaru při tahu a tlaku na vnější působící síle.

Při experimentálních pozorováních bylo zjištěno, že změna délky sledovaného tělesa závisí na :

- velikosti působící síly F

- původní délce l_0

- obsahu průřezu S

- materiálu E

$$\Delta l = \frac{l_0}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

Vydělíme-li obě strany rovnice l_0 dostaneme

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

$$\Delta l$$

Veličina $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ se nazývá relativní prodloužení.

$$l_0$$

Materiálová konstanta E [Pa] se nazývá modul pružnosti a její hodnotu najdeme v tabulkách.

Hookův zákon, který platí pro pružnou deformaci tahem (tlakem) pak vyjádříme ve tvaru:

1 Poměrné prodloužení materiálu je přímo úměrné napětí uvnitř

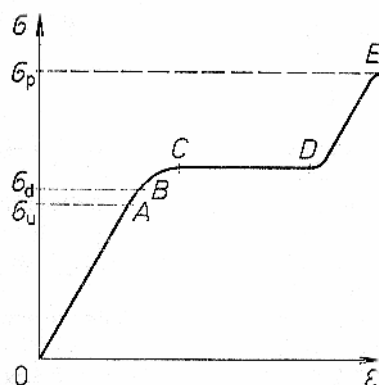
$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma_n \quad \text{materiálu.}$$

$$E$$

3.2.6. Trhací diagram

Trhací diagram neboli křivka deformace je graf znázornění závislosti napětí v materiálu na poměrném prodloužení.

σ_u – mez úměrnosti, nejvyšší hodnota napětí, pro kterou ještě platí Hookův zákon, pro normálové napětí $\sigma \leq \sigma_u$ je grafem úsečka 0A



σ_d – mez pružnosti, do této hodnoty napětí je ještě deformace pružná, ale závislost mezi prodloužením a napětím není přímá, prodloužení narůstá rychleji (úsek AB). Po překročení meze pružnosti se už materiál nevrátí do původního tvaru a začne probíhat plastická deformace. Nejdříve roste relativní prodloužení tak, jak je znázorněno křivkou BC. Pak se zkoumané těleso (tyč, drát) rychle prodlužuje, „teče“, a to při konstantním napětí (úsek CD).

Na materiálu se začnou objevovat nápadné trhliny.

σ_p – mez pevnosti je hodnota normálového napětí, při které po tzv. zpevnění materiálu (úsek DE) dojde k porušení soudržnosti látky.

3.2.7. Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je jev, při kterém dochází ke změně rozměrů tělesa jako důsledek změny teploty. Rozlišujeme dva druhy teplotní roztažnosti :

1) teplotní délková roztažnost – u předmětů, kde výrazně převládá jeden rozměr (dráty, trubky, kolejnice)

Změna délky závisí na materiálu, původní délce l_0 a velikosti ohřevu Δt

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

α součinitel délkové teplotní roztažnosti, materiálová konstanta jejíž hodnotu najdeme v tabulkách

Pro konečnou délku při ohřevu pak platí :

$$l_t = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

2) teplotní objemová roztažnost

Změna objemu závisí na materiálu, původním objemu V_0 a velikosti ohřevu Δt

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

β - součinitel objemové roztažnosti, materiálová konstanta, jejíž velikost je přibližně trojnásobkem hodnoty součinitele délkové roztažnosti dané látky

Pro konečný objem při ohřevu pak platí :

$$V_t = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t)$$

PŘÍKLAD : Při jaké změně teploty zinkového drátu ($\alpha = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) je jeho relativní prodloužení 0,09% ? Jaké je prodloužení při této změně teploty, je-li počáteční délka drátu 321 mm ?

Řešení : $\alpha = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

$$\varepsilon = 0,0009$$

$$\Delta T = ? \text{ K}$$

$$l_0 = 321 \text{ mm} = 0,321 \text{ m}$$

$$\Delta l = ? \text{ m}$$

Vydeme ze vztahu

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

$$\Delta l$$

Vydělíme obě strany rovnice l_0 :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad \text{tedy} \quad \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

Vyjádříme změnu teploty $\Delta T = \frac{\varepsilon}{\alpha}$ a dosadíme číselné hodnoty $\Delta T = \frac{0,0009}{0,000029 \text{ K}^{-1}} = 31 \text{ K}$

Vypočteme prodloužení $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$ $\Delta l = 0,000029 \text{ K}^{-1} \cdot 0,321 \text{ m} \cdot 31 \text{ K}$
 $\Delta l = 0,0002885 \text{ m} = 0,29 \text{ mm}$

Teplota vzroste o 31 K a drát se prodlouží o 0,29 mm.

3.2.8. Příklady – Struktura pevných látek

- 1) Ocelové lano je vytvořeno z deseti drátů, z nichž každý má průměr 2 mm. Jakou silou se lano přetrhne, je-li mez pevnosti oceli 1,3 GPa ?

[41 kN]

- 2) Tahovými silami o velikosti 80 N se ocelová struna o obsahu příčného řezu $0,5 \text{ mm}^2$ protáhla o 1,2 mm. Určete modul pružnosti v tahu, je-li počáteční délka struny 1,5 m.

$[2,10^{11} \text{ Pa}]$

- 3) Při výrobě dílců z železobetonu, byly napínány kvalitní ocelové pruty o délce 6 m silou $F = 6 \cdot 10^4 \text{ N}$. Dosažené napětí je rovno 80 % meze pružnosti. Vypočítejte mez pružnosti a prodloužení ocelových tyčí, je-li jejich průměr 10 mm.

[22 mm; $9,5 \cdot 10^8 \text{ Pa}$]

- 4) Jaký poloměr musí mít závěsné lano jeřábu, aby při rovnoměrném zvedání nákladu o hmotnosti 2,5 t nepřekročilo normálové napětí v libovolném příčném řezu hodnotu 60 MPa ?

[1,2 cm]

- 5) Jaké je relativní prodloužení hliníkového drátu, jestliže se zvýší jeho teplota o 80°C ? Jaké je absolutní prodloužení tohoto drátu počáteční délky 100,3 m ? Součinitel teplotní délkové roztažnosti hliníku je $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

[0,2 %; 20 cm]

- 6) Teplota mosazného válce se zvětšila z 5°C na 35°C . Při teplotě 5°C má válec průměr 40,9 mm. Lze zjistit zvětšení průměru válce, použijeme-li k měření mikrometr s přesností 0,01 mm ?

[ano; 0,02 mm]

- 7) Jak velkými silami je třeba deformovat tahem měděnou tyč o obsahu příčného řezu 12 mm^2 , aby neprodloužila o stejnou hodnotu jako při zvýšení teploty o 35 K ? Součinitel

teplotní délkové roztažnosti mědi je $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ a modul pružnosti v tahu je $1,25 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$.

[0,9 kN]

- 8) Betonový sloup má při určité teplotě objem $0,25 \text{ m}^3$. Při které změně teploty se zmenší objem sloupu o $0,45 \text{ dm}^3$? Součinitel teplotní délkové roztažnosti betonu je $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

[pokles o 50 K]

- 9) Při teplotě 0°C má olověná koule průměr 200 mm. Jaká je relativní změna objemu této koule při zvýšení teploty na 100°C ? Jaký objem má koule při teplotě 100°C ?

[0,9 %; $4,24 \text{ dm}^3$]

3.3. Struktura kapalin

Struktura kapalin je podobná struktuře pevných amorfních látek. Každá molekula kmitá kolem své rovnovážné polohy a současně se přemísťuje na jiné místo, kde opět zaujímá rovnovážnou polohu. Doba změny rovnovážné polohy je v nanosekundách.

Vzdálenost molekul v kapalině je řádově 0,1 nm, proto na sebe působí značnými přitažlivými silami. Na každou molekulu tedy působí její bezprostřední sousedé. Silové působení uvnitř kapaliny a na povrchu se liší. Uvnitř jsou molekuly v rovnovážném postavení a výslednice sil je nulová. Molekuly, které se nacházejí v povrchové vrstvě, jsou výslednou silou „vtahovány“ dovnitř kapaliny. Uvedená vlastnost má za následek, že se volný povrch kapaliny chová jako tenká pružná blána a na hladině kapaliny se mohou udržet drobné předměty (desetník, žiletka, jehla), které by podle Archimédova zákona měly klesnout ke dnu.

3.3.1. Povrchová energie a povrchové napětí

Mikročástice v povrchové vrstvě mají větší potenciální energii než mikročástice uvnitř objemu kapaliny. Abychom mohli přesunout molekulu zvnitřku kapaliny na povrch, musíme vykonat práci, abychom energii zvětšili (porušujeme rovnovážný stav).

Rozdíl mezi potenciální energií molekul na povrchu a uvnitř kapaliny se nazývá **povrchová energie**. Je jednou ze složek vnitřní energie kapaliny.

Změna povrchové energie ΔE je přímo úměrná změně obsahu ΔS volného povrchu kapaliny.

$$\Delta E = \sigma \cdot \Delta S$$

Konstanta úměrnosti σ se nazývá **povrchové napětí**. Tato veličina je materiálová konstanta, která závisí na druhu kapaliny a prostředí nad volným povrchem kapaliny.

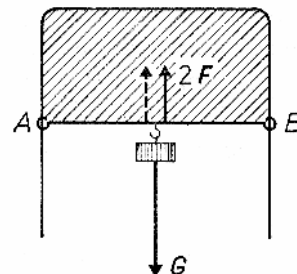
S rostoucí teplotou povrchové napětí klesá.

Každá soustava má tendence zaujímat stav s minimální energií. Pro kapalinu to znamená, že

v rovnovážném stavu nabývá kapalina s daným objemem tvaru s nejmenším obsahem volného povrchu. Při daném objemu má ze všech těles nejmenší povrch koule. Proto např. volné kapky mlhy nebo rosy mají kulový tvar.

Určení velikosti povrchového napětí

Vytvoříme blánu z mýdlového roztoku v drátěném obdélníkovém rámečku, jehož jedna strana AB je pohyblivá. Síla F působící v jedné povrchové vrstvě blány na příčku AB se nazývá **povrchová síla** a její velikost můžeme určit experimentálně, jestliže rovinu rámečku dáme do svislé polohy a zatížíme tak, aby soustava byla v rovnovážné poloze.



$$G$$

Pak platí: $F = \frac{G}{2}$

$$2$$

Ke zvětšení povrchu blány je třeba vykonat práci W , která se rovná přírůstku povrchové energie blány: $W = \Delta E$

Posunutím příčky AB o délce l o vzdálenost Δx se zvětší obsah obou povrchů o hodnotu $2\Delta S = 2 \cdot l \cdot \Delta x$

Pro přírůstek vnitřní energie pak platí: $\Delta E = \sigma \cdot 2\Delta S = \sigma \cdot 2 \cdot l \cdot \Delta x$ (1)

Vykonanou práci lze vyjádřit vztahem $W = 2 \cdot F \cdot \Delta x$ (2)

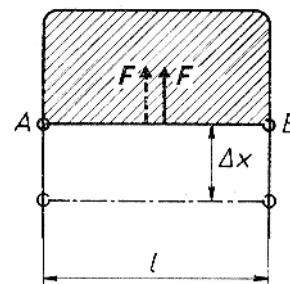
Porovnáme vztahy (1) a (2) :

$$W = \Delta E$$

$$2 \cdot F \cdot \Delta x = \sigma \cdot 2 \cdot l \cdot \Delta x$$

Odtud

$$F = \sigma \cdot l$$



Velikost povrchové síly je přímo úměrná délce okraje povrchové blány.

Povrchové napětí je fyzikální veličina, která udává velikost síly působící na jednotkovou délku okraje povrchové blány.

$$F$$

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$$

$$l$$

3.3.2. Kapilarita

Na styku pevného tělesa a kapaliny dochází k zakřivení volného povrchu. Způsob zakřivení závisí na druhu kapaliny, na materiálu, ze kterého je nádoba a na prostředí nad kapalinou.

Podle způsobu zakřivení rozlišujeme:

a) smáčivé kapaliny

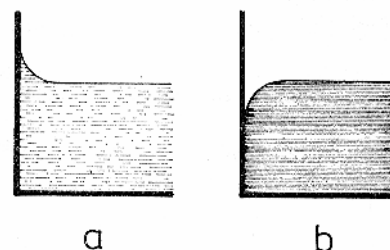
(dutý povrch)

voda ve skleněné nádobě

b) nesmáčivé kapaliny

(vypuklý povrch)

rtuť ve skleněné nádobě



Jako důsledek zakřivení volného povrchu vzniká v kapalině přídavný tlak, který nazýváme **kapilární tlak**. Velikost kapilárního tlaku je dána vztahem:

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

kde σ je povrchové napětí a r poloměr zakřivení.

Důsledkem existence kapilárního tlaku je vznik **kapilárních jevů (kapilarity)** v úzkých dutých trubicích (kapilárách).

Podle toho, je-li kapalina smáčivá nebo nesmáčivá, rozlišujeme dva typy kapilarity:

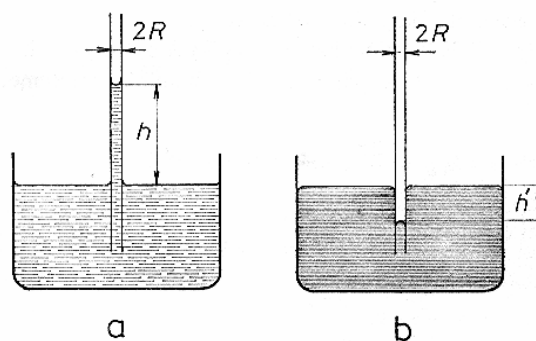
a) kapilární elevace - u smáčivých kapalin vystoupí kapalina v kapiláře nad hladinu volného povrchu v nádobě,

b) kapilární deprese - u nesmáčivých kapalin je kapalina v kapiláře pod hladinou volného povrchu kapaliny v nádobě.

Výšku výstupu kapaliny v kapiláře je dána rovnováhou mezi kapilárním a hydrostatickým tlakem:

$$p_k = p_h$$

$$\frac{2\sigma}{r} = h \cdot \rho \cdot g \quad \text{odtud} \quad h = \frac{2\sigma}{r \cdot \rho \cdot g}$$



Výška výstupu kapaliny v kapiláře je nepřímo úměrná poloměru kapiláry a hustotě kapaliny

PŘÍKLAD: Jaký je vnitřní průměr kapiláry, jestliže v ní benzín vystoupí do výše 3 cm nad volnou hladinu benzínu v širší nádobě? Hustota benzínu je 700 kg.m^{-3} , povrchové napětí 21 mN.m^{-1} a tíhové zrychlení 10 m.s^{-2} .

Řešení : $\sigma = 21 \text{ mN.m}^{-1} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$

$$\rho = 700 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$g = 10 \text{ m.s}^{-2}$$

$$h = 3 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$d = ? \text{ m}$$

Ze vztahu pro výpočet výšky při kapilární elevaci vyjádříme poloměr :

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot r} \quad r = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot h \cdot g} \quad \text{dosadíme číselné hodnoty} \quad r = \frac{2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}}{700 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 10 \text{ m.s}^{-2}}$$

$$r = 0,0002 \text{ m}$$

$$\text{průměr } d = 2 \cdot r \quad d = 0,0004 \text{ m} = 0,4 \text{ mm}$$

Vnitřní průměr kapiláry je 0,4 mm.

3.3.3. Teplotní roztažnost kapalin

Stejně jako u pevných látek dochází u kapalin v důsledku změny teploty ke změně objemu.

Změna objemu: $\Delta V = V_o \cdot \beta \cdot \Delta T$

Konečný objem po ohřevu: $V_t = V_o \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T)$

Voda je mezi kapalinami výjimkou z hlediska závislosti objemu na teplotě. Zahříváme-li vodu z teploty 0°C na teplotu 4°C , její objem se zmenšuje. Teprve od teploty 4°C (přesněji $3,98^\circ\text{C}$) se voda chová jako ostatní kapaliny – s rostoucí teplotou se její objem zvětšuje. Tato vlastnost se nazývá **anomálie vody**. Má velký význam pro život v přírodě. Způsobuje, že voda v rybnících a ve vodních tocích nezamrzá až ke dnu.

Se změnou objemu dochází ke změně hustoty kapaliny, protože hmotnost sledovaného vzorku je konstantní. Při konstantním tlaku hustota kapalin s rostoucí teplotou klesá přibližně

lineárně: $\rho_t = \rho_o \cdot (1 - \beta \Delta T)$

PŘÍKLAD : Hladina elektrolytu v akumulátoru při teplotě 5°C je 4 mm od otvoru. Při jaké teplotě začne část elektrolytu vytékat z otvoru? Výška akumulátoru je 300 mm, teplotní

součinitel objemové roztažnosti elektrolytu je $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Změnu obsahu dna a výšky nádoby lze zanedbat.

Řešení : $t_1 = 5^\circ \text{C}$

$$h_0 = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$$

$$\Delta h = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$$

$$\beta = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$t_2 = ?^\circ \text{C}$$

Vypočteme, jaká změna teploty je potřebná k tomu, aby hladina elektrolytu dosáhla k hornímu otvoru.

Změna objemu v závislosti na změně teploty: $\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T = S \cdot h_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$ (1)

$$\Delta V = S \cdot \Delta h$$
 (2)

Porovnáme vztahy (1) a (2) :

$$S \cdot \Delta h = S \cdot h_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$\text{Vyjádříme } \Delta T : \quad \Delta T = \frac{\Delta h}{h_0 \cdot \beta} \quad \Delta T = \frac{0,004 \text{ m}}{0,3 \text{ m} \cdot 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}}$$

Potřebný přírůstek teploty $\Delta T = 31 \text{ K}$.

Výsledná teplota $t_2 = t_1 + \Delta t$ $t_2 = 5^\circ \text{C} + 31^\circ \text{C} = 36^\circ \text{C}$

Elektrolyt začne vytékat z otvoru při teplotě 36°C .

3.3.4. Příklady – Struktura kapalin

- 1) Jak velká povrchová energie se uvolní, jestliže při dešti z kapek o průměru 10-3 mm se vytvoří kapka o průměru 3 mm ? (Návod: vypočteme počet malých kapek, které vytvoří velkou kapku: $x = V_2 : V_1$ a změnu povrchu $\Delta S = x \cdot S_1 - S_2$).
- 2) V kapiláře stoupl petrolej do výše 12,9 mm a v kapiláře téhož průměru poklesla o 14 mm pod úroveň volné hladiny. Vyhledejte v tabulkách hustoty obou kapalin a ze známé hodnoty povrchového napětí petroleje vypočtete povrchové napětí rtuti.

$$[27 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}]$$

- 3) Jak velký je tlak vzduchu ve vzduchové bublině průměru 0,01 mm, která je v hloubce 20 cm pod vodní hladinou, je-li atmosférický tlak 1013 hPa, teplota 4°C a povrchové napětí vody při styku se vzduchem $73 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$? (Návod: Tlak v bublině je roven součtu tlaku atmosférického, hydrostatického a kapilárního).

$$[1,325 \cdot 10^5 \text{ Pa}]$$

- 4) Kapilára o vnitřním poloměru 0,2 mm je ponořena do nádoby s vodou. Oč je nutno zvýšit tlak v kapiláře proti tlaku nad vodou nádobě, aby hladina vody v kapiláře byla stejně vysoko jako hladina vody v nádobě ?

[0,73 kPa]

- 5) Při teplotě 20 °C má rtuť hustotu 13 546 kg.m⁻³. Jako má hustotu při teplotě 0°C, je-li součinitel teplotní objemové roztažnosti rtuti 1,818.10⁻⁴ K⁻¹ ?

[13 596 kg.m⁻³]

- 6) Ocelový sud vnitřního objemu 100 l je naplněn až po okraj petrolejem. Jaký objem má petrolej, který vyteče ze sudu, když se teplota zvýší o 40 °C ?

[3,7 l]

- 7) Vypočítejte relativní změnu objemu etylalkoholu, zvýšíme-li jeho teplotu o 20 °C a je-li $\beta = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

[2,75 %]

3.4. Struktura a vlastnosti plynů

Plynem nazýváme soustavu volně se pohybujících mikročastic – jednoatomových nebo víceatomových molekul. Ze všech skupenství látek má plyn nejjednodušší strukturu.

Molekuly plynu vykonávají tepelný pohyb, jehož rychlost a směr se neustále mění v důsledku vzájemných srážek molekul a srážek se stěnami nádoby. Rozpínavost a stlačitelnost plynů svědčí o tom, že přitažlivé a odpudivé síly mezi částicemi jsou velmi malé.

Abychom mohli snáze zkoumat jevy v plynech, zavádíme modelovou představu zvanou **ideální plyn**.

Molekuly ideálního plynu musí mít tyto vlastnosti:

- 1) Rozměry molekul jsou zanedbatelně malé ve srovnání s jejich střední vzdáleností, tzn., že ideální plyn lze stlačit na nulový objem.
- 2) Mezi molekulami ideálního plynu nepůsobí žádné přitažlivé síly, tzn., že potenciální energie soustavy je nulová.
- 3) Veškeré srážky mezi molekulami nebo mezi molekulou a stěnou nádoby jsou dokonale pružné – realizují se bez úbytku energie.

Z 2.a 3. vlastnosti vyplývá, že vnitřní energie soustavy molekul je rovna kinetické energii mikročastic.

Jestliže reálné plyny mají dostatečně vysokou teplotu a nízký tlak, můžeme je považovat za ideální plyny (např. vzduch za normálních podmínek tj. $t = 0^\circ \text{C}$ a $p = 101\,325 \text{ Pa}$).

3.4.1. Rychlost, energie a tlak molekul ideálního plynu

Termodynamická soustava plynu se skládá z mnoha molekul, jejich rychlosti se neustále mění co do směru i velikosti. Tím se mění také kinetická energie posuvného pohybu těchto částic, ale celková energie zůstává konstantní. Abychom mohli jednoduše vyjádřit energii celé soustavy, zavádíme tzv. střední kvadratickou rychlost molekul.

Střední kvadratická rychlost molekul plynu je taková rychlost, jakou by se musely pohybovat všechny molekuly, aby se celková kinetická energie posuvného pohybu molekul nezměnila.

m_o ... hmotnost molekuly

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

T ... termodynamická teplota

k ... Boltzmannova konstanta

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

Dosazením střední kvadratické rychlosti do vztahu $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ dostaneme **střední kinetickou energii E_o**

$$E_o = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

Molekuly ideálního plynu mají v důsledku neuspořádaného posuvného pohybu střední kinetickou energii, která je přímo úměrná termodynamické teplotě.

Jako důsledek vzájemných srážek molekul a srážek molekul se stěnami nádoby vzniká **tlak**. Velikost tlaku vyjadřuje **základní rovnice pro tlak ideálního plynu**, která je jedním z nejdůležitějších výsledků kinetické teorie plynů. Uvádí do souvislosti veličiny, které se vztahují k molekulám (hmotnost, rychlost a počet molekul) s veličinou, která charakterizuje plyn jako celek a dá se bezprostředně měřit při pokusech (tlak).

N ... počet molekul

V ... objem plynu

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

m_o ... hmotnost jedné molekuly plynu

v_k ... střední kvadratická rychlost

m

Součin $N \cdot m_0$ je roven hmotnosti m plynu a podíl — je hustota ρ plynu.

Základní rovnici pak lze upravit na tvar: V

$$p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot v_k^2$$

3.4.2. Stavová rovnice pro ideální plyn

Plyn v rovnovážném stavu popisujeme nejčastěji objemem, tlakem a termodynamickou teplotou. Vztah mezi nimi vyjadřuje stavová rovnice:

$p \cdot V$

Při stavové změně ideálního plynu stálé hmotnosti je výraz — konstantní.

T

Má-li plyn na počátku děje tlak p_1 , objem V_1 a termodynamickou teplotu T_1 , na konci děje tlak p_2 , objem V_2 , termodynamickou teplotu T_2 a během děje se hmotnost plynu nemění, můžeme psát stavovou rovnici ve tvaru:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

$p \cdot V_m$

Za normálních podmínek pro látkové množství 1 mol platí, že výraz — bude mít hodnotu $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$. Nazýváme ji univerzální plynová konstanta. T

Stavová rovnice pro 1 mol plynu se pak vyjádří ve tvaru: $p \cdot V_m = R \cdot T$

Pokud budeme pracovat s určitým množstvím látky, která bude obsahovat n molů, můžeme odvodit stavovou rovnici ve tvaru:

m

$$p \cdot V = \frac{m}{M_m} \cdot R \cdot T$$

PŘÍKLAD: Jak se změní tlak plynu, jestliže se jeho termodynamická teplota zvětší 2,8krát a jeho objem vzroste o 40 % původního objemu ?

Řešení: Počáteční stav popisují veličiny p_1, V_1, T_1

$$T_2 = 2,8 \cdot T_1$$

$$V_2 = 1,4 V_1$$

$$p_2 = ?$$

$$\text{Použijeme stavovou rovnici ve tvaru } \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ dosadíme } \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot 1,4 V_1}{2,8 \cdot T_1}$$

Po úpravě $p_2 = 2 \cdot p_1$

Tlak vzroste dvakrát.

3.4.3. Tepelné děje v plynech

Tepelné děje v plynech jsou takové děje, při nichž dochází k energetickým změnám. Změny energie se navenek projeví změnou některých stavových veličin.

Podle toho, jakým způsobem se energie mění, rozlišujeme 4 tepelné děje:

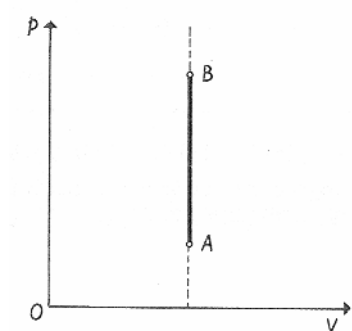
- izochorický
- izobarický
- izotermický
- adiabatický

Izochorický děj je děj, při kterém je objem plynu stálý, tedy $V = \text{konst}$.

Platí **Charlesův zákon**: Při izochorickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je poměr tlaku a termodynamické teploty konstantní.

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

Grafické znázornění závislosti tlaku na objemu (pV diagram) se nazývá **izochora**.



Při izochorickém ději je objem konstantní, takže termodynamická soustava ani okolní síly působící na soustavu nekonají práci.

I. termodynamický zákon je pak ve tvaru: $\Delta U = \pm Q$ tedy $\Delta U = \pm m \cdot c_v \cdot \Delta T$

Změna vnitřní energie je dána příjmem (vyzářením) tepla. Navenek se projeví změnou teploty soustavy.

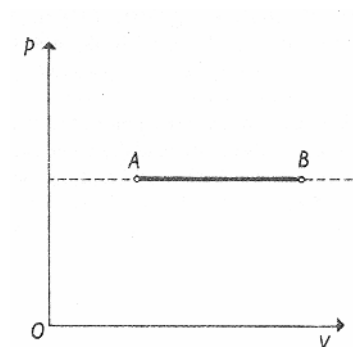
Izobarický děj je děj, při kterém je tlak plynu stálý, tedy $p = \text{konst}$.

Probíhá podle **Gay-Lussacova zákona**: Při izobarickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je poměr objemu a termodynamické teploty konstantní. $\frac{V}{T} = \text{konst}$

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

T

Grafické znázornění závislosti tlaku na objemu (pV diagram) se nazývá **izobara**.



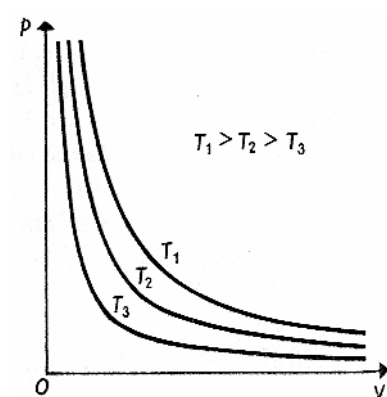
Pokud dodáme plynu teplo $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$, zvětší se jeho objem a aby tlak zůstal konstantní, soustava vykoná práci $W = p \cdot \Delta V$.

První termodynamický zákon má pak tvar: $\Delta U = Q - W$ tedy $\Delta U = m \cdot c_p \cdot \Delta T - p \cdot \Delta V$

Izotermický děj je děj, při kterém je stálá termodynamická teplota, tedy $T = \text{konst}$.

Platí **Boylův-Mariottův zákon**: Při izotermickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je součin tlaku a objemu plynu konstantní: $p \cdot V = \text{konst}$

Grafické znázornění závislosti tlaku na objemu se nazývá **izoterma**.



Aby se vnitřní energie nezměnila (aby teplota zůstala stálá), musí se teplo přijímat pomalu. Práce se koná na úkor přijímaného tepla.

První termodynamický zákon má pak tvar $Q = W$ tedy $m \cdot c \cdot \Delta T = p \cdot \Delta V$

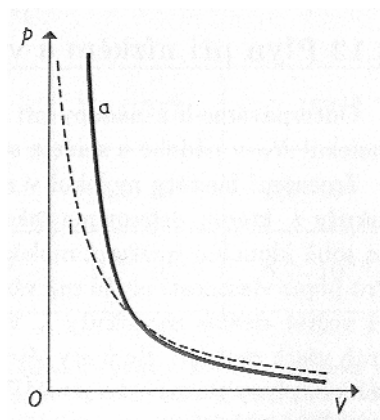
Adiabatický děj je děj, při kterém si plyn nevyměňuje teplo s okolím, tedy $Q = \text{konst.}$

Probíhá podle **Pissonova zákona**: $p \cdot V^\chi = \text{konst.}$

Konstanta χ se nazývá **Poissonova konstanta** a její hodnota se rovná podílu měrné tepelné kapacity při stálém tlaku a měrné tepelné kapacity při stálém objemu.

$$\chi = \frac{c_p}{c_v}$$

pV diagram se nazývá **adiabata**. Její průběh je strmější než u izotermy.



Změna tlaku a objemu se děje bez tepelné výměny. Práce při adiabatické expanzi se děje na účet vnitřní energie. Podmínkou děje je rychlý průběh, aby nedošlo k tepelné výměně mezi plynem a okolím.

I. termodynamický zákon má tvar: $W = -\Delta U$

PŘÍKLAD: Při teplotě 0°C má ideální plyn tlak $1,02 \text{ kPa}$. Určete tlak plynu, jestliže se jeho teplota zvýší o 100°C při stálém objemu.

Řešení: Jedná se o izochorický děj tj. $V = \text{konst.}$

:POZOR! Teplotu musíme uvádět v kelvinech

$$p_1 = 1,02 \text{ kPa} = 1020 \text{ Pa}$$

$$t_1 = 0^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 273,15 \text{ K}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 373,15 \text{ K}$$

$$p_2 = ? \text{ Pa}$$

Platí Charlesův zákon:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{odtud} \quad p_2 = \frac{p_1}{T_1} \cdot T_2$$

$$1020 \text{ Pa}$$

$$\text{Dosadíme: } p_2 = \frac{1020 \text{ Pa}}{273,15 \text{ K}} \cdot 373,15 \text{ K}$$

$$p_2 = 1393 \text{ Pa} = 1,4 \text{ kPa}$$

Plyn má tlak 1,4 kPa.

3.4.4. Příklady – Stavová rovnice, tepelné děje v plynech

- 1) Jak se změní objem ideálního plynu, jestliže se jeho termodynamická teplota zvětší dvakrát a jeho tlak vzroste o 25 % ?
[zvětší se 1,6krát]
- 2) Při teplotě 20°C je tlak vzduchu v pneumatice osobního automobilu 0,15 MPa. Jaký tlak má vzduch, zvýší-li se teplota o 30°C a objem vzroste o 1 % ?
[0,16 MPa]
- 3) Balón obsahoval při teplotě 17°C za normálního tlaku plyn o objemu 800 m³. Ve výšce, ve které je tlak 0,506 62.10⁵ Pa se objem balónu zvětšil na 1 450 m³. Určete teplotu plynu v této výšce za předpokladu, že byla stejná jako teplota okolního vzduchu.
[-13,7°C]
- 4) Žárovka se při výrobě plnila dusíkem pod tlakem 50,6 kPa za teploty 18°C. Jakou teplotu měl dusík v rozsvícené žárovce, jestliže se jeho tlak zvětšil na 118 kPa ?
[406°C]
- 5) Jaký tlak bude mít tlak v zásobníku pneumatické brzdy tramvajového vagónu po 250 zdvích pístu ? Objem zásobníku je 30 l, pístem se jedním zdvihem nasaje 600 cm³ vzduchu normálního tlaku. Změnu teploty zanedbejte.
[0,5 MPa]
- 6) Teplota ideálního plynu dané hmotnosti se zvětšuje za stálého tlaku z počáteční teploty 20 °C. Při jaké teplotě má plyn poloviční hustotu ve srovnání s hustotou při počáteční teplotě?
[313°C]

4. MECHANICKÉ KMITÁNÍ A VLNĚNÍ

4.1. Kmitání

4.1.1. Kmitavý pohyb, veličiny popisující kmitavý pohyb

Periodický pohyb je jedním z nejvýznamnějších pohybů, s nimiž se setkáváme v přírodě i v technické praxi. Konají jej například části chvějící se struny na kytarě, písty spalovacího motoru, kyvadlo nástěnných hodin apod.

Kmitavý pohyb koná těleso, jestliže se opakovaně (periodicky) pohybuje po stejné dráze v okolí určitého bodu, který nazýváme rovnovážná poloha.

Zařízení, které vykonává kmitavý pohyb se nazývá

mechanický oscilátor a můžeme si jej představit jako těleso zavěšené na pružině.

Abychom mohli popsat kmitání tělesa podrobněji, musíme objasnit následující pojmy:

Rovnovážná poloha 0 je bod, ve kterém jsou v rovnováze tíhová síla, která působí na těleso a síla pružiny. Obvykle volíme vztažnou soustavu tak, že rovnovážná poloha je v počátku této soustavy.

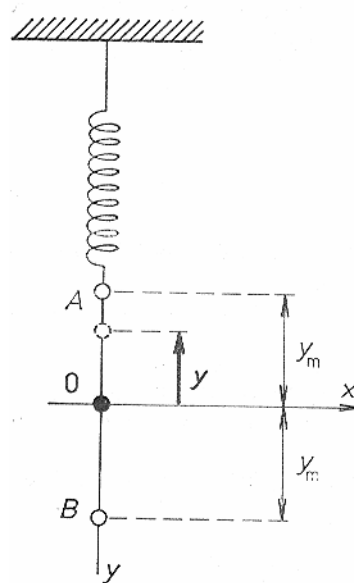
Okamžitá výchylka y [m] je vzdálenost kmitajícího tělesa od rovnovážné polohy v určitém okamžiku kmitání. Těleso na pružině kmitá podél osy y . Body **A** a **B** se nazývají **body obratu**. Dochází v nich ke změně směru pohybu.

Amplituda výchylky y_m [m] je maximální výchylka, tedy vzdálenost bodu obratu od rovnovážné polohy

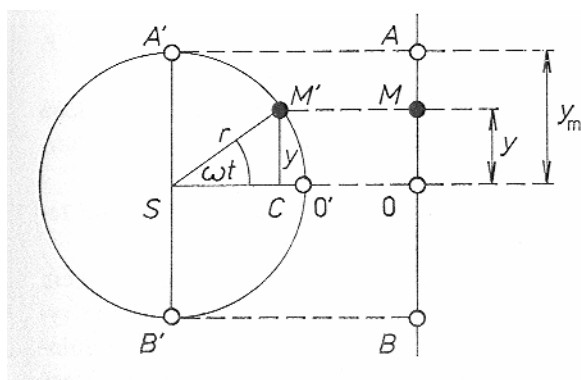
Kmit je dráha čtyř amplitud.

Perioda T [s] je doba jednoho kmitu. 1

Frekvence f [Hz] udává počet kmitů za 1 s. $f = \frac{1}{T}$



4.1.2. Základní a obecná rovnice harmonického pohybu



V průběhu kmitání se okamžitá výchylka neustále mění. Vztah pro okamžitou výchylku jako funkci času najdeme srovnáním kmitavého pohybu s rovnoměrným pohybem po kružnici.

Kmitavému pohybu odpovídá průmět pohybu rovnoměrného po kružnici do svislé roviny

(obr.) Předpokládejme, že na počátku pohybu, tj. v čase $t = 0$ s, je hmotný bod v poloze O' a její kolmý průmět na úsečku AB odpovídá rovnovážné poloze O kmitajícího bodu. Pohybuje-li se hmotný bod po kružnici stálou úhlovou rychlostí ω , opíše jeho průvodič za dobu t úhel $\varphi = \omega \cdot t$. Přitom okamžité poloze M' bodu na kružnici odpovídá okamžitá poloha bodu M jeho průmětu na úsečce AB . Z trojúhelníku SCM' pak vyplývá vztah $y = r \cdot \sin \omega t$. Z obrázku je zřejmé, že poloměr r se rovná amplitudě výchylky.

Odvodili jsme vztah: $y = y_m \cdot \sin \omega \cdot t$

Pohyb, jehož okamžitá výchylka (rychlost, zrychlení) je periodickou funkcí času se nazývá **harmonický pohyb**.

Výše uvedená rovnice se nazývá **základní rovnice harmonického pohybu** a udává závislost okamžité výchylky na čase v případě, že v čase $t = 0$ s se nachází kmitající těleso v rovnovážné poloze.

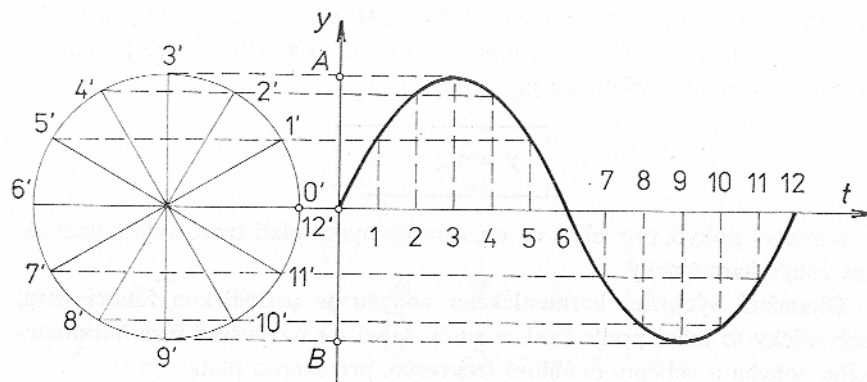
Úhel $\varphi = \omega \cdot t$ [rad] se nazývá **fáze**.

2π

Veličina ω [rad.s⁻¹] se nazývá **úhlová frekvence** a platí pro ni $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$

T

Grafem závislosti okamžité výchylky na čase je sinusoida



Obecná rovnice harmonického pohybu udává závislost okamžité výchylky na čase v případě, že v čase $t = 0$ s má kmitající těleso nenulovou výchylku a má tvar:

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

Veličina φ_0 [rad] se nazývá **počáteční fáze**.

PŘÍKLAD: Harmonický pohyb je popsán rovnicí $y = 0,2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$

Určete amplitudu výchylky, počáteční fázi, úhlovou frekvenci, frekvenci, periodu a okamžité výchylky v čase $t_1 = 0$ s a $t_2 = 1,5$ s.

Řešení : Amplitudu výchylky, počáteční fázi a úhlovou frekvenci „vyčteme“ přímo z rovnice

$$y_m = 0,2 \text{ m}; \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{4} \text{ rad}; \quad \omega = \frac{\pi}{2} \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\text{Frekvenci vypočteme ze vztahu } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \text{ kam dosadíme } \omega = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{tedy } 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{\pi}{2} \quad \text{odtud } f = 0,25 \text{ Hz.}$$

$$\text{Perioda } T = \frac{1}{f} \quad T = 4 \text{ s}$$

Okamžité výchylky vypočteme, jestliže dosadíme postupně časy t_1 a t_2 do obecné rovnice harmonického pohybu :

$$y_1 = 0,2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0 + \frac{\pi}{4}\right) = 0,2 \cdot \sin \frac{\pi}{4} = 0,2 \cdot 0,707 = 0,1414$$

$$y_1 = 0,14 \text{ m}$$

$$y_2 = 0,2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{4}\right) = 0,2 \cdot \sin \pi = 0,2 \cdot 0 = 0$$

$$y_2 = 0 \text{ m}$$

Amplituda výchylky $y_m = 0,2 \text{ m}$; počáteční fáze $\varphi_0 = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$; úhlová frekvence $\omega = \frac{\pi}{2} \text{ rad.s}^{-1}$;

frekvence $f = 0,25 \text{ Hz}$; perioda $T = 4 \text{ s}$; okamžitá výchylka v čase $t = 0 \text{ s}$ je $y = 0,14 \text{ m}$ a v čase $t = 1,5 \text{ s}$ je těleso v rovnovážné poloze ($y = 0 \text{ m}$).

4.1.3. Dynamika harmonického pohybu

Harmonický pohyb mechanického oscilátoru je způsoben silou pružnosti $\mathbf{F}$, která stále směřuje do rovnovážné polohy (má tedy opačný směr než vektor posunutí $\mathbf{y}$) a její velikost je přímo úměrná okamžité výchylce.

$$\mathbf{F} = -k \cdot \mathbf{y}$$

Konstanta úměrnosti $k [\text{N.m}^{-1}]$ se nazývá **tuhost** pružiny.

Pomocí druhého pohybového zákona (zákona síly) a vztahu pro výpočet síly pružnosti lze odvodit níže uvedené vztahy, ze kterých je patrné, jak závisí vlastní frekvence (respektive perioda) harmonického kmitání na parametrech mechanického oscilátoru, tj. na tuhosti pružiny a na hmotnosti kmitajícího tělesa.

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

PŘÍKLAD: Závaží o hmotnosti 100 g kmitá na pružině s frekvencí 5 Hz . Určete tuhost pružiny.

Řešení: $m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$

$$f = 5 \text{ Hz}$$

$$k = ? \text{ N.m}^{-1}$$

Vydeme ze vztahu pro výpočet frekvence. Jedná se o iracionální rovnici, tj. rovnici ve které se nachází neznámá (v našem případě tuhost) pod odmocninou.

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{obě strany rovnice umocníme :} \quad f^2 = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{k}{m}$$

$$\text{odtud} \qquad k = 4\pi^2 \cdot m \cdot f^2$$

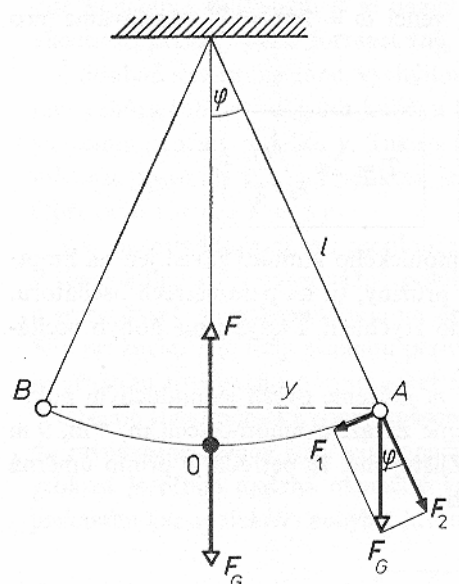
$$\text{po dosazení číselných hodnot} \qquad k = 98,7 \text{ N.m}^{-1}$$

4.1.4. Kyvadlo

Obecně kyvadlem rozumíme každé těleso, které je zavěšené nad těžištěm a jehož všechny body opisují kolem bodu závěsu části kružnic. Kmitavý pohyb kyvadel, která mají různý tvar a hmotnost je poměrně složitý. Abychom mohli pohyb kyvadla matematicky popsat zavádíme zjednodušenou modelovou představu, tzv. matematické kyvadlo.

Matematické kyvadlo je model realizovaný jako hmotný bod zavěšený na dokonale tuhém nehmotném závěsu.

Abychom určili velikost síly, která po vychýlení kyvadla z rovnovážné polohy způsobuje jeho kmitání, rozložíme sílu tíhovou F_G ve dvě navzájem kolmé síly F_1 a F_2 . Síla F_1 má směr tečny ke trajektorii pohybu hmotného bodu a její velikost je $F_1 = F_G \cdot \sin \varphi$. Protože směřuje k rovnovážné poloze, uvádí kyvadlo do pohybu. Síla F_2 má směr závěsu a ruší se jeho pevností; její velikost je $F_2 = F_G \cdot \cos \varphi$.



Kmitavý pohyb kyvadla způsobuje síla F_1 , která směřuje v každé poloze kyvadla (kromě rovnovážné polohy, kde je nulová) do rovnovážné polohy.

Pokud bude rozkyv kyvadla (vzdálenost bodů obratu) dostatečně malý, tj. pokud úhel $\varphi < 5^\circ$, můžeme pro frekvenci a periodu kyvadla odvodit vztahy:

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

Frekvence a perioda harmonického pohybu matematického kyvadla závisí na délce l jeho závěsu a na velikosti tíhového zrychlení g v daném místě.

Pracujeme-li s fyzikálním kyvadlem (každé těleso zavěšené nad těžištěm) které má hmotu rozprostřenou, musíme do vztahů pro frekvenci či periodu dosazovat takzvanou redukovanou délku. **Redukovaná délka** je taková vzdálenost od bodu závěsu, do které bychom museli umístit veškerou hmotu sledovaného kyvadla, aby se frekvence jeho pohybu nezměnila. V praxi tuto vzdálenost hledáme tak, že na těžnici procházející bodem závěsu hledáme takový bod, kolem něhož kmitá těleso se stejnou frekvencí jako kolem bodu závěsu.

Při pohybu kyvadla rozlišujeme **kmit** (dráha 4 amplitud výchylky) a **kyv** – polovina kmitu (dráha 2 amplitud výchylky)

Často počítáme s tzv. sekundovým kyvadlem. **Sekundové kyvadlo** je matematické kyvadlo, jehož kyv trvá 1 sekundu (perioda = doba kmitu je dvojnásobná)

4.1.5. Tlumené a netlumené kmity. Rezonance

Tlumené kmity jsou takové, jejichž amplituda výchylky se s časem exponenciálně zmenšuje. Frekvence se nemění. Všechny přirozené kmity jsou tlumené, protože energie kmitajícího tělesa se spotřebovává na překonání odporových sil.

Netlumené kmity jsou takové, jejichž amplituda výchylky je stálá. Konstantní amplitudu výchylky udržujeme dodáváním energie zvenčí.

Nucené kmity vznikají působením periodické síly na oscilátory i na objekty, které vlastnosti oscilátoru nemají. Frekvence nuceného kmitání závisí na frekvenci působící síly a nezávisí na vlastnostech kmitajícího objektu. Nucené kmitání je netlumené.

Rezonance je jev, ke kterému dochází, jestliže se frekvence vnější harmonické síly rovná (nebo je velmi blízká) vlastní frekvenci oscilátoru. Při rezonanci dochází k maximálnímu přenosu energie, což se projeví velkým nárůstem amplitudy výchylky.

V praxi je v řadě případů rezonance nežádoucí. Je tomu zejména u strojů, jejichž části se otáčejí. Tím vznikají periodické síly, které se přenášejí nejen nevlastní zařízení, ale i na jeho okolí, např. na podlahu, k níž je stroj upevněn. Vzniku rezonančního kmitání se předchází tím, že se vlastní frekvence zařízení upraví tak, aby se lišila od frekvence sil vynucujících kmitání a od jejich násobků. Např. rotor parní turbíny se otáčí s frekvencí 50 Hz,. Proto musí být celá konstrukce turbíny včetně základu volena tak, aby se její vlastní frekvence lišila od frekvence 50 Hz a jejích násobků.

Praktické využití rezonance spočívá především v rezonančním zesilování v hudební akustice a reprodukční technice. Na rezonanci jsou také založeny četné měřicí metody a přístroje pro měření frekvence.

4.1.6. Příklady – Kmitání

- 1) Určete okamžitou výchylku harmonického pohybu v čase $t = 0$ s a v čase $t = -T$, je-li

$$y = 10 \sin\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{6}\right)$$
amplituda výchylky 10 cm a počáteční fáze $\frac{\pi}{6}$ rad.
[5 cm; 8,66 cm]
- 2) Harmonické kmitání je popsáno rovnicí $y = 0,1 \sin\left(\frac{\pi}{6}t + \frac{\pi}{6}\right)$. Určete amplitudu
výchylky, periodu a počáteční fázi kmitání. Určete dobu od počátku kmitání, za kterou
okamžitá výchylka dosáhne amplitudy výchylky.
[0,1 m; 2 s; $\frac{\pi}{6}$ rad; 0,33s]
- 3) Těleso zavěšené na pružině kmitá harmonicky s frekvencí 1,6 Hz. Hmotnost tělesa je 200g.
Určete dobu, za kterou vykoná 30 kmitů, tuhost pružiny a frekvenci kmitů, jestliže se tuhost
zdvojnásobí.
[19 s; 20 N.m⁻¹; 2,3 Hz]
4. Oscilátor vznikl zavěšením závaží o hmotnosti 10 kg na pružinu, která se prodloužila o
15 cm. Urči periodu .
[0,78 s]
5. Srovnej délku sekundového kyvadla na Zemi ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$) a na Měsíci ($g = 1,6 \text{ m.s}^{-2}$)
[1 m; 0,16m]
6. Urči délku matematického kyvadla, které kmitá s frekvencí 1,6 Hz.
[9,7 cm]
7. Kyvadlo s délkou závěsu 40 cm kmitá se stejnou periodou jako těleso zavěšené na pružině
o tuhosti 20 N.m⁻¹. Určete hmotnost tělesa.
[0,82 kg]
8. Těleso zavěšené na pružině o tuhosti 50 N.m⁻¹ vykoná 50 kmitů za 64 s. Určete hmotnost.
[2,1 kg]

4.2. Akustika

je obor fyziky zabývající se vznikem, šířením a přijímáním zvuku.

Zvuk je postupné mechanické vlnění, které se ve vzduchu šíří jako vlnění podélné.

V některých pevných látkách se zvuk šíří jako vlnění příčné.

Zdrojem zvuku může být každé chvějící se těleso, tj. těleso, ve kterém vzniklo stojaté vlnění.

Patří zde hudební nástroje, ladičky, hlasivky, součástky strojů, struny, tyče, membrány, píšťaly, sirény, tónové generátory.

Zvuk můžeme dělit podle různých kritérií:

1) rozdělení zvuku podle způsobu kmitání zdroje:

a) tóny – vznikají pravidelným rozkmitáním zdroje. Patří zde zvuky hudebních nástrojů, ale také samohlásek řeči. Nejjednodušší hudební zvuk, který má sinusový průběh, nazýváme jednoduchý tón. Většina tónů je složena z tónu základního a tzv. vyšších harmonických.

b) nehudební zvuky nazývané **hluk** vznikají nepravidelnými mechanickými rozruchy a vnímáme je jako praskání, vrzání, šramot apod.

2) rozdělení zvuku podle frekvence:

a) infrazvuk - je mechanické vlnění s frekvencí od 0 Hz do 16 Hz. Patří zde především otřesy a záchvěvy půdy: Těžké dopravní prostředky vyvolávají kmity budov a vzhledem k tomu, že frekvence vlastních kmitů budov je blízká frekvenci infrazvukových vln, mohou tyto kmity vyvolat nežádoucí rezonanční jevy. K registraci infrazvukových vln se užívají seismografy.

b) slyšitelný zvuk – od 16 Hz do 20 kHz

c) ultrazvuk – mechanické vlnění s frekvencí nad 20 kHz. Zdrojem jsou ultrazvukové generátory. Někteří živočichové mají vlastní ultrazvuková zařízení (včely, cvrčci, netopýři, delfini). V praxi se ultrazvuk využívá v defektoskopii k vyhledávání skrytých vad materiálu. Je založena na odrazu ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí. Ultrazvuk se šíří přímočaře ve tvaru úzkých paprsků, které se mohou lámat, odrážet a soustřeďovat do ohniska, čehož se využívá při obrábění a řezání tvrdých materiálů. Odrazu se využívá k měření hloubky moře a určování polohy ledovců apod. V lékařství se ultrazvuk využívá v diagnostice a v ultrazvukové vrtačce.

4.2.1. Šíření zvuku

Nutnou podmínkou pro šíření zvuku je pružné prostředí. Ve vakuu se zvuk nešíří, v nepružném prostředí (vlna, korek apod.) se šíří špatně. Tyto látky se nazývají zvukové izolátory.

Rychlost zvuku závisí na druhu a hustotě prostředí a na teplotě. V kapalných a pevných látkách je větší než ve vzduchu. Vzduch $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$ při teplotě asi 15°C

$$\text{voda} \quad v = 1440 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\text{ocel} \quad v = 5000 \text{ m.s}^{-1}$$

4.2.2. Zvukové jevy

Důležitým jevem při šíření zvuku je **odraz zvuku**. Nastává na překážkách větších než je vlnová délka dopadajícího zvuku. Za těmito překážkami je **akustický stín**, tj. prostor, kde se zvuk nešíří. Při odrazu zvuku mohou vzniknout dva zajímavé efekty:

- 1) **ozvěna** – vznikne tehdy, jestliže se zvukové vlnění dostane od zdroje k překážce a zpět za 0,1 s nebo za dobu delší. Odražený zvuk pak vnímáme jako samostatný zvukový vjem.
- 2) **dozvuk** – vznikne tehdy, je-li časový interval mezi vysláním zvukového signálu a jeho návratem po odrazu menší než 0,1 s. V malých místnostech slouží dozvuk k zesílení zvukového vjemu. V nádražních halách splývá odražený zvuk se zvukem následujícím, konce slov se prodlužují a řeč se stává nesrozumitelnou. S dozvukem je třeba počítat při projektování konferenčních a hudebních sálů. K jeho potlačení používáme většího členění stěn, závěsy, čalounění apod.

PŘÍKLAD : V jaké nejmenší vzdálenosti musí stát rovinná stěna od zdroje zvuku, abychom odraženou slabiku vnímali jako ozvěnu ?

Řešení:

Rychlost šíření zvuku ve vzduchu

$$v = 340 \text{ m.s}^{-1}$$

Podmínka pro vznik ozvěny

$$t = 0,1 \text{ s}$$

$$s = ? \text{ m}$$

Pro dráhu rovnoměrného přímočarého pohybu platí :

$$s = v \cdot t$$

Dosadíme do vztahu:

$$s = 340 \cdot 0,1$$

$$s = 34 \text{ m}$$

Vypočtená dráha je však vzdálenost, kterou zvukový signál urazí od zdroje k překážce a zpět, proto ji musíme vydělit 2. $s:2 = 17\text{m}$

Rovinná stěna musí být vzdálena nejméně 17 .

Při vzdálenosti stěny $n \cdot 17\text{ m}$ ($n = 1,2,3,\dots$) vzniká ozvěna n -slabičná. Je-li několik překážek, na kterých se může zvuk odrážet, pak při jejich vhodné vzdálenosti vnímáme po sobě odrazy téhož zvuku, tedy několikanásobnou ozvěnu.

Ohyb zvukových vln vzniká za předměty (zvukovými izolátory), které mají stejné nebo menší rozměry, než je vlnová délka zvukového vlnění (pro slyšitelné frekvence je vlnová délka od 2 cm po 21 m) . Díky ohybu se zvuk šíří za překážku.

4.2.3. Vlastnosti zvuku

Zvukové vlnění charakterizují čtyři základní vlastnosti : **výška, barva, hlasitost a intenzita**.

Výška tónu závisí na frekvenci. Čím je vyšší frekvence chvění zdroje zvuku, tím je větší výška. U jednoduchého tónu určuje frekvence **absolutní výšku** tónu. U složeného tónu, který obsahuje složky různých frekvencí, je výška dána základní, tj. nejnižší frekvencí.

Vzhledem k tomu, že absolutní většinou nedokážeme přímo určit sluchem, zavádíme **relativní výšku tónu**, která je dána poměrem frekvence daného tónu k frekvenci tónu základního. V hudební akustice byl stanoven jako základní tón mezinárodní dohodou tón o frekvenci 440 Hz tzv. komorní a (a^1). V technické praxi se používá jako základní tón tzv. referenční tón o frekvenci 1 kHz.

Barva zvuku umožňuje subjektivně rozlišit tóny stejné výšky, které vydávají různé zdroje nebo rozlišit lidské hlasy. Vnímání různé „barevnosti“ zvuku je způsobeno tím, že žádný přirozený zdroj zvuku se nechvěje s jedinou frekvencí. Výsledný tón je složen ze základního tónu, který určuje výšku zvuku, a z vyšších tónů harmonických, jejichž amplituda je podstatně menší než amplituda základního tónu. Čím více harmonických složek tón obsahuje, tím je jeho barva plnější, „malebnější“. Monofrekvenční tóny (ladička, tónový generátor) znějí dutě, prázdně.

Hlasitost zvuku je subjektivní vlastnost a závisí na citlivosti sluchu. Zvuková vlna v podstatě představuje periodické stlačování a rozpínání pružného prostředí a ve vzduchu dochází k periodickým změnám atmosférického tlaku, který uchem vnímáme jako zvuk určité hlasitosti. Nejnižší tlaková změna, která vyvolá sluchový vjem je asi 10^{-5} Pa a nazývá se práh slyšení. Nejvyšší tlaková změna, při které ještě nevzniká v uchu pocit bolesti je asi

10^2 Pa a při překročení této hranice, která se nazývá práh bolesti, může dojít k porušení ušního bubínku.

Intenzita zvuku je veličina, která byla zavedena pro objektivní hodnocení zvuků. Je

definována vztahem $I = \frac{P}{S}$, kde P je výkon zvukového vlnění a S je plocha, kterou vlnění

prochází. Vzhledem k velkému rozsahu intervalu zvukového vnímání (řádově 13) se ukázalo vhodnější zavést logaritmickou stupnici, kterou nazýváme hladina intenzity. Její jednotkou je bel. V praxi se jednotka desetkrát menší – decibely. Prahu bolesti odpovídá hladina intenzity 130 dB, prahu slyšení 0 dB.

4.2.4. Základy fyziologické akustiky

Lidský hlas se tvoří v hrtanu mezi dvěma hlasovými vazy – hlasivkami. Mezi hlasovými vazy je úzká štěrbina, kterou prochází vzduch. Proudem vzduchu z plic se okraje hlasivek rozechvívají a vzniklé tóny zesílí rezonancí dutiny ústní, hrudní a nosohltanové. V kratších hlasivkách (u žen a dětí) se tvoří základní tón vyšší než v delších hlasivkách u mužů.

Lidský sluchový orgán – ucho – je složen z ucha vnějšího, středního a vnitřního. K vnějšímu uchu patří boltec, který zachycuje zvukové vlny, a zvukovod. Zvukovodem se vede zvuk na pružnou blanku – bubínek. Úkolem středního ucha je snižovat amplitudu výchylky akustických kmitů a přivádět je k systému vnitřního ucha. Ve vnitřním uchu, které je vyplněno kapalinou, je vlastní sluchový orgán, tzv. Cortiho ústrojí. Obsahuje sluchové buňky. Dopadne-li na bubínek zvuková vlna zachycená boltcem, přenesou se energie zvukového vlnění kůstky středního ucha na tekutinu ve vnitřním uchu. Vzniká zde stojaté vlnění, kterým se rezonancí rozkmitávají jemná vlákna sluchového nervu uložená na Cortiho ústrojí. Nejvíce se rozkmitá to vlákno, jehož frekvence je stejná jako frekvence dopadajícího zvukového vlnění. Sluchový vjem se přenáší pomocí elektrických impulsů do nervové soustavy

4.2.5. Příklady - Akustika

- 1) Frekvence ultrazvuku $f = 2 \cdot 10^6$ Hz. Jaká je délka vlny v mořské vodě, jestliže předpokládáme rychlost šíření vlnění $v = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$?
[0,75 mm]
- 2) Zvuk odražený v mořské vodě od hejna sledů se vrátil za 0,6 s. Vypočítejte vzdálenost hejna sledů od zdroje zvuku.
[450 m]

- 3) Zvuk se šíří povrchem Země 13krát rychleji než vzduchem. Jak velký časový rozdíl zjistí pozorovatel ve vzdálenosti 17 km, jestliže zaslechne výbuch, který se šíří vzduchem, a pocítí zachvění půdy, které vzniklo při výbuchu ? Rychlost zvuku je 340 m.s^{-1}
- [46,1 s]

5. OPTIKA

5.1. Vlnová a kvantová optika

Optika je část fyziky, která zkoumá podstatu světla a zákonitosti světelných jevů vznikajících při šíření světla a při vzájemném působení světla a látky.

Vlastnosti světla podmiňují různý přístup k výkladu světelných jevů a použití metod jejich zkoumání. Na základě toho dělíme optiku na:

- 1) **Optiku vlnovou**, která se zabývá jevy potvrzujícími vlnovou povahu světla. Z nich má největší význam interference, ohyb a polarizace.
- 2) **Optiku paprskovou (geometrickou)**, která při popisu optického zobrazení zanedbává vlnovou povahu světelného záření. Je založena na principu nezávislosti světelných paprsků, na přímočarém šíření světla v homogenních prostředích a na zákonech odrazu a lomu světla.
- 3) **Optiku kvantovou**, která se zabývá ději, při nichž se projevuje kvantový ráz světla. Ten odpovídá představě, že světlo je tvořeno částicemi – fotony

5.1.1. Vývoj názorů na podstatu světla

V 17. a 18. století vznikla dvě navzájem si odporující pojetí povahy světla.

- 1) **Newtonova korpuskulární teorie**: Světlo je tok částic zvaných korpuskule, které se šíří přímočaře optickým prostředím, od neprůhledného prostředí se odrážejí a při vstupu do oka vyvolají vjem vidění. Nedostatkem této teorie byla skutečnost, že nedokázala objasnit některé jevy jako např. ohyb světla.
- 2) **Huygensova vlnová teorie**: Podle Huygense je světlo podélné mechanické vlnění. Mechanické vlnění však potřebuje ke svému šíření hmotné prostředí a bylo nutno vysvětlit šíření světla ve vakuu. Podle této teorie se světlo šíří řídkým tzv. světelným éterem. Vlnová teorie objasnila podstatu tehdy známých jevů vlnové povahy, ale existence světelného éteru nebyla nikdy dokázána.
- 3) **Maxwellova elektromagnetická teorie (19. století)** : Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, které se šíří i ve vakuu. Podle této teorie jsou v tělese atomové oscilátory, které vysílají spojitě elektromagnetické vlnění.
- 4) **Kvantová teorie světla** Uveřejnil ji v roce 1900 německý fyzik Max Planck. K výkladu vzniku a šíření záření učinil předpoklad, že záření má diskrétní (nespojitou) povahu a záleží na jeho frekvenci, zda se nespojitost projeví či nikoli.

Podle současných představ se projevuje dvojí povaha záření: **korpuskulární i vlnová**.

Částicová povaha se nejvýrazněji projevuje u krátkovlnného záření s velkou frekvencí (např. rentgenové záření) a vlnová povaha se výrazněji projevuje u dlouhovlnného záření, tj. s malou frekvencí. Avšak ani vlnová, ani korpuskulární představa sama o sobě nedává úplný obraz o povaze světla. Jen obě hlediska dohromady umožňují objasnění všech světelných jevů. Této dvojakosti říkáme **dualismus**.

Světlo je tok částic tzv. fotonů, které nesou elementární kvantum energie a zároveň má charakter příčného elektromagnetického vlnění.

5.1.2. Charakteristiky světla jako vlnění

Rychlost světla byla v dřívějších stoletích považována za nekonečnou, protože nešla tehdejšími metodami změřit. Prvním úspěšným měřením rychlosti světla lze nazvat výsledek, který v 17. století získal dánský astronom Römer. Astronomickou metodou z různých dob zatmění měsíců Jupitera při jejich pozorování ze Země stanovil hodnotu $2,2 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Současná měření rychlosti světla poskytují velmi přesné výsledky, přičemž využívají moderní aparatury (např. lasery) a důmyslné metody měření. Na jejich základě byla zjištěna hodnota rychlosti světla ve vakuu $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$

Tato hodnota byla určena metodou, která je založena na měření frekvence helium-neonového laseru a používá se od roku 1974. Bylo dosaženo přesnosti vyjádřené odchylkou $1,2 \text{ m.s}$.

Při většině výpočtů vystačíme s přibližnou hodnotou $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Rychlost světla můžeme vypočítat dvěma způsoby:

1) pomocí charakteristik vlnění $c = \lambda \cdot f$

λ ... vlnová délka

f ... frekvence

2) pomocí charakteristik prostředí $c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon \cdot \mu}}$

ε ... permitivita prostředí (charakterizuje elektrické vlastnosti prostředí)

μ ... permeabilita prostředí (charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí)

Četnými pokusy byla zjištěna tato **3 pravidla** týkající se rychlosti světla:

- 1) Rychlost světla je ve všech prostředích menší než ve vakuu.
- 2) Rychlost světla v daném prostředí nezávisí na barvě, tedy na vlnové délce.
- 3) Rychlost světla nelze zvětšit ani zmenšit vzájemným pohybem zdroje a pozorovatele.

Frekvence je určena zdrojem světla a při průchodu různými látkami se nemění. Je nejdůležitější veličinou charakterizující vlnění, závisí na ní jeho vlastnosti a účinky. Fyziologický vjem zvaný vidění vyvolává elektromagnetické vlnění o frekvencích $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz až $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz. Světlo různých frekvencí vyvolává u člověka různý zrakový vjem, který charakterizujeme jako barvu světla. Nejmenší frekvenci má světlo červené barvy a největší frekvenci světlo fialové barvy. Oko je nejcitlivější na světlo žlutozelené barvy.

Vlnová délka je při konstantní rychlosti nepřímo úměrná frekvenci.

Červené světlo má ve vakuu vlnovou délku 760 nm a fialové světlo 390 nm. Při průchodu světla různými látkami se vlnová délka na rozdíl od frekvence mění

5.1.3. Druhy elektromagnetického vlnění

Podle vlnové délky (případně frekvence) rozlišujeme několik druhů elektromagnetického záření. Není mezi nimi ostrá hranice, přechody mezi nimi jsou plynulé nebo se oblasti jednotlivých druhů záření i překrývají.

Rádiové záření má nejdelší vlnovou délku. Podrobněji se probere v elektřině.

Infračervené záření zaujímá oblast mezi nejkratšími rádiovými vlnami ($\lambda = 10^{-3}$ m) a světlem.

Zdrojem jsou tělesa zahřátá na vyšší teplotu. Při pohlcování infračerveného záření probíhá tepelná výměna a ozářené těleso se zahřívá. Např. topné těleso infrazářiče hřeje, ale nesvítí.. Nepůsobí na normální fotografickou emulzi, pouze na speciálně připravené emulze, které lze použít pro fotografování v noci. Využívá se v bezpečnostní technice – čidla reagující na teplo.

Ultrafialové záření je elektromagnetické vlnění o vlnové délce kratší než má světlo fialové barvy a jeho nejkratší vlnové délky zasahují do oblasti rentgenového záření.

Zdrojem jsou tělesa zahřátá na velmi vysokou teplotu (Slunce, elektrický oblouk) nebo speciální výbojky naplněné párami rtuti (horské slunce). UV záření silně pohlcuje atmosféra. Je příčinou vzniku ozónu, protože způsobuje ionizaci vzdušného kyslíku. Na zrakový orgán působí škodlivě. V lidském těle produkuje vitamín D. Ozáření pokožky vyvolává vznik ochranného pigmentu, což se projevuje zhnědnutím. Velké dávky UV záření škodí lidskému organismu, může vzniknout rakovina kůže. Ničí choroboplodné mikroorganismy, proto se používá v lékařství při sterilizaci.

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění, jehož vlnové délky leží v intervalu 10^{-8} m až 10^{-12} m. Zdrojem je vakuová trubice tzv. rentgenka. Elektrony emitované z katody jsou značně urychleny elektrickým polem, dopadají na anodu, kde se velká část jejich

kinetické energie mění ve vnitřní energii a pouze malá část (asi 1 %) na energii rentgenového záření.

Rentgenové záření částečně proniká látkami a částečně je jimi pohlcováno. Pohlcování závisí na frekvenci. Záření s vysokou frekvencí se nazývá **tvrdé záření**, prochází i značně silnými vrstvami látek a méně se pohlcuje. Využívá se v defektoskopii a v lékařství v diagnostice. Rentgenové záření působí na fotografickou emulzi. Části prozařovaného tělesa, které obsahují prvky s větším atomovým číslem (v těle např. kosti), pohltnou více záření. To se na fotografickém negativu projeví světlejším obrazem. **Měkké záření** má nižší frekvenci, méně prostupuje látkou a je tedy více pohlcováno. Využívá se v rentgenové terapii, kde svými účinky vyvolává v lidském těle potřebné fyziologické změny.

γ -záření je elektromagnetické vlnění o vlnové délce 10^{-15} m – 10^{-12} m. Má svůj původ v jádru atomu. Silně prostupuje látkami. Působí škodlivě na lidský organismus.

5.1.4. Jevy na rozhraní dvou prostředí

Vzhledem k průchodnosti světla prostředím rozlišujeme tato prostředí:

- **optické prostředí** (světlo se jím šíří), dělí se na **průhledné a průsvitné**, přičemž průhlednost a průsvitnost je ovlivněna tloušťkou prostředí a příměsemi.

Nejlepší optické prostředí je vakuum.

- **neprůhledné prostředí** (světlo se jím nešíří)

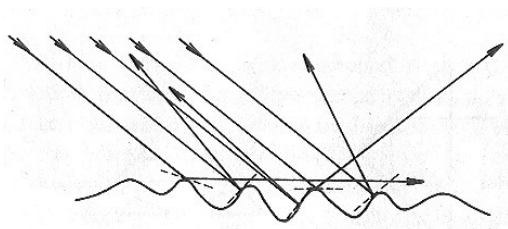
Na rozhraní dvou prostředí může nastat odraz nebo lom světla.

Odraz světla je jev, ke kterému dochází na rozhraní dvou optických prostředí (vzduch – vodní hladina) nebo na rozhraní optického a neprůhledného prostředí (vzduch – zrcadlo). Paprsky světla dopadnou na rozhraní a vracejí se zpět do původního prostředí.

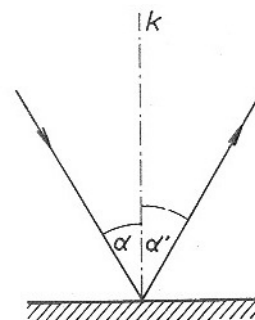
Odraz světla se řídí zákonem odrazu.

Při odrazu světla mohou nastat dva případy:

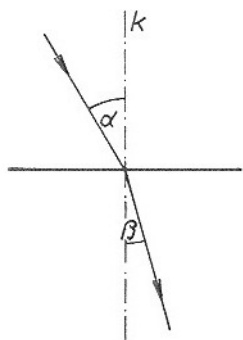
a) Zrcadlení nastává na velmi hladkých plochách, jejichž nerovnosti jsou menší než vlnová délka světla. Dopadne-li na zrcadlo rovnoběžný svazek paprsků, odražené paprsky jsou opět rovnoběžné.



b) Rozptyl nastává na plochách, jejichž nerovnosti jsou větší než vlnová délka paprsků, se „rozptýlí“ do různých směrů (obr.) Rozptyl je důležitý



v případech, kdy potřebujeme, aby se světlo dostalo do míst, do kterých by se podle zákona přímočarého šíření nedostalo.



Lom světla nastává na rozhraní dvou optických prostředí. Světlo projde z jednoho prostředí do druhého, kde změní směr a rychlost.

Lom světla se řídí zákonem lomu. U lomu světla rozlišujeme dva případy:

a) Prochází-li světlo z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí, tzn. do prostředí ve kterém se šíří menší rychlostí a ve kterém má větší absolutní index lomu, nastane lom ke kolmici (obr)

b) Prochází-li světlo z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí, nastane lom od kolmice.

Absolutní index lomu je materiálová konstanta, která udává kolikrát se šíří světlo rychleji ve vakuu, než v dané látce

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

Z uvedeného vztahu vyplývá, že index lomu vakua je 1.

Relativní index lomu udává poměr rychlostí dvou prostředí, kterými se světlo šíří.

Totální (úplný) odraz je jev, ke kterému dochází při lomu od kolmice, tzn. při přechodu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí

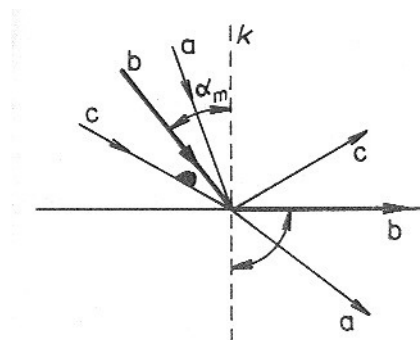
(paprsek) Dopadne-li světlo na rozhraní pod úhlem větším než je tzv. mezní úhel α_m , neprojde do druhého prostředí, ale odráží se zpět (paprsek c)

Mezní úhel α_m je úhel dopadu, kterému odpovídá úhel lomu 90° (paprsek b)

Pro případ úplného odrazu můžeme zákon lomu

napsat ve tvaru:

$$\sin \alpha_m = \frac{1}{n}$$



Z tohoto vztahu vyplývá, že měření mezního úhlu umožňuje určit index lomu látky, kterou světlo prochází. Na tom jsou založeny přístroje pro měření indexu lomu zvané **refraktometry**.

Úplný odraz se využívá ke konstrukci **odrazných hranolů**, které v mnoha optických přístrojích slouží ke změně směru paprsků.

Na úplném odrazu jsou založeny **vláknové vlnovody**. Základem vláknového vlnovodu je tenké skleněné vlákno, jehož střední část má větší index lomu než obvodová vrstva. Světelný paprsek se na obvodové vrstvě úplně odráží a světlo se šíří po trajektorii dané tvarem vlákna.

PŘÍKLAD: Zdroj světla je umístěn pod vodou. Index lomu vody je 1,33. Ve kterém případě projde světelný paprsek z vody do vzduchu, jestliže dopadá na vodní hladinu pod úhlem
a) 30° b) 40° c) 50° ?

Řešení: Světlo neprojde z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí, jestliže úhel dopadu bude větší než mezní úhel na rozhraní dvojic prostředí. Musíme tedy vypočítat mezní úhel na rozhraní mezi vodou a vzduchem. $n_1 = 1,33$

$$n_2 = 1$$

$$\alpha_m = ?^\circ$$

$$\alpha_m =$$

Mezní úhel na rozhraní mezi vodou a vzduchem je 48°45'. Světlo projde do vzduchu v případě a) a b).

PŘÍKLAD : Určete index lomu oleje, jestliže světelný paprsek přecházející z oleje do vody má úhel dopadu 30° a úhel lomu 34°50'. Index lomu vody je 1,33.

Řešení : $\alpha = 30^\circ$

$$\beta = 34^\circ 50'$$

$$n_2 = 1,33$$

$$n_1 = ?$$

Vyjdeme ze zákona lomu

odtud

dosadíme

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

$$n_1 = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot n_2$$

$$n_1 = \frac{\sin 30^\circ}{\sin 34^\circ 50'} \cdot 1,33 = 1,52$$

Index lomu oleje je 1,52.

5.1.5. Příklady

- 1) Vypočtete rychlost světla ve skle o indexu lomu 1,5.

$$[1,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- 2) Paprsek dopadající ze vzduchu na vodní hladinu se láme pod úhlem 20° . Určete úhel dopadu, je-li index lomu vody 1,33.

$$[27^\circ 03']$$

- 3) O jaký úhel se odchýlí od původního směru paprsek světla, který dopadá ze vzduchu na vodní hladinu pod úhlem 30° ?

$$[8^\circ]$$

- 4) Silný třpyt diamantů způsobuje malý mezní úhel $24^\circ 36'$. Vypočtete index lomu diamantu.

$$[2,4]$$

- 5) Určete interval vlnové délky světla v látce o indexu lomu 2, je-li $f_{\min} = 3,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ a $f_{\max} = 7,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.

$$[200 \text{ nm} - 400 \text{ nm}]$$

- 6) Na sklo s indexem lomu 1,6 dopadá světlo tak, že odražený a lomený paprsek svírají pravý úhel. Určete úhel dopadu.

$$[58^\circ]$$

5.1.6. Interference světla

Podstata interference spočívá v tom, že vlnění, která přicházejí do určitého bodu z různých zdrojů, se v tomto bodě skládají. To znamená, že u mechanického vlnění se sčítají okamžité výchylky a u elektromagnetického vlnění se sčítají okamžité hodnoty elektrické složky a magnetické složky elektromagnetického vlnění.

Za normálních podmínek interferenci světla nepozorujeme, protože lidské oko je schopné vnímat změny odpovídající frekvenci kolem 20 Hz, ale frekvence světla je 10^{14} Hz . Aby bylo interferenci světla možné pozorovat, musí být splněn základní předpoklad – **koherence** světelného vlnění.

Koherentní jsou světelná vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění.

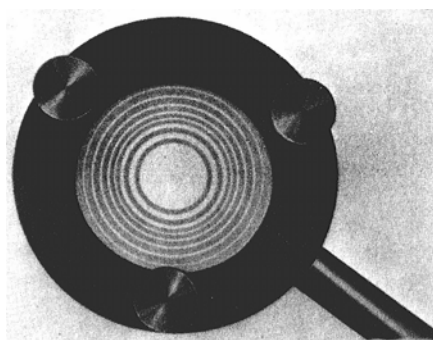
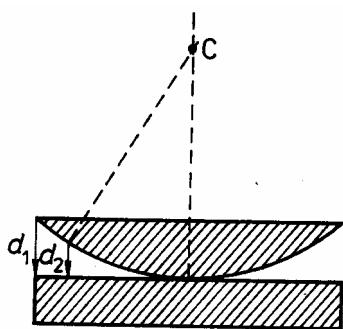


Dobré podmínky pro pozorování interferenčních jevů vytváří světlo vyzařované lasery. Některé projevy interference světla známe z běžné zkušenosti. Jsou to například duhové barvy na mýdlových bublinách nebo duhově zbarvené olejové skvrny na mokré vozovce. Jedná se o interferenci na velmi

tenkých vrstvách. Je-li tenká vrstva tvořena dokonale rovinnými rovnoběžnými plochami, jeví se v monofrekvenčním světle v závislosti na tloušťce světlá nebo tmavá. Pokud rozhraní není dokonale rovinné, pozorujeme na povrchu světlé a tmavé proužky různého tvaru, interferenční maxima a minima.

Při osvětlení bílým světlem je tenká vrstva duhově zbarvená.

Jednoduché zařízení, které umožňuje pozorovat interferenci, ale lze jím i měřit vlnovou délku světla sestrojil I. Newton. Tato tzv. **Newtonova skla** jsou tvořena skleněnou deskou s rovnoběžnými rovinnými plochami, ke které je přiložena ploskovypuklá čočka. (obr.). Mezi deskou a čočkou je vzduchová vrstva proměnné tloušťky a při dopadu světla dochází k interferenci světla odraženého od obou rozhraní vzduchové vrstvy. Interferenční obrazec pro monofrekvenční světlo má podobu soustavy tmavých a světlých kroužků, kterým říkáme **Newtonovy kroužky** (obr.)



Užití interference: Na interferenci vysoce koherentního světla laserů je založena významná metoda záznamu a trojrozměrného vybavování obrazu – **holografie**.

Interferenční jevy se využívají při měření vlnové délky světla, měření tloušťky tenkých materiálů, měření poloměru křivosti čoček, při kontrole kvality obráběné plochy

5.1.7. Ohyb světla (difrakce)

Ohyb světla vzniká na překážkách, jejichž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou dopadajícího světla. Světlo se šíří do míst, kde by podle zákona přímočarého šíření měl být geometrický stín. Okraje překážek (tenký drátek, úzká štěrbina, ostrá hrana) se stávají podle Huygensova principu zdrojem nového vlnění, jsou to zdroje koherentní a mohou spolu interferovat. Na stínítku pak vznikne soustava světlých a tmavých proužků – ohybový obrazec.

5.1.8. Polarizace světla

Světlo vysílané běžnými zdroji (Slunce, žárovka, plamen) je **nepolarizované**, tzn., že elektrická i magnetická složka vlnění mění směr nahodile a světlo má stejné vlastnosti ve všech rovinách proložených ve směru jeho šíření.

Polarizací rozumíme proces, kterým docílíme, že elektrická i magnetická složka (vektor elektrické intenzity a magnetické intenzity) leží ve stálých rovinách. Tímto procesem vznikne polarizované světlo.

Světlo lze polarizovat třemi způsoby : odrazem

lomem

dvojlomem

Užití polarizace : V praxi se polarizované světlo využívá při zkoumání opticky aktivních látek. Tyto látky mají schopnost stáčet kmitovou rovinu polarizovaného světla. Opticky aktivní je např. cukr, který stáčí kmitovou rovinu vpravo. Toho se využívá k měření koncentrace cukru v roztoku.

V mineralogii se využívá polarizovaného světla ke zkoumání vlastností krystalů.

V technické praxi se využívá polarizace ke zkoumání mechanických napětí v různých objektech.

5.1.9. Fotoelektrický jev

Na konci 19. století ruský fyzik Stoletov a německý fyzik Hallwachs zjistili, že při dopadu světelného záření s dostatečně velkou frekvencí na povrch některých kovů jsou z jejich povrchu emitovány elektrony. Tento jev se nazývá **vnější fotoelektrický jev**.

Studiem tohoto jevu bylo zjištěno, že:

- 1) Počet emitovaných elektronů závisí na intenzitě dopadajícího záření.
- 2) Energie emitovaných elektronů je přímo úměrná frekvenci dopadajícího záření.

Některé poznatky vyplývající z četných experimentů nedovedla tehdejší klasická fyzika objasnit. Vysvětlení a matematické zpracování bylo provedeno na základě poznatků kvantové

fyziky, jejímž zakladatelem byl Max Planck. Albert Einstein obdržel za objasnění fotoefektu Nobelovu cenu.

Kvantová fyzika vychází z tvrzení, že **vysílání a pohlcování energie při záření se děje jen v celistvých násobcích jistého kvanta energie.**

$$E = n \cdot h \cdot f \quad n \dots \text{celé kladné číslo}$$

Velikost elementárního (základního) kvanta energie, jehož nositelem je foton, je dána

vztahem: $\varepsilon = h \cdot f$

$f \dots$ frekvence záření
 $h \dots$ Planckova konstanta
 $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Aby elektron mohl emitovat, musíme mu dodat určité množství energie:

$$E = E_K + W$$

$E_K \dots$ kinetická energie elektronu
 $W \dots$ výstupní práce

Výstupní práce je množství energie potřebné k uvolnění elektronu z obalu atomu, tedy k překonání vazebních sil, a vypočítá se ze vztahu :

$$W = h \cdot f_0$$

$f_0 \dots$ charakteristická (mezní) frekvence (konstanta pro daný kov)

Aby došlo k fotoelektrickému jevu, musí být frekvence dopadajícího vlnění vždy větší než charakteristická frekvence.

Poznámka: V atomové a jaderné fyzice měříme energii většinou v elektronvoltech eV. Je to vedlejší jednotka a odpovídá energii, kterou získá částice s elementárním nábojem e urychlená napětím jednoho voltu.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Příklad: Vypočítejte energii fotonu v elektronvoltech pro fotony: 400 nm, 760 nm, 1 nm, 0,1 nm, 1 mm a 1 km.

Řešení :

$$\begin{aligned} c &= 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ \lambda &= 400 \text{ nm} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m} \\ h &= 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ \text{eV} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

Frekvenci vypočteme ze vztahu
a dosadíme do vztahu

$$c = f \cdot \lambda \quad \text{odtud} \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\varepsilon = h \cdot f$$

$$\varepsilon = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Dosadíme číselné hodnoty

$$\varepsilon = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,96875 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Hodnotu energie převedeme na eV:

$$4,96875 \cdot 10^{-19} \text{ J} : 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,1 \text{ eV}$$

Foton o vlnové délce 400 nm má energii 3,1 eV. Energii zbývajících fotonů vypočteme stejným postupem. [1,6 eV; 1240 eV; $1,24 \cdot 10^4$ eV; $1,24 \cdot 10^{-3}$ eV; $1,24 \cdot 10^{-9}$ eV]

6. ATOMOVÁ FYZIKA

Je jedním z nejmladších oborů fyziky. Zabývá se strukturou atomu, zkoumáním elementárních částic a studiem jevů, které probíhají v atomovém jádře, elektronovém obalu a při přeměnách atomů.

Atomová fyzika se dělí na: fyziku atomového obalu
jadernou fyziku

6.1. Modely atomů

Představy o tom, že se látky skládají z malých, dále už nedělitelných částic (atomos- nedělitelný) vznikly již ve starověku. Strukturou atomu se podrobněji zabývali fyzikové až v novověku, kdy v 19.století v souvislosti s rozvojem užití elektřiny vznikla potřeba objasnit elektrické jevy. Dnešní představa o struktuře je tvořena posloupností následujících modelů.

Thompsonův pudinkový model

Anglický fyzik Thompson si představoval atom jako kladně nabitou masu (puding), ve které jsou rozmístěny záporné elektrony (hrozinky). Atom jako celek je elektricky neutrální.

Rutherfordův planetární model

Anglický fyzik Ernst Rutherford ostřeloval tenkou folii částicemi ,tedy částicemi s kladným nábojem a zjistil, že jen malý počet částic se zřetelně odchýlil od původního směru pohybu. Výsledek tohoto experimentu vedl k závěru, že Thompsonův model je nevyhovující, jelikož atomy jsou snadno prostupné a kladný náboj i hmota musí být soustředěna do velmi malého prostoru uprostřed atom. Rutherford vyslovil tuto představu o stavbě atomu:

Atom se skládá ze dvou částí:

- 1) **atomového jádra**, které obsahuje kladné protony a neutrony bez náboje. Je v něm soustředěna většina hmotnosti atomu.
- 2) **atomového obalu** tvořeného zápornými elektrony, které obíhají kolem jádra po mírně výstředných eliptických drahách podobných oběžným drahám planet kolem Slunce.
Počet elektronů v obalu se rovná počtu protonů v jádře, takže atom je navenek elektricky neutrální.

Bohrův model

Dánský fyzik Niels Bohr použil k vytvoření svého modelu jednak představ Rutherfordových, jednak představ Planckovy kvantové teorie. Vyslovil 3 **postuláty**, které upřesňují pohyb elektronů v obalu.

I.postulát: Elektrony se v obalu pohybují po kruhových drahách s přesně daným poloměrem (důsledek kvantového přijímání a vyzařování energie)

II.postulát: Pohybuje-li se elektron po určité dovolené trajektorii, musí mít určitou hodnotu energie. (Elektrická síla, kterou je elektron přitahován ke kladnému jádru musí být v rovnováze s odstředivou silou)

III.postulát: Jestliže přijme elektron energii zvenčí, přeskočí na dráhu s větší poloměrem. Jestliže elektron energii vyzaří, přeskočí na dráhu s menším poloměrem.

Výpočty podle Bohrovovy teorie pro atomy vodíku souhlasily se spektrem získaným experimentálně. Později se ukázalo, že pro složitější atomy s více elektrony Bohrovův model nevyhovuje.

Schrodingerův kvantově mechanický model

Elektrony se v atomu nepohybují po kruhových nebo eliptických trajektoriích. Lze jen vypočítat pravděpodobnost, s jakou se elektron vyskytuje v určité oblasti kolem jádra atomu zvané orbit.

6.2. Jevy probíhající v elektronovém obalu atomu

Elektrony obsazují v obalu dráhy tak, aby celková energie atomu byla co nejmenší. Říkáme, že atom je v základním stavu. Jestliže elektron přijme energii zvenčí, nachází se atom v tzv. excitovaném (vzbuzeném) stavu. S příjmem a výdejem energie elektronu souvisí tyto jevy:

Excitace je krátkodobý jev. Elektron přijme energii a přeskočí na dráhu s větším poloměrem. Prvky tak mohou měnit svá mocenství a tvořit větší množství sloučenin.

Ionizace. Elektron přijme tak velké množství energie, že překoná vazební síly a opustí atom. Z atomu vznikne kladný iont.

Luminiscence je jev známý již ze starověku a rozumíme jím samovolné záření některých pevných a kapalných látek. Podstata luminiscence spočívá v tom, že elektron při přechodu na dráhu s menším poloměrem vyzaří přebytečnou energii ve formě světla. Mezi látky schopné „světélkovat“ tzv. luminofovy patří například sulfidy zinečnatý a kademnatý, v nichž jsou jako příměsi atomy zlata, stříbra, mědi a alkalické halogenidy (NaCl, KCl, NaJ) s příměsí atomů zlata, thalia atd.

Luminiscenci můžeme dělit z hlediska doby trvání na **fluorescenci**, která trvá krátkodobě po dobu dodávání energie a **fosforescenci**, která trvá i po přerušení přísunu energie

V praxi se luminiscenční jevy využívají v osvětlovací technice (zářivky, výbojky), u stínítek obrazovek, k výrobě světélkujících barev apod.

6.3. Atomové jádro

Jádro atomu obsahuje kladné protony a neutrony bez elektrického náboje. Tyto částice označujeme společným názvem nukleony (latinsky nukleus = jádro)

Nukleonové číslo A udává počet nukleonů v jádře.

Atomové číslo Z určuje: 1. počet protonů v jádře

2. počet elektronů v obalu atomu

3. pořadí v periodické soustavě prvků

Jádra určitého prvku musí mít přesně daný počet protonů, počet neutronů se může lišit.

Jednoznačně můžeme jakýkoliv prvek zapsat tímto způsobem: ${}_Z^A X$

kde X je značka prvku, Z atomové číslo, A nukleonové číslo

Nuklid je soubor atomů se stejným atomovým i nukleonovým číslem.

Izotop je nuklid téhož chemického prvku, který má v jádře stejný počet protonů, počet neutronů se liší. Například jádro lehkého vodíku obsahuje 1 proton, těžký vodík (deuterium) má v jádře 1 proton a 1 neutron, supertěžký vodík (trícium) má v jádře 2 neutrony.

6.4. Síly působící v jádře

1) V jádře působí tyto síly:

gravitační – soudržné, jejich velikost můžeme vypočítat pomocí Newtonova všeobecného gravitačního zákona

2) **elektrické** – odpuzivé, jsou důsledkem silového působení kladných protonů a jejich velikost můžeme vypočítat pomocí Coulombova zákona. Výpočty lze dokázat, že elektrické síly jsou větší než gravitační, přesto jádro drží pohromadě. Je to způsobeno existencí tzv. jaderných sil.

3) **jaderné síly** – jsou přitažlivé, mají velkou intenzitu, krátký dosah a nezávisí na typu nukleonů

6.5. Hmotnostní schodek

Při zkoumání jádra bylo zjištěno, že hmotnost jádra jako celku složeného z určitého počtu částic je menší, než součet hmotností jednotlivých nukleonů. Vzniká tzv. hmotnostní schodek

$$B_j = \sum m_i - m_j$$

$\sum m_i$. . . součet hmotností nukleonů obsažených v jádře

m_j . . . hmotnost celého jádra

Toto zdánlivé popření zákona zachování hmotnosti vysvětlujeme následovně : Při vzniku jádra se část látkové formy hmoty přemění v jaderné pole. Existence tohoto pole je dokázána přítomností jaderných sil. S přeměnou hmotnosti souvisí i energetická změna. Kinetická energie původně volných částic se změní ve vazební energii jádra.

6.6. Radioaktivita

Radioaktivitou nazýváme jev, při kterém se mění jádro prvku v jádro jiného prvku. Tato přeměna je provázena emisí pronikavého radioaktivního záření.

Objevitelem radioaktivity byl Henry Becquerel.

Rozlišujeme dva druhy radioaktivity:

- a) **přírozená radioaktivita** – dochází k ní samovolně bez vnějšího zásahu. O výzkum přírozené radioaktivity a radioaktivních přeměn se zásadním způsobem zasloužili Marie a Pierre Curieovi. V návaznosti na Becquerelův objev měřili stupeň radioaktivity různých látek podle ionizačních účinků vysílaného záření a porovnávali tato měření s chemickým obsahem příslušného radioaktivního prvku. Zjistili, že rychlost samovolného záření nelze fyzikálně nijak ovlivnit. Objevili nové prvky – radium a polonium. Byla jim udělena Nobelova cena za fyziku.

Uran 238, uran 235 a thorium 232 jsou výchozími radionuklidy přírodních přeměnových řad. Např. řada, která začíná uranem 238 má 16 členů a končí stabilním olovem 206. V horninách, které obsahují uran jsou stále přítomny všechny radionuklidy celé řady a postupně narůstá obsah olova.

- b) **umělá radioaktivita** vzniká u méně stabilních lehkých a středně těžkých prvků. Aby došlo k přeměně jádra, musí být dodáno větší množství energie. Umělé radionuklidy se dnes připravují průmyslově ostřelováním atomových jader částicemi z urychlovačů nebo neutrony z jaderných reaktorů. Bylo jich získáno již několik tisíc. Mají užití v mnoha oblastech vědy, techniky a medicíny. Uměle byly získány radionuklidy s atomovými čísly většími než 92, tzv. transurany.

První umělou reakci provedl Rutherford. O výzkum umělé radioaktivity se zasloužil Frédéric Joliot-Curie se svou ženou Irene Curie.

6.7. Radioaktivní záření

Radioaktivní záření je pronikavé záření doprovázející radioaktivní rozpad. Jeho zkoumáním bylo zjištěno, že existuje několik druhů, které se liší svou schopností pronikat látkou a chováním v elektrickém a magnetickém poli.

Záření α je tvořeno tokem α -částic, což jsou jádra helia He . Pohltí je list papíru, pohybují se velkou rychlostí. Mají kinetickou energii 2 MeV- 8 MeV a silné ionizační účinky.

α -částice se v elektrickém poli vychyluje k zápornému pólu.

Záření β je tvořeno tokem rychle letících elektronů, které vzniknou rozpadem neutronu.

Některé radionuklidy vyzařují místo elektronů kladně nabitě pozitrony, a proto rozlišujeme záření β^+ a β^- . Je pronikavější než α . Je pohlceno tenkým hliníkovým plechem.

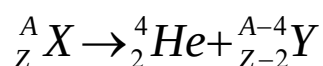
V elektrickém a magnetickém poli se vychyluje na opačnou stranu než α -záření.

Záření γ je elektromagnetické záření s vlnovými délkami kratšími než 300 pm. Protože fotony nemají elektrický náboj, záření γ se neodchyluje v elektrickém ani magnetickém poli. Silně ionizuje vzduch, uvolňuje z látky nabitě částice. Jeho rychlost je rovna rychlosti světla. Je nejpronikavější ze všech druhů záření. Škodí živým organismům. Lze je oslabit silnou vrstvou materiálu obsahující jádra těžkých prvků, např. olova.

6.8. Posunovací zákony

Charakterizují změny jádra vyvolané radioaktivním rozpadem.

- 1) **posunovací zákon:** Vyzáří-li jádro prvku α - záření, vznikne prvek, který je o dvě místa blíže počátku periodické soustavy prvků než prvek původní a jeho jádro má o 4 nukleony méně.



- 2) **posunovací zákon:** Vyzáří-li jádro prvku β - záření, vznikne prvek, který bude ležet v periodické soustavě prvků za původním prvkem. Nukleonové číslo se nezmění.



- 3) **posunovací zákon:** Vyzáří-li jádro prvku γ - záření, charakter jádra se nezmění. (γ - záření zpravidla provází α či β rozpad

6.9. Jaderné reakce

Pod pojmem jaderná reakce rozumíme přeměnu jádra vyvolanou vzájemným působením (srážkou) s jinými jádry nebo částicemi. Při jaderných reakcích se uvolňuje velké množství energie.

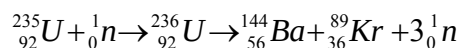
Rozlišujeme dva typy jaderných reakcí:

- 1) **štěpení jader** – z těžších jader vznikají jádra se střední hmotností
- 2) **jadernou syntézu** – jádra s malou hmotností se spojují na jádra střední hmotnosti

Při jaderných reakcích platí tyto zákony zachování:

- A) Spojený zákon zachování hmotnosti a energie:** Energie a hmotnost částic účastnících se jaderné reakce se zachovává.
- B) Zákon zachování elektrického náboje:** Algebraický součet nábojů všech částic účastnících se jaderné reakce se zachovává.
- C) Zákon zachování hybnosti:** Výsledný vektor hybnosti všech částic vstupujících do reakce se rovná výslednému vektoru hybnosti všech částic z reakce vystupujících.
- D) Zákon zachování nukleonů:** Při jaderné reakci se nemění počet nukleonů (dochází pouze k jejich přerozdělení)

Štěpení jader probíhá vždy v řetězu a k uskutečnění této reakce potřebujeme částici s tzv. aktivační energií, která jádro rozštěpí, zpravidla neutron. Neutron zpomalený průchodem vrstvou těžké vody nebo parafinu může rozštěpit těžké jádro uranu 235 na dvě přibližně stejně těžká jádra podle reakce:



Vzniklá jádra jsou v excitovaném stavu, při reakci se uvolní 3 nové neutrony a energie kolem 200 MeV. Nově uvolněné neutrony mohou po zpomalení štěpit další jádra a tak dojde k řetězové reakci. K uskutečnění řetězové reakce je třeba mít k dispozici určité množství štěpného materiálu, tzv. kritické množství.

Existují pouze čtyři nuklidy, které mohou sloužit jako štěpné materiály k získávání jaderné energie: uran 235, plutonium 239, uran 233 a plutonium 241.

Zařízení, v němž se udržuje řetězová jaderná reakce a v němž se uvolňuje energie štěpením jader, se nazývá **jaderný reaktor**. K uskutečnění řízené jaderné řetězové reakce je nutné, aby se neutrony v nuklidu uranu 235 pohltily, tj. musí se nějakým způsobem zpomalit. Látky sloužící ke zpomalení neutronů se nazývá **moderátory**. Jsou to např. těžká voda nebo uhlík ve formě grafitu.

Jaderná syntéza – Aby došlo k syntéze, je třeba jádra prvků k sobě přiblížit na takovou vzdálenost, ve které se projeví působnost jaderných sil. Teoreticky toho jde dosáhnout dvěma způsoby:

- 1) vysokými tlaky (technicky nemožné)
- 2) vysokými teplotami (řádově 10⁸ K), proto se jaderná reakce nazývá termojaderná či termonukleární reakce. Typická termonukleární reakce probíhá na Slunci a hvězdách,

které se nacházejí ve vývojovém stádiu hlavní posloupnosti stejně jako naše Slunce.

Jedná se o tzv. proton-protonový cyklus, při kterém vzniká z jader vodíků jádro hélia.

6.10. Elementární částice

Mikročástice tvoří hmotu, která vyplňuje prostor tohoto světa. Látka (jádra, atomy, molekuly) je tvořena třemi druhy částic – protony, neutrony a elektrony. Postupně bylo objeveno mnoho dalších částic v kosmickém záření, později na urychlovačích. Mají různou dobu života, různý význam ve struktuře hmoty. Existuje jich více než 130. Jedním z kritérií dělení je jejich hmotnost.

- 1) **fotony** - mikročástice bez klidové hmotnosti, tzv. polní částice, existují pouze v pohybu
- 2) **leptony** – velmi lehké částice s různě dlouhou dobou života (elektron, neutrino)
- 3) **mezony** – středně těžké částice s relativně krátkou dobou života (10^{-8} s), existují v průběhu jaderných reakcí (piony)
- 4) **baryony** - těžké nebo supertěžké částice, velmi stabilní (proton, neutron)

Mezi částicemi platí různé příbuzenské a symetrické vztahy. Jednou ze základních symetrie přírody je symetrie mezi částicemi a antičásticemi, které představují jakoby dvě zrcadlové částice téže hmotnosti, ale s opačným znaménkem elektrického náboje, magnetického momentu a některých kvantových čísel. Při srážkách částic s antičásticemi, např. elektronu s pozitronem, dochází k tzv. **anihilaci** částic a vzniku gama záření. Termín anihilace (latinsky nihil = nic) není přesný, protože ve skutečnosti nejde o přeměnu částic v „nic“, ale v částice o nulové klidové hmotnosti, tedy o uvolnění energie.