Odmaturuj!

z fyziky

Průvodce středoškolským učivem fyziky

Příprava k maturitě (i k nové podobě maturity)

Příprava na přijímací zkoušky na vysoké školy

Pro studenty středních škol a jejich učitele

didaktis

Milí přátelé, studenti a učitelé,

právě držíte v rukou jeden z titulů nové edice Odmaturuj, jejímž cílem je poskytnout Vám kompletní přehled učiva středních škol a ulehčit Vám tak přípravu k maturitní zkoušce i k přijímacím zkouškám na vysoké školy. Edice je již nyní zpracována v souladu s požadavky Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy na podobu a obsah tzv. celostátní maturity.

Publikace Odmaturuj z fyziky podává přehledně uspořádané středoškolské učivo z fyziky. Seznámíte se postupně s poznatky fyzikálních disciplín od základů klasické fyziky až po nejnovější poznatky moderní fyziky. Snadnou orientaci v textu podporuje nejenom účelné členění na kapitoly a menší tematické celky, ale také grafické odlišení ústředního textu v levém sloupci od vedlejšího učiva v pravém modrém sloupci. Modrý sloupec obsahuje množství vysvětlujících obrázků, doplňujících textů a stručná odvození vztahů (v některých ojedinělých případech i pomocí vyšší matematiky). Proto lze publikaci využít i pro přípravu na vysoké školy. K tomuto účelu slouží také vysvětlení entropie v učivu termodynamiky a vektorového součinu v elektrodynamice (tyto pojmy v osnovách středních škol nejsou). Moderní fyzika, zejména fyzika elementárních částic a vývoj vesmíru, je zpracována podle nejnovějších poznatků vědy přehledným a srozumitelným způsobem, jehož součástí jsou mnohá schémata a tabulky, jako např. schematická tabulka vysvětlující systém elementárních částic v souladu se Standardním modelem elementárních částic CPEP (Contemporary Physics Education Project, Berkeley, California, U.S.A.).

Doufáme, že Vám tato kniha, stejně jako ostatní tituly z naší produkce, usnadní studium na střední škole, pomůže projít úskalími „zkoušky dospělosti" i zvládnout přijímací zkoušky na vysoké školy.

redakce nakladatelství

Odmaturuj z fyziky

Nakladatelství DIDAKTIS spol. s r. o., Mlýnská 44, 602 00 Brno, www.didaktis.cz

© **DIDAKTIS** 2006. Vydání druhé.

Žádná část této publikace nesmí být publikována a šířena žádným způsobem a v žádné podobě bez výslovného svolení vydavatele.

Zpracovali Ing. Pavol Tarábek, CSc.; Mgr. Petra Červinková a kolektiv

Redakce Pavol Tarábek

Odborná korektura Doc. RNDr. Vojtěch Stach, CSc.; Doc. RNDr. Přemysl Záškodný, CSc.; Mgr. Radko Mareš

Jazyková korektura Mgr. Eva Hánová, Mgr. Olga Mužíková

© **Grafický layout** Pavol Tarábek

© **Obálka** Pavol Tarábek

Tisk TAVA-GRAPHICAL, s. r. o., Brno

ISBN 80-7358-058-6

Obsah

1.1 Úvod do fyziky 7
Vymezení předmětu fyziky 7
Fyzikální jevy a objekty, stav fyzikálního objektu 7
Fyzikální parametry a veličiny 8
Fyzikální zákony a teorie 8
Členění fyziky podle metod zkoumání a aplikací 8
Základní fyzikální metody 8

1.2 Fyzikální veličiny a měření 9
Fyzikální veličiny 9
Zákonné jednotky 9
Základní jednotky SI 10
Doplňkové jednotky 10
Odvozené jednotky SI 10
Vedlejší jednotky 10
Násobné a dílčí jednotky 11
Měření fyzikálních veličin 11
Chyby měření 11
Zpracování výsledků měření; Chyby měřicích přístrojů 12
Konstanty 12
Zkouška správnosti vztahu 12

2.0 Mechanika 13
Členění mechaniky 13
Formy hmoty 13

2.1 Kinematika 14
Mechanický obraz světa 14
Základní pojmy 14
Rovnoměrný přímočarý pohyb 15
Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb 15
Rovnoměrně zpomalený přímočarý pohyb 17
Rovnoměrný pohyb po kružnici 17
Volný pád 19
Skládání pohybů a rychlostí 19
Svislý vrh vzhůru 19
Vodorovný vrh; Šikmý vrh vzhůru 20

2.2 Dynamika 22
Mechanický obraz světa 22
Síla 22
Síly působící na dálku prostřednictvím silových polí 22
Síly působící při vzájemném dotyku fyzikálních objektů 23
Skládání sil 23
Skládání dvou sil se společným působištěm 23
Skládání dvou různoběžných sil se společným působištěm 24
Skládání více sil se společným působištěm 24
Skládání dvou rovnoběžných sil působících v různých bodech - obě síly leží v téže přímce 24
Skládání dvou různoběžných sil působících v různých bodech na pevné těleso 24
Skládání dvou rovnoběžných sil stejného směru působících v různých bodech na pevné těleso 25
Skládání dvou rovnoběžných sil opačného směru působících v různých bodech na pevné těleso 25
Rozklad síly 25
Rozklad síly na dvě různoběžné složky 25
Rozklad síly na dvě rovnoběžné složky 25
Třecí síla; Valivý odpor 26
Dostředivá síla 27
Tíhová síla a tíha 27
Tíha tělesa v neinerciálních vztažných soustavách 27
Těžiště 27
První Newtonův pohybový zákon - zákon setrvačnosti (1. NPZ) 28
Galileiho princip relativity 28
Formulace zákona setrvačnosti v moderní fyzice 28
Druhý Newtonův pohybový zákon - zákon síly (2. NPZ) 29
Třetí Newtonův pohybový zákon - zákon akce a reakce 29
Impuls a hybnost 30
Zákon setrvačnosti vyjádřený pomocí hybnosti 30
Zákon zachování hybnosti 30
Neinerciální vztažná soustava, setrvačné síly 31
Neinerciální vztažná soustava pohybující se v tíhovém poli svislým směrem 32
Otáčející se vztažná soustava, odstředivá síla 33
Moment hybnosti 33

2.3 Mechanická energie, práce, výkon 34
Mechanická práce 34
Mechanická energie 35
Kinetická (pohybová) energie 35
Potenciální (polohová) energie 35
Zákon zachování mechanické energie 36
pro izolovanou soustavu „Země a padající těleso" 36
pro izolovanou soustavu „Pružina a těleso" 36
pro izolovanou soustavu „Země a kyvadlo" 36
Obecný zákon zachování energie 36
Výkon, příkon, účinnost 37

2.4 Gravitační pole 38
Newtonova teorie gravitace 38
Gravitační pole Země 38
Gravitační pole Slunce 39
Intenzita gravitačního pole 39
Tíhová a gravitační síla na povrchu Země 40
Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země 40
Pohyby těles v centrálním gravitačním poli Země 40
Rovnoměrný pohyb po kružnici okolo Země 40
Pohyb po eliptické a parabolické trajektorii kolem Země 41
Pohyby těles v centrálním grav. poli Slunce, Keplerovy zákony 41
Obecná teorie relativity - Einsteinova teorie gravitace 43

2.5 Mechanika tuhého tělesa ... 44
Tuhé těleso; Moment síly, momentová věta 44
Dvojice sil; Těžiště 45
Statika tuhého tělesa 46
Rovnovážné polohy tělesa; Stabilita 46
Jednoduché stroje 47
Nakloněná rovina; Šroub; Klín; Páka 47
Kladka; Kolo na hřídeli 48
Zlaté pravidlo mechaniky 48
Dynamika tuhého tělesa 49
Kinetická energie otáčivého pohybu tělesa, moment setrvačnosti 49
Momenty setrvačnosti některých těles 49

2.6 Mechanika kapalin a plynů ... 50
Tekutiny a jejich vlastnosti 50
Společné vlastnosti tekutin; Rozdílné vlastnosti kapalin a plynů 50
Ideální kapalina a plyn 50
Tlak v tekutině 50
Tlak vyvolaný vnější silou, Pascalův zákon 51
Tlak vyvolaný tíhovou silou 52
Kapaliny; Plyny 52
Vztlaková síla; Archimedův zákon 53
Chování těles v kapalinách 53
Proudění kapalin a plynů, rovnice kontinuity 54
Ustálené proudění ideální kapaliny 54
Bernoulliho rovnice 55
Torricelliho vzorec pro výtokovou rychlost 55
Proudění plynů 55
Obtékání těles 56
Křídlo obtékané vzduchem 56

2.7 Mechanika pružných těles ... 57
Deformace pevného tělesa 57
Hookův zákon 58
Objemová deformace 58

3.0 Termika, termodynamika, molekulová fyzika ... 59
3.1 Termika ... 60
Teplota 60
Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin 61
Teplo 62
Tepelná kapacita 62
Skupenské teplo 63
Kalorimetrická rovnice 63
Přenos tepla 64
Vedení tepla; Tepelné záření; Proudění tepla 64

3.2 Termodynamika ... 65
Vnitřní energie soustavy a její změny 65
První termodynamický zákon 66
Teplo; Práce 66
Termodynamické děje 67
Druhý termodynamický zákon; Třetí termodynamický zákon 68
Entropie 69
Tepelné stroje 70
Tepelné motory 71
Ideální plyn 72
Izotermický děj s ideálním plynem 72
Izochorický děj s ideálním plynem 72
Izobarický děj s ideálním plynem 73
Teplotní roztažnost a rozpínavost plynů 73
Adiabatický děj 74
Avogadrův zákon, Avogadrova konstanta 74
Stavová rovnice ideálního plynu, plynová konstanta 74
Stavová rovnice reálného plynu 75
Práce vykonaná plynem 75

3.3 Molekulová fyzika, kinetická teorie plynů ... 76
Kinetická teorie látek 76
Vzájemné působení molekul, atomů, iontů 76
Struktura plynů, pevných látek a kapalin 77
Relativní molekulová a atomová hmotnost 78
Látkové množství; Molární hmotnost; Molární objem 78
Kinetická teorie plynů 79
Základní rovnice kinetické teorie plynů 79
Celková kinetická energie neuspořádaného tepelného pohybu molekul ideálního plynu 80
Molární tepelná kapacita ideálního plynu při stálém objemu 80
Vnitřní energie ideálního plynu 81
Molární tepelná kapacita ideálního plynu při konst. tlaku 81
Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul 81

3.4 Struktura a vlastnosti plynů, kapalin a pevných látek ... 82
Plyny 82
Kapaliny 84
Povrchové jevy; Povrchové napětí a povrchová energie 84
Kapilární jevy; Kapilární tlak 85
Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin 86
Krystalové mřížky pevných látek 86
Poruchy krystalové mřížky 87
Deformace pevného tělesa 87

3.5 Změny skupenství látek ... 88
Tání, tuhnutí 88
Sublimace, desublimace; Vypařování, kapalnění 89
Var; Pára 90
Fázový diagram 90
Vlhkost vzduchu, rosný bod 91

4.1 Mechanické kmitání ... 92
Harmonické kmitání, rovnice harmonického pohybu 93
Skládání kmitavých pohybů 94
Dynamika harmonického pohybu 94
Kyvadlo 95
Přeměny energie v mechanickém oscilátoru 96
Nucené kmitání, rezonance 96

4.2 Mechanické vlnění 97
Definice a druhy vlnění 97
Postupné mechanické vlnění 97
Rovnice postupné vlny 98
Interference vlnění 98
Stojaté vlnění 99
Odraz, lom a ohyb vlnění v izotropním prostředí 100

4.3 Zvukové vlnění 101
Zvuk, jeho frekvence, zdroje a druhy zvuku 101
Vlastnosti zvuku 101
Infrazvuk, ultrazvuk, zázněje (rázy), rezonance 102
Rychlost šíření zvuku 102
Odraz zvuku 102
Dopplerův jev 103
Nadzvuková rychlost 103
Ochrana před hlukem 103

5.1 Elektrický náboj a elektrické pole 104
Elektrický náboj a jeho vlastnosti, elektrické síly 104
Coulombův zákon 105
Elektrické pole, intenzita elektrického pole 105
Potenciální energie elektrického pole, elektrický potenciál, elektrické napětí, práce 106
Vodič v elektrickém poli 108
Izolant v elektrickém poli 109
Elektrická kapacita vodiče 109
Kondenzátor 110
Spojování kondenzátorů 110

5.2 Elektrický proud v látkách 111
Elektrický proud, zdroj a elektrické napětí 111
Ohmův zákon, elektrický odpor vodiče 112
Závislost odporu na vlastnostech vodiče a jeho teplotě 112
Spojování rezistorů 112
Ohmův zákon pro jednoduchý obvod 113
Spojování zdrojů elektrického napětí 114
Supravodivost 114
Regulace proudu a napětí proměnným odporem 114
Kirchhoffovy zákony 114
Práce a výkon elektrického proudu 115
Elektrický proud v polovodičích 118
Vlastní polovodiče, vlastní vodivost 118
Příměsové polovodiče, příměsová vodivost 118
Polovodičová dioda 119
Elektrický proud v kapalinách 120
Elektrolýza, Faradayovy zákony pro elektrolýzu 120
Galvanické články, akumulátor 120
Elektrický proud v plynech 121

5.3 Magnetické pole 122
Magnet, magnetické pole a indukční čáry 122
Magnetická síla, magnetická indukce 122
Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli 123
Magnetické pole přímého vodiče 124
Magnetické pole cívky 124
Rovnoběžné vodiče s proudem 125
Hallův jev 125
Magnetické vlastnosti látek, feromagnetismus 127
Elektromagnetická indukce 128
Faradayův zákon elektromagnetické indukce 129
Vznik střídavého proudu 129
Lenzův zákon 129
Vlastní indukce 130
Projevy indukčnosti cívky, energie magnetického pole cívky 130

5.4 Střídavý proud 132
Střídavý proud a střídavé napětí 132
Obvod střídavého proudu s rezistorem 132
Výkon střídavého proudu v obvodu s rezistorem 132
Obvod střídavého proudu s cívkou 133
Obvod střídavého proudu s kondenzátorem 134
Složený obvod střídavého proudu 134
Rezonance v sériovém obvodu RLC 135
Výkon střídavého proudu 135
Přehled obvodů střídavého proudu 136
Generátor střídavého proudu 137
Trojfázová soustava střídavého napětí 137
Trojfázový asynchronní elektromotor 138
Transformátor 138

5.5 Elektromagnetické kmitání, elektromagnetické pole a vlnění 139
Elektromagnetické kmitání 139
Elektromagnetický oscilátor 139
Analogie mezi elektromagnetickým a mechanickým oscilátorem, energie elektromagnetického oscilátoru 140
Perioda a frekvence kmitů LC oscilátoru 140
Nucené kmitání 140
Vazba a rezonance elektromagnetických oscilátorů 141
Elektromagnetické pole, elektromagnetické vlnění 142
Další charakteristické vlastnosti elektromag. vlnění 143
Experimentální důkaz existence elektromagnetického pole 143
Přenos signálů elektromagnetickými vlnami 144
Radiokomunikace 145

5.6 Elektromagnetické záření 146
Rádiové záření 146
Optické záření 147
Rentgenové záření; Záření gama (γ-záření) 148
Přenos energie elektromagnetickým vlněním 148
Fotometrie 149
Elektromagnetické záření látek 150
Záření černého tělesa 151

6.0 Optika 152
6.1 Vlnové vlastnosti světla 152
Odraz a lom světla 153

Disperze 155
Interference 156
Interference na dvojštěrbině 156
Změna fáze při odrazu 156
Interference na tenké vrstvě 156
Difrakce 158
Ohyb světla na štěrbině 158
Ohyb na dvou štěrbinách 158
Difrakční (optická) mřížka 158
Polarizace 159

6.2 Zobrazování optickými soustavami 160
Optické zobrazení, optická soustava 160
Zobrazení rovinným zrcadlem; Zobrazení kulovým zrcadlem 161
Zobrazení tenkou čočkou 163
Oko 167
Lupa; Mikroskop 168
Dalekohled 169

7.0 Speciální teorie relativity 170
Proč vznikla speciální teorie relativity? 170
Principy speciální teorie relativity (STR) 171
Relativnost současnosti 171
Dilatace času; Kontrakce délky 172
Relativistické skládání rychlostí 173
Relativistická hmotnost; Relativistická hybnost 174
Vztah mezi energií a hmotností 174

8.0 Fyzika mikrosvěta 176
Členění fyzikálních objektů podle velikosti 176
Hranice klasické fyziky 176

8.1 Základní poznatky kvantové fyziky 177
Kvantová hypotéza 177
Fotoelektrický jev (fotoefekt) 177
Selhání klasické fyziky při vysvětlení fotoefektu 177
Vysvětlení fotoefektu pomocí kvantové hypotézy 178
Comptonův jev 178
Fotony 179
Vlnově-korpuskulární povaha světla (fotonů) 179
Vlnové vlastnosti částic 180
Potvrzení existence de Broglieových vln 180
Kvantová mechanika 181

8.2 Atomová fyzika 182
Stavba atomu, modely atomu 182
Rutherfordův model atomu 183
Nedostatky Rutherfordova modelu atomu 184
Bohrův model atomu 184
Bohrův model atomu – přednosti a nedostatky 187
Kvantově-mechanický model atomu vodíku 187
Kvantová čísla, vlnové funkce stacionárních stavů 188
Kvantová čísla 189
Pauliho vylučovací princip 190
Stavba elektronového obalu 190
Laser 191

8.3 Jaderná fyzika 192
Složení jádra; Vlastnosti atomových jader 192
Jaderné reakce 193
Radioaktivita 194
Jaderná fyzika v praxi 195
Jaderná elektrárna; Další využití jaderné fyziky 196
Ochrana před účinky radioaktivního záření 197
Detekce radioaktivního záření 197

8.4 Fyzika elementárních částic 198
Historie objevů elementárních částic 198
Urychlovače mikročástic 199
Fyzikální charakteristiky a vlastnosti elementárních částic 200
Základní fyzikální interakce 201
Kritéria třídění částic 202
Fyzikální zákony mikrosvěta 202
Systém elementárních částic 204
Kvarkový model; Stavba hmoty 205

9.1 Země a její okolí 206
Základní informace o Zemi; Zemské nitro a kůra 206
Okolí Země; Měsíc 208
Atmosféra Země 209

9.2 Sluneční soustava 210
Slunce 210
Planety 211
Planety zemského typu 211
Obří planety 212
Měření vzdálenosti planet 212
Planety, komety, TNO, meteoroidy 213
Vznik a vývoj sluneční soustavy 213

9.3 Hvězdy, galaxie, vesmír 214
Charakteristiky hvězd 214
Vznik, vývoj a zánik hvězd 215
Vznik hvězd a jejich vývoj na hlavní posloupnosti 215
Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti 215
Měření vzdálenosti hvězd 217
Galaxie a hvězdokupy 217
Vesmír 218
Vesmír se rozpíná 218
Stáří vesmíru 219
Big Bang – velký třesk a vývoj vesmíru 218

Rejstřík 220

1.1 Úvod do fyziky

Vymezení předmětu fyziky

FYZIKA je přírodní věda, která zkoumá:
- fyzikální jevy,
- obecné vlastnosti fyzikálních objektů,
- interakce mezi fyzikálními objekty,
- stavbu hmoty a strukturu fyzikálních objektů.

Fyzika dále hledá a formuluje fyzikální zákony popisující a vysvětlující:
- fyzikální jevy,
- vlastnosti fyzikálních objektů,
- strukturu fyzikálních objektů a interakce mezi nimi.

Fyzikální jevy a objekty, stav fyzikálního objektu

FYZIKÁLNÍ JEVY jsou obecně jakékoliv děje a procesy, které fyzika pozoruje a zkoumá buď přímo, nebo pomocí experimentů. Analyzujeme-li fyzikální jevy, zjistíme, že jsou to fyzikální děje a procesy týkající se fyzikálních objektů, tj. „to, co se děje s fyzikálními objekty".

Děje a procesy týkající se fyzikálních objektů jsou např. jejich pohyby, změny stavů atd.

FYZIKÁLNÍ OBJEKTY lze členit na:
- objekty přímo pozorovatelné (tělesa, kapaliny, plyny, hvězdy, planety atd.),
- objekty, které není možné přímo pozorovat a u nichž zkoumáme jenom jejich projevy (gravitační pole, elektron apod.),
- objekty přímo pozorovatelné a složené z obrovského množství přímo nepozorovatelných mikroskopických částic, tzv. MAKROSYSTÉMY (např. plyny, kapaliny, plazma). Zkoumá je termika, termodynamika a statistická fyzika.

Fyzika zkoumá fyzikální jevy několika způsoby:
- jako POHYBOVÉ JEVY, tedy pohyby jednoho nebo více fyzikálních objektů jako celků (např. v mechanice),
- jako JEVY TERMODYNAMICKÉ, kdy fyzika zkoumá stavy objektů, změny stavů a přechody z jednoho stavu do jiného (zabývá se jimi např. termika a termodynamika),
- jako INTERAKCE mezi fyzikálními objekty, např. interakce mezi gravitačním polem a tělesem nebo interakce mezi elementárními částicemi.

STAV fyzikálního objektu je určen souhrnem vnějších podmínek, za nichž fyzikální objekt existuje, a souhrnem nezávislých vnitřních vlastností, přičemž je charakterizován parametry, kterými jsou např. teplota, energie, hustota, objem.

Osnova kapitoly:
- Vymezení předmětu fyziky
- Fyzikální jevy a objekty
- Stav fyzikálního objektu
- Fyzikální parametry a veličiny
- Fyzikální zákony a teorie
- Základní fyzikální metody
- Členění fyziky podle metod zkoumání

Fyzika vytváří FYZIKÁLNÍ OBRAZY SVĚTA z pohledu konkrétních fyzikálních disciplín (např. mechanický nebo relativistický obraz světa).

Fyzika je nejen
- souhrnem všech fyzikálních poznatků, ale také
- procesem fyzikálního poznávání.

FYZIKÁLNÍ JEVY lze členit podle forem pohybu, fyzikálních objektů a druhu vzájemného působení na:
- jevy mechanické,
- jevy tepelné a termodynamické,
- jevy elektrické, magnetické a elektromagnetické,
- jevy subatomární a jaderné,
- jevy kosmologické atd.

Nejsou-li FYZIKÁLNÍ OBJEKTY přímo pozorovatelné (gravitační pole, elektromagnetické pole, elektron apod.), fyzika studuje jejich projevy a vytváří modely těchto objektů. Např. i když elektrický náboj není viditelný, můžeme pozorovat jeho silové působení na jiné náboje; elektromagnetické vlnění také není přímo pozorovatelné a vnímáme jej jako světelné paprsky anebo stopy při dopadu na fotocitlivou desku, resp. světelné vjemy na sítnici.

Zvláštním případem pohybových jevů jsou JEVY STATICKÉ, kde se poloha fyzikálních objektů s časem nemění. Statické jevy se nazývají také rovnovážnými stavy.

Při změnách stavů se některé parametry mění a jiné ne – podle toho rozlišujeme rozličné tepelné a termodynamické děje. Při studiu přechodů z jednoho STAVU do druhého se často využívají zákony zachování, např. zákon zachování energie, kdy se energie jako vnitřní parametr fyzikálního objektu nemění.

Fyzikální parametry a veličiny

Při fyzikálním zkoumání fyzikálních objektů a jevů přiřazuje fyzika obecným vlastnostem fyzikálních objektů, jejich stavům a fyzikálním dějům určité PARAMETRY, kterými vlastnosti objektů, stavy, ve kterých se objekty nacházejí, a fyzikální děje popisuje. Aby tyto popisy byly jednoznačné a přesné, fyzika modifikuje některé parametry na FYZIKÁLNÍ VELIČINY, které je možno měřit, tj. vyjádřit jejich velikost ve vhodně zvolených jednotkách.

Fyzikální zákony a teorie

FYZIKÁLNÍ ZÁKON v slovní podobě vyjadřuje pravidelnost přírodních jevů, platnost zachovávání velikosti fyzikálních veličin (zákony zachování energie, hybnosti, momentu hybnosti, náboje apod.) anebo vztahy mezi fyzikálními objekty (např. „hmotný objekt působí na jiné objekty gravitační silou"). Fyzikální zákon v matematické podobě vyjadřuje vztahy mezi fyzikálními veličinami, přičemž vzájemná závislost fyzikálních veličin je dána matematickou formulí, matematickým vztahem nebo rovnicí.

FYZIKÁLNÍ PRINCIPY jsou nejobecnější fyzikální zákonitosti, obvykle formulované slovně. Týkají se většinou celé fyzikální disciplíny nebo celé fyziky (např. princip zachování energie).

TEORIE vzniká, jestliže fyzika spojí všechny poznané zákony v jednotný systém založený na malém počtu několika nejobecnějších zákonů, principů.

Členění fyziky podle metod zkoumání a aplikací

Podle základní metody, kterou je zkoumání fyzikálních objektů prováděno, lze dělit fyziku na teoretickou a experimentální.

TEORETICKÁ FYZIKA na základě experimentálního materiálu a známých poznatků hledá co nejobecnější souvislosti, uvádí fyzikální poznatky do systémů a konečně formuluje obecné zákony (obvykle v matematické podobě) a principy, které spojuje do teorie. Z teorie pak deduktivním postupem vyvozuje jak zákony a poznatky známé, tak popř. i závěry dosud neznámé, dávající podnět k novým experimentům, fyzikálním poznatkům nebo novým obrazům světa (např. teorie relativity úplně změnila naše chápání času a prostoru).

EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKA vychází z pokusů, z nichž induktivní cestou dochází k obecným empirickým zákonům a vztahům.

PRAKTICKÁ FYZIKA se zabývá studiem měřicích metod.

APLIKOVANÁ FYZIKA se zabývá aplikacemi fyziky v praxi, např. v technice, průmyslu, elektronice, medicíně apod.

FYZIKÁLNÍ VELIČINY mají velikost (hodnotu) a fyzikální rozměr (dimenzi). Fyzikální rozměr vyjadřuje, o jakou fyzikální veličinu se jedná (m/s, resp. N vyjadřuje skutečnost, že se jedná o rychlost, resp. sílu). Velikost (hodnotu) měřené veličiny určuje fyzika tak, že ji porovnává s určitou (vhodně zvolenou) hodnotou, kterou si zvolí za jednotku.

EMPIRICKÉ FYZIKÁLNÍ ZÁKONY jsou zevšeobecněním empirických údajů o pozorovaných jevech a fyzikálních objektech a jsou formulovány jako obecný popis fyzikálních dějů, procesů, pohybů a stavů objektů, resp. změn stavů. Tyto zákony mají často jenom přibližnou platnost a jejich přesnost roste s vývojem fyzikálního poznávání.

V pozdější etapě fyzikálního poznávání jsou formulovány TEORETICKÉ FYZIKÁLNÍ ZÁKONY, nejprve jako hypotézy, které jsou pak ověřovány pomocí experimentů.

Základní fyzikální metody

POZOROVÁNÍ znamená sledování přírodních jevů, registraci faktů, které s nimi souvisejí, a sběr kvantitativních údajů, a to bez zásahu pozorovatele do přírody.

EXPERIMENT (POKUS) je fyzikální děj nebo proces připravený experimentátorem, který je prováděn s úmyslem získat přesně vymezená fakta a údaje o vybraném fyzikálním objektu. Mnohokrát je pokus zjednodušován tak, aby na průběh fyzikálního děje mělo vliv méně faktorů než v realitě (přičemž výběr působících faktorů je postupně obměňován), což umožňuje postupné poznávání fyzikálních zákonitostí zkoumaných jevů.

TEORETICKÝ POSTUP je zpracovávání registrovaných dat myšlenkovou činností, kdy zevšeobecněním formulujeme empirické zákony, a dále myšlenkové modelování, tj. vytváření myšlenkových modelů a vytváření hypotéz. Patří sem také analýza myšlenkových modelů, jejich ověřování z hlediska logické struktury, jejich konzistentnosti s fyzikální teorií apod. Výsledkem teoretického postupu jsou fyzikální zákony, pravidla a principy.

1.2 Fyzikální veličiny a měření

Fyzikální veličiny

FYZIKÁLNÍMI VELIČINAMI charakterizujeme a popisujeme:

- vlastnosti fyzikálních objektů,
- parametry stavů, ve kterých se fyzikální objekty nacházejí,
- parametry fyzikálních jevů (dějů a procesů), které je možno měřit.

Měřením fyzikální veličiny určujeme její hodnotu.

HODNOTU (velikost) fyzikální veličiny určujeme kvantitativním porovnáváním s určitou, předem zvolenou hodnotou veličiny téhož druhu, kterou volíme za jednotku. Hodnotu fyzikální veličiny X vyjadřujeme její číselnou hodnotou $\{X\}$ a jednotkou fyzikální veličiny $[X]$.

Hodnota fyzikální veličiny = číselná hodnota · měřicí jednotka

$X = \{X\} \cdot [X]$.

JEDNOTKA FYZIKÁLNÍ VELIČINY (MĚŘICÍ JEDNOTKA) je dohodou stanovená hodnota fyzikální veličiny, která je základem pro měření fyzikálních veličin téhož druhu.

Fyzikální veličiny, se kterými se setkáváme ve fyzice na střední škole, lze rozdělit do dvou skupin:

- SKALÁRNÍ VELIČINY (nebo stručně skaláry) jsou zcela určeny číselnou hodnotou a jednotkou.
- VEKTOROVÉ VELIČINY (nebo stručně vektory) jsou určeny číselnou hodnotou, jednotkou a směrem. Při zápisu je odlišujeme od skalárních tím, že nad ně píšeme šipku, a to tímto způsobem: $\vec{X}$. Hodnotu (velikost) vektorové veličiny $\vec{X}$ označujeme symbolem $|\vec{X}|$ a pro zjednodušení zápisu používáme jen označení X. Vektorové veličiny znázorňujeme graficky pomocí vektorů, tzn. orientovanou úsečkou. V tištěném textu se někdy označení vektorů šipkou nahrazuje tučným písmem: $\vec{X} = \mathbf{X}$.

Zákonné jednotky

ZÁKONNÉ JEDNOTKY v ČR (jednotky, jejichž používání upravuje zákon) jsou dány ČSN (Českou státní normou). Mezi zákonné jednotky patří:

- základní jednotky Mezinárodní soustavy jednotek SI, přijaté na XI. generální konferenci pro váhy a míry v Paříži v r. 1960,
- jednotky doplňkové,
- jednotky odvozené od jednotek SI,
- násobky a díly základních a odvozených jednotek,
- jednotky vedlejší.

Osnova kapitoly:

- Fyzikální veličiny
- Zákonné jednotky
- Měření fyzikálních veličin
- Konstanty
- Zkouška správnosti vztahu

FYZIKÁLNÍ VELIČINY jsou např. čas, rychlost, hmotnost, elektrický proud. Fyzikální veličiny nejsou např. pohyb, hmota, elektrický obvod.

Příklady zápisu FYZIKÁLNÍCH VELIČIN:
HODNOTA hmotnosti je $m = 10{,}5$ kg; tedy
$\{m\} = 10{,}5$; $[m] = \text{kg}$
hodnota elektrického proudu je $I = 0{,}5$ A tedy
$\{I\} = 0{,}5$; $[I] = \text{A}$
velikost rychlosti je $|\vec{v}| = v = 12\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rychlost je vektorová veličina); tedy $\{v\} = 12$; $[v] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

SKALÁRNÍ VELIČINY jsou např. elektrický proud, hmotnost, čas, teplota, energie.

VEKTOROVÉ VELIČINY jsou např. zrychlení, hybnost, síla, moment síly.

Termín JEDNOTKA FYZIKÁLNÍ VELIČINY má ve středoškolských učebnicích dva významy:

1. dohodou stanovená hodnota fyzikální veličiny, která je základem pro měření (měřicí jednotka),
2. fyzikální rozměr (fyzikální dimenze).

FYZIKÁLNÍ ROZMĚR obvykle vyjadřuje, o jakou fyzikální veličinu se jedná (např. $\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ vyjadřuje skutečnost, že se jedná o energii). Dvě fyzikální veličiny téhož rozměru mohou být i odlišné, např. energie a moment síly: obě veličiny mají fyzikální rozměr $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, odlišují se však jejich názvy – pro energii J, pro moment síly N · m. V rovnici $X = \{X\} \cdot [X]$ pak $[X]$ znamená fyzikální rozměr. Pro vyjádření toho, co je jednotkou fyzikální veličiny, jsou vhodnější věty typu: „Jednotkou energie je 1 J." nebo „Jednotkou rychlosti je $1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$." V této knize se v souladu s učebnicemi používají věty typu: „Jednotkou energie je J." Pokud je v textech učebnic používán termín „jednotka", musíme rozlišovat, o který z dvou významů se jedná. Některé fyzikální veličiny nemají fyzikální rozměr (např. účinnost, úhel) a jejich jednotky se nazývají BEZROZMĚROVÉ.

Základní jednotky SI

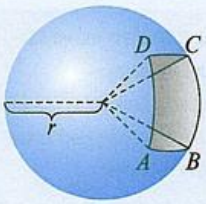
Tabulka ZÁKLADNÍCH JEDNOTEK soustavy SI

FYZIKÁLNÍ VELIČINA	ZNAČKA VELIČINY	ZÁKLADNÍ JEDNOTKA	ZNAČKA JEDNOTKY
délka	l	metr	m
hmotnost	m	kilogram	kg
čas	t	sekunda	s
elektrický proud	I	ampér	A
termodynamická teplota	T	kelvin	K
látkové množství	n	mol	mol
svítivost	I	kandela	cd

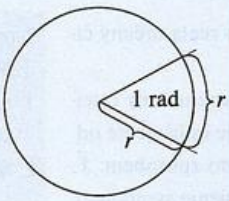
Doplňkové jednotky

DOPLŇKOVÉ JEDNOTKY jsou jednotka rovinného úhlu a jednotka prostorového úhlu. Obě jsou bezrozměrové.

FYZIKÁLNÍ VELIČINA	ZNAČKA VELIČINY	ZÁKLADNÍ JEDNOTKA	ZNAČKA JEDNOTKY
rovinný úhel	např. α	radián	rad (str. 17)
prostorový úhel	např. Ω	steradián	sr



Plocha obrazce *ABCD* na povrchu koule, jejž vymezuje úhel 1 steradián, je rovná r^2.



Odvozené jednotky SI

ODVOZENÉ JEDNOTKY jsou jednotky fyzikálních veličin soustavy SI odvozené ze základních jednotek soustavy SI na základě DEFINIČNÍCH VZTAHŮ.

Tabulka některých ODVOZENÝCH JEDNOTEK s vlastními názvy:

FYZIKÁLNÍ VELIČINA	ZNAČKA VELIČINY	NÁZEV JEDNOTKY	ZNAČKA JEDNOTKY
síla	F	newton	N
práce, energie	W, E	joule	J
výkon	P	watt	W
elektrický náboj	Q	coulomb	C
elektrické napětí	U	volt	V
elektrický odpor	R	ohm	Ω
tlak	p	pascal	Pa

Vedlejší jednotky

VEDLEJŠÍ JEDNOTKY jsou jednotky, které nepatří do soustavy SI, ale jejich používání má praktické důvody.

Mezi vedlejší jednotky patří např.:

- min (minuta), h (hodina), d (den), r (rok), 1 min = 60 s, 1 h = 3 600 s, 1 d = 86 400 s, r = 365,25 d;
- ° (úhlový stupeň), 180 ° = π rad;
- ′ (úhlová minuta), 1° = 60′;
- ″ (úhlová vteřina), 1′ = 60″;
- l (litr), 1 l = 1 dm^3 = 0,001 m^3;
- t (tuna), 1 t = 1 000 kg;
- ha (hektar), 1 ha = 10 000 m^2;
- V · A (voltampér), 1 V · A = 1 W (watt);
- eV (elektronvolt), 1 eV = 1,602 · 10^{-19} J;
- AU (astronomická jednotka, str. 42);
- pc (parsec), 1 pc = 3,085678 · 10^{16} m;
- l. y. (light year – světelný rok); 1 l. y. = 9,460730 · 10^{15} m.

Dříve byly používány i tyto vedlejší jednotky:

- k (kůň, koňská síla, HP), 1 k = 735,5 W;
- cal (kalorie) a kcal (kilokalorie) = 1 000 cal, 1 cal = 4,1868 J;
- 1 erg = 10^{-7} J.

ODVOZENÉ JEDNOTKY jsou např.:

- m · s^{-1} (metr za sekundu) pro rychlost;
- m · s^{-2} (metr za sekundu na druhou) pro zrychlení;
- m^3 (metr na třetí) pro objem;
- kg · m^{-3} (kilogram na metr krychlový) pro hustotu;
- Hz = s^{-1} (hertz) pro frekvenci;
- 1 Ws (wattsekunda) = 1 J.

DEFINIČNÍ (VELIČINOVÉ) VZTAHY vycházejí:

- z definic odvozených veličin; např. hustota ρ je definována vztahem
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{hmotnost}}{\text{objem}} = \frac{\text{hmotnost}}{\text{délka}^3}$$
a dosazením základních jednotek do definičního vztahu získáme jednotku hustoty: $[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- z fyzikálních rovnic vyjadřujících fyzikální zákony; např. pro sílu platí 2. Newtonův pohybový zákon $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ a pro jednotku síly platí: $[\vec{F}] = [m] \cdot [\vec{a}] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Násobné a dílčí jednotky

NÁSOBNÉ A DÍLČÍ JEDNOTKY jsou jednotky získané jako násobek nebo díl základní nebo odvozené jednotky. Jejich název je vytvořen přidáním předpony před základní nebo odvozenou jednotku, případně před její značku. Výjimkou je jednotka hmotnosti g (gram), která je dílem základní jednotky kg (kilogram) $1\ g = 10^{-3}\ kg$.

PŘEDPONA	ZNAČKA PŘEDPONY	POMĚR K ZÁKLADNÍ JEDNOTCE
tera-	T	10^{12}
giga-	G	10^{9}
mega-	M	10^{6}
kilo-	k	10^{3}
hekto-	h	10^{2}
deka-	da	10^{1}
deci-	d	10^{-1}
centi-	c	10^{-2}
mili-	m	10^{-3}
mikro-	μ	10^{-6}
nano-	n	10^{-9}
piko-	p	10^{-12}

NÁSOBNÉ A DÍLČÍ JEDNOTKY jsou např.:
- 1 kJ (kilojoule) = 1 000 J (joulů);
- 1 mA (miliampér) = 10^{-3} A;
- 1 μA (mikroampér) = 10^{-6} A;
- 1 nm (nanometr) = 10^{-9} m;
- 1 kW (kilowatt) = 10^{3} W;
- 1 MW (megawatt) = 10^{6} W;
- 1 GW (gigawatt) = 10^{9} W;
- 1 hPa (hektopascal) = 100 pascalů.

Příklady převodu dílčích jednotek na jednotky základní, případně odvozené:
- $155\ mA = 155 \cdot 10^{-3}\ A = 0{,}155\ A$;
- $280\ cm = 280 \cdot 10^{-2}\ m = 2{,}8\ m$;
- $113{,}5\ hPa = 113{,}5 \cdot 10^{2}\ Pa = 11350\ Pa$;
- $1{,}4\ kN = 1{,}4 \cdot 10^{3}\ N = 1400\ N$.

Při převádění jednotek na jednotky násobné a dílčí využíváme následujícího pravidla:
Kolikrát se zmenší jednotka, tolikrát se zvětší číselná hodnota veličiny a naopak.

Měření fyzikálních veličin

MĚŘENÍ je soubor činností, jejichž cílem je stanovení hodnoty měřené fyzikální veličiny. MĚŘICÍ METODA je způsob, jak lze danou fyzikální veličinu měřit.

PŘÍMÁ METODA měření zjišťuje hodnotu měřené veličiny přímo srovnáváním s jednotkou téže veličiny, obvykle odečtením na stupnici měřidla (délková měřidla, teploměr, ampérmetr).

NEPŘÍMÁ METODA měření zjišťuje hodnotu měřené veličiny nepřímo na základě fyzikálního vztahu z určených hodnot jiných veličin. Např. elektrické napětí můžeme určit změřením proudu a odporu, hybnost změřením rychlosti a hmotnosti apod.

Metody, při nichž se měřená veličina určuje z jejího definičního vztahu, se někdy označují za METODY PŘÍMÉ, např.:
- hustotu můžeme určit změřením hmotnosti m a objemu V ze vztahu $\rho = \frac{m}{V}$;
- rychlost v vystřeleného projektilu lze určit změřením dráhy s a času t potřebného k jejímu proběhnutí ze vztahu $v = \frac{s}{t}$.

NEPŘÍMOU METODOU je určení rychlosti vystřeleného projektilu z výchylky balistického kyvadla, s využitím zákona zachování energie.

Chyby měření

Opakováním nějakého měření neobdržíme téměř nikdy týž výsledek, protože každé měření je zatíženo chybami. Naměřená hodnota je buď větší, nebo menší než hodnota správná.

CHYBA MĚŘENÍ = hodnota správná – hodnota naměřená

Chyby, vznikající při každém měření, jsou trojího druhu:
- HRUBÉ CHYBY jsou způsobené selháním měřicího přístroje nebo pozorovatele – naměřená hodnota zatížená hrubou chybou se obvykle značně liší od ostatních hodnot.
- SOUSTAVNÉ CHYBY se vyznačují tím, že ovlivňují výsledek vždy stejně, tj. dávají hodnotu buď trvale větší, nebo stále menší, než je hodnota správná.
- NÁHODNÉ CHYBY měření se projevují tím, že výsledky opakovaných měření se od sebe poněkud liší.

HRUBÉ CHYBY vznikají nepozorností nebo přehlédnutím. Měříme-li např. délku úsečky vůči milimetrové stupnici, pak chyba má být menší než 0,2 mm. Hrubou chybou je, dopustí-li se pozorovatel chyby např. 1 mm.

SOUSTAVNÉ (SYSTEMATICKÉ) CHYBY jsou způsobené nedokonalostí metody měření nebo měřicích přístrojů.

NÁHODNÉ CHYBY vznikají náhodnými vlivy při měření. Jsou způsobeny nedokonalostí našich smyslů, různými rušivými vlivy (otřesy, změnami teploty, vlhkosti, tlaku vzduchu atd.).

Zpracování výsledků měření

Vliv náhodných chyb omezujeme:

- prováděním většího počtu měření fyzikální veličiny x,
- stanovením aritmetického průměru $\bar{x}$ měřené veličiny,
- výpočtem průměrné odchylky Δx nebo střední chyby $s(\bar{x})$ aritmetického průměru.

Nejjednodušší postup zpracování výsledků měření:

1. Označíme-li hodnoty získané měřením veličiny x postupně $x_1, x_2, ..., x_n$, vypočítáme pro tento soubor ARITMETICKÝ PRŮMĚR $\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$.
2. Dále určíme PRŮMĚRNOU ODCHYLKU $\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i - \bar{x}|}{n}$.
3. Výsledek měření zapíšeme ve tvaru $x = \bar{x} \pm \Delta x$.
4. Průměrná relativní odchylka je $\delta(\bar{x}) = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\,\%$.

Chyby měřicích přístrojů

U elektrických měřicích přístrojů udává výrobce PŘESNOST MĚŘENÍ v procentech ($\pm p\,\%$), tzn. relativní dovolená mezní chyba přístroje je $\varepsilon(\bar{x}) = p\,\%$. Jestliže výrobce měřicího přístroje udává TŘÍDU PŘESNOSTI p, znamená to, že relativní dovolená mezní chyba přístroje je $\varepsilon(\bar{x}) = p\,\%$.

Konstanty

KONSTANTOU je každý výsledek měření dané fyzikální veličiny za daných podmínek, který může být použit i v jinou dobu a na jiném místě než tam, kde byl získán.

UNIVERZÁLNÍ KONSTANTY udávají hodnotu fyzikální veličiny, která je stejná za všech známých okolností.

Zkouška správnosti vztahu

Při odvozování fyzikálního vztahu nám jako pomůcka pro ověření správnosti může posloužit vyjádření vztahu v základních jednotkách. Vztah je odvozen správně, jestliže se rovnají jednotky (fyzikální rozměry) na obou stranách vztahu.

Přesnější postup zpracování výsledků měření:

2.1 Určíme SMĚRODATNOU ODCHYLKU jednotlivého měření: $s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$.

2.2 Odchyluje-li se některá z naměřených hodnot x_i od průměru $\bar{x}$ o více než $3\,s$ (což je tzv. mezní chyba), vyloučíme ji ze souboru $\{x_1, x_2, ..., x_n\}$ a znovu musíme vypočítat $\bar{x}$ a s.

2.3 Určíme SMĚRODATNOU ODCHYLKU $s(\bar{x})$ aritmetického průměru: $s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$.

3. Výsledek měření: $x = \bar{x} \pm s(\bar{x})$.

4. Výsledek měření můžeme zapsat také ve tvaru: $x = \bar{x} \pm 3\,s(\bar{x})$, kde $3\,s(\bar{x})$ je MEZNÍ CHYBA, tzn. skutečná hodnota veličiny x je v intervalu $\bar{x} - 3\,s(\bar{x}) < x < \bar{x} + 3\,s(\bar{x})$ s pravděpodobností 99,7 %.

RELATIVNÍ MEZNÍ CHYBA $\varepsilon(\bar{x}) = \frac{3\,s(\bar{x})}{\bar{x}} \cdot 100\,\%$. Máme-li ampérmetr s rozsahem od 1 mA do 1 A a výrobce udává přesnost 1 % pro celý rozsah, znamená to, že např. pro hodnotu 150 mA je maximální chyba měření 1,5 mA.

KONSTANTAMI (čili konstantními veličinami) jsou např. měrné odpory kovů nebo hustoty kapalin při určité teplotě a koncentraci.

UNIVERZÁLNÍMI KONSTANTAMI jsou např. gravitační konstanta κ, rychlost světla ve vakuu c, elementární náboj e, Planckova konstanta h.

Zkouška správnosti vztahu pro první kosmickou rychlost $v_k = \sqrt{K \cdot R_Z}$ (str. 40): K je intenzita gravitačního pole, $[K] = \mathrm{N \cdot kg^{-1} = kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1} = m \cdot s^{-2}}$, R_Z je poloměr Země, $[R_Z] = \mathrm{m}$.

$[\sqrt{K \cdot R_Z}] = \sqrt{\mathrm{m \cdot s^{-2} \cdot m}} = \sqrt{\mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}} = \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$[v_k] = \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Vztah je odvozen správně.

Př. 1

Zpracování výsledků měření – ilustrativní příklad

Jsou dány tyto naměřené hodnoty hmotnosti m tělesa: 125,6 g; 125,7 g; 125,3 g; 125,5 g.

Aritmetický průměr hmotnosti tělesa je: $\bar{m} = \frac{125{,}6 + 125{,}7 + 125{,}3 + 125{,}5}{4} = 125{,}525\ \mathrm{g} \doteq 125{,}5\ \mathrm{g}$.

Průměrná odchylka hmotnosti tělesa je: $\Delta m = \frac{0{,}075 + 0{,}175 + 0{,}225 + 0{,}025}{4} = 0{,}125\ \mathrm{g} \doteq 0{,}1\ \mathrm{g}$.

Výsledná naměřená hmotnost m tělesa je tedy: $m = (125{,}5 \pm 0{,}1)\ \mathrm{g}$.

2.0 Mechanika

MECHANIKA zkoumá jevy, které souvisejí s mechanickým pohybem fyzikálních objektů – různých hmotných těles, kapalin a plynů. Podle způsobu zkoumání lze mechaniku členit na kinematiku a dynamiku, podle druhu fyzikálních jevů na dynamiku a statiku.

KINEMATIKA analyzuje a popisuje různé druhy MECHANICKÝCH POHYBŮ pomocí fyzikálních veličin určujících polohu, dráhu, rychlost, zrychlení apod.

Pokud se kinematika zabývá pohyby HMOTNÉHO BODU, nazývá se KINEMATIKA HMOTNÉHO BODU.

DYNAMIKA zkoumá příčiny změn POHYBOVÉHO STAVU fyzikálních objektů. Tyto příčiny souvisejí se vzájemným působením mezi fyzikálními objekty a označujeme je názvem SÍLY.

DYNAMIKA dále hledá fyzikální zákony popisující a vysvětlující MECHANICKÉ POHYBY a také zákony popisující vzájemné působení mezi fyzikálními objekty.

STATIKA zkoumá především JEVY STATICKÉ, tj. stavy rovnováhy těles, kapalin a plynů, na které působí vnější síly, a hledá zákonitosti této rovnováhy.

Osnova kapitoly:

- Kinematika, dynamika, statika
- Členění mechaniky
- Formy hmoty
- Pohyb, klid
- Hmotný bod
- Pohybový stav

POHYB lze obecně definovat jako změnu polohy fyzikálního objektu vůči jiným objektům s probíhajícím časem. MECHANICKÝM POHYBEM rozumíme pohyb fyzikálního objektu jako celku, dále kmitání mechanického oscilátoru i mechanické a zvukové vlnění. O tělese říkáme, že je v KLIDU, nemění-li svou polohu vůči okolním tělesům.

K přesnému určení polohy zkoumaného tělesa si mechanika vybírá jeden jeho bod – obvykle těžiště, do kterého soustředí veškerou hmotnost tělesa. Vzniká tím myšlenkový model – HMOTNÝ BOD, kterým mechanika těleso nahrazuje.

POHYBOVÝ STAV tělesa, resp. hmotného bodu je určen okamžitou rychlostí $\vec{v}$. Mění-li se rychlost tělesa, mění se také jeho pohybový stav. Nejznámějším pohybovým stavem je rovnoměrný přímočarý pohyb. Stav klidu je pohybovým stavem s nulovou rychlostí.

Zvláštním případem mechanických jevů jsou **JEVY STATICKÉ**, kde se poloha fyzikálních objektů s časem nemění a nacházejí se ve stavech rovnováhy.

Členění mechaniky

MECHANIKU LZE ČLENIT NA TYTO DISCIPLÍNY:	ZKOUMANÉ FYZIKÁLNÍ OBJEKTY	ZKOUMANÉ FYZIKÁLNÍ JEVY
kinematika a dynamika hmotného bodu	hmotný bod	pohyb, působení sil
dynamika zabývající se silovým působením na hmotná tělesa (gravitační síly, síly tření, tlak apod.)	tělesa a silová pole	pohyb, působení sil
mechanika tuhého tělesa (statika a dynamika)	tuhá tělesa	rovnováha a pohyb
mechanika kapalin a plynů (statika a dynamika)	kapaliny, plyny	rovnováha a pohyb
mechanika pružných (deformovatelných) těles	reálná tělesa (kontinuum)	deformace, pružnost
mechanika zabývající se mechanickým kmitáním a vlněním	tělesa, kapaliny, plyny	kmity a vlny

Formy hmoty

Z hlediska forem HMOTY, které zkoumá fyzika, lze fyzikální objekty členit na dvě základní kategorie: LÁTKA a POLE (str. 175). V mechanice je účelné místo dvojice pojmů látka a pole používat dvojici pojmů těleso a pole. Jako příklady tělesa a pole lze uvést např. setrvačník a gravitační pole.

Víte, že mechanika je nejstarším oborem fyziky? Její členění na kinematiku, dynamiku a statiku souvisí s historickým vývojem fyzikálního poznání. Jako první fyzikální věda se vyvinula ve starověku a středověku statika, protože její znalosti byly nutné ke stavbě lodí, mostů, chrámů, hradů apod. Poté vzniká kinematika, kterou pomocí svých experimentů a studií rozvinul Galilei, a nakonec dynamika, kterou k dokonalosti přivedl svými objevy Newton.

2.1 Kinematika

Mechanický obraz světa

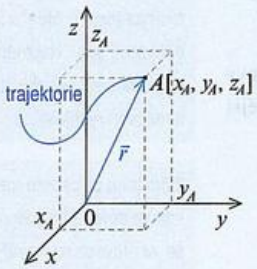
Zkoumané fyzikální objekty: hmotná tělesa, hmotné body.
Zkoumané fyzikální jevy: mechanické pohyby.
Mechanický obraz světa: homogenní a izotropní prostor; čas, který plyne sám o sobě, nezávisle na hmotě a pohybu.

Základní pojmy

HMOTNÝ BOD je myšlený bodový objekt, kterým při zkoumání mechanických pohybů těleso nahrazujeme. Má stejnou hmotnost jako těleso a představujeme si ho umístěný v těžišti tělesa (str. 27, 45). Hmotným bodem nahrazujeme těleso, jehož rozměry a tvar jsou pro zkoumaný pohyb zanedbatelné. Totéž těleso může být současně v pohybu vzhledem k jednomu tělesu a v klidu vzhledem k jinému tělesu. Je proto nutné určit při popisu pohybu tělesa vztažné těleso, vzhledem k němuž určujeme polohu.

Pokud spojíme vztažné těleso se soustavou souřadnic, dostaneme VZTAŽNOU SOUSTAVU.

Polohu hmotného bodu můžeme určit souřadnicemi nebo POLOHOVÝM VEKTOREM $\vec{r}$.



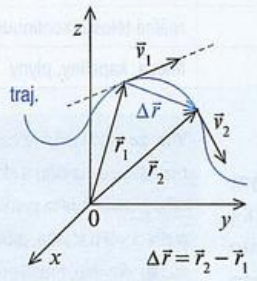
TRAJEKTORIE je množina všech poloh, kterými hmotný bod při pohybu prochází.

DRÁHA s je délka trajektorie hmotného bodu za danou dobu. Je to skalární fyzikální veličina a její jednotkou je metr (m).

PRŮMĚRNÁ RYCHLOST v_p je definována jako podíl dráhy Δs a času Δt, za který hmotný bod tuto dráhu urazí: $v_p = \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

OKAMŽITÁ RYCHLOST $\vec{v}$ je dána vztahem $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$, kde Δt je velmi malé, tj. $\Delta t \to 0$.

Okamžitá rychlost $\vec{v}$ je vektorová veličina a má směr tečny k trajektorii pohybu – je orientována ve směru změny polohového vektoru $\Delta \vec{r}$ pro $\Delta t \to 0$.



Veličina $\Delta \vec{r}$ vyjadřuje změnu polohového vektoru za čas Δt.

Osnova kapitoly:

- Základní pojmy a mechanické pohyby
- Rovnoměrný přímočarý pohyb
- Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb
- Rovnoměrně zpomalený přímočarý pohyb
- Rovnoměrný pohyb po kružnici
- Volný pád
- Skládání pohybů a rychlostí
- Svislý vrh vzhůru, vodorovný vrh, šikmý vrh vzhůru

Nahrazujeme-li těleso hmotným bodem, pak podle tvaru trajektorie rozlišujeme:

PŘÍMOČARÝ POHYB, jehož trajektorií je přímka.	KŘIVOČARÝ POHYB, jehož trajektorií je křivka.

Pokud nenahrazujeme těleso hmotným bodem, můžeme rozlišovat u těles:

POSUVNÝ POHYB, kdy trajektorie všech bodů tělesa mají stejný tvar.	OTÁČIVÝ POHYB, kdy trajektorie všech bodů tělesa mají tvar kružnic (nebo části kružnic), ale o různých poloměrech.

JEDNOTKOU RYCHLOSTI je metr za sekundu ($m \cdot s^{-1}$). Další užívané jednotky jsou kilometr za hodinu ($km \cdot h^{-1}$), kilometr za sekundu ($km \cdot s^{-1}$).

Odvození jednotky rychlosti: $[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{m}{s} = m \cdot s^{-1}$

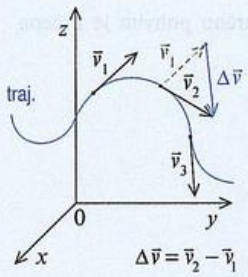
Symbol Δ vyjadřuje obecně změnu, tj. rozdíl počáteční a koncové hodnoty dané veličiny. „Δt je velmi malé" používáme ve smyslu $\Delta t \to 0$, čteme „Δt se blíží k nule".

OKAMŽITÁ RYCHLOST $\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$.

Podle rychlosti dělíme pohyby na:

- ROVNOMĚRNÝ POHYB – velikost rychlosti pohybu je konstantní (směr se může měnit);
- NEROVNOMĚRNÝ POHYB – velikost rychlosti se mění.

ZRYCHLENÍ $\vec{a}$ udává časovou změnu vektoru rychlosti a je dáno podílem $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ pro Δt velmi malé ($\Delta t \to 0$). Velikost zrychlení a v čase t je dána vztahem: $|\vec{a}| = a = \frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t}$.



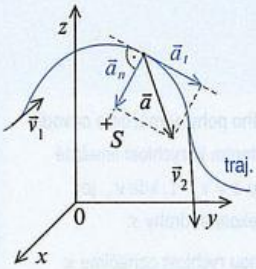
JEDNOTKOU ZRYCHLENÍ je metr za sekundu na druhou ($m \cdot s^{-2}$).

Odvození jednotky zrychlení:

$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{m \cdot s^{-1}}{s} = m \cdot s^{-2}$$

Zrychlení $\vec{a}$ hmotného bodu je možné rozložit na dvě navzájem kolmé složky:

- **TEČNÉ ZRYCHLENÍ** $\vec{a}_t$, které je rovnoběžné s tečnou trajektorie pohybu,
- **NORMÁLOVÉ ZRYCHLENÍ** $\vec{a}_n$, které je kolmé na tečnu trajektorie pohybu.



TEČNÉ ZRYCHLENÍ vyjadřuje změnu velikosti rychlosti v čase.

NORMÁLOVÉ ZRYCHLENÍ vzniká jen při křivočarých pohybech a vyjadřuje změnu orientace vektoru rychlosti v čase.

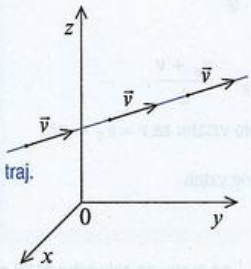
POHYBOVÝ STAV hmotného bodu je určen okamžitou rychlostí (str. 14).

Pro tečné a normálové zrychlení platí: $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$. Pro velikost zrychlení platí vztah: $|\vec{a}| = a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$.

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}, \text{ resp. } a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t}$$

Rovnoměrný přímočarý pohyb

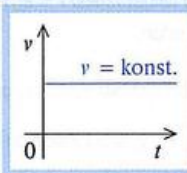
ROVNOMĚRNÝ PŘÍMOČARÝ POHYB je pohyb, při němž rychlost nemění velikost ani směr ($\vec{v} = \overline{\text{konst.}}$). Trajektorií pohybu je přímka.



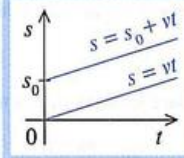
Dráha rovnoměrného přímočarého pohybu s je přímo úměrná času t a je určena vztahy:

- $s = v \cdot t$, je-li $s_0 = 0$;
- $s = s_0 + v \cdot t$, je-li $s_0 \neq 0$;

kde s_0 je počáteční ujetá dráha.



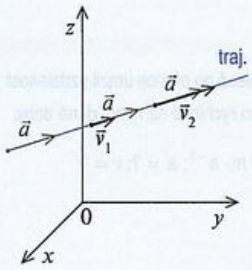
Závislost velikosti rychlosti v na čase t je konstantní funkcí. Grafem je polopřímka.



Závislost dráhy s na čase t je lineární funkcí. Grafem je polopřímka.

Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb

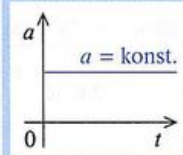
ROVNOMĚRNĚ ZRYCHLENÝ PŘÍMOČARÝ POHYB je pohyb, při němž zrychlení nemění velikost ani směr, tzn. $\vec{a} = \overline{\text{konst.}}$, a vektor zrychlení $\vec{a}$ má stejný směr jako vektor rychlosti $\vec{v}$. Trajektorií je přímka.



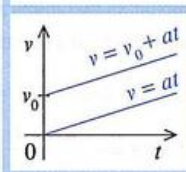
Velikost v okamžité rychlosti rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu je přímo úměrná času t a je určena vztahy:

- $v = a \cdot t$, je-li $v_0 = 0$;
- $v = v_0 + a \cdot t$, je-li $v_0 \neq 0$; kde v_0 je počáteční rychlost.

Pro výpočet velikosti rychlosti v rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu je možno pro $v_0 = 0$ a $s_0 = 0$ využít vztah: $v = \sqrt{2as}$.



Závislost velikosti zrychlení a na čase t je konstantní funkcí. Grafem je polopřímka.



Závislost velikosti rychlosti v na čase t je lineární funkcí. Grafem je polopřímka.

Vztah $v = \sqrt{2as}$ získáme odvozením ze vztahů $v = at$ a $s = \frac{1}{2}at^2$.

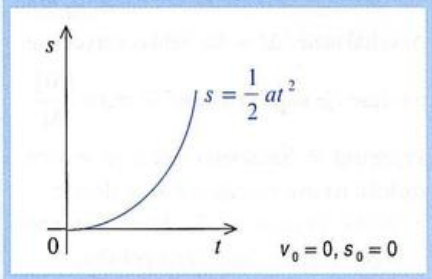
Pro výpočet rychlosti platí i vztah $v = \frac{2s}{t}$.

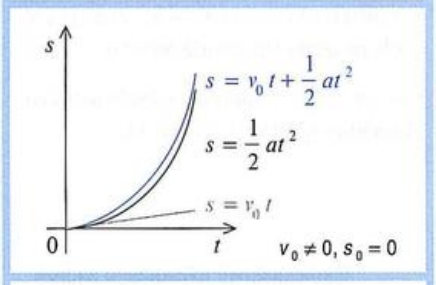
Dráha rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu je určena vztahy:

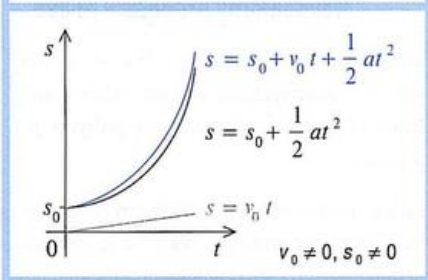
- $s = \frac{1}{2}at^2$, je-li $v_0 = 0$, $s_0 = 0$;
- $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$, je-li $v_0 \neq 0$, $s_0 = 0$;
- $s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$, je-li $v_0 \neq 0$, $s_0 \neq 0$;

kde v_0 je počáteční rychlost a s_0 je počáteční dráha.

Závislost dráhy s na čase t je kvadratická funkce (v_0 je počáteční rychlost, s_0 je počáteční dráha).







Př. 1

Dráhu rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu můžeme odvodit jednoduchou úvahou. Dráhu pohybu, při kterém je rychlost lineárně závislá na čase, vypočteme pomocí vztahu $s = v_p \cdot t$, kde v_p je průměrná rychlost a t je čas potřebný k překonání dráhy s.

a) Je-li počáteční rychlost nulová a konečnou rychlost označíme v, pak $v_p = \frac{0 + v}{2} = \frac{v}{2}$. Odtud $s = \frac{v}{2} \cdot t$.

Dosadíme-li do tohoto vztahu $v = at$, je $s = \frac{1}{2}at^2$, což je hledaný vztah.

b) Je-li počáteční rychlost nenulová, pak $v_p = \frac{v_0 + v}{2}$.

Odtud $s = \frac{v_0 + v}{2} \cdot t$. Dosadíme-li do tohoto vztahu za $v = v_0 + at$, je po úpravě $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$, což je hledaný vztah.

Př. 2

Převeď na uvedené jednotky: **a)** 36 km · h^{-1} na metry za sekundu; **b)** 36 m · s^{-1} na kilometry za hodinu.

a) $36\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1} = 36\ \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{36\,000\ \text{m}}{3\,600\ \text{s}} = 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

b) $36\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \frac{36\ \text{m}}{1\ \text{s}} = \frac{36 \cdot 10^{-3}\ \text{km}}{\frac{1}{3{,}6 \cdot 10^3}\ \text{h}} = \frac{36 \cdot 10^{-3}\ \text{km}}{0{,}2\overline{7} \cdot 10^{-3}\ \text{h}} = 129{,}6\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

Př. 3

Hmotný bod pohybující se rovnoměrně zrychleně po přímce urazil vzdálenost 18 m za 6 s. Jeho počáteční rychlost byla 5,4 km · h^{-1}. Urči zrychlení hmotného bodu a velikost jeho rychlosti na konci dané doby.

$s = 18\ \text{m}$; $t = 6\ \text{s}$; $v_0 = 5{,}4\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1} = 1{,}5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $a = ?$; $v = ?$

- Zapíšeme vztah pro dráhu.

$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \Rightarrow a = \frac{2 \cdot (s - v_0 t)}{t^2}$

- Ze vztahu pro dráhu vyjádříme zrychlení a vypočítáme (nejprve pouze číselnou hodnotu).

$\{a\} = \frac{2 \cdot (18 - 1{,}5 \cdot 6)}{6^2} = 0{,}5$; $a = 0{,}5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

$v = v_0 + at$

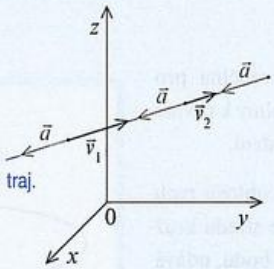
- Zapíšeme vztah pro rychlost a vypočítáme ji.

$\{v\} = 1{,}5 + 0{,}5 \cdot 6 = 4{,}5$; $v = 4{,}5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Hmotný bod má zrychlení 0,5 m · s^{-2} a velikost rychlosti 4,5 m · s^{-1}.

Rovnoměrně zpomalený přímočarý pohyb

ROVNOMĚRNĚ ZPOMALENÝ PŘÍMOČARÝ POHYB je pohyb, při kterém zrychlení nemění velikost ani směr ($\vec{a} = \overline{\text{konst.}}$) a vektor zrychlení $\vec{a}$ má opačný směr než vektor rychlosti $\vec{v}$. Trajektorií je přímka.



Velikost okamžité rychlosti v rovnoměrně zpomaleného přímočarého pohybu je přímo úměrná času a je určena vztahem $v = v_0 - a \cdot t$, kde v_0 je počáteční rychlost.

Pro dráhu rovnoměrně zpomaleného přímočarého pohybu platí:

- $s = v_0 t - \frac{1}{2}at^2$, je-li $s_0 = 0$;
- $s = s_0 + v_0 t - \frac{1}{2}at^2$, je-li $s_0 \neq 0$;

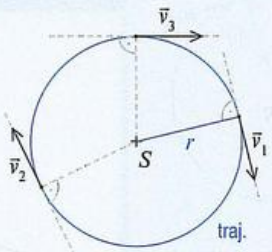
kde s_0 je počáteční dráha a v_0 je počáteční rychlost.

Pozor: při výpočtu dráhy rovnoměrně zpomaleného přímočarého pohybu je nutné si uvědomit, že pro hodnotu času t nelze užít libovolných hodnot, ale pouze hodnot z intervalu $\langle 0, t_n \rangle$, kde t_n je hodnota času, kdy hmotný bod dosáhne nulovou rychlost $v_n = v_0 - at_n = 0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow t_n = \frac{v_0}{a}$.

Pokud při rovnoměrně zpomaleném pohybu je velikost konečné rychlosti $v = 0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, platí pro počáteční rychlost v_0 vztah: $v_0 = \sqrt{2as}$. Pro dráhu s pak platí: $s = \frac{v_0}{2} t_n = \frac{v_0^2}{2a}$ (je-li $s_0 = 0$).

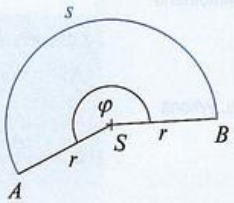
Rovnoměrný pohyb po kružnici

ROVNOMĚRNÝ POHYB PO KRUŽNICI je pohyb, při němž velikost rychlosti v je konstantní a trajektorií je kružnice.



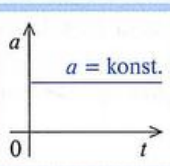
Při tomto pohybu se ovšem mění směr vektoru okamžité rychlosti $\vec{v}$ a rychlost hmotného bodu má v každém okamžiku směr tečny ke kružnici.

PRŮVODIČ r je spojnice hmotného bodu a středu kružnice, po které se bod pohybuje.

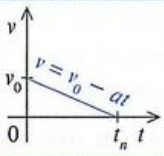


ÚHLOVÁ DRÁHA φ je středový úhel opsaný průvodičem hmotného bodu za dobu t:

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

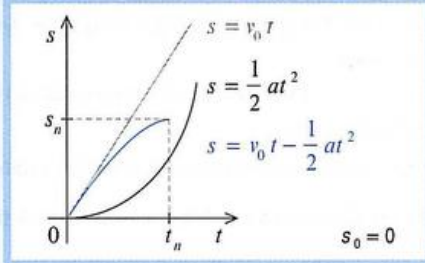


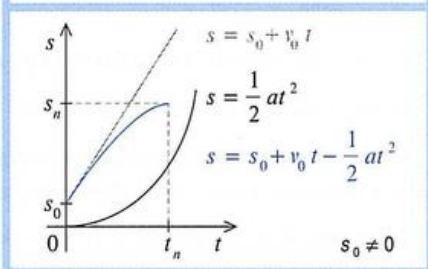
Závislost velikosti zrychlení a na čase t je konstantní funkcí. Grafem je polopřímka.

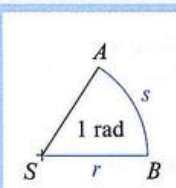


Závislost velikosti rychlosti v na čase t je klesající lineární funkcí. Grafem je úsečka s počátkem $[0; v_0]$ a koncem $[t_n; 0]$.

Závislost dráhy s na čase t je kvadratická funkce. Grafem je část paraboly s počátečním bodem $[0; s_0]$ a koncovým bodem $[t_n; s_n]$:







JEDNOTKOU ÚHLOVÉ DRÁHY je **RADIÁN** (rad). Jeden radián je středový úhel, jemuž přísluší oblouk kružnice stejné délky, jako je její poloměr, 1 rad ≐ 57,3 °.

Pro délku oblouku s platí vztah $s = r \cdot \varphi$, kde r je poloměr kružnice a φ je středový úhel.

Převod úhlových stupňů na radiány:

$\alpha° = \alpha \cdot \frac{\pi}{180}$ rad, což plyne ze vztahů

$360° = 2\pi$ rad, tj. $1° = \frac{\pi}{180}$ rad.

ÚHLOVÁ RYCHLOST ω je další fyzikální veličina popisující pohyb hmotného bodu po kružnici. Její velikost určíme jako podíl úhlové dráhy $\Delta\varphi$, kterou opíše hmotný bod za dobu Δt, a této doby: $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$.

Úhlová rychlost $\vec{\omega}$ se zavádí jako vektorová veličina pro určení směru pohybu po kružnici. Vektor $\vec{\omega}$ je kolmý k rovině kružnice a leží na přímce procházející jejím středem.

PRAVIDLEM PRAVÉ RUKY určíme směr vektoru úhlové rychlosti: jestliže prsty pravé ruky obrácené dlaní ke středu kružnice ukazují směr okamžité rychlosti hmotného bodu, udává vztyčený palec směr vektoru $\vec{\omega}$.

Rovnoměrný pohyb po kružnici je periodický.

PERIODA T je fyzikální veličina vyjadřující dobu trvání jednoho oběhu.

FREKVENCE f je fyzikální veličina vyjadřující počet oběhů za jednotku času.

Frekvenci a periodu spojuje následující vztah: $f = \frac{1}{T}$.

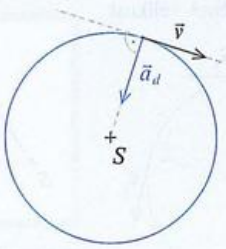
Pro velikost úhlové rychlosti ω platí následující vztahy:

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

OKAMŽITÁ RYCHLOST $\vec{v}$ hmotného bodu při rovnoměrném pohybu po kružnici má velikost: $v = r \cdot \omega = \frac{2\pi r}{T}$.

Protože při rovnoměrném pohybu hmotného bodu po kružnici se neustále mění směr vektoru okamžité rychlosti $\vec{v}$, existuje **DOSTŘEDIVÉ ZRYCHLENÍ** $\vec{a}_d = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$, kde Δt je velmi malé, tj. $\Delta t \to 0$.

Dostředivé zrychlení $\vec{a}_d$ je kolmé k vektoru okamžité rychlosti $\vec{v}$ v daném bodě, tudíž směřuje do středu kružnice.



Velikost dostředivého zrychlení a_d je konstantní a platí:

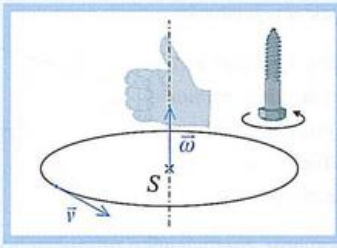
$a_d = \frac{v^2}{r}$ nebo $a_d = \omega^2 r$.

Př. 4

Jaká je frekvence rovnoměrného kruhového pohybu hmotného bodu, je-li oběžná doba $T = \frac{1}{4}$ s?

Je-li doba oběhu hmotného bodu po kružnici $T = \frac{1}{4}$ s, vykoná za sekundu 4 oběhy, tedy frekvence je $f = 4$ Hz.

JEDNOTKOU ÚHLOVÉ RYCHLOSTI je radián za sekundu (rad · s^{-1}). $[\omega] = \frac{[\Delta\varphi]}{[\Delta t]} = \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$



PRAVIDLO PRAVOTOČIVÉHO ŠROUBU

PRAVIDLO PRAVÉ RUKY

JEDNOTKOU PERIODY je sekunda (s).

JEDNOTKOU FREKVENCE je **HERTZ** (Hz).

$[f] = \frac{1}{[T]} = \frac{1}{\text{s}} = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$

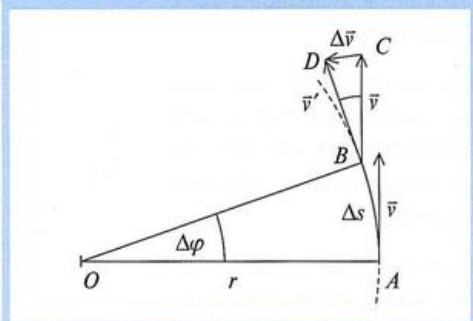
Dosadíme-li do vztahu pro úhlovou rychlost dobu oběhu $\Delta t = T$ a jí příslušnou úhlovou dráhu $\Delta\varphi = 2\pi$, můžeme velikost úhlové rychlosti vyjádřit následovně:

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{f^{-1}} = 2\pi f$

Odvození velikosti rychlosti v hmotného bodu při pohybu po kružnici: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{r \cdot \Delta\varphi}{\Delta t} = r \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = r \cdot \omega$

DOSTŘEDIVÉ ZRYCHLENÍ $\vec{a}_d = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$.

Odvození velikosti dostředivého zrychlení.



Z podobnosti trojúhelníků OAB a BCD pro $\Delta\varphi \to 0$ plyne:

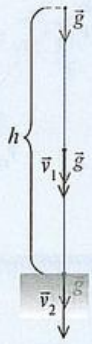
$\frac{|\Delta\vec{v}|}{v} = \frac{\Delta s}{r}$, odtud $|\Delta\vec{v}| = \frac{\Delta s \cdot v}{r}$, tedy

$|\vec{a}_d| = \frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t} = \frac{\Delta s \cdot v}{\Delta t \cdot r} = \frac{v^2}{r} = \frac{r^2\omega^2}{r} = r \cdot \omega^2$.

Volný pád

VOLNÝ PÁD je pohyb, který koná volně puštěné těleso z výšky h v tíhovém poli v blízkosti povrchu Země. Můžeme-li zanedbat odpor vzduchu, jde pak o rovnoměrně zrychlený pohyb s nulovou počáteční rychlostí a tíhovým zrychlením $\vec{g}$. Pro dráhu s a velikost rychlosti v volného pádu v čase t platí:

$s = \frac{1}{2}gt^2, v = g \cdot t.$



TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ $\vec{g}$ směřuje vždy svisle dolů (je kolmé k vodorovné rovině) a v naší zeměpisné šířce má velikost přibližně $g = 9{,}81\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Rychlost v tělesa v okamžiku dopadu z výšky h je: $v = \sqrt{2gh}$.

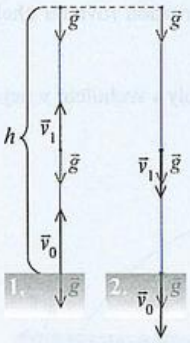
Skládání pohybů a rychlostí

PRINCIP NEZÁVISLOSTI POHYBŮ: Koná-li hmotný bod dva nebo více pohybů současně, je jeho výsledná poloha taková, jako by konal tyto pohyby po sobě, a to v libovolném pořadí.

ZÁKON SKLÁDÁNÍ RYCHLOSTÍ: Pokud se hmotný bod pohybuje jedním směrem rychlostí $\vec{v}_1$ a současně druhým směrem rychlostí $\vec{v}_2$, jeho výsledná rychlost $\vec{v}$ je dána vektorovým součtem $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$.

Svislý vrh vzhůru

SVISLÝ VRH VZHŮRU je pohyb, který koná těleso vržené počáteční rychlostí $\vec{v}_0$ svisle vzhůru. Protože zrychlení $\vec{g}$ má opačný směr než počáteční rychlost $\vec{v}_0$, jde o rovnoměrně zpomalený pohyb. Okamžitá rychlost $\vec{v}$ se s rostoucí výškou postupně zmenšuje až na nulu, kdy těleso dosáhne největší výšky h a začne padat k zemi volným pádem.



Pro velikost okamžité rychlosti v platí:
$v = v_0 - g \cdot t.$

Pro okamžitou výšku y v čase t platí: $y = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$.

VÝŠKA VÝSTUPU h je největší výška, které těleso dosáhne během svislého vrhu vzhůru: $h = \frac{v_0^2}{2g}$.

DOBA VÝSTUPU t_h je čas, za který těleso dosáhne výšky h: $t_h = \frac{v_0}{g}$.

Pro **SVISLÝ VRH VZHŮRU** platí: těleso z výšky h dopadá na zem stejnou rychlostí, jakou bylo vrženo vzhůru.

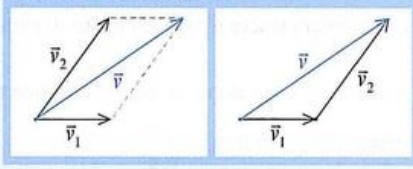
Vztahy pro volný pád, svislý vrh vzhůru, vodorovný vrh a šikmý vrh vzhůru platí za předpokladu, že těleso lze nahradit hmotným bodem, kdy lze zanedbat odpor vzduchu a přesně definovat jeho dráhu.

Mezinárodní dohodou byla stanovena hodnota **NORMÁLNÍHO TÍHOVÉHO ZRYCHLENÍ** $g = 9{,}80665\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Vztah $v = \sqrt{2gh}$ vyplývá ze vztahu $v = \sqrt{2as}$ (str. 15).

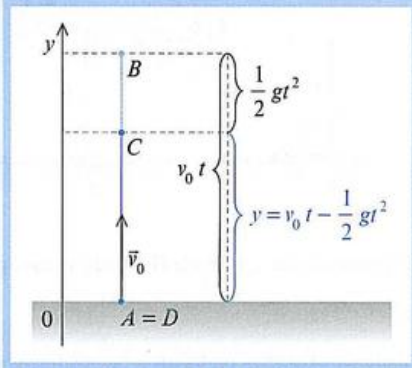
Tíhová síla, tíhové pole a tíhové zrychlení (str. 27 a str. 40).

Vektorové skládání rychlostí



SVISLÝ VRH VZHŮRU si můžeme představit jako dva nezávislé pohyby, které se skládají z:

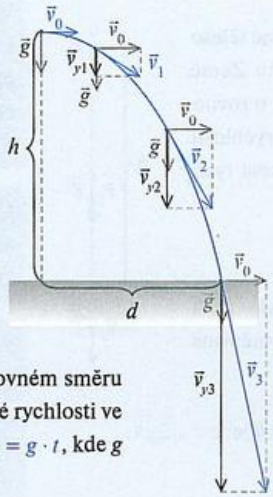
- rovnoměrného přímočarého pohybu vzhůru rychlostí v_0, kdy se hmotný bod v čase t dostane z bodu A do bodu B, jehož výška je $y = v_0 t$,
- volného pádu z bodu B do bodu C, jehož délka je $y = \frac{1}{2}gt^2$.



Bod A označuje místo vrhu, bod D místo dopadu.

Vztah pro výšku výstupu lze odvodit z podmínky $0 = v_0 - g \cdot t$ a vztahu $v_0 = \sqrt{2as}$ (str. 17).

Vodorovný vrh



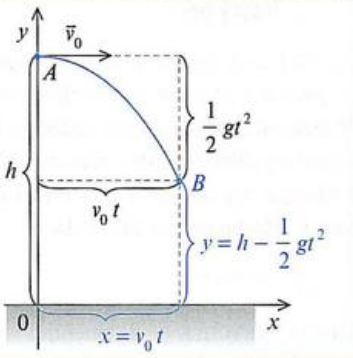
VODOROVNÝ VRH je pohyb, který koná těleso, udělíme-li mu ve výšce h počáteční rychlost $\vec{v}_0$ ve vodorovném směru. Trajektorií vodorovného vrhu je část paraboly s vrcholem v místě vrhu $[0; h]$. Jestliže h je výška, odkud těleso vrháme, jsou souřadnice tělesa v čase t v bodě $B[x; y]$:

$x = v_0 t$, $y = h - \frac{1}{2}gt^2$.

Velikost okamžité rychlosti v_x ve vodorovném směru je konstantní: $v_x = v_0$ a velikost okamžité rychlosti ve svislém směru v_y bude dána vztahem: $v_y = g \cdot t$, kde g je tíhové zrychlení.

DÉLKA VRHU d je největší vzdálenost od místa vrhu ve vodorovném směru a zároveň místo dopadu: $d = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$.

DOBA VRHU t_n je doba, za kterou dosáhne těleso vržené vodorovným vrhem výšky $y = 0$; $t_n = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.



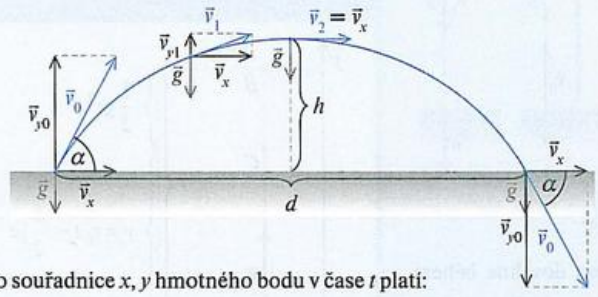
Vodorovný vrh lze složit ze dvou pohybů:
- rovnoměrného přímočarého pohybu ve vodorovném směru a
- volného pádu ve svislém směru.

Odvození délky vodorovného vrhu d a doby vrhu t: souřadnice místa vrhu A jsou $x_0 = 0$, $y_0 = h$ a místa dopadu D jsou $x_D = d$, $y_D = 0$. Proto $h - \frac{1}{2}gt^2 = 0$, odtud pro dobu vodorovného vrhu platí $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ a po dosazení do vztahu $x_D = v_0 t$ je délka vrhu $d = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$.

Šikmý vrh vzhůru

ŠIKMÝ VRH VZHŮRU je pohyb, který koná těleso, udělíme-li mu počáteční rychlost $\vec{v}_0$ ve směru, který svírá s vodorovnou rovinou úhel α. Tento úhel nazýváme **ELEVAČNÍM ÚHLEM**.

Trajektorií šikmého vrhu vzhůru je část paraboly s vrcholem v nejvyšším bodě vrhu h.

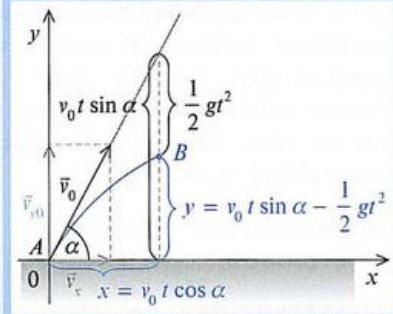


Pro souřadnice x, y hmotného bodu v čase t platí:

$x = v_0 \cdot t \cdot \cos\alpha$, $y = v_0 t \cdot \sin\alpha - \frac{1}{2}gt^2$.

Velikost okamžité rychlosti v_x ve vodorovném směru je konstantní: $v_x = v_0 \cdot \cos\alpha$.

Velikost okamžité rychlosti ve svislém směru v_y je dána vztahem: $v_y = v_0 \cdot \sin\alpha - g \cdot t$, kde g je tíhové zrychlení.



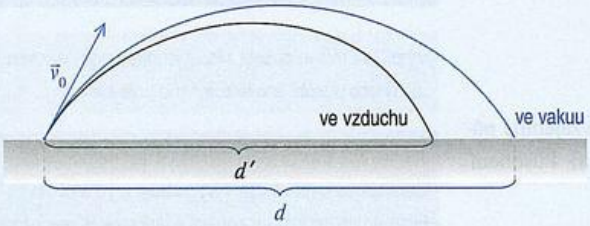
Šikmý vrh vzhůru lze složit ze dvou pohybů:
- rovnoměrného přímočarého pohybu ve vodorovném směru a
- vrhu svislého vzhůru.

Po vyloučení času t ze vztahů pro souřadnice x, y dostaneme rovnici trajektorie šikmého vrhu: $y = x \cdot \mathrm{tg}\,\alpha - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2$.

DÉLKA VRHU d je největší vzdálenost od místa vrhu ve vodorovném směru a zároveň místo dopadu ve výšce $y = 0$: $d = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

VÝŠKA VÝSTUPU h je maximální výška, které těleso dosáhne během šikmého vrhu vzhůru: $h = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}$.

Výška výstupu h a délka vrhu d závisí na velikosti počáteční rychlosti a na elevačním úhlu. Maximální délka vrhu je při elevačním úhlu 45°.



Ve vzduchu je pohyb tělesa ovlivněn odporem vzduchu. Trajektorií šikmého vrhu vzhůru je **BALISTICKÁ KŘIVKA**, kde $d' < d$.

Délku vrhu d určíme ze souřadnic bodu dopadu D, $x_D = d$, $y_D = 0$. Odtud

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

tedy pro dobu pohybu hmotného bodu platí

$t = 2 v_0 \frac{\sin\alpha}{g}$.

Po dosazení za t do vztahu pro x_D získáme délku vrhu

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

Ve výšce výstupu h je okamžitá rychlost $\vec{v}_h$ nulová, tedy $v_y = v_0 \cdot \sin\alpha - g \cdot t = 0$. Odtud

$t = v_0 \frac{\sin\alpha}{g}$.

Po dosazení za čas t do vztahu pro souřadnici $y = v_0 t \cdot \sin\alpha - \frac{1}{2} g t^2 = h$ získáme výšku výstupu

$h = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}$.

Př. 5

Z věže o výšce 45 metrů byl vodorovným směrem vržen kámen rychlostí 25 $m \cdot s^{-1}$. Urči dobu t, za kterou kámen dopadne, a délku vrhu d.

$v_0 = 25\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $h = 45$ m; $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$; $t = ?$, $d = ?$

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

$\{t\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 45}{10}} = 3$; $t = 3$ s

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

$\{d\} = 25 \cdot 3 = 75$; $d = 75$ m

Kámen dopadne za 3 sekundy a délka vrhu kamene bude 75 metrů.

- Zapíšeme vztahy platící pro délku a dobu vodorovného vrhu a dosadíme do nich.

Př. 6

Letadlo letí rovnoměrně přímočaře rychlostí 600 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$, vrtule se otáčí úhlovou rychlostí 200 $\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$. Urči, jakou dráhu uletí letadlo během jedné otáčky vrtule.

$v = 600\ \mathrm{km \cdot h^{-1}} = 166{,}7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $\omega = 200\ \mathrm{rad \cdot s^{-1}}$; $s = ?$

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

$s = vt = vT = v\frac{2\pi}{\omega}$

$\{s\} = 166{,}7 \cdot \frac{2\pi}{200} = 5{,}3$; $s = 5{,}3$ m

Během jedné otáčky vrtule urazí letadlo 5,3 m.

- Zapíšeme vztah pro úhlovou rychlost a vyjádříme z něho periodu T.
- Dráhu vypočítáme ze vztahu pro rovnoměrný přímočarý pohyb, kam za dobu t dosadíme periodu T.

2.2 Dynamika

Mechanický obraz světa

Zkoumané fyzikální objekty: hmotná tělesa, hmotné body.
Zkoumané fyzikální jevy: mechanické pohyby.
Mechanický obraz světa: absolutní, homogenní a izotropní prostor; absolutní čas, který plyne sám o sobě nezávisle na hmotě a pohybu, síly působící okamžitě na dálku.

Síla

SÍLA $\vec{F}$ je fyzikální veličina, která charakterizuje vzájemné působení (interakci) fyzikálních objektů (těles a polí). Působení síly na těleso se projevuje:

- při vzájemném dotyku těles (dotykové síly),
- na dálku prostřednictvím silových polí (např. gravitačního nebo elektromagnetického pole).

Účinky síly na těleso jsou:

- deformační – mění se tvar tělesa,
- pohybové – mění se pohybový stav tělesa.

SÍLA je vektorová veličina – má velikost, směr a působiště. Proto účinek síly závisí i na jejím působišti.

Síly působící na dálku prostřednictvím silových polí

GRAVITAČNÍ SÍLA je přitažlivá síla, kterou na sebe působí jakákoliv dvě hmotná tělesa, aniž musí dojít k jejich bezprostřednímu dotyku. V prostoru, v němž se projevují účinky gravitační síly, je GRAVITAČNÍ POLE. Gravitační pole existuje v okolí všech hmotných těles (např. v okolí Země, planet, Slunce, hvězd apod.).

ELEKTRICKÁ SÍLA je přitažlivá nebo odpudivá síla, kterou na sebe působí elektricky nabitá tělesa nebo elementární částice s elektrickým nábojem.

MAGNETICKÁ SÍLA je síla, která se projevuje v magnetickém poli působením na železo, jiné magnety a na pohybující se elektrické náboje.

ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE je vzájemné působení (elektrické i magnetické) elektrických nábojů a je zprostředkováno ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM.

Osnova kapitoly:

- Síla, skládání sil, rozklad síly
- Smykové tření, třecí síla, valivý odpor
- Dostředivá síla, tíhová síla, tíha, těžiště
- Newtonovy pohybové zákony – zákon setrvačnosti, zákon síly, zákon akce a reakce
- Hybnost a impuls síly, zákon zachování hybnosti
- Inerciální a neinerciální vztažná soustava
- Setrvačné síly
- Moment hybnosti

Výrok „na těleso působí síla..." je zkráceným výrokem „na těleso působí jiné těleso nebo pole silou...".

JEDNOTKOU SÍLY je NEWTON (N). Jeden newton je síla, která tělesu o hmotnosti 1 kg uděluje zrychlení $1\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$. Fyzikální rozměr síly v soustavě jednotek SI je možno odvodit z 2. NPZ (str. 29):
$\mathrm{N} = [F] = [m] \cdot [a] = \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}$

Klasická mechanika označuje síly často podle toho, o jaký fyzikální jev se jedná: např. tření – třecí síla, tlak – tlaková síla, odpor prostředí – odporová síla apod.

Moderní fyzika zná čtyři základní síly, tzv. základní fyzikální interakce (str. 201):

- SILNÁ INTERAKCE s velmi krátkým dosahem zodpovědná za stabilitu nukleonů (fundamentální silná interakce) a atomových jader (zbytková silná interakce – jaderná síla),
- SLABÁ INTERAKCE, která souvisí s radioaktivním rozpadem,
- GRAVITAČNÍ SÍLA,
- ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE.

TÍHOVÁ SÍLA je síla, kterou jsou všechna tělesa přitahována k Zemi v blízkosti jejího povrchu. Směřuje svisle dolů (str. 40).

V prostoru, v němž se projevují účinky elektrické síly, je ELEKTRICKÉ POLE.

MAGNETICKÉ POLE je silové pole, které vytváří magnet a pohybující se elektrické náboje.

Elektrické a magnetické pole jsou speciálními případy ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE.

Síly působící při vzájemném dotyku fyzikálních objektů

TŘECÍ SÍLA $\vec{F}_t$ vzniká při smykovém tření na stykových plochách při posunu tělesa po podložce (po povrchu jiného tělesa) a působí proti směru pohybu (str. 26).

VALIVÝ ODPOR vzniká při valivém pohybu kruhového tělesa po pevné podložce. Proti pohybu tělesa působí brzdicí síla, která se nazývá **ODPOROVÁ SÍLA** (str. 26).

ODPOROVÁ SÍLA vzniká také při pohybu tělesa v kapalině (hydrodynamická odporová síla) nebo plynu (aerodynamická odporová síla) a působí proti směru pohybu tělesa. Jedná se o **ODPOR PROSTŘEDÍ**, jehož příčinou jsou třecí síly vzniklé při obtékání tělesa kapalinou nebo plynem (str. 56).

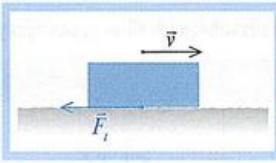
TLAKOVÁ SÍLA v kapalinách nebo plynech působí kolmo na stěnu nádoby nebo jakéhokoliv tělesa (str. 50).

TLAKOVÁ SÍLA při působení na pevné těleso způsobuje jeho deformaci (str. 57).

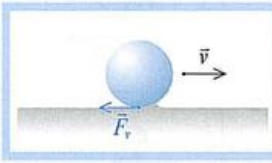
TAHOVÁ SÍLA při působení na pevné těleso způsobuje jeho deformaci tahem.

VZTLAKOVÁ SÍLA je výslednice tlakových sil, které působí na povrch tělesa v kapalině nebo v plynu. Vztlaková síla těleso nadnáší (str. 53).

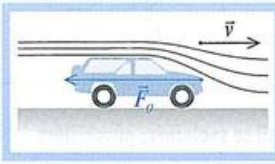
DOSTŘEDIVÁ SÍLA způsobuje pohyb tělesa po křivce, např. po kružnici, kdy směřuje do středu kružnice (str. 27).



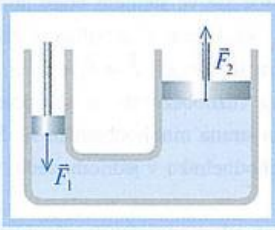
$\vec{F}_t$ je **TŘECÍ SÍLA** působící proti směru pohybu.



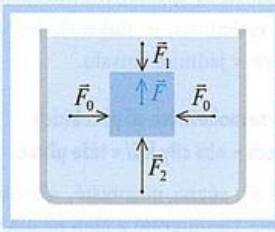
$\vec{F}_v$ je **ODPOROVÁ SÍLA** valivého odporu.



$\vec{F}_o$ je **ODPOROVÁ SÍLA** působící proti směru pohybu.



TLAKOVÁ SÍLA
$F = p \cdot S$, kde
p – tlak v kapalině,
S – plocha.



VZTLAKOVÁ SÍLA
$\vec{F} = \vec{F}_2 - \vec{F}_1$ je důsledkem působení hydrostatických tlakových sil na povrch tělesa.

DOSTŘEDIVÁ SÍLA může být dotyková – způsobená třením kol vozidla v zatáčce, nebo působí na dálku – gravitační síla Slunce působící na planety.

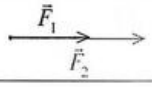
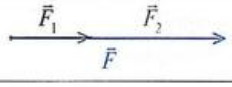
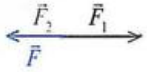
Skládání sil

SKLÁDAT SÍLY znamená nahradit je jedinou silou, jež má stejný účinek jako síly, které skládáme. Tato síla se nazývá **VÝSLEDNICE SIL**. Výslednice $\vec{F}$ je vektorovým součtem všech sil působících na fyzikální objekt: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n$.

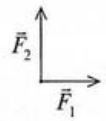
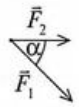
VÝSLEDNICE je síla stejně velká, ale opačného směru jako síla, která skládané síly udrží v rovnováze.

Skládání dvou sil se společným působištěm

Výslednice $\vec{F}$ má působiště O ve stejném bodě jako dvě skládané síly $\vec{F}_1$ a $\vec{F}_2$. Síly jsou stejného směru.

SKLÁDANÉ SÍLY	KONSTRUKCE VÝSLEDNICE SIL	VELIKOST VÝSLEDNICE SIL
		$F = F_1 + F_2$
		$F = F_1 - F_2$

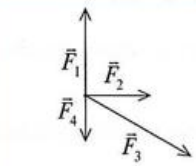
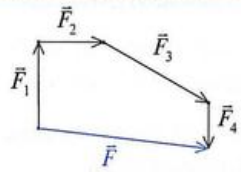
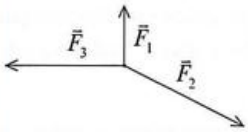
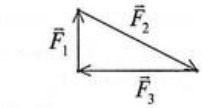
Skládání dvou různoběžných sil se společným působištěm

SKLÁDANÉ SÍLY	KONSTRUKCE VÝSLEDNICE SIL	VELIKOST VÝSLEDNICE SIL
		$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2}$
		$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\alpha}$

Skládání více sil se společným působištěm

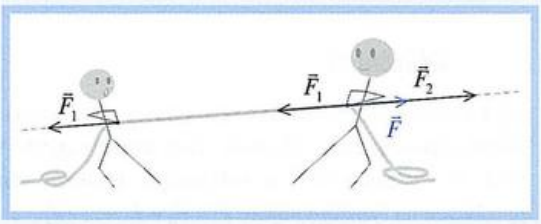
Výslednice $\vec{F}$ má působiště ve stejném bodě jako skládané síly $\vec{F}_1, \vec{F}_2, ..., \vec{F}_n$. Výslednici $\vec{F}$ několika sil získáme postupným skládáním těchto sil: $\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2+...+\vec{F}_n$. Výslednicí $\vec{F}$ několika různoběžných sil se společným působištěm je závěrná strana mnohoúhelníku sil. Složky jdou po obvodu mnohoúhelníku v jednom sledu, výslednice jde proti nim.

Několik různoběžných sil se společným působištěm je v rovnováze (jejich výslednice je nulová), je-li silový mnohoúhelník uzavřen v jednom smyslu.

SKLÁDANÉ SÍLY	KONSTRUKCE VÝSLEDNICE SIL
	
	 $\vec{F}=\vec{0}$. Výslednice sil je nulová.

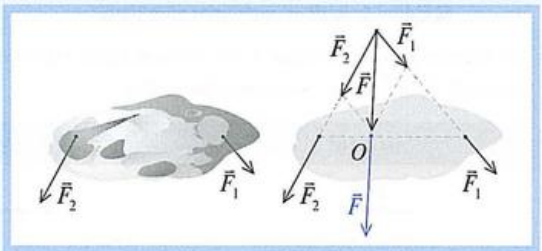
Skládání dvou rovnoběžných sil působících v různých bodech – obě síly leží v téže přímce

Mají-li dvě síly $\vec{F}_1$ a $\vec{F}_2$ různá působiště, ale obě leží v téže přímce, můžeme kteroukoliv z nich posunout do působiště druhé síly a najít výslednici podle vztahu $\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2$. Výslednou sílu $\vec{F}$ můžeme také posunout do libovolného působiště, které leží na vektorové přímce, tj. přímce proložené vektorem $\vec{F}$.



Skládání dvou různoběžných sil působících v různých bodech na pevné těleso

Síly $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ přeneseme po jejich vektorových přímkách do společného působiště, kde je složíme pomocí vektorového rovnoběžníku. Výslednou sílu pak přeneseme po vektorové přímce tak, aby měla působiště na spojnici působišť sil $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$. Působiště O výslednice $\vec{F}$ se jmenuje **STŘED SIL**.

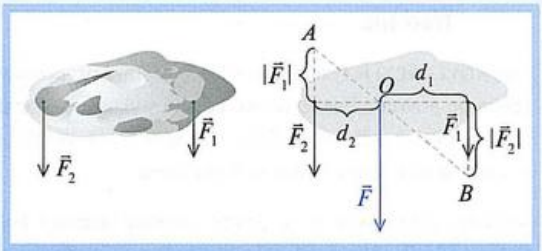


Při skládání sil využíváme poznatku, že účinek síly se nemění posunutím působiště síly po její vektorové přímce.

Skládání dvou rovnoběžných sil stejného směru působících v různých bodech na pevné těleso

Výslednice sil má velikost $F = F_1 + F_2$, je se skládanými silami rovnoběžná a její působiště je na spojnici obou sil, blíž větší síle. K určení přesné polohy působiště O výslednice sil $\vec{F}$ užijeme vztah vyplývající z momentové věty. Protože účinek síly $\vec{F}$ na těleso je stejný jako účinky sil $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, musí být jejich otáčivé účinky na těleso vzhledem k bodu O nulové, tedy:

$$M_1 = M_2 \Rightarrow F_1 d_1 = F_2 d_2 \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

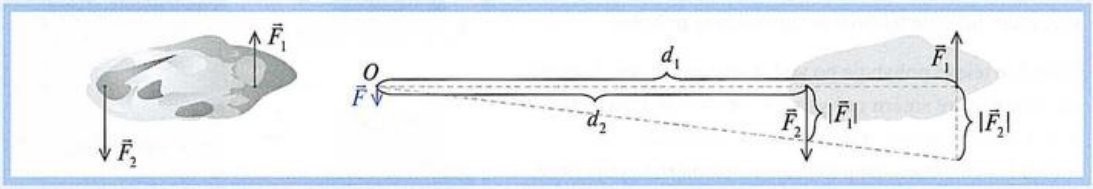


Poměr sil je opačný k poměru jejich ramen, jak vyplývá z momentové věty. Využijeme toho ke grafickému určení působiště výslednice $\vec{F}$. Působiště síly $\vec{F}$ je v místě, kde úsečka AB protne spojnici působišť sil $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$. Výslednice $F = F_1 + F_2$.

Skládání dvou rovnoběžných sil opačného směru působících v různých bodech na pevné těleso

Výslednice má velikost $F = F_2 - F_1$, leží vně obou sil na straně větší síly, s níž je souhlasně rovnoběžná. Vzdálenost působiště výslednice od působišť obou sil je v obráceném poměru sil: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$.

Při hledání a konstrukci působiště O výslednice obou sil postupujeme podobně jako v případě rovnoběžných sil téhož směru, tj. využijeme momentovou větu, odkud $M_1 = M_2$, tj. $F_1 d_1 = F_2 d_2$.

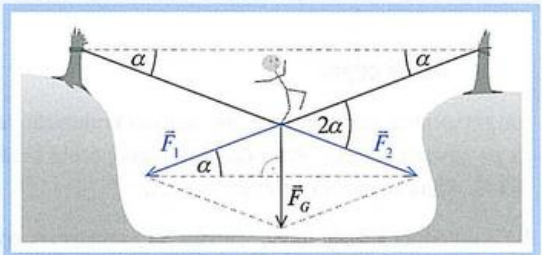


Rozklad síly

ROZLOŽIT SÍLU znamená nahradit ji dvěma nebo více silami, které mají na těleso stejný účinek jako daná síla.

Rozklad síly na dvě různoběžné složky

Rozklad síly $\vec{F}_G$ provedeme tak, že počátečním bodem vektoru $\vec{F}_G$ vedeme přímky danými směry. Složky $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ tvoří strany vektorového rovnoběžníku a vycházejí z působiště síly $\vec{F}_G$, která je úhlopříčkou rovnoběžníku.



Lano je napínáno tíhovou silou $\vec{F}_G$, kterou rozložíme na F_1, F_2:

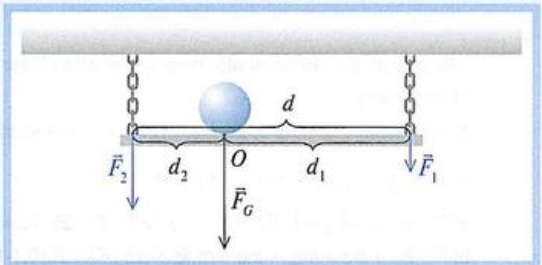
$\vec{F}_G = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ $\quad \frac{F_G}{2} = F_1 \sin\alpha$ $\quad F_1 = F_2$

Rozklad síly na dvě rovnoběžné složky

Známe-li vzdálenosti působišť obou složek d_1, d_2 od síly $\vec{F}_G$, kterou rozkládáme, pak velikosti složek určíme řešením následující soustavy rovnic: $F_G = F_1 + F_2$ ❶

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad ❷$$

Protože účinek síly $\vec{F}$ na těleso je stejný jako účinky sil $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, musí být jejich otáčivé účinky na těleso vzhledem k bodu O nulové a platí momentová věta (str. 44): $M_1 = M_2$, tj. $F_1 d_1 = F_2 d_2$, z čehož odvodíme rovnici ❷.



Řešením rovnic ❶, ❷ dostaneme pro F_1, F_2 vztahy:

$F_1 = \frac{d_2}{d} F_G$ $\quad F_2 = \frac{d_1}{d} F_G$

Třecí síla

SMYKOVÉ TŘENÍ je fyzikální jev, který nastává při posouvání tělesa po povrchu jiného tělesa, kdy na stykových plochách těles vzniká brzdicí síla. Tato síla se nazývá **TŘECÍ SÍLA** a směřuje vždy proti směru pohybu tělesa.

Velikost **TŘECÍ SÍLY** $\vec{F}_t$ je přímo úměrná velikosti kolmé tlakové síly $\vec{F}_N$, kterou působí těleso kolmo na podložku, tedy $F_t = f \cdot F_N$, kde f je **SOUČINITEL SMYKOVÉHO TŘENÍ**.

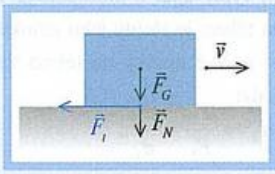
TŘECÍ SÍLA $\vec{F}_t$ nezávisí na obsahu stykových ploch a při běžných rychlostech ani na rychlosti pohybu tělesa. Při velkých rychlostech se třecí síla zmenšuje, proto je účinnost automobilových brzd při velké rychlosti snížena.

Součinitel klidového tření f_0 je větší než součinitel tření f za pohybu. Proto je třecí síla $\vec{F}_{t0}$ u těles v klidu (pokud se je snažíme uvést do pohybu) větší než třecí síla $\vec{F}_t$ u těles v pohybu, tedy $F_{t0} = f_0 \cdot F_N > F_t, F_t = f \cdot F_N$. Proto je síla, která překonává klidové tření a uvádí těleso do pohybu, větší než síla, která udržuje těleso v rovnoměrném pohybu.

Pokud se těleso pohybuje po vodorovné podložce, $\vec{F}$ je stálá síla působící ve směru pohybu a $\vec{F}_t$ je třecí síla, pak platí:

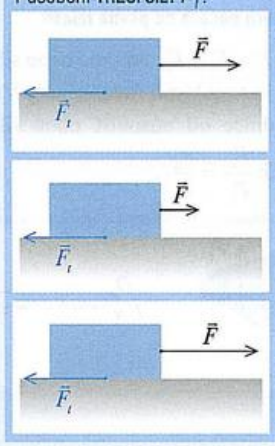
- Je-li $F = F_t$, těleso se pohybuje rovnoměrně.
- Je-li $F < F_t$, těleso se pohybuje rovnoměrně zpomaleně.
- Je-li $F > F_t$, těleso se pohybuje rovnoměrně zrychleně.

Hlavní příčinou vzniku **TŘECÍ SÍLY** jsou nerovnosti na styčných plochách a přitažlivé síly mezi částicemi povrchových vrstev těles (u velmi hladkých a vyleštěných ploch). Při pohybu nerovnosti stykových ploch na sebe narážejí, zapadají do sebe, deformují se a obrušují.



Na vodorovné rovině je kolmá tlaková síla $\vec{F}_N$ rovna tíhové síle $\vec{F}_G$, tj. $F_N = F_G$.

Působení **TŘECÍ SÍLY** $\vec{F}_t$:



$F = F_t$
$\Rightarrow$ rovnoměrný pohyb

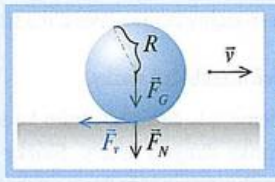
$F < F_t$
$\Rightarrow$ těleso zpomaluje

$F > F_t$
$\Rightarrow$ těleso zrychluje

Valivý odpor

VALIVÝ ODPOR vzniká při valivém pohybu kruhového tělesa po pevné podložce. Proti pohybu tělesa působí brzdicí síla $\vec{F}_v$, která se nazývá **ODPOROVÁ SÍLA**.

Velikost odporové síly $\vec{F}_v$ je přímo úměrná velikosti tlakové síly $\vec{F}_N$, kterou působí těleso na podložku, a nepřímo úměrná poloměru R tělesa, tedy $F_v = \xi \cdot \frac{F_N}{R}$, kde se součinitel ξ nazývá **RAMENO VALIVÉHO ODPORU**.



ODPOROVÁ SÍLA je vyvolána deformací podložky a někdy i deformací tělesa.

JEDNOTKOU RAMENE VALIVÉHO ODPORU ξ je metr.

Př. 1

Urči, jak velkou vodorovnou silou musíme působit na kvádr o hmotnosti 20 kg, aby se pohyboval po vodorovné rovině:

a) rovnoměrně,

b) rovnoměrně zrychleně se zrychlením $2\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$, je-li součinitel smykového tření mezi kvádrem a podlahou 0,1 ($g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$).

$m = 20$ kg; $a = 2\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$; $f = 0{,}1$; $F = ?$

a) $F = F_t = f \cdot F_N = f \cdot F_G = f \cdot m \cdot g$; $\{F\} = 0{,}1 \cdot 20 \cdot 10 = 20$; $F = 20$ N

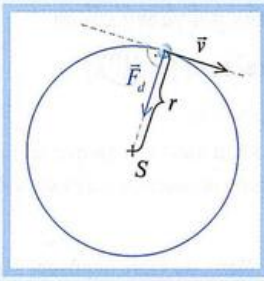
b) $F = F_t + ma = fmg + ma = m(fg + a)$; $\{F\} = 20(0{,}1 \cdot 10 + 2) = 60$; $F = 60$ N

Na kvádr musíme působit silou 20 N, aby se pohyboval rovnoměrně, a silou 60 N, aby se pohyboval se zrychlením $2\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Dostředivá síla

Při rovnoměrném pohybu po kružnici mění vektor rychlosti $\vec{v}$ neustále svůj směr, tedy hmotný bod má dostředivé zrychlení $\vec{a}_d$ směřující do středu kružnice. Příčinou dostředivého zrychlení je **DOSTŘEDIVÁ SÍLA** $\vec{F}_d$, pro niž platí podle 2. Newtonova pohybového zákona vztah: $\vec{F}_d = m \cdot \vec{a}_d$.

Pro velikost dostředivého zrychlení platí: $a_d = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$ (pohyb po kružnici, str. 18). Takže na těleso o hmotnosti m pohybující se po kružnici o poloměru r působí síla o velikosti: $F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$.



DOSTŘEDIVÁ SÍLA je kolmá k okamžité rychlosti, tedy směřuje do středu kružnice.

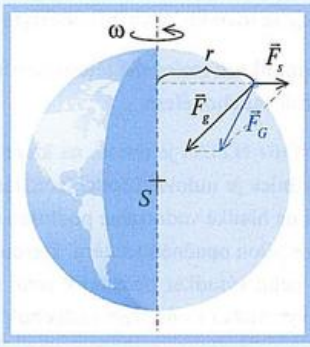
Zanikne-li dostředivá síla např. nedostatečným třením při jízdě vozidla v zatáčce, dojde ke smyku, a vozidlo se pak pohybuje ve směru tečny k trajektorii.

Tíhová síla a tíha

TÍHOVÁ SÍLA ZEMĚ $\vec{F}_G$ je síla, kterou jsou všechna tělesa přitahována k Zemi v blízkosti jejího povrchu. Tíhová síla $\vec{F}_G$ uděluje tělesům tíhové zrychlení $\vec{g}$ a má s ním stejný svislý směr. Působiště tíhové síly klademe do těžiště tělesa (str. 45). Pro $\vec{F}_G$ podle 2. NPZ platí: $\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$.

TÍHOVÉ POLE je prostor kolem Země, v němž se projevují účinky tíhové síly.

TÍHA $\vec{G}$ je síla, kterou těleso v tíhovém poli Země působí na jiná tělesa. Projevuje se jako tlaková síla na vodorovnou podložku nebo tahová síla na svislý závěs. Má stejnou velikost i směr jako tíhová síla, její působiště je však ve styčné ploše tělesa s podložkou nebo v bodě závěsu.



TÍHOVÁ SÍLA ZEMĚ $\vec{F}_G$ je výslednicí gravitační síly Země $\vec{F}_g$ a setrvačné síly $\vec{F}_s$ (str. 40) způsobené otáčením Země.

TÍHOVÁ SÍLA působí i na povrchu Měsíce, kde je asi šestkrát menší než na Zemi.

Tíha tělesa v neinerciálních vztažných soustavách

TÍHA tělesa v neinerciálních vztažných soustavách se může lišit od tíhové síly. Např. tíha tělesa v kabině výtahu nebo raketoplánu padajícího volným pádem je nulová – těleso je v beztížném stavu. Přitom však na těleso stále působí tíhová síla, která mu (stejně jako padajícímu raketoplánu) uděluje tíhové zrychlení (neinerciální vztažná soustava, str. 31).

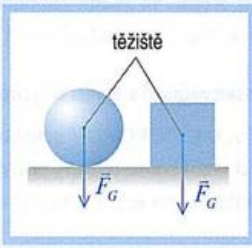
TÍHA $\vec{G}$ jako tlaková síla

TÍHA $\vec{G}$ jako tahová síla

Zavěsíme-li v padající kabině na siloměr závaží, siloměr ukáže nulovou **TÍHU** $\vec{G}$.

Těžiště

TĚŽIŠTĚ je působiště tíhové síly na těleso nacházející se v homogenním tíhovém poli. Těžiště určujeme jako působiště výsledné tíhové síly, skládáním tíhových sil působících na jednotlivé mikroskopicky malé části (hmotné body) tělesa (mechanika tuhého tělesa, str. 45).



TĚŽIŠTĚ koule a krychle je v jejich geometrickém středu.

První Newtonův pohybový zákon – zákon setrvačnosti (1. NPZ)

1. NPZ – ZÁKON SETRVAČNOSTI:
Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není nuceno působením vnější síly svůj pohybový stav změnit.

IZOLOVANÉ TĚLESO je těleso, na které nepůsobí žádné síly. To znamená, že žádné jiné těleso ani silové pole nepůsobí na izolované těleso silou.

Důležitou vlastností těles je SETRVAČNOST. Znamená to, že izolované těleso, které je v dané vztažné soustavě v klidu, zůstává v klidu. Je-li izolované těleso v pohybu, zůstává dále v pohybu a pohybuje se rovnoměrným přímočarým pohybem.

V pozemských podmínkách izolované těleso neexistuje, proto se zavádí model izolovaného tělesa.

MODEL IZOLOVANÉHO TĚLESA je těleso, na které působí síly tak, že jejich výslednice je nulová. Model izolovaného tělesa tvoří např. kulička na hladké vodorovné podložce (tíhová síla se ruší stejně velkou silou opačného směru, kterou na kuličku působí podložka) nebo výsadkář padající k zemi stálou rychlostí (jeho tíha se vyrovnává s odporem vzduchu).

ZÁKON SETRVAČNOSTI PRO MODEL IZOLOVANÉHO TĚLESA:
Pokud je výslednice vnějších sil nulová, těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.

INERCIÁLNÍ VZTAŽNÁ SOUSTAVA je soustava, ve které izolované těleso (nebo model izolovaného tělesa) setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Platí v ní zákon setrvačnosti.

Každá vztažná soustava, která je vzhledem k dané inerciální soustavě v klidu nebo v pohybu rovnoměrném přímočarém, je rovněž INERCIÁLNÍ.

Galileiho princip relativity

Zákony mechaniky platí stejně ve všech inerciálních vztažných soustavách a rovnice, které je vyjadřují, mají stejný tvar.

Formulace zákona setrvačnosti v moderní fyzice

Existuje vztažná soustava, tzv. INERCIÁLNÍ soustava, ve které se izolovaný hmotný bod (izolované těleso) pohybuje s nulovým zrychlením, tj. je v klidu nebo se pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem.

ZÁKON SETRVAČNOSTI vyjadřuje tři fakty:
- setrvačnost těles (v klidu i v pohybu),
- příčinou změny pohybového stavu* je síla,
- rovnoměrný přímočarý pohyb je pohyb bez působení síly (nebo výslednice sil je nulová).

* definice pohybového stavu str. 13, 15

Víte, že od „prvního pohybového zákona" formulovaného řeckým filozofem Aristotelem k Newtonovu zákonu setrvačnosti uplynulo téměř 2 000 let? Setrvačnost těles byla Aristotelovi zřejmá, nebylo však zřejmé, zda rovnoměrný přímočarý pohyb probíhá bez působení síly. Zkušenost totiž ukazovala, že tělesa se přestávají pohybovat, pokud síla, která je uvedla do pohybu, přestane působit; tedy rovnoměrný přímočarý pohyb je možný pouze tehdy, když je těleso „hnáno" nějakou silou. Aristoteles toto tvrzení formuloval jako přírodní zákon. Až detailní rozbory pohybových jevů (včetně pochopení brzdicích účinků třecí síly) umožnily formulovat zákon setrvačnosti nejenom pro tělesa ve stavu klidu, ale i pro rovnoměrný přímočarý pohyb.

Pro zkoumání pohybů v pozemských podmínkách za vztažnou soustavu volíme nejčastěji soustavu spojenou s povrchem Země, která je přibližně INERCIÁLNÍ – ve většině případů můžeme vlivy způsobené rotací Země a pohybem kolem Slunce zanedbat. Pro pohyby ve sluneční soustavě to může být vztažná soustava spojená se Sluncem a nejbližšími hvězdami.

Podle GALILEIHO PRINCIPU RELATIVITY probíhají mechanické děje stejně ve všech inerciálních vztažných soustavách. Není možné žádným mechanickým pokusem zjistit, zda se vztažná soustava (např. pohybující se kosmická loď) vůči jiné soustavě (např. vůči Zemi) pohybuje, pokud pozorovatel nevidí okolí.

Původní Newtonova formulace ZÁKONA SETRVAČNOSTI předpokládá existenci vztažné soustavy, ve které tento zákon platí, tedy inerciální vztažné soustavy. Newton předpokládal existenci ABSOLUTNÍHO PROSTORU, který byl tou základní inerciální vztažnou soustavou. Vývoj fyziky ukázal, že absolutní prostor jako takový neexistuje, a to vedlo k objevům moderní fyziky, např. k teorii relativity.

Druhý Newtonův pohybový zákon – zákon síly (2. NPZ)

Velikost zrychlení a, které síla $\vec{F}$ uděluje tělesu o hmotnosti m, je přímo úměrná velikosti síly F a nepřímo úměrná HMOTNOSTI tělesa m:

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

Zrychlení $\vec{a}$, které síla $\vec{F}$ uděluje tělesu, má stejný směr jako síla: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

2. NPZ – ZÁKON SÍLY: Výslednice sil působících na těleso je rovna součinu jeho hmotnosti a zrychlení: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Vztah $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ se nazývá také POHYBOVÁ ROVNICE, která umožňuje určit závislost rychlosti hmotného bodu na čase a dráhu hmotného bodu z působení vnějších sil.

2. NPZ vyjádřený pomocí hybnosti: $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ (str. 30).

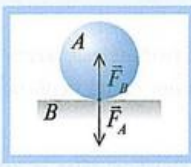
Víte, že 2. NPZ neobjevil Isaac Newton? Tento zákon postupně objevovali fyzikové předtím a Newton „jen" zevšeobecnil dílčí poznatky svých předchůdců a zákon v jeho přesné podobě zformuloval. Vycházel přitom ze znalosti **zákona volného pádu**, který objevil G. Galilei, podle něhož na padající těleso působí tíhová síla a uděluje mu konstantní tíhové zrychlení, přičemž rychlost volného pádu $v = g \cdot t$. Dále vycházel z Huygensových rozborů kruhového pohybu, podle kterých je příčinou dostředivého zrychlení **dostředivá síla** směřující do středu kružnice. Dále mohl využít Descartem objevený poznatek, že změna hybnosti tělesa je úměrná impulsu působící síly. Tento poznatek, který je vlastně jinou formou 2. NPZ, Newton doplnil definicí **hybnosti** jako součinu hmotnosti a rychlosti. Kromě toho obecně definoval sílu jako příčinu změny pohybového stavu tělesa nejenom na Zemi, ale i všude ve vesmíru, což také vysvětlilo zakřivení pohybů planet kolem Slunce.

Třetí Newtonův pohybový zákon – zákon akce a reakce

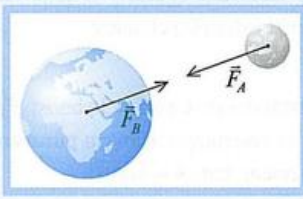
3. NPZ – ZÁKON AKCE A REAKCE: Každá síla $\vec{F}_A$, kterou jedno těleso působí na druhé, vyvolává reakci – sílu $\vec{F}_B$ opačného směru, kterou druhé těleso působí na to první.

Síly $\vec{F}_A$ a $\vec{F}_B$, kterými na sebe působí dvě tělesa, jsou stejně velké, opačného směru, současně vznikají a zanikají. Tyto síly se nazývají AKCE a REAKCE.

Pro síly akce $\vec{F}_A$ a reakce $\vec{F}_B$ platí $\vec{F}_B = -\vec{F}_A$, ale $F_B = F_A$.



Akce $\vec{F}_A$ je tíha kuličky působící na podložku. Reakce $\vec{F}_B$ je síla, kterou podložka působí na kuličku.



Síly akce $\vec{F}_A$ a reakce $\vec{F}_B$ působí na různá tělesa. Proto se ve svých účincích neruší.

Př. 2

Střela o hmotnosti 5 g letěla rychlostí 400 m · s^{-1} a vnikla do hloubky 20 cm dřevěné překážky. Urči:

a) s jak velkým zpomalením se pohybovala střela v překážce,

b) jak velkou silou odporu působila překážka na střelu.

Pohyb střely v překážce považujeme za přímočarý rovnoměrně zpomalený.

$m = 5\ \text{g} = 0{,}005\ \text{kg}$; $v = 400\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $s = 20\ \text{cm} = 0{,}2\ \text{m}$; $a = ?$; $F = ?$

a) $v = \sqrt{2as} \Rightarrow a = \frac{v^2}{2s}$; $\{a\} = \frac{400^2}{2 \cdot 0{,}2} = 4 \cdot 10^5$; $a = 4 \cdot 10^5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

b) $F = ma$; $\{F\} = 0{,}005 \cdot 4 \cdot 10^5 = 2\,000$; $F = 2\,000\ \text{N}$

Zpomalení střely bylo $4 \cdot 10^5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, síla odporu byla 2 000 N.

- K výpočtu zpomalení užijeme vztah pro rychlost rovnoměrně zpomaleného pohybu odvozený v kapitole 2.1.
- Odporovou sílu vypočteme podle 2. NPZ.

Impuls a hybnost

HYBNOST $\vec{p}$ je definována jako součin hmotnosti m a okamžité rychlosti $\vec{v}$ tělesa: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.
Velikost hybnosti je dána vztahem: $p = m \cdot v$.

IMPULS SÍLY $\vec{I}$ je definován jako součin síly $\vec{F}$ a doby Δt, po kterou síla na těleso působí: $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$, přičemž síla $\vec{F}$ je po dobu Δt konstantní.

Impuls síly $\vec{I}$ vyvolává změnu hybnosti $\Delta \vec{p}$ tělesa: $\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p} = m \cdot \Delta \vec{v}$. Tato rovnice vyplývá z 2. NPZ, který vyjádřený pomocí hybnosti má tvar: $\vec{F} = \dfrac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$.
V tomto tvaru platí 2. NPZ i pro proměnnou hmotnost, kde $\vec{p}$ je relativistická hybnost (str. 174).

POHYBOVÝ STAV hmotného bodu je určen jeho hybností.

Zákon setrvačnosti vyjádřený pomocí hybnosti

Pokud je výslednice vnějších sil nulová, těleso nemění svoji hybnost.

Zákon zachování hybnosti

IZOLOVANOU SOUSTAVU TĚLES tvoří tělesa, která na sebe navzájem působí silami, přitom na ně nepůsobí silami jiná tělesa.

CELKOVÁ HYBNOST $\vec{p}$ izolované soustavy těles je vektorovým součtem hybností jednotlivých těles:
$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \ldots + \vec{p}_n$.

ZÁKON ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI: Celková hybnost $\vec{p}$ izolované soustavy těles se vzájemným silovým působením těles této soustavy nezmění, tzn. $\vec{p} = \overline{\text{konst.}}$

Pro **PRUŽNOU SRÁŽKU** dvou těles platí zákon zachování hybnosti a také zákon zachování energie.

HYBNOST je vektorová fyzikální veličina, má stejný směr jako rychlost a charakterizuje pohybový stav tělesa (hmotného bodu).

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

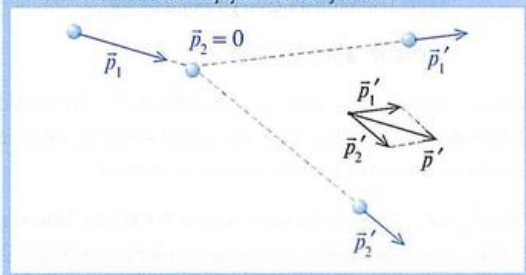
IMPULS SÍLY je vektorová fyzikální veličina, má stejný směr jako síla a charakterizuje časový účinek síly na těleso (hmotný bod).

JEDNOTKOU IMPULSU je N · s (newtonsekunda).

Odvození rovnice $\vec{F} = \dfrac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ z 2. NPZ: $\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \dfrac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} =$
$= m \cdot \dfrac{\vec{v} - \vec{v}\,'}{\Delta t} = \dfrac{m\vec{v} - m\vec{v}\,'}{\Delta t} = \dfrac{\vec{p} - \vec{p}\,'}{\Delta t} = \dfrac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$,
kde $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}\,'$ je změna rychlosti za čas Δt.

Izolovanou soustavu těles tvoří např. dvě kuličky při pružné srážce, můžeme-li zanedbat tření.

PRUŽNÁ SRÁŽKA dvou stejných biliardových koulí



$\vec{p}_1 = m \cdot \vec{v}_1$; $\vec{p}_2 = \vec{0}$; $\vec{p}_1\,' = m \cdot \vec{v}_1\,'$; $\vec{p}_2\,' = m \cdot \vec{v}_2\,'$
$\vec{p}$ – celková hybnost před srážkou; $\vec{p} = \vec{p}_1$
$\vec{p}\,'$ – celková hybnost po srážce; $\vec{p}\,' = \vec{p}_1\,' + \vec{p}_2\,'$
Celková hybnost $\vec{p}$ před srážkou se rovná celkové hybnosti $\vec{p}\,'$ po srážce: $\vec{p} = \vec{p}\,'$

Př. 3

Vozíček o hmotnosti $m_1 = 4$ kg se pohybuje rychlostí $v_1 = 0{,}5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ a narazí na vozíček o hmotnosti $m_2 = 2$ kg, který se pohybuje týmž směrem rychlostí $v_2 = 0{,}2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Po nárazu se oba vozíčky pohybují společně. Urči jejich rychlost, zanedbáme-li tření (vozíčky tvoří izolovanou soustavu těles).

$m_1 = 4$ kg; $m_2 = 2$ kg; $v_1 = 0{,}5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_2 = 0{,}2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v = ?$

$p_1 + p_2 = p$

$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)v \Rightarrow v = \dfrac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$

$\{v\} = \dfrac{4 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}2}{4 + 2} = 0{,}4$; $v = 0{,}4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Společná rychlost obou vozíčků je $0{,}4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- K výpočtu užijeme zákona zachování hybnosti.
- Velikosti hybností sčítáme, protože mají stejný směr. Pokud by se vozíčky pohybovaly proti sobě, velikosti jejich hybností by se odečítaly.

Neinerciální vztažná soustava, setrvačné síly

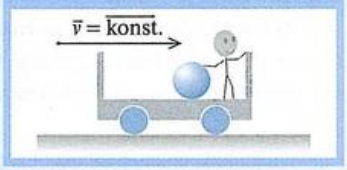
NEINERCIÁLNÍ VZTAŽNÁ SOUSTAVA je soustava, která se vzhledem k inerciální vztažné soustavě pohybuje jinak než rovnoměrným přímočarým pohybem. V neinerciální vztažné soustavě izolované těleso nezůstává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.

Pozorovatel nacházející se v neinerciální vztažné soustavě, která se pohybuje se zrychlením $\vec{a}$, pozoruje pohyb izolovaného tělesa se zrychlením $-\vec{a}$. Tento pohyb vysvětlí existencí SETRVAČNÉ SÍLY $\vec{F}_s = -m \cdot \vec{a}$, působící na těleso o hmotnosti m.

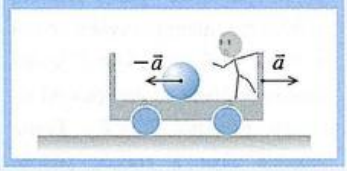
Setrvačná síla $\vec{F}_s$ je důsledkem zrychleného pohybu soustavy a má opačný směr, než je směr zrychlení $\vec{a}$.
Setrvačná síla $\vec{F}_s$ není důsledkem vzájemného silového působení tělesa s jinými tělesy nebo silovými poli.

V neinerciální vztažné soustavě neplatí zákon setrvačnosti.
Pro setrvačnou sílu neplatí zákon akce a reakce.

INERCIÁLNÍ VZTAŽNOU SOUSTAVOU je soustava spojená s vozem pohybujícím se rovnoměrným přímočarým pohybem.

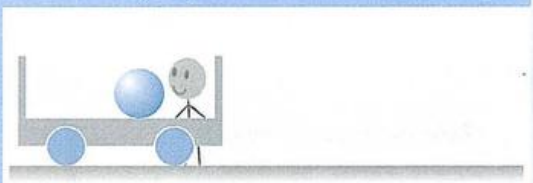


NEINERCIÁLNÍ VZTAŽNOU SOUSTAVOU je soustava spojená s vozem pohybujícím se se zrychlením $\vec{a} \neq \vec{0}$.

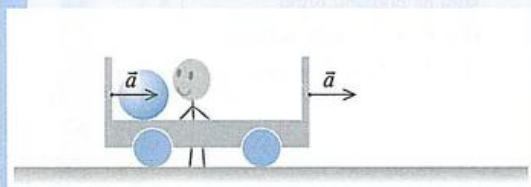


Neinerciální vztažná soustava pohybující se rovnoměrně zrychleným přímočarým pohybem

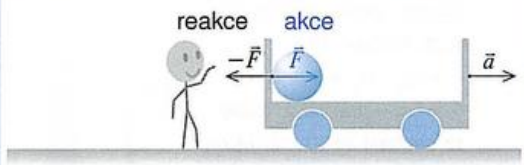
z hlediska vnějšího pozorovatele:



- vůz stojí, kulička je v klidu (soustava je zatím inerciální),

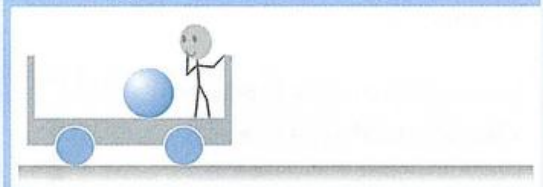


- vůz se rozjel (soustava se stala neinerciální), kulička zůstává v klidu a zadní stěna vozu se k ní přibližuje se zrychlením $\vec{a}$,

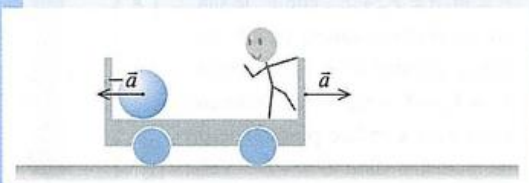


- kulička se pohybuje se zrychlením $\vec{a}$ spolu s vozem a zadní stěna vozu na ni působí silou $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.
- Podle zákona akce a reakce působí kulička na zadní stěnu reakcí - stejně velkou silou opačného směru $-\vec{F} = -m \cdot \vec{a}$.

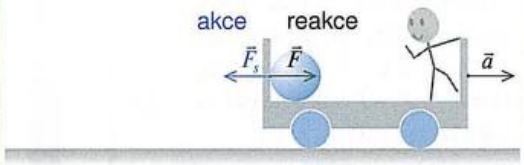
z hlediska pozorovatele uvnitř vozu:



- vůz stojí, kulička je v klidu (soustava je zatím inerciální),

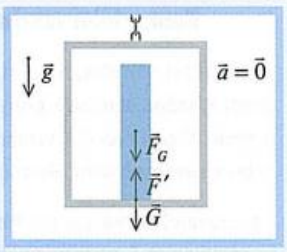


- vůz zůstává v klidu (soustava je ovšem neinerciální) a kulička se rozjela se zrychlením $-\vec{a}$, působí na ni setrvačná síla $\vec{F}_s = -m \cdot \vec{a}$,



- kulička narazila na stěnu, poté zůstala v klidu a působí na stěnu setrvačnou silou $\vec{F}_s = -m \cdot \vec{a}$.
- Podle zákona akce a reakce působí zadní stěna na kuličku reakcí - stejně velkou silou opačného směru $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

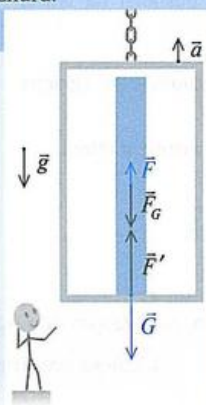
Neinerciální vztažná soustava pohybující se v tíhovém poli svislým směrem



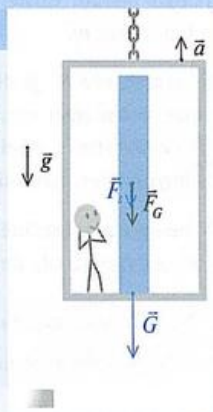
Kabina výtahu je v klidu nebo se pohybuje rovnoměrně. Na těleso o hmotnosti m působí tíhová síla $\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$ směrem dolů a těleso působí na podlahu kabiny tíhou $\vec{G} = m \cdot \vec{g}$, kde $\vec{g}$ je tíhové zrychlení. Podle zákona akce a reakce tlačí podlaha kabiny na těleso silou $\vec{F}' = -m \cdot \vec{g}$ směrem vzhůru.

Kabina výtahu zrychluje směrem vzhůru.

Z hlediska vnějšího pozorovatele působí na těleso o hmotnosti m pohybující se ve výtahu směrem vzhůru zrychlením $\vec{a}$ výsledná síla $\vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}'$, kde $\vec{F}'$ je síla, kterou podlaha kabiny působí na těleso, přičemž $F' > F_G$. Podle zákona akce a reakce působí těleso na podlahu silou $\vec{G} = -\vec{F}'$ a velikost tíhy $G = F' = F_G + F$. Vzniká **PŘETÍŽENÍ** o velikosti $F = m \cdot a$.

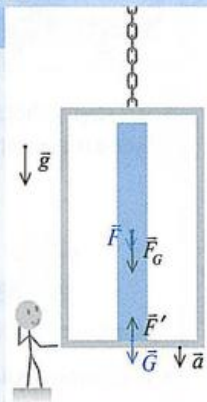


Z hlediska pozorovatele ve výtahu působí na těleso dodatečná setrvačná síla $\vec{F}_s = -m \cdot \vec{a}$, vzniká **PŘETÍŽENÍ**. Těleso působí na podlahu silou $\vec{G} = \vec{F}_G + \vec{F}_s$. Velikost tíhy $G = F_G + F_s = mg + ma$.

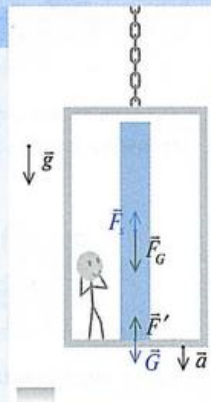


Kabina výtahu zrychluje směrem dolů.

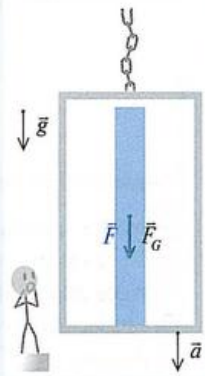
Z hlediska vnějšího pozorovatele působí na těleso o hmotnosti m pohybující se ve výtahu směrem dolů zrychlením $\vec{a}$ výsledná síla $\vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}'$, kde $\vec{F}'$ je síla, kterou podlaha kabiny působí na těleso, přičemž $F' < F_G$. Velikost $F' = F_G - F = mg - ma$. Podle zákona akce a reakce působí těleso na podlahu silou $\vec{G} = -\vec{F}'$. Velikost tíhy $G = F' = F_G - F < F_G$.



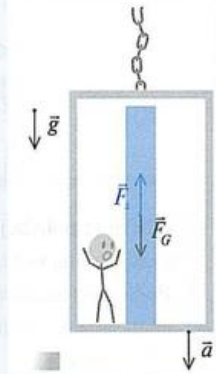
Z hlediska pozorovatele ve výtahu působí na těleso setrvačná síla $\vec{F}_s = -m \cdot \vec{a}$ směrem vzhůru. Těleso působí na podlahu tíhou $\vec{G} = \vec{F}_G + \vec{F}_s$, jejíž velikost $G = F_G - F_s = mg - ma$.



Pokud kabina výtahu dosáhne zrychlení $\vec{a} = \vec{g}$, začne padat volným pádem. Na těleso působí síla $\vec{F} = m \cdot \vec{g} = \vec{F}_G$. Velikost tíhy $G = F' = F_G - F = 0$ a těleso se nachází ve **STAVU BEZTÍŽE**.



Pokud je $\vec{a} = \vec{g}$, kabina výtahu padá volným pádem. Velikost tíhy $G = F_G - F_s = mg - ma$. $G = mg - ma = 0$ a těleso se nachází ve **STAVU BEZTÍŽE**.



Př. 4 Těleso o hmotnosti 5 kg je zavěšeno na siloměru v kabině výtahu. Jakou silou působí těleso na siloměr, pohybuje-li se výtah: **1)** se zrychlením $3\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ směrem vzhůru, **2)** se zrychlením $3\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ směrem dolů.

$m = 5\ \mathrm{kg}$; $a = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$; $G = ?$

- Příklad řešíme z hlediska pozorovatele ve výtahu, jedná se o neinerciální vztažnou soustavu a na těleso působí setrvačná síla $\vec{F}_s$.

1) Pohybuje-li se výtah se zrychlením $\vec{a}$ směrem nahoru, platí: $G = F_G + F_s = mg + ma$

$G = 5\ \mathrm{kg} \cdot 10\ \mathrm{ms^{-2}} + 5\ \mathrm{kg} \cdot 3\ \mathrm{ms^{-2}} = 65\ \mathrm{kg\,m\,s^{-2}} = 65\ \mathrm{N}$;

$\{G\} = 5 \cdot 10 + 5 \cdot 3 = 65$; $G = 65\ \mathrm{N}$

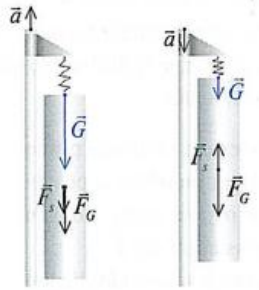
Pojede-li výtah nahoru se zrychlením $3\ \mathrm{ms^{-2}}$, těleso působí na siloměr silou 65 N.

2) Pohybuje-li se výtah se zrychlením $\vec{a}$ směrem dolů, platí: $G = F_G - F_s = mg - ma$

$G = 5\ \mathrm{kg} \cdot 10\ \mathrm{ms^{-2}} - 5\ \mathrm{kg} \cdot 3\ \mathrm{ms^{-2}} = 35\ \mathrm{kg\,m\,s^{-2}} = 35\ \mathrm{N}$;

$\{G\} = 5 \cdot 10 - 5 \cdot 3 = 35$; $G = 35\ \mathrm{N}$

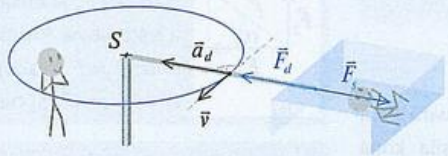
Pojede-li výtah dolů se zrychlením $3\ \mathrm{ms^{-2}}$, těleso působí na siloměr silou 35 N.



Otáčející se vztažná soustava, odstředivá síla

Těleso o hmotnosti m se pohybuje v otáčející se vztažné soustavě rovnoměrným kruhovým pohybem rychlostí $\vec{v}$ a má dostředivé zrychlení $\vec{a}_d$ o velikosti:

$a_d = \dfrac{v^2}{r} = \omega^2 r$, kde ω je úhlová rychlost otáčení.



Z hlediska pozorovatele v inerciální vztažné soustavě působí na kabinu centrifugy dostředivá síla $\vec{F}_d = m \cdot \vec{a}_d$. Podle zákona akce a reakce působí kabina centrifugy na závěs silou $\vec{F}_s = -\vec{F}_d = -m \cdot \vec{a}_d$.

Z hlediska pozorovatele v otáčející se vztažné soustavě - centrifuze, působí na kabinu centrifugy SETRVAČNÁ ODSTŘEDIVÁ SÍLA $\vec{F}_s = -m \cdot \vec{a}_d$.

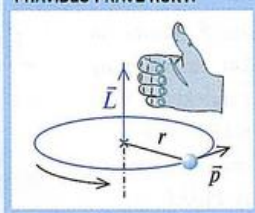
CENTRIFUGA je zařízení otáčející se rovnoměrným kruhovým pohybem. Používá se na dosažení velikých odstředivých sil, např. při simulaci přetížení působícího na kosmonauty při startu kosmické rakety.

Když dostředivá síla $\vec{F}_d$ přestane působit, zanikne současně reakce – síla $\vec{F}_s$ a těleso se bude pohybovat dále rovnoměrným přímočarým pohybem rychlostí $\vec{v}$.

Moment hybnosti

Těleso o hmotnosti m pohybující se stálou rychlostí v po kruhové dráze o poloměru r má MOMENT HYBNOSTI $\vec{L}$, jehož velikost je $L = r \cdot p$, kde $p = mv$ je velikost hybnosti tělesa. Směr momentu $\vec{L}$ je dán PRAVIDLEM PRAVÉ RUKY.

PRAVIDLO PRAVÉ RUKY:



Položíme-li pravou ruku k otáčejícímu se tělesu tak, aby lehce pokrčené prsty ruky ukazovaly směr otáčení tělesa, pak vztyčený palec ukazuje směr vektoru $\vec{L}$.

Pro moment hybnosti platí VĚTA O MOMENTU HYBNOSTI:

Časová změna momentu hybnosti otáčejícího se tělesa $\dfrac{\Delta \vec{L}}{\Delta t}$ je rovna momentu síly $\vec{M}$ působící na těleso: $\dfrac{\Delta \vec{L}}{\Delta t} = \vec{M}$.

Platí ZÁKON ZACHOVÁNÍ MOMENTU HYBNOSTI: Nepůsobí-li na otáčející se těleso moment žádné vnější síly (str. 44), jeho moment hybnosti zůstává konstantní.

ZACHOVÁNÍ MOMENTU HYBNOSTI:

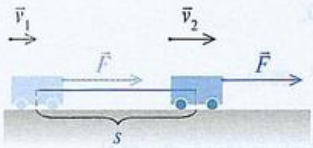
Pirueta se po zvednutí rukou zrychlí.

2.3 Mechanická energie, práce, výkon

Mechanická práce

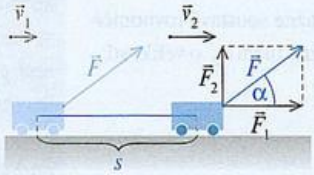
MECHANICKOU PRÁCI W koná síla $\vec{F}$ působící na těleso, přičemž ho přemísťuje po určité trajektorii. Mechanická práce W charakterizuje fyzikální děj, při kterém se mění stav tělesa nebo soustavy těles.

- Těleso se pohybuje přímočarým pohybem a působí na něj ve směru pohybu konstantní síla $\vec{F}$.



Urazí-li těleso působením konstantní síly $\vec{F}$ rovnoběžné s trajektorií dráhu s, pak síla $\vec{F}$ vykoná práci: $W = F \cdot s$.

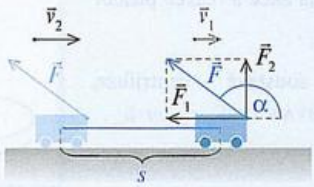
- Těleso se pohybuje přímočarým pohybem a působí na něj konstantní síla $\vec{F}$.



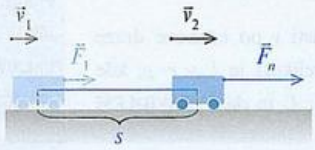
Urazí-li těleso působením síly $\vec{F}$ svírající s trajektorií úhel α dráhu s, pak síla $\vec{F}$ vykoná práci: $W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$.

Jestliže síla $\vec{F}$ působí na těleso ve směru pohybu, svírá s trajektorií pohybu úhel $0 \le \alpha < 90°$, $\cos\alpha > 0 \Rightarrow$ síla koná KLADNOU PRÁCI.

Jestliže síla $\vec{F}$ působí na těleso proti směru pohybu, svírá s trajektorií úhel $90° < \alpha \le 180°$, pak $\cos\alpha < 0 \Rightarrow$ síla koná ZÁPORNOU PRÁCI.



- Těleso se pohybuje přímočarým pohybem a působí na něj síla $\vec{F}$ rovnoběžná s trajektorií a velikost síly se podél trajektorie mění.

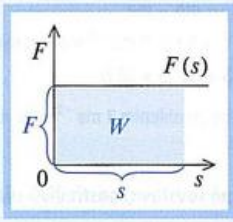


Dráhu pohybu s rozdělíme na velmi malé úseky Δs, v nichž lze sílu pokládat za konstantní a práci vykonanou na i-tém úseku dráhy lze vyjádřit vztahem $W_i = F_i \cdot \Delta s$, kde F_i je velikost síly na i-tém úseku. Jsou-li úseky dráhy dostatečně malé, pak celková vykonaná práce $W = F_1 \cdot \Delta s + F_2 \cdot \Delta s + \ldots + F_n \cdot \Delta s$.

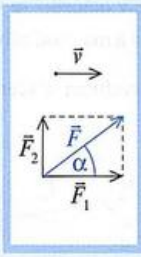
Osnova kapitoly:

- Mechanická práce, mechanická energie
- Kinetická energie
- Potenciální energie
- Zákon zachování mechanické energie
- Zákon zachování energie
- Výkon, příkon, účinnost

JEDNOTKOU PRÁCE je JOULE (J).
$[W] = [F] \cdot [s] = \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} = \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2} = \mathrm{J}$



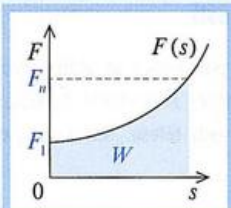
Pro konstantní sílu $\vec{F}$ působící ve směru pohybu je PRÁCE W, kterou tato síla vykoná na dráze s, dána obsahem obdélníka o stranách s, F.



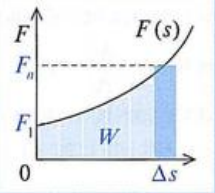
Šikmou sílu $\vec{F}$ musíme rozložit na dvě kolmé složky $\vec{F}_1$ a $\vec{F}_2$. Síla $\vec{F}_1$ je rovnoběžná s trajektorií a koná práci. Síla $\vec{F}_2$ je kolmá k trajektorii a práci nekoná. Protože práci koná složka $F_1 = F \cdot \cos\alpha$, platí $W = F_1 \cdot s = F \cdot s \cdot \cos\alpha$.

Obecně pro konstantní sílu $\vec{F}$ a přímou dráhu s platí vztah: $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$, kde $\vec{F} \cdot \vec{s} = F \cdot s \cdot \cos\alpha$ je skalární součin. Vektor $\vec{s}$ má směr pohybu a jeho velikost je rovna dráze s.

Je-li síla $\vec{F}$ kolmá na směr pohybu tělesa, tj. $\alpha = 90°$, $\cos\alpha = 0 \Rightarrow \vec{F}$ práci nekoná.



Mechanická práce W je dána obsahem modrého obrazce pod křivkou $F = F(s)$, jehož velikost je dána integrálem $W = \int_0^s F(s) \cdot \mathrm{d}s$.



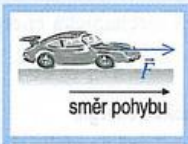
PRACOVNÍ DIAGRAM je závislost velikosti síly na velikosti dráhy.
$W = F_1 \cdot \Delta s + F_2 \cdot \Delta s + \ldots + F_n \cdot \Delta s$

Mechanická energie

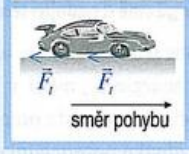
MECHANICKÁ ENERGIE E je skalární fyzikální veličina, která charakterizuje stav tělesa nebo soustavy těles. Změna mechanické energie ΔE se rovná práci W, kterou vykoná působící síla: $\Delta E = W$.

KINETICKÁ (POHYBOVÁ) ENERGIE E_k je mechanická energie tělesa pohybujícího se vzhledem k dané vztažné soustavě.
POTENCIÁLNÍ ENERGIE E_p je mechanická energie tělesa nacházejícího se v silovém poli jiného tělesa nebo těles.
Celková MECHANICKÁ ENERGIE E tělesa je rovna součtu potenciální energie E_p a kinetické energie E_k:
$E = E_p + E_k$.

JEDNOTKA ENERGIE je stejná jako jednotka práce, tedy JOULE (J).



- Jestliže síla koná KLADNOU PRÁCI, mechanická energie tělesa narůstá (rozjíždějící se automobil).



- Jestliže síla koná ZÁPORNOU PRÁCI, mechanická energie tělesa klesá (brzdící automobil).

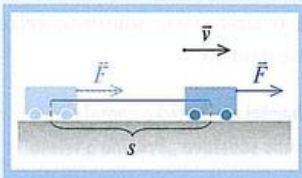
Kinetická (pohybová) energie

KINETICKÁ (POHYBOVÁ) ENERGIE E_k tělesa nebo hmotného bodu o hmotnosti m, který se pohybuje rychlostí $\vec{v}$, je dána vztahem: $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

Kinetická energie soustavy hmotných bodů o hmotnostech $m_1, m_2, ..., m_n$ a rychlostech $\vec{v}_1, \vec{v}_2, ..., \vec{v}_n$ je dána součtem kinetických energií jednotlivých hmotných bodů:

$$E_k = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 + ... + \frac{1}{2}m_n v_n^2.$$

Kinetická energie je závislá na volbě vztažné soustavy, protože rychlost určujeme vždy k určité vztažné soustavě.



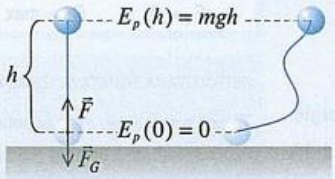
Těleso o hmotnosti m se působením stálé síly $\vec{F}$ rovnoběžné s trajektorií pohybovalo rovnoměrně zrychleným přímočarým pohybem a z nulové rychlosti dosáhlo konečné rychlosti $\vec{v}$.
Jeho KINETICKÁ ENERGIE E_k je rovna vykonané PRÁCI W.

$E_k = W \quad W = F \cdot s \quad F = ma \quad s = \frac{1}{2}at^2 \quad v = at$

$E_k = ma \cdot \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}ma^2t^2 = \frac{1}{2}mv^2$

Potenciální (polohová) energie

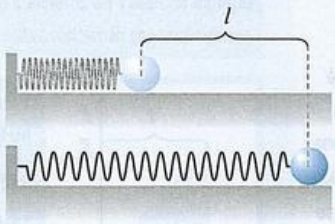
TÍHOVOU POTENCIÁLNÍ ENERGII E_p mají tělesa nacházející se v tíhovém poli. Ve výšce h nad nulovou hladinou $E_p(0)$ má těleso o hmotnosti m tíhovou potenciální energii:
$E_p = mgh$.
Nulovou hladinu tíhové potenciální energie obvykle volíme na povrchu Země.



Odvození vztahu pro TÍHOVOU POTENCIÁLNÍ ENERGII:
Těleso o hmotnosti m se působením stálé síly $\vec{F} = -\vec{F}_G = -m\vec{g}$ pomalu zvedalo ze zemského povrchu do výšky h. Je-li jeho potenciální energie na povrchu Země $E_p(0) = 0$, práce W vykonaná silou $\vec{F}$ zvýší potenciální energii tělesa o hodnotu $E_p(h)$
$E_p(h) = W = F \cdot h = F_G \cdot h = mgh$.

Práce W a tedy také potenciální energie E_p nezávisí na tvaru trajektorie ani na délce dráhy, jen na dosažené výšce.

POTENCIÁLNÍ ENERGII PRUŽNOSTI E_p získávají tělesa při pružné deformaci. Pružina protažená nebo stlačená o délku l má potenciální energii pružnosti
$E_p = \frac{1}{2}kl^2$, kde k je TUHOST pružiny.



Stejně jako práce má za následek změnu mechanické energie, tak i „energie je schopnost konat práci". Tato definice je odrazem technického myšlení a zavedl ji do fyziky skotský inženýr W. Rankine v r. 1872. Moderní fyzika používá přesnější formulace (str. 66).

JEDNOTKOU TUHOSTI je $N \cdot m^{-1}$.

Odvození vztahu pro potenciální energii pružnosti pružiny př. 1, str. 36.

Zákon zachování mechanické energie

ZÁKON ZACHOVÁNÍ MECHANICKÉ ENERGIE: Při mechanických dějích dochází k proměně kinetické energie E_k v potenciální nebo k proměně potenciální energie E_p v kinetickou, přičemž celková mechanická energie IZOLOVANÉ soustavy je stálá: $E = E_k + E_p = \text{konst.}$

Zákon zachování mechanické energie pro izolovanou soustavu „Země a padající těleso"

Ve výšce h je potenciální energie tělesa $E_p(h) = mgh$. Při volném pádu se potenciální energie E_p mění v kinetickou E_k. Tíhová síla $\vec{F}_G$ koná při volném pádu práci, která je rovna přírůstku kinetické a úbytku potenciální energie. Protože se jedná o izolovanou soustavu, celková mechanická energie se nemění.

Zákon zachování mechanické energie pro izolovanou soustavu „Pružina a těleso"

Pohyb A–0: potenciální energie pružiny E_p se mění v kinetickou energii tělesa E_k; pohyb 0–B: kinetická energie tělesa E_k se mění v potenciální energii pružiny E_p.
Celková energie $E = E_p + E_k = \text{konst.}$

Zákon zachování mechanické energie pro izolovanou soustavu „Země a kyvadlo"

Pohyb A–0: potenciální energie kyvadla E_p se mění v kinetickou energii E_k; pohyb 0–B: kinetická energie E_k kyvadla se mění v potenciální energii E_p.
Celková energie $E = E_p + E_k = \text{konst.}$

Obecný zákon zachování energie

Celková energie izolované soustavy se nemění.
Při všech přírodních dějích se mění jeden druh energie v jiný nebo přechází energie z jednoho tělesa na jiné, celková energie izolované soustavy je však stálá.

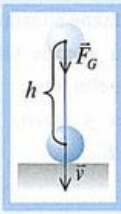
Př. 1

POTENCIÁLNÍ ENERGII PRUŽNOSTI lze odvodit výpočtem práce vykonané stlačenou pružinou.

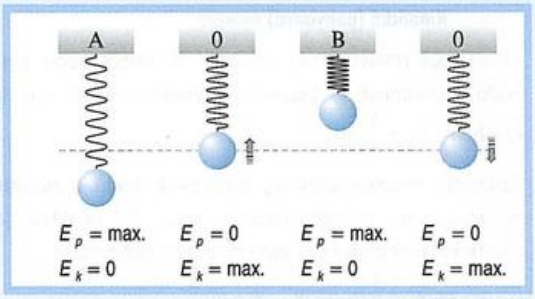
Pružina je stlačená o délku l a má potenciální energii E_p. Při vymršťování koule síla působící na ni postupně klesá z maximální hodnoty $F_{max} = k \cdot l$ až na nulovou hodnotu, kdy se pružina vyrovná. Podle Hookova zákona (str. 58) se velikost síly mění lineárně, $F = k \cdot x$, kde x je okamžité stlačení pružiny. Potenciální energie E_p se rovná vykonané práci $W = \frac{1}{2}k \cdot l^2$, tedy $E_p = \frac{1}{2}k \cdot l^2$.

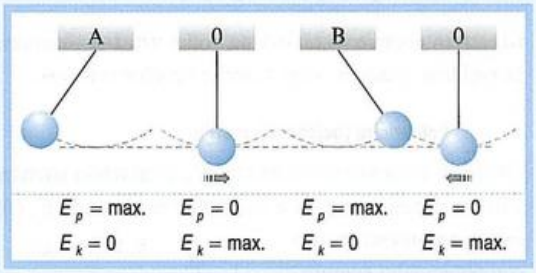
IZOLOVANÁ (UZAVŘENÁ) SOUSTAVA těles je soustava, která svoji energii okolí nepředává ani ji z okolí nepřijímá.

MECHANICKÁ ENERGIE E tělesa (soustavy těles) je rovna součtu potenciální energie E_p a kinetické energie E_k tělesa (soustavy těles), tj. $E = E_p + E_k$.



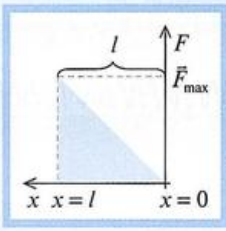
Při dopadu je kinetická energie $E_k(0) = \frac{1}{2}mv^2$ a potenciální energie $E_p(0) = 0$, kde $v = \sqrt{2gh}$ je rychlost dopadu (str. 19). Dosazením zjistíme, že $E_k(0) = \frac{1}{2}m \cdot 2gh = mgh = E_p(h)$.





NEIZOLOVANÁ SOUSTAVA „ZEMĚ A ZVEDANÉ TĚLESO"

Těleso o hmotnosti m se působením stálé vnější síly $\vec{F} = -\vec{F}_G = -m\vec{g}$ pomalu zvedá z povrchu Země do výšky h. Vykonaná práce W je rovna přírůstku potenciální energie: $W = E_p(h) - E_p(0) = mgh$. Protože síla $\vec{F}$ je vnější, soustava „Země a zvedané těleso" není izolovaná a celková mechanická energie soustavy se změnila z nuly na hodnotu $E = mgh$; energie se tedy nezachovává.



Práce W je dána obsahem modrého trojúhelníku se stranami F_{max}, l, tedy $W = \frac{1}{2}F_{max} \cdot l$. Po dosazení za $F_{max} = k \cdot l$ obdržíme pro práci vztah $W = \frac{1}{2}k \cdot l^2$.

Výkon, příkon, účinnost

PRŮMĚRNÝ VÝKON P_p stroje je určen podílem mechanické práce W, kterou stroj vykonal, a doby t, za kterou ji vykonal: $P_p = \frac{W}{t}$.

OKAMŽITÝ VÝKON je určen podílem mechanické práce ΔW a doby Δt, za kterou byla práce vykonána: $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$, pro $\Delta t \to 0$.

Je-li $\vec{F}$ konstantní síla konající práci ΔW na dráze Δs, pak **OKAMŽITÝ VÝKON** je dán vztahem $P = F \cdot v$, kde v je velikost okamžité rychlosti.

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

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

ÚČINNOST η definujeme jako podíl výkonu P a příkonu P_0, tedy $\eta = \frac{P}{P_0}$.

JEDNOTKOU VÝKONU je **WATT** (W).

$[P_p] = \frac{[W]}{[t]} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$

Výkon 1 W má zařízení, které práci 1 J vykoná za 1 s.

Kromě jednotky 1 W se používají i jednotky větší:

- 1kW (kilowatt) = 1 000 W,
- 1MW (megawatt) = 1 000 kW.

Je-li $\vec{F}$ konstantní síla konající práci ΔW na dráze Δs po dobu Δt, pak $\Delta W = F \cdot \Delta s$. **OKAMŽITÝ VÝKON** je dán vztahem: $P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = F \cdot v$, kde $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ je okamžitá rychlost ($\Delta t \to 0$).

Jednotkou **PŘÍKONU** je watt (W).

$1\,\text{J} = 1\,\text{W} \cdot 1\,\text{s} = 1\,\text{Ws}$ (wattsekunda)

$1\,\text{Wh} = 3\,600\,\text{Ws}$

$1\,\text{kWh} = 1\,000\,\text{Wh} = 3{,}6 \cdot 10^6\,\text{Ws}$

Jednotka kWh se užívá v energetice, např. při stanovení spotřeby elektrické energie.

ÚČINNOST η je bezrozměrová veličina a udáváme ji v procentech.

Př. 1

Letadlo o hmotnosti 10^4 kg má mít při startu rychlost 288 km · h^{-1}. Motory letadla vyvinou celkovou sílu o velikosti 20 kN. Předpokládejme, že 20 % této hodnoty připadá na překonání síly tření a odporu vzduchu.
Urči, jakou minimální startovací dráhu potřebuje letadlo.

$m = 10^4$ kg; $v = 288\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1} = 80\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $F = 20\ \text{kN} = 2 \cdot 10^4$ N; $s = ?$

$E_k = 0{,}8 \cdot W$

$\frac{1}{2}mv^2 = 0{,}8 \cdot Fs \Rightarrow s = \frac{mv^2}{1{,}6F}; \{s\} = \frac{10^4 \cdot 80^2}{1{,}6 \cdot 2 \cdot 10^4} = 2\,000;\ s = 2\,000$ m

Letadlo potřebuje minimální startovací dráhu 2 000 m.

- Z textu je zřejmé, že na zvýšení kinetické energie letadla zbude 80 % práce vykonané motorem letadla na startovací dráze s.

Př. 2

Motor výtahu zvedne náklad o hmotnosti 240 kg do výšky 36 m za 90 s.
Jaký je jeho výkon? Jaký je příkon motoru, je-li jeho účinnost 96 %?

$m = 240$ kg; $h = 36$ m; $\Delta t = 90$ s; $\eta = 0{,}96$; $P = ?$; $P_0 = ?$

$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}; \Delta W = \Delta E_p = mgh; P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta E_p}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t}$

$\{P\} = \frac{240 \cdot 10 \cdot 36}{90} = 960;\ P = 960$ W

$\eta = \frac{P}{P_0} \Rightarrow P_0 = \frac{P}{\eta}; \{P_0\} = \frac{960}{0{,}96} = 1000;\ P_0 = 1000$ W

Výkon motoru je 960 W, jeho příkon je 1 000 W.

- Výkon výtahu je určen jeho prací vykonanou za daný čas. Práce výtahu je dána změnou jeho potenciální polohové energie.
- Příkon motoru výtahu určíme ze znalosti výkonu výtahu a jeho účinnosti.

2.4 Gravitační pole

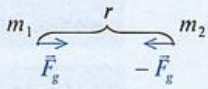
Newtonova teorie gravitace

GRAVITAČNÍ SÍLA je přitažlivá síla, kterou na sebe působí jakákoliv dvě hmotná tělesa, aniž musí dojít k jejich přímému dotyku.

GRAVITAČNÍ POLE existuje v okolí všech hmotných těles a zprostředkuje působení gravitačních sil mezi nimi.

GRAVITAČNÍ ZÁKON: Každá dvě tělesa se navzájem přitahují stejně velkými gravitačními silami $\vec{F}_g$, $-\vec{F}_g$ opačného směru.

Velikost **GRAVITAČNÍ SÍLY** F_g pro dva hmotné body o hmotnosti m_1, m_2 ve vzdálenosti r je dána vztahem



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

kde κ (kappa) se nazývá **GRAVITAČNÍ KONSTANTA** a má hodnotu $\kappa = 6{,}67259 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$.

GRAVITAČNÍ SÍLA $\vec{F}_g$ uděluje každému tělesu o hmotnosti m, které se nachází v gravitačním poli, **GRAVITAČNÍ ZRYCHLENÍ**:

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

Dosazením z gravitačního zákona dostaneme pro velikost gravitačního zrychlení v daném místě prostoru vztah:

$$a_g = \kappa \frac{M}{r^2}.$$

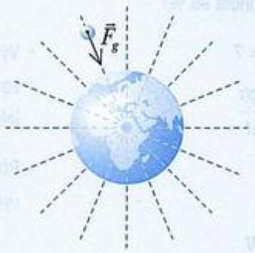
kde M je hmotnost kulového tělesa, které pole vytváří, a r je vzdálenost od jeho středu.

Gravitační pole Země

Země vytváří v okolitém prostoru gravitační pole. Siločáry gravitačního pole směřují ke středu Země. Gravitační pole působí na hmotná tělesa gravitační silou $\vec{F}_{gZ}$ o velikosti

$$F_{gZ} = \kappa \frac{mM_Z}{r^2},$$

kde M_Z je hmotnost Země, m je hmotnost tělesa a r vzdálenost tělesa od středu Země.

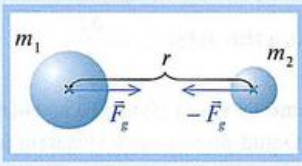


SILOČÁRA je myšlená čára, jejíž tečna v daném bodě určuje směr vektoru gravitační síly.

Osnova kapitoly:

- Newtonova teorie gravitace, gravitační zákon
- Gravitační pole, gravitační zrychlení, siločáry
- Intenzita gravitačního pole
- Tíhová a gravitační síla na povrchu Země
- Pohyby v tíhovém poli Země, v centrálním gravitačním poli Země, kosmické rychlosti
- Pohyby těles v centrálním gravitačním poli Slunce, Keplerovy zákony

GRAVITACE (neboli přitažlivost) je fyzikální jev vzájemného působení hmotných objektů na dálku prostřednictvím gravitačního pole.



Vztah pro velikost **GRAVITAČNÍ SÍLY** platí i pro dvě homogenní koule.

Hodnota **GRAVITAČNÍ KONSTANTY** udává, jakou silou se přitahují dvě tělesa o hmotnosti 1 kg vzdálená 1 m.

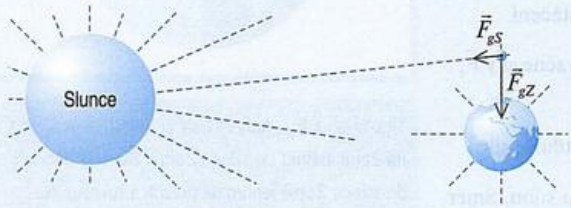
Víte, že I. Newton, objevitel **GRAVITAČNÍHO ZÁKONA**, navázal na poznatky Ch. Huygense (str. 29) a J. Keplera (str. 41), kteří předpokládali, že pohyby planet kolem Slunce vyvolává nějaká „hybná síla", která pochází ze Slunce? I. Newton postuloval, že gravitační síla Země sahá až na Měsíc, stejně jako gravitační síla Slunce sahá až k planetám a tato síla stejně jako na Zemi způsobuje zrychlení pohybů. Pak odvodil z Keplerových zákonů nejenom její velikost, ale také fakt, že gravitační síla Slunce způsobuje dostředivé zrychlení a směřuje ke Slunci. Přesto působení gravitačních sil na dálku pokládal za absurdní a na otázku: „Co je příčinou gravitace?" odpověděl: „Hypotézy nevymýšlím." Moderní fyzika přímé působení sil na dálku také odmítá a vysvětluje ho pomocí gravitačního pole, které není jenom matematickou konstrukcí, ale zvláštní formou hmoty odlišnou od látky (str. 22, 201).

Na těleso o hmotnosti $m = 1\,\mathrm{kg}$ na povrchu Země působí gravitační síla $\vec{F}_{gZ}(R_Z)$ o velikosti $F_{gZ}(R_Z) = \kappa \frac{mM_Z}{R_Z^{\,2}}$.

Po dosazení hodnot $m = 1\,\mathrm{kg}$, $M_Z = 5{,}977 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg}$ a $R_Z = 6{,}378 \cdot 10^{6}\,\mathrm{m}$ zjistíme, že síla $F_{gZ} = 9{,}787\,\mathrm{N}$ (př. 2, str. 42).

Gravitační pole Slunce

Slunce vytváří v okolním prostoru gravitační pole, které působí na planety a všechna tělesa gravitační silou $\vec{F}_{gS}$ o velikosti $F_{gS} = \kappa \frac{mM_S}{r^2}$, kde M_S je hmotnost Slunce, m je hmotnost tělesa a r vzdálenost tělesa od středu Slunce.



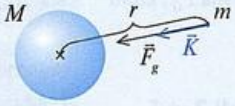
GRAVITAČNÍ SÍLA Slunce $\vec{F}_{gS}$ působící na těleso o hmotnosti $m = 1$ kg, které se nachází v blízkém okolí Země, je $5{,}93 \cdot 10^{-3}$ N. Výsledek lze vypočítat z gravitačního zákona $F_{gS} = \kappa \frac{mM_S}{R_{SZ}^2}$, kde $M_S = 1{,}989 \cdot 10^{30}$ kg, vzdálenost Slunce od Země $R_{SZ} = 1{,}496 \cdot 10^{11}$ m.

V okolí Země je gravitační síla Slunce víc než 1 000krát menší než gravitační síla Země, tedy gravitační pole Slunce téměř nemění tvar gravitačního pole Země v jejím blízkém okolí.

Intenzita gravitačního pole

INTENZITA GRAVITAČNÍHO POLE $\vec{K}$ v daném bodě prostoru je definována jako podíl gravitační síly $\vec{F}_g$, která v daném místě působí na hmotný bod, a hmotnosti tohoto bodu m: $\vec{K} = \frac{\vec{F}_g}{m}$.

Intenzita gravitačního pole $\vec{K}$ má stejný směr jako gravitační síla a její velikost je rovna velikosti gravitační síly působící na jednotku hmoty. Intenzita $\vec{K}$ v daném místě gravitačního pole je rovna gravitačnímu zrychlení $\vec{a}_g$.



INTENZITA $\vec{K}$ popisuje gravitační pole v každém bodě prostoru jednoznačně, protože závisí pouze na poloze tohoto bodu a na tělese, které pole vytváří.

JEDNOTKOU INTENZITY GRAVITAČNÍHO POLE je newton na kilogram ($N \cdot kg^{-1}$).

$$[\vec{K}] = \frac{[\vec{F}_g]}{[m]} = \frac{N}{kg} = N \cdot kg^{-1} =$$
$$= kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1} = m \cdot s^{-2} = [\vec{a}_g]$$

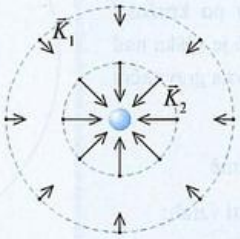
INTENZITA $\vec{K}$ v daném místě gravitačního pole je rovna **GRAVITAČNÍMU ZRYCHLENÍ** $\vec{a}_g$, tzn. $\vec{K} = \frac{\vec{F}_g}{m} = \vec{a}_g$.

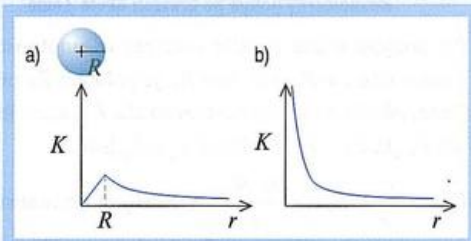
Po dosazení za F_g z gravitačního zákona dostaneme pro velikost intenzity K v daném místě gravitačního pole vztah $K = \kappa \frac{M}{r^2}$, kde M je hmotnost tělesa, které pole vytváří, a r je vzdálenost místa od středu tohoto tělesa.

Velikost **INTENZITY GRAVITAČNÍHO POLE**

Odvození vztahu: $K = \frac{F_g}{m} = \frac{\kappa \frac{mM}{r^2}}{m} = \kappa \frac{M}{r^2} = a_g$

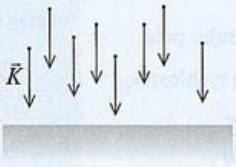
CENTRÁLNÍ GRAVITAČNÍ POLE (radiální gravitační pole) je v prostoru kolem hmotného bodu nebo homogenní koule. Vektory intenzity $\vec{K}$ směřují do středu a jejich velikost se zmenšuje se vzdáleností od hmotného bodu nebo středu koule.





Závislost velikosti **INTENZITY GRAVITAČNÍHO POLE**
a) homogenní koule na vzdálenosti r od středu koule,
b) hmotného bodu na vzdálenosti r.

HOMOGENNÍ GRAVITAČNÍ POLE je pole, jehož intenzita má ve všech místech stejnou velikost i směr. Jde o idealizované gravitační pole.



Za přibližně homogenní můžeme považovat gravitační pole při povrchu Země v prostoru o rozměrech několika set metrů.

Tíhová a gravitační síla na povrchu Země

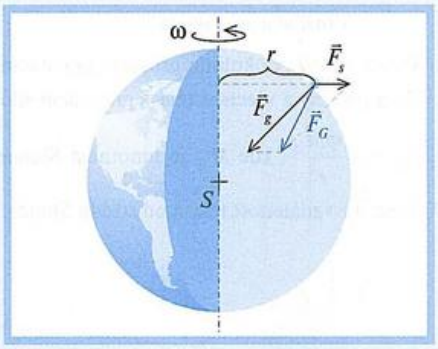
Na všechna tělesa na Zemi působí síly:

- gravitační síla o velikosti $F_g = \kappa \frac{m \cdot M_Z}{R_Z^2}$ směřující do středu Země, kde M_Z je hmotnost Země, R_Z je poloměr Země a m je hmotnost tělesa;
- setrvačná odstředivá síla o velikosti $F_s = m\omega^2 r$ způsobená otáčením Země kolem osy a směřující kolmo od osy otáčení.

TÍHOVÁ SÍLA $\vec{F}_G$ je výslednicí gravitační síly $\vec{F}_g$ a setrvačné síly $\vec{F}_s$: $\vec{F}_G = \vec{F}_g + \vec{F}_s$.

TÍHOVÉ POLE je v prostoru, v němž se projevují účinky tíhové síly.

TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ $\vec{g}$ je zrychlení způsobené tíhovou silou. Směr tíhového zrychlení určuje **SVISLÝ SMĚR**, tedy stejný jako směr tíhové síly. Protože $\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$, jak známe z 2. NPZ, je $\vec{g} = \frac{\vec{F}_G}{m}$.



TÍHOVÁ SÍLA $\vec{F}_G$, tedy i svislý směr na většině míst na Zemi, nemíří do středu Země. Svislý směr míří do středu Země jenom na pólech a rovníku. Na pólech je $F_s = 0$, proto $F_G = F_g$.
Na rovníku jsou síly $\vec{F}_g$ a $\vec{F}_s$ opačného směru, proto $F_G = F_g - F_s$.

Velikost **TÍHOVÉHO ZRYCHLENÍ** g závisí na zeměpisné šířce. Na rovníku je tíhové zrychlení asi $9{,}78\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$, na pólech je $9{,}83\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$. Mezinárodně dohodnutá standardní velikost **NORMÁLNÍHO TÍHOVÉHO ZRYCHLENÍ** je $9{,}80665\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země

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

Nejjednodušší pohyby v homogenním tíhovém poli Země jsou: volný pád, vodorovný vrh, svislý vrh vzhůru a šikmý vrh vzhůru (str. 19–21).

Pohyby těles v centrálním gravitačním poli Země, kosmické rychlosti

POHYBY TĚLES V CENTRÁLNÍM GRAVITAČNÍM POLI ZEMĚ jsou pohyby, jejichž trajektorie mají rozměry porovnatelné s rozměry Země. Odpor vzduchu v těchto vzdálenostech od Země můžeme považovat za zanedbatelný.

Rovnoměrný pohyb po kružnici okolo Země

Při pohybu tělesa (umělé družice) o hmotnosti m po kružnici o poloměru $r = R_Z + h$, kde R_Z je poloměr Země a h je výška nad Zemí, působí na těleso dostředivá síla $\vec{F}_d$, která je rovna gravitační síle $\vec{F}_g$, tj. $\vec{F}_d = \vec{F}_g$. Velikosti $\vec{F}_d$ a $\vec{F}_g$ jsou:

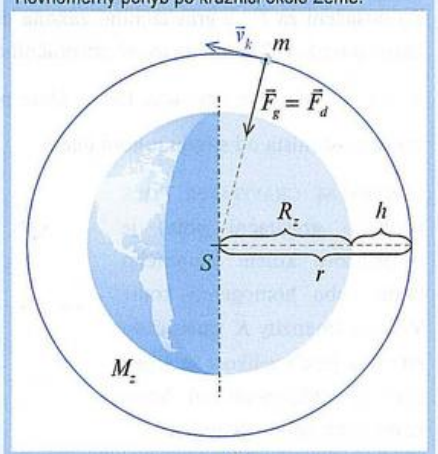
$F_d = m\frac{v_k^2}{r}$, $F_g = \kappa \frac{m \cdot M_Z}{r^2}$, kde M_Z je hmotnost Země a v_k **KRUHOVÁ RYCHLOST**. Pro kruhovou rychlost platí vztah:

$$v_k = \sqrt{\frac{\kappa \cdot M_Z}{r}} = \sqrt{a_g \cdot r} = \sqrt{K \cdot r},$$

kde $\vec{a}_g$ je gravitační zrychlení, $\vec{K}$ je intenzita gravitačního pole.

Pro **OBĚŽNOU DOBU** T družice pohybující se kruhovou rychlostí v_k ve vzdálenosti r od středu Země platí: $T = \frac{2\pi r}{v_k} = \frac{2\pi r^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\kappa M_Z}}$.

Rovnoměrný pohyb po kružnici okolo Země:



Protože $F_d = F_g$, platí $m\frac{v_k^2}{r} = \kappa \frac{m \cdot M_Z}{r^2}$. Odtud

$$v_k = \sqrt{\frac{\kappa \cdot M_Z}{r}} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot M_Z \cdot r}{r^2}} = \sqrt{a_g \cdot r} = \sqrt{K \cdot r}$$

(str. 39).

PRVNÍ KOSMICKÁ RYCHLOST je kruhová rychlost tělesa, jehož výška h nad Zemí je malá vzhledem k poloměru Země R_Z, a je dána vztahem: $v_k = \sqrt{a_g \cdot R_Z}$.

Pro hodnoty $a_g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$, $r = R_Z = 6{,}378 \cdot 10^6$ m je $v_k = 7{,}91\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$; oběžná doba družice je 84 min.

GEOSTACIONÁRNÍ DRUŽICE – STACIONÁRNÍ DRUŽICE ZEMĚ se pohybuje nad rovníkem takovou kruhovou rychlostí v_k, že z hlediska pozorovatele na Zemi zůstává na stejném místě, tudíž její oběžná doba je 24 hodin.

Pohyb po eliptické trajektorii kolem Země

Těleso se bude kolem Země pohybovat po eliptické trajektorii, je-li jeho oběžná rychlost v větší než kruhová rychlost v_k a menší než parabolická rychlost v_p. Jedno ohnisko eliptické trajektorie leží v gravitačním středu Země.

Pohyb po parabolické trajektorii kolem Země

Těleso se začne pohybovat kolem Země po parabolické trajektorii, dosáhne-li **PARABOLICKÉ RYCHLOSTI** $v_p = \sqrt{2 a_g r}$. Parabolická rychlost se nazývá též **ÚNIKOVÁ RYCHLOST**, protože je to nejmenší rychlost, kterou musíme udělit kosmické lodi, aby se setrvačností dostala z gravitačního pole Země.

Ve výšce h zanedbatelně malé vzhledem k poloměru Země je úniková rychlost $v_p = \sqrt{2 a_g R_Z}$.

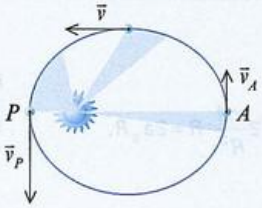
Nazývá se též **DRUHÁ KOSMICKÁ RYCHLOST** neboli úniková rychlost z povrchu Země a má hodnotu $v_p = 11{,}2\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

Pohyby těles v centrálním gravitačním poli Slunce, Keplerovy zákony

Keplerovy zákony objevil v 17. století J. Kepler a popisují pohyby planet v centrálním gravitačním poli Slunce. Keplerovy zákony platí pro všechna tělesa pohybující se v centrálním gravitačním poli Slunce, tedy i pro komety, planetky apod.

1. KEPLERŮV ZÁKON: Planety obíhají kolem Slunce po elipsách málo odlišných od kružnic, v jejichž společném ohnisku je Slunce.

2. KEPLERŮV ZÁKON: Obsahy ploch opsaných **PRŮVODIČEM** planety za jednotku času jsou konstantní.



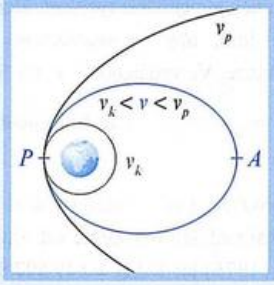
3. KEPLERŮV ZÁKON: Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin hlavních poloos jejich trajektorií: $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$.

Je-li výška družice h nad Zemí malá vzhledem k poloměru Země R_Z, můžeme ji ve vztahu pro kruhovou rychlost zanedbat, pak **PRVNÍ KOSMICKÁ RYCHLOST** $v_k = \sqrt{a_g \cdot r} = \sqrt{a_g \cdot (R_Z + h)} = \sqrt{a_g \cdot R_Z}$.

GEOSTACIONÁRNÍ DRUŽICE se pohybuje kruhovou rychlostí $v_s = \sqrt{\frac{\kappa M_Z}{r_s}} = 3{,}072\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Její výška nad povrchem Země je přibližně 36 000 km.

KRUHOVÁ RYCHLOST se snižuje s rostoucí vzdáleností od středu Země a její hodnota ve vzdálenosti Měsíce je $v_k = 1{,}0183\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

ELIPTICKÁ TRAJEKTORIE ($v_k < v < v_p$)
PARABOLICKÁ TRAJEKTORIE ($v \geq v_p$)

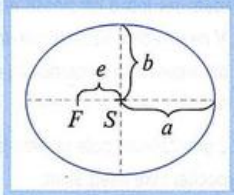


Při eliptické trajektorii se bod, v němž má těleso nejmenší vzdálenost od Země, nazývá **PERIGEUM (P)**. Největší vzdálenost má těleso v bodě nazývaném **APOGEUM (A)**.

Parabolická rychlost $v_p = \sqrt{2 a_g r} = \sqrt{2 \frac{\kappa M}{r}} = \sqrt{2} \cdot v_k$, kde kde v_k je kruhová rychlost.

ÚNIKOVÁ RYCHLOST v_p se snižuje s rostoucí vzdáleností r od středu Země a ve vzdálenosti Měsíce je $1{,}44\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

ČÍSELNÁ VÝSTŘEDNOST (numerická excentricita) ε elipsy



vyjadřuje, do jaké míry se liší eliptická trajektorie planety od kruhové.

$\varepsilon = \frac{|SF|}{a} = \frac{e}{a}$,

$e = \sqrt{a^2 - b^2}$

S je střed, F ohnisko elipsy, a je délka hlavní poloosy, b je délka vedlejší poloosy elipsy.

Pro Zemi je $\varepsilon = 0{,}01671$, tedy její trajektorie je téměř kruhová. Elipsa Pluta má $\varepsilon = 0{,}2488$.

PRŮVODIČ PLANETY je úsečka spojující planetu a střed Slunce. Délka průvodiče se mění, nejkratší je v **PERIHELIU P** (přísluní), nejdelší je v **AFELIU A** (odsluní).

Pro **KRUHOVÉ RYCHLOSTI** planet v gravitačním poli Slunce platí vztah $v_k = \sqrt{\frac{\kappa \cdot M_S}{r}}$.

Pro **OBĚŽNÉ DOBY PLANET** v gravitačním poli Slunce platí vztah $T = \frac{2\pi r^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\kappa M_S}}$,

kde M_S je hmotnost Slunce, r je vzdálenost planety od středu Slunce, κ je gravitační konstanta.

KRUHOVÁ rychlost planet se nazývá též **ORBITÁLNÍ** neboli **OBĚŽNÁ** rychlost a klesá s rostoucí vzdáleností planet od Slunce. Tak se chovají všechny planetární i hvězdné systémy, v nichž je převážná část hmoty systému soustředěna v centru. Tyto systémy se nazývají keplerovské na počest J. Keplera.

TŘETÍ KOSMICKÁ RYCHLOST v_3 neboli **ÚNIKOVÁ RYCHLOST** z gravitačního pole Slunce je nejmenší rychlost, kterou musíme udělit kosmické lodi, aby se setrvačností dostala z gravitačního pole Slunce. Ve vzdálenosti r od Slunce je dána vztahem $v_3(r) = \sqrt{\frac{2\kappa \cdot M_S}{r}}$, kde hmotnost Slunce $M_S = 1{,}989 \cdot 10^{30}$ kg.

ASTRONOMICKÁ JEDNOTKA (AU - astronomical unit) je přibližně rovna střední vzdálenosti Země od Slunce; její hodnota přijatá IAU (1976) je: 1 AU = 149 597 870 km.

Odvození vztahu pro **KRUHOVOU RYCHLOST PLANET** je stejné jako odvození kruhové rychlosti na str. 40:
Gravitační síla $\vec{F}_{gS}$, kterou Slunce působí na planetu, je dostředivá síla $\vec{F}_d$ jejího kruhového pohybu: $F_{gS} = F_d$.
Dosadíme-li vztah pro gravitační sílu $F_{gS} = \kappa \frac{m \cdot M_S}{r^2}$ (str. 39) a dostředivou sílu $F_d = m\frac{v_k^2}{r}$ (str. 33), pak $m\frac{v_k^2}{r} = \kappa \frac{m \cdot M_Z}{r^2}$, kde m je hmotnost planety,
z toho plyne: $v_k = \sqrt{\frac{\kappa \cdot M_S}{r}}$.
Kruhová rychlost Země okolo Slunce je $v_k = 29{,}79\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

Pro **OBĚŽNOU DOBU** planety platí
$T = \frac{2\pi r}{v_k} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{\kappa \cdot M_S}{r}}} = \frac{2\pi r^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\kappa \cdot M_S}}$, kde r je vzdálenost planety od středu Slunce, M_S je hmotnost Slunce.

Úniková rychlost z povrchu Slunce je asi $617{,}7\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.
V oblasti Země má úniková rychlost ze sluneční soustavy, resp. třetí kosmická rychlost $v_3(r)$ hodnotu $v_3 = 42{,}1\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

Střední vzdálenost Země od Slunce – delší poloosa její eliptické dráhy a = 149 597 887,5 km.

Př. 1

Odvození **ÚNIKOVÉ RYCHLOSTI** v_p.

Předpokládáme myšlenkový model, ve kterém kosmická loď startuje přímo vzhůru a pohybuje se přímočarým pohybem v centrálním gravitačním poli planety. Při vzdalování se od planety loď překonává gravitační sílu $\vec{F}_g$ směřující proti směru pohybu a spotřebovává se práce, přičemž kinetická energie lodi se postupně snižuje.

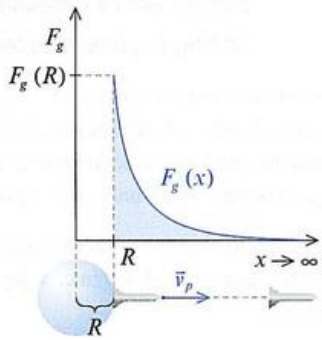
Počáteční kinetická energie kosmické lodi o hmotnosti m startující z planety rychlostí v_p je $E_k = \frac{1}{2}mv_p^2$. V nekonečné* vzdálenosti dosáhne kinetická energie nulové hodnoty, přičemž nezanikla, ale změnila se v potenciální energii E_p, která je rovna celkové spotřebované práci W, tedy $W = E_p = \frac{1}{2}mv_p^2$.

Práce spotřebovaná na únik z gravitačního pole planety je dána obsahem modrého obrazce anebo ji můžeme vypočítat také integrálem:

$$W = \int_R^\infty F_g\,\mathrm{d}x = \int_R^\infty \frac{\kappa m M}{x^2}\,\mathrm{d}x = \kappa m M \cdot \int_R^\infty \frac{\mathrm{d}x}{x^2} = \frac{\kappa m M}{R}.$$

Z rovnosti $W = E_p$, teda $\frac{\kappa m M}{R} = \frac{1}{2}mv_p^2$, vypočítáme: $v_p^2 = 2\frac{\kappa M}{R^2} \cdot R = 2a_gR$,

teda $v_p = \sqrt{2a_gR} = \sqrt{2\frac{\kappa M}{R}}$.



$F_g(x) = \frac{\kappa m M}{x^2}$ je velikost gravitační síly ve vzdálenosti x od středu planety.

Celková spotřebovaná i vykonaná práce W v gravitačním poli nezávisí na tvaru trajektorie. Z toho vyplývá, že velikost únikové rychlosti tělesa nezávisí na jejím směru.

*Nekonečná vzdálenost znamená prakticky vzdálenost, kde je gravitační pole planety zanedbatelně malé.

Obecná teorie relativity – Einsteinova teorie gravitace

Speciální teorie relativity (str. 170) a její experimentálně ověřené důsledky (kupř. fakt, že světlo se šíří prostorem konečnou rychlostí) byly v rozporu s Newtonovou teorií gravitace, podle které se gravitační působení šířilo nekonečnou rychlostí. Proto se Albert Einstein pokoušel najít takovou teorii gravitace, jež by byla v souladu se speciální teorií relativity. Tuto teorii předložil v roce 1915; dnes ji nazýváme **OBECNOU TEORIÍ RELATIVITY** a její součástí je **EINSTEINŮV GRAVITAČNÍ ZÁKON**, resp. **EINSTEINOVY ROVNICE POLE**, které matematicky popisují, jak hmota, resp. energie zakřivuje prostoročas. Podle tohoto zákona je zakřivení prostoru kolem hmotného tělesa tím větší, čím větší je jeho hmotnost.

Důsledky obecné teorie relativity:

- gravitační pole zakřivuje dráhu světla,
- gravitační pole ovlivňuje chod času – v blízkosti hmotného tělesa jdou hodiny pomaleji.

ČERNÉ DÍRY jako důsledek řešení Einsteinových rovnic obecné teorie relativity předpověděl Karl Schwarzschild v roce 1917. Černé díry vznikají např. jako důsledek gravitačního kolapsu jádra supernovy o hmotnosti větší nežli dvojnásobek hmotnosti Slunce (str. 216). Velikost černé díry o hmotnosti M je určena **SCHWARZCHILDOVÝM POLOMĚREM** R_g:

$R_g = \frac{2\kappa M}{c^2}$, kde κ je gravitační konstanta, c je rychlost světla.

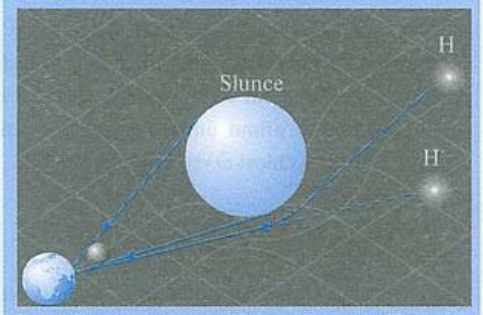
KOSMOLOGICKÉ MODELY VÝVOJE VESMÍRU vycházející z obecné teorie relativity předpovídají rozpínání vesmíru. **ROZPÍNÁNÍ VESMÍRU** bylo potvrzeno E. J. Hubblem v roce 1929 pomocí měření vzdálenosti a červeného posuvu spektrálních čar světla dalekých galaxií a ověřeno mnohými dalšími měřeními. Z Hubblova zákona (str. 218) ale nebylo zřejmé, jak se vesmír rozpínal na počátku a jak bude jeho expanze pokračovat.

Podle prvního modelu (1), který předložil A. Friedmann v roce 1922, by se rozpínání vesmíru mělo postupně zpomalovat v důsledku přitažlivé gravitační síly mezi galaxiemi; nakonec se zastaví, galaxie se k sobě začnou přibližovat, vesmír se začne smršťovat a skončí gravitačním kolapsem (tzv. Big Crunch). Ve druhém modelu (2) by se rozpínání vesmíru rovněž mělo zpomalovat, ale nikdy se nezastaví, vesmír se tedy bude rozpínat věčně. Ve třetím modelu (3) se vesmír rozpíná právě tak rychle, aby nedošlo k fázi kontrakce. Tento model je podle posledních měření Hubblovy konstanty nejpravděpodobnější, pozoruhodné ovšem je, že v současnosti se vesmír zřejmě nachází ve stadiu zrychlujícího se rozpínání (4), (str. 218).

Newtonova teorie gravitace předpokládala šíření gravitačních efektů nekonečnou rychlostí – změní-li se hmotnost tělesa, jeho gravitační pole se změní okamžitě v každém bodě prostoru, jakkoliv vzdáleného od tělesa.

Třírozměrný prostor a jednorozměrný čas tvoří v Einsteinově gravitační teorii čtyřrozměrný prostoročas.

Gravitační pole Slunce zakřivuje paprsky světla, tedy pozorovatel vidí obraz H' vzdálené hvězdy H posunut. Tento jev byl prvně pozorován britskou expedicí při zatmění Slunce v Africe v roce 1919.

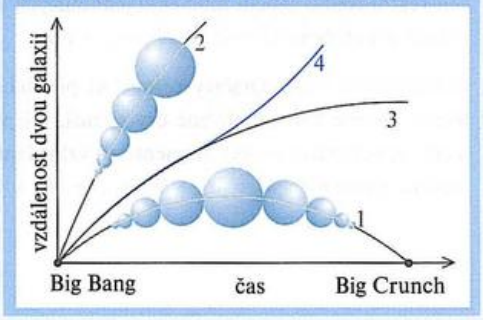


Pomalejší chod hodin na vrcholu vodárenské věže oproti hodinám na zemi byl ověřen v roce 1962.

SCHWARZCHILDŮV POLOMĚR určuje **HORIZONT UDÁLOSTÍ**, tj. hranici oblasti, ze které se nemůže dostat ven žádný světelný signál, žádná informace, žádná hmota. Úniková rychlost v místě horizontu událostí je rovna rychlosti světla. Schwarzschildův poloměr nejmenší černé díry o hmotnosti rovné dvojnásobku hmotnosti Slunce je přibližně 5,92 km.

KOSMOLOGICKÉ MODELY VÝVOJE VESMÍRU:

1. model uzavřeného vesmíru,
2. model otevřeného vesmíru,
3. model plochého vesmíru,
4. model plochého vesmíru s akcelerací rozpínání.



2.5 Mechanika tuhého tělesa

Tuhé těleso

TUHÉ TĚLESO definujeme jako ideální těleso, jehož tvar ani objem se účinkem libovolně velkých sil nemění. Tuhé těleso je myšlenkový model reálného pevného tělesa. V praxi považujeme za tuhé takové těleso, u něhož jsou deformace zanedbatelně malé. Tuhé těleso může konat pohyb posuvný, otáčivý nebo pohyb složený z těchto dvou pohybů.

POSUVNÝ (TRANSLAČNÍ) POHYB: všechny body tuhého tělesa opisují stejné trajektorie a mají stejnou rychlost.

OTÁČIVÝ (ROTAČNÍ) POHYB kolem nehybné osy O: všechny body opisují soustředné kružnice (nebo jejich části) o různých poloměrech se středem v ose otáčení. Velikost rychlosti jednotlivých bodů je přímo úměrná jejich vzdálenosti od osy otáčení. Úhlová rychlost $\vec{\omega}$ všech bodů je stejná.

Moment síly, momentová věta

MOMENT SÍLY $\vec{M}$ je fyzikální veličina vyjadřující otáčivý účinek síly $\vec{F}$ na tuhé těleso otáčející se okolo nehybné osy. Moment síly je vektor ležící v ose otáčení a jeho velikost je rovna součinu velikosti působící síly F a ramene síly d: $M = d \cdot F$.

RAMENO SÍLY d je kolmá vzdálenost vektorové přímky p, na níž leží vektor síly $\vec{F}$, od osy otáčení.

Kladným znaménkem označujeme momenty, které způsobují otáčení proti směru hodinových ručiček. Záporným znaménkem označujeme momenty, které způsobují otáčení ve směru hodinových ručiček.

OTÁČIVÝ ÚČINEK SÍLY na těleso, které se může otáčet okolo nehybné osy, závisí nejenom na velikosti a směru působící síly, ale i na poloze jejího působiště vzhledem k ose otáčení.

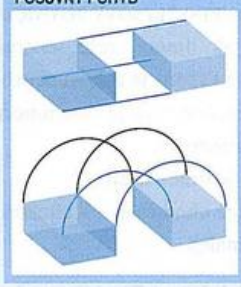
VÝSLEDNÝ MOMENT SIL současně působících na těleso je roven vektorovému součtu momentů jednotlivých sil vzhledem k dané ose otáčení: $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \ldots + \vec{M}_n$.

MOMENTOVÁ VĚTA: Otáčivý účinek sil působících na tuhé těleso otáčené kolem nehybné osy se ruší, je-li výsledný moment, tj. vektorový součet momentů sil vzhledem k dané ose otáčení, roven nule: $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \ldots + \vec{M}_n = \vec{0}$.

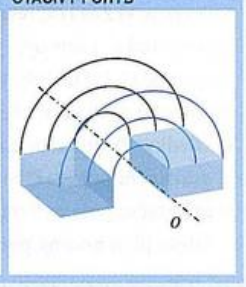
Osnova kapitoly:

- Tuhé těleso
- Moment síly, momentová věta, dvojice sil
- Těžiště
- Statika tuhého tělesa, rovnovážné polohy, stabilita, jednoduché stroje
- Dynamika tuhého tělesa, kinetická energie otáčivého pohybu, moment setrvačnosti

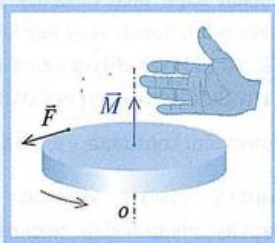
POSUVNÝ POHYB



OTÁČIVÝ POHYB

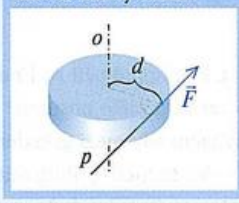


Složený posuvný i otáčivý pohyb koná např. kolo automobilu.

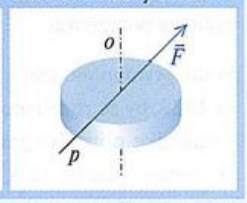


Směr momentu síly určíme podle PRAVIDLA PRAVÉ RUKY: Položíme-li pravou ruku na těleso tak, aby lehce pokrčené prsty pravé ruky ukazovaly směr otáčení tělesa, dlaň směrem k ose otáčení, pak vztyčený palec ukazuje směr momentu $\vec{M}$.

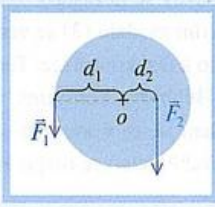
RAMENO SÍLY $d \neq 0$, tedy síla má otáčivý účinek.



RAMENO SÍLY $d = 0$, tedy síla nemá otáčivý účinek.



JEDNOTKOU MOMENTU SÍLY je newtonmetr (Nm).



MOMENTOVÁ VĚTA

$M_1 = F_1 d_1$

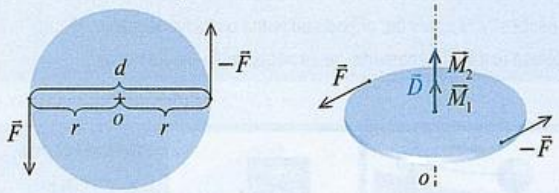
$M_2 = F_2 d_2$

$\vec{M}_1 = -\vec{M}_2$, tedy

$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 = \vec{0}$

Dvojice sil

DVOJICI SIL tvoří dvě stejně velké rovnoběžné síly opačného směru působící v různých bodech tělesa otáčejícího se okolo nehybné osy.



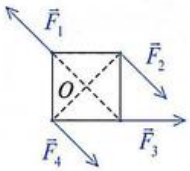
MOMENT DVOJICE SIL $\vec{D}$ udává otáčivý účinek dvojice sil $\vec{F}$, $-\vec{F}$ a jeho velikost je součin velikosti jedné síly F a ramene dvojice sil d, tj. $D = F \cdot d$.

RAMENO DVOJICE SIL d je vzdálenost vektorových přímek obou sil.

$\vec{D} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$, kde $\vec{M}_1$ je moment jedné síly a $\vec{M}_2$ je moment druhé síly.

Př. 1

Čtvercová deska o straně 2 metry je otáčivá kolem osy jdoucí jejím středem a kolmé k rovině desky. Na desku působí síly $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$ o velikosti $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = 10$ N (podle obrázku). Vypočti velikost a směr výsledného momentu sil.



$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = 10$ N; $M = ?$

$d_1 = 0$ m; $d_2 = \sqrt{2}$ m; $d_3 = 1$ m; $d_4 = \sqrt{2}$ m

$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \vec{M}_4$

$\{M\} = 10 \cdot 0 - 10 \cdot \sqrt{2} + 10 + 10 \cdot \sqrt{2} = 10; M = 10$ Nm

Výsledný moment sil má velikost 10 Nm a směřuje před nákresnu.

DVOJICÍ SIL působí ruce řidiče při otáčení volantem, prsty při otáčení šroubovákem, ruce otáčející oboustranné vratidlo nástrčkového klíče na utahování matic nebo závitníku na řezání závitů.

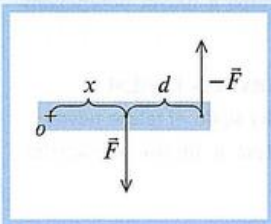
VELIKOST MOMENTU DVOJICE SIL

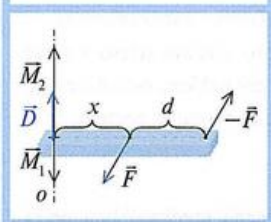
Moment dvojice sil $\vec{D} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$,

$M_1 = F \cdot r$, $M_2 = F \cdot r$.

Protože vektory $\vec{M}_1$ a $\vec{M}_2$ jsou stejného směru, velikost výsledného momentu dvojice sil D je dána součtem

$D = F \cdot r + F \cdot r = F \cdot d$.





VELIKOST MOMENTU DVOJICE SIL pro síly ležící na jedné straně osy otáčení:

M_1 je velikost momentu první síly $\vec{F}$,

M_2 je velikost momentu druhé síly $-\vec{F}$.

$M_1 = F \cdot x$

$M_2 = F \cdot (x + d)$

Protože vektory $\vec{M}_1$ a $\vec{M}_2$ jsou opačného směru (mají opačný otáčivý účinek), velikost výsledného momentu dvojice sil D je dána rozdílem $M_1 - M_2$, tedy

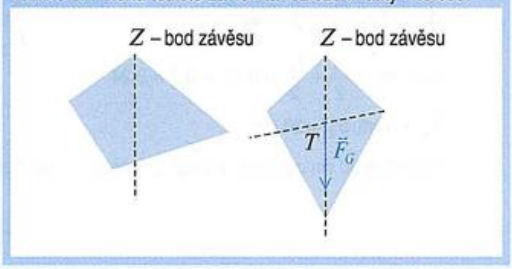
$D = M_1 - M_2 = F \cdot (x + d) - F \cdot x = F \cdot d$. Protože $M_2 > M_1$, $\vec{M}_2$ směřuje nahoru a $\vec{M}_1$ dolů, výsledný moment $\vec{D} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$ směřuje nahoru.

Těžiště

TĚŽIŠTĚ tělesa je působiště tíhové síly na těleso nacházející se v homogenním tíhovém poli. Těžiště určujeme jako působiště výsledné tíhové síly skládáním tíhových sil působících na jednotlivé mikroskopicky malé části tělesa. Experimentálně určujeme těžiště tělesa jeho zavěšováním, jako průsečík těžnic.

TĚŽNICE je přímka procházející těžištěm a bodem závěsu. Těžnice procházející bodem zavěšení směřuje svisle dolů. U souměrných stejnorodých těles je těžiště ve středu souměrnosti tělesa (např. u koule, krychle), případně na ose souměrnosti (např. u kužele, válce).

TĚŽIŠTĚ tělesa získáme jeho postupným zavěšováním. Při každém zavěšení naznačíme těžnici. Jejich průsečíkem je těžiště T. Poloha těžiště závisí na rozložení látky v tělese.



Statika tuhého tělesa

Těleso je v **ROVNOVÁŽNÉ POLOZE**, je-li v klidu a platí dvě podmínky:

- výslednice sil působících na těleso je nulová, $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n = \vec{0}$,
- výsledný moment sil působících na těleso je nulový, $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + ... + \vec{M}_n = \vec{0}$.

STATIKA TUHÉHO TĚLESA se zabývá podmínkami rovnováhy, rovnovážnými polohami a jednoduchými stroji využívajícími princip rovnováhy sil nebo momentů sil.

O **ROVNOVÁŽNÉ POLOZE** mluvíme pouze tehdy, jestliže na těleso působí síly. V opačném případě se jedná o izolované těleso. Výrok „těleso je v klidu" znamená, že se neposunuje ani se neotáčí.

Rovnovážné polohy tělesa

ROVNOVÁŽNÁ POLOHA STÁLÁ - STABILNÍ

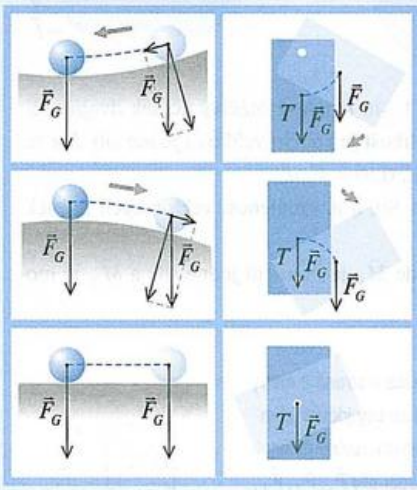
Po vychýlení se těleso do stabilní polohy vrací. Těžiště při vychýlení stoupá a tíhová potenciální energie se zvětšuje.

ROVNOVÁŽNÁ POLOHA VRATKÁ - LABILNÍ

Po vychýlení z této polohy se do ní těleso nevrací. Těžiště při vychýlení klesá a tíhová potenciální energie se zmenšuje.

ROVNOVÁŽNÁ POLOHA VOLNÁ - INDIFERENTNÍ

Po vychýlení z této polohy zůstává těleso v nové poloze. Těžiště nestoupá ani neklesá, osa otáčení je v těžišti, tíhová potenciální energie se nemění.



STABILNÍ POLOHA
Bod závěsu je nad těžištěm.

LABILNÍ POLOHA
Bod závěsu je pod těžištěm.

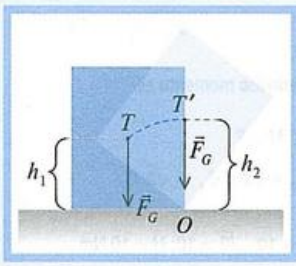
VOLNÁ POLOHA
Bod závěsu je v těžišti.

Stabilita

STABILITA TĚLESA je určena mechanickou prací, kterou musíme vykonat, abychom těleso přemístili z polohy stabilní do polohy vratké.

Těleso je **STABILNÍ**, jestliže svislá těžnice prochází jeho podstavou.

Větší **STABILITU** mají těžší tělesa s větší plochou podstavy a s níže položeným těžištěm.



Kvádr se dostane z polohy stálé do polohy vratké, když svislá těžnice již nebude procházet podstavou a překročí **PŘEKOTNOU HRANU**. Práce k tomu potřebná je $W = F_G \cdot (h_2 - h_1)$.

Př. 2

Urči polohu těžiště kladiva, je-li hmotnost hlavy 1 kg, její šířka 8 cm, hmotnost násady 0,2 kg a její délka 40 cm.

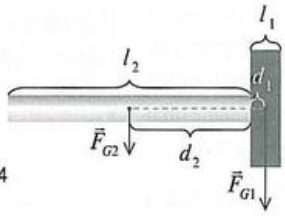
$m_1 = 1\,\text{kg}; m_2 = 0{,}2\,\text{kg}; l_1 = 0{,}08\,\text{m};$
$l_2 = 0{,}40\,\text{m}; d_1 = ?; d_2 = ?$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{F_{G1}}{F_{G2}} = \frac{m_1 g}{m_2 g} = \frac{10}{2} = 5$$

$$d_1 + d_2 = \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2} = 0{,}04 + 0{,}2 = 0{,}24$$

$d_1 = 4\,\text{cm}, d_2 = 20\,\text{cm}$

Těžiště je 20 cm od středu násady a 4 cm od středu hlavy.



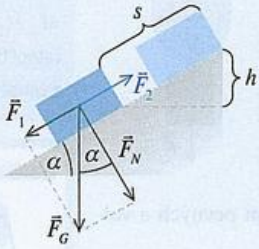
- Předpokládáme, že těžiště jednotlivých částí, tj. hlavy a násady, leží uprostřed těchto částí.
- Těžiště určíme jako působiště výsledné tíhové síly tělesa, tedy jako působiště výslednice dvou rovnoběžných sil o velikosti $F_{G1} = m_1 g = 10$ N, $F_{G2} = m_2 g = 2$ N.
- Získali jsme soustavu dvou rovnic pro dvě neznámé d_1, d_2 (což jsou vzdálenosti jednotlivých tíhových sil od těžiště kladiva), kterou vyřešíme.

Jednoduché stroje

JEDNODUCHÉ STROJE jsou zařízení, která přenášejí sílu a mechanický pohyb z jednoho tělesa na jiné.

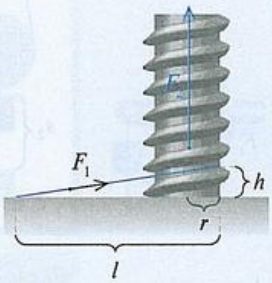
Nakloněná rovina

NAKLONĚNÁ ROVINA svírá s vodorovnou rovinou úhel α. Používá se k přemísťování těžkých nákladů směrem vzhůru, přičemž práci vykonáváme na delší dráze s menší silou $\vec{F}_2$, která je minimálně rovná $-\vec{F}_1$ (pokud zanedbáváme tření).



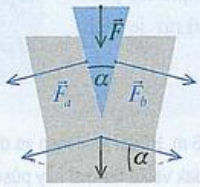
Šroub

ŠROUB je z fyzikálního hlediska nakloněná rovina navinutá na válcovou plochu, kde vytváří křivku zvanou šroubovice, podél níž je vyřezán šroubový závit. Jako zvedák se používá ke zvedání těžkých břemen, jako lis k dosahování velké tlakové síly.



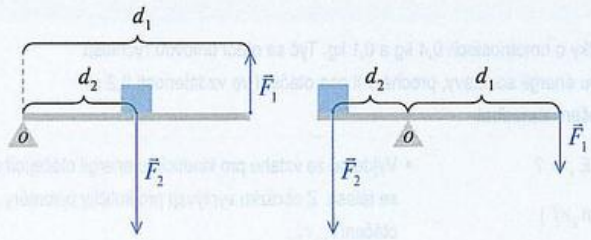
Klín

KLÍN je založen na principu rozkladu sil a nakloněné roviny. Používá se na vyvinutí velkých bočných sil. Princip klínu využívá nůž, sekera, dláto apod.



Páka

PÁKA je pevná tyč otáčivá kolem osy kolmé na tyč.
JEDNOZVRATNÁ PÁKA má osu na svém konci,
DVOJZVRATNÁ PÁKA se otáčí kolem osy, která není na konci páky.
Na principu páky pracují kleště, nůžky, maticové klíče apod.



JEDNODUCHÉ STROJE dělíme na:
- stroje založené na rozkladu a rovnováze sil (nakloněná rovina, klín, šroub),
- stroje založené na rovnováze momentů sil (páka, kladka, kolo s hřídelem).

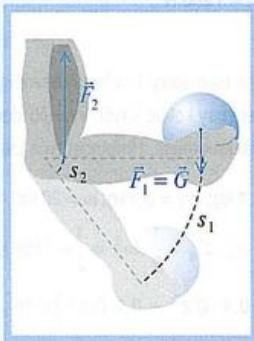
Na **NAKLONĚNÉ ROVINĚ** sklonu α rozložíme tíhovou sílu $\vec{F}_G$ na dvě navzájem kolmé složky:
- $\vec{F}_N$ je kolmá tlaková síla na podložku,
- $\vec{F}_1$ je rovnoběžná s nakloněnou rovinou.

Platí podmínka rovnováhy sil $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$ a práce W vykonaná silou $\vec{F}_2$ po dráze s je:
$W = F_2 \cdot s = F_1 \cdot s = F_G \cdot \sin\alpha \cdot s$.
Protože výška nakloněné roviny $h = s \cdot \sin\alpha$, práce $W = F_2 \cdot s = F_G \cdot h$.

Při utahování působí na **ŠROUB** síla $\vec{F}_1$ podél dráhy $l = 2\pi r$, kde r je poloměr šroubovice.
Při jednom otočení šroubu vykoná tato síla práci $W = F_1 \cdot 2\pi r = F_2 \cdot h$, kde h je výška závitu a $\vec{F}_2$ je síla, kterou působí šroub na zvedané těleso nebo na matici. Je zřejmé, že $\vec{F}_2 > \vec{F}_1$, přitom sílu, kterou šroub působí, můžeme ještě zvětšit pomocí páky.

Síla $\vec{F}$ působící na **KLÍN** se rozkládá na bočné síly $\vec{F}_a, \vec{F}_b$, kde $F_a = F_b = \dfrac{F}{2\sin\dfrac{\alpha}{2}}$
(rozklad sil, str. 25). Síly $\vec{F}_a, \vec{F}_b$ budou tím větší, čím menší bude úhel α.

PÁKA je v rovnováze, mají-li momenty $\vec{M}_1, \vec{M}_2$ obou působících sil $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ stejnou velikost: $M_1 = M_2$ neboli $M_1 = F_1 d_1 = F_2 d_2 = M_2$.

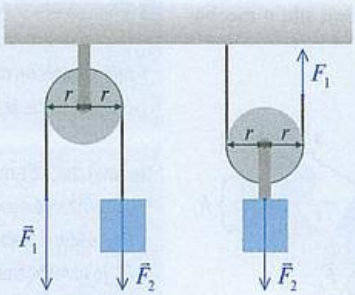


Princip páky umožňuje nejenom znásobení síly, ale také zrychlení pohybu, např. u lidské ruky. Biceps působí větší silou $\vec{F}_2$, než je tíže břemene $\vec{G} = \vec{F}_1$, a dráha pohybu ruky $s_1 > s_2$ (s_2 je dráha úponu bicepsu). Tedy i rychlost pohybu ruky je vyšší než rychlost pohybu bicepsu.

Kladka

PEVNÁ KLADKA je jednoduchý stroj, který využívá princip dvojzvratné páky, jejíž ramena tvoří poloměr r kladky.

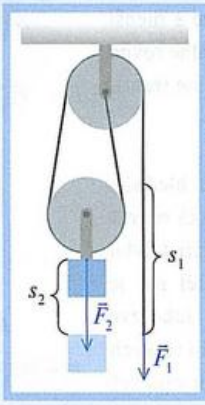
VOLNÁ KLADKA je jednoduchý stroj, který využívá princip jednozvratné páky, jejíž ramena jsou r, $2r$.



PEVNÁ KLADKA je v rovnováze, mají-li momenty $\vec{M}_1, \vec{M}_2$ obou působících sil $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ stejnou velikost: $M_1 = M_2$ neboli $F_1 r = F_2 r$. Pak je síla $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$.

VOLNÁ KLADKA je v rovnováze, mají-li momenty $\vec{M}_1, \vec{M}_2$ obou působících sil $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ stejnou velikost: $M_1 = M_2$ neboli $F_1 \cdot 2r = F_2 r$, z čehož vyplývá $F_2 = 2F_1$.

KLADKOSTROJ je zařízení, které vznikne spojením pevných a volných kladek.

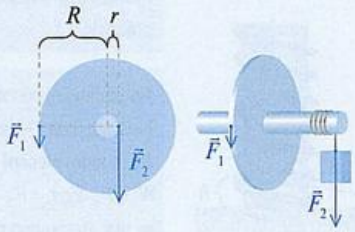


Kladkostroj znásobuje vynaloženou sílu $\vec{F}_1$, tj. $F_2 = 2F_1$, a stejnou měrou prodlužuje její dráhu s_1. Práce obou sil je stejná: $W = F_1 s_1 = F_2 s_2$.

Obecně pro sílu $\vec{F}_2$ platí $F_2 = 2nF_1$, kde n je počet volných kladek kladkostroje.

Kolo na hřídeli

KOLO NA HŘÍDELI pracuje jako dvojzvratná páka, jejíž ramena tvoří poloměr kola R a poloměr hřídele r.



KOLO NA HŘÍDELI je v rovnováze, mají-li momenty $\vec{M}_1, \vec{M}_2$ obou působících sil $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ stejnou velikost: $M_1 = M_2$ neboli $F_1 R = F_2 r$. Pak je síla $\vec{F}_1 = \frac{r}{R}\vec{F}_2$.

Zlaté pravidlo mechaniky

Jednoduché stroje zmenšují sílu nutnou ke konání práce, práci však neušetří. Kolikrát je menší působící síla, tolikrát je delší dráha, po níž síla působí.

Př. 3

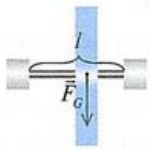
Setrvačník tíhy $F_G = 3$ kN je uložen na hřídeli délky 0,5 m. Hřídel je uložen ve dvou ložiskách. Levé ložisko je od středu setrvačníku vzdáleno 0,2 m. Jak velké tlakové síly působí na ložiska?

$F_G = 3$ kN $= 3\,000$ N; $l = 0{,}5$ m; $d_1 = 0{,}2$ m; $d_2 = 0{,}5$ m $- 0{,}2$ m $= 0{,}3$ m;

$F_1 = ?, F_2 = ?$

$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$ $\quad F_1 + F_2 = F; \frac{F_1}{F_2} = \frac{3}{2}; F_1 + F_2 = 3\,000$ N

$F_1 = 1\,800$ N, $F_2 = 1\,200$ N



Př. 4

Na koncích tenké tyče délky 1 m jsou upevněny kuličky o hmotnostech 0,4 kg a 0,1 kg. Tyč se otáčí úhlovou rychlostí 20 rad · s^{-1} kolem osy kolmé k tyči. Vypočti kinetickou energii soustavy, prochází-li osa otáčení ve vzdálenosti 0,2 m od kuličky s větší hmotností. Hmotnost tyče lze při řešení zanedbat.

$l = 1$ m; $m_1 = 0{,}4$ kg; $m_2 = 0{,}1$ kg; $\omega = 20$ rad · s^{-1}; $E_k = ?$

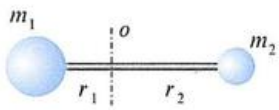
$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2; E_k = \frac{1}{2} J\omega^2 = \frac{1}{2}\omega^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)$

$\{E_k\} = \frac{1}{2} 20^2 \left(0{,}4 \cdot 0{,}2^2 + 0{,}1 \cdot 0{,}8^2\right) = 16$

$E_k = 16$ J

Kinetická energie soustavy je 16 J.

- Vyjdeme ze vztahu pro kinetickou energii otáčejícího se tělesa. Z obrázku vyplývají pro kuličky poloměry otáčení r_1, r_2.



Dynamika tuhého tělesa

Kinetická energie otáčivého pohybu tělesa, moment setrvačnosti

Kinetická energie tělesa je rovna součtu kinetických energií jednotlivých hmotných bodů:

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \ldots + \frac{1}{2} m_n v_n^2 .$$

Protože při otáčivém pohybu tělesa je $v_1 = \omega r_1,\ v_2 = \omega r_2, \ldots, v_n = \omega r_n$, pro kinetickou energii platí:

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 \omega^2 r_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \omega^2 r_2^2 + \ldots + \frac{1}{2} m_n \omega^2 r_n^2 ,$$

odtud $E_k = \frac{1}{2}\omega^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \ldots + m_n r_n^2)$.

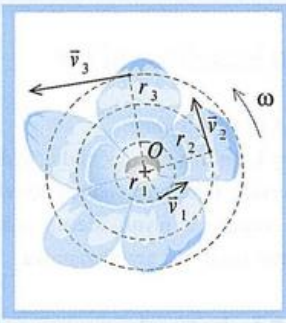
MOMENT SETRVAČNOSTI J TUHÉHO TĚLESA vzhledem k ose otáčení je definován vztahem:

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \ldots + m_n r_n^2 = \sum_{k=1}^{n} m_k r_k^2 .$$

KINETICKÁ ENERGIE při otáčivém pohybu je $E_k = \frac{1}{2} J\omega^2$.

Koná-li těleso současně posuvný i otáčivý pohyb, pak $E_k = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} J\omega^2$, kde v je rychlost posuvného pohybu.

STEINEROVA VĚTA: Pokud osa otáčení o' neprochází těžištěm tělesa, moment setrvačnosti určujeme podle Steinerovy věty: $J = J_0 + md^2$.

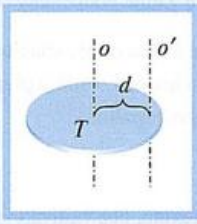


Při **OTÁČIVÉM POHYBU** (neboli rotaci) je úhlová rychlost $\vec{\omega}$ pro všechny body tělesa stejná, velikost rychlosti v jednotlivých bodů se však mění v závislosti na poloměru kružnic r, které body opisují.

MOMENT SETRVAČNOSTI tuhého tělesa je skalární veličina a vyjadřuje rozložení látky tělesa vzhledem k ose otáčení. **JEDNOTKOU MOMENTU SETRVAČNOSTI** je $kg \cdot m^2$.

V definici **MOMENTU SETRVAČNOSTI** jsou $m_1, m_2, \ldots, m_n$ hmotnosti jednotlivých hmotných bodů, z nichž se těleso skládá, $r_1, r_2, \ldots, r_n$ jsou vzdálenosti bodů od osy.

SETRVAČNÍK je tuhé těleso s velkým momentem setrvačnosti (obvykle osově souměrné), které se může setrvačně otáčet, a tak nahromadit kinetickou energii.

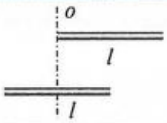
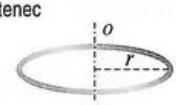


STEINEROVA VĚTA

J_0 – moment setrvačnosti vzhledem k ose o procházející těžištěm a rovnoběžné s osou o';

d – vzdálenost osy otáčení o' od osy o, m – hmotnost tělesa

Momenty setrvačnosti některých těles

TĚLESO	OSA OTÁČENÍ	MOMENT SETRVAČNOSTI
Tenká tyč 	Osa o je kolmá na tyč v koncovém bodě. Osa o je kolmá na tyč v jejím středu.	$J = \frac{1}{3} ml^2$ $J = \frac{1}{12} ml^2$
Rotační válec	Osa o je totožná s osou válce.	$J = \frac{1}{2} mr^2$
Tenký prstenec 	Osa o je kolmá na rovinu ve středu prstence.	$J = mr^2$
Koule	Osa o prochází středem koule.	$J = \frac{2}{5} mr^2$

2.6 Mechanika kapalin a plynů

MECHANIKA KAPALIN A PLYNŮ studuje:

- podmínky rovnováhy kapalin a plynů v klidu (hydro- a aerostatika) včetně rovnováhy těles ponořených do tekutin;
- zákonitosti pohybu kapalin a plynů včetně pohybu těles ponořených do tekutin (hydro- a aerodynamika).

Tekutiny a jejich vlastnosti

Kapaliny a plyny jsou pro svou tekutost označovány společným názvem TEKUTINY.

Společné vlastnosti tekutin

Kapaliny a plyny mají společnou vlastnost TEKUTOST. Proto nemají stálý tvar, ale přizpůsobují se tvarům nádob, v nichž se nacházejí.

Rozdílné vlastnosti kapalin a plynů

Kapalná tělesa mají stálý objem, jsou velmi málo stlačitelná a v klidu vytvářejí v tíhovém poli Země vodorovný povrch.

Plynná tělesa nemají stálý objem a jsou dobře stlačitelná. Tvar i objem je dán tvarem a objemem nádoby, v níž je plyn uzavřen (nevytváří vodorovný povrch jako kapalina).

Ideální kapalina a plyn

IDEÁLNÍ KAPALINA je dokonale tekutá, bez vnitřního tření a naprosto nestlačitelná.

IDEÁLNÍ PLYN je dokonale tekutý, bez vnitřního tření a dokonale stlačitelný.

Tlak v tekutině

TLAK je jedním z parametrů, které charakterizují STAV kapaliny a plynu. Tlak je skalární fyzikální veličina.

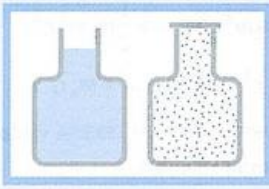
Tlak v tekutině se projevuje jako tlaková síla, kterou:

- kapalina působí na stěny i dno nádoby a na tělesa ponořená do kapaliny,
- plyn působí na stěny nádoby i na stěny těles vznášejících se v plynu,
- vzduch působí na povrch Země i na pozemská tělesa.

Pro TLAK p v tekutině platí $p = \frac{F}{S}$, kde F je velikost TLAKOVÉ SÍLY, která působí kolmo na rovinnou plochu tekutiny, a S je obsah této plochy.

Osnova kapitoly:

- Tekutiny a jejich vlastnosti
- Tlak v tekutině
- Tlak vyvolaný vnější silou, Pascalův zákon
- Tlak vyvolaný tíhovou silou – hydrostatický a atmosférický tlak
- Vztlaková síla, Archimedův zákon
- Proudění kapalin a plynů, rovnice kontinuity
- Bernoulliho rovnice, Torricelliův vzorec
- Obtékání těles, Newtonova a Stokesova síla



TEKUTINY (např. voda, olej, vzduch) se přizpůsobují tvaru nádoby, v níž se nacházejí.

Příčinou tekutosti je snadná vzájemná pohyblivost molekul tekutin, které se vzájemně trvale nevážou přitažlivými silami tak, jak je tomu u pevných těles (str. 77).

KAPALINY jsou téměř nestlačitelné díky malým vzdálenostem a odpudivým silám mezi molekulami kapaliny (str. 77).

PLYNY jsou dobře stlačitelné díky velkým vzdálenostem mezi molekulami plynu a tím i malým vzájemným silám mezi nimi (str. 77).

IDEÁLNÍ KAPALINA je model skutečné kapaliny, stejně jako ideální plyn je model skutečného plynu.

Mluvíme-li o TLAKU charakterizujícím STAV tekutiny v klidu, rozumíme tím tekutinu nacházející se:

- v uzavřené nádobě (úplně nebo částečně),
- v silovém poli (např. v tíhovém poli Země).

Další parametry, které charakterizují STAV tekutiny v klidu, jsou objem a teplota (str. 72).

JEDNOTKOU TLAKU je PASCAL (Pa).

$$1\ \text{Pa} = [p] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}}{\text{m}^2} = \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$$

Jeden PASCAL je tlak rovnoměrně rozložené a kolmo působící síly 1 N na plochu o obsahu 1 m^2.
Dříve se používaly jednotky tlaku bar, milibar (1 bar = 10^5 Pa) a mm Hg (str. 52).

Tlak v plynech vzniká:

- působením vnější síly, např. tlakem pevného tělesa na plyn v uzavřené nádobě (str. 51),
- v tíhovém poli Země působením tíhové síly na vzduch (atmosférický tlak, str. 52),
- díky tepelnému pohybu a srážkám molekul plynu vzájemně i se stěnami nádoby (str. 77, 79).

Tlak v kapalinách vzniká:

- působením vnější síly, např. tlakem pevného tělesa na kapalinu v uzavřené nádobě,
- působením tíhové síly na kapalinu v nádobě (hydrostatický tlak, str. 52).

Protože v tekutině je tlak, musí uvnitř ní působit síly. Tyto síly se projeví, umístíme-li do tekutiny malinkou plošku S, na kterou pak působí tlaková síla $\vec{F}$. Je-li tekutina v klidu, tlaková síla je na tuto plošku vždy kolmá, přičemž velikost tlakové síly nezávisí na natočení plošky S. Z toho plyne důležitá vlastnost tekutiny: velikost tlakové síly působící na jednotku plochy je ve všech směrech stejná neboli

TLAK V TEKUTINĚ PŮSOBÍ VE VŠECH SMĚRECH STEJNĚ.

Tlak vyvolaný vnější silou, Pascalův zákon

PASCALŮV ZÁKON: Tlak v kapalině vyvolaný vnější silou, která působí na kapalné těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.

Pascalův zákon platí také pro plyny.

Důsledků Pascalova zákona se v praxi využívá u hydraulických a pneumatických zařízení.

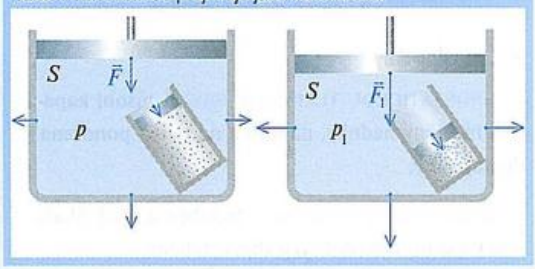
HYDRAULICKÉ ZAŘÍZENÍ se skládá ze dvou nádob nestejného průřezu spojených trubicí. Obě nádoby i trubice jsou naplněny kapalinou, která je uzavřena pohyblivými písty. Působíme-li na užší píst silou $\vec{F}_1$, vyvolá tato síla v kapalině tlak p, který je podle Pascalova zákona ve všech místech kapaliny, tedy i v širší nádobě, stejný. Z definičního vztahu pro tlak vyplývá: $p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$,

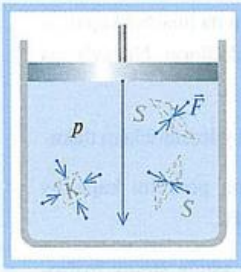
tedy na širší píst působí kapalina tlakovou silou $\vec{F}_2$, která je tolikrát větší, kolikrát větší je obsah průřezu širšího pístu.

Na stejném principu pracují PNEUMATICKÁ ZAŘÍZENÍ, v nichž se ovšem tlak přenáší místo kapaliny stlačeným vzduchem.

TLAK V TEKUTINĚ je číselně roven velikosti tlakové síly působící na jednotku plochy, podobně jako intenzita gravitačního pole je číselně rovna gravitační síle na jednotku hmotnosti.

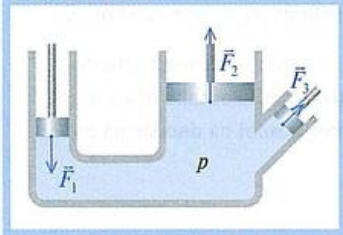
TLAK V TEKUTINĚ se projevuje jako tlaková síla.





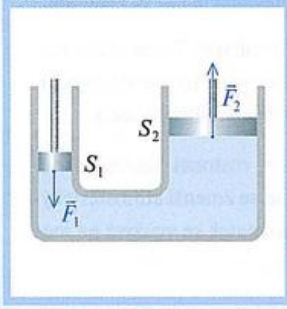
Tekutina je v klidu a je v ní tlak p. Kdyby na malou plošku S působila šikmá síla, docházelo by k pohybu tekutiny podél plošky. Kdyby velikost tlakové síly nebyla stejná pro všechny směry, malá krychlička K by se pohybovala.

PASCALŮV ZÁKON



Protože tlak je v celém objemu kapaliny stejný a působí ve všech směrech stejně, tlaková síla $\vec{F}$ se přenáší do všech směrů, působí vždy kolmo na plochu a její velikost závisí na velikosti plochy.

HYDRAULICKÉ ZAŘÍZENÍ



$\vec{F}_1$ – vnější tlaková síla působící na užší píst o ploše S_1, $\vec{F}_2$ – tlaková síla kapaliny působící na širší píst o ploše S_2.

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

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

HYDRAULICKÁ ZAŘÍZENÍ jsou brzdy automobilů, hydraulické lisy, hydraulické zvedáky.

PNEUMATICKÁ ZAŘÍZENÍ jsou brzdy u vlaků, pneumatická kladiva, vrtačky.

Tlak vyvolaný tíhovou silou

Na všechny částice tekutiny v tíhovém poli Země působí tíhová síla. Výsledkem tohoto působení je:

- HYDROSTATICKÝ TLAK p_h v kapalinách,
- ATMOSFÉRICKÝ TLAK p_a ve vzduchu.

Kapaliny

HYDROSTATICKOU TLAKOVOU SILOU působí kapalina na stěny nádoby, na dno a na tělesa ponořená do kapaliny.

HYDROSTATICKÝ TLAK p_h v hloubce h pod hladinou kapaliny o hustotě ρ je dán vztahem: $p_h = h\rho g$.

Hydrostatický tlak závisí jenom na hustotě kapaliny a hloubce místa pod volnou hladinou. Nezávisí na tvaru nádoby.

HLADINY jsou místa o stejném hydrostatickém tlaku.

VOLNÁ HLADINA je hladina na povrchu kapaliny o nulovém hydrostatickém tlaku.

U dna SPOJENÝCH NÁDOB je všude stejný hydrostatický tlak, proto je hladina ve všech ramenech ve stejné výšce bez ohledu na jejich tvar nebo objem.

HYDROSTATICKÝ PARADOX: V různých nádobách se stejnou kapalinou o stejném obsahu dna a stejné výšce vodního sloupce působí na dno stejná hydrostatická síla.

Plyny

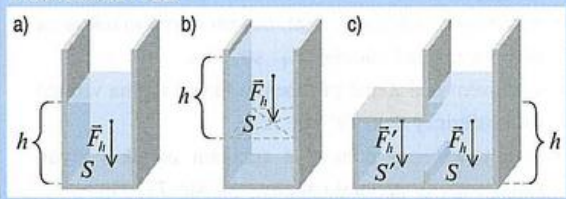
ATMOSFÉRICKOU TLAKOVOU SILOU působí vzdušný obal Země – ATMOSFÉRA na všechna tělesa na povrchu Země i na tělesa nacházející se ve vzduchu.

ATMOSFÉRICKÝ TLAK lze prokázat Torricelliho pokusem. Atmosférický tlak se rovná hydrostatickému tlaku rtuťového sloupce v Torricelliho trubici.

Atmosférický tlak klesá s rostoucí nadmořskou výškou. Při výstupu o 100 m se zmenší atmosférický tlak asi o 13 hPa. Tento poznatek se využívá na měření nadmořské výšky.

Atmosférický tlak se mění i v závislosti na počasí a pohybuje se v rozmezí asi 980 hPa (tlaková níže) až 1 030 hPa (tlaková výše, str. 209). Tlak vzduchu měříme barometry.

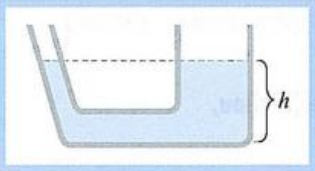
HYDROSTATICKÝ TLAK



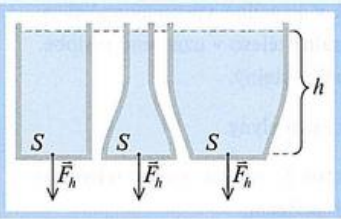
a) Velikost hydrostatické tlakové síly F_h, kterou působí sloupec kapaliny o výšce h na dno nádoby o obsahu S, je dána tíhou G kapaliny v nádobě, tedy $F_h = G$. $G = mg = V\rho g = Sh\rho g$, kde $V = Sh$ je objem kapaliny v nádobě, ρ je hustota kapaliny. Platí tedy $F_h = Sh\rho g$, z toho plyne $\frac{F_h}{S} = h\rho g$. Protože $p_h = \frac{F_h}{S}$, platí pro hydrostatický tlak u dna $p_h = h\rho g$.

b) Stejně tak působí sloupec kapaliny o výšce h hydrostatickou tlakovou silou $\vec{F}_h$ na kapalinu pod ním. Velikost této síly je $F_h = Sh\rho g$, tedy hydrostatický tlak v hloubce h je $p_h = h\rho g$.

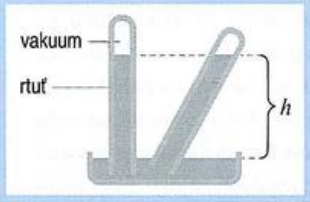
c) Protože tlak v kapalině působí ve všech směrech stejně, stejný hydrostatický tlak $p_h = h\rho g$ je také u dna S' a na dno o obsahu S' působí hydrostatická tlaková síla o velikosti $F_h' = S'h\rho g$.



SPOJENÉ NÁDOBY
Kdyby v jedné části byl u dna jiný tlak než ve druhé, kapalina by se pohybovala, dokud by se tlaky nevyrovnaly.



HYDROSTATICKÝ PARADOX
Zdánlivě protismyslný jev byl zjištěn experimentálně a vysvětluje ho skutečnost, že hydrostatický tlak závisí pouze na hloubce.



TORRICELLIHO POKUS
Atmosférická tlaková síla udržuje sloupec rtuti ve výšce cca 760 mm, sloupec vody ve výšce přibližně 10 m.

Víte, že jednotka mmHg, která se ještě používá v medicíně, byla definována jako hydrostatický tlak rtuťového sloupce o výšce 1 mm; 1 mmHg = 133,322 Pa? Další starší jednotka, fyzikální atmosféra (atm), odpovídá tlaku zemské atmosféry, 1 atm = 101 325 Pa.

Pro meteorologické účely byl stanoven NORMÁLNÍ ATMOSFÉRICKÝ TLAK na hodnotu p_0 = 101 325 Pa.

Př. 1

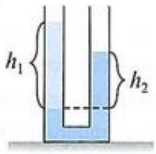
Do spojených nádob nalijeme olej a vodu. Výška sloupce vody, měřená od společného rozhraní, je 18 cm, výška sloupce oleje je 20 cm. Vypočti hustotu oleje, je-li hustota vody 1 000 kg · m^{-3}.

$h_1 = 20$ cm $= 0{,}2$ m; $h_2 = 18$ cm $= 0{,}18$ m; $\rho_2 = 1000$ kg · m^{-3}; $\rho_1 = ?$

$$p_1 = p_2 \Rightarrow h_1\rho_1 g = h_2\rho_2 g \Rightarrow \rho_1 = \frac{h_2\rho_2}{h_1}$$

$$\{\rho_1\} = \frac{0{,}18 \cdot 1000}{0{,}2} = 900;\ \rho_1 = 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Hustota oleje je 900 kg · m^{-3}.



- Hydrostatický tlak $p = h\rho g$ způsobovaný oběma sloupci tekutin musí být na rozhraní stejný. Z rovnosti těchto dvou tlaků vyjdeme při řešení úlohy.

Vztlaková síla, Archimedův zákon

VZTLAKOVÁ SÍLA $\vec{F}_{vz}$ je síla, která nadlehčuje každé těleso ponořené do kapaliny (nebo do plynu). Vztlaková síla má směr svislý vzhůru a je důsledkem působení hydrostatických tlakových sil na povrch tělesa.

ARCHIMEDŮV ZÁKON

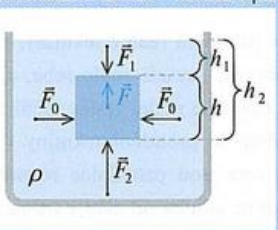
Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou $\vec{F}_{vz}$, jejíž velikost se rovná tíze kapaliny o stejném objemu, jako je objem ponořené části tělesa:

$F_{vz} = V\rho g = G$,

kde V je objem tělesa, ρ hustota kapaliny, g je tíhové zrychlení.

Archimedův zákon a jeho důsledky platí i pro nadlehčování těles v plynu.

ARCHIMEDŮV ZÁKON – odvození pro krychli, jejíž podstava je ve vodorovné poloze:



Účinky hydrostatických sil působících na boční stěny se vzájemně ruší. Velikost **VZTLAKOVÉ SÍLY** je určena rozdílem velikostí hydrostatických sil působících na dolní a horní podstavu tělesa o ploše S:

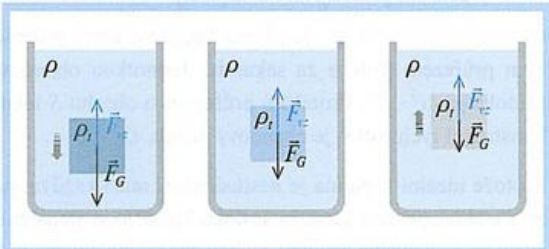
$F_{vz} = F_2 - F_1 = Sh_2\rho g - Sh_1\rho g = S\rho g(h_2 - h_1) =$
$= Sh\rho g = V\rho g = mg = G$, kde $V = S \cdot h$ je objem tělesa.

Ve vztahu pro vztlakovou sílu představuje součin $V\rho$ hmotnost m kapaliny o stejném objemu, jako je ponořená část tělesa; součin $V\rho g$ pak představuje tíhu $G = mg$ kapaliny o tomto objemu.

Chování těles v kapalinách

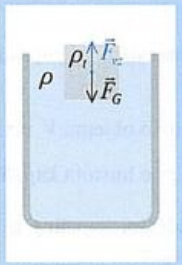
Důsledkem Archimedova zákona je různé chování těles v kapalině. Na těleso v kapalině působí kromě tíhové síly $\vec{F}_G$ ještě i vztlaková síla $\vec{F}_{vz}$. Podle toho, jakou mají síly velikost, dochází k různému chování těles ponořených v kapalinách:

- jestliže $F_G > F_{vz}$, TĚLESO KLESÁ KE DNU,
- jestliže $F_G = F_{vz}$, TĚLESO SE VOLNĚ VZNÁŠÍ,
- jestliže $F_G < F_{vz}$, TĚLESO STOUPÁ K HLADINĚ.



$\rho_t > \rho$	$\rho_t = \rho$	$\rho_t < \rho$
Těleso v kapalině klesá ke dnu.	Těleso v kapalině se volně vznáší.	Těleso v kapalině stoupá k hladině.
$F_G > F_{vz}$	$F_G = F_{vz}$	$F_G < F_{vz}$

Pokud je vztlaková síla působící na těleso ponořené do kapaliny větší než tíhová síla, pak těleso stoupá, až dosáhne volné hladiny kapaliny, částečně se vynoří a ustálí se v takové poloze, kdy vztlaková síla F'_{vz} je v rovnováze s tíhovou silou F_G. V tomto případě říkáme, že TĚLESO PLOVE. Velikost vztlakové síly plovajícího tělesa je $F'_{vz} = V'\rho g$, kde V' je objem ponořené části tělesa, ρ je hustota kapaliny.



TĚLESO PLOVE, jestliže vztlaková a tíhová síla jsou v rovnováze: $F'_{vz} = F_G$. Protože platí $F'_{vz} = V'\rho g$ a $F_G = V\rho_t g$, tedy

$$V'\rho g = V\rho_t g \Rightarrow \frac{\rho_t}{\rho} = \frac{V'}{V},$$

kde ρ_t je hustota tělesa, ρ je hustota kapaliny, V je objem tělesa a V' je objem ponořené části tělesa.

HUSTOMĚRY se používají k měření hustoty kapalin a jsou založeny na různém ponoru těles v závislosti na hustotě kapaliny.

Proudění kapalin a plynů, rovnice kontinuity

Převažuje-li pohyb tekutiny v jednom směru, nazýváme tento pohyb PROUDĚNÍM.

- STACIONÁRNÍ (USTÁLENÉ) PROUDĚNÍ je proudění, při kterém je rychlost $\vec{v}$ částic proudící tekutiny procházejících libovolným daným místem stálá, tzn. nemění se s časem.
- NESTACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ je proudění, při kterém rychlost $\vec{v}$ částic proudící tekutiny procházejících libovolným daným místem není stálá, tzn. mění se s časem.

PROUDNICE je myšlená čára, jejíž tečna v libovolném bodě má směr rychlosti $\vec{v}$ pohybující se částice.

- LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ je proudění reálné tekutiny, při kterém jednotlivé vrstvy tekutiny proudí vedle sebe, aniž se promíchávají, a rychlost částic se podél vrstev mění jen pozvolna. Laminární proudění je proudění tekutiny o malé rychlosti v trubici, při němž jsou proudnice rovnoběžné a rychlost proudění pozvolna stoupá od okraje trubice, kde je nejmenší, ke středu trubice, kde je největší.
- TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ je proudění reálné tekutiny o větších rychlostech, při kterém dochází k turbulencím, tj. chaotickým změnám rychlosti proudění, hustoty a tlaku tekutiny. Při turbulentním proudění se proudnice chaoticky mění, zakřivují a spirálovitě zatáčejí – dochází ke tvoření virů.

Ustálené proudění ideální kapaliny

OBJEMOVÝ PRŮTOK Q_v je objem kapaliny, která proteče daným průřezem trubice za sekundu. Jednotkou objemového průtoku je $m^3 \cdot s^{-1}$. Protéká-li průřezem o obsahu S tekutina konstantní rychlostí $\vec{v}$, je objemový průtok $Q_v = S \cdot v$.

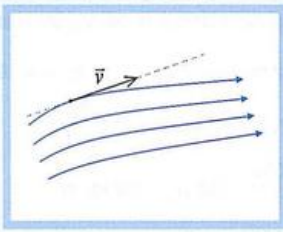
Protože ideální kapalina je nestlačitelná, musí každým průřezem trubice protéct za stejnou dobu kapalina o stejném objemu, tzn. v každém průřezu je konstantní objemový průtok. Z toho plyne ROVNICE KONTINUITY:
Při ustáleném proudění ideální kapaliny je součin obsahu průřezu S a konstantní velikosti rychlosti proudu v v každém místě trubice stejný: $S \cdot v = \text{konst.}$ neboli $Q_v = \text{konst.}$

Bernoulliho rovnice

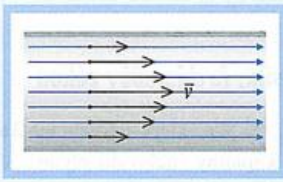
Stav ideální kapaliny při ustáleném proudění je popsán její rychlostí $\vec{v}$ a tlakem p.

KINETICKÁ ENERGIE E_k ideální kapaliny o objemu V při ustáleném proudění je $E_k = \frac{1}{2}\rho V \cdot v^2$, kde ρ je hustota kapaliny.

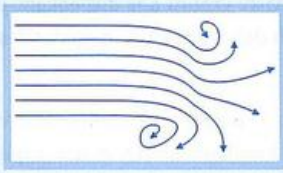
TLAKOVÁ POTENCIÁLNÍ ENERGIE E_p ideální kapaliny o objemu V při ustáleném proudění je $E_p = p \cdot V$.



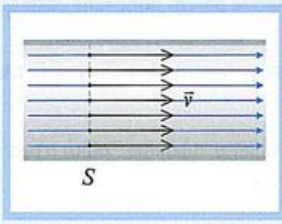
PROUDNICE znázorňují trajektorie částic proudící tekutiny. Při ustáleném proudění se proudnice nemění s časem.



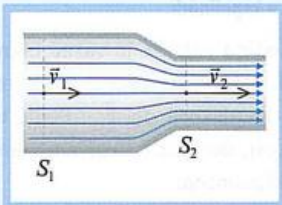
LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ reálné tekutiny v trubici.



TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ, turbulence a víry.

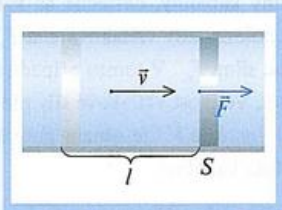


OBJEMOVÝ PRŮTOK Q_v ideální kapaliny, kde se všechny částice pohybují stejnou rychlostí $\vec{v}$: $Q_v = S \cdot v$.



Důsledkem ROVNICE KONTINUITY je, že rychlosti proudící kapaliny v trubici nestejného průřezu jsou v opačném poměru než obsahy průřezů, tzn. čím menší průřez trubice, tím je v něm vyšší rychlost proudící kapaliny. Plyne to z následující rovnosti:

$$Q_{v1} = Q_{v2} \Rightarrow S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$



TLAKOVÁ POTENCIÁLNÍ ENERGIE je rovna mechanické práci, kterou vykoná tlaková síla $\vec{F}$ kapaliny vlevo od pístu, jestliže posune ve vodorovném potrubí píst o obsahu S o délku l: $W = F \cdot l = pSl = pV$, odtud $E_p = pV$.

Celková energie E ideální kapaliny o objemu V při ustáleném proudění je $E = E_k + E_p = \frac{1}{2}\rho V v^2 + pV$.

Podle zákona zachování energie se celková energie ideální kapaliny při ustáleném proudění ve vodorovném potrubí zachovává, tedy $E = E_k + E_p = \frac{1}{2}\rho V v^2 + pV = \text{konst.}$

BERNOULLIHO ROVNICE

Součet kinetické a tlakové potenciální energie kapaliny o jednotkovém objemu je ve všech místech vodorovné trubice stejný: $\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{konst.}$

Ve vodorovné trubici s nestejnými průřezy má Bernoulliho rovnice tvar: $\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2$,

kde v_1, p_1 jsou rychlost a tlak ve větším průřezu, v_2, p_2 jsou rychlost a tlak v menším průřezu trubice.

Výraz $\frac{1}{2}\rho v^2$ se nazývá též **DYNAMICKÝ TLAK** a lze jej měřit tzv. **Pitotovou trubicí**, jejíž otvor je natočen proti směru proudění. Platí $\frac{1}{2}\rho v^2 + p = h_P \rho g$, kde z výšky h_P a určením tlaku $p = h\rho g$ pomocí výšky h zjistíme dynamický tlak i rychlost proudění kapaliny $v = \sqrt{2g(h_P - h)}$. Upravenou Pitotovou trubicí (Prandlovou dýzou) lze měřit rychlost proudícího plynu, což umožňuje měřit rychlost letadel.

Torricelliho vzorec pro výtokovou rychlost

Zákon zachování energie platí i pro proud kapaliny vytékající otvorem v nádobě. V hloubce h se tlaková potenciální energie o jednotkovém objemu $\frac{E_p}{V} = p = h\rho g$ mění v blízkosti otvoru na kinetickou energii $\frac{E_k}{V} = \frac{1}{2}\rho v^2$ o jednotkovém objemu.

Z toho plyne $h\rho g = \frac{1}{2}\rho v^2$ a odtud velikost

VÝTOKOVÉ RYCHLOSTI $v = \sqrt{2hg}$.

Proudění plynů

Zákon zachování energie, vyjádřen Bernoulliho rovnicí, platí i pro plyny. Rovnice je však složitější, protože změnou tlaku se mění i hustota plynu.

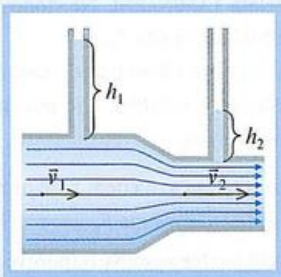
PODTLAK v místech zúžení vzniká také v případě proudícího plynu (princip rozprašovače, předjíždění).

BERNOULLIHO ROVNICE vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro proudění ideální kapaliny o jednotkovém objemu ve vodorovném potrubí. Odvodíme ji ze zákona zachování energie vydělením objemem V:

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

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

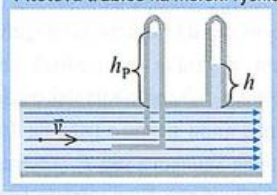
Veličina $\frac{1}{2}\rho v^2$ vyjadřuje kinetickou energii a tlak p potenciální energii jednotkového objemu kapaliny.



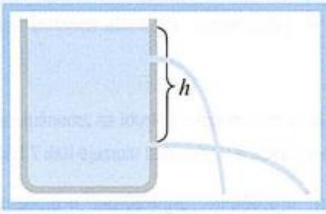
HYDRODYNAMICKÝ PARADOX pro vodorovnou trubici s nestejnými průřezy – zdánlivě překvapující jev, spočívající v poklesu tlaku v zúžené části trubice.

Platí $v_1 < v_2$, proto z **BERNOULLIHO ROVNICE** plyne: $p_2 < p_1$, $p_1 = h_1\rho g$, $p_2 = h_2\rho g$, tedy platí: $h_2 < h_1$. Při značném zúžení trubice je rychlost kapaliny tak velká, že tlak p_2 je menší než atmosférický. Na zúženém místě vzniká **PODTLAK** a do trubice se nasává vzduch. Na tomto jevu je založena vodní vývěva.

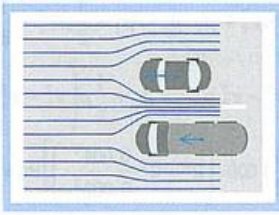
Pitotova trubice na měření rychlosti proudící kapaliny



Uzavřené manometry ukazují dynamický tlak $\frac{1}{2}\rho v^2$ a tlak p.



VÝTOKOVÁ RYCHLOST roste s hloubkou otvoru.



Nebezpečný **PODTLAK** vzniká při příliš blízkém předjíždění automobilů.

Obtékání těles

U reálných kapalin a plynů vznikají v důsledku vnitřního tření a turbulencí **ODPOROVÉ SÍLY** působící proti směru relativního pohybu tělesa v tekutině.

Na pohybující se těleso působí dvě odporové síly:

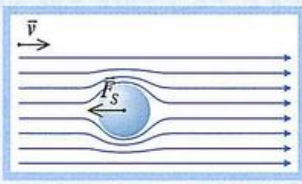
- **STOKESOVA SÍLA** způsobená vnitřním třením,
- **NEWTONOVA SÍLA** způsobená odporem při odstraňování kapaliny před tělesem a vytvářením vírů za tělesem.

Při menších rychlostech tělesa vzhledem k tekutině je proudění kolem obtékaného tělesa **LAMINÁRNÍ**, Newtonova síla nevzniká a projevuje se pouze Stokesova síla $\vec{F}_S$.

Velikost **STOKESOVY SÍLY** pro těleso tvaru koule: $F_S = 6\pi\eta r v$, kde η je **DYNAMICKÁ VISKOZITA** tekutiny, r je poloměr kulového tělesa, v je rychlost jeho pohybu.

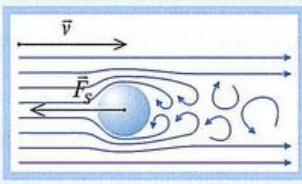
Při velkých rychlostech tělesa vzhledem k tekutině vzniká **PROUDĚNÍ TURBULENTNÍ** a Newtonova síla $\vec{F}_N$ je zpravidla daleko větší než Stokesova. Pro velikost Newtonovy odporové síly působící na těleso při turbulentním proudění platí vztah $F_N = \frac{1}{2}C\rho S v^2$, kde C je **SOUČINITEL ODPORU** (závisí na tvaru tělesa), ρ je hustota vzduchu, S je obsah průřezu tělesa kolmo ke směru pohybu a v je velikost relativní rychlosti. Vztah platí pouze pro rychlosti $v < c$, kde c je rychlost šíření zvuku v daném prostředí.

HYDRODYNAMICKÉ ODPOROVÉ SÍLY působí proti směru pohybu tělesa v kapalinách.
AERODYNAMICKÉ ODPOROVÉ SÍLY působí proti směru pohybu tělesa v plynech.

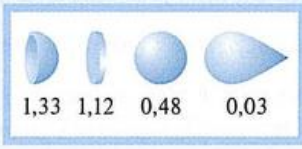


LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ při malých rychlostech

DYNAMICKÁ VISKOZITA charakterizuje velikost vnitřního tření. Její **JEDNOTKOU** je $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.



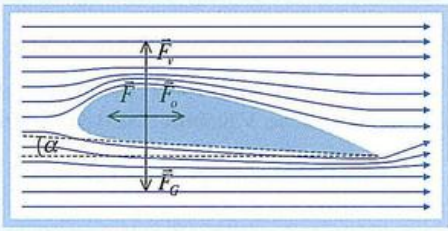
TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ při velkých rychlostech



SOUČINITEL ODPORU pro různé tvary těles.

Křídlo obtékané vzduchem

Vzduch obtékající horní stěnu křídla má větší rychlost než vzduch obtékající dolní stěnu, a vzniká tak podtlak nad horní stěnou. Kromě toho úhel náběhu $\alpha > 0$ způsobuje tlak na dolní stěnu křídla. V důsledku podtlaku nad horní stěnou a tlaku na dolní stěnu působí na nosnou plochu letadla vztlaková síla $\vec{F}_v$ směrem vzhůru, která působí současně proti tíhové síle $\vec{F}_G$ a udržuje letadlo ve vzduchu. Odporovou sílu $\vec{F}_o$ překonává tažná síla motorů letadla $\vec{F}$.



Př. 3

Obsah průřezu vodorovného potrubí se zmenšuje ze 40 cm^2 na 20 cm^2. Rychlost vody v širší části je 2 $m \cdot s^{-1}$, manometrická trubice v této části ukazuje tlak 7,5 kPa. Urči, jaký tlak je v zúžené části potrubí.

$S_1 = 40\ cm^2 = 0{,}004\ m^2$; $S_2 = 20\ cm^2 = 0{,}002\ m^2$; $v_1 = 2\ m \cdot s^{-1}$; $p_1 = 7{,}5\ kPa = 7\,500\ Pa$; $\rho = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$; $p_2 = ?$

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

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2);\ p_2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho\left(v_1^2 - v_1^2\frac{S_1^2}{S_2^2}\right)$$

$$p_2 = \left[7\,500 + \frac{1}{2}1\,000 \cdot \left(2^2 - 2^2\frac{0{,}004^2}{0{,}002^2}\right)\right] Pa = 1\,500\ Pa = 1{,}5\ kPa$$

V zúžené části potrubí je tlak 1 500 Pa.

- Zapíšeme Bernoulliho rovnici pro dvě místa potrubí a vyjádříme z ní tlak p_2.
- Z rovnice kontinuity $S_1 v_1 = S_2 v_2$ vyplývá pro rychlost $v_2 = v_1\frac{S_1}{S_2}$. Tento výraz dosadíme do Bernoulliho rovnice za v_2.

2.7 Mechanika pružných těles

Mechanika pružných těles je spolu s mechanikou tekutin součástí MECHANIKY KONTINUA.

KONTINUUM (spojité prostředí) je myšlenkový model reálného pevného tělesa nebo tekutiny, jehož parametry a jim odpovídající fyzikální veličiny (hustota, tlak, napětí atd.) se mění jen pozvolna. Fyzikální zákonitosti jsou v mechanice kontinua odvozovány pomocí matematického aparátu na základě představ o spojitosti prostředí (str. 56), nebo empiricky na základě naměřených údajů (Hookův zákon).

Deformace pevného tělesa

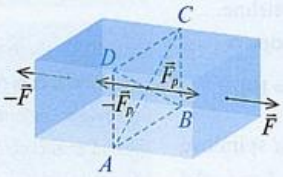
DEFORMACE pevného tělesa je změna jeho rozměrů, objemu a zpravidla také tvaru. Nastává účinkem vnějších sil.

Deformace může být:

- PRUŽNÁ (elastická), jestliže se těleso vrátí k původnímu tvaru, jakmile přestanou působit vnější deformační síly,
- TRVALÁ (plastická), která trvá i po odstranění vnějších sil.

SÍLY PRUŽNOSTI F_p vznikají v pevném tělese deformovaném vnějšími silami. Je-li těleso deformováno tlakem nebo tahem, je velikost síly pružnosti F_p rovna velikosti deformující síly F.

NAPĚTÍ σ je definováno vztahem $\sigma = \frac{F_p}{S}$, kde F_p je velikost síly pružnosti působící kolmo na plochu příčného řezu o obsahu S. Napětí σ při deformaci tahem je způsobené vnější silou $\vec{F}$, která je kolmá na průřez $ABCD$ hranolu. Hovoříme o NAPĚTÍ V TAHU nebo o NORMÁLOVÉM NAPĚTÍ σ_n.



MEZ PRUŽNOSTI σ_E je největší hodnota normálového napětí, při kterém je deformace ještě pružná.

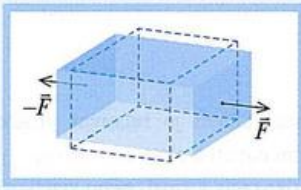
MEZ PEVNOSTI σ_P je největší hodnota normálového napětí, při kterém se neporuší soudržnost materiálu.

Materiály z hlediska pružnosti můžeme dělit na:

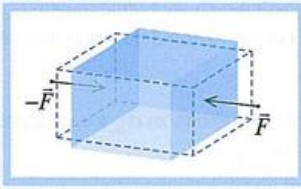
- PRUŽNÉ (ELASTICKÉ) MATERIÁLY, u nichž ani poměrně vysoké napětí nevyvolá trvalou deformaci (ocel);
- PLASTICKÉ MATERIÁLY se účinkem vnější síly deformují a podrží si deformovaný tvar (plastická hlína);
- KŘEHKÉ MATERIÁLY, u nichž je mez pevnosti nižší než mez pružnosti a nemůže vzniknout trvalá deformace (sklo).

Osnova kapitoly:

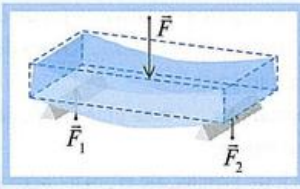
- Kontinuum, mechanika kontinua
- Deformace pevného tělesa
- Hookův zákon
- Objemová deformace



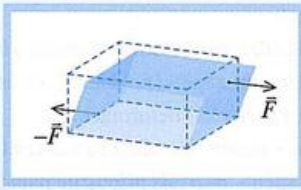
DEFORMACE TAHEM
Na těleso působí dvě stejně velké síly se směry ven z tělesa.



DEFORMACE TLAKEM
Dvě stejně velké síly působí dovnitř tělesa.

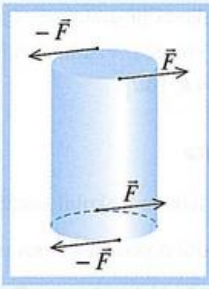


DEFORMACE OHYBEM
Nosník podepřený na obou koncích.



DEFORMACE SMYKEM
Deformující síly působí na jeho dolní a horní podstavu.

NAPĚTÍ σ je síla pružnosti F_p přepočtená na jednotkovou plochu. Jednotkou napětí je pascal (Pa).



TORZNÍ DEFORMACE (DEFORMACE KROUCENÍM)
Vzniká například, působí-li na koncích tyče dvě dvojice sil. Torzní deformace nastává u spirálových pružin.

Trvalá deformace pružných materiálů nastává až za mezí pružnosti σ_E (str. 58).

U plastických materiálů leží mez pružnosti σ_E na počátku křivky deformace (str. 58).

Hookův zákon

Při deformaci tahem vnější síly způsobí, že tyč zvětší svou délku z původní hodnoty d na hodnotu $d + \Delta d$, kde Δd je prodloužení tyče.

RELATIVNÍ PRODLOUŽENÍ nebo **DEFORMACE** ε jsou definovány: $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d}$.

HOOKŮV ZÁKON

Při pružné deformaci tahem je relativní prodloužení přímo úměrné normálovému napětí a platí: $\sigma_n = E \cdot \varepsilon$, kde E je **MODUL PRUŽNOSTI V TAHU** nebo **YOUNGŮV MODUL**.

Hookův zákon platí i pro pružnou deformaci tlakem, kde $\varepsilon = \frac{|\Delta d|}{d}$ je relativní zkrácení.

Dosadíme-li do Hookova zákona za σ_n a ε, získáme vztah pro prodloužení: $\Delta d = \frac{d}{E \cdot S} F_p$.

Závislost normálového napětí na relativním prodloužení (získaná měřením) se nazývá **KŘIVKA DEFORMACE**. Křivka deformace pro pružné materiály má tyto části:

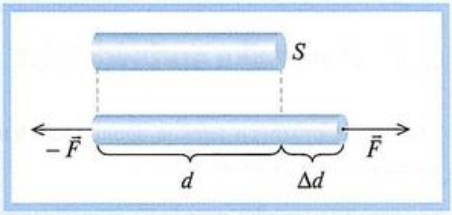
- $0A$ – pružná deformace; σ_u – mez úměrnosti, po tuto mez je deformace úměrná napětí;
- AB – deformace je ještě pružná, ale Hookův zákon již neplatí;
- σ_E – mez pružnosti;
- σ_k – mez kluzu; jestliže napětí dosáhne meze kluzu, prodloužení roste bez zvyšování napětí (po jistou hodnotu);
- BC – oblast trvalé (plastické) deformace;
- σ_p – mez pevnosti – napětí, při němž se materiál přetrhne.
- σ_{dov} – dovolené napětí – nejvyšší přípustné napětí odpovídající míře bezpečnosti $k = \frac{\sigma_p}{\sigma_{dov}}$ (u lan výtahů je $k = 10$).

Z Hookova zákona plyne, že elastické prodloužení Δd spirálové pružiny je přímo úměrné velikosti působící síly F, tj. $F = k \cdot \Delta d$, kde k je tuhost pružiny (str. 35). Vztah platí i pro elastické stlačení pružiny v podobě $F = k \cdot |\Delta d|$.

Objemová deformace

Deformace tělesa způsobená tlakem p okolní kapaliny je dána poměrem $\frac{\Delta V}{V}$, kde V je původní objem deformovaného tělesa a ΔV je absolutní hodnota změny jeho objemu. Pro objemovou deformaci pak platí $p = K \frac{\Delta V}{V}$,

kde K je **MODUL OBJEMOVÉ PRUŽNOSTI**. Pevné látky jsou obecně mnohem méně stlačitelné než kapaliny. Např. modul objemové pružnosti vody je $2{,}2 \cdot 10^9$ Pa a oceli $160 \cdot 10^9$ Pa.

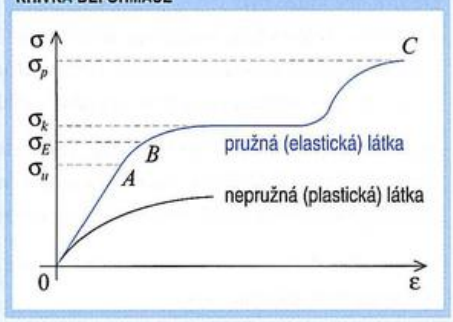


HOOKŮV ZÁKON platí i pro pružnou deformaci tlakem. Modul pružnosti pro tah a tlak má stejnou hodnotu u většiny materiálů. Hookův zákon platí i pro pružnou deformaci smykem a torzní deformaci. Konstantou úměrnosti je modul pružnosti ve smyku G.

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon \Rightarrow \frac{F_p}{S} = E \frac{\Delta d}{d} \Rightarrow \Delta d = \frac{F_p \cdot d}{E \cdot S}$$

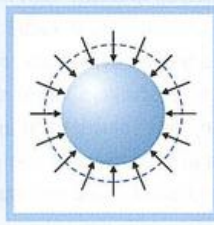
JEDNOTKOU MODULU PRUŽNOSTI je Pa.

KŘIVKA DEFORMACE



DOPRUŽOVÁNÍ (elastická hystereze): Pružná deformace po odlehčení nezmizí ihned, nýbrž zmizí jen část a zbývající deformace se pozvolna zmenšuje, až se těleso za určitou dobu vrátí do původního tvaru (pryž).

I když modul pružnosti pro tah a tlak bývá téměř stejný, mez pevnosti se u namáhání tlakem často liší od meze pevnosti pro namáhání tahem. Např. beton vykazuje velkou pevnost v tlaku, avšak malou pevnost v tahu.



Relativní smrštění objemu vody v hloubce 4 000 m pod hladinou oceánu (tlak 40 MPa) je 1,8 %. Ocel se pod stejným tlakem smrští jen o 0,025 %.

3.0 Termika, termodynamika, molekulová fyzika

Termika, termodynamika, molekulová fyzika, kinetická teorie plynů, kinetická teorie látek a statistická fyzika jsou názvy fyzikálních oborů, které spojuje metoda založená na zkoumání stavů fyzikálních objektů a dějů souvisejících se změnami stavů, především dějů spojených s výměnou vnitřní energie. V tom se tyto obory liší od mechaniky, která se zabývá především mechanickým pohybem fyzikálních objektů a přeměnami „vnější" mechanické energie.

TERMIKA zkoumá tepelné vlastnosti látek, zejména jejich teplotní roztažnost, tepelnou kapacitu, teploty fázových přechodů (tání, tuhnutí, varu) a skupenská tepla látek. Termika dále zkoumá děje a procesy spojené s přenosem tepla a tepelnou výměnou. Termika je empirická vědní disciplína, která své zákony odvozuje na základě zevšeobecnění experimentálně získaných faktů.

TERMODYNAMIKA se zabývá studiem obecných vlastností termodynamických makroskopických soustav a obecných zákonitostí makroskopických procesů. Termodynamika zkoumá především děje, které souvisejí se změnami vnitřní energie termodynamických soustav při tepelné výměně a konání práce (první zákon termodynamiky), dále vratné a nevratné děje v souvislosti s entropií termodynamických soustav (druhý zákon termodynamiky) a přenosem tepelné energie. Fenomenologická* termodynamika je teorie založená na axiomatických zákonech termodynamiky, z nichž tři základní vyplynuly z empirických poznatků.
(* fenomén, z řečtiny, znamená jev)

MOLEKULOVÁ FYZIKA vyšetřuje makroskopické vlastnosti a chování látek na základě jejich mikroskopické molekulární nebo atomové struktury. Při popisu chování soustav skládajících se z velkého počtu částic, tzv. MAKROSYSTÉMŮ, používá statistické metody.

KINETICKÁ TEORIE PLYNŮ vysvětluje pozorovatelné makroskopické jevy u plynů (tlak, teplotu...) na základě modelu ideálního plynu, ve kterém je plyn složen z velkého počtu molekul (str. 79).

KINETICKÁ TEORIE LÁTEK vysvětluje makroskopické vlastnosti látek na základě představ, že látky jsou složeny z částic (atomů, molekul nebo iontů), které vykonávají tepelný pohyb (str. 76).

STATISTICKÁ FYZIKA je fyzikální teorie zabývající se obecně zkoumáním stavů makrosystémů a procesů, které v nich probíhají. Vychází z poznatků o částicové struktuře makrosystémů a makroskopické vlastnosti fyzikálních objektů vysvětluje z mikroskopického hlediska.

Osnova kapitoly:

- Termika
- Termodynamika
- Molekulová fyzika
- Kinetická teorie plynů a látek
- Statistická fyzika

Metoda založená na zkoumání stavů makroskopických fyzikálních objektů a dějů souvisejících se změnami jejich stavů se někdy nazývá i TERMODYNAMICKÁ METODA.

TERMIKA (nauka o tepelných jevech) se začala rozvíjet v 17. století, kdy se badatelé naučili spolehlivě měřit teplotu, a tím položili základy tzv. termometrie. Teprve v 18. stol. se však začaly rozlišovat pojmy teplota a teplo a začala se rozvíjet také kalorimetrie, tj. nauka o měření tepla.

TERMODYNAMICKOU SOUSTAVOU se nazývá fyzikální objekt složený z obrovského počtu atomů nebo molekul (těleso, kapalina, plyn), jehož stav a změny studuje termika, termodynamika a molekulová fyzika, str. 60, 62.

Klasická TERMODYNAMIKA zkoumala nejprve termodynamické děje v plynech a její inspirací byla problematika tepelných strojů. Od poloviny 19. století, kdy byly formulovány první dva termodynamické zákony, se stala vědeckým základem vzniku parních strojů, turbín, zážehových a vznětových motorů.

Nejstarší částí MOLEKULOVÉ FYZIKY je KINETICKÁ TEORIE PLYNŮ (od poloviny 19. století), která ve svém vývoji vyústila v KINETICKOU TEORII LÁTEK.

Na vzniku STATISTICKÉ FYZIKY se spolupodílely kinetická teorie (plynů a látek), fenomenologická termodynamika a matematická statistika. Od termodynamiky převzala statistická fyzika termodynamickou metodu a objekt svého studia – makrosystém (str. 7, 69), od kinetické teorie mikroskopický přístup ke studiu makrosystémů, z matematiky statistické metody.

3.1 Termika

TEPELNÁ VÝMĚNA je fyzikální děj probíhající mezi dvěma termodynamickými soustavami (str. 62, 65), jestliže jedna soustava předává energii druhé a má-li předávání energie za následek, že vnitřní energie jedné soustavy se zvětšuje na úkor vnitřní energie druhé soustavy.

TEPELNÝ KONTAKT mezi dvěma soustavami je interakce, při které může docházet k tepelné výměně.

Teplota

TEPLOTA T je skalární fyzikální veličina, která charakterizuje STAV fyzikálního objektu (str. 7, 50, 65). O teplotě platí tyto zkušeností a experimenty potvrzené poznatky:

- Měníme-li teplotu různých předmětů a látek, jejich stav a vlastnosti se také mění.
- Jestliže mají dvě různá tělesa A, B různé teploty T_A, T_B a je mezi nimi tepelný kontakt, jejich teploty se postupně vyrovnávají, až dosáhnou stejné hodnoty T (za předpokladu, že při dotyku nedojde k chemické reakci a tělesa nemají tepelný kontakt se svým okolím).
- NULTÝ ZÁKON TERMODYNAMIKY: Je-li každé ze dvou těles A, B v tepelné rovnováze s třetím tělesem C, jsou v tepelné rovnováze také tělesa A, B navzájem.

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že teplotu lze přiřadit pouze takové termodynamické soustavě, jejíž všechny části jsou ve vzájemné tepelné rovnováze.

MĚŘENÍ TEPLOTY provádíme pomocí TEPLOMĚRU, na němž je vytvořena teplotní stupnice.

CELSIOVU TEPLOTU t měříme teploměrem s Celsiovou teplotní stupnicí, její jednotkou je 1 °C (stupeň Celsia). Stupnice je určena pomocí dvou základních rovnovážných stavů:

- Rovnovážný stav chemicky čisté vody a ledu za normálního atmosférického tlaku (str. 52) udává teplotu 0 °C.
- Rovnovážný stav chemicky čisté vody a její syté páry při varu za normálního atmosférického tlaku (str. 52) udává teplotu 99,975 °C (tedy přibližně 100 °C).

TERMODYNAMICKOU TEPLOTU T měříme pomocí termodynamické teplotní stupnice, její jednotkou je K (kelvin). Termodynamická teplotní stupnice je určena jediným základním rovnovážným stavem soustavy „led + voda + sytá vodní pára", který nazýváme TROJNÝ BOD VODY. Tomuto stavu tepelné rovnováhy přiřazujeme teplotu 273,16 K, tj. 0,01 °C (str. 90).

Osnova kapitoly:

- Teplota, měření teploty
- Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin
- Teplo, tepelná kapacita, měrná a molární tepelná kapacita, skupenské teplo
- Kalorimetrická rovnice
- Přenos tepla, tepelná vodivost

V termice se často místo termínu TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA užívá název „těleso".
V termodynamice se kromě termínu TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA (nebo stručněji SOUSTAVA) používá též termín TERMODYNAMICKÝ SYSTÉM.

Při TEPELNÉ VÝMĚNĚ jsou obě tělesa vůči sobě v klidu, takže změna jejich vnitřní energie nenastává konáním práce.

S rostoucí teplotou se roztahuje kovová tyčka, roste elektrický odpor drátu, stejně tak roste tlak plynu uzavřeného v nádobě, mění se barva záření, které těleso vysílá.

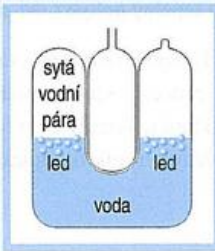
Ve vzájemné TEPELNÉ ROVNOVÁZE jsou tělesa v tepelném kontaktu mající tutéž teplotu.

Těleso samo je v tepelné rovnováze, jestliže všechny jeho části jsou ve vzájemné tepelné rovnováze.

Na MĚŘENÍ TEPLOTY pomocí teploměru se využívá skutečnost, že některé fyzikální veličiny se mění v závislosti na teplotě, např.:

- kapalinový teploměr využívá zvětšování objemu rtuti nebo lihu s rostoucí teplotou,
- plynový teploměr využívá změny tlaku plynu v závislosti na teplotě,
- odporový teploměr využívá zvyšování elektrického odporu s rostoucí teplotou.

Při měření teploty musí být teploměr a těleso, jehož teplotu měříme, v tepelné rovnováze.



Baňka pro TROJNÝ BOD VODY, v níž jsou v tepelné rovnováze led, voda a vodní pára. Do dutiny je vsunut plynový teploměr.

Jeden KELVIN je $\frac{1}{273{,}16}$ termodynamické teploty trojného bodu vody.

Vztah mezi termodynamickou teplotou T a Celsiovou teplotou t je: $T = \left(\{t\} + 273{,}15\right)$ K.
Ze vztahu pro t a T plyne, že teplotní rozdíl Δt a ΔT je číselně stejný, tedy platí $\Delta t = \Delta T$.

FAHRENHEITOVA STUPNICE používaná v USA užívá menší teplotní stupeň než Celsiova (9 °F = 5 °C) a jinou hodnotu nuly (0 °F = –17,78 °C). Převodní vztah mezi číselnými hodnotami těchto stupnic je $t_F = \left(\frac{9}{5}\{t\} + 32\right)$ °F,
kde t_F je Fahrenheitova teplota.

K měření termodynamické teploty T lze použít PLYNOVÝ TEPLOMĚR. Za předpokladu, že tlak plynu v nádobě plynového teploměru je přímo úměrný jeho termodynamické teplotě za stálého objemu plynu, dostaneme z přímé úměrnosti p, T vztah $T = (273{,}16\ \mathrm{K})\frac{p}{p_3}$, kde p_3 je tlak při teplotě trojného bodu vody.

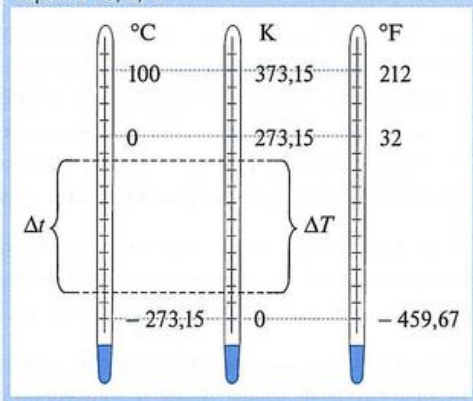
Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin

Z praxe je známo, že při změně teploty dochází ke změně rozměrů pevných těles a změně objemu kapalin. Tento jev se nazývá TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST.
Zkoumáme-li změnu jednoho rozměru pevného tělesa v závislosti na teplotě (např. délku tyče, prodloužení drátu atd.), mluvíme o délkové teplotní roztažnosti. Zkoumáme-li závislost objemu pevného tělesa nebo kapaliny na teplotě, jde o objemovou teplotní roztažnost.

DÉLKOVÁ TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST pevných látek je zkoumána u podélných předmětů (např. tyčí, drátů, kolejí). Jestliže teplota T_0 kovové tyče vzroste o ΔT na hodnotu $T = T_0 + \Delta T$, její původní délka d_0 vzroste o Δd na hodnotu $d = d_0 + \Delta d$.
Prodloužení tyče bude: $\Delta d = d_0 \alpha \Delta T$, kde α je na materiálu závislá konstanta zvaná TEPLOTNÍ SOUČINITEL DÉLKOVÉ ROZTAŽNOSTI. Jeho jednotkou je K^{-1}, což je totéž jako $(°\mathrm{C})^{-1}$.
Délka tyče d po změně teploty je pak $d = d_0(1 + \alpha\Delta T)$.

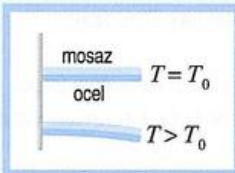
OBJEMOVÁ TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST pevných těles a kapalin je dána vztahem $\Delta V = V_0 \beta \Delta T$, kde V_0 je původní objem a β je TEPLOTNÍ SOUČINITEL OBJEMOVÉ ROZTAŽNOSTI.
Pro pevné izotropní látky je $\beta = 3\alpha$.
Objem V po změně teploty je pak $V = V_0(1 + \beta\Delta T)$.
Důsledkem teplotní roztažnosti látek je závislost jejich hustoty na teplotě $\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T)$, kde ρ_0 je původní hustota při teplotě T_0, ρ je hustota při teplotě $T = T_0 + \Delta T$.

Teplota v °C, K, °F



Některé teploty v kelvinech, stupních Celsia a stupních Fahrenheita:

- teplota absolutní nuly
  $T = 0$ K, $t = -273{,}15$ °C
- teplota tání ledu za normálního tlaku
  $T = 273{,}15$ K, $t = 0$ °C, $t_F = 32$ °F
- trojný bod vody
  $T = 273{,}16$ K, $t = 0{,}01$ °C
- bod varu vody za normálního tlaku
  $T = 373{,}15$ K, $t = 100$ °C, $t_F = 212$ °F



BIMETALOVÝ PROUŽEK (BIMETAL) je tvořen dvěma pásy z různých kovů, např. proužkem mosazi a oceli, svařenými k sobě. Rozdílná teplotní roztažnost různých materiálů způsobuje, že bimetal se ohýbá na jednu nebo na druhou stranu při teplotách vyšších nebo nižších, než je referenční teplota T_0. Na tomto principu pracuje mnoho termostatů tak, že bimetal sepne nebo rozepne elektrický kontakt, když teplota klesne nebo vzroste (např. u žehličky).

Při výpočtu přírůstku teploty $\Delta T = T - T_0$, kde T_0 je počáteční teplota a T konečná teplota, je nutné si uvědomit, že tento přírůstek může být i záporný, je-li $T < T_0$. Výsledná délka nebo objem je pak menší.

U běžných kapalin hustota s rostoucí teplotou klesá. U vody v intervalu od 0 °C do 3,98 °C nastává výjimka, hustota s teplotou roste. Tento jev se nazývá ANOMÁLIE VODY. Proto jezera a řeky zamrzají shora dolů a nikoli zezdola nahoru. Led se tvoří na volné hladině a díky anomálii vody přetrvává život v jezerech a řekách i v zimě.

Teplo

TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA (nebo stručněji „soustava") je skupina fyzikálních objektů (těleso, kapalina, plyn), jejichž stav a změny zkoumá termika a termodynamika, přičemž jsou odděleny od okolí rozhraním. **OKOLÍ** termodynamické soustavy jsou fyzikální objekty, které do soustavy nepatří, přičemž mezi soustavou a okolím může docházet k tepelné výměně.

TEPLO Q je určeno energií, která je přenesená mezi termodynamickou soustavou a okolím nebo mezi dvěma termodynamickými soustavami při tepelné výměně (str. 66).

Teplo bereme jako **KLADNÉ**, je-li dodáno do soustavy z okolí. Teplo je **ZÁPORNÉ**, jestliže přešlo ze soustavy do jejího okolí.

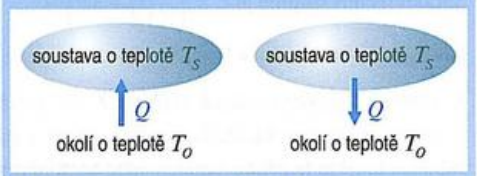
Na rozdíl od energie, teploty, tlaku a objemu nejsou teplo a práce vlastnostmi soustavy. Proto rozlišujeme:

- **DĚJOVÉ VELIČINY** (teplo, práce) popisující konkrétní děj – výměnu energie mezi soustavou a okolím,
- **STAVOVÉ VELIČINY** (vnitřní energie, teplota, tlak atd.) popisující konkrétní stav soustavy.

TEPLO Q je skalární fyzikální veličina. Protože velikost tepla je rovna velikosti přenesené energie, jednotka tepla v SI je táž jako jednotka energie, tedy **JOULE**. Než si vědci uvědomili, že teplo je mírou přenesené energie, měřili ho pomocí vzrůstu teploty vody. Jedna **KALORIE** (cal) byla definována jako množství tepla, které zvýší teplotu 1 g vody ze 14,5 °C na 15,5 °C. Nyní je kalorie definována pomocí joulu: 1 cal = 4,186 J.

$Q > 0$ – teplo bylo soustavou pohlceno

$Q < 0$ – teplo bylo soustavou uvolněno, vyzářeno



$T_S < T_O$ $T_S > T_O$

Energii mezi termodynamickou soustavou a okolím lze vyměňovat také prostřednictvím práce. Stejně jako teplo i práce může být kladná nebo záporná (str. 35).

Tepelná kapacita

TEPELNÁ KAPACITA C tělesa je konstanta úměrnosti mezi množstvím tepla Q dodaného tělesu (nebo odevzdaného tělesem) a tím způsobenou změnou jeho teploty. Platí tedy:

$$Q = C(T_2 - T_1),$$

kde T_1 je počáteční a T_2 je konečná teplota tělesa.

Tepelná kapacita tělesa C je tedy definována vztahem:

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

kde $\Delta T = T_2 - T_1$.

Nenastane-li změna skupenství, teplota soustavy se dodáním tepla zvyšuje, uvolněním tepla se soustava ochlazuje.

TEPELNÁ KAPACITA tělesa je číselně rovna teplu, které je potřebné k ohřátí tělesa o jeden kelvin.

JEDNOTKOU TEPELNÉ KAPACITY je $J \cdot K^{-1}$.

MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA látky c je tepelná kapacita vztažená na jednotku hmotnosti. Pro množství tepla Q dodaného tělesu (nebo odevzdaného tělesem) a tím způsobenou změnou jeho teploty platí:

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

kde T_1 je počáteční, T_2 konečná teplota, m je hmotnost tělesa. Měrná tepelná kapacita látky c je tedy definována vztahem:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}.$$

MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA látky c je číselně rovna teplu potřebnému k ohřátí 1 kg látky o 1 °C a nevztahuje se ke konkrétnímu předmětu, ale k jeho materiálu. Měrné tepelné kapacity látek závisejí poněkud na teplotě; v tabulkách jsou uvedeny jejich hodnoty za pokojové teploty.

JEDNOTKOU MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY je $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Značně vysokou měrnou tepelnou kapacitu má voda $c(H_2O) = 4\,185{,}5\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, proto se relativně pomalu ochlazuje nebo ohřívá.

MOLÁRNÍ TEPELNÁ KAPACITA c_{mol} látky je tepelná kapacita vztažená na 1 mol látky a je definována vztahem:

$$c_{mol} = \frac{Q}{n \cdot \Delta T},$$

přičemž platí: $c_{mol} = c \cdot M_m$,

kde M_m je molární hmotnost, n je látkové množství (počet molů látky).

MOLÁRNÍ TEPELNÁ KAPACITA c_{mol} látky je rovna teplu, které je potřebné k ohřátí 1 molu látky o 1 °C.

JEDNOTKOU MOLÁRNÍ TEPELNÉ KAPACITY je $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$.

Molární hmotnost $M_m = \frac{m}{n}$ (str. 78).

TEPLO Q potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti m o teplotu ΔT lze vypočítat pomocí vztahu:

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$,

kde $\Delta T = T_2 - T_1$, T_1 je počáteční a T_2 je konečná teplota tělesa, c je měrná tepelná kapacita látky daného tělesa.

Vztah pro výpočet tepla platí, nejen když teplo tělesu dodáváme, ale i když ho odebíráme při ochlazování.

Skupenské teplo

SKUPENSKÉ TEPLO L je množství tepla, které musí být dodáno nebo odebráno homogennímu tělesu nebo látce o hmotnosti m při **ZMĚNĚ SKUPENSTVÍ**.

ZMĚNA SKUPENSTVÍ

Dodáme-li pevné látce nebo kapalině teplo, teplota látky obvykle roste, ale nemusí tomu tak být vždy. Namísto růstu teploty může látka změnit své skupenství (pevné, kapalné nebo plynné). Tak například led může tát a pohlcovat teplo, aniž se mění jeho teplota. Voda se vaří a pohlcuje teplo, aniž roste její teplota. Při obráceném ději (mrznutí vody či kondenzaci páry) teplo ze soustavy odchází, aniž se mění teplota systému.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO l je skupenské teplo vztažené na jednotku hmotnosti:

$$l = \frac{L}{m},$$

MOLÁRNÍ SKUPENSKÉ TEPLO l_m je skupenské teplo vztažené na jeden mol:

$$l_m = \frac{L}{n},$$

kde n je látkové množství.

JEDNOTKOU SKUPENSKÉHO TEPLA je joule (J).
JEDNOTKOU MĚRNÉHO SKUPENSKÉHO TEPLA je $J \cdot kg^{-1}$.
JEDNOTKOU MOLÁRNÍHO SKUPENSKÉHO TEPLA je $J \cdot mol^{-1}$.

Podle toho, o jakou změnu skupenství se jedná, rozlišujeme:

- **SKUPENSKÉ TEPLO TÁNÍ**
  - změna skupenství z pevné látky na kapalinu;
- **SKUPENSKÉ TEPLO TUHNUTÍ**
  - změna skupenství z kapaliny na pevnou látku;
- **SKUPENSKÉ TEPLO VYPAŘOVÁNÍ**
  - změna skupenství z kapaliny na plyn;
- **SKUPENSKÉ TEPLO KONDENZACE**
  - kapalnění plynu.

Víte, že v 18. století mnozí fyzikové považovali teplo za jakousi bezvážnou kapalinu – kalorikum – proudící z tělesa teplejšího na těleso chladnější? Název „kalorimetr" znamenal, že se v něm měří množství kalorika, stejně tak i kalorie jako jednotka pro kalorikum.

Při stejných podmínkách je měrné skupenské teplo tuhnutí a tání stejné.
Při stejných podmínkách je měrné skupenské teplo kondenzace a vypařování stejné.

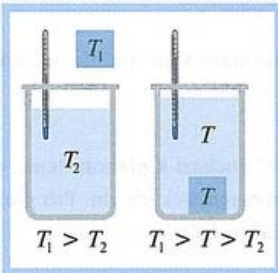
Kalorimetrická rovnice

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

Kalorimetrická rovnice v tomto tvaru vyjadřuje energetickou bilanci při tepelné výměně mezi tělesy v kalorimetru za podmínky, že lze zanedbat tepelnou kapacitu kalorimetru. Slouží k výpočtu jedné ze sedmi veličin, které obsahuje, jsou-li ostatní veličiny známy.

Pokud nezanedbáváme tepelnou kapacitu kalorimetru C_k, platí ze zákona zachování energie: $Q_1 = Q_2 + Q_k$, kde Q_k je teplo přijaté kalorimetrem. Pro tento případ platí kalorimetrická rovnice: $m_1 c_1 (T_1 - T) = m_2 c_2 (T - T_2) + C_K (T - T_2)$.

SMĚŠOVACÍ KALORIMETR je tepelně izolovaná nádoba s míchačkou a teploměrem. Izolaci zabezpečuje vakuum mezi dvojitými stěnami nádoby. Kalorimetr slouží k měření tepla, tepelné kapacity, resp. měrné tepelné kapacity.



Při tepelném kontaktu dvou různě teplých látek v kalorimetru – vody o teplotě T_2 a tělesa o teplotě T_1, zanedbáme-li tepelnou kapacitu kalorimetru, platí podle zákona zachování energie, že teplo Q_1 odevzdané teplejší látkou se rovná teplu Q_2 přijatému chladnější látkou, tj. $Q_1 = Q_2$. Označíme-li hmotnost, měrnou tepelnou kapacitu a teplotu teplejší látky m_1, c_1, T_1 a studenější látky m_2, c_2, T_2, výslednou teplotu T, pak platí:

$Q_1 = m_1 c_1 (T_1 - T)$, $Q_2 = m_2 c_2 (T - T_2)$.

Z rovnosti $Q_1 = Q_2$ platí:

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

Přenos tepla

PŘENOS TEPLA je přenosem vnitřní energie mezi dvěma termodynamickými soustavami a uskutečňuje se:

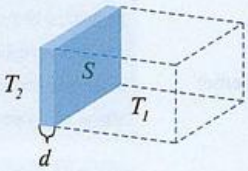
- vedením tepla,
- zářením,
- prouděním.

Vedení tepla

PŘENOS TEPLA VEDENÍM je fyzikální děj, při němž energie samovolně přechází z míst o vyšší teplotě na místa o teplotě nižší, aniž přitom současně dochází k pohybu prostředí, v němž se přenos tepla děje. Při tomto přenosu tepla mají molekuly na místech o vyšší teplotě větší kinetickou energii, částečně ji vzájemnými srážkami předávají sousedním molekulám, a tím dochází k přenosu energie.

Vedení tepla obvodovou zdí se významně podílí na tepelných ztrátách při vytápění domu. Teplo Q přenesené zdí z vnitřku domu o teplotě T_1 do vnějšího prostředí o teplotě T_2 za dobu τ je dáno vztahem:

$$Q = \lambda S \frac{(T_1 - T_2)}{d} \tau,$$



kde S je plocha zdi, d její tloušťka a λ je SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI.

TEPELNÝ TOK I je množství tepla přenesené za jednotku času:

$$I = \frac{Q}{\tau} = \lambda S \frac{(T_1 - T_2)}{d}.$$

TEPELNÝ ODPOR R zdi o tloušťce d: $R = \frac{d}{\lambda}$.

TEPELNÝ TOK I zdí plochy S: $I = S \frac{(T_1 - T_2)}{R}$.

Tepelný tok zdí možno snížit větší tloušťkou a lepší izolací.

Tepelné záření

Při TEPELNÉM ZÁŘENÍ dochází k přenosu tepla vyzařováním a pohlcováním elektromagnetických vln. Pro přenos tepla zářením není potřeba žádné látkové prostředí.

Proudění tepla

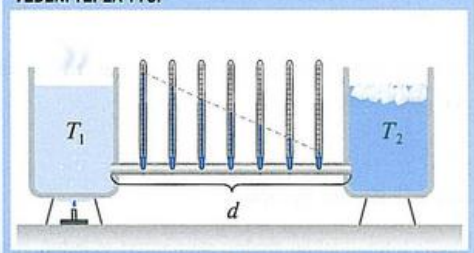
Přenos vnitřní energie PROUDĚNÍM nastává tehdy, když zahříváme v tíhovém poli tekutinu zdola. Vzniká proudění, tj. teplejší tekutina stoupá vzhůru, protože má menší hustotu, a vytlačuje studenou tekutinu. Proudící tekutina tedy přenáší energii z teplejších míst do míst chladnějších.

PŘENOS TEPLA je obvykle chápán jako tepelná výměna, kdy vnitřní energie přechází z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou.

PŘENOS TEPLA je přenosem energie. Používáme názvy přenos tepla, proudění tepla, vedení tepla, tepelný tok v tomto smyslu.

Víte, že tyto názvy jsou pozůstatkem původních představ o teple jako stavové veličině, která se zachovává? Dnes již nelze říci „Teplo tělesa se zvýšilo o 10 J", jak to bylo možné ještě v 18. století. Teplo v tomto významu nahradil pojem „vnitřní energie" soustavy.

VEDENÍ TEPLA TYČÍ

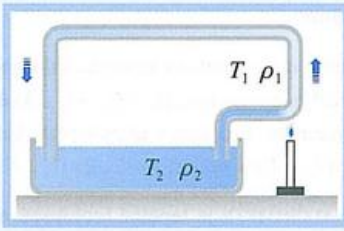


Vnitřní energie se přenáší tyčí z místa s vyšší teplotou T_1 do místa s nižší teplotou T_2. Pokles teploty je lineární pouze pro tepelně izolovanou tyč.

JEDNOTKOU TEPELNÉHO TOKU I je $J \cdot s^{-1}$ = watt.

Dobrou tepelnou vodivost mají kovy:
λ (Cu) = 395 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
λ (Ag) = 428 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.
Malou tepelnou vodivost mají izolační materiály:
λ (polystyren) = 0,16 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
λ (minerální vlna) = 0,043 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Tepelné záření (sálání tepla) je infračervené elektromagnetické záření o vlnových délkách v rozmezí 10^{-3} m až $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ m (str. 147, 151).



Přenos energie prouděním. $T_1 > T_2$ $\rho_1 < \rho_2$

Proudění tepla bez čerpadla nastává v okruhu ústředního topení, je-li kotel umístěn dole a radiátory nahoře.

3.2 Termodynamika

TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA (nebo stručněji „soustava") je skupina fyzikálních objektů (těleso, kapalina, plyn), jejichž stav a změny zkoumá termika a termodynamika. Soustava je oddělena od okolního prostředí skutečným nebo myšleným rozhraním.

STAV termodynamické soustavy je určen stavovými veličinami, např. tlakem, objemem, teplotou, vnitřní energií.

Pokud soustava není ovlivňována okolním prostředím nebo se vnější podmínky nemění, přejde po určité době do **STAVU TERMODYNAMICKÉ ROVNOVÁHY**, ve kterém se stavové veličiny (např. teplota, tlak, hustota, vnitřní energie, objem soustavy) nemění. Tepelná rovnováha je dílčím případem termodynamické rovnováhy, kdy je teplota všech částí soustavy stejná.

TERMODYNAMICKÝ DĚJ je změna stavu soustavy, při níž soustava přejde ze stavu počátečního do stavu konečného a změní se její vlastnosti, tedy veličiny popisující její stav.

ROVNOVÁŽNÝ DĚJ je termodynamický děj, při němž soustava prochází řadou na sebe navazujících rovnovážných stavů.

Vnitřní energie termodynamické soustavy a její změny

Stlačená nebo protažená pružina má potenciální energii, a proto je schopna konat práci (str. 35, 36). Ze skutečnosti, že termodynamická soustava je také schopna konat práci, vyplývá, že má energii, kterou nazýváme vnitřní energie.

Opačným dějem - přeměnou mechanické práce v teplo (podle dnešní terminologie ve „vnitřní energii" soustavy) - se obšírně zabýval J. P. Joule v letech 1840-43. Z mnoha jeho pokusů jednoznačně vyplývalo, že na vytvoření jedné kalorie tepla je potřeba vždy totéž množství mechanické práce (tehdy se teplo měřilo v kaloriích).

V letech 1841-45 si lékař J. R. Mayer jako první uvědomil, že teplo je rovnocenný pojem k pojmu „práce", a kromě energie mechanické (kinetické a potenciální) rozlišil další formy energie: tepelnou, elektrickou, magnetickou a chemickou (energie chemické vazby). Mayer tedy odlišil pojem „teplo", jako veličinu popisující děj, od pojmu „tepelná energie", což je veličina popisující stav - dnes by ji Mayer nazval vnitřní energií. Dále formuloval obecný zákon zachování energie, jenž se týkal všech forem energie.

Osnova kapitoly:

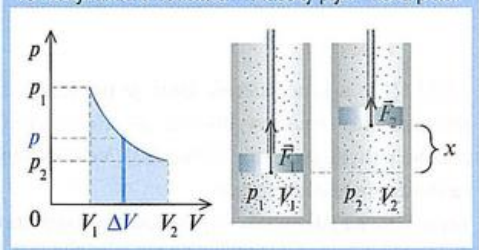
- Vnitřní energie termodynamické soustavy
- První termodynamický zákon
- Termodynamické děje
- Druhý a třetí termodynamický zákon, entropie
- Tepelné stroje, tepelné motory, chladicí stroje
- Ideální plyn, stavová rovnice
- Práce vykonaná plynem

O **STAVU** termodynamické soustavy lze hovořit jen tehdy, když jsou intenzivní stavové veličiny (např. teplota, tlak, hustota) stejné ve všech částech soustavy. Intenzivní veličiny nezávisejí na počtu částic, resp. hmotnosti soustavy, na rozdíl od aditivních veličin (objem, vnitřní energie), které na počtu částic, resp. hmotnosti soustavy závisejí. Hodnota aditivní veličiny (např. objemu) dané soustavy je rovna součtu hodnot všech makroskopických částí soustavy, což neplatí o veličinách intenzivních.

STAV TERMODYNAMICKÉ ROVNOVÁHY se nazývá také termodynamickým rovnovážným stavem.

Reálné děje je možno považovat za rovnovážné, jestliže probíhají dostatečně pomalu. Pokud skutečné děje probíhají rychle, jsou nerovnovážné (např. rychlá expanze plynu nebo rychlé ochlazení kapaliny).

Termodynamická soustava – stlačený plyn – koná práci.



Plyn zvedá píst a koná práci. Pro malé posunutí pístu Δx, jemuž odpovídá změna objemu $\Delta V = S \cdot \Delta x$, je práce $\Delta W = F \cdot \Delta x$, kde $F = p \cdot S$ je velikost síly $\vec{F}$, kterou plyn působí na píst, p je tlak plynu a S je plocha pístu. Dosadíme: $\Delta W = F \cdot \Delta x = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$. Celá práce W je dána modrou plochou.

Joule např. stlačil plyn z 1 atm na 22 atm (jednotka atm str. 52) a práce potřebná na stlačení se proměnila v teplo, které změřil kalorimetrem. V jiném pokusu klesající závaží roztáčelo lopatkové kolo v kalorimetru, čímž se opět mechanická práce proměnila v teplo.

VNITŘNÍ ENERGIE SOUSTAVY U je energie termodynamické soustavy, která je jako celek v klidu. Podle kinetické teorie látek je vnitřní energie rovna součtu celkové kinetické energie E_k neuspořádaného (tepelného, str. 76) pohybu všech částic soustavy a celkové potenciální energie E_p určené vzájemným působením mezi těmito částicemi: $U = E_k + E_p$.
Vnitřní energie U je stavová veličina a její změna závisí jen na konečném a počátečním stavu soustavy, nikoli na způsobu přechodu mezi těmito stavy.

ZMĚNA VNITŘNÍ ENERGIE ΔU nastává:

- konáním práce W, přičemž $\Delta U = W$;
- tepelnou výměnou a je rovna předanému nebo přijatému teplu, tj. $\Delta U = Q$.

První termodynamický zákon

PRVNÍ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON (1. TZ):
Přírůstek vnitřní energie ΔU soustavy je roven součtu dodané mechanické práce W a přivedeného tepla Q:
$\Delta U = W + Q$.

Nejobecnější formulací prvního termodynamického zákona je vztah $\Delta U = W + Q$, protože zahrnuje nejenom přírůstek, ale také úbytek vnitřní energie. Dále zahrnuje práci nejenom soustavě dodanou, ale také práci soustavou vykonanou a teplo soustavě dodané i z ní odvedené. Z prvního termodynamického zákona plyne nemožnost sestrojit **PERPETUUM MOBILE PRVNÍHO DRUHU**.

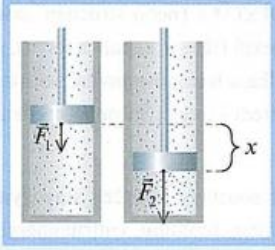
Teplo

TEPLO Q je určeno energií, která je přenesená z jedné termodynamické soustavy do jiné prostřednictvím neuspořádaného pohybu molekul (str. 62). Velikost tepla je rovna velikosti přenesené energie.
Teplo bereme jako **KLADNÉ**, je-li dodáno do soustavy z okolí.
Teplo je **ZÁPORNÉ**, jestliže přechází ze soustavy do okolí.

Práce

PRÁCE je určena energií, která je přenesená z jednoho tělesa na jiné prostřednictvím mechanického pohybu (zpravidla důsledkem vnější síly působící mezi tělesy).
Práci W bereme jako **KLADNOU**, byla-li soustavě dodána, tj. práce byla vykonána vnějšími silami, resp. okolními tělesy působícími na soustavu silami (srovnej s definicí kladné práce, str. 34).
Práce W je **ZÁPORNÁ**, jestliže byla vykonána termodynamickou soustavou působením na okolní tělesa.

Změna vnitřní energie ΔU nastává konáním práce např. při tření těles, při stlačování plynu ve válci, při ohýbání drátu, při prudkém míchání kapaliny.



Stlačováním plynu ve válci konáme práci W, která zvýší vnitřní energii plynu U o $\Delta U = W$. Projeví se to zvýšením teploty plynu.

Změna vnitřní energie ΔU nastává tepelnou výměnou např. při zahřívání jídla na sporáku, ochlazováním potravin v ledničce, tavením kovů.
Teplo dodané termodynamické soustavě zvýší její vnitřní energii U o $\Delta U = Q$, což se projeví zvýšením její teploty.

ZMĚNA VNITŘNÍ ENERGIE je **KLADNÁ** – nastane přírůstek energie, jestliže se jedná:

- o práci, která byla soustavě dodána, tj. práci vykonanou vnějšími silami,
- o teplo, které bylo soustavě dodáno okolními tělesy.

ZMĚNA VNITŘNÍ ENERGIE je **ZÁPORNÁ** – nastane úbytek energie, jestliže se jedná:

- o práci, kterou termodynamická soustava sama vykonává,
- o teplo, které bylo termodynamické soustavě odebráno.

PRVNÍ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON rozšiřuje princip zachování energie v izolované soustavě (str. 36) na soustavy, které nejsou izolované. V takových případech může energie přecházet do soustavy nebo z něj vycházet jako práce W anebo teplo Q. První termodynamický zákon je vlastně zákonem zachování energie pro neizolované soustavy.

TEPLO je mírou přenosu vnitřní energie – jeho velikost je rovna velikosti přenesené energie.

Teplo a práce jsou **DĚJOVÉ VELIČINY**, protože popisují děj – výměnu energie mezi soustavou a jejím okolím. Vnitřní energie, teplota, objem, tlak jsou **STAVOVÉ VELIČINY**, protože popisují konkrétní stav termodynamické soustavy.

Pro analýzu práce tepelných strojů je často z praktických důvodů označována jako **KLADNÁ** ta **PRÁCE**, kterou soustava na okolních tělesech vykonává. Tato práce je označována symbolem W'. Jestliže práce byla soustavě dodána, je záporná. 1. TZ má pak tvar: $Q = W' + \Delta U$.

Termodynamické děje

ADIABATICKÝ DĚJ je takový, při němž se nevyměňuje žádné teplo mezi soustavou a okolím. Dosazením $Q = 0$ do prvního termodynamického zákona získáme: $\Delta U = W$. Pokud soustava koná práci, vnitřní energie poklesne o množství vykonané práce.

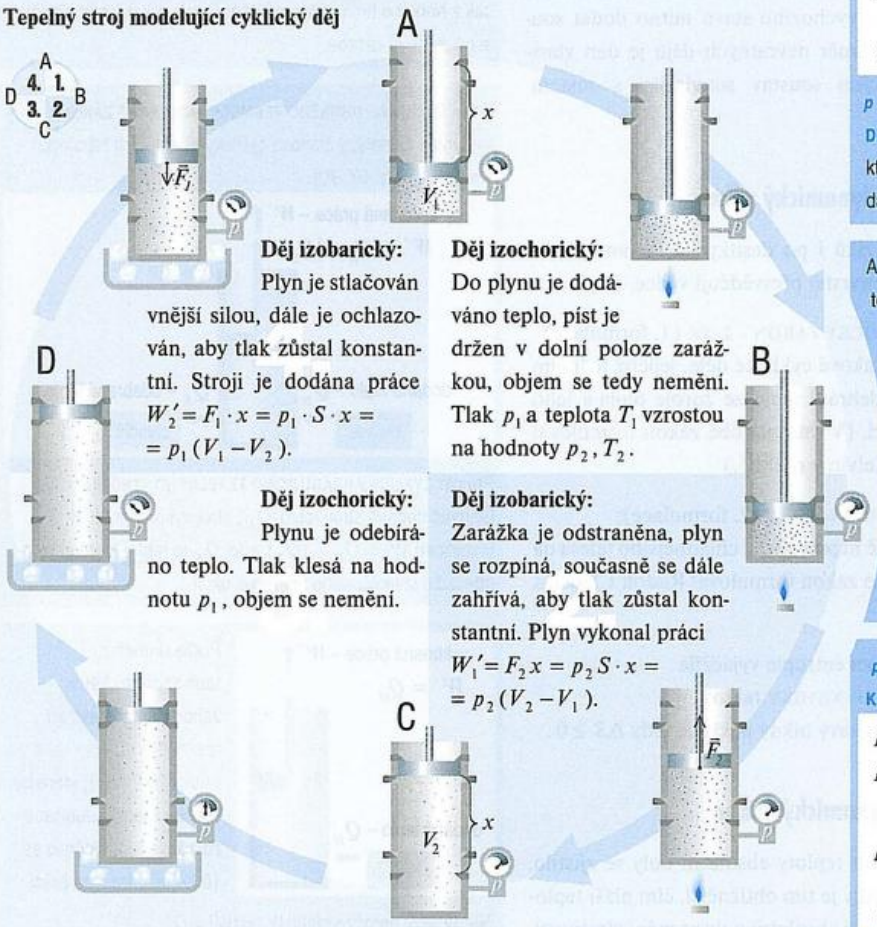
IZOCHORICKÝ DĚJ probíhá v plynu při stálém objemu, soustava nekoná žádnou práci.

IZOBARICKÝ DĚJ probíhá v plynu při stálém tlaku. Mění se objem i teplota a plyn koná práci $W = p \cdot \Delta V$ (str. 65, 75).

IZOTERMICKÝ DĚJ probíhá při stálé teplotě.

CYKLICKÝ (KRUHOVÝ) DĚJ: Při tomto ději se soustava po výměně tepla a práce nakonec vrátí do výchozího stavu, tedy vnitřní energie soustavy je po proběhnutí cyklu stejná jako na začátku. Protože $\Delta U = 0$, z prvního termodynamického zákona plyne $W = -Q$.

Tepelný stroj modelující cyklický děj



Děj izobarický: Plyn je stlačován vnější silou, dále je ochlazován, aby tlak zůstal konstantní. Stroji je dodána práce $W_2' = F_1 \cdot x = p_1 \cdot S \cdot x = p_1 (V_1 - V_2)$.

Děj izochorický: Do plynu je dodáváno teplo, píst je držen v dolní poloze zarážkou, objem se tedy nemění. Tlak p_1 a teplota T_1 vzrostou na hodnoty p_2, T_2.

Děj izochorický: Plynu je odebíráno teplo. Tlak klesá na hodnotu p_1, objem se nemění.

Děj izobarický: Zarážka je odstraněna, plyn se rozpíná, současně se dále zahřívá, aby tlak zůstal konstantní. Plyn vykonal práci $W_1' = F_2 x = p_2 S \cdot x = p_2 (V_2 - V_1)$.

Celková práce W, kterou plyn vykonal: $W' = W_1' + W_2' = (p_2 - p_1) \cdot (V_2 - V_1)$.

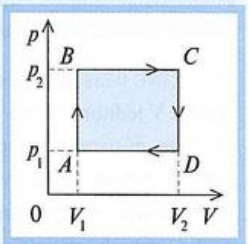
Podle prvního termodynamického zákona je vykonaná práce $W' = Q_H + Q_S$.

Vztah mezi přijatým teplem Q_H a užitečnou prací W vyjadřuje **ÚČINNOST**

$$\eta = \frac{W'}{Q_H} = \frac{Q_H + Q_S}{Q_H} = \frac{|Q_H| - |Q_S|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_S|}{|Q_H|}*.$$

Poněvadž $0 < |Q_S| < |Q_H|$, je účinnost kruhového děje $\eta < 1$.

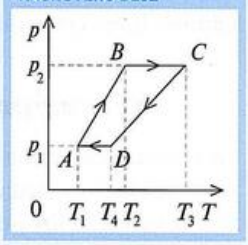
ADIABATICKÝ DĚJ probíhá tehdy, je-li soustava velmi dobře izolována, nebo když děj probíhá tak rychle, že tepelná výměna nestačí proběhnout (např. při expanzi plynu do vakua).



p – V DIAGRAM KRUHOVÉHO DĚJE – celková práce, kterou plyn vykonal, je dána modrou plochou.

A → B → C: Plyn přijímá teplo Q_H ze zdroje tepla.
B → C: Stroj koná užitečnou práci W_1.
C → D → A: Plyn vrací teplo Q_S do chladiče, přičemž $|Q_S| < |Q_H|$.
D → A: Stroji je dodána práce W_2, přičemž $|W_2| < |W_1|$.

p – T DIAGRAM KRUHOVÉHO DĚJE



* Odvedené teplo Q_S je záporné (str. 66) a přijaté teplo Q_H kladné, proto je ve vzorci pro účinnost absolutní hodnota.

VRATNÝ DĚJ je takový rovnovážný děj, při němž se soustava může vrátit z koncového stavu do výchozího, aniž nastanou v jejím okolí změny. Děj je vratný, je-li možno z koncového stavu do výchozího převést soustavu tak, že se do zdroje tepla vrátí teplo, které z něj bylo odebráno, a soustavě se vrátí práce, kterou vykonala. Případná pomocná zařízení se též musí vrátit do počátečního stavu. Vratné děje jsou pouze ději ideálními, jimž se skutečné děje mohou přiblížit, jestliže probíhají dostatečně pomalu.

NEVRATNÉ DĚJE jsou všechny skutečné děje, které nejsou vratné. V jednom směru obvykle probíhají samovolně, bez vnějšího působení. V opačném směru nikdy neprobíhají nebo je pro návrat do výchozího stavu nutno dodat soustavě určitou energii. Směr nevratných dějů je dán vlastností termodynamických soustav související s růstem entropie.

Druhý termodynamický zákon

Teoretické analýzy fyziků i po desítky let sbírané zkušenosti praktického inženýrství přesvědčují vědce, že platí:

DRUHÝ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON - 2. TZ (1. formulace):
Není možné vytvořit takové cyklické děje, jejichž jediným výsledkem by bylo odebrání tepla ze zdroje tepla a jeho úplná přeměna v práci. (V této podobě zákon formuloval W. Thomson - lord Kelvin v r. 1851.)

DRUHÝ ZÁKON TERMODYNAMIKY (2. formulace):
Teplo nikdy samovolně nepřechází z chladnějšího tělesa na teplejší. (V této podobě zákon formuloval Rudolf Clausius v r. 1850.)

Termodynamika pomocí entropie vyjádřila
DRUHÝ ZÁKON TERMODYNAMIKY takto:
Entropie izolované soustavy nikdy neklesá, tedy $\Delta S \geq 0$.

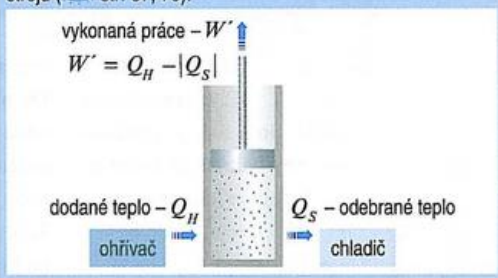
Třetí termodynamický zákon

Při pokusech dosáhnout teploty absolutní nuly se zjistilo, že další ochlazování látky je tím obtížnější, čím nižší teplotu už látka má. V blízkosti absolutní nuly se mění vlastnosti látek. Měrná tepelná kapacita a teplotní součinitel objemové roztažnosti se blíží k nule. Z experimentů a z teoretické analýzy vyplynul
TŘETÍ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON:
Teploty absolutní nuly nelze dosáhnout konečným počtem kroků.

Příkladem **VRATNÉHO DĚJE** je pomalé rozpínání plynu, který si vyměňuje teplo s okolním prostředím při nepatrném rozdílu teplot. Vratnost tohoto děje nevyplývá z toho, že plyn lze vrátit z konečného do počátečního stavu stlačením. Je vratný proto, že při pomalém stlačení plyn vrátí svému okolí teplo, které mu při rozpínání odebral, a přijme práci stejně velkou, jako je ta, kterou vykonal při rozpínání.

Příkladem **NEVRATNÉHO DĚJE** je samovolná expanze plynu: Propíchneme-li heliem naplněný balonek, plyn z něj uteče a rozptýlí se po místnosti. Ale jednotlivé atomy helia se už nikdy samy neshluknou a nevrátí zpátky do balonku. Stejně tak z horkého hrnku kávy přechází teplo do zkřehlých rukou, a nikdy ne obráceně.

První formulace **DRUHÉHO TERMODYNAMICKÉHO ZÁKONA** vyplynula z analýzy činnosti cyklicky pracujících tepelných strojů (str. 67, 70).



Princip **CYKLICKY PRACUJÍCÍHO TEPELNÉHO STROJE:**
Ohřívač dodává stroji teplo Q_H, stroj vykoná práci W' o velikosti $W' = Q_H - |Q_S|$, kde Q_S je teplo, které stroj odevzdal chladiči nebo vnějšímu okolí.

Podle druhého termodynamického zákona **nelze** sestrojit tzv. **PERPETUUM MOBILE DRUHÉHO DRUHU**, které by všechno teplo odebírané ze zdroje tepla měnilo se 100% účinností na práci.

Nikdy tedy nemůže platit: $W' = |W| = Q_H$.

Víte, že z třetí formy 2. TZ vyplývá i Clausiova formulace? Protože entropie izolované soustavy nikdy neklesá, není možný takový směr nevratných procesů, při kterém by entropie klesala, tedy teplo by přecházelo z chladnějšího tělesa na teplejší. Z Clausiovy formy 2. TZ plyne Thomsonova formulace.

Entropie

V termodynamice není možné entropii (podobně jako vnitřní energii) definovat pro termodynamické soustavy přímo. Definuje se jenom změna entropie ΔS.

ENTROPIE S termodynamické soustavy se mění, když si soustava vyměňuje energii s okolím. Změna entropie ΔS je definována vztahem $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$,

kde ΔQ je teplo do soustavy dodané nebo z něj odebrané během vratného děje.

Entropie je stavová veličina, její hodnota tedy závisí na stavu termodynamické soustavy.

Ve statistické fyzice je ENTROPIE S definována vztahem $S = k \cdot \ln W$,
kde k je Boltzmannova konstanta a W je míra pravděpodobnosti daného makrostavu termodynamické soustavy. Boltzmannova konstanta $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J \cdot K^{-1}}$. Tento vztah poprvé odvodil L. Boltzmann v roce 1877 a je vytesán také na jeho náhrobku.

Změny entropie:

- Při nevratném ději entropie izolované soustavy roste. Souvisí to se skutečností, že nerovnovážné stavy mají menší pravděpodobnost, a tedy i menší entropii než rovnovážný stav dané soustavy.
- Při vratném ději entropie tepelně izolovaného systému zůstává stálá.
- Entropie soustavy klesá, jestliže nevratné děje probíhají obráceně (např. teplota anebo hustota jedné části soustavy vzroste a jiné části klesne). Nevratné děje mohou probíhat obráceně jedině za podmínky, že soustavě dodáme energii, nejedná se tedy o soustavu izolovanou.

Tyto skutečnosti vyjadřuje ZÁKON RŮSTU ENTROPIE: Entropie izolovaného systému nikdy neklesá, tedy $\Delta S \geq 0$.

Zákon růstu entropie je nejobecnější formou druhého zákona termodynamiky (str. 68).

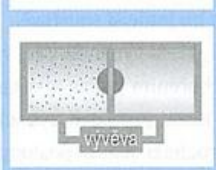
Entropie je jedním z nejdůležitějších pojmů fyziky. Zákon růstu entropie vysvětluje, proč některé děje nejsou možné – např. samovolný přechod tepla z chladnějšího tělesa na teplejší nebo perpetuum mobile druhého druhu, což by znamenalo prakticky neomezený zdroj levné energie.

Mění-li se v průběhu děje teplota, definiční vztah $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ platí pro $\Delta Q \to 0$.

ENTROPIE vyjadřuje míru pravděpodobnosti, že se termodynamická soustava nachází v daném stavu, a zákon růstu entropie vyjadřuje skutečnost, že soustava vždy přechází z méně pravděpodobného stavu do stavu, který má větší pravděpodobnost.

1) Lze to ilustrovat na izolované soustavě „plyn + nádoba".

Nejpravděpodobnější stav nastává tehdy, když je plyn v nádobě rovnoměrně rozptýlen.



Přečerpání plynu z jedné části nádoby do druhé vývěvou je nevratný děj, kdy soustavě dodáváme práci. Entropie klesá, soustava ovšem není izolovaná. Nerovnovážný stav – vakuum v jedné části nádoby a plyn v druhé části, přičemž jsou spojeny otevřeným ventilem, samovolně nikdy nenastane, protože má nesmírně malou pravděpodobnost. Tento stav musí být udržován uzavřeným ventilem.

Otevřeme-li ventil, plyn rychle zaplní prázdnou část nádoby, soustava tedy přejde ze stavu s malou pravděpodobností do nejpravděpodobnějšího stavu. Její entropie při tomto nevratném ději vzroste.

Pomalé adiabatické rozpínání plynu v tepelně izolované nádobě je dějem vratným, při kterém se entropie nemění.

MAKROSYSTÉM (str. 7) je termodynamická soustava vytvořená z nesmírně velkého počtu mikročástic (molekul, atomů), které se mohou nacházet v různých stavech. Každá konfigurace různých stavů mikročástic tvoří jeden mikrostav. **MAKROSTAV** soustavy je vytvořen všemi navenek nerozlišitelnými mikrostavy.

Tepelné stroje

TEPELNÝ STROJ je zařízení, které si se svým okolím vyměňuje teplo a práci. Důležitou součástí tepelného stroje je **PRACOVNÍ LÁTKA**, které je teplo získané strojem předáno a která změnou své vnitřní energie a expanzí umožňuje stroji konat práci.

Podle způsobu práce a účelu rozlišujeme:

- **CYKLICKY PRACUJÍCÍ TEPELNÉ STROJE**, které odebírají teplo ze svého okolí a konají práci. Pracovní látka je trvalou náplní stroje. Pracovní látka při práci prochází posloupností termodynamických stavů a na konci každého cyklu se vrátí zpět do výchozího stavu.
- **CHLADNIČKA** anebo **TEPELNÉ ČERPADLO** jsou zařízení, kterým dodáváme práci, aby odebírala teplo chladnější termodynamické soustavě a dodávala ho teplejší soustavě.
- **TEPELNÉ MOTORY** jsou zařízení, která využívají část vnitřní energie pracovní látky získané hořením paliva a konají užitečnou práci. Některé tepelné motory pracují cyklicky, to znamená, že pracovní látka prochází jistou posloupností termodynamických stavů; děje mezi nimi nazýváme **TAKTY** nebo **DOBY**. Na konci každého cyklu se cyklicky pracující tepelný motor vrátí do výchozího stavu. Pracovní látka, která již vykonala práci, odchází z motoru ven. U cyklicky pracujícího tepelného motoru následuje po **EXPANZI** také **KOMPRESE**, na kterou se spotřebuje část vykonané práce.

CARNOTŮV STROJ, jehož pracovní látkou je ideální plyn ve válci s pístem, je ideální cyklicky pracující tepelný stroj, v němž jsou všechny děje vratné. Jeho pracovní cyklus je následující:

1. Válec spojíme se zdrojem tepla o teplotě T_H, z něhož teplo Q_H přechází do pracovní látky, plyn se izotermicky rozpíná a píst koná práci ($p-V$ diagram, izoterma AB).
2. Válec je tepelně izolován, plyn se adiabaticky rozpíná (tj. žádná tepelná výměna) a teplota klesá z hodnoty T_H na hodnotu T_S ($p-V$ diagram, adiabata BC).
3. Válec spojíme s chladičem o teplotě T_S, z pracovní látky do chladiče se přenáší teplo Q_S a plyn se izotermicky stlačuje ($p-V$ diagram, izoterma CD).
4. Válec je tepelně izolován, plyn se adiabaticky stlačuje (tj. žádná tepelná výměna) a teplota stoupá z hodnoty T_S na hodnotu T_H ($p-V$ diagram, adiabata DA).

ÚČINNOST Carnotova stroje je $\eta = 1 - \frac{|Q_S|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_S}{T_H}$.

Vztah platí také pro jiné cyklicky pracující tepelné stroje. Účinnost tepelného stroje nikdy nemůže být 100%, protože teplo Q_S přenesené do chladiče může být nulové pouze tehdy, je-li teplota chladiče $T_S = 0$ nebo teplota zdroje tepla $T_H = \infty$, což je nemožné.

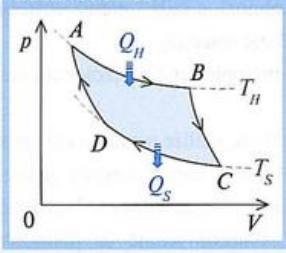
PRACOVNÍ LÁTKOU tepelného stroje může být ideální plyn (v ideálních cyklicky pracujících tepelných strojích), vodní pára (v parním stroji), vzduch a benzinová směs nespálená i spálená (v automobilovém motoru), freon (v chladničce).

V **CYKLICKY PRACUJÍCÍM TEPELNÉM STROJI** pracovní látka odebírá teplo z teplejšího zdroje a následnou expanzí koná užitečnou práci. Část přijatého tepla pak vrací do chladnějšího okolí. Cyklicky pracující tepelné stroje jsou obvykle myšlenkové konstrukce, na kterých termodynamika studovala možnosti přeměny vnitřní energie na práci. První parní stroje vycházely z těchto studií.

V **TEPELNÉM ČERPADLE** pracovní látka odebírá teplo z chladnějšího okolí a dodává ho příjemci tepla (např. domu, který je tímto způsobem vytápěn).

V **TEPELNÉM MOTORU** se teplo získává buď hořením paliva a je předáno pracovní látce (parní stroj, parní turbína), anebo přímo hořením pracovní látky (benzinové směsi), která pak expanzí (tj. zvyšováním objemu) koná práci proti vnějším silám a uvádí do pohybu pracovní stroje.

CARNOTŮV STROJ



$p-V$ diagram kruhového děje Carnotova stroje. Celková práce, kterou motor vykonal během jednoho cyklu, je rovna velikosti modré plochy.

Účinnost Carnotova stroje lze odvodit ze vztahu $\Delta S = \Delta S_{AB} + \Delta S_{CD} = 0$, kde ΔS_{AB} je změna entropie v taktu AB, ΔS_{CD} je změna entropie v taktu CD, přičemž celková změna entropie v celém cyklu je nulová. $Q_H = T_H \cdot \Delta S_{AB}$ je teplo přijaté od zdroje tepla o teplotě T_H, $Q_S = T_S \cdot \Delta S_{CD}$ je teplo odevzdané chladiči o teplotě T_S. Platí $\Delta S_{AB} = \frac{Q_H}{T_H}$, $\Delta S_{CD} = \frac{Q_S}{T_S}$.

Dosadíme do vztahu $\Delta S = \Delta S_{AB} + \Delta S_{CD} = 0$, tedy

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_S}{T_S} = 0 \Rightarrow \frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_S|}{T_S} \Rightarrow \frac{|Q_S|}{|Q_H|} = \frac{T_S}{T_H}.$$

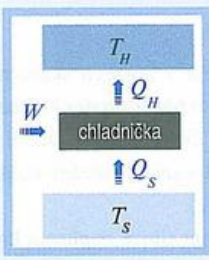
Dosadíme do vztahu pro účinnost, pak: $\eta = 1 - \frac{T_S}{T_H}$.

Vztah udává horní **hranici účinnosti tepelných strojů**. Jejich reálná účinnost je v důsledku energetických ztrát nižší.

CHLADNIČKA je tepelný stroj, který využívá práce W k čerpání tepla Q_S z chladnějšího prostředí o teplotě T_S do teplejšího prostředí o teplotě T_H cyklickým dějem.

ÚČINNOST chladničky vyjadřuje **CHLADICÍ FAKTOR** $K = \frac{|Q_S|}{|W|}$.

Pro ideální chladničku platí: $K = \frac{T_S}{T_H - T_S}$.



Ideální **CHLADNIČKA** pracuje jako obrácený Carnotův stroj. Nejlepší účinnost dosahuje pro teploty T_H blízké T_S. Q_S je teplo odčerpané z chladnějšího prostředí o teplotě T_S, W je vynaložená práce.

Tepelné motory

Nejznámější tepelné motory jsou: parní stroj; parní, plynová turbína; zážehový, vznětový motor; proudový, raketový motor.

PARNÍ STROJ: Vodní pára získaná v parním kotli se přivádí střídavě na levou a pravou stranu pracovního válce a uvádí do pohybu píst.

PARNÍ TURBÍNA: Vodní pára o vysokém tlaku a teplotě získaná v parním kotli se přivádí na soustavu oběžných kol s lopatkami a vnitřní energie páry se mění v kinetickou energii otáčivého pohybu turbíny.

PLYNOVÁ TURBÍNA pracuje obdobně jako parní. Pracovní látkou však není vodní pára, ale plyn, který vzniká hořením paliva, obvykle zemního plynu.

ZÁŽEHOVÝ MOTOR: Pracovní látkou je směs benzinových par se vzduchem. Činnost motoru lze rozdělit na čtyři doby:

1. Sání - sací ventil je otevřen, píst ve válci motoru se pohybuje a válec je plněn pracovní látkou.
2. Komprese - ventily jsou uzavřeny a píst stlačuje směs.
3. Výbuch - jiskra mezi kontakty zapalovací svíčky zapálí směs a vzniklý plyn o vysoké teplotě a tlaku při svém rozpínání posouváním pístu koná práci.
4. Výfuk - otevírá se výfukový ventil a píst vytlačuje shořenou směs do výfukového potrubí.

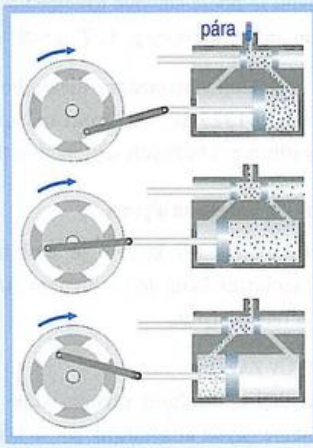
VZNĚTOVÝ MOTOR pracuje obdobně jako motor zážehový, jen s vyšší kompresí. Palivem je nafta, která se vstřikuje tryskou přímo do válce, a ke vznícení paliva dojde samovolně, poněvadž teplota stlačeného vzduchu dosahuje kolem 600 °C.

PROUDOVÝ (REAKTIVNÍ) MOTOR přeměňuje vnitřní energii paliva na kinetickou energii spalovaných plynů. Využívá zákon akce a reakce, tj. spálené plyny unikají tryskou ven (akce) a pohánějí motor (reakce). Ke spalování je potřebný vzduch, který je nasáván otvorem v přední části motoru a kompresorem je vháněn do spalovací komory.

RAKETOVÝ MOTOR je rovněž reaktivní a pracuje na stejném principu jako proudový. Nepotřebuje vzduch, protože kromě paliva veze také okysličovadlo nutné k hoření paliva. Proto raketový motor pracuje i mimo zemskou atmosféru.

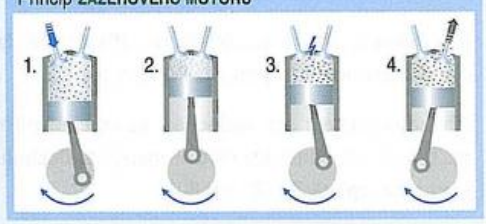
TEPELNÉ MOTORY lze rozdělit podle způsobu práce na:

- parní motory – parní stroj, parní turbína;
- spalovací motory – zážehový motor, vznětový motor, plynová turbína;
- reaktivní motory – proudový motor, raketový motor.



Princip **PARNÍHO STROJE**

Princip **ZÁŽEHOVÉHO MOTORU**



Princip **REAKTIVNÍHO MOTORU**

Impuls síly $\vec{F}_r$, která pohání raketu, je $\vec{F}_r \Delta t = \Delta m \vec{v}_r$, kde Δm je hmotnost plynů uniklých tryskou za čas Δt, $\vec{v}_r$ je výtoková rychlost plynů vzhledem k raketě.

Z toho plyne:

$\vec{F}_r = \frac{\Delta m}{\Delta t}\vec{v}_r$, kde $\left|\frac{\Delta m}{\Delta t}\right| = R$ je hmotnost zplodin uniklých z trysky za 1 sekundu.

Velikost zrychlení rakety je $a = \frac{F_r}{M}$, kde M je hmotnost rakety.

Ideální plyn

Pro zjednodušení studia dějů v plynech skutečný plyn nahrazujeme IDEÁLNÍM PLYNEM, o němž předpokládáme, že:

- je dokonale stlačitelný a tvořený molekulami o zanedbatelném objemu ve srovnání s jejich střední vzdáleností (považujeme je za hmotné body),
- molekuly na sebe navzájem silově nepůsobí kromě zanedbatelné doby vzájemných srážek,
- srážky molekul mezi sebou a s částicemi stěn nádoby jsou dokonale pružné.

STAV IDEÁLNÍHO PLYNU je určen fyzikálními veličinami: tlakem p, objemem V, teplotou T a látkovým množstvím n.

Stav ideálního plynu je podle stavové rovnice určen jednoznačně již třemi veličinami ze souboru p, V, T, n (str. 74, 75).

Reálné plyny se přibližují vlastnostem ideálního plynu již při teplotě 0 °C a tlaku $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa. Proto můžeme považovat za ideální plyn i vzduch při běžných teplotách a tlacích.

Izotermický děj s ideálním plynem

IZOTERMICKÝ DĚJ je děj, při kterém je teplota plynu stálá, tj. T = konst. Při izotermickém ději s plynem stálé hmotnosti se mění objem V a tlak p plynu.

BOYLŮV-MARIOTTŮV ZÁKON

Při izotermickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je součin tlaku a objemu plynu konstantní: pV = konst.

Graf závislosti tlaku na objemu $p = \frac{\text{konst.}}{V}$ je grafem nepřímé úměrnosti a nazývá se IZOTERMA. Při změně tlaku a objemu plynu z hodnot p_1, V_1 na p_2, V_2 tedy platí: $p_1 V_1 = p_2 V_2$.

Při izotermickém ději nedochází ke změně vnitřní energie plynu, tj. $\Delta U = 0$, poněvadž vnitřní energie U ideálního plynu závisí jenom na teplotě T (str. 80).

Z prvního termodynamického zákona (str. 66) tedy plyne, že teplo Q přijaté ideálním plynem je rovno práci W', kterou plyn při izotermickém ději vykonal: $W' = Q$.

Izochorický děj s ideálním plynem

IZOCHORICKÝ DĚJ je děj, při kterém je objem plynu stálý, tj. V = konst. Při izochorickém ději s plynem stálé hmotnosti se mění tlak p a teplota T plynu.

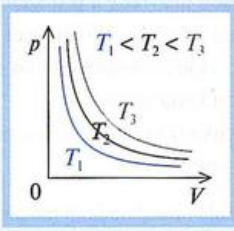
CHARLESŮV ZÁKON

Při izochorickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je tlak plynu přímo úměrný termodynamické teplotě tohoto plynu: p = konst. T.

Zkoumáním plynů bylo experimentálně zjištěno, že když uzavřeme různé plyny stejného látkového množství (str. 74) a stejné teploty do nádob stejného objemu, naměříme v každé nádobě téměř stejný tlak. Jestliže opakujeme měření při snížené hustotě, pak i tento rozdíl mezi tlaky prakticky vymizí. Reálné plyny se při nízkých hustotách chovají téměř stejně, můžeme je tedy nahradit modelem skutečného plynu, kterým je IDEÁLNÍ PLYN.

Víte, že studium vlastností a chování plynů významně přispělo k nastartování průmyslové revoluce v 19. století? Vytvořením teorie tepelných strojů totiž umožnilo vynález parního stroje.

IZOTERMICKÝ DĚJ: Dodané teplo Q nezvýší vnitřní energii plynu U, ale promění se v práci W' plynem vykonanou.



IZOTERMY

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

pro různé teploty.

Zákon Boylův-Mariottův objevil experimentálně anglický fyzik R. Boyle v r. 1661 a nezávisle na něm i Francouz E. Mariotte.

IZOCHORICKÝ DĚJ: Dodané teplo Q zvýší vnitřní energii plynu U, tedy i teplotu T.

Graf závislosti tlaku na termodynamické teplotě $p = \text{konst.} \cdot T$ nebo na objemu, $V = \text{konst.}$, se nazývá **IZOCHORA**.

Při změně tlaku a teploty plynu z p_1, T_1 na p_2, T_2 tedy platí:

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

Při izochorickém ději plyn nekoná práci ($W = 0$), poněvadž objem se nemění. Z prvního termodynamického zákona (str. 66) plyne, že přijaté, resp. odevzdané teplo Q je rovno přírůstku, resp. úbytku vnitřní energie plynu: $Q = \Delta U$, kde teplo $Q = c_V m \Delta T$ (str. 62, 63), c_V je měrná tepelná kapacita plynu při stálém objemu.

Izobarický děj s ideálním plynem

IZOBARICKÝ DĚJ je děj, při kterém je tlak plynu stálý, tj. $p = \text{konst.}$ Při izobarickém ději s plynem stálé hmotnosti se mění objem V a teplota T plynu.

GAY-LUSSACŮV ZÁKON

Při izobarickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je objem plynu přímo úměrný jeho termodynamické teplotě: $V = \text{konst.} \cdot T$.

Graf závislosti objemu ideálního plynu na termodynamické teplotě $V = \text{konst.} \cdot T$ nebo graf závislosti tlaku plynu na jeho objemu $p = \text{konst.}$ se nazývá **IZOBARA**.

Při změně objemu a teploty plynu z V_1, T_1 na V_2, T_2 tedy platí:

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

Z prvního termodynamického zákona (str. 66) plyne, že teplo Q přijaté ideálním plynem při izobarickém ději se rovná přírůstku jeho vnitřní energie a práce vykonané plynem, tj. $Q = \Delta U + W'$, kde $Q = c_p m \Delta T$ (str. 62, 63), c_p je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku.

Teplotní roztažnost a rozpínavost plynů

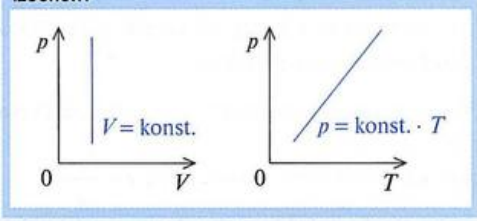
Když jsou odpovídající zákony izobarických a izochorických dějů vyjádřeny v Celsiově teplotě, pak pro objem V a tlak p plynu při teplotě t budou platit vztahy

- pro teplotní (objemovou) roztažnost ideálního plynu: $V(t) = V_0(1 + \gamma \cdot t)$,
- pro rozpínavost ideálního plynu: $p(t) = p_0(1 + \gamma \cdot t)$,

v nichž V_0 a p_0 jsou objem a tlak plynu při teplotě 0 °C, γ je **TEPLOTNÍ SOUČINITEL OBJEMOVÉ ROZTAŽNOSTI**, popř. **TEPLOTNÍ SOUČINITEL ROZPÍNAVOSTI** ideálního plynu.

Pro jeho hodnotu platí $\gamma = \dfrac{1}{273{,}15\ \text{K}}$.

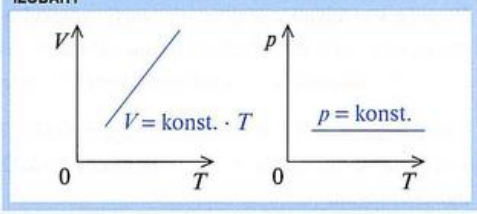
IZOCHORY



Charlesův zákon objevil experimentálně francouzský fyzik J. Charles (1746–1823).

IZOBARICKÝ DĚJ: Teplo Q dodané plynu se spotřebuje na vykonání práce W' a zvýšení vnitřní energie o ΔU.

IZOBARY



Gay-Lussacův zákon objevil experimentálně v r. 1801 francouzský fyzik J. L. Gay-Lussac.

Odvození vztahu pro **OBJEMOVOU ROZTAŽNOST PLYNŮ:**

$V = \text{konst.} \cdot T = \text{k} \cdot T = \text{k} \cdot (t + 273{,}15)$ po dosazení vztahu mezi termodynamickou teplotou T a Celsiovou teplotou t (str. 61). Pro teplotu $t = 0$ °C pak platí:

$$V_0 = \text{k} \cdot (0 + 273{,}15) \Rightarrow \text{k} = \frac{V_0}{273{,}15}.$$

Dosazením do prvního vztahu dostaneme:

$$V = \frac{V_0}{273{,}15} \cdot (t + 273{,}15) = V_0 \frac{t + 273{,}15}{273{,}15}, \text{ tedy}$$

$$V = V_0(1 + \gamma \cdot t), \text{ kde } \gamma = \frac{1}{273{,}15}.$$

Teplotní součinitel objemové roztažnosti a rozpínavosti plynů nezávisle na sobě změřili J. Dalton a J. L. Gay-Lussac v r. 1802.

Adiabatický děj

ADIABATICKÝ DĚJ je děj, při kterém nedochází k tepelné výměně mezi plynem a okolím.

Pro tento děj platí POISSONŮV ZÁKON vyjádřený vztahem
$pV^{\kappa} = \text{konst.}$,
kde κ je POISSONOVA KONSTANTA $\kappa = \frac{c_p}{c_V}$,
c_p je měrná tepelná kapacita plynu za stálého tlaku,
c_V je měrná tepelná kapacita plynu za stálého objemu.
Pro ideální plyn s jednoatomovými molekulami je $\kappa = \frac{5}{3}$, s dvouatomovými molekulami $\kappa = \frac{7}{5}$. Pro reálné plyny jsou hodnoty Poissonovy konstanty uvedeny v tabulkách.

Graf závislosti tlaku plynu na jeho objemu je ADIABATA.

Při adiabatickém ději neprobíhá tepelná výměna mezi plynem a okolím, tj. $Q = 0$. Z toho plyne, že změna vnitřní energie je rovna dodané nebo vykonané práci, tj. $\Delta U = W$.

Avogadrův zákon, Avogadrova konstanta

AVOGADRŮV ZÁKON: Stejné objemy všech plynů za stejné teploty a stejného tlaku obsahují vždy stejný počet molekul.

Protože stav plynu závisí na množství molekul a ne na jejich hmotnosti, bylo pro studium plynů výhodné zavést veličinu LÁTKOVÉ MNOŽSTVÍ n, vyjadřující množství molekul v plynu.

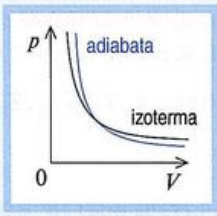
Látkové množství $n = 1$ mol obsahuje $6{,}0221367 \cdot 10^{23}$ molekul; látkové množství n molů obsahuje $n \cdot 6{,}0221367 \cdot 10^{23}$ molekul plynu.

Počet molekul plynu obsažený v látkovém množství $n = 1$ mol je AVOGADROVA KONSTANTA $N_A = 6{,}022\,136\,7 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ (str. 78). Počet molekul v jednom molu plynu byl vypočítán z Loschmidtova čísla $2{,}686\,763 \cdot 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$, což je množství molekul v $1\,\text{cm}^3$, které experimentálně zjistil vídeňský profesor J. Loschmidt v r. 1865.

Stavová rovnice ideálního plynu, plynová konstanta

Kombinací Gay-Lussacova a Boyle-Mariottova zákona odvodil B. Clapeyron v roce 1834 stavovou rovnici ideálního plynu: $pV = nRT$, a to následujícím způsobem:

Ideální plyn je uzavřen v nádobě s pohyblivým pístem a jeho stav je určen počátečními hodnotami stavových veličin p_0, V_0, T_0. Izobarickým a izotermickým dějem přejde plyn do konečného stavu, v němž mají stavové veličiny hodnoty p, V, T.



ADIABATA
klesá strměji než izoterma.

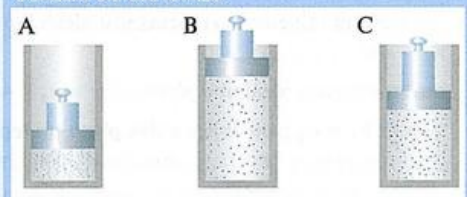
ADIABATICKÝ DĚJ

V praxi lze dosáhnout rychlé změny objemu plynu tak, že během této doby plyn nepřijme ani neodevzdá svému okolí teplo. Ochlazení plynu při ADIABATICKÉ EXPANZI se využívá k získání nízkých teplot.
U vznětových motorů se při ADIABATICKÉ KOMPRESI vzduchu zvýší jeho teplota na zápalnou teplotu nafty, která se po vstříknutí do válce vznítí.

Poměr hodnot c_p a c_V lze odvodit pomocí vztahů $C_p = M_m c_p$, $C_V = M_m c_V$, kde C_p, resp. C_V je molární tepelná kapacita c_{mol} (str. 62) ideálního plynu při stálém tlaku, resp. stálém objemu (str. 80, 81), M_m je molární hmotnost; $C_V = \frac{3}{2}R$, resp. $C_V = \frac{5}{2}R$ pro jednoatomové, resp. dvouatomové molekuly, mezi C_p a C_V platí Mayerův vztah $C_p = C_V + R$ (str. 81).

JEDNOTKA LÁTKOVÉHO MNOŽSTVÍ se nazývá MOL (str. 78). Z řady měření bylo zjištěno, že 1 mol libovolného plynu má při teplotě 0 °C a normálním atmosférickém tlaku $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa vždy týž objem $2{,}24141 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^3$ (přibližně 22,4 litrů).

Odvození stavové rovnice



$p_0, V_0, T_0 \rightarrow p_0, V_1, T \rightarrow p, V, T$

$p_0 = \text{konst.}$ izobarický děj (zahřívání)

$T = \text{konst.}$ izotermický děj (stlačování)

Izobarický děj: Plyn při stálém tlaku p_0 zahřejeme z počáteční teploty T_0 na konečnou teplotu T. Jeho objem se zvětší z hodnoty V_0 na hodnotu V_1. Podle Gay-Lussacova zákona platí:

$$\frac{V_1}{T} = \frac{V_0}{T_0} \quad \Rightarrow \quad V_1 = \frac{V_0}{T_0} T.$$

Izotermický děj: Plyn při stálé teplotě T stlačíme z objemu V_1 na konečný objem V. Tlak plynu se zvětší z hodnoty p_0 na hodnotu p. Podle Boyle-Mariottova zákona platí: $pV = p_0 V_1$.

Dosadíme za V_1 a po úpravě dostaneme STAVOVOU ROVNICI pro ideální plyn ve tvaru: $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \text{konst.}$

STAVOVÁ ROVNICE obecně nabývá tvaru: $pV = nRT$, kde R je plynová konstanta, n je látkové množství (počet molů plynu).

Jestliže pro počáteční stav plynu zvolíme normální podmínky (str. 78), pak počáteční hodnoty budou: $p_0 = 1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa, $T_0 = 273{,}15$ K ($t = 0$ °C), $V_0 = nV_m$, kde $V_m = 22{,}4141 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$, n je látkové množství plynu, které se během celého děje nemění.

Dosazením za $V_0 = nV_{mol}$ STAVOVÁ ROVNICE nabývá tvar $\frac{pV}{T} = n\frac{p_0 V_{mol}}{T_0}$, kde $\frac{p_0 V_{mol}}{T_0} = R$.

R je PLYNOVÁ KONSTANTA nezávislá na množství plynu. Dosadíme-li počáteční hodnoty p_0, V_0, T_0, dostaneme pro plynovou konstantu hodnotu $R = 8{,}31451\ \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Stavová rovnice reálného plynu

Chování skutečných plynů popisují stavové rovnice reálného plynu, které platí i pro vysoké tlaky a nízké teploty plynu; berou v úvahu vlastní objem molekul plynu a přitažlivé mezimolekulové síly. Nejznámější z nich je VAN DER WAALSOVA STAVOVÁ ROVNICE reálného plynu:

$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = nRT$, kde a, b jsou konstanty získané z údajů p, V, T naměřených pro daný plyn, tedy jsou závislé na druhu plynu; n je látkové množství plynu.

Stavová rovnice ideálního plynu platí s dostatečnou přesností pro reálné plyny za nízkého tlaku, tj. při malé hustotě a vysoké teplotě plynu. Není-li tato podmínka splněna, neřídí se již stavy reálných plynů uvedenou stavovou rovnicí a používají se jiné stavové rovnice, tzv. stavové rovnice reálného plynu.

Práce vykonaná plynem

Plyn uzavřený v nádobě s pohyblivým pístem působí na píst tlakovou silou o velikosti F a při zvětšování objemu koná práci.

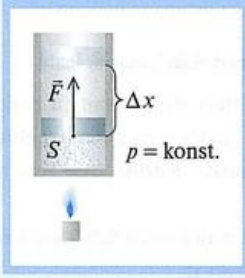
Při izobarickém ději je práce W' vykonaná plynem o tlaku p při změně objemu z hodnoty V_1 na hodnotu V_2 dána vztahem $W' = p \cdot \Delta V$, kde $\Delta V = V_2 - V_1$.

Mění-li se tlak plynu během děje, pak lze postupovat obdobně jako na str. 34 a 65.

Práce W' vykonaná plynem při změně objemu z hodnoty V_1 na hodnotu V_2 je dána obsahem plochy v p - V diagramu ohraničené vodorovnou osou, příslušnou křivkou $p = f(V)$ a úsečkami, které vyjadřují velikost objemu na začátku a na konci daného děje.

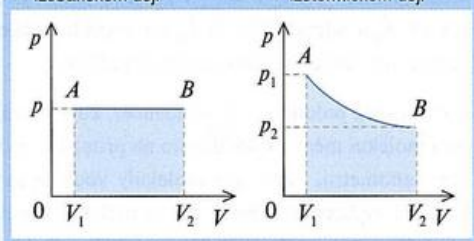
Pro izotermický děj je práce: $W' = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$, kde V_1 je počáteční a V_2 konečná hodnota objemu plynu, T je jeho teplota, n je počet molů plynu.

Posune-li se píst při izobarickém ději o Δx, vykoná plyn práci $W' = F \cdot \Delta x$. Dosadíme za $F = p \cdot S$, kde S je plošný obsah pístu a p tlak plynu. Pak platí $W' = p \cdot S \cdot \Delta x$, kde $S \cdot \Delta x = \Delta V$ je změna objemu. Používáme značení W', tj. kladná je ta práce, kterou plyn vykonává.



Pro výpočet práce lze sestrojit PRACOVNÍ DIAGRAM neboli $p - V$ diagram, kde práce vykonaná plynem je graficky znázorněna obsahem modré plochy při:

- izobarickém ději
- izotermickém ději



Obecně je práce W' vykonaná plynem při změně objemu z hodnoty V_1 na V_2 dána vztahem $W' = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot \mathrm{d}V$.

3.3 Molekulová fyzika, kinetická teorie plynů

MOLEKULOVÁ FYZIKA zkoumá makroskopické vlastnosti a chování látek na základě:

- jejich mikroskopické molekulární nebo atomové struktury,
- neustálého pohybu molekul,
- vzájemného působení molekul, atomů nebo iontů.

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

Kinetická teorie látek

KINETICKÁ TEORIE LÁTEK vysvětluje makroskopické vlastnosti látek na základě představ, že:

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

Vzájemné působení molekul, atomů, iontů

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

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

Mezimolekulové síly $\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_e$ jsou jako výslednice přitažlivých $\vec{F}_p$ a odpudivých sil $\vec{F}_e$ při malých vzdálenostech odpudivé, při větších vzdálenostech přitažlivé.

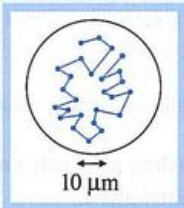
Rovnovážná poloha r_0, tj. vzdálenost, kdy se vzájemné působení molekul mění z odpudivého na přitažlivé, je řádově desetiny nanometru, např. pro molekuly vody je to asi 0,3 nm. Ve větší vzdálenosti (asi 1 nm u molekul kapaliny) zaniká i přitažlivá síla, proto je každá molekula přitahována jen nejbližšími molekulami ve svém okolí.

Osnova kapitoly:

- Kinetická teorie látek
- Struktura plynů, pevných látek a kapalin
- Relativní molekulová hmotnost, látkové množství
- Molární hmotnost, molární objem
- Kinetická teorie plynů, základní rovnice
- Molární tepelné kapacity, Maxwellovo rozdělení

Historicky nejstarší částí molekulové fyziky je KINETICKÁ TEORIE PLYNŮ (od poloviny 19. století), která vyústila postupně v kinetickou teorii látek a nakonec ve statistickou fyziku.

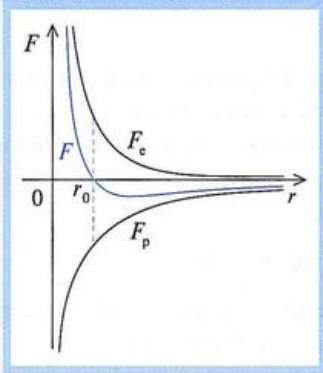
Představy KINETICKÉ TEORIE LÁTEK a PLYNŮ o částicovém složení látky vycházejí z experimentálních poznatků o Brownově pohybu, difuzi, chemických reakcích atd. S kinetickou teorií úzce souvisí také vysvětlení tlaku plynu, pochopení vnitřního tření v tekutinách, kapilárních jevů, vedení tepla atd.



BROWNŮV POHYB je neustálý chaotický pohyb mikroskopických částic (o rozměru kolem 1 μm) rozptýlených v tekutinách (plynech nebo kapalinách). Jeho příčinou jsou nepravidelné nárazy molekul tekutiny na částice. Obrázek ukazuje mikroskopický časový záznam pohybu jedné částice.

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

Závislost velikosti přitažlivé síly F_p a odpudivé síly F_e i jejich výslednice F, které působí mezi dvěma částicemi, na jejich vzdálenosti r. Bod r_0 označuje rovnovážnou polohu, tj. stav, kdy je výslednice $\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_e$ působících sil nulová.



Přitažlivé síly drží pohromadě atomy tvořící molekulu. Pro každou molekulu můžeme určit VAZEBNOU ENERGII molekuly E_v, která je rovna práci potřebné k rozrušení vazby mezi atomy a rozbití molekuly na jednotlivé atomy nebo menší molekuly.

Struktura plynů, pevných látek a kapalin

Vlastnosti látek v určitém skupenství vyplývají:

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

PEVNÉ LÁTKY

- mají stálý tvar i objem, který se mění jen nepatrně vlivem teploty (str. 61) a působících sil (deformace, str. 57);
- molekuly konají kmitavý pohyb kolem neměnných rovnovážných poloh – tepelný pohyb;
- molekuly jsou blízko sebe a působí mezi nimi silné přitažlivé síly;
- molekuly jsou většinou uspořádány pravidelně.

Pevné látky se podle uspořádání molekul dělí na:

- KRYSTALICKÉ LÁTKY, ve kterých molekuly vytvářejí pravidelnou krystalovou mřížku (str. 86);
- AMORFNÍ LÁTKY, ve kterých neexistuje pravidelná struktura (str. 86).

KAPALINY

- nemají vlastní tvar, v silovém poli nabývají tvaru nádob;
- jsou tekuté, mají vlastní objem, jenž se mění jen nepatrně vlivem teploty (str. 61) a tlaku (str. 57);
- molekuly konají tepelné kmity kolem rovnovážných poloh uvnitř objemu poskytovaného molekule sousedními molekulami; rovnovážné polohy se s časem mění – molekuly se přemístí do vzdálenosti cca 0,1 μm;
- vzájemné přitažlivé síly mezi molekulami jsou menší než u pevných látek, nejsou ovšem zanedbatelné jako u plynů;
- částice vytvářejí krátkodobé shluky, kde jsou molekuly vázány a uspořádány pravidelně, přičemž se shluky vzájemně pohybují.

PLYNY

- nemají stálý tvar ani objem (vyplní celý prostor v nádobě);
- jsou velmi dobře stlačitelné;
- molekuly se pohybují volně v celém objemu;
- vzájemné přitažlivé síly jsou velmi malé díky velkým vzdálenostem mezi nimi.

Jako přiměřená JEDNOTKA VAZEBNÉ ENERGIE se používá ELEKTRONVOLT (eV); 1 eV je energie, kterou získá elektron, jestliže je zrychlen potenciálovým rozdílem jednoho voltu (str. 177); $1\,\text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J.

VAZEBNÁ ENERGIE molekuly E_v

- Je-li $E_v > 0$, molekula je stabilní, pak k rozložení molekuly na atomy musíme energii dodat (součet klidových hmotností atomů je větší než klidová hmotnost molekuly).
- Je-li $E_v < 0$, molekula je nestabilní, pak při rozpadu molekuly se energie uvolňuje (součet klidových hmotností atomů je menší než původní klidová hmotnost molekuly).

PEVNÉ LÁTKY

Střední vzdálenosti mezi částicemi pevné látky jsou asi 0,2 až 0,4 nm. Nižší energie tepelného pohybu a silné vzájemné přitažlivé síly mezi částicemi způsobují, že tyto drží pevně u sebe a pevná látka vytváří těleso určitého tvaru a objemu.

Celková vnitřní potenciální energie soustavy částic pevného tělesa je větší než celková vnitřní kinetická energie tepelného pohybu těchto částic.

KAPALINY

Střední vzdálenosti mezi částicemi kapaliny jsou kolem 0,2 až 0,4 nm, tedy stejné jako u pevných látek. Nicméně vyšší energie tepelného pohybu molekul překonává vzájemné přitažlivé síly mezi částicemi, které pak nedrží pevně u sebe. Molekuly si mohou vyměňovat místo a vnější síla způsobuje jejich přesuny, což má za následek, že kapalina nabývá v silovém poli tvar nádoby, v níž se nachází.

U kapaliny daného objemu je celková vnitřní potenciální energie soustavy částic srovnatelná s celkovou vnitřní energií tepelného pohybu těchto částic.

PLYNY

Střední vzdálenosti mezi částicemi plynů jsou asi 3 nm (za normálních podmínek), tedy mnohem větší než rozměry molekul (kolem 0,1 nm). Následkem toho jsou vzájemné přitažlivé síly mezi částicemi plynu zanedbatelné, částice se volně pohybují, narážejí na sebe i na stěny nádoby, což se projevuje tlakem plynu. Celková vnitřní potenciální energie je zanedbatelná oproti celkové vnitřní energii tepelného pohybu.

Relativní molekulová a atomová hmotnost

RELATIVNÍ (POMĚRNÁ) MOLEKULOVÁ HMOTNOST M_r je poměr průměrné hmotnosti molekuly m_m k $\frac{1}{12}$ atomové hmotnosti m_u nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}C$, tedy $M_r = \frac{m_m}{m_u}$.

RELATIVNÍ (POMĚRNÁ) ATOMOVÁ HMOTNOST A_r je poměr hmotnosti atomu m_a k $\frac{1}{12}$ atomové hmotnosti m_u nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}C$, tedy $A_r = \frac{m_a}{m_u}$.

Látkové množství

LÁTKOVÉ MNOŽSTVÍ n vypočítáme ze vztahu $n = \frac{N}{N_A}$,

kde N je počet částic chemicky stejnorodé soustavy a N_A je Avogadrova konstanta.

AVOGADROVA KONSTANTA N_A je číslo udávající počet atomů v 0,012 kg nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}C$, $N_A = 6{,}022\,136\,7 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$.

Avogadrova konstanta tedy současně udává počet částic (molekul, atomů apod.) obsažených v jednom molu látky.

Molární hmotnost

MOLÁRNÍ HMOTNOST M_m je definována vztahem $M_m = \frac{m}{n}$,

kde m je hmotnost tělesa a n je odpovídající látkové množství. Molární hmotnost je vlastně hmotnost jednoho molu látky. Vztah mezi molární hmotností M_m a hmotností molekuly m_m je: $M_m = N_A m_m$.

Vztah mezi molární hmotností M_m a poměrnou molekulovou hmotností M_r je: $M_m = M_r \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$

nebo: $M_m = M_r\ \mathrm{g \cdot mol^{-1}}$.

Pro hmotnost m chemicky stejnorodého tělesa platí: $m = N \cdot m_m = n \cdot N_A \cdot m_m$, kde N je počet částic tělesa, m_m je hmotnost jedné molekuly.

Molární objem

MOLÁRNÍ OBJEM V_m je definován vztahem $V_m = \frac{V}{n}$,

kde V je objem dané látky, n je látkové množství této látky. Molární objem V_m je objem jednoho molu látky. Pro všechny reálné plyny, které se při NORMÁLNÍCH PODMÍNKÁCH (tj. tlak $p_0 = 1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa, $T_0 = 273{,}15$ K, $t = 0°$ C) chovají jako ideální plyn, je molární objem V_m stejný a má hodnotu: $V_m = 22{,}414\,1 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m^3 \cdot mol^{-1}}$.

Relativní atomová a molekulová hmotnost jsou bezrozměrové veličiny.

ATOMOVÁ HMOTNOSTNÍ KONSTANTA m_u (též ATOMOVÁ HMOTNOSTNÍ JEDNOTKA u) je rovna $\frac{1}{12}$ hmotnosti neutrálního atomu nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}C$ v základním stavu: $m_u = u = 1{,}660\,540 \cdot 10^{-27}$ kg. V těchto jednotkách je zvykem vyjadřovat klidové hmotnosti atomů a elementárních částic (str. 204).

Stav ideálního plynu závisí na množství molekul a ne na jejich hmotnosti, stejně jako při slučování atomů v molekuly jsou důležité počty částic, a ne jejich hmotnosti. Proto bylo výhodné zavést jednotku LÁTKOVÉHO MNOŽSTVÍ n, tj. jednotku vyjadřující množství částic v látce (str. 74).

JEDNOTKOU LÁTKOVÉHO MNOŽSTVÍ je MOL. 1 mol je látkové množství soustavy, která obsahuje právě tolik částic, kolik je atomů v 0,012 kg nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}C$. Jeden mol obsahuje právě tolik gramů látky, kolik je její relativní molekulová hmotnost: jeden mol atomárního vodíku má hmotnost 1,00797 g, 1 mol molekulárního vodíku H_2 má hmotnost přibližně 2 g.

JEDNOTKOU MOLÁRNÍ HMOTNOSTI je $\mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$. V chemii se pro molární hmotnost používá spíše jednotky $\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$, protože tam přetrvává udávání hmotnosti látky v gramech.

Odvození: $M_m = \frac{m}{n} = \frac{nN_A m_m}{n} = N_A m_m$.

Za hmotnost molekuly m jsme dosadili vztah $m = N \cdot m_m = n \cdot N_A \cdot m_m$.

Odvození vztahu mezi molární a poměrnou hmotností:

do vztahu $M_m = \frac{m}{n}$ dosadíme za

$m = N \cdot m_m$, $n = \frac{N}{N_A}$, dále za $m_m = M_r m_u$.

Pak $M_m = \frac{NM_r m_u}{\frac{N}{N_A}} = M_r \cdot N_A m_u$.

Součin $N_A m_u = 10^{-3}$, tedy $\{M_m\} = M_r \cdot 10^{-3}$.

JEDNOTKOU MOLÁRNÍHO OBJEMU je $1\ \mathrm{m^3} \cdot \mathrm{mol^{-1}}$.

Kinetická teorie plynů

KINETICKÁ TEORIE PLYNŮ vysvětluje pozorovatelné makroskopické jevy u plynů (tlak plynu, vnitřní energii, viskozitu, difuzi, tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu apod.) na základě tohoto MODELU IDEÁLNÍHO PLYNU:

- plyn je složen z velkého počtu molekul, které se pohybují neuspořádaně všemi směry, narážejí na stěny nádoby a na sebe navzájem;
- rozměry molekul jsou zanedbatelné vzhledem ke vzájemným vzdálenostem molekul;
- molekuly plynu se pohybují v intervalech mezi srážkami volně, při srážce se chovají jako dokonale pružné koule;
- vzájemné přitažlivé síly mezi molekulami plynu jsou zanedbatelné.

Základní rovnice kinetické teorie plynů

ZÁKLADNÍ ROVNICE KINETICKÉ TEORIE PLYNŮ má tvar: $p = \frac{1}{3}\frac{N}{V}mv_k^2$, kde v_k je střední kvadratická rychlost molekul, m je hmotnost jedné molekuly, N je počet molekul v nádobě o objemu V.

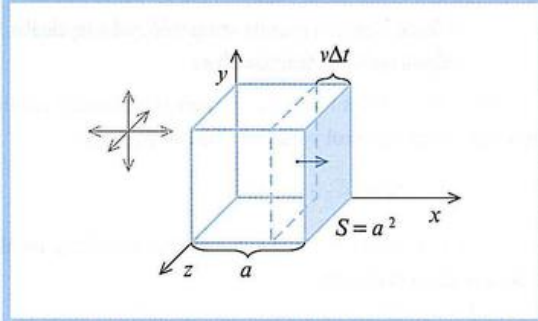
STŘEDNÍ KVADRATICKÁ RYCHLOST $v_k = \sqrt{\overline{v^2}}$, kde $\overline{v^2} = \frac{N_1 v_1^2 + N_1 v_1^2 + \ldots + N_j v_j^2}{N}$ (N_1 molekul má rychlost v_1, N_2 molekul má rychlost v_2 atd.).

Upravíme-li základní kinetickou rovnici plynů na tvar $pV = \frac{1}{3}Nmv_k^2 = \text{konst.}$ pro dané množství plynu, dostaneme Boyle-Mariottův zákon pro ideální plyn.

Dosadíme-li do této rovnice za $N = n \cdot N_A$ (n je látkové množství, přičemž výraz $N_A m = M_m$ je ovšem molární hmotnost plynu), pak ZÁKLADNÍ ROVNICE KINETICKÉ TEORIE PLYNŮ nabývá tvar: $pV = \frac{1}{3}nM_m v_k^2$.

STŘEDNÍ VOLNÁ DRÁHA λ je střední vzdálenost, kterou molekula urazí mezi dvěma srážkami: $\lambda = \frac{V}{\sqrt{2}\pi d^2 N}$, d je průměr molekuly, V je objem, N počet molekul plynu. Střední volná dráha pro vzduch za normálních podmínek (teplota 0 °C, tlak $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa) je $\lambda = 0{,}1\,\mu\text{m}$.

ZÁKLADNÍ ROVNICI KINETICKÉ TEORIE PLYNŮ odvodil Rudolf Clausius v r. 1857. Vycházel nejprve ze zjednodušené představy, že molekuly se pohybují stejnou rychlostí v a jen ve třech směrech vzájemně kolmých (ve směrech udávaných souřadnými osami x, y, z). Tedy ve směru osy x se pohybuje k vyznačené stěně S $\frac{1}{6}$ všech molekul v krychli, od stěny S také $\frac{1}{6}$ všech molekul v krychli.



V krychli o hraně a je N molekul ideálního plynu a její stěny mají stálou teplotu T. Molekuly plynu pohybující se k vyznačené stěně S na ni narážejí, jejich odraz od stěny je pružný, tzn. že molekula se odrazí od stěny stejně velkou rychlostí v, jakou na ni dopadla. Změna hybnosti při nárazu jedné molekuly bude $\Delta P = 2mv$, kde m je hmotnost molekuly. Dopadne-li za dobu Δt na vyznačenou stěnu ΔN molekul, pak celková změna hybnosti bude rovna impulsu síly F, kterou plyn působí na stěnu (str. 30),

tj. $\Delta N \cdot 2mv = F\Delta t$, pak síla $F = \frac{\Delta N \cdot 2mv}{\Delta t}$

a tlak na stěnu bude $p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta N \cdot 2mv}{S \cdot \Delta t}$.

Množství $\Delta N = S \cdot v\Delta t \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{N}{V}$, kde $S \cdot v\Delta t$ je objem prostoru při stěně, ze kterého dopadnou na plochu S molekuly za dobu Δt, výraz $\frac{1}{6} \cdot \frac{N}{V}$ je počet molekul v jednotce objemu pohybujících se směrem ke stěně S, V je objem krychle. ΔN dosadíme do výrazu pro tlak, pak $p = S \cdot v\Delta t \frac{1}{6}\frac{N}{V}\frac{\cdot 2mv}{S \cdot \Delta t} = \frac{1}{3}\frac{N}{V}mv^2$.

Odvození rovnice za předpokladu, že molekuly plynu mají různé rychlosti a pohybují se do všech stran náhodnými směry, je s užitím vyšší matematiky podobné, jen místo velké plochy S se vybere malá ploška ΔS a místo jedné rychlosti jsou uvažovány průměty rychlostí do směru osy x, které se sčítají. Pak místo jedné rychlosti v vystupuje v základní rovnici kinetické teorie plynů jistý druh střední rychlosti v_k – střední kvadratická rychlost.

$v_k = \sqrt{\overline{v^2}}$, kde $\overline{v^2} = \int_0^\infty v^2 g(v)\,\mathrm{d}v$, $g(v)$ je rozdělovací funkce absolutních hodnot rychlostí plynu, např. Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul (str. 81).

Kombinujeme-li základní rovnici kinetické teorie plynů se stavovou rovnicí ideálního plynu, obdržíme VZTAH MEZI STŘEDNÍ KVADRATICKOU RYCHLOSTÍ v_k a TEPLOTOU T: $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$,

kde m je hmotnost jedné molekuly, $k = \frac{R}{N_A}$ je

BOLTZMANNOVA KONSTANTA $k = 1{,}380658 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J \cdot K^{-1}}$.

Celková kinetická energie neuspořádaného tepelného pohybu molekul ideálního plynu

CELKOVÁ KINETICKÁ ENERGIE E_k neuspořádaného tepelného pohybu všech molekul v daném objemu plynu je:

$E_k = N\frac{3}{2}kT$ nebo $E_k = n\frac{3}{2}RT$,

STŘEDNÍ KINETICKÁ ENERGIE $\overline{E_{k1}}$ jedné molekuly ideálního plynu je dána vztahem:

$\overline{E_{k1}} = \frac{1}{2}mv_k^2 = \frac{3}{2}kT$,

kde N je počet molekul daného objemu plynu, k je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota, n je látkové množství, R je plynová konstanta, m je hmotnost molekuly, v_k je střední kvadratická rychlost molekul.

Z modelu ideálního plynu (str. 79) vyplývá, že celková vnitřní potenciální energie E_p je zanedbatelná oproti celkové kinetické energii E_k tepelného pohybu molekul, tedy energii E_k lze ztotožnit s celkovou vnitřní energií ideálního plynu U.

Pro VNITŘNÍ ENERGII IDEÁLNÍHO PLYNU platí:

$U = N\frac{3}{2}kT$ anebo $U = n\frac{3}{2}RT$.

Oba vztahy platí za podmínky, že molekuly můžeme považovat za hmotné body (např. u jednoatomového plynu). U plynu s dvouatomovými molekulami je vnitřní energie vyšší o rotační energii molekul (str. 81).

Molární tepelná kapacita ideálního plynu při stálém objemu

Molární tepelná kapacita C_V ideálního plynu při stálém objemu je definována vztahem (str. 62): $Q = nC_V\,\Delta T$, kde Q je teplo dodané do soustavy při izochorickém ději, n je počet molů. Protože objem plynu je při izochorickém ději konstantní, nekoná plyn žádnou práci, a tedy $W = 0$, proto z prvního termodynamického zákona platí $\Delta U = nC_V\,\Delta T$. Dosazením za $\Delta U = n\frac{3}{2}R\Delta T$ obdržíme pro

MOLÁRNÍ TEPELNOU KAPACITU IDEÁLNÍHO PLYNU PŘI STÁLÉM OBJEMU vztah: $C_V = \frac{3}{2}R$.

Odvození vztahu mezi střední kvadratickou rychlostí a teplotou:

$pV = \frac{nM_m v_k^2}{3}$, $pV = nRT \Rightarrow \frac{nM_m v_k^2}{3} = nRT \Rightarrow$

$\Rightarrow v_k^2 = \frac{3RT}{M_m}$. Dosazením za $M_m = N_A m$ (str. 78)

obdržíme $v_k^2 = \frac{3RT}{N_A m} \Rightarrow v_k^2 = \frac{3kT}{m} \Rightarrow v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$,

kde $k = \frac{R}{N_A}$, m je hmotnost jedné molekuly plynu, N_A je Avogadrova konstanta, R je plynová konstanta.

plyn	M_r	$v_k\,[\mathrm{m \cdot s^{-1}}]$
vodík H_2	2,02	1 920
helium He	4,00	1 370
vodní pára	18,00	645
kyslík O_2	28,00	483

STŘEDNÍ KVADRATICKÁ RYCHLOST v_k je tím menší, čím je relativní molekulová hmotnost M_r, tedy i hmotnost molekuly, větší. Údaje v_k jsou při teplotě 300 K.

CELKOVÁ KINETICKÁ ENERGIE E_k tepelného pohybu (str. 76) všech molekul plynu v daném objemu je $E_k = N \cdot \frac{1}{2}mv_k^2$, kde N je počet molekul plynu, $\frac{1}{2}mv_k^2$ je střední kinetická energie jedné molekuly a v_k je střední kvadratická rychlost odpovídající této energii.

Dosazením vztahu pro střední kvadratickou rychlost $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ obdržíme:

$E_k = N\frac{1}{2}mv_k^2 = N\frac{m3kT}{2m} \Rightarrow E_k = N\frac{3}{2}kT$.

Dosazením za $N = nN_A$ (str. 78) i za $k = \frac{R}{N_A}$

obdržíme tvar: $E_k = nN_A\frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T = n\frac{3}{2}RT$.

Pro střední kinetickou energii $\overline{E_{k1}}$ tepelného pohybu jedné molekuly plynu platí: $\overline{E_{k1}} = \frac{E_k}{N} = \frac{3}{2}kT$.

Dosazením za $\Delta U = n\frac{3}{2}R\Delta T$ do vztahu $\Delta U = nC_V\,\Delta T$ obdržíme $n\frac{3}{2}R\Delta T = nC_V\,\Delta T$,

tedy pro tepelnou kapacitu plyne $C_V = \frac{3}{2}R$.

Vnitřní energie ideálního plynu

Pro vnitřní energii ideálního plynu platí: $U = nC_V T$.

Tento vztah platí obecně nejen pro jednoatomové ideální plyny, ale také pro dvouatomové a víceatomové ideální plyny, pokud dosadíme odpovídající hodnotu C_V.

Pokud se změní teplota ideálního plynu o hodnotu ΔT, pak výsledná změna jeho vnitřní energie ΔU je dána vztahem: $\Delta U = nC_V \Delta T$.
Vztah platí pro uzavřenou soustavu (str. 83).

Vztah pro vnitřní energii lze odvodit dosazením $C_V = \frac{3}{2}R$ do vztahu $U = n \cdot \frac{3}{2}R \cdot T$.

Vztah $C_V = \frac{3}{2}R$ byl odvozen za předpokladu, že molekuly jsou hmotné body, vztah tedy platí pro jednoatomový ideální plyn se třemi stupni volnosti. Pro plyn s dvouatomovými molekulami (např. O_2, H_2) s 5 stupni volnosti lze odvodit vztah $C_V = \frac{5}{2}R$. Obecně každý stupeň volnosti molekuly přispívá k její energii $\frac{1}{2}$ (podle ekvipartičního teorému).

Molární tepelná kapacita ideálního plynu při konstantním tlaku

Molární tepelná kapacita C_p ideálního plynu při konstantním tlaku je definována vztahem $Q = nC_p \Delta T$, kde Q je teplo dodané do systému při izobarickém ději, n je počet molů. Využitím prvního termodynamického zákona obržíme pro C_p známý MAYERŮV VZTAH: $C_p = C_V + R$.

Je zřejmé, že $C_p > C_V$; při zahřívání a rozpínání plynu za stálého tlaku se totiž část tepla spotřebovává na práci potřebnou na zvětšení objemu plynu.

Dosazením za ΔU, Q, W' do prvního termodynamického zákona $\Delta U = Q - W'$ (W' je práce vykonaná plynem, str. 66), kde $\Delta U = nC_V \Delta T$, $Q = nC_p \Delta T$, $W' = p\Delta V$ obdržíme vztah: $nC_V \Delta T = nC_p \Delta T - p\Delta V$. Použitím stavové rovnice vztah pro práci $W' = p\Delta V$ upravíme na $p\Delta V = nR\Delta T$, čímž předešlý vztah nabývá tvar: $nC_V \Delta T = nC_p \Delta T - nR\Delta T$, tedy pro molární tepelné kapacity obdržíme vztah: $C_p = C_V + R$. Vztah odvodil tentýž J. R. Mayer, který formuloval jako první fyzik obecný zákon zachování energie (str. 65).

Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul

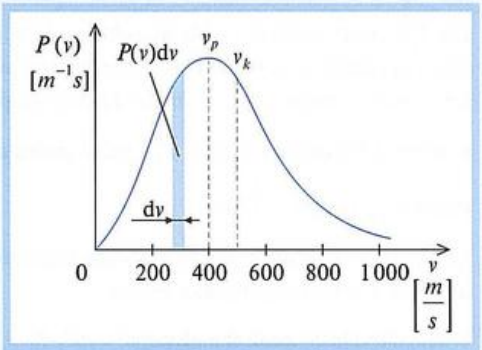
Zákon rozdělení molekul podle rychlostí teoreticky odvodil anglický fyzik J. Maxwell v r. 1852. Dospěl k výsledku známému jako MAXWELLOVO ROZDĚLENÍ RYCHLOSTÍ MOLEKUL:

$$P(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^2}{v_p^3} \exp\left(-\frac{v^2}{v_p^2}\right).$$

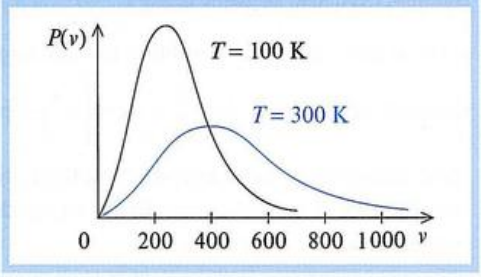
Zákon platí pro soustavu neuspořádaně se pohybujících molekul plynu v rovnovážném stavu, v je rychlost molekul, v_p je nejpravděpodobnější rychlost molekul, exp(x) je exponenciální funkce e^x.

Veličina $P(v)$ se nazývá ROZDĚLOVACÍ FUNKCE, kde součin $P(v)\mathrm{d}v$ (který je bezrozměrný) udává relativní počet molekul s rychlostmi v intervalu $(v, v + \mathrm{d}v)$, tj. pravděpodobnost rychlosti molekul v intervalu $(v, v + \mathrm{d}v)$. Absolutní počet molekul v intervalu $(v, v + \mathrm{d}v)$ je roven $N \cdot P(v)\mathrm{d}v$, kde N je počet molekul v daném plynu. Relativní počet molekul je roven plošce sloupce, jehož výška je $P(v)$ a šířka $\mathrm{d}v$.

Z tvaru rozdělovací funkce lze odvodit: $v_p = \sqrt{\frac{2}{3}} v_k$, dosazením za $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ obdržíme $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ a Maxwellovo rozdělení bude mít tvar: $P(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$.



MAXWELLOVO ROZDĚLENÍ rychlostí molekul – rozdělovací funkce $P(v)$, v_k je střední kvadratická rychlost molekul, v_p je nejpravděpodobnější rychlost molekul. Dolní obrázek ukazuje závislost Maxwellova rozdělení na teplotě T.



3.4 Struktura a vlastnosti plynů, kapalin a pevných látek

Plyny

- nemají stálý tvar ani objem (vyplní celý prostor v nádobě);
- jsou velmi dobře stlačitelné (str. 77);
- jejich molekuly se pohybují volně v celém objemu;
- vzájemné přitažlivé síly mezi molekulami jsou velmi malé.

STAVOVÁ ROVNICE ideálního plynu: $pV = nRT$,
kde p značí tlak, V objem, n látkové množství (počet molů), T teplotu, $R = 8{,}31451\ \mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$ je plynová konstanta.

PRÁCE W' vykonaná ideálním plynem při změně objemu z hodnoty V_1 na hodnotu V_2 (str. 75):

- při izochorickém ději $W' = 0$ (protože objem se nemění),
- při izobarickém ději $W' = p \cdot (V_2 - V_1)$,
- při izotermickém ději $W' = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$,
- obecně $W' = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot \mathrm{d}V$.

ZÁKLADNÍ ROVNICE KINETICKÉ TEORIE PLYNŮ

$$p = \frac{1}{3}\frac{N}{V} m v_k^2 = \frac{1}{3} n M_m v_k^2,$$

kde N je počet molekul v nádobě o objemu V, m je hmotnost jedné molekuly, v_k je střední kvadratická rychlost molekul, n je látkové množství, M_m je molární hmotnost plynu.

STŘEDNÍ KINETICKÁ ENERGIE $\overline{E_{k1}}$ jedné molekuly ideálního plynu: $\overline{E_{k1}} = \frac{1}{2} m v_k^2 = \frac{3}{2} kT$,

kde m je hmotnost molekuly, v_k je střední kvadratická rychlost molekul, T je termodynamická teplota.

VNITŘNÍ ENERGIE ideálního plynu: $U = nC_V T$,
C_V je molární tepelná kapacita ideálního plynu při stálém objemu, n je látkové množství, T teplota (str. 81).

Pro MOLÁRNÍ TEPELNOU KAPACITU ideálního plynu při konstantním tlaku platí Mayerův vztah: $C_p = C_V + R$ (str. 80).

MAXWELLOVO ROZDĚLENÍ rychlostí molekul ideálního plynu:

Rozdělovací funkce $P(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^2}{v_p^3} \exp\left(-\frac{v^2}{v_p^2}\right)$ platí pro soustavu neuspořádaně se pohybujících molekul plynu v rovnovážném stavu, v je rychlost molekul, v_p nejpravděpodobnější rychlost molekul (str. 81).

Osnova kapitoly:

- Plyny, ideální plyn, stavová rovnice ideálního plynu, práce vykonaná ideálním plynem
- Základní rovnice kinetické teorie plynů, vnitřní energie, Maxwellovo rozdělení, uzavřená a otevřená soustava
- Kapaliny, povrchové napětí kapalin, kapilární jevy, kapilární tlak
- Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin
- Krystalové mřížky pevných látek, poruchy
- Deformace pevného tělesa, Hookův zákon

IDEÁLNÍ PLYN je model skutečného plynu, o němž předpokládáme, že je dokonale stlačitelný, tvořený molekulami o zanedbatelném objemu, které na sebe navzájem silově nepůsobí kromě zanedbatelné doby vzájemných srážek, a vzájemné srážky molekul i srážky se stěnami nádoby jsou dokonale pružné (str. 79).

AVOGADROVA KONSTANTA N_A udává počet částic (molekul, atomů) obsažených v jednom molu látky a její experimentálně zjištěná hodnota je
$N_A = 6{,}022\,136\,7 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$.

STŘEDNÍ KVADRATICKÁ RYCHLOST $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$,
T je teplota, m je hmotnost jedné molekuly,
$k = \frac{R}{N_A}$ je BOLTZMANNOVA KONSTANTA,
$k = 1{,}380\,658 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J \cdot K^{-1}}$ (str. 80).

Celková kinetická energie E_k neuspořádaného tepelného pohybu všech molekul v daném objemu plynu je:
$E_k = N \frac{3}{2} kT$, kde N je počet molekul daného objemu plynu (str. 80).

Pro MOLÁRNÍ TEPELNOU KAPACITU ideálního plynu při stálém objemu platí vztah: $C_V = \frac{f}{2} R$,
kde f je počet stupňů volnosti molekuly plynu.
Molekula jednoatomového plynu má 3 stupně volnosti, dvouatomového plynu 5 stupňů volnosti atd.

Nejpravděpodobnější rychlost molekul $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$.

Pro zkoumání dějů v plynech musíme velmi dobře rozlišovat, zda je termodynamická soustava izolovaná, uzavřená nebo otevřená.

Rozlišujeme tyto typy soustav:

- **IZOLOVANÁ SOUSTAVA**, jestliže nedochází k výměně energie ani k výměně částic mezi soustavou a okolím; jejím opakem je neizolovaná soustava;
- **UZAVŘENÁ SOUSTAVA**, jestliže nedochází k výměně částic mezi soustavou a okolím;
- **OTEVŘENÁ SOUSTAVA**, jestliže u ní dochází k výměně částic s okolím;
- **ADIABATICKY IZOLOVANÁ**, když u ní nedochází k tepelné výměně s okolím.

ROZDÍL MEZI UZAVŘENOU A OTEVŘENOU SOUSTAVOU

Úloha 1:

V promrzlé chatě o objemu V má vzduch počáteční teplotu $T_1 = -5\,°C$. Poté, co zatopíme v kamnech, se tato teplota zvýší na $T_2 = 18\,°C$. Zvýší se vnitřní energie vzduchu uvnitř chaty?

Řešení:

Pokud by chata byla zcela vzduchotěsná a stoupla by teplota, podle stavové rovnice by se zvýšil tlak uvnitř. Protože běžná stavení nejsou dokonale utěsněná, vzduch při stoupání teploty uniká ven. Podle vztahu pro vnitřní energii (str. 82) platí pro její změnu $\Delta U = C_V\,\Delta(nT)$. Nahradíme-li podle stavové rovnice výraz $\Delta(nT)$ výrazem $\frac{\Delta(pV)}{R}$, získáme vztah $\Delta U = \frac{C_V}{R}\Delta(pV)$.

Poněvadž se v chatě nezměnil ani tlak, ani objem vzduchu, je změna vnitřní energie vzduchu uvnitř chaty nulová, tj. $\Delta U = 0$, přestože teplota vzduchu stoupla.

Výsledek lze pochopit, protože soustava „vzduch v chatě" není uzavřená. Zvyšování teploty T má tedy za následek snižování látkového množství n vzduchu v chatě.

Př. 1

Plyn uzavřený v nádobě o vnitřním objemu 1,6 m^3 má teplotu –5 °C. Urči, jaký je tlak plynu, jehož látkové množství je 3,2 kmol.

$V = 1{,}6\ \text{m}^3;\ t = -5\ °\text{C} \Rightarrow T \quad -5 + 273{,}15)\,\text{K} = 268{,}15\ \text{K};\ n = 3{,}2\ \text{kmol} = 3\,200\ \text{mol};\ p = ?$

$$pV = nR_m T \Rightarrow p = \frac{nR_m T}{V}$$

$$p = \frac{3\,200 \cdot 8{,}31 \cdot 268{,}15}{1{,}6}\ \text{Pa} = 4\,456\,653\ \text{Pa} = 4{,}46\ \text{MPa}$$

Tlak plynu je 4,46 MPa.

Př. 2

Urči, jak se změní tlak plynu, jestliže se jeho termodynamická teplota zvětší 2,8krát a jeho objem vzroste o 40 % původního objemu.

$T_2 = 2{,}8T_1;\ V_2 = 1{,}4V_1;\ p_2 = ?$

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1V_1T_2}{T_1V_2} = \frac{p_1V_1 \cdot 2{,}8T_1}{T_1 \cdot 1{,}4V_1} = 2p_1$$

Tlak plynu vzroste dvakrát.

Př. 3

Žárovka se plní dusíkem pod tlakem 50,6 kPa za teploty 18 °C. Urči, jakou teplotu má dusík v rozsvícené žárovce, jestliže se jeho tlak zvětší na hodnotu 118 kPa.

$p_1 = 50{,}6\ \text{kPa} = 50\,600\ \text{Pa};\ p_2 = 118\ \text{kPa} = 118\,000\ \text{Pa};\ t_1 = 18\ °\text{C} \Rightarrow T_1 = 291{,}15\ \text{K};\ t_2 = ?\ (T_2 = ?)$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = \frac{p_2T_1}{p_1}$$

$$T_2 = \frac{118\,000 \cdot 291{,}15}{50\,600}\ \text{K} = 679\ \text{K} \Rightarrow t_2 = 406\ °\text{C}$$

- Jedná se o izochorický děj, proto platí $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$.

Dusík v rozsvícené žárovce má teplotu 406 °C.

Kapaliny

- nemají vlastní tvar, nabývají tvaru nádob, v nichž se nacházejí;
- jsou tekuté, mají vlastní objem, jenž se mění jen nepatrně vlivem teploty (str. 61) a tlaku (str. 58);
- molekuly konají chaotické kmity kolem rovnovážných poloh, které se s časem mění (str. 77);
- vzájemné přitažlivé síly mezi molekulami jsou menší než u pevných látek, nejsou ovšem zanedbatelné jako u plynů;
- kapalina se skládá z velmi malých oblastí, kde jsou molekuly vázány a pravidelně uspořádány.

Povrchové jevy

Přitažlivé síly z vnitřku kapaliny působí na povrchové molekuly kapaliny a vytvářejí jednostrannou tahovou sílu $\vec{F}$ směřující dovnitř kapaliny. Tato tahová síla i vzájemné přitažlivé síly molekul na povrchu kapaliny, rovnoběžné s povrchem, mají za následek, že okrajové molekuly vytvářejí na povrchu kapaliny velmi tenkou **POVRCHOVOU VRSTVU**, jejíž tloušťka je řádově rovna 1 nm (10^{-9} m), s vlastnostmi odlišnými od vnitřních vrstev kapaliny.

V povrchové vrstvě se projevují **POVRCHOVÉ SÍLY**, které způsobují, že povrch kapaliny se chová jako pružná blána. Povrchové síly jsou rovnoběžné s povrchem kapaliny a kolmé na okraj povrchové vrstvy.

Povrchové napětí a povrchová energie

Velikost **POVRCHOVÉ SÍLY** $\vec{F}_p$ je úměrná délce l okraje povrchové blány: $F_p = \sigma \cdot l$, kde veličina σ je povrchové napětí.

POVRCHOVÉ NAPĚTÍ je definováno vztahem $\sigma = \dfrac{F_p}{l}$,

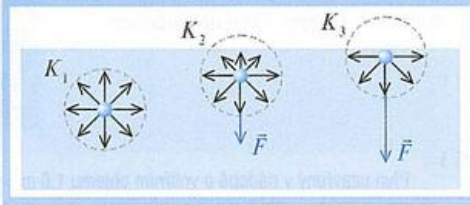
kde F_p je velikost povrchové síly, l je délka okraje povrchové blány.

Při posunutí molekuly z vnitřku kapaliny do její povrchové vrstvy je nutno vykonat práci. Proto má molekula v povrchové vrstvě větší potenciální energii, než by měla, kdyby se nacházela uvnitř kapaliny. Povrchová vrstva má navíc energii, kterou nazýváme povrchová energie.

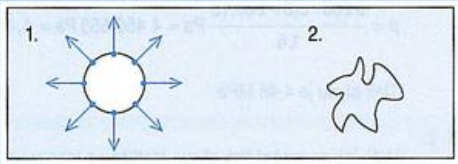
POVRCHOVÁ ENERGIE KAPALINY E je definována jako rozdíl mezi potenciální energií molekul v povrchové vrstvě a uvnitř kapaliny. Povrchová energie je tedy úměrná velikosti povrchu kapaliny, tedy změna povrchové energie ΔE je přímo úměrná změně obsahu ΔS volného povrchu kapaliny a platí:
$\Delta E = \sigma \cdot \Delta S$, kde σ je povrchové napětí kapaliny.

Volný povrch kapaliny se chová obdobně jako tenká pružná blána. Svědčí o tom známé jevy, např. hmyz chodící po hladině, jehla plovoucí na vodě, pod kterou se hladina prohýbá.

Střední vzdálenosti mezi částicemi kapaliny jsou kolem 0,2 až 0,3 nm (str. 77), přitažlivé síly působí do vzdálenosti několika nm (např. pro molekuly vody asi do 1 nm, str. 76), proto je každá molekula přitahována jen nejbližšími částicemi ve svém okolí. Kolem každé molekuly tedy existuje kulová **SFÉRA VZÁJEMNÉHO PŮSOBENÍ** K. Výslednice $\vec{F}$ přitažlivých sil, jimiž působí molekuly ve sférách typu K_2, K_3 na molekuly v jejich středech, je kolmá k povrchu kapaliny a má směr dovnitř kapaliny.

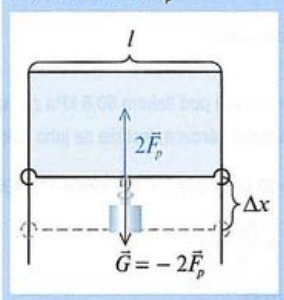


Vložíme-li do blány vytvořené z mýdlového roztoku smyčku z tenké nitě (2) a blánu uvnitř smyčky propíchneme, **POVRCHOVÉ SÍLY** ji napnou (1) do kruhového tvaru, protože jsou na nit, tj. okraj povrchové vrstvy, kolmé.



JEDNOTKOU POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ je $N \cdot m^{-1}$, pro praktické účely se používá jednotka $\mu N \cdot m^{-1}$.

POVRCHOVÁ SÍLA $\vec{F}_p$



Na drátěném rámečku s pohyblivou stranou vytvoříme blánu z mýdlového roztoku. Protože blána má dva povrchy, táhne příčku povrchovou silou o velikosti $2F_p = 2\sigma l$.

Při posunutí příčky o Δx povrchová síla $\vec{F}_p$ vykoná práci $W = F_p \cdot \Delta x = \sigma l \cdot \Delta x = \sigma \Delta S$, která je rovna změně povrchové energie, tj. $W = \Delta E = \sigma \cdot \Delta S$.

Kapilární jevy

Na rozhraní pevného tělesa a kapaliny mohou vzniknout dvě následující situace:

- kapalina smáčí stěny nádoby, pozorujeme zakřivení povrchové vrstvy u stěn nádoby směrem vzhůru a platí: $0 \leq \vartheta < 90°$; pokud $\vartheta = 0°$, kapalina je dokonale smáčivá;

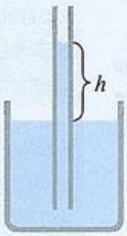
- kapalina nesmáčí stěny nádoby, pozorujeme zakřivení povrchové vrstvy směrem dolů a platí: $90° < \vartheta \leq 180°$; pokud $\vartheta = 180°$, kapalina je dokonale nesmáčivá.

Úhel ϑ je úhel mezi stěnou nádoby a povrchovou vrstvou.

KAPILÁRNÍ ELEVACE je jev, kdy volná hladina kapaliny v kapiláře stoupá. Nastává u kapalin, které smáčejí stěny nádoby.

Pro výšku vodního sloupce h při kapilární elevaci dokonale smáčivé kapaliny platí vztah: $h = \dfrac{2\sigma}{R\rho g}$,

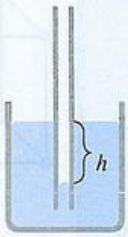
kde σ je povrchové napětí, R poloměr kapiláry, ρ hustota kapaliny, g je gravitační zrychlení.



KAPILÁRNÍ DEPRESE je jev, kdy volná hladina kapaliny v kapiláře klesá. Nastává u kapalin, které nesmáčejí stěny nádoby.

Pro hloubku vodního sloupce h při kapilární depresi dokonale nesmáčivé kapaliny platí vztah: $h = \dfrac{2\sigma}{R\rho g}$,

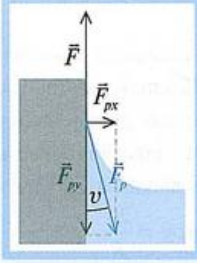
kde σ je povrchové napětí, R poloměr kapiláry, ρ hustota kapaliny, g je gravitační zrychlení.



Kapilární tlak

KAPILÁRNÍ TLAK p_k vzniká vlivem povrchového napětí pod zakřiveným povrchem kapaliny a síly vyvolané kapilárním tlakem míří do středu křivosti. Má-li povrch kapaliny tvar kulového vrchlíku, kapilární tlak je dán vztahem: $p_k = \dfrac{2\sigma}{R}$,

kde σ je povrchové napětí a R poloměr křivosti.



Povrch kapaliny působí na místo styku kapaliny se stěnou silou $F_p = \sigma l$, kde l je délka okraje kapaliny. Podle zákona akce a reakce také místo styku působí na okraj kapaliny opačnou silou $F = F_p \cos\vartheta$.

Kapilární elevaci můžeme pozorovat u knotu svíčky, savého papíru nebo u vlhkého zdiva. S kapilární elevací (vzlínavostí) se setkáváme i v přírodě. Voda vzlíná kapilárami rostlin.

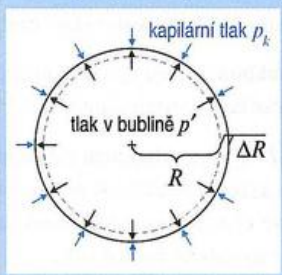
Odvození výšky vodního sloupce v kapiláře pro dokonale smáčivou kapalinu: Platí $\vartheta = 0°$, tedy velikost síly $\vec{F}$ působící podél celého vnitřního obvodu kapiláry je $F = F_p = \sigma l$, kde $l = 2\pi R$, R je poloměr kapiláry. Pak platí $F = \sigma \cdot 2\pi R$ a tato síla musí být rovna hydrostatické síle kapalinového sloupce v kapiláře F_h, kde $F_h = p \cdot S = h\rho g \cdot \pi R^2$, $p = h\rho g$ je hydrostatický tlak vodního sloupce v kapiláře, $S = \pi R^2$ je průřez kapiláry. Protože $F = F_h$, dosazením za F a F_h obdržíme vztah $\sigma \cdot 2\pi R = h\rho g \cdot \pi R^2$, tedy pro kapilární elevaci platí vztah $h = \dfrac{2\sigma}{R\rho g}$.

Odvození vztahu pro kapilární tlak: Tlak p' v bublině o poloměru R rovný kapilárnímu tlaku p_k vykoná při nepatrném zvětšení poloměru o hodnotu ΔR práci $\Delta W = p_k \cdot \Delta V$, kde ΔV je změna objemu V bubliny. Dosadíme-li za ΔV, obdržíme $\Delta W = p_k \cdot 4\pi R^2 \Delta R$. Povrchová energie E se vykonáním práce ΔW změní o hodnotu $\Delta E = \sigma \cdot \Delta S$, kde ΔS je změna povrchu. Dosadíme ΔS a obdržíme $\Delta E = \sigma \cdot 16\pi R \Delta R$. Protože $\Delta W = \Delta E$, musí platit $p_k \cdot 4\pi R^2 \Delta R = \sigma \cdot 16\pi R \Delta R$, odtud plyne pro kapilární tlak vztah $p_k = \dfrac{4\sigma}{R}$.

Vztah platí pro bublinu, která má dva povrchy – vnější a vnitřní. Pro kulovou kapku s jedním povrchem platí vztah $p_k = \dfrac{2\sigma}{R}$.

$$\Delta V = \frac{4}{3}\pi(R + \Delta R)^3 - \frac{4}{3}\pi R^3 \doteq 4\pi R^2 \Delta R$$

$$\Delta S = 2(4\pi(R + \Delta R)^2 - 4\pi R^2) \doteq 16\pi R \cdot \Delta R$$



S je součet vnitřní a vnější plochy povrchu bubliny.

Protože ΔR je nepatrné, ve výpočtu ΔV a ΔS byly zanedbány členy vyšších řádů obsahující $(\Delta R)^2$ a $(\Delta R)^3$.

Kapilární tlak

Sníženou hladinu, ve které se ustálí nesmáčivá kapalina v kapiláře, lze vysvětlit také kapilárním tlakem. Kapilární tlak pod půlkulovým povrchem kapaliny v kapiláře působí směrem dolů, proto kapalina v kapiláře musí být v takové hloubce h, aby se rozdíl hydrostatických tlaků Δp_h v nádobě a kapiláře vyrovnal kapilárnímu tlaku: $\Delta p_h = p_k$, tj. $h\rho g = \frac{2\sigma}{R}$.

Platí tedy: $h = \frac{2\sigma}{R\rho g}$. Vztah platí pouze pro půlkulový povrch, jehož poloměr křivosti je roven poloměru kapiláry, a platí pouze pro dokonale nesmáčivé kapaliny. Stejný vztah lze odvodit pro dokonale smáčivé kapaliny.

Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin

Pro **DÉLKOVOU TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST** pevných látek platí vztah: $\Delta d = d_0 \alpha \Delta T$, kde Δd je prodloužení tyče, ΔT je změna teploty, konstanta α je **TEPLOTNÍ SOUČINITEL DÉLKOVÉ ROZTAŽNOSTI** (str. 61). Délka tyče d po změně teploty ΔT je $d = d_0 (1 + \alpha \Delta T)$.

OBJEMOVÁ TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST pevných těles a kapalin je dána vztahem $\Delta V = V_0 \beta \Delta T$, kde V_0 je původní objem a β je **TEPLOTNÍ SOUČINITEL OBJEMOVÉ ROZTAŽNOSTI** (str. 61). Pro pevné izotropní látky je $\beta = 3\alpha$.
Objem V po změně teploty je pak $V = V_0 (1 + \beta \Delta T)$.

Důsledkem teplotní roztažnosti látek je závislost jejich hustoty na teplotě $\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T)$, kde ρ_0 je původní hustota při teplotě T_0, ρ je hustota při teplotě $T = T_0 + \Delta T$.

Krystalové mřížky pevných látek

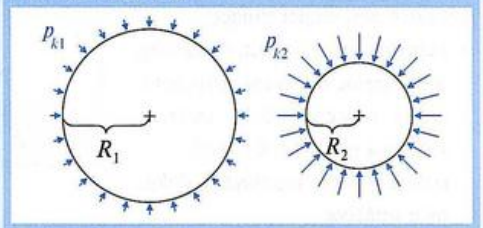
Podle uspořádání částic dělíme pevné látky na:

- **KRYSTALICKÉ**, charakterizovány pravidelným uspořádáním částic, které se buď periodicky opakuje, pak jsou to tzv. **MONOKRYSTALY**, nebo se vyskytuje v drobných krystalcích – zrnech, jejichž vzájemná poloha je však nahodilá, jsou to tzv. **POLYKRYSTALICKÉ LÁTKY**,
- **AMORFNÍ**, které postrádají pravidelné uspořádání částic.

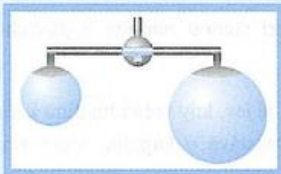
KRYSTALOVÁ MŘÍŽKA je struktura, kterou vytvářejí pravidelně uspořádané částice krystalické látky (atomy, ionty, molekuly).

KUBICKÁ KRYSTALOVÁ MŘÍŽKA je nejjednodušší základní buňka krystalické látky, má tvar krychle a může být prostá, plošně centrovaná nebo prostorově centrovaná, podle toho, jakým způsobem jsou v této buňce rozloženy částice látky.

KAPILÁRNÍ TLAK je nepřímo úměrný poloměru křivosti $R_1 > R_2 \Rightarrow p_{k1} < p_{k2}$



Nepůsobí-li na kapky kapaliny vnější síly (např. v beztížném stavu), pak kapilární tlak formuje povrch kapky do tvaru koule. Platí to i v případě, že vnější síly jsou ze všech stran stejné (kapky nemísící se s okolní kapalinou) anebo zanedbatelné (pro velmi malý objem kapky).

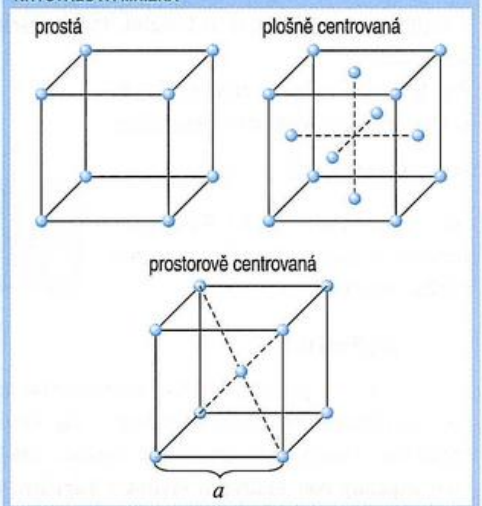


Nepřímou závislost **KAPILÁRNÍHO TLAKU** na poloměru křivosti demonstruje pokus podle obrázku.

Pokud obě bubliny spojíme, začne se zvětšovat větší bublina a menší se zmenšuje, až zanikne. V bublině o menším poloměru byl tedy větší tlak.

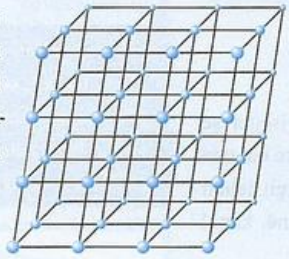
V závislosti hustoty na teplotě existuje výjimka, tzv. **ANOMÁLIE VODY**. Zahříváme-li vodu v intervalu od 0 °C do 3,98 °C, její hustota roste (str. 61).

KRYSTALOVÁ MŘÍŽKA



MŘÍŽKOVÝ PARAMETR a je délka hrany základní buňky. Velikost mřížkového parametru je několik desetin nanometru.

IDEÁLNÍ KRYSTALOVOU MŘÍŽKU získáme, jestliže základní buňku opakovaně posouváme podél prodloužených hran. Tím můžeme vytvořit krystal libovolných rozměrů.



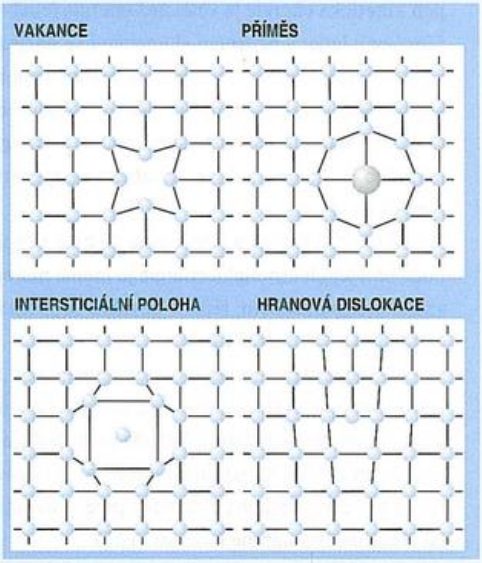
Monokrystalické látky jsou např. kamenná sůl, křemen, diamant. Polykrystalickou látkou je většina ostatních. Amorfní látkou je např. sklo, pryskyřice, jantar, vosk, asfalt.

Prostou kubickou mřížku má např. polonium alfa, plošně centrovanou mřížku má hliník, prostorově centrovanou má železo alfa.

Poruchy krystalové mřížky

V reálných krystalech není splněno pravidelné opakování základních buněk, krystal má ve struktuře poruchy. Mohou to být následující typy poruch:

- **VAKANCE**, což je porucha vzniklá neobsazením polohy částice v krystalové mřížce;
- **PŘÍMĚSI**, což jsou cizí částice, které se v krystalu vyskytují;
- **INTERSTICIÁLNÍ POLOHA**, což je porucha, kdy se částice nachází mimo pravidelný bod krystalové mřížky.



Deformace pevného tělesa

DEFORMACE pevného tělesa je změna jeho rozměrů, objemu a zpravidla také tvaru; nastává účinkem vnějších sil. Je-li těleso deformováno tlakem nebo tahem, je velikost síly pružnosti F_p rovna velikosti deformující síly F (více str. 57, 58).

NAPĚTÍ σ je definováno vztahem $\sigma = \frac{F_p}{S}$, kde F_p je velikost síly pružnosti působící kolmo na plochu příčného řezu o obsahu S.

NAPĚTÍ V TAHU (NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ) σ_n je napětí při deformaci tahem způsobené vnější silou $\vec{F}$, která je kolmá na průřez.

MEZ PRUŽNOSTI σ_E je největší hodnota normálového napětí, při kterém je deformace tahem (tlakem) ještě pružná.

MEZ PEVNOSTI σ_P je největší hodnota normálového napětí, při kterém se neporuší soudržnost materiálu.

HOOKŮV ZÁKON: Při pružné deformaci tahem je relativní prodloužení přímo úměrné normálovému napětí a platí: $\sigma_n = E \cdot \varepsilon$, kde E je **MODUL PRUŽNOSTI V TAHU**.

Vztah pro prodloužení: $\Delta d = \frac{d}{E \cdot S} F_p$.

OBJEMOVÁ DEFORMACE tělesa $\frac{\Delta V}{V}$ způsobená tlakem p okolní kapaliny je dána vztahem $p = K \frac{\Delta V}{V}$, kde K je **MODUL OBJEMOVÉ PRUŽNOSTI** (str. 58).

Deformace může být:

- **PRUŽNÁ** (elastická), jestliže se těleso vrátí k původnímu tvaru, jakmile přestanou působit vnější deformační síly,
- **TRVALÁ** (plastická), která trvá i po odstranění vnějších sil.

Materiály z hlediska pružnosti můžeme dělit na:

- **PRUŽNÉ (ELASTICKÉ) MATERIÁLY**, u nichž ani poměrně vysoké napětí nevyvolá trvalou deformaci (ocel);
- **PLASTICKÉ MATERIÁLY** se účinkem vnější síly deformují a podrží si deformovaný tvar;
- **KŘEHKÉ MATERIÁLY**, u nichž je mez pevnosti nižší než mez pružnosti a nemůže vzniknout trvalá deformace (sklo).

Nezaměňovat!

PEVNÉ TĚLESO je těleso z pevné látky, které je deformovatelné.

TUHÉ TĚLESO definujeme jako ideální těleso (myšlenkový model), jehož tvar ani objem se účinkem libovolně velkých sil nemění (str. 44).

3.5 Změny skupenství látek

SKUPENSTVÍ LÁTKY charakterizuje stav látky související se stupněm uspořádanosti částic (molekul, atomů, iontů) a závisí na vztahu mezi kinetickou energií částic a energií jejich vzájemného působení. Rozlišujeme skupenství plynné, kapalné, pevné a plazma.

- **SKUPENSTVÍ PLYNNÉ**, v němž se částice pohybují volně; jejich kinetická energie je větší než energie jejich vzájemného působení; látka v plynném skupenství se nazývá plyn.
- **SKUPENSTVÍ KAPALNÉ**, v němž se částice uspořádávají krátkodobě do shluků, které se mohou vzájemně pohybovat; kinetická energie částic je srovnatelná s energií jejich vzájemného působení; látka v kapalném skupenství se nazývá kapalina (str. 77).
- **SKUPENSTVÍ PEVNÉ**, v němž jsou částice uspořádány dlouhodobě a jejich kinetická energie je menší než energie jejich vzájemného působení; látka v pevném skupenství se nazývá pevná látka (str. 77).
- **PLAZMA** je ionizovaný plyn tvořený nosiči volného elektrického náboje (elektrony a ionty) a obvykle i neutrálními částicemi (atomy, molekulami). Plazma se vyznačuje kolektivním chováním elektricky nabitých částic, které v plazmatu tvoří různá seskupení, jejichž elektrická pole ovlivňují pohyb nosičů elektrického náboje (str. 121).

FÁZE je část termodynamické soustavy, která, nepůsobí-li vnější síly, má všude stejné fyzikální a chemické vlastnosti (např. stejnou hustotu, strukturu apod.) a od ostatních částí soustavy je oddělena ostrým rozhraním.

Tání, tuhnutí

TÁNÍ je přeměna pevné látky na kapalinu, která nastává při určité teplotě za daného vnějšího tlaku, přijímá-li látka teplo.

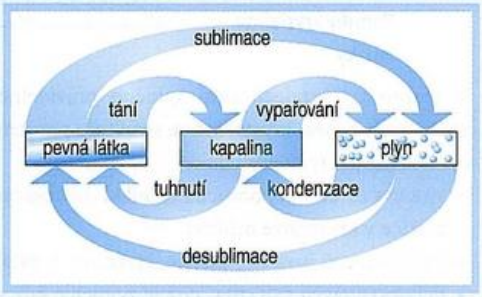
K tání dochází při určité teplotě, tzv. **TEPLOTĚ TÁNÍ**. Teplota tání látky závisí na tlaku okolního prostředí a druhu látky. Její hodnoty za normálního tlaku jsou uvedeny v tabulkách.

SKUPENSKÉ TEPLO TÁNÍ L_t je teplo, které přijme pevné těleso již zahřáté na bod tání, aby se změnilo na kapalinu téže teploty.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO TÁNÍ l_t je definováno vztahem $l_t = \frac{L_t}{m}$, kde L_t je skupenské teplo tání pevného tělesa o hmotnosti m. Platí tedy $L_t = m \cdot l_t$.

Osnova kapitoly:

- Skupenství látky, fáze
- Tání, tuhnutí, sublimace, desublimace
- Vypařování, kapalnění, var
- Pára, fázový diagram
- Vlhkost vzduchu, rosný bod

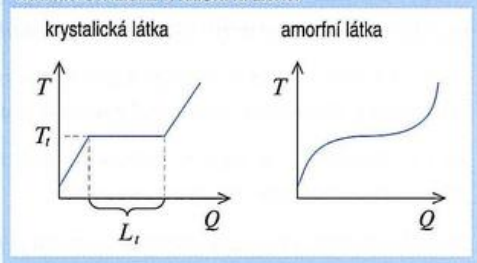


Slabě ionizovaný plyn proudící z tryskových motorů není plazma, neboť pohyb částic není ovládán silami elektromagnetickými, nýbrž hydrodynamickými.

PLAZMA se vyskytuje na Slunci, při termojaderné reakci, v horních vrstvách atmosféry Země, v elektrických výbojích apod.

FÁZE vody jsou led, voda a vodní pára; olej ve vodě tvoří soustavu dvou fází. Fáze nemusí být látka chemicky čistá, např. vodný roztok kuchyňské soli tvoří jednu fázi.

TÁNÍ KRYSTALICKÉ A AMORFNÍ LÁTKY



Dodáváme-li pevné krystalické látce teplo při stálém tlaku, zvyšuje se její teplota a po dosažení teploty tání T_t se přeměňuje na kapalinu téže teploty – krystalická látka taje. Teplota soustavy „pevná látka – kapalina" se nemění, dokud pevná látka neroztaje. Jakmile všechna krystalická látka roztaje a dál dodáváme teplo, začne teplota vzniklé kapaliny vzrůstat.

Dodáváme-li pevné amorfní látce teplo, zvyšuje se trvale její teplota a současně měkne, stává se tekutější, až se změní v kapalinu. Nemá určitou teplotu tání.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO TÁNÍ je teplo potřebné k roztavení 1 kg látky zahřáté na bod tání.

TUHNUTÍ je přeměna kapalného skupenství v pevné, jde tedy o děj opačný k tání. Teplota tuhnutí je shodná s teplotou tání. Vzniká-li přitom krystalická látka, jev nazýváme KRYSTALIZACE.

Při stejných podmínkách je měrné skupenské teplo tání a měrné skupenské teplo tuhnutí stejné.

Při tání je třeba teplo látce dodávat, při tuhnutí je naopak třeba teplo látce odnímat.

Sublimace, desublimace

SUBLIMACE je přeměna pevného skupenství látky přímo na plynné. Opačný proces k sublimaci, tj. přeměnu plynného skupenství na pevné, nazýváme DESUBLIMACE.

SKUPENSKÉ TEPLO SUBLIMACE L_s je teplo přijaté pevným tělesem při jeho sublimaci za dané teploty.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO SUBLIMACE l_s je definováno vztahem $l_s = \frac{L_s}{m}$, kde L_s je skupenské teplo tělesa o hmotnosti m.

Měrné skupenské teplo sublimace závisí na teplotě a najdeme ho pro různé látky v tabulkách.

Vypařování, kapalnění

VYPAŘOVÁNÍ je přeměna kapalného skupenství na plynné, tj. přeměna kapaliny na páru, která se děje za každé teploty, při níž kapalné skupenství existuje.

SKUPENSKÉ TEPLO VYPAŘOVÁNÍ L_v je teplo, které musí kapalina přijmout, aby se změnila na páru téže teploty.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO VYPAŘOVÁNÍ je definováno vztahem $l_v = \frac{L_v}{m}$, kde L_v je skupenské teplo vypařování kapaliny o hmotnosti m. Platí tedy $L_v = m \cdot l_v$.

KAPALNĚNÍ (KONDENZACE) je obrácený děj k vypařování, tj. přeměna plynného skupenství na kapalné.

SKUPENSKÉ TEPLO KONDENZAČNÍ uvolňuje látka při kondenzaci (kapalnění). Měrné skupenské teplo kondenzační je rovno měrnému skupenskému teplu vypařování téže látky při téže teplotě.

Je-li kapalina v uzavřené nádobě, vypařuje se tak dlouho, až se vytvoří rovnovážný stav mezi kapalinou a vzniklou párou.

JEDNOTKOU SKUPENSKÉHO TEPLA je JOULE (J).
JEDNOTKOU MĚRNÉHO SKUPENSKÉHO TEPLA je $J \cdot kg^{-1}$.

TEPLOTA TÁNÍ některých látek za normálního tlaku: pro rtuť –38,8 °C, led 0 °C, pro olovo 327,3 °C, pro železo 1 535 °C. Teplota tání látek se snižuje přimísením jiných látek. Některé slitiny mají nižší bod tání než jejich složky (např. klempířská pájka).

Měrné skupenské teplo tání pro olovo je $l_t = 22{,}6\ kJ \cdot kg^{-1}$, pro led je $332{,}4\ kJ \cdot kg^{-1}$.

Většina látek při **TÁNÍ** zvětšuje svůj objem a při **TUHNUTÍ** ho zmenšuje. Výjimku tvoří např. led, který při tání svůj objem zmenšuje, voda při tuhnutí svůj objem zvětšuje (asi o 9 %).

Podobně u většiny látek roste při zvýšení tlaku i teplota tání. U ledu je to naopak, teplota tání se při zvýšeném tlaku sníží; pozorujeme, že led pod tlakem taje (křivka tání, str. 90).

Za běžného atmosférického tlaku sublimuje např. jod, kafr, pevný oxid uhličitý, led a vlastně všechny vonící nebo zapáchající látky. Měrné skupenské teplo sublimace pro vodní led při teplotě 0 °C je $l_s = 2{,}8\ MJ \cdot kg^{-1}$.

VYPAŘOVÁNÍ: Má-li kapalina volný povrch, vyletují nejrychlejší molekuly do okolí, tj. kapalina se vypařuje, mění se v páru. V kapalině zůstávají molekuly s menší pohybovou energií, takže její teplota klesá, pokud nedodáváme kapalině energii. Rychlost vypařování roste s teplotou, velikostí povrchu kapaliny a při odstraňování par (např. větrem).

Pokles teploty při vypařování pocítí každý, kdo má mokré tělo a osychá. Zvláště patrné je to na větru, který vypařování urychluje.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO VYPAŘOVÁNÍ závisí na teplotě. S rostoucí teplotou klesá, protože při vyšší teplotě mají molekuly již větší energii a k jejich vypaření je zapotřebí méně tepla. Hodnoty najdeme v tabulkách.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO vypařování pro vodu:
při 0 °C je $l_v = 2{,}51\ MJ \cdot kg^{-1}$,
při 100 °C je $l_v = 2{,}25\ MJ \cdot kg^{-1}$.

Var

VAR je jev, při kterém se kapalina vypařuje nejen na svém volném povrchu (jako u vypařování), ale také uvnitř svého objemu. Přijímá-li kapalina teplo, var nastává při určité teplotě, tzv. **TEPLOTĚ VARU**, a projevuje se vytvářením bublin syté páry uvnitř kapaliny, které se postupně zvětšují a vystupují k volnému povrchu. Teplota varu roste s vnějším tlakem.

MĚRNÉ SKUPENSKÉ TEPLO VARU se rovná měrnému skupenskému teplu vypařování při teplotě varu dané kapaliny.

Při **TEPLOTĚ VARU** se tlak sytých par uvnitř vznikajících bublin rovná tlaku plynu nad volným povrchem kapaliny (při zanedbání kapilárního a hydrostatického tlaku), pára uvnitř se volně rozpíná a bubliny stoupají k hladině.

Při normálním tlaku (asi 0,1 MPa) vře voda při 100 °C, při vnějším tlaku 0,2 MPa vře voda asi při 120 °C. Toho je využito např. u Papinova hrnce, v němž při zvyšování teploty roste tlak a tedy i teplota varu.

Pára

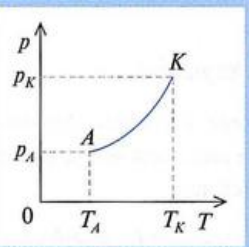
SYTÁ PÁRA je pára, která je v rovnovážném stavu se svou kapalinou. Vzniká v uzavřeném prostoru nad kapalinou.

Tlak syté páry je určen jen teplotou, nikoli jejím objemem. Zmenšujeme-li objem syté páry při stálé teplotě a tlaku, sytá pára kondenzuje v kapalinu - kapalní. Naopak při zvětšování objemu za stálé teploty a tlaku se kapalina vypařuje. Pro sytou páru v termodynamické rovnováze se svou kapalinou neplatí Boyle-Mariottův zákon.

S rostoucí teplotou tlak syté páry roste. Tuto závislost vyjadřuje **KŘIVKA SYTÉ PÁRY**: A je počáteční bod křivky, přísluší mu nejmenší hodnota teploty T_A a tlaku p_A, při kterých ještě existuje kapalina a sytá pára v dynamické rovnováze. K je tzv. **KRITICKÝ BOD**, jemuž odpovídá kritická teplota T_k a kritický tlak p_k (také kritická hustota ρ_k), v tomto stavu mizí rozdíl mezi kapalinou a sytou párou.

Vypařuje-li se kapalina v uzavřené nádobě, přestane se po určité době objem kapaliny zmenšovat a objem páry zvětšovat a vytvoří se mezi nimi rovnovážný stav, tj. stav dynamické rovnováhy, kdy počet molekul opouštějících kapalinu za jednotku času je stejný jako počet molekul, které se do ní vracejí za jednotku času.

KŘIVKA SYTÉ PÁRY



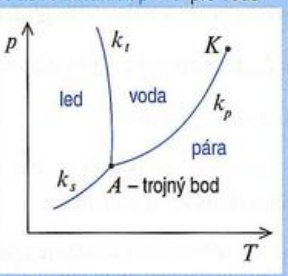
Hodnoty kritických veličin pro vodu:
$T_K = 647{,}3\ \mathrm{K}$,
$p_K = 22{,}13\ \mathrm{MPa}$,
$\rho_K = 315\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

Fázový diagram

FÁZOVÝ DIAGRAM je grafické vyjádření závislosti mezi veličinami určujícími rovnovážný stav soustavy (teplota, tlak, hustota atd.). **FÁZOVÝ DIAGRAM** $p-T$ obsahuje tři křivky, které vyjadřují termodynamickou rovnováhu dvou fází (p je tlak, T teplota). Na fázovém diagramu $p-T$ vody **KŘIVKA SYTÉ PÁRY** (křivka vypařování) k_p znázorňuje rovnovážnou koexistenci kapalného a plynného skupenství téže látky. **KŘIVKA TÁNÍ** k_t znázorňuje rovnovážnou koexistenci kapalné a pevné fáze téže látky. **KŘIVKA SUBLIMAČNÍ** k_s znázorňuje rovnovážnou koexistenci pevného a plynného skupenství téže látky.

TROJNÝ BOD je společný bod křivky syté páry, křivky tání a křivky sublimační a charakterizuje stav látky, v němž pevné, kapalné a plynné skupenství téže látky jsou v termodynamické rovnováze a mohou vedle sebe nezměněně existovat.

FÁZOVÝ DIAGRAM $p-T$ pro vodu



KŘIVKA SYTÉ PÁRY k_p začíná trojným bodem A a končí kritickým bodem K. **KŘIVKA TÁNÍ** k_t začíná bodem A a pravděpodobně nemá ukončení.

Pro vodu má zápornou směrnici, protože teplota tání ledu s rostoucím tlakem klesá. **KŘIVKA SUBLIMAČNÍ** k_s končí **TROJNÝM BODEM** A, který je určen tlakem 611 Pa a teplotou 273,16 K.

PŘEHŘÁTÁ PÁRA vznikne ze syté páry za nepřítomnosti kapaliny buď zvětšením objemu, nebo zvýšením teploty. Přehřátá pára má nižší tlak a hustotu než sytá pára téže teploty a chová se podobně jako ideální plyn. Ve fázovém diagramu $p - T$ je přehřátá pára napravo od křivky syté páry. Přehřátá pára nemůže rovnovážně koexistovat s kapalnou fází.

PODCHLAZENÁ PÁRA (přesycená pára) vznikne ze syté páry za nepřítomnosti kapaliny buď stlačováním, nebo ochlazováním v případě, že neobsahuje kondenzační jádra (prachové nebo elektricky nabité částice). Přesycená pára má vyšší tlak a hustotu než sytá pára téže teploty. Její stav je nestabilní a po přidání kondenzačních částic rychle kondenzuje.

Vznik **PŘEHŘÁTÉ PÁRY** zvětšením objemu

Vlhkost vzduchu, rosný bod

ABSOLUTNÍ VLHKOST VZDUCHU ϕ je veličina definovaná vztahem $\phi = \frac{m}{V}$, kde m je hmotnost vodní páry obsažené ve vzduchu o objemu V.

ABSOLUTNÍ VLHKOST vzduchu je hustota vodní páry ve vzduchu. **JEDNOTKOU ABSOLUTNÍ VLHKOSTI** je $kg \cdot m^{-3}$.

RELATIVNÍ (POMĚRNÁ) VLHKOST VZDUCHU φ je definována vztahem $\varphi = \frac{\phi}{\phi_m}$, kde ϕ je absolutní vlhkost vzduchu při dané teplotě a ϕ_m je absolutní vlhkost vzduchu nasyceného vodní párou, tj. hustota syté vodní páry ve vzduchu při téže teplotě.

RELATIVNÍ VLHKOST se udává v procentech a měří se vlhkoměry. Nejznámější je vlhkoměr vlasový, který je založen na skutečnosti, že lidský vlas mění délku při změně vlhkosti vzduchu.

Úplně suchý vzduch má relativní vlhkost 0 %. Vzduch, který obsahuje sytou vodní páru, má relativní vlhkost 100 %.

Pro **RELATIVNÍ VLHKOST** také platí $\varphi = \frac{p}{p_0}$, kde p je skutečný tlak vodní páry a p_0 je tlak syté vodní páry při téže teplotě.

ROSNÝ BOD je stav, při kterém se vodní páry obsažené ve vzduchu stávají při dosažení tzv. **TEPLOTY ROSNÉHO BODU** sytými a při dalším snížení teploty začnou kapalnět.

TEPLOTA ROSNÉHO BODU je teplota, na kterou se musí vzduch izobaricky ochladit, aby se vodní pára v něm obsažená stala sytou.

Př. 1

Vypočítej teplo potřebné k roztavení 600 g olova teploty 25 °C, je-li měrná tepelná kapacita olova 126 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, jeho měrné skupenské teplo tání 22,6 $kJ \cdot kg^{-1}$ a teplota tání olova 327,3 °C.

$m = 600\ g = 0{,}6\ kg;\ t_1 = 25\ °C;\ c = 126\ J \cdot kg \cdot K^{-1};\ l_t = 22{,}6\ kJ \cdot kg^{-1} = 22\ 600\ J \cdot kg^{-1};\ t_2 = 327{,}3\ °C$

$Q = Q' + L_t;\ Q' = mc\Delta t,\ L_t = m \cdot l_t;\ Q = mc\Delta t + ml_t$

$\{Q\} = 0{,}6 \cdot 126 \cdot (327{,}3 - 25) + 0{,}6 \cdot 22\ 600 = 36\ 413{,}9$

$Q = 36\ 413{,}9\ J = 36{,}4\ kJ$

K roztavení 600 g olova je třeba 36,4 kJ tepla.

- Nejprve je třeba dodat teplo potřebné k zahřátí na bod tání Q', pak skupenské teplo tání L_t. Celkem je tedy třeba teplo $Q = Q' + L_t$.

Př. 2

Vypočítej teplo, které přijme voda o hmotnosti 2 kg a teplotě 20 °C, je-li uvedena do varu za normálního tlaku a během varu se vypaří vodní pára o hmotnosti 0,15 kg.

$\Delta t = 80\ °C = 80\ K;\ l_v = 2{,}25\ MJ \cdot kg^{-1} = 2{,}25 \cdot 10^6\ J \cdot kg^{-1};\ c = 4{,}2\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} = 4{,}2 \cdot 10^3\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1};$
$m_1 = 2\ kg;\ m_2 = 0{,}15\ kg$

$Q = Q' + L_v;\ Q' = mc\Delta t,\ L_v = m \cdot l_v;\ Q = m_1 c\Delta t + m_2 l_v$

$\{Q\} = 2 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 80 + 0{,}15 \cdot 2{,}25 \cdot 10^6 = 1\ 009\ 500$

$Q = 1\ 009\ 500\ J$

Potřebné teplo je asi 1 MJ.

- Nejprve je třeba dodat teplo potřebné k zahřátí na bod varu Q', pak skupenské teplo vypařování L_v. Celkem je tedy třeba teplo $Q = Q' + L_v$.

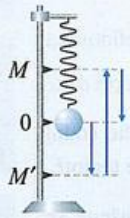
4.1 Mechanické kmitání

MECHANICKÉ KMITÁNÍ je pohyb, v mechanice zvaný též **KMITAVÝ POHYB**, při němž se těleso (popř. hmotný bod) nebo element kontinua (str. 57) střídavě vychyluje v různých směrech od své rovnovážné polohy. Charakteristickým znakem mechanického kmitání je, že veličiny, kterými kmitání popisujeme, se s časem mění a tyto změny jsou převážně periodické. Mechanické kmity nazýváme též **OSCILACE**.

MECHANICKÝ OSCILÁTOR je mechanická soustava, která vykonává kmitavý pohyb. Je-li oscilátorem těleso, pak veličiny popisují kmitání těžiště tělesa anebo některého jiného vybraného bodu (např. u tyče upevněné na jednom konci).

Názvem **OSCILÁTOR** se označuje také soustava, ve které se uskutečňuje kmitání jiné fyzikální povahy než mechanické (např. kmity v elektrickém obvodu).

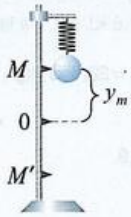
PERIODICKÝ KMITAVÝ POHYB je pohyb s periodickým průběhem charakterizovaný veličinami, které se v čase periodicky mění. Děj, v jehož průběhu se tyto veličiny vrátí k původním hodnotám, je jeden kmit. **PERIODA** (doba kmitu) T kmitavého pohybu je doba, za kterou těžiště oscilátoru vykoná jeden kmit.



FREKVENCE kmitavého pohybu je počet kmitů, které těžiště oscilátoru vykoná za jednotku času. Frekvence je převrácenou hodnotou periody, tj. $f = \frac{1}{T}$.

VÝCHYLKA neboli **OKAMŽITÁ VÝCHYLKA** y je okamžitá vzdálenost těžiště oscilátoru od jeho rovnovážné polohy.

AMPLITUDA y_m kmitavého pohybu je maximální výchylka těžiště oscilátoru z rovnovážné polohy.



Kmitá-li těžiště oscilátoru po přímce, jde o **PŘÍMOČARÝ KMITAVÝ POHYB**.

ČASOVÝ DIAGRAM kmitavého pohybu vyjadřuje závislost okamžité výchylky na čase.

Kmitání mechanického oscilátoru může být:

- **NETLUMENÉ**, jestliže se amplituda kmitavého pohybu nemění v průběhu kmitání (nepůsobí žádné brzdicí síly),
- **TLUMENÉ**, jestliže se amplituda kmitání zmenšuje (vlivem třecí síly, odporu prostředí).

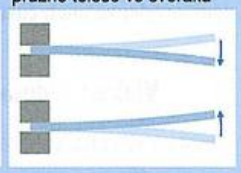
Osnova kapitoly:

- Mechanické kmitání, mechanický oscilátor, oscilace
- Harmonické kmitání, rovnice harmonického pohybu
- Skládání kmitavých pohybů
- Dynamika harmonického pohybu
- Kyvadlo
- Přeměny energie v mechanickém oscilátoru
- Nucené kmitání, rezonance

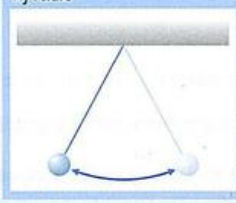
MECHANICKÉ OSCILÁTORY

kulička v důlku

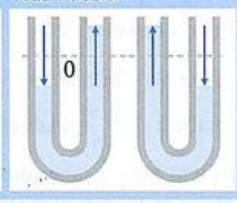
pružné těleso ve svěráku



kyvadlo

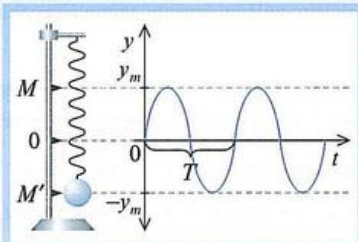


voda v trubici

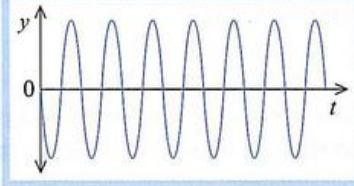


JEDNOTKOU PERIODY je sekunda.

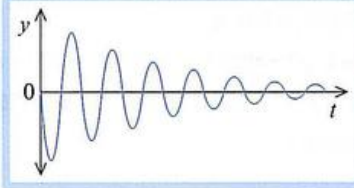
JEDNOTKOU FREKVENCE je **HERTZ** (Hz), $1\,\text{Hz} = 1\,\text{s}^{-1}$.



Časový diagram **KMITAVÉHO POHYBU**



Časový diagram **NETLUMENÉHO KMITÁNÍ**



Časový diagram **TLUMENÉHO KMITÁNÍ**

Harmonické kmitání, rovnice harmonického pohybu

HARMONICKÉ KMITÁNÍ, též JEDNODUCHÝ HARMONICKÝ POHYB (krátce HARMONICKÝ POHYB), je přímočarý kmitavý pohyb hmotného bodu (popř. těžiště tělesa), při němž se okamžitá výchylka y mění s časem podle funkce sinus:
$y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, popř. kosinus:
$y = y_m \cos(\omega t + \varphi_0)$.

FÁZE KMITAVÉHO POHYBU je $\varphi = \omega t + \varphi_0$, kde ω je ÚHLOVÁ FREKVENCE kmitavého pohybu, t je čas, φ_0 je POČÁTEČNÍ FÁZE kmitavého pohybu v čase $t = 0$ (jestliže mechanický oscilátor v čase $t = 0$ neprochází rovnovážnou polohou), y_m je AMPLITUDA kmitavého pohybu.

Pro úhlovou frekvenci kmitavého pohybu ω platí $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$.

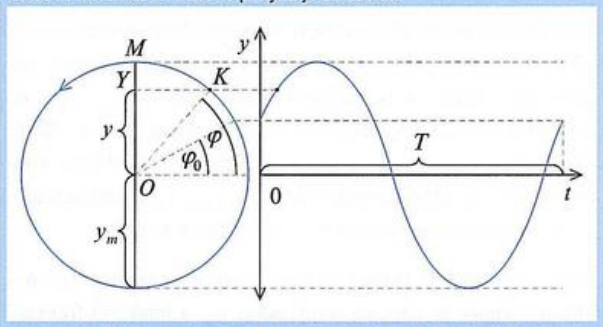
ROVNICÍ HARMONICKÉHO POHYBU se nazývá vztah $y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$.

Okamžitá hodnota RYCHLOSTI HARMONICKÉHO KMITAVÉHO POHYBU je dána vztahem
$v = \omega y_m \cos(\omega t + \varphi_0)$.

Maximální hodnota okamžité rychlosti je určena vztahem $v_m = \omega y_m$.

Okamžitá hodnota ZRYCHLENÍ HARMONICKÉHO KMITAVÉHO POHYBU je dána vztahem:
$a = -\omega^2 y_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 y$.

ČASOVÝ DIAGRAM kmitavého pohybu je sinusoida.



Rovnoměrný pohyb po kružnici a harmonický kmitavý pohyb spolu souvisejí, a to následujícím způsobem:

Při rovnoměrném pohybu bodu po kružnici se kolmý průmět okamžitých poloh na osu y jeví jako kmitavý pohyb. Z trojúhelníku OKY plyne: $y = |OK| \sin\varphi$, kde φ je úhlová dráha kruhového pohybu a současně fáze kmitavého pohybu. Protože platí $|OK| = y_m$, $\varphi = \omega t + \varphi_0$, dosazením do vztahu pro y obdržíme rovnici harmonického pohybu.

Analogické veličiny: pohyb po kružnici – kmitavý pohyb
úhlová dráha φ – fáze $\varphi = \omega t + \varphi_0$
úhlová rychlost ω – úhlová frekvence ω

JEDNOTKOU ÚHLOVÉ FREKVENCE je 1 rad · s^{-1},
JEDNOTKOU FÁZE KMITAVÉHO POHYBU je 1 rad.

OKAMŽITOU RYCHLOST v kmitavého harmonického pohybu dostaneme derivací rovnice $y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ podle času,
tj. $v = \frac{dy}{dt} = \omega y_m \cos(\omega t + \varphi_0)$.

ZRYCHLENÍ kmitavého harmonického pohybu:
$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 y_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 y$.

Př. 1

Hmotný bod kmitá harmonicky s amplitudou 50 mm, periodou 4 s a počáteční fází $\frac{\pi}{4}$. Urči okamžitou výchylku bodu v čase 0 s a 1,5 s. Nakresli časový diagram pohybu.

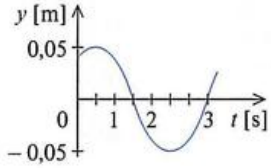
$y_m = 50\ \text{mm} = 0{,}05\ \text{m};\ T = 4\ \text{s};\ \varphi_0 = \frac{\pi}{4};\ t_1 = 0\ \text{s};\ t_2 = 1{,}5\ \text{s};\ y_1 = ?;\ y_2 = ?$

$y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0) = y_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_0\right)$

$y = 0{,}05 \sin\left(\frac{\pi}{2} t + \frac{\pi}{4}\right)\text{m}$

$t = 0\ \text{s} \Rightarrow y_1 = 0{,}05 \sin\left(0 + \frac{\pi}{4}\right)\text{m} = 0{,}035\ \text{m}$

$t = 1{,}5\ \text{s} \Rightarrow y = 0{,}05 \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1{,}5 + \frac{\pi}{4}\right)\text{m} = 0{,}05 \sin\pi\ \text{m} = 0\ \text{m}$



- Do obecné rovnice harmonického pohybu dosadíme nejprve za úhlovou frekvenci $\omega = \frac{2\pi}{T}$ a pak rovnici vyčíslíme. Získáme tak rovnici pro daný kmitavý pohyb, podle které nakreslíme časový diagram.

Okamžitá výchylka hmotného bodu v čase 0 s je 0,035 m a v čase 1,5 s je 0 m.

Skládání kmitavých pohybů

Pro skládání kmitů platí **PRINCIP SUPERPOZICE**: Jestliže hmotný bod koná současně několik harmonických kmitavých pohybů téhož směru s okamžitými výchylkami $y_1, y_2, ..., y_k$, je okamžitá výchylka výsledného kmitání rovna součtu všech výchylek, tj. $y = y_1 + y_2 + ... + y_k$. Průběh výsledného kmitání závisí na amplitudách výchylek y_{m1}, y_{m2}, frekvencích f_1, f_2 a počátečních fázích $\varphi_{01}, \varphi_{02}$ dílčích kmitání.

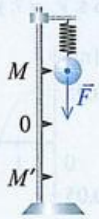
RÁZY jsou zvláštní případ kmitání složeného ze dvou harmonických kmitů se stejnou amplitudou y_m a blízkými frekvencemi f_1, f_2 ($f_1 < f_2$, odpovídající úhlové frekvence jsou ω_1, ω_2). Průběh rázů je blízký harmonickému průběhu kmitání s pomalu se měnící amplitudou $y_r = |2y_m \cos(\Delta\omega t)|$, kde $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ (zvukové rázy, str. 102).

Perioda rázů je $T_r = \dfrac{\pi}{\Delta\omega}$, frekvence rázů je $f = f_2 - f_1$.

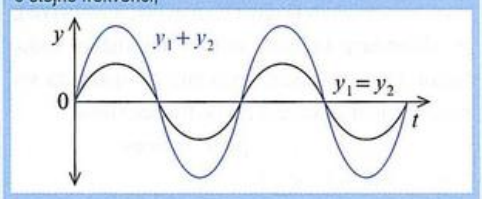
Dynamika harmonického pohybu

Podle 2. NPZ, tedy vztahu $\vec{F} = m\vec{a}$, je síla, která způsobuje harmonické kmitání, rovna $\vec{F} = -m\omega^2 \vec{y}$. Tato rovnice se nazývá **POHYBOVÁ ROVNICE HARMONICKÉHO POHYBU**, kde m je hmotnost harmonického pružinového oscilátoru (např. hmotnost koule, přičemž hmotnost pružiny je zanedbatelná). Příčinou harmonického kmitání pružinového oscilátoru je síla $\vec{F}$, jejíž velikost je přímo úměrná okamžité výchylce y oscilátoru a směřuje vždy do rovnovážné polohy: $\vec{F} = -k\vec{y}$, kde k je tuhost pružiny (str. 35, 58). Působením této síly vzniká **VLASTNÍ KMITÁNÍ MECHANICKÉHO OSCILÁTORU**. Porovnáním této síly s pohybovou rovnicí, tj. $-ky = -m\omega^2 y$, odvodíme vztah pro **VLASTNÍ ÚHLOVOU FREKVENCI** ω_0 mechanického oscilátoru, tedy $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$.

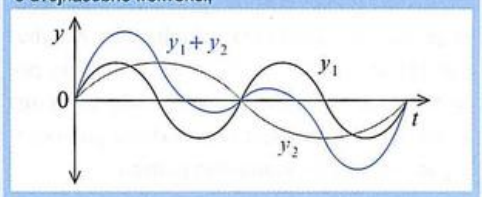
Ze vztahu pro úhlovou frekvenci $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi f$ odvodíme vztah pro **PERIODU VLASTNÍHO KMITÁNÍ** pružinového oscilátoru $T_0 = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$ a také pro **FREKVENCI VLASTNÍHO KMITÁNÍ** pružinového oscilátoru $f_0 = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}}$.



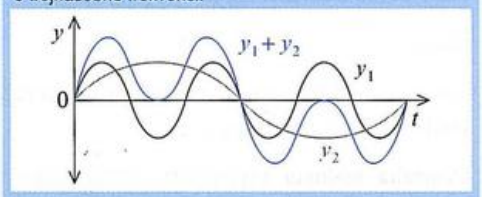
Skládání dvou kmitů stejné amplitudy:
$y_1 = y_m \sin(\omega_1 t + \varphi_{01})$,
$y_2 = y_m \sin(\omega_2 t + \varphi_{02})$, $\varphi_{01} = \varphi_{02} = 0$,
o stejné frekvenci,



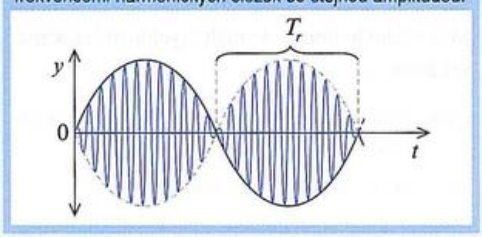
o dvojnásobné frekvenci,



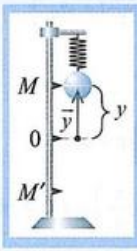
o trojnásobné frekvenci.



RÁZY – časový diagram složeného kmitání s blízkými frekvencemi harmonických složek se stejnou amplitudou.



Vztahy pro vlastní úhlovou frekvenci, periodu vlastního kmitání a frekvenci vlastního kmitání platí obecně pro jakýkoliv mechanický oscilátor, u něhož je velikost síly F úměrná okamžité výchylce: $F = -ky$.



Velikost vektoru $\vec{y}$ je rovna absolutní hodnotě okamžité výchylky y a směr vektoru má směr okamžité výchylky.

Kyvadlo

KYVADLO je těleso zavěšené nad těžištěm, které se může volně otáčet kolem vodorovné osy procházející bodem závěsu kolmo k rovině kmitání.

MATEMATICKÉ KYVADLO je model kyvadla tvořený malým tělesem (hmotným bodem) zavěšeným na pevném vlákně zanedbatelné hmotnosti pro úhel vychýlení $\alpha \leq 5°$.

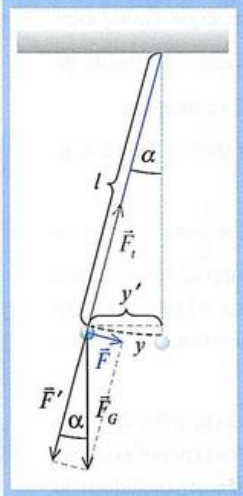
ÚHLOVÁ FREKVENCE ω, **PERIODA** T_0 a **FREKVENCE** f_0 vlastního kmitání matematického kyvadla jsou veličiny, které závisejí pouze na délce kyvadla l a tíhovém zrychlení g a jsou dány vztahy:

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

KYVADLO se užívá např. při měření času, protože periodu kmitání lze snadno nastavit změnou délky kyvadla.

Vlastní kmitání oscilátoru je vždy tlumené (vlivem třecích sil, odporu prostředí, ztrát energie při deformaci pružiny apod.). Netlumené harmonické kmitání je tedy určitou fyzikální abstrakcí.

MODEL MATEMATICKÉHO KYVADLA



Harmonické kmitání je přímočarý pohyb. Aby tato podmínka byla (přibližně) splněna u modelu matematického kyvadla, musí být výchylka z rovnovážné polohy malá. Je-li úhel vychýlení $\alpha \leq 5°$, je možno pohyb kyvadla považovat za harmonické kmitání.

$\vec{F}_G$ – tíhová síla,
$\vec{F}$ – pohybová složka tíhové síly (příčina kmitavého pohybu),
l – délka kyvadla,
α – úhel vychýlení,
$\vec{F}_t$ – tah vlákna kompenzující složku $\vec{F}'$.

Odvození vztahů pro periodu a frekvenci vlastního kmitání matematického kyvadla:

Z obrázku je zřejmé, že $y' = l \sin\alpha$, $F = F_G \sin\alpha = mg \sin\alpha$. Pro malé úhly je možno y' položit rovno y, kde y je výchylka kyvadla. Dosadíme-li do vztahu $F = mg \sin\alpha$ za $\sin\alpha = \frac{y}{l}$, obdržíme přímou úměrnost $F = \frac{mg}{l}|y|$ neboli $\vec{F} = -k\vec{y}$, kde $k = \frac{mg}{l}$. Dosadíme-li za k do vztahů pro periodu a frekvenci oscilátoru, obdržíme vztahy: $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$.

Př. 3

V kabině výtahu visí kyvadlo, které kmitá s periodou 1 s. Když se kabina pohybuje se stálým zrychlením, kyvadlo kmitá s periodou 1,2 s. Urči velikost zrychlení a směr pohybu kabiny.

$T_0 = 1\,\text{s}$; $T = 1{,}2\,\text{s}$; $a = ?$

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 1\,\text{s}$$

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

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g-a}\cdot\frac{g}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\cdot\sqrt{\frac{g}{g-a}} = T_0\sqrt{\frac{g}{g-a}} = 1\cdot\sqrt{\frac{g}{g-a}} \Rightarrow T = \sqrt{\frac{g}{g-a}}$$

$$T^2 = \frac{g}{g-a} \Rightarrow g - a = \frac{g}{T^2} \Rightarrow a = g - \frac{g}{T^2}$$

$$a = 9{,}81 - \frac{9{,}81}{1{,}2^2}\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2} = 3\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$

- Pokud se výtah pohybuje se zrychlením a kyvadlo pak kmitá s periodou 1,2 s, tedy větší, pohybuje se směrem dolů, protože v tomto případě na kyvadlo působí menší výsledná síla $F = mg - ma$, výsledné zrychlení je pak $g - a$.

Výtah jede se stálým zrychlením asi $3\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ směrem dolů.

Přeměny energie v mechanickém oscilátoru

Vhodným příkladem mechanického oscilátoru je pružinový oscilátor (str. 92). Zde se kinetická energie kmitajícího závaží $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ mění na potenciální energii pružnosti deformované pružiny $E_p = \frac{1}{2}ky^2$ (str. 35) a naopak,

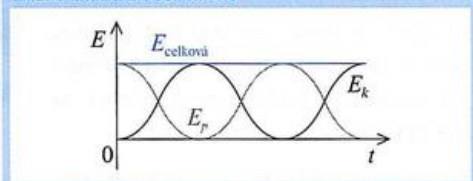
kde m je hmotnost závaží, v je jeho okamžitá rychlost, k je tuhost pružiny, y je výchylka.

Největší kinetickou energii $E_{k\,\max} = \frac{1}{2}mv_m^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 y_m^2$ má závaží oscilátoru tehdy, když prochází rovnovážnou polohou, kdy má i největší rychlost $v_m = \omega y_m$ (str. 93), y_m je amplituda kmitů. Potenciální energie pružnosti je v tomto okamžiku nulová.

Naopak v krajní poloze oscilátoru, tzn. když výchylka dosáhne amplitudy y_m, je jeho kinetická energie nulová (neboť rychlost je rovna nule) a potenciální energie pružnosti oscilátoru je největší $E_{p\,\max} = \frac{1}{2}ky_m^2$.

Při harmonickém pohybu se periodicky mění potenciální energie oscilátoru v energii kinetickou a naopak. Celková energie oscilátoru je konstantní a je v každém okamžiku rovna součtu energie kinetické a potenciální, pokud zanedbáváme tření, tj. ztráty energie. U reálného oscilátoru se amplituda výchylky postupně zmenšuje, až volné kmitání zanikne. Příčinou jsou přeměny mechanické energie oscilátoru v jinou formu energie.

ZMĚNY ENERGIE OSCILÁTORU



$E_k = \frac{1}{2}mv^2$ je kinetická energie pružinového oscilátoru,

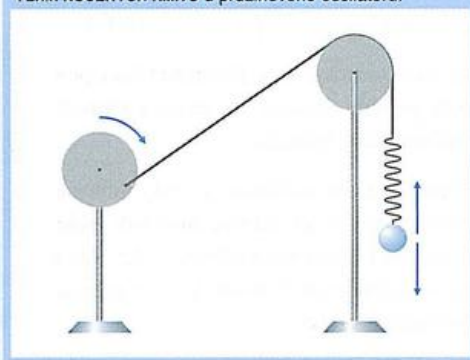
$E_p = \frac{1}{2}ky^2$ je jeho potenciální energie.

Pro celkovou energii oscilátoru platí:

$E_{celk} = E_p + E_k = E_{p\,max} = E_{k\,max} = \text{konst.}$

Vztah platí, zanedbáváme-li ztráty energie, tedy kmitání je netlumené.

Vznik **NUCENÝCH KMITŮ** u pružinového oscilátoru.



Nucené kmitání, rezonance

NUCENÉ KMITÁNÍ vzniká působením vnější periodické síly na mechanický oscilátor. Frekvence kmitů je pak shodná s frekvencí působící síly a kmitání oscilátoru je netlumené. Je-li frekvence vnější síly značně odlišná od vlastní frekvence oscilátoru, je amplituda výchylky nucených kmitů malá.

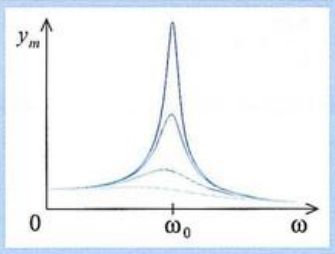
REZONANCE nastává, jestliže je úhlová frekvence ω nucených kmitů shodná s frekvencí ω_0 vlastních kmitů oscilátoru. Amplituda kmitů pak dosáhne největší hodnoty a dochází k **REZONANČNÍMU ZESÍLENÍ** nucených kmitů. Malou, periodicky působící silou lze v oscilátoru vzbudit kmitání o značné amplitudě výchylky, pokud je frekvence vnějšího působení shodná s frekvencí vlastního kmitání oscilátoru.

REZONANČNÍ KŘIVKA je graf, který vyjadřuje závislost amplitudy výchylky y_m nuceného kmitání na jeho úhlové frekvenci ω. Rezonanční křivky na obr. ukazují různá tlumení mechanického oscilátoru. Čím je tlumení menší, tím je křivka vyšší, tj. amplituda kmitání je větší.

Nucené kmity vzniknou např., jestliže rozkmitáváme pružinový oscilátor nebo kyvadlo rukou, mechanickým působením apod.

REZONANCÍ dochází např. k rozkmitání:

- rezonančních desek hudebních nástrojů,
- částí strojů při rotaci strojů,
- mostu při pochodu vojenského útvaru přes most,
- oken při přeletu letadla,
- struny hudebního nástroje od tónu vydávaného jiným zdrojem o kmitočtu, na nějž je struna naladěna.



REZONANČNÍ KŘIVKY mechanického oscilátoru s různým tlumením.

4.2 Mechanické vlnění

Definice a druhy vlnění

MECHANICKÉ VLNĚNÍ je děj, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím. Toto prostředí je složeno z velkého množství částic, mezi nimiž existuje vazba, a nucené kmitání jedné částice se postupně přenáší na další částice. Částice prostředí se nepřemísťují v prostoru, ale kmitají pouze kolem rovnovážných poloh. Druhy vlnění jsou:

- vlny postupné příčné,
- vlny postupné podélné,
- vlny stojaté příčné,
- vlny stojaté podélné.

ZDROJ VLNĚNÍ je hmotný objekt nebo element prostředí, ze kterého se vlnění (resp. vlny) šíří.

VLNĚNÍ POSTUPNÉ je charakteristické tím, že kmitání se ze zdroje vlnění postupně přenáší do bodů vzdálenějších od zdroje. Postupným vlněním se nepřenáší látka, ale pouze energie kmitavého pohybu ze zdroje do prostředí, které zdroj obklopuje.

VLNĚNÍ STOJATÉ vzniká složením (superpozicí) dvou stejných vln (např. přímé a odražené) se stejnou frekvencí a vlnovou délkou, které postupují proti sobě. U stojatého vlnění se energie nepřenáší, pouze se mění z energie potenciální na kinetickou a opačně.

VLNĚNÍ PŘÍČNÉ je charakteristické tím, že částice kmitají kolmo ke směru šíření vlnění.

VLNĚNÍ PODÉLNÉ je charakteristické tím, že částice kmitají ve směru šíření vlnění.

Postupné mechanické vlnění

POSTUPNÉ MECHANICKÉ VLNĚNÍ vzniká postupným rozkmitáváním bodů v pružném látkovém prostředí. Pružným prostředím může být např. hadice, lano, kov, struna, vodní hladina, vzduch, tedy látka jakéhokoliv skupenství.

Jednotlivé druhy postupného vlnění lze modelovat na řadě hmotných bodů spojených vazbou (řadu hmotných bodů si v praxi představujeme jako hadici nebo pružnou tyč):

- postupné PŘÍČNÉ VLNĚNÍ – body prostředí kmitají kolmo na směr šíření vlnění,
- postupné PODÉLNÉ VLNĚNÍ – body prostředí kmitají ve směru šíření vlnění.

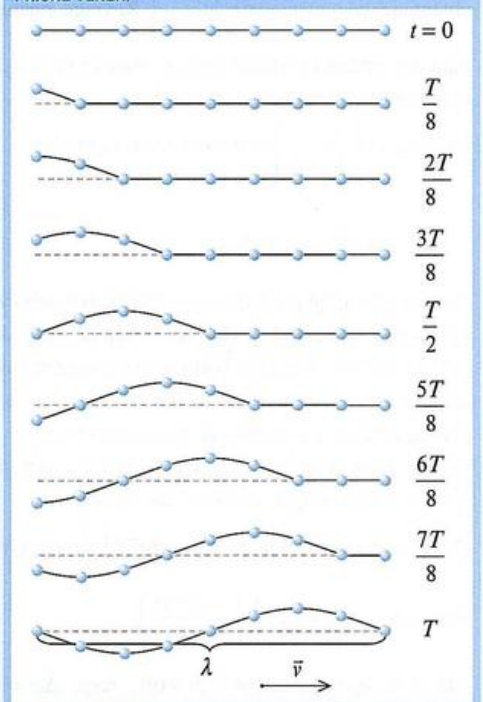
Osnova kapitoly:

- ❑ Definice a druhy vlnění
- ❑ Postupné mechanické vlnění, vlnová délka, perioda, rovnice postupné vlny
- ❑ Interference vlnění, dráhový a fázový rozdíl
- ❑ Stojaté vlnění, základní a vyšší frekvence
- ❑ Odraz, lom a ohyb vlnění v izotropním prostředí

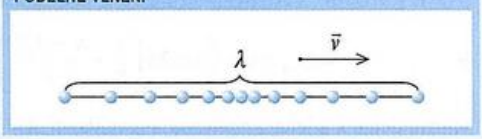
Příčné postupné vlnění je např. vlnění gumové hadice, příčné stojaté vlnění je např. chvění struny, podélné postupné vlnění je např. šíření zvuku, podélné stojaté vlnění je např. chvění tyče (je-li rozruch způsoben kolmým nárazem na plochu jednoho konce tyče). Vlněním je také rozhlasové či televizní vysílání a světlo (elektromagnetické vlnění). Vlnění nemusí postupovat pouze po přímce, ale i v rovině a prostoru.

Vznik a šíření POSTUPNÉHO VLNĚNÍ

PŘÍČNÉ VLNĚNÍ



PODÉLNÉ VLNĚNÍ



VLNOVÁ DÉLKA λ je nejmenší vzdálenost měřená ve směru šíření vlny, na které dochází k opakování tvaru vlny. Vlnová délka je vzdálenost, kam se rozšíří vlnění za dobu kmitu T, která se rovná periodě vlnění, a také vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází.

Pro vlnovou délku platí $\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$,

kde v je rychlost šíření vlnění, T perioda a f frekvence vlnění.

RYCHLOST ŠÍŘENÍ VLNĚNÍ (fázová rychlost) v je rychlost, kterou se mechanické vlnění šíří v daném prostředí.

PERIODA VLNĚNÍ T je doba mezi nejdříve po sobě následujícími okamžiky, ve kterých jsou výchylka i rychlost určité částice prostředí stejné, tedy po uplynutí jedné periody se v daném bodě prostředí průběh kmitání opakuje. U harmonického vlnění odpovídá perioda vlnění periodě kmitání zdroje.

Rovnice postupné vlny

ROVNICE POSTUPNÉ VLNY, tedy rovnice pro okamžitou výchylku y daného bodu prostředí v čase t a ve vzdálenosti x od zdroje vlnění, je $y = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$. Rovnice postupného vlnění platí pro příčné i podélné vlnění v daném prostředí (tato vlnění mají obvykle různou rychlost šíření).

Veličina $2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$ se nazývá **FÁZE VLNĚNÍ**.

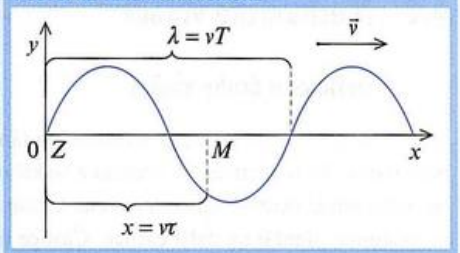
Interference vlnění

Jestliže postupují pružným prostředím dvě nebo více mechanických vln, dochází pak (pokud se setkají) k jejich skládání neboli **INTERFERENCI**. Kmitání bodu v uvažovaném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění. Jako příklad interference uvedeme skládání dvou vlnění y_1 a y_2 o stejné vlnové délce a stejné amplitudě, která postupují řadou bodů stejnou rychlostí (jak velikostí, tak i směrem).

Rovnice první vlny je $y_1 = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$, rovnice druhé vlny je $y_2 = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x-d}{\lambda}\right)$,

kde d je jejich **DRÁHOVÝ ROZDÍL**, resp. $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d$ je jejich **FÁZOVÝ ROZDÍL**. Výsledkem skládání je opět harmonické vlnění $y_s = y_1 + y_2 = 2y_m \cos\pi\frac{d}{\lambda} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x-d/2}{\lambda}\right)$ o stejné vlnové délce λ a jeho amplituda A o velikosti $A = 2y_m \cos\pi\frac{d}{\lambda}$ závisí na dráhovém rozdílu d.

POSTUPNÉ VLNĚNÍ HARMONICKÉ



Jestliže se harmonické postupné vlnění (vyjádřené funkcí sinus) šíří rychlostí $\vec{v}$ řadou hmotných bodů, dorazí do bodu M, který je ve vzdálenosti x od zdroje Z, za dobu $\tau = \frac{x}{v}$ a o tuto dobu je také zpožděno kmitání bodu M vůči bodu Z.

Z toho plyne, že perioda vlnění $T = \frac{\lambda}{v}$.

Odvození **ROVNICE POSTUPNÉ VLNY**

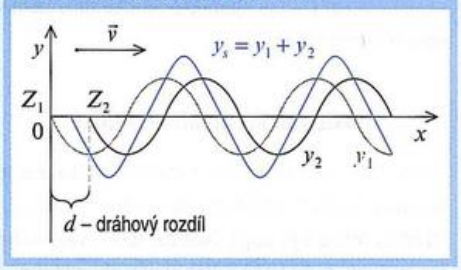
Pro výchylku prvního bodu řady platí $y_1 = y_m \sin \omega t$. Bod ve vzdálenosti x je časově posunut o $\frac{x}{v}$, proto pro jeho výchylku platí

$y = y_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$. Dosadíme-li za $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

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

tedy $y = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$.

Při interferenci vlnění používáme **PRINCIP SUPERPOZICE** výchylek (str. 94).



Odvození **ROVNICE SLOŽENÉ VLNY** $y_s = y_1 + y_2$.

Dosadíme za y_1 a y_2, tedy

$$y_s = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x-d}{\lambda}\right)$$

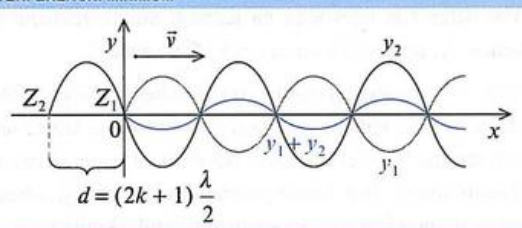
$$y_s = 2y_m \sin\frac{2\pi}{2}\left(2\frac{t}{T} - 2\frac{x}{\lambda} + \frac{d}{\lambda}\right)\cos 2\pi\frac{d}{2\lambda} =$$

$$y_s = 2y_m \cos\pi\frac{d}{\lambda} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x-d/2}{\lambda}\right).$$

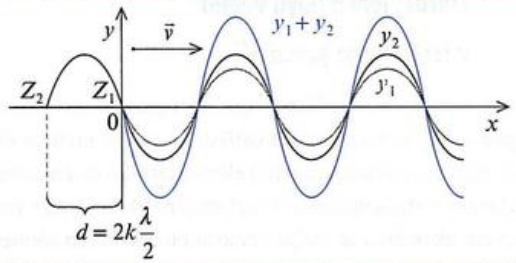
Dva speciální případy skládání dvou vlnění, která postupují stejnou rychlostí, mají stejnou vlnovou délku λ (tedy i stejnou periodu) a rozdílnou amplitudu v závislosti na dráhovém rozdílu vlnění d:

1. Dráhový rozdíl je roven lichému počtu půlvln (půlvlna $= \frac{1}{2}\lambda$), tj. $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0, 1, 2...$ Vlny se zde setkávají s opačnou fází, vzniká INTERFERENČNÍ MINIMUM a při stejné amplitudě se obě vlny ruší.
2. Dráhový rozdíl je roven sudému počtu půlvln, tj. $d = 2k\frac{\lambda}{2} = k\lambda$, kde $k = 0, 1, 2...$ Vlny se zde setkávají se stejnou fází a vzniká INTERFERENČNÍ MAXIMUM.

INTERFERENČNÍ MINIMUM



INTERFERENČNÍ MAXIMUM



Stojaté vlnění

STOJATÉ VLNĚNÍ (neboli chvění) vzniká interferencí vlnění o stejné amplitudě a frekvenci, která postupují proti sobě.

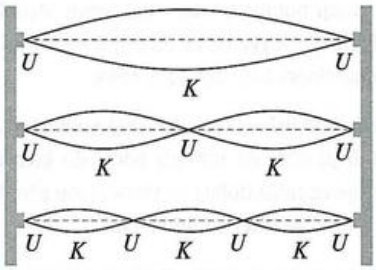
Uvedeme si příklad stojatého vlnění vzniklého na tyči upevněné na obou koncích:
Na obrázku vidíme význačné body označené K jako KMITNY, což jsou body kmitající s maximální amplitudou, a body označené U jako UZLY, což jsou body, které jsou v klidu. Sousední uzly jsou vzdáleny o $\frac{\lambda}{2}$, stejně tak i sousední kmitny jsou vzdáleny o délku $\frac{\lambda}{2}$.

ZÁKLADNÍ FREKVENCE stojatého vlnění f_0 je dána vztahem $f_0 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$, kde v je rychlost postupného vlnění, ze kterého stojaté vlnění interferencí vzniklo. Tato frekvence odpovídá nejmenšímu možnému počtu půlvln.

Mohou vzniknout i další stojaté vlny, které ale musí vždy splňovat podmínku $l = k\frac{\lambda}{2}$, kde $k = 1, 2, 3...$ Frekvence, při nichž je k > 1, nazýváme VYŠŠÍ HARMONICKÉ FREKVENCE. Je zřejmé, že tyto frekvence mají velikost $f = k \cdot f_0$, kde $k = 2, 3...$ je počet půlvln.

Příklady STOJATÝCH VLNĚNÍ na tyči:

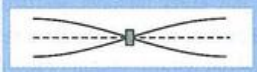
- Tyč délky l je upevněna uprostřed; základní frekvence f_0; první vyšší harmonická frekvence f.



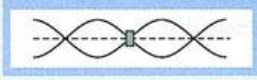
STOJATÉ VLNĚNÍ na tyči (nebo struně) upevněné na obou koncích vzniká odrazem vlnění od konce tyče a interferencí obou vln – přímé i odražené. Uzly jsou na koncích tyče.

- Vznikne-li na tyči délky l jedna půlvlna, je $l = \frac{\lambda}{2}$, z toho plyne, že $\lambda = 2l$. Frekvence je pak určena vztahem $f_0 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$ a nazývá se **ZÁKLADNÍ FREKVENCE**.
- Vzniknou-li na tyči délky l dvě půlvlny, je $l = \lambda$. Frekvence je pak určena vztahem $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{l} = 2f_0$.
- Vzniknou-li na tyči délky l tři půlvlny, je $l = \frac{3}{2}\lambda$, z toho plyne, že $\lambda = \frac{2}{3}l$. Frekvence je pak určena vztahem $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3v}{2l} = 3f_0$ atd.

STOJATÁ VLNĚNÍ na tyči upevněné uprostřed



$l = \frac{1}{2}\lambda,\ \lambda = 2l,\ f_0 = \frac{v}{2l}$



$l = \frac{3}{2}\lambda,\ \lambda = \frac{2l}{3},\ f = \frac{3v}{2l}$

Příklady STOJATÝCH VLNĚNÍ na tyči:

- Tyč délky l je upevněna na jednom konci; základní frekvence f_0; první vyšší harmonická frekvence f.

ODRAZ VLNĚNÍ postupujícího po dlouhém pružném tělese nastává na jeho konci s opačnou fází, jestliže je konec tělesa (např. struna, hadice) upevněn. Na pevném konci je pak uzel stojatého vlnění. Je-li konec pružného tělesa volný, odraz nastává se stejnou fází a na konci struny vzniká kmitna.

Odraz, lom a ohyb vlnění v izotropním prostředí

HUYGENSŮV PRINCIP: Každý bod vlnoplochy, do něhož postupné vlnění v izotropním prostředí dospělo v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch ve směru, v němž se vlnění šíří. Díky Huygensovu principu můžeme zkonstruovat vlnoplochu v určitém okamžiku, je-li známa její poloha a tvar v některém předcházejícím okamžiku. Pomocí Huygensova principu lze odvodit i zákony odrazu a lomu vlnění (str. 153, 154).

VLNOPLOCHA postupného vlnění je plocha, jejíž body kmitají se stejnou fází (neboli plocha, na níž leží body, do kterých vlnění dospělo ze zdroje za tutéž dobu). PAPRSKY jsou přímky kolmé na vlnoplochu, udávají směr šíření vlnění.

ODRAZ VLNĚNÍ je děj na rozhraní dvou prostředí, při němž se vlnění dopadající na rozhraní vrací zpět do prostředí, z něhož vzešlo.

ZÁKON ODRAZU VLNĚNÍ: Úhel odrazu vlnění α je roven úhlu dopadu vlnění α', tj. $\alpha = \alpha'$. Odražený paprsek leží v ROVINĚ DOPADU (str. 153).

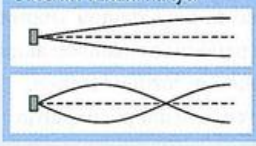
LOM VLNĚNÍ je děj na rozhraní dvou prostředí, při němž vlnění přechází do druhého prostředí a v něm se šíří jiným směrem.

ZÁKON LOMU VLNĚNÍ: Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí veličina konstantní a rovná se poměru rychlostí v obou prostředích, tj. $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$.

Veličina n je INDEX LOMU vlnění pro daná dvě prostředí. Lomený paprsek leží v rovině dopadu (str. 154).

OHYB VLNĚNÍ neboli DIFRAKCE je jev, který nastává, jestliže vlnění dopadá na rozhraní s překážkou a za touto překážkou se šíří jinak, než odpovídá přímočarému šíření vlnění. Ohyb vlnění je tím menší, čím je menší vlnová délka.

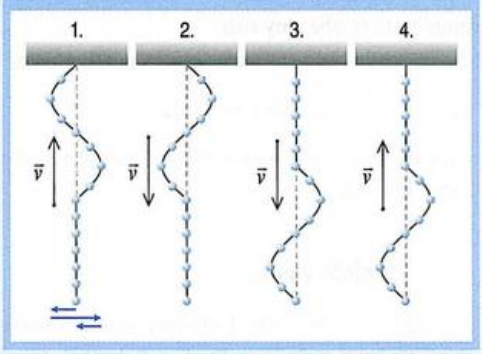
STOJATÁ VLNĚNÍ na tyči



$l = \frac{1}{4}\lambda, f_0 = \frac{v}{4l}$

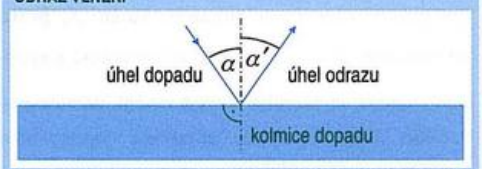
$l = \frac{3}{4}\lambda, f = \frac{3v}{4l}$

ODRAZ VLNĚNÍ na konci pružného tělesa:
na pevném konci nastává odraz s opačnou fází,
na volném konci nastává odraz se stejnou fází.

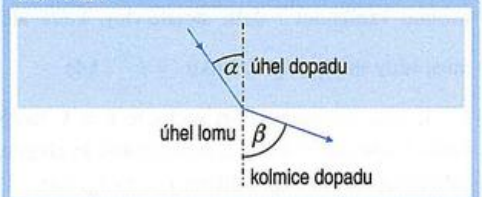


HUYGENSŮV PRINCIP

ODRAZ VLNĚNÍ



LOM VLNĚNÍ



ROVINA DOPADU je určena dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu, tj. přímkou vztyčenou kolmo na rozhraní v místě dopadu paprsku.

4.3 Zvukové vlnění

Zvuk, jeho frekvence, zdroje a druhy zvuku

ZVUK je mechanické vlnění látkového prostředí, které je člověk schopen vnímat sluchem. Jeho frekvence je přibližně v rozmezí 16 Hz až 20 000 Hz. Zvuk se šíří v plynech, kapalinách i pevných látkách. Ve vakuu se zvuk nešíří. Fyzikálními ději, které vznikají při přenosu zvuku, se zabývá AKUSTIKA.

ZDROJE ZVUKU jsou tělesa, ve kterých vzniká stojaté vlnění neboli chvění. Chvění těles (tedy zdrojů zvuku) se přenáší na okolní látkové prostředí a v něm se šíří jako mechanické vlnění. Zdroji zvuku jsou např. struny, tyče, desky, blány, vzduchové sloupce.

Podle časového průběhu dělíme zvuky na:

- HUDEBNÍ ZVUKY neboli TÓNY, které mají buď harmonický průběh (jednoduché tóny), nebo periodický složitější průběh (složené tóny),
- NEHUDEBNÍ ZVUKY neboli HLUKY, které mají neperiodický průběh.

Vlastnosti zvuku

VÝŠKA ZVUKU je dána jeho frekvencí. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje frekvence absolutní výšku tohoto tónu. ABSOLUTNÍ VÝŠKU TÓNU měříme přístroji pro měření zvukových frekvencí. Sluchem ji většinou nedokážeme určit. Pro subjektivní hodnocení zvuku je důležitější RELATIVNÍ VÝŠKA TÓNU, která je určena podílem frekvence daného tónu k frekvenci zvoleného referenčního tónu. V hudební akustice je referenčním tónem tzv. ZÁKLADNÍ TÓN o frekvenci 440 Hz (jde o a^1). V technické praxi se používá referenční tón o frekvenci 1 000 Hz.

BARVA ZVUKU je určena počtem vyšších harmonických tónů ve složeném tónu a jejich amplitudami. Sluchem proto rozeznáme různé hudební nástroje i hlasy lidí.

INTENZITA ZVUKU I je zvuková energie dopadající na jednotku plochy za jednotku času, je tedy $I = \frac{E}{S \cdot t}$,

kde E je energie, t doba a S obsah plochy.

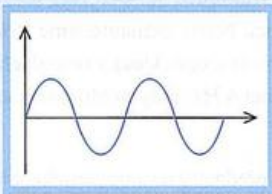
HLADINA INTENZITY ZVUKU L je veličina udávající intenzitu zvuku v jednotkách DECIBEL (dB) a platí pro ni převodní vztah $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$.

Osnova kapitoly:

- Zvuk, jeho frekvence, zdroje a druhy zvuku
- Vlastnosti zvuku, intenzita, hladina, hlasitost
- Infrazvuk, ultrazvuk, zázněje, rezonance
- Rychlost šíření zvuku, odraz zvuku, ozvěna
- Dopplerův jev, nadzvuková rychlost

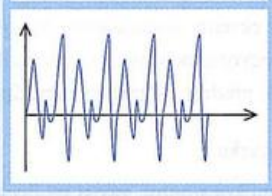
Mezi základní zdroje hudebních zvuků patří:

- LADIČKY, které vydávají jednoduché tóny a jejich frekvence závisí nepřímo na velikosti ladičky (opatřené rezonanční skříňkou jsou lépe slyšet),
- STRUNY, o jejichž chvění platí totéž, co o chvění tyče upevněné na obou koncích (str. 99, 100),
- PÍŠŤALY, v nichž rozkmitáváme vzduchový sloupec, velikost jejich frekvence závisí na délce píšťaly a na tom, je-li píšťala na konci otevřená, nebo uzavřená.



HUDEBNÍ ZVUKY

Časový diagram jednoduchého tónu.



Časový diagram složeného tónu.

NEHUDEBNÍ ZVUK

Příklad časového diagramu hluku.

JEDNOTKOU INTENZITY ZVUKU je $W \cdot m^{-2}$ (watt/metr^2).

$$[I] = \frac{[E]}{[S] \cdot [t]} = \frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{W}{m^2} = W \cdot m^{-2}$$

Z převodního vztahu mezi intenzitou I a hladinou intenzity L je zřejmé,

- že zvětší-li se intenzita 10krát, hladiny se liší o 10 dB,
- zvětší-li se intenzita 100krát, hladiny se liší o 20 dB,
- zvětší-li se intenzita 1 000krát, hladiny se liší o 30 dB atd.

$I_0 = 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$ je práh slyšení, což je nejmenší intenzita zvuku, kterou je lidské ucho schopno vnímat.

Intenzita zvuku je veličina objektivní. Kromě toho existuje i podobná, ale subjektivní veličina, tzv. hlasitost zvuku. **HLASITOST ZVUKU** vyjadřuje, jak silně působí zvuk na normální sluch (závisí tedy na intenzitě zvuku, ale i na citlivosti sluchu na zvuky různé frekvence). Největší citlivost lidského ucha je při frekvencích 700 Hz až 6 000 Hz, pod 500 Hz se citlivost s klesající frekvencí snižuje, nad 6 000 Hz je také menší.

Významné hodnoty intenzity zvuku pro frekvenci 1 kHz, které souvisejí s hlasitostí:

- **PRÁH SLYŠENÍ**, což je nejmenší intenzita, kterou je lidské ucho schopno vnímat, jde o intenzitu $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$, čemuž odpovídá hladina 0 decibelů (dB),
- **PRÁH BOLESTI**, což je taková intenzita zvuku, kdy v uchu vzniká bolestivý pocit, jde o intenzitu $1\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$, čemuž odpovídá hladina 120 decibelů (dB).

Infrazvuk, ultrazvuk, zázněje (rázy), rezonance

INFRAZVUK je zvuk o frekvenci menší než 16 Hz.

ULTRAZVUK je zvuk o frekvenci větší než 20 kHz.
Ultrazvuky ani infrazvuky nejsou pro lidské ucho slyšitelné.

ULTRAZVUKU se užívá v mnoha oborech vědy a techniky, např. v defektoskopii, která zjišťuje vady materiálu, v lékařství k diagnostice i léčení, k vytváření emulzí, čištění brýlí apod. Zdroji ultrazvuku jsou malé ladičky a malé píšťalky (pro psy), sirény, elektromagnetické generátory apod.
Mezi zdroje **INFRAZVUKU** patří chvění budov, strojů, zemětřesení, hladina moře při vlnobití apod. Infrazvuk se dobře šíří ve vodě. Vnímají ho někteří mořští živočichové, kteří jsou tímto způsobem varováni před bouřkami.

ZÁZNĚJE neboli **RÁZY** nastávají, jestliže interferují (skládají se) dva tóny s blízkými frekvencemi (str. 94), např. 440 Hz a 444 Hz. Když oba tóny dorazí do našeho ucha současně, uslyšíme tón, jehož frekvence je 442 Hz, tedy průměr původních dvou frekvencí. Navíc zaznamenáme střídavé změny v intenzitě zvuku: ta roste a opět klesá v pomalých rázech, které se opakují s frekvencí 4 Hz, tedy rozdílem obou původních frekvencí.

REZONANCE pevných předmětů nastává, jestliže je jejich vlastní frekvence totožná s frekvencí dopadajícího zvuku. Pokud vlivem zvuku vznikne v pevném předmětu stojaté vlnění a intenzita zvuku je dostatečná, předmět se může i rozpadnout.

REZONANCE: Je-li frekvence vlastních kmitů sklenice shodná s frekvencí dopadajícího zvuku, může dojít k jejímu roztříštění. Podobně se ultrazvukem rozbíjejí ledvinové kameny.

Rychlost šíření zvuku

RYCHLOST ZVUKU není konstantní, závisí na druhu prostředí (v kapalinách a pevných látkách se šíří rychleji než v plynech), závisí také na teplotě prostředí a dalších parametrech.

Závislost rychlosti zvuku v ve vzduchu na teplotě t v Celsiových stupních vyjadřuje vztah: $v = (331{,}82 + 0{,}61\{t\})\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

RYCHLOST ZVUKU ve vzduchu závisí na jeho složení (je ovlivněna např. vlhkostí), ale nejvíce na teplotě (při 0 °C je $331{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$). Nezávisí na tlaku vzduchu ani na frekvenci zvuku.
Rychlost zvuku ve vodě je $1\,500\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ při 25 °C, v oceli je $5\,000\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ při 20 °C.

Odraz zvuku

Na rozhraní dvou prostředí se zvuk odráží, tedy dochází k odrazu vlnění. Nastává-li odraz zvuku v malé místnosti, splývá odražený zvuk s původním. Přichází-li odražený zvuk se zpožděním nejméně 0,1 s, urazí-li tedy asi 34 m, vzniká ozvěna. **OZVĚNA** je jev, který vzniká v případě, že pozorovatel slyší zvuk přímo od zdroje a zvuk odražený od překážky v takové vzdálenosti, že oba zvuky vnímá odděleně. Nastává, odrazí-li se zvuk od překážky vzdálené nejméně 17 m. Pokud slyšíme zvuk odražený od překážky ještě poté, co zdroj přestal zvuk vydávat, nazýváme tento jev **DOZVUKEM**.

ODRAZ ZVUKU od pevných předmětů se využívá při měření hloubky moří nebo při detekci jiných plavidel pomocí sonarů. Netopýři se orientují a hledají kořist vysíláním a přijímáním odrazů ultrazvukových vln.

Blíží-li se rozměry místnosti vzdálenosti 17 m, může se v místnosti stát řeč vlivem odrazů a dozvuků nesrozumitelnou, pokud není vyřešena tzv. akustika místnosti členěním stěn, izolačním obložením pohlcujícím zvuk apod.

Dopplerův jev

DOPPLERŮV JEV nastává při relativním pohybu zdroje zvuku a pozorovatele, který zvuk přicházející od zdroje vnímá. Pozorovatel slyší zvuk jiné frekvence, než je frekvence zdroje, a to vyšší, jestliže se zdroj zvuku a přijímač zvuku přibližují, a nižší, jestliže se zdroj zvuku a přijímač zvuku navzájem vzdalují. Tento jev pozoroval (i když ne zcela objasnil) v roce 1843 rakouský fyzik J. Ch. Doppler.

Pro frekvenci f_1 přibližujícího se zdroje zvuku Z platí vztah:

$f_1 = f\dfrac{v}{v - v_Z}$, kde f je frekvence zdroje Z, v_Z je rychlost zdroje, v je rychlost zvuku.

Pro frekvenci f_2 vzdalujícího se zdroje zvuku Z platí vztah:

$f_2 = f\dfrac{v}{v + v_Z}$, kde f je frekvence zdroje Z, v_Z je rychlost zdroje, v je rychlost zvuku.

Pohybuje-li se vzhledem k homogennímu izotropnímu prostředí, kterým se šíří zvukové vlnění, zdroj zvuku rychlostí v_Z a pozorovatel rychlostí v_P, platí vztah:

$$f' = f\frac{v + v_P \cdot \cos\varphi_P}{v + v_Z \cdot \cos\varphi_Z},$$

kde v je rychlost zvuku, f je frekvence zdroje zvuku, f' je frekvence, kterou slyší pozorovatel.

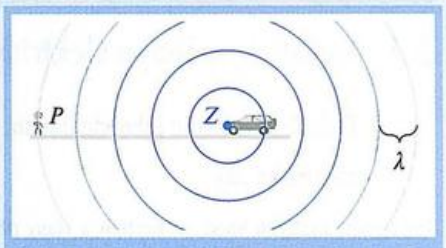
Nadzvuková rychlost

Jestliže se zdroj zvuku Z (např. nadzvukové letadlo) pohybuje právě rychlostí zvuku, stále se dotýká již dříve vyslaných vlnoploch. Nadzvukové letadlo musí rychlost zvuku co nejrychleji překročit, jinak by nahromaděná energie zvukových vln působících na letadlo v bodě P_1 mohla způsobit jeho destrukci.

Velikosti nadzvukové rychlosti obvykle uvádíme v jednotkách MACH. Jestliže je např. rychlost letadla 2,5 machů, znamená to, že letí 2,5krát rychleji než zvuk ve vzduchu.

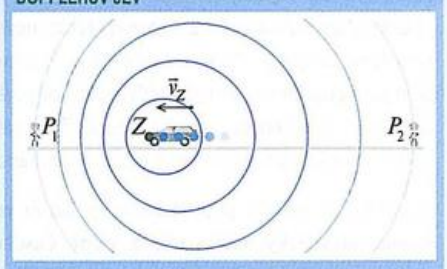
Ochrana před hlukem

Pobyt v hlučném prostředí má špatný vliv na zdraví člověka, jeho pracovní výkon a pozornost. Proto je potřeba proti hluku bojovat. Především snižováním hlučnosti strojů a zařízení, používáním zvukové izolace a ochranných pomůcek. Jako izolační materiály jsou nejvhodnější pórovité látky, plst, koberce, vakuové vrstvy apod. Okenní skla se zvýšenou tepelnou izolací mají obvykle i lepší zvukově-izolační vlastnosti. Podobně též zateplení obvodových plášťů budov snižuje propustnost zvuku z vnějšího prostředí.



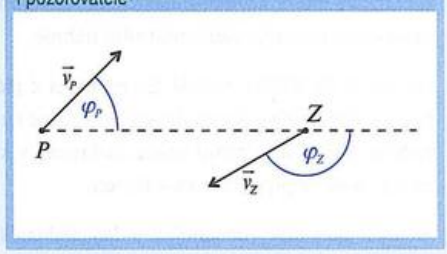
Siréna auta (zdroj zvuku Z) zaparkovaného u kraje silnice vydává zvuk o frekvenci f = 1 000 Hz. Jestliže pozorovatel P také stojí, uslyší tutéž frekvenci.

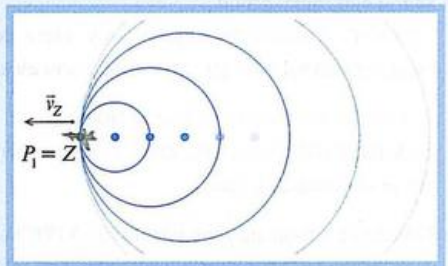
DOPPLERŮV JEV



V případě, že stojící pozorovatel P_1 slyší sirénu přibližujícího se auta, uslyší tón o vyšší frekvenci f_1. Naopak pozorovatel P_2, od kterého se auto vzdaluje, slyší tón o nižší frekvenci f_2.

DOPPLERŮV JEV pro případ pohybujícího se zdroje i pozorovatele





Letí-li letadlo rychlostí zvuku, zvukové vlny v bodě P_1 interferují a zesilují se tak intenzivně, že jejich energie může způsobit destrukci letadla.

5.1 Elektrický náboj a elektrické pole

Elektrický náboj a jeho vlastnosti, elektrické síly

Při česání suchých vlasů se hřeben a vlasy přitahují. Na obrazovkách monitorů nebo televizorů se projevuje statická přilnavost, přitahují prach. Třeme-li suchým hadříkem nebo rukou polyetylenovou fólii, začne přitahovat suché kousky papíru. Již v 6. století př. n. l. řecký filozof Thales pozoroval přitažlivé síly vznikající třením jantaru, který pak přitahoval kousky slámy. Podle slova *elektron* (řecký název pro jantar) se tyto jevy nazývají JEVY ELEKTRICKÉ. Příčinou elektrických jevů jsou elektrické síly (přitažlivé nebo odpudivé), kterými na sebe působí elektricky nabitá tělesa. Tato tělesa nesou elektrický náboj, který může být kladný nebo záporný.

ELEKTRICKÝ NÁBOJ Q je skalární fyzikální veličina charakterizující elektricky nabitá tělesa, popř. částice vytvářející ve svém okolí elektrické pole.

ELEMENTÁRNÍ ELEKTRICKÝ NÁBOJ je nejmenší možný náboj, který lze v přírodě experimentálně zjistit. Elementární elektrický náboj má:

- ELEKTRON se záporným nábojem $-e$ (str. 182);
- PROTON s kladným nábojem e (str. 192).

Elektrický náboj každého elektricky nabitého tělesa je roven celistvému násobku elementárního náboje.

VOLNÝ ELEKTRICKÝ NÁBOJ lze přenášet z jednoho tělesa na jiné a může se přemísťovat i v jednom tělese na makroskopické vzdálenosti. Volný náboj nesou elektrony v kovech a polovodičích, ionty v plynech a kapalinách.

VODIČE jsou látky obsahující volný elektrický náboj, vodiče vedou elektrický proud.

IZOLANTY (DIELEKTRIKA) jsou látky, které neobsahují volný elektrický náboj (str. 109) a nevedou elektrický proud.

ZÁKON ZACHOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE:
Elektrický náboj soustavy, která z okolí nepřijímá částice ani mu je nepředává, je stálý.

Elektrické náboje na sebe působí ELEKTRICKOU SILOU $\vec{F}_e$:

- souhlasné náboje, resp. souhlasně nabitá tělesa se odpuzují;
- opačné náboje, resp. nesouhlasně nabitá tělesa se přitahují.

BODOVÉ NÁBOJE jsou elektrické náboje těles nebo částic, jejichž rozměry jsou značně menší než vzdálenosti mezi nimi, tj. jejich rozměry můžeme zanedbat.

Osnova kapitoly:

- Elektrický náboj, jeho vlastnosti, elektrické síly
- Coulombův zákon
- Elektrické pole, intenzita elektrického pole, radiální a homogenní elektrické pole
- Elektrický potenciál, elektrické napětí, práce
- Vodič v elektrickém poli, elektrostatická indukce
- Izolant v elektrickém poli, polarizace dielektrik
- Kapacita vodiče, kondenzátory, jejich spojování

Elektrické vlastnosti látek souvisejí se stavbou atomů, které jsou složeny z atomových jader a elektronů. Jádra jsou tvořena neutrony a protony (kapitola 8.2, 8.3). Za normálních podmínek se v látce počet protonů s kladným nábojem rovná počtu elektronů se záporným nábojem. Vnějším působením se tato rovnováha může porušit a vzniká tak ELEKTRICKY NABITÉ TĚLESO, které je:

- nabité záporně, pokud převažují elektrony,
- nabité kladně, pokud převažují protony.

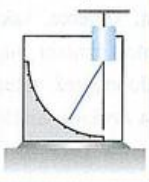
JEDNOTKOU ELEKTRICKÉHO NÁBOJE je COULOMB (C).
Vyjádření coulombu v základních jednotkách SI je $1\,C = 1\,A \cdot s$ (ampér krát sekunda).
Záporný náboj 1 C obsahuje asi $6{,}2415 \cdot 10^{18}$ elektronů.

ELEMENTÁRNÍ ELEKTRICKÝ NÁBOJ má hodnotu $e = 1{,}602\,177 \cdot 10^{-19}$ C.

Pojem „ELEKTRICKÝ NÁBOJ" používáme ve dvou významech:

- V prvním významu vyjadřuje stav elektricky nabitých těles nebo částic, které mají elektrický náboj. Tento náboj lze přenášet z jednoho tělesa na jiné. Často místo správného termínu „těleso, resp. částice s elektrickým nábojem" říkáme jen „elektrický náboj" nebo stručněji „náboj".
- Ve druhém významu termín „elektrický náboj" znamená fyzikální veličinu, která je mírou tohoto stavu a měří se v coulombech.

elektroskop



Zda je těleso nabité, se přesvědčíme pomocí ELEKTROSKOPU, který s tělesem vodivě propojíme, a náboj se na něj přenese.

Coulombův zákon

COULOMBŮV ZÁKON: Dva bodové elektrické náboje Q_1 a Q_2 v klidu ve vzdálenosti r se navzájem přitahují nebo odpuzují stejně velkými elektrickými silami $\vec{F}_e$, $-\vec{F}_e$ o velikosti

$$F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{r^2},$$

kde ε je PERMITIVITA prostředí, $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita (str. 109). Permitivita vakua ε_0 je konstanta a má hodnotu $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{N^{-1}C^2m^{-2}}$.

Elektrické pole, intenzita elektrického pole

ELEKTRICKÉ POLE je silové pole, v němž na tělesa nebo částice s elektrickým nábojem působí elektrická síla. Elektrické pole existuje kolem každého elektricky nabitého tělesa nebo částice s elektrickým nábojem.

INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE $\vec{E}$ je definována vztahem

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q},$$

kde $\vec{F}_e$ je elektrická síla, kterou působí elektrické pole v daném místě na bodový náboj q. Intenzita elektrického pole je vektorová veličina a charakterizuje elektrické pole v daném bodě.

Velikost intenzity elektrického pole je $E = \frac{F_e}{|q|}$.

Směr intenzity elektrického pole je určen směrem elektrické síly, která působí na kladný elektrický náboj vložený do elektrického pole.

RADIÁLNÍ (CENTRÁLNÍ) ELEKTRICKÉ POLE se nachází v okolí osamoceného bodového náboje Q. Vektory intenzity radiálního elektrického pole $\vec{E}$ mají směr buď od bodového náboje Q (v případě kladného náboje), nebo k němu (v případě záporného náboje). Elektrický náboj Q nazýváme ZDROJEM radiálního elektrického pole.

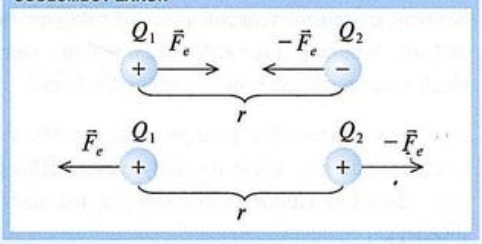
VELIKOST INTENZITY radiálního elektrického pole ve vzdálenosti r od bodového zdroje Q je:

$$E = \frac{F_e}{|q|} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{|Q|}{r^2}.$$

Uvedený vztah platí také pro intenzitu elektrického pole vně vodivé koule s nábojem Q (tj. pro $r \geq R$, kde R je poloměr koule).

Elektrické pole vytvořené bodovým nábojem Q působí na náboj q nacházející se v tomto poli ELEKTRICKOU SILOU $\vec{F}_e$, jejíž velikost je dána vztahem $F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{|Q \cdot q|}{r^2}$.

COULOMBŮV ZÁKON



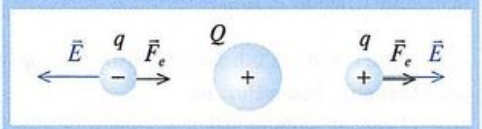
Relativní PERMITIVITA každého prostředí je větší než jedna, tzn. permitivita libovolného prostředí je větší než permitivita vakua, např. ε_r (vzduch) = 1,0006, ε_r (voda) = 81.

JEDNOTKOU INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE je newton na coulomb, $[E] = \mathrm{N \cdot C^{-1}}$. Častěji používanou jednotkou intenzity elektrického pole je VOLT NA METR ($\mathrm{V \cdot m^{-1}}$), je odvozena ze vztahu $[E] = \frac{[U]}{[d]} = \mathrm{V \cdot m^{-1}}$, kde U je elektrické napětí (str. 107).

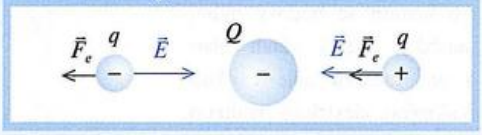
INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE je rovna elektrické síle působící na kladný jednotkový elektrický náboj $q = 1\,\mathrm{C}$.

SMĚR INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE vytvořeného elektrickým nábojem Q a působícího na elektrický náboj q:

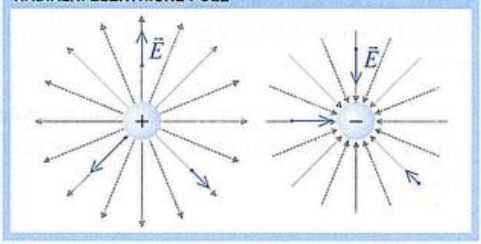
- Je-li náboj q kladný, pak mají vektory $\vec{E}$ a $\vec{F}_e$ stejný směr (v definičním vztahu $\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$ náboj $q > 0$ nezmění směr vektoru $\vec{F}_e$).



- Je-li náboj q záporný, pak mají vektory $\vec{E}$ a $\vec{F}_e$ opačný směr (v definičním vztahu $\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$ náboj $q < 0$ změní směr vektoru $\vec{F}_e$).



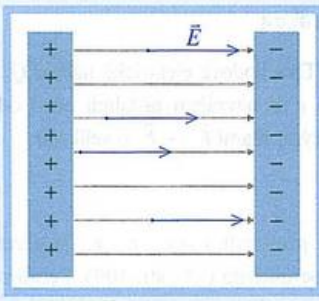
RADIÁLNÍ ELEKTRICKÉ POLE



HOMOGENNÍ ELEKTRICKÉ POLE se nachází mezi rovnoběžnými, dostatečně velikými a opačně nabitými vodivými deskami. V homogenním elektrickém poli má intenzita ve všech místech stejnou velikost i směr: $\vec{E} = \overline{\text{konst.}}$

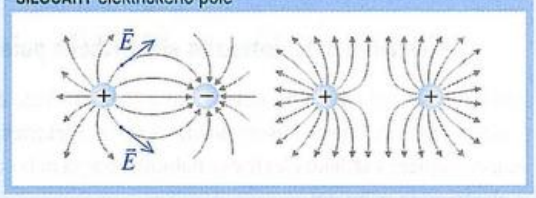
SILOČÁRA elektrického pole je myšlená čára, v jejímž každém bodě má vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}$ směr její tečny (tudíž i elektrická síla má směr tečny siločáry).

Siločáry jsou orientované křivky mající směr od kladného náboje k zápornému. V případě osamoceného náboje ubíhají do nekonečna a směřují od kladného náboje, popř. k zápornému náboji.



INTENZITA HOMOGENNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE $\vec{E}$ má směr od kladného náboje k zápornému. Siločáry jsou rovnoběžné.

SILOČÁRY elektrického pole



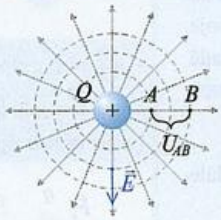
Potenciální energie elektrického pole, elektrický potenciál, elektrické napětí, práce

Náboj Q vytváří v prostoru kolem sebe elektrické pole. **POTENCIÁLNÍ ENERGIE** E_p bodového náboje q nacházejícího se v bodě A elektrického pole je dána prací W_{A0}, kterou vykoná elektrická síla $\vec{F}_e = \vec{E} \cdot q$ při přemísťování náboje q z bodu A do místa nulové intenzity, tedy $E_p = W_{A0}$.

ELEKTRICKÝ POTENCIÁL φ v libovolném bodě elektrického pole je skalární veličina definovaná jako podíl potenciální energie E_p kladného bodového náboje q v daném bodě a náboje q, tj. $\varphi = \dfrac{E_p}{q}$.

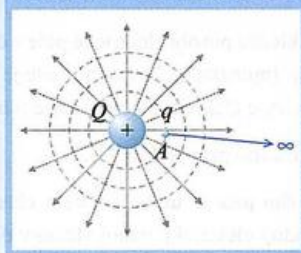
ELEKTRICKÝ POTENCIÁL RADIÁLNÍHO POLE φ v okolí osamoceného bodového náboje Q má ve vzdálenosti r velikost $\varphi = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \dfrac{Q}{r}$,

kde ε je permitivita prostředí, ve kterém se bodový náboj nachází. Stejný vztah platí i pro radiální pole v okolí kulového, elektricky nabitého tělesa, přičemž r je vzdálenost do středu tělesa a potenciál má nejvyšší absolutní hodnotu na povrchu tělesa.



EKVIPOTENCIÁLNÍ PLOCHY neboli hladiny potenciálu jsou množiny bodů elektrického pole, které mají stejný potenciál.

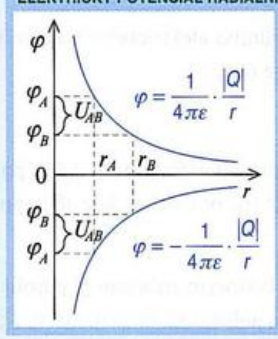
Elektrické pole je vytvořené vodivou koulí s nábojem Q. **PRÁCE** W_{A0} vykonaná elektrickými silami tohoto pole při přemístění elektrického náboje q z bodu A do místa s nulovou intenzitou je dána vztahem: $W_{A0} = \dfrac{Q \cdot q}{4\pi\varepsilon} \cdot \dfrac{1}{r_A}$,



kde r_A je vzdálenost bodu A od středu koule. V případě radiálního pole je místo s nulovou intenzitou v nekonečnu.

Práce W_{A0} i potenciální energie E_p náboje q v radiálním elektrickém poli je:		znaménko zdroje Q elektrického pole	
		+	−
znaménko náboje q	+	kladná	záporná
	−	záporná	kladná

ELEKTRICKÝ POTENCIÁL RADIÁLNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE je:



- kladný pro kladný zdroj Q,
- záporný pro záporný zdroj Q,
- nulový potenciál je v obou případech v nekonečnu.

Intenzita $\vec{E}$ elektrického pole ukazuje směr klesání elektrického potenciálu.

EKVIPOTENCIÁLNÍ PLOCHY radiálního elektrického pole tvoří soustředné kulové plochy.

ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ U_{AB} mezi dvěma body A a B elektrického pole je definováno jako rozdíl potenciálů,

tj. $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$,

kde φ_A, φ_B jsou potenciály v bodech A a B.

Elektrické napětí U_{AB} mezi dvěma body A a B elektrického pole je dáno také vztahem $U_{AB} = \dfrac{W_{AB}}{q}$,

kde W_{AB} je práce vykonaná elektrickou silou při přemísťování kladného elektrického náboje q z bodu A do bodu B.

PRÁCE, kterou vykonají síly elektrického pole při přemístění náboje q z bodu A do bodu B, je dána vztahem:

$W_{AB} = U_{AB} \cdot q$,

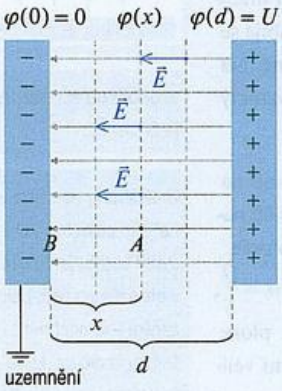
kde U_{AB} je elektrické napětí mezi body A a B elektrického pole.

Obecně platí, že práce W_{AB} vykonaná elektrickou silou při přemístění náboje z bodu A do bodu B v elektrickém poli závisí pouze na poloze bodů A, B; nezávisí na trajektorii náboje (podobně jako práce a potenciální energie hmotného bodu v tíhovém poli, str. 35).

ELEKTRICKÝ POTENCIÁL HOMOGENNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE $\varphi(x)$ mezi dvěma rovnoběžnými nesouhlasně nabitými deskami kondenzátoru má velikost:

$\varphi(x) = E \cdot x = U\dfrac{x}{d}$,

kde E je velikost intenzity pole, x je vzdálenost od uzemněné desky, U je napětí mezi nabitými deskami, jejichž vzdálenost je d. Uzemněná deska je vodivě spojena se zemí, její potenciál je nulový.



Za místa s nulovým elektrickým potenciálem obvykle volíme zem a místa vodivě spojená se zemí, tj. uzemněná.

Je-li mezi dvěma nesouhlasně nabitými rovnoběžnými deskami homogenní elektrické pole, pak mezi jeho intenzitou $\vec{E}$ a napětím U mezi deskami platí vztah

$E = \dfrac{U}{d}$,

kde d je vzdálenost desek, E je velikost intenzity elektrického pole.

JEDNOTKOU ELEKTRICKÉHO POTENCIÁLU je VOLT (V).

Z definice potenciálu plyne $\mathrm{V} = [\varphi] = \dfrac{[E_p]}{[q]} = \dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$,

$\mathrm{V} = \dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} = \dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{A \cdot s}} = \dfrac{1}{\mathrm{A}} \cdot \dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \dfrac{\mathrm{W}}{\mathrm{A}} \Rightarrow \mathrm{W} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{A}$.

JEDNOTKOU ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ je VOLT (V).

Mezi dvěma body A, B elektrického pole je napětí 1 volt, jestliže elektrické síly vykonají při přemístění náboje 1 coulombu z bodu A do bodu B práci 1 joulu.

Přemístí-li síly elektrického pole z bodu A do bodu B náboj q, pak vykonají práci, která je rovna úbytku jeho elektrické potenciální energie:

$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = \left(\dfrac{E_{pA}}{q} - \dfrac{E_{pB}}{q}\right) \cdot q = (\varphi_A - \varphi_B) \cdot q$,

$W_{AB} = U_{AB} \cdot q$,

kde E_{pA}, E_{pB} je potenciální energie v bodě A, resp. v bodě B, φ_A, φ_B jsou elektrické potenciály v bodě A, resp. v bodě B.

Na náboj q v homogenním elektrickém poli s intenzitou $\vec{E}$ působí síla $\vec{F}_e = \vec{E} \cdot q$. Přemístí-li síla $\vec{F}_e$ kladný náboj q z bodu A do bodu B po dráze x rovnoběžně se siločárami, pak tato síla vykoná práci $W_{AB} = F_e \cdot x = E \cdot q \cdot x$.

Dosadíme za práci $W_{AB} = U_{AB} \cdot q$, pak platí

$W_{AB} = U_{AB} \cdot q = E \cdot q \cdot x \Rightarrow U_{AB} = E \cdot x$.

Dosadíme-li za $x = d$, pak $U = E \cdot d \Rightarrow E = \dfrac{U}{d}$.

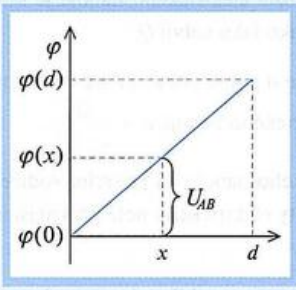
Podle definice $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \varphi(x) - \varphi(0) = \varphi(x)$,

protože $\varphi(0) = 0$. Platí tedy $\varphi(x) = U_{AB} = E \cdot x = \dfrac{U}{d} \cdot x$.

Obecně nutno pro práci použít vztah: $W_{AB} = \vec{F}_e \cdot \vec{x} = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{x}$ (str. 34). Vektor $\vec{x}$ má směr přemístění náboje. Pak platí:

$W_{AB} = U_{AB} \cdot q = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{x} \Rightarrow U_{AB} = \vec{E} \cdot \vec{x} \Rightarrow |U| = E \cdot d$.

Intenzita $\vec{E}$ elektrického pole ukazuje směr klesání elektrického potenciálu.



ELEKTRICKÝ POTENCIÁL φ homogenního elektrického pole mezi dvěma rovnoběžnými nesouhlasně nabitými deskami kondenzátoru. Nulový potenciál $\varphi(0)$ je na uzemněné záporně nabité desce (vlevo).

EKVIPOTENCIÁLNÍ PLOCHY v homogenním elektrickém poli jsou roviny rovnoběžné s deskami vytvářejícími pole.

Př. 1 Urči, jakou elektrickou silou na sebe působí dva bodové náboje o velikosti $Q_1 = -100$ nC a $Q_2 = 300$ nC, jsou-li od sebe vzdáleny 5 cm: **a)** ve vakuu, $\varepsilon_{r1} = 1$, **b)** ve vodě, $\varepsilon_{r2} = 81$.

$Q_1 = -100\ \text{nC} = -100 \cdot 10^{-9}\ \text{C}; Q_2 = 300\ \text{nC} = 300 \cdot 10^{-9}\ \text{C}; r = 5\ \text{cm} = 0{,}05\ \text{m}; \varepsilon_{r1} = 1; \varepsilon_{r2} = 81; F_e = ?$

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

a) $\{F_e\} = \dfrac{1}{4\pi \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} \cdot \dfrac{|-100 \cdot 10^{-9} \cdot 300 \cdot 10^{-9}|}{0{,}05^2} = 0{,}11; F_e = 110\ \text{mN}$

b) $\{F_e\} = \dfrac{1}{4\pi \cdot 81 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} \cdot \dfrac{|-100 \cdot 10^{-9} \cdot 300 \cdot 10^{-9}|}{0{,}05^2} = 1{,}3 \cdot 10^{-3}; F_e = 1{,}3\ \text{mN}$

Bodové náboje Q_1 a Q_2 se ve vakuu přitahují silou 110 mN a ve vodě silou 1,3 mN.

Př. 2 Mezi dvěma rovnoběžnými deskami vzdálenými 10 cm je homogenní elektrické pole s intenzitou $E = 21\ \text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$.
Urči: **a)** jaké je napětí mezi deskami, **b)** práci, kterou vykoná elektrická síla přenesením elektronu z jedné desky na druhou.

$d = 10\ \text{cm} = 0{,}1\ \text{m}; E = 21\ \text{kV} \cdot \text{m}^{-1} = 2{,}1 \cdot 10^4\ \text{V} \cdot \text{m}^{-1}; U = ?; W = ?$

a) $U = Ed$ $\quad \{U\} = 2{,}1 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1 = 2\,100; U = 2\,100\ \text{V}$

b) $W = U \cdot q$ $\quad \{W\} = 2\,100 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} = 3{,}364 \cdot 10^{-16}; W = 3{,}364 \cdot 10^{-16}\ \text{J}$ anebo $W = 2\,100 \cdot 1; W = 2\,100\ \text{eV}$.

Napětí mezi deskami je 2 100 V. Elektrická síla vykoná při přenesení elektronu práci 2 100 eV.

Vodič v elektrickém poli

Vložíme-li do elektrického pole s intenzitou $\vec{E}$ kovový vodič, přesunou se volné elektrony uvnitř tohoto vodiče proti směru intenzity $\vec{E}$. Jeden konec vodiče má pak přebytek elektronů a nabije se záporně, druhý má nedostatek elektronů a nabije se kladně. Na obou koncích vodiče se **INDUKUJE** elektrický náboj. Takto vzniklý náboj se nazývá **INDUKOVANÝ NÁBOJ**.

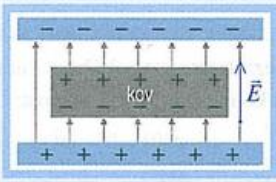
ELEKTROSTATICKÁ INDUKCE je vznik indukovaného náboje na povrchu vodiče, který je vyvolán přemístěním volných nosičů náboje v izolovaném vodiči působením vnějšího elektrického pole.

PLOŠNÁ HUSTOTA elektrického náboje je dána vztahem: $\sigma = \dfrac{Q}{S}$, kde Q je velikost náboje rovnoměrně rozmístěného na ploše o obsahu S. Plošná hustota elektrického náboje je skalární veličina a má stejné znaménko jako náboj Q.

Na povrchu vodivé koule o poloměru R nabité nábojem Q je **PLOŠNÁ HUSTOTA** elektrického náboje $\sigma = \dfrac{Q}{4\pi R^2}$.

Plošná hustota elektrického náboje na povrchu vodiče je přímo úměrná velikosti intenzity elektrického pole při vnějším povrchu vodiče: $|\sigma| = \varepsilon E$.

Plošná hustota náboje roste se zakřivením povrchu vodiče, takže na hrotech a hranách může hustota náboje a tím i intenzita vnějšího elektrického pole dosahovat velmi vysokých hodnot.



ELEKTROSTATICKÁ INDUKCE

JEDNOTKOU PLOŠNÉ HUSTOTY ELEKTRICKÉHO NÁBOJE je $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$.

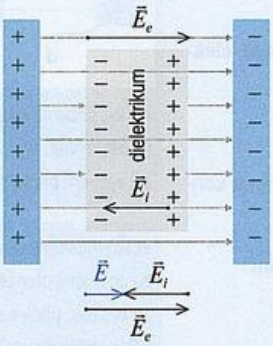
U elektricky nabitého vodiče je elektrický náboj jen na jeho povrchu. Také intenzita elektrického pole $\vec{E}$ uvnitř vodiče je nulová. Nachází-li se kovové těleso v elektrickém poli, pak uvnitř tohoto tělesa toto pole zaniká – je odstíněno.
Dutým vodičům, které odstíní elektrické pole, se říká **FARADAYOVA KLEC**. Proto např. vnitřek kovové karoserie automobilu může ochránit před blesky.

Pro intenzitu elektrického pole $\vec{E}$ na povrchu kulového vodiče o poloměru R platí: $E = \dfrac{1}{\varepsilon} \cdot \dfrac{|Q|}{4\pi R^2}$ (str. 105). Protože $\sigma = \dfrac{Q}{4\pi R^2}$, platí: $|\sigma| = \varepsilon E$.

Díky vysoké intenzitě elektrického pole kolem hrotů vodičů bývá vzduch kolem nich ionizován, vzniká koronový výboj, který bývá předzvěstí úderu blesku.

Izolant v elektrickém poli

IZOLANTY (neboli DIELEKTRIKA, NEVODIČE) jsou látky, které nemají volné elektrony ani jiné volné částice s nábojem, jež by mohly zprostředkovat vedení proudu.



POLARIZACE DIELEKTRIKA nastává, jestliže vložíme izolant (dielektrikum) do elektrického pole a atomové nebo molekulové dipóly se uspořádají. Na té straně, kde siločáry pole do dielektrika vstupují, jsou záporné póly dipólů a na opačné straně kladné póly. Tím se vytvoří na koncích dielektrika navzájem opačné elektrické náboje a dochází k jeho polarizaci. Náboj indukovaný na povrchu dielektrika vytváří elektrické pole s intenzitou $\vec{E}_i$, která má opačný směr než intenzita vnějšího elektrického pole $\vec{E}_e$. Intenzita výsledného elektrického pole uvnitř dielektrika $\vec{E}$ je dána vektorovým součtem, tj. $\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_i$. Protože $E_i < E_e$, platí, že intenzita $\vec{E}$ má stejný směr jako $\vec{E}_e$, ale její velikost je menší. Podíl určující zeslabení velikosti intenzity E je RELATIVNÍ PERMITIVITA $\varepsilon_r = \dfrac{E_e}{E}$.

Elektrická kapacita vodiče

Připojíme-li osamocený izolovaný vodič k pólu stejnosměrného elektrického zdroje, získá vzhledem k zemi stejný potenciál $\varphi = U$, jako má pól zdroje. U je napětí zdroje, jehož druhý pól je uzemněn. Na vodiči se rozmístí náboj Q, který je přímo úměrný jeho potenciálu φ, resp. napětí U: $Q = C \cdot \varphi$.

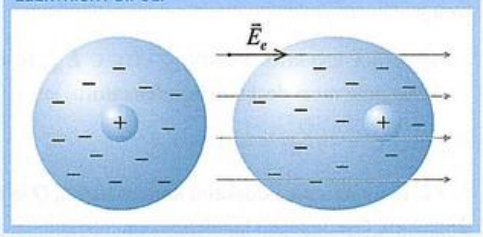
Konstanta úměrnosti $C = \dfrac{Q}{\varphi}$ se nazývá ELEKTRICKÁ KAPACITA osamoceného vodiče.

KAPACITA VODIVÉ KOULE má velikost $C = 4\pi\varepsilon R$.

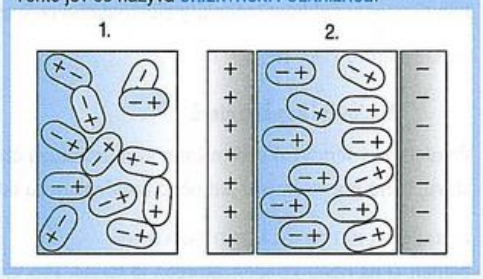
Připojíme-li dva navzájem izolované vodiče (např. desky kondenzátoru) k pólům stejnosměrného elektrického zdroje, vznikne mezi nimi elektrické napětí U. Na každém vodiči se rozmístí náboj Q, na jednom kladný, na druhém záporný, jehož velikost je přímo úměrná napětí: $Q = C \cdot U$.

Konstanta úměrnosti $C = \dfrac{Q}{U}$ se nazývá ELEKTRICKÁ KAPACITA dvou navzájem izolovaných vodičů nebo KAPACITA kondenzátoru.

ATOMOVÁ POLARIZACE nastává, jestliže vnější elektrické pole deformuje tvar atomů a molekul. Kladný náboj se posune ve směru intenzity vnějšího pole $\vec{E}_e$, elektrony se posunou proti směru $\vec{E}_e$. Z atomu se vytvoří ELEKTRICKÝ DIPÓL.



POLÁRNÍ DIELEKTRIKA jsou látky, jejichž molekuly mají náboj rozložen nerovnoměrně; na jedné straně převládá kladný náboj a na opačné straně záporný. Tyto molekuly jsou elektrickými DIPÓLY, a protože jsou orientovány různými směry, elektrický náboj se navenek neprojevuje. Vlivem elektrického pole se natáčejí ve směru siločar. Tento jev se nazývá ORIENTAČNÍ POLARIZACE.



JEDNOTKOU KAPACITY VODIČE je FARAD (F).
Běžně používané jednotky jsou menší, např. pikofarad (pF), mikrofarad (μF).
Vodič má kapacitu 1F, jestliže se nábojem 1C nabije na potenciál 1V.

$$\mathrm{F} = [C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} = \frac{\mathrm{A \cdot s}}{\mathrm{V}} = \frac{\mathrm{s}}{\Omega}$$ (A, Ω kap. 5.2)

Potenciál kulového vodiče o poloměru R, který se nachází v prostředí s permitivitou ε, je dán vztahem: $\varphi = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \dfrac{Q}{R}$ (str. 107). Odtud plyne $Q = 4\pi\varepsilon R\varphi$.

Ve vztahu $Q = C \cdot U$ znamená Q absolutní hodnotu náboje a U absolutní hodnotu napětí, podobně jako ve vztahu pro elektrickou energii kondenzátoru.

Kondenzátor

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

DESKOVÝ KONDENZÁTOR je tvořen dvěma rovnoběžnými deskami o obsahu plochy S ve vzájemné vzdálenosti d, oddělené dielektrikem o permitivitě ε. Kapacita deskového kondenzátoru je $C = \varepsilon \frac{S}{d}$.

ELEKTRICKÁ ENERGIE KONDENZÁTORU E_{el}, tj. energie elektrického pole mezi deskami kondenzátoru, je:

$$E_{el} = \frac{1}{2}UQ = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}CU^2,$$

kde U je napětí mezi deskami kondenzátoru, Q je náboj na kondenzátoru, C je kapacita kondenzátoru.

HUSTOTA ENERGIE ELEKTRICKÉHO POLE mezi deskami kondenzátoru je $w_{el} = \frac{E_{el}}{S \cdot d}$.

Dosazením za E_{el} a C obdržíme vztah

$$w_{el} = \frac{\varepsilon}{2} \cdot \frac{U^2}{d^2} = \frac{1}{2}\varepsilon E^2,$$

kde $E = \frac{U}{d}$ je velikost intenzity elektrického pole mezi deskami kondenzátoru (str. 107).

Spojování kondenzátorů

Paralelním i sériovým spojováním kondenzátorů dostáváme soustavu, která má vlastnosti jediného kondenzátoru o kapacitě C.

PARALELNÍ ZAPOJENÍ KONDENZÁTORŮ:

Napětí U na obou kondenzátorech je stejné. Pro výsledný náboj kondenzátorů pak platí:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1U + C_2U = (C_1 + C_2)U = CU,$$

tedy výsledná kapacita kondenzátorů je dána vztahem:

$$C = C_1 + C_2.$$

Pro n kondenzátorů vedle sebe platí: $C = C_1 + C_2 + ... + C_n$.

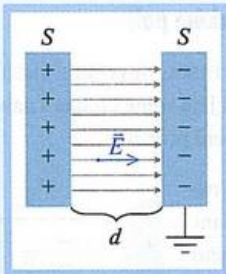
SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ KONDENZÁTORŮ:

Výsledné napětí je dáno součtem napětí na obou kondenzátorech. Náboje Q na jednotlivých kondenzátorech jsou stejné, pak platí: $U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) = \frac{Q}{C}$,

tedy výsledná kapacita kondenzátorů je dána vztahem:

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

Pro n kondenzátorů za sebou platí: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}$.

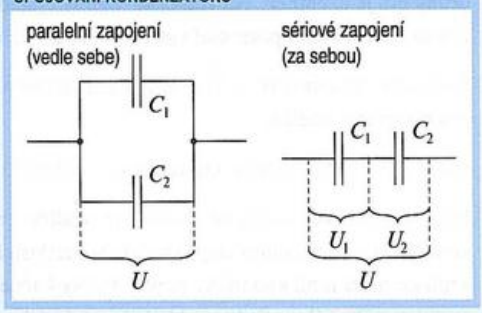


DESKOVÝ KONDENZÁTOR

Kapacitu lze zvětšovat použitím dielektrika s vysokou permitivitou mezi deskami kondenzátoru, zvětšováním účinné plochy desek nebo jejich přibližováním. Kondenzátor akumuluje elektrický náboj, přičemž se uplatňují pouze ty části desek, které se překrývají. Vysokonapěťové kondenzátory mohou být při vybíjení přes tělo člověka i nebezpečné.

ELEKTRICKOU ENERGII KONDENZÁTORU lze spočítat tím, že postupně přenášíme nepatrný náboj dQ z jedné desky na druhou, přičemž práce potřebná na přenesení náboje dQ z jedné desky na druhou bude $dW = u \cdot dQ$, kde u je okamžité napětí mezi deskami. Přenesený náboj se postupně zvyšuje, a tím narůstá i napětí u mezi deskami. Protože $Q = C \cdot u$, platí pak $dQ = C \cdot du$ a po dosazení obdržíme $dW = C \cdot u \cdot du$. Celkovou práci W_{el} potřebnou na přenesení celého náboje Q lze vypočítat tím, že všechny nepatrné dW sečteme pomocí integrálu, tedy $W_{el} = \int_0^U dW = \int_0^U C \cdot u \cdot du = C \cdot \frac{U^2}{2}$, kde U je konečné napětí mezi deskami, C je kapacita kondenzátoru, přičemž je zřejmé, že práce W_{el} je rovna elektrické energii kondenzátoru. Dosazením za U ze vztahu $Q = C \cdot U$ obdržíme další vzorce $E_{el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot UQ$.

SPOJOVÁNÍ KONDENZÁTORŮ



Podle druhu použitého dielektrika rozlišujeme kondenzátory s papírovým dielektrikem, s plastovou fólií, skleněné, slídové apod. Vysokou kapacitu mají elektrolytické kondenzátory, které jsou tvořeny např. hliníkovými fóliemi, mezi nimiž je vrstva papíru napuštěná elektrolytem. U těchto kondenzátorů je nutné dodržovat polaritu zapojení.

5.2 Elektrický proud v látkách

Elektrický proud, zdroj a elektrické napětí

Připojíme-li kovový vodič ke svorkám elektrického zdroje, vznikne v kovu elektrické pole, elektrony se začnou pohybovat proti směru intenzity $\vec{E}$, neuspořádaný pohyb elektronů se změní v pohyb uspořádaný a vodičem prochází proud.

ELEKTRICKÝ PROUD I je uspořádaný pohyb volných částic s elektrickým nábojem. Prochází-li elektrický náboj průřezem vodiče rovnoměrně, elektrický proud je definován vztahem:

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

kde ΔQ je celkový náboj, který prošel průřezem vodiče za dobu Δt. Dohodnutý směr proudu je definován jako směr pohybu kladného náboje, tj. od kladného pólu zdroje k zápornému.

ELEKTRICKÝ PROUD mohou zprostředkovat nejen elektrony, ale i volné záporné nebo kladné ionty. Pokud je proud zprostředkován kladným i záporným nábojem, pak náboj Q je součtem velikostí kladných i záporných nábojů prošlých daným průřezem: $|Q| = |Q_1| + |Q_2|$.

ELEKTRICKÝ OBVOD je soustava elektrických zdrojů napětí, spotřebičů (příp. dalších elektrotechnických součástek) spojených vodiči.

ELEKTRICKÝ SPOTŘEBIČ je zařízení, v němž se elektrická energie mění v jinou energii, např. světelnou v žárovce, vnitřní neboli tepelnou v ohřívači, mechanickou v elektromotoru.

ZDROJ ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ neboli **ELEKTRICKÝ ZDROJ** je zařízení, které vytváří v obvodu elektrické pole tím, že mezi dvěma póly zdroje (kladným a záporným) je udržován rozdíl potenciálů. Toto elektrické pole uvádí nositele elektrického náboje do uspořádaného pohybu, a tím vzniká elektrický proud. Zdrojem prochází proud od záporného pólu ke kladnému. Póly elektrického zdroje se nazývají také **SVORKY**.

SVORKOVÉ NAPĚTÍ U je napětí na svorkách elektrického zdroje, ze kterého se odebírá proud.

ELEKTROMOTORICKÉ NAPĚTÍ U_e je napětí na svorkách nezatíženého elektrického zdroje, tj. zdroje, ze kterého se neodebírá elektrický proud (zdroj naprázdno). Napětí nezatíženého zdroje značíme též U_0 a nazýváme **NAPĚTÍ NAPRÁZDNO**, platí $U_e = U_0$. Toto napětí je vždy větší než svorkové napětí U.

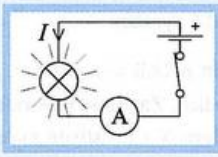
NAPĚTÍ NA VODIČI nebo spotřebiči je napětí mezi konci vodiče, které uvádí do pohybu elektrický náboj ve vodiči.

Osnova kapitoly:

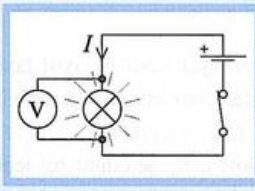
- Elektrický proud, zdroj a elektrické napětí
- Ohmův zákon, elektrický odpor vodiče, závislost odporu na teplotě, spojování rezistorů
- Ohmův zákon pro jednoduchý obvod, spojování zdrojů napětí, supravodivost, regulace proudu a napětí
- Kirchhoffovy zákony
- Práce a výkon elektrického proudu
- Elektrický proud v polovodičích, vlastní polovodiče a vodivost, termistor, příměsové polovodiče, příměsová vodivost, polovodičová dioda, LED, fotodioda
- Elektrický proud v kapalinách, elektrolýza, Faradayovy zákony, galvanické články, akumulátor
- Elektrický proud v plynech, druhy výbojů

JEDNOTKOU ELEKTRICKÉHO PROUDU je **AMPÉR** (A), $A = C \cdot s^{-1}$. Projde-li průřezem vodiče náboj 1C za 1 sekundu, pak jím protéká proud 1 A.

Okamžitá hodnota proudu: $i = \frac{dQ}{dt}$.



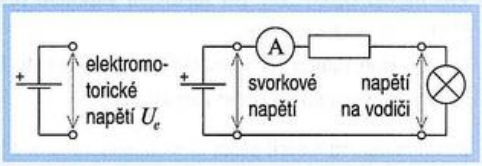
ELEKTRICKÝ PROUD se měří **AMPÉRMETREM**, který zapojujeme do série se spotřebičem, jímž proud prochází.



ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ měříme **VOLTMETREM**, který se zapojuje paralelně se spotřebičem, na němž napětí zjišťujeme.

ZDROJI ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ jsou např.:

- **GALVANICKÝ ČLÁNEK** je článek složený ze dvou elektrod a elektrolytu (str. 120).
- **FOTOČLÁNEK** (solární článek, sluneční baterie) mění dopadající světlo na elektrickou energii, používá se jako elektrický zdroj k napájení kalkulaček (str. 119).
- **TERMOČLÁNEK**, který funguje na principu dotyku dvou různých kovových vodičů, při němž vznikne na rozhraní napětí.



Ohmův zákon, elektrický odpor vodiče

Graf závislosti proudu I procházejícího elektrickým vodičem (spotřebičem) na napětí U mezi konci vodiče se nazývá VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA, značí se V-A charakteristika.

OHMŮV ZÁKON

Proud procházející elektrickým vodičem je přímo úměrný napětí mezi konci vodiče: $I = G \cdot U$.

Veličina G se nazývá ELEKTRICKÁ VODIVOST. Častěji se používá veličina ELEKTRICKÝ ODPOR R, pro který platí $R = \frac{1}{G}$.

OHMŮV ZÁKON se obvykle zapisuje ve tvaru:

$I = \frac{U}{R}$ anebo $U = R \cdot I$.

Výraz $U = R \cdot I$ je napětí na vodiči s odporem R a nazývá se také ÚBYTEK NAPĚTÍ na odporu vodiče nebo spotřebiče anebo zkráceně úbytek napětí na vodiči, spotřebiči apod.

Závislost odporu na vlastnostech vodiče a jeho teplotě

Elektrický odpor neboli REZISTANCE vodiče R při dané teplotě závisí na jeho délce l, kolmém průřezu S a na použitém materiálu, ze kterého je vodič vyroben.

MĚRNÝ ELEKTRICKÝ ODPOR neboli REZISTIVITA ρ je veličina charakterizující materiál vodiče. Závislost elektrického odporu vodiče na jeho délce l, průřezu S a rezistivitě materiálu vodiče vyjadřuje vztah: $R = \rho \frac{l}{S}$.

ELEKTRICKÝ ODPOR kovových vodičů závisí také na teplotě, s rostoucí teplotou roste. Tato závislost je přibližně lineární a je dána vztahem: $R = R_0 \left[1 + \alpha(t - t_0)\right] = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$, kde R je odpor při teplotě t, R_0 je odpor při teplotě t_0, α je TEPLOTNÍ SOUČINITEL elektrického odporu, který je charakteristický pro daný materiál.

REZISTOR je elektrotechnická součástka s pevně stanoveným (fixním) odporem.

Spojování rezistorů

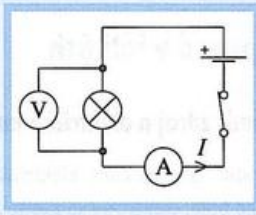
SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ REZISTORŮ

Odpor R, kterým lze rezistory R_1, R_2 zapojené za sebou nahradit, je roven jejich součtu: $R = R_1 + R_2$.

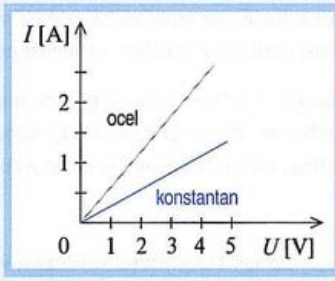
Pro napětí U, U_1, U_2 při sériovém zapojení rezistorů platí: $U : U_1 : U_2 = R : R_1 : R_2$.

U_1, U_2 jsou napětí na jednotlivých rezistorech, $U = U_1 + U_2$ je výsledné napětí na obou rezistorech.

Pro n rezistorů v sérii platí: $R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$.



VOLTAMPÉROVOU CHARAKTERISTIKU vodiče (spotřebiče, např. žárovky) měříme podle zapojení na obrázku.



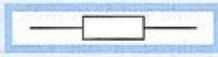
Voltampérová charakteristika ocelového a konstantanového drátu při stálé teplotě.

JEDNOTKOU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI je SIEMENS (S).
JEDNOTKOU ELEKTRICKÉHO ODPORU je OHM (Ω).
JEDNOTKOU MĚRNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU je ohm · metr (Ω · m).

JEDNOTKOU TEPLOTNÍHO SOUČINITELE ELEKTRICKÉHO ODPORU je kelvin na minus první (K^{-1}).

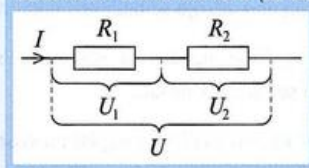
Měrné elektrické odpory kovů při teplotě 20 °C:
$\rho(\mathrm{Cu}) = 1{,}70 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$
$\rho(\mathrm{Al}) = 2{,}7 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$
$\rho(\mathrm{Ag}) = 1{,}70 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$

Fyzikální rozměr jednotky OHM vyplývá ze vztahu $R = \frac{U}{I}$
$\Omega = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{A}^{-1} = \mathrm{W} \cdot \mathrm{A}^{-2} = \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2} \cdot \mathrm{A}^{-2}$
$\mathrm{V} = \mathrm{W} \cdot \mathrm{A}^{-1}$, $\mathrm{W} = \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2}$ (str. 107, 37)



Značka odporu a rezistoru

SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ REZISTORŮ (za sebou)



V obou rezistorech teče stejný proud I.
Pro výsledné napětí na rezistorech platí $U = U_1 + U_2$. Odtud pomocí Ohmova zákona obdržíme $IR = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$.
Pro výsledný odpor R, kterým lze nahradit dané dva rezistory, tedy platí $R = R_1 + R_2$.
R_1, R_2 jsou odpory rezistorů; U_1, U_2 jsou napětí na jednotlivých rezistorech.

PARALELNÍ ZAPOJENÍ REZISTORŮ:

Pro výsledný odpor R paralelně zapojených rezistorů R_1, R_2 platí: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, anebo $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Pro proudy platí: $I : I_1 : I_2 = \frac{1}{R} : \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2}$.

Pro n rezistorů platí: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$.

Ohmův zákon pro jednoduchý obvod

V jednoduchém uzavřeném elektrickém obvodu prochází proud všemi částmi obvodu, tzn. spotřebičem, spínačem, spojovacími vodiči a také zdrojem napětí. Všechny části obvodu kladou procházejícímu proudu elektrický odpor. Odpor, který klade procházejícímu proudu zdroj elektrického napětí, nazýváme **VNITŘNÍ ODPOR ZDROJE** a označujeme ho R_i. Je-li R odpor elektrického spotřebiče, spojovacích vodičů a spínače, R_i vnitřní odpor zdroje, pak celkový odpor uzavřeného obvodu je $R + R_i$. Při elektromotorickém napětí U_e prochází uzavřeným obvodem proud I. Pak platí **OHMŮV ZÁKON** ve tvaru: $U_e = (R_i + R)I$.

Ohmův zákon pro uzavřený obvod můžeme rozepsat do tvaru $U_e = (R_i + R)I = R_i I + RI = U_i + U$, kde $U_i = R_i I$ je úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje R_i a $U = RI$ je úbytek napětí na vnějším odporu R a současně svorkové napětí.

Svorkové napětí U elektrického zdroje klesá v závislosti na velikosti odebíraného proudu z tohoto zdroje. Tato závislost $U = U(I)$ se nazývá **ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA** elektrického zdroje.

Pro svorkové napětí U platí vztah $U = U_e - R_i I$.

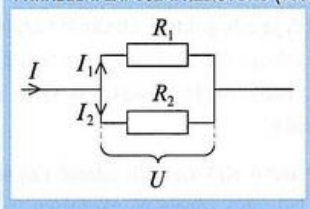
Je-li odpor R vnější části obvodu nulový $R = 0$, nastane **ZKRAT** neboli **SPOJENÍ NAKRÁTKO**, zdroj je zkratován, svorkové napětí $U = 0$ a zdrojem bude procházet zkratový proud $I_z = \frac{U_e}{R_i}$.

Nebezpečí zkratu zabraňujeme zařazováním **POJISTEK** a **JISTIČŮ** do elektrického obvodu, které obvod při zkratu přeruší. Zvlášť nebezpečný může být zkrat u olověných akumulátorů a u elektrické rozvodné sítě.

TVRDÉ ZDROJE NAPĚTÍ mají velmi malý vnitřní odpor a jejich svorkové napětí klesá v závislosti na odebíraném proudu nepatrně.

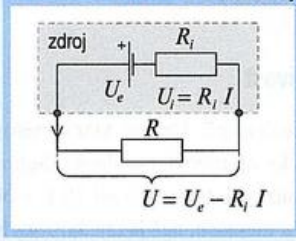
MĚKKÉ ZDROJE NAPĚTÍ mají velký vnitřní odpor.

PARALELNÍ ZAPOJENÍ REZISTORŮ (vedle sebe)



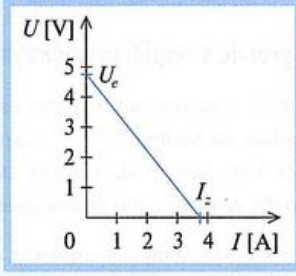
Na obou rezistorech je stejné napětí U. Pro celkový proud v obvodu platí $I = I_1 + I_2$, I_1, I_2 jsou proudy jednotlivých rezistorů, R_1, R_2 jsou odpory rezistorů. Odtud pomocí Ohmova zákona získáme vztah $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$. Pro výsledný odpor, kterým lze oba rezistory nahradit, platí $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

JEDNODUCHÝ OBVOD tvoří elektrický zdroj s vnitřním

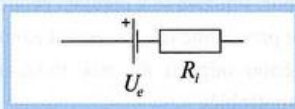


odporem R_i a smyčka s vnějším odporem R. Proud prochází pouze uzavřeným obvodem.

ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA elektrického zdroje



Pro svorkové napětí U platí $U = U_e - R_i I$, kde R_i je vnitřní odpor zdroje, U_e elektromotorické napětí, I je proud.



Schematická značka zdroje o elektromotorickém napětí U_e a vnitřním odporu R_i. Reálný elektrický zdroj se chová, jako by byl sériově složen z ideálního zdroje.

Zdroj elektrického napětí je také zdrojem elektrické energie, která koná práci. Připojením zdroje napětí do obvodu vzniká ve vnější části obvodu elektrické pole, které uvádí do pohybu elektrické náboje. Je-li U svorkové napětí zdroje, přenesením náboje Q z kladného pólu zdroje na záporný se vykoná práce $W = U \cdot Q$ (str. 107), která se spotřebuje na překonání vnějšího odporu R.

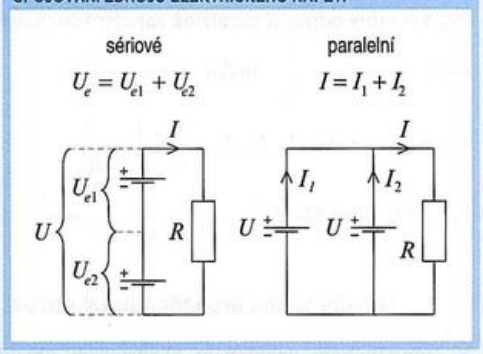
Spojování zdrojů elektrického napětí

Elektrická **BATERIE** je zdroj, který získáme vzájemným spojením elektrických zdrojů (sériově nebo paralelně). Spojením dostaneme zdroj, který může poskytovat vyšší napětí nebo dodávat vyšší proudy.

Při **SÉRIOVÉM SPOJENÍ** elektrických zdrojů (za sebou) spojujeme kladný pól jednoho zdroje se záporným pólem zdroje následujícího. Výsledné napětí celé baterie se rovná součtu napětí jednotlivých zdrojů: $U_e = U_{e1} + U_{e2}$.

Při **PARALELNÍM SPOJENÍ** elektrických zdrojů (vedle sebe) spojujeme kladné póly všech zdrojů a také záporné póly všech zdrojů; všechny zdroje musí mít stejné elektromotorické napětí. Výsledné napětí baterie je stejné jako napětí jednotlivých zdrojů, může ale dodávat vyšší proud.

SPOJOVÁNÍ ZDROJŮ ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ



Supravodivost

SUPRAVODIVOST je jev, při kterém klesá měrný elektrický odpor látky prakticky na nulovou hodnotu. Supravodivost se objevuje při velmi nízkých teplotách asi 10 K a při hustotách elektrického proudu menších, než je tzv. kritická hustota proudu supravodiče.

SUPRAVODIČ je látka, u které byly pozorovány supravodivé vlastnosti. Pokud vytvoříme v supravodivém prstenci proud, bude jím procházet beze změny stále, aniž by jej bylo potřeba udržovat elektrickým zdrojem.

VYSOKOTEPLOTNÍ SUPRAVODIVOST nastává u některých nově objevených, tzv. kovových keramických sloučenin již při teplotách kolem 70–80 K.

Vznik supravodivosti je podmíněn vznikem Cooperových párů elektronů, které se chovají jako bosony a nesrážejí se při pohybu s atomy.

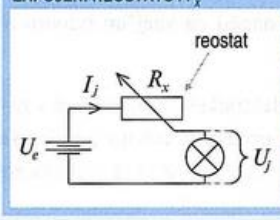
Regulace proudu a napětí proměnným odporem

Potřebujeme-li zmenšit hodnoty napětí nebo proudu, které dodává elektrický zdroj, na hodnoty I_j, U_j udané výrobcem spotřebiče, docílíme toho tak, že do obvodu zapojíme proměnný odpor v podobě reostatu nebo potenciometru.

REOSTAT je rezistor s nastavitelným kontaktem, který umožňuje měnit jeho odpor. Používá se k regulaci proudu v elektrickém obvodu, kterou provádíme tak, že reostat zapojíme sériově ke spotřebiči. Změnou odporu R_x pak můžeme regulovat proud a napětí na spotřebiči.

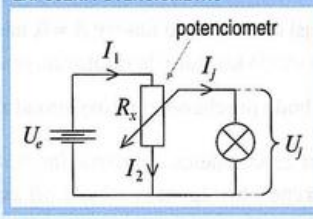
POTENCIOMETR je rezistor s nastavitelným kontaktem, který se používá k nastavení požadované hodnoty elektrického napětí U_j. Regulaci potenciometrem provádíme změnou jeho odporu, požadované napětí můžeme měnit plynule od maximální hodnoty U_e až do nuly.

ZAPOJENÍ REOSTATU R_x



Optimální hodnoty proudu I_j a napětí U_j dosáhneme nastavením odporu R_x na reostatu, pak $U_j = U_e - I_j R_x$.

ZAPOJENÍ POTENCIOMETRU



Požadované hodnoty napětí U_j dosáhneme nastavením odporu na potenciometru.

Kirchhoffovy zákony

Složitější elektrické obvody nazýváme **ELEKTRICKÉ SÍTĚ**.

UZEL sítě je místo, ve kterém se stýkají nejméně tři vodiče. Vodivé spojení sousedních uzlů se nazývá **VĚTEV**.

JEDNODUCHÝ OBVOD je tvořen zdroji, vodiči, spotřebiči apod. spojenými do kruhu.

Uzavřená **SMYČKA** je část elektrické sítě tvořící (nebo vypadající jako) jednoduchý obvod.

Síť na obrázku znázorňujícím zapojení potenciometru má dvě uzavřené smyčky.

1. KIRCHHOFFŮV ZÁKON (zákon pro uzel sítě): Součet proudů vstupujících do uzlu se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.

První Kirchhoffův zákon je důsledkem zákona zachování elektrického náboje: v uzlu náboj nevzniká, nehromadí se, ani se neztrácí.

1. KIRCHHOFFŮV ZÁKON zapsaný rovnicí:

Algebraický součet proudů v uzlu je nulový, tj. $\sum_{k=1}^{n} I_k = 0$,

kde n je počet větví stýkajících se v uzlu.

Proudy, jejichž vyznačený směr míří do uzlu, bereme se znaménkem kladným, proudy vycházející z uzlu se znaménkem záporným.

2. KIRCHHOFFŮV ZÁKON (pro uzavřenou smyčku elektrické sítě): Součet všech elektromotorických napětí zdrojů je v uzavřené smyčce stejný jako součet všech úbytků napětí na rezistorech. Jestliže je tedy ve smyčce m zdrojů a n rezistorů, platí:

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

V uzavřené smyčce si zvolíme směr obíhání. Elektromotorická napětí orientovaná souhlasně se směrem obíhání píšeme s kladným znaménkem, ostatní se záporným. Úbytky napětí na rezistorech píšeme s kladným znaménkem, jestliže zvolená orientace proudu souhlasí se směrem obíhání, jinak se záporným.

Práce a výkon elektrického proudu

Při přenesení náboje Q ve vnější části elektrického obvodu mezi místy, mezi kterými je napětí U, vykoná elektrické pole a tedy i elektrický proud práci: $W = U \cdot Q$.

Je-li proud I v obvodu konstantní, pak pro práci elektrického proudu vykonanou v průběhu doby t platí: $W = U \cdot I \cdot t$.

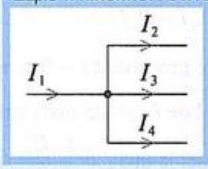
VÝKON P elektrického proudu I ve spotřebiči o odporu R je dán vztahem: $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$, kde U je napětí na spotřebiči. Vztah vyjadřuje také **PŘÍKON SPOTŘEBIČE**, tj. množství elektrické energie odebrané spotřebičem za jednotku času.

VÝKON SPOTŘEBIČE P_s je množství práce, kterou spotřebič vykoná za jednotku času.

ÚČINNOST SPOTŘEBIČE η_s je podíl výkonu P_s a příkonu P spotřebiče: $\eta_s = \frac{P_s}{P}$.

ÚČINNOST η_z elektrického zdroje je podíl výkonu proudu ve vnějším obvodu $P = U \cdot I$ a energie $P_z = U_e \cdot I$ dodané zdrojem za jednotku času: $\eta_z = \frac{P}{P_z} = \frac{R}{(R_i + R)}$.

Zápis **1. KIRCHHOFFOVA ZÁKONA** pro zobrazený uzel:



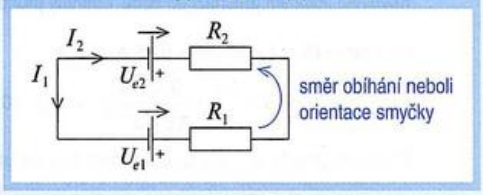
$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$

anebo

$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

Jestliže neumíme předem vyznačit správný směr proudu, můžeme ho zvolit libovolně. Zvolíme-li směr správně, po vyřešení rovnic vyjde proud kladný, zvolíme-li směr proudu opačně, nežli je jeho skutečný směr, po vyřešení vyjde proud záporný.

Zápis **2. KIRCHHOFFOVA ZÁKONA** pro zobrazenou uzavřenou smyčku je $U_{e1} - U_{e2} = R_1 I_1 - R_2 I_2$.



Orientace elektromotorického napětí ve zdroji má směr nárůstu potenciálu, tj. od minus do plus.

Elektrická energie zdroje elektrického napětí se ve spotřebiči mění na jiné formy energie. Např. v elektromotoru se mění na energii mechanickou, v žárovce v energii vnitřní a světelnou, v topné spirále ve vnitřní energii.

VÝKON ELEKTRICKÉHO PROUDU P je určen prací vykonanou za jednotku času, tj. $P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$.

Dosazením za napětí U, resp. za proud I z Ohmova zákona obdržíme vztah: $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$.

JEDNOTKOU VÝKONU je **WATT** (W) (str. 37), W = V · A (str. 107).

JOULŮV-LENZŮV ZÁKON: Průchodem proudu se vodiče zahřívají. Nedochází-li k jiné spotřebě elektrické energie v obvodu, pak se veškerá energie dodávaná po dobu t spotřebovává na zahřívání vodičů, tj. mění se v **JOULOVO TEPLO** $Q_J = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 t = \frac{U^2}{R} t$.

$$\eta_z = \frac{P}{P_z} = \frac{U \cdot I}{U_e \cdot I} = \frac{U}{U_e} = \frac{RI}{(R_i + R)I} = \frac{R}{(R_i + R)}$$

Výkon elektrického proudu ve spotřebiči je:
$P = U \cdot I = (U_e - R_i I)I = U_e I - R_i I^2$.

Nulový výkon ve spotřebiči je pro proud $I = 0$ a při spojení zdroje nakrátko, kdy $I = I_z = \frac{U_e}{R_i}$, kde I_z je zkratový proud.

Maximální výkon ve spotřebiči je pro $I = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_e}{R_i} = \frac{I_z}{2}$.

Energie $P_z = U_e \cdot I = (R + R_i) \cdot I^2 = RI^2 + R_i I^2$ dodávaná zdrojem za jednotku času se spotřebuje:

- ve vnitřním odporu zdroje R_i (ve vztahu pro P_z je to člen $R_i I^2$),
- ve vnější části obvodu (člen $RI^2 = U \cdot I = P$),

kde I je proud protékající zdrojem a obvodem, R je odpor vnější části obvodu, U_e je elektromotorické napětí.

Nulový výkon ve spotřebiči $P = 0$, tj.

$P = U_e I_z - R_i I_z^2 = 0 \Rightarrow U_e I_z = R_i I_z^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow U_e = R_i I_z \Rightarrow I_z = \frac{U_e}{R_i}$.

Zkratový proud I_z je největší proud, který může procházet obvodem.

Maximální výkon P zjistíme z podmínky $\frac{dP}{dI} = 0$,

$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI}(U_e I - R_i I^2) = U_e - 2R_i I = 0 \Rightarrow$

$U_e = 2R_i I \Rightarrow I = \frac{U_e}{2R_i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_e}{R_i} = \frac{1}{2} \cdot I_z$.

Př. 1

Kovovým vodičem prochází po dobu 1 minuty proud o velikosti 50 mA. Kolik elektronů projde za tuto dobu průřezem vodiče?

$t = 1\,\text{min} = 60\,\text{s}; I = 50\,\text{mA} = 0{,}05\,\text{A}; N = ?$

$I = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t} \Rightarrow N = \frac{I \cdot t}{e} = \frac{0{,}05 \cdot 60}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \doteq 1{,}9 \cdot 10^{19}$

Při stálém proudu 50 mA projde vodičem za 1 minutu asi $1{,}9 \cdot 10^{19}$ elektronů.

- Prošlý náboj Q lze vyjádřit jako celočíselný násobek elementárního náboje $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, který přenáší jeden elektron.

Př. 2

Měděný vodič má při teplotě 15 °C odpor 58 Ω. Urči jeho odpor při teplotě 300 °C, jestliže $\alpha(\text{Cu}) = 4 \cdot 10^{-3}\,\text{K}^{-1}$.

$t_0 = 15\,°\text{C}; t = 300\,°\text{C}; R_0 = 58\,\Omega; R = ?$

$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t); \{R\} = 58 \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (300 - 15)] \doteq 124; R = 124\,\Omega$

Odpor vodiče při teplotě 300 °C bude 124 Ω.

Př. 3

Urči, jaké bude napětí na rezistorech $R_1 = 400\,\Omega$, $R_2 = 600\,\Omega$, jestliže budou připojeny ke zdroji o napětí 24 V:
a) za sebou, **b)** vedle sebe.

$R_1 = 400\,\Omega; R_2 = 600\,\Omega; U = 24\,\text{V}; U_1 = ?; U_2 = ?$

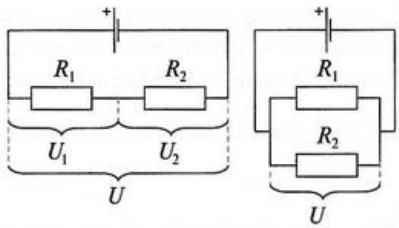
a) $U_1 : U_2 = R_1 : R_2 = 400 : 600 = 2 : 3$

$U_1 : U_2 = 2 : 3$

$U_1 + U_2 = 24$

$U_1 = 9{,}6\,\text{V}; U_2 = 14{,}4\,\text{V}$

- Získali jsme soustavu dvou rovnic o dvou neznámých, kterou vyřešíme.



a) Napětí na rezistorech bude $U_1 = 9{,}6$ V a $U_2 = 14{,}4$ V.

b) Napětí na obou rezistorech je stejné jako napětí zdroje, tj. $U_1 = U_2 = 24$ V.

Př. 4

Ke svorkám zdroje o elektromotorickém napětí 3 V a vnitřním odporu 1,8 Ω je připojen vnější obvod, kterým prochází proud 150 mA. Určete odpor vnějšího obvodu a proud při zkratu.

$U_e = 3\,\text{V}; R_i = 1{,}8\,\Omega; I = 150\,\text{mA} = 0{,}15\,\text{A}; R = ?; I_k = ?$

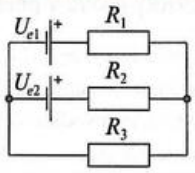
$I = \frac{U_e}{R + R_i} \Rightarrow R = \frac{U_e - I \cdot R_i}{I}; I_k = \frac{U_e}{R_i}$

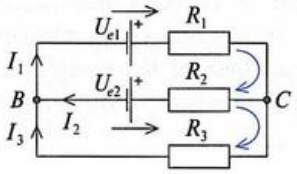
$\{R\} = \frac{3 - 0{,}15 \cdot 1{,}8}{0{,}15} = 18, R = 18\,\Omega; \{I_k\} = \frac{3}{1{,}8} = 1{,}7; I_k = 1{,}7\,\text{A}$

Odpor vnějšího obvodu je 18 Ω, proud při zkratu je 1,7 A.

Př. 5

Urči proudy v jednotlivých větvích. Urči velikost napětí na rezistoru R_3, jestliže je dáno: $U_{e1} = U_{e2} = 4{,}5$ V, $R_1 = 0{,}75\ \Omega$, $R_2 = 3\ \Omega$, $R_3 = 3{,}9\ \Omega$.





- Zvolíme (libovolně) směr proudů v jednotlivých větvích. Většinou volíme směry proudů tak, aby všechny proudy nesměřovaly do uzlu, nebo aby naopak všechny proudy nesměřovaly z uzlu ven (něco musí jít dovnitř a něco ven).
  Zvolíme směr „obíhání" uzavřenou smyčkou. Shoduje-li se směr obíhání ve větvi se směrem proudu, je úbytek napětí na rezistoru kladný, jinak je záporný.
- Elektromotorická napětí orientovaná (směr od minus k plus) souhlasně se směrem obíhání jsou kladná, jinak jsou záporná.

$I_1 = I_2 + I_3 \Rightarrow I_1 - I_2 - I_3 = 0$

$R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_{e1} - U_{e2}$ dosadíme, pak $0{,}75 I_1 + 3 I_2 = 0$

$-R_2 I_2 + R_3 I_3 = U_{e2}$ dosadíme, pak $-3 I_2 + 3{,}9 I_3 = 4{,}5$

- První rovnice plyne z 1. Kirchhoffova zákona pro uzel B.
- Sestavíme další dvě rovnice (ze dvou uzavřených smyček) a dostaneme takto soustavu tří rovnic pro tři neznámé I_1, I_2, I_3.
- Dosadíme do soustavy číselné hodnoty jednotlivých veličin a soustavu vyřešíme.

$I_1 = 0{,}8$ A, $I_2 = -0{,}2$ A, $I_3 = 1$ A

$U_3 = R_3 \cdot I_3$

$\{U_3\} = 3{,}9 \cdot 1 = 3{,}9;\ U_3 = 3{,}9$ V

- Znaménko minus u proudu I_2 znamená, že skutečný směr tohoto proudu je opačný než zvolený.
- Spočteme napětí na rezistoru R_3.

Proudy v jednotlivých větvích obvodu mají velikost $I_1 = 0{,}8$ A, $I_2 = 0{,}2$ A, $I_3 = 1$ A. Napětí na rezistoru R_3 je 3,9 V.

Př. 6

Ke zdroji s elektromotorickým napětím 24 V a vnitřním odporem 0,8 Ω je připojen spotřebič o odporu 1,2 Ω.
Urči: **a)** proud procházející obvodem, **b)** výkon zdroje, **c)** teplo, které vznikne při průchodu el. proudu tímto obvodem za 1 hod.

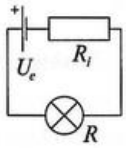
$U_e = 24$ V; $R_i = 0{,}8\ \Omega$; $R = 1{,}2\ \Omega$; $t = 1$ h $= 3\ 600$ s; $I = ?$; $P = ?$; $Q = ?$

a) $I = I_s$

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

$$\{I\} = \frac{24}{1{,}2 + 0{,}8} = 12;\ I = 12 \text{ A}$$

- Proudy procházející zdrojem a spotřebičem jsou stejné.



Proud procházející zdrojem i spotřebičem je 12 A.

b) $P = U_e \cdot I$

$\{P\} = 24 \cdot 12 = 288;\ P = 288$ W

Výkon zdroje je přibližně 290 W.

c) $Q = RI^2 t$

$\{Q\} = 1{,}2 \cdot 12^2 \cdot 3\ 600 = 622\ 080;\ Q = 622\ 080$ J $= 622{,}08$ kJ

Teplo, které vznikne v obvodu za hodinu, je asi 620 kJ.

Elektrický proud v polovodičích

POLOVODIČE jsou látky, jejichž elektrické vlastnosti závisejí na vnějších podmínkách (např. teplotě, osvětlení apod.) mnohem více než u vodičů. Polovodiče se při nízkých teplotách chovají jako izolanty, jejich odpor se ale s rostoucí teplotou rychle zmenšuje (odpor kovů se s teplotou zvětšuje). Měrný elektrický odpor polovodičů se pohybuje v intervalu 10^{-4} Ωm - 10^{8} Ωm, kdežto kovy mají měrný odpor v rozmezí 10^{-8} Ωm - 10^{-6} Ωm. Polovodiče jsou např. křemík Si, germanium Ge, uhlík C, selen Se, telur Te a některé chemické sloučeniny.

Vlastní polovodiče, vlastní vodivost

VLASTNÍ POLOVODIČ je čistý polovodič (čistá krystalická látka, např. křemík Si) zbavený nežádoucích příměsí, v němž jsou nositeli volného elektrického náboje jen elektrony a díry generované (např. zvýšením teploty nebo osvětlením) současně, tedy v párech. Hustota elektronů i děr je v takovém polovodiči stejná.

VLASTNÍ VODIVOST POLOVODIČE je elektrická vodivost zprostředkovaná elektrony, které se uvolní z atomu v důsledku tepelných kmitů, a vzniklými dírami. V místě uvolněného elektronu vzniká nedostatek záporného náboje, tzv. díra, která má vlastnost kladné částice. Vzniku páru elektron - díra se říká **GENERACE**, zániku páru se říká **REKOMBINACE**. Elektrický proud v polovodiči je součtem elektronového a děrového proudu: $I = I_e + I_d$. S rostoucí teplotou roste i tepelný pohyb atomů v krystalové mřížce, což u polovodičů způsobuje větší počet generací párů elektron - díra, tím roste i vodivost polovodiče.

Příměsové polovodiče, příměsová vodivost

PŘÍMĚSOVÝ POLOVODIČ obsahuje příměs, tj. atomy zabudované do jeho krystalové mřížky, které mají přebytek anebo nedostatek valenčních elektronů oproti vlastnímu polovodiči. **PŘÍMĚSOVÁ VODIVOST** polovodiče je elektrická vodivost způsobená příměsemi, tedy podmíněná zvýšenou hustotou nosičů náboje určitého druhu (elektronů nebo děr).

DONOR je příměs atomů, které mají přebytek valenčních elektronů oproti vlastnímu polovodiči. Je-li vlastním polovodičem křemík, donorem jsou atomy prvků s 5 valenčními elektrony (P, As, Sb, Te), zvyšující hustotu elektronů v polovodiči.

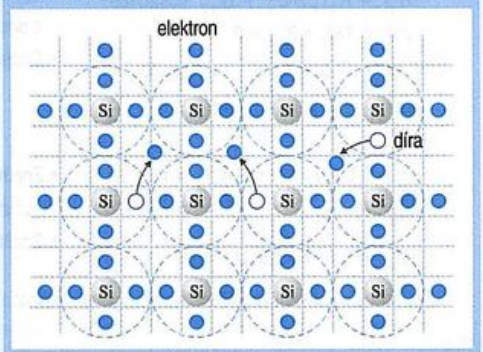
ELEKTRONOVÁ VODIVOST je taková vodivost polovodiče, kdy jako nositelé proudu převažují elektrony.

POLOVODIČE TYPU N jsou polovodiče s elektronovou vodivostí (N - podle elektronu s negativním nábojem).

TERMISTOR je polovodičová součástka, která se používá v obvodech k měření a regulaci teploty. Využívá se přitom toho, že odpor termistoru se s rostoucí teplotou rychle zmenšuje. Termistory jsou vyrobeny např. z Fe_2O_3, CuO, TiO_2.

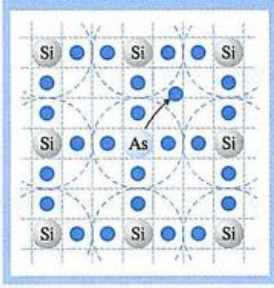
FOTOREZISTOR je polovodičová součástka (tzv. fotobuňka), která se používá v obvodech k měření a regulaci osvětlení (str. 178). Využívá se přitom toho, že odpor fotorezistoru (větší než 1MΩ) klesá při osvětlení na 1 000–100 Ω. Fotorezistory jsou vyrobeny nejčastěji z CdS.

VLASTNÍ POLOVODIČ
Schéma krystalové mřížky křemíku.
Vznik párů volný elektron – díra.



Atom křemíku má 4 valenční elektrony, které v krystalové mřížce čistého křemíku vytvářejí kovalentní vazby s valenčními elektrony 4 sousedních atomů. Při běžných teplotách dochází vlivem tepelných kmitů k uvolnění některých elektronů z vazeb. Vzniklá díra se časem zaplní, např. přeskokem blízkého vázaného elektronu, na jeho místě vznikne nová díra, tedy kladný náboj spojený s dírou se pohybuje.

POLOVODIČ TYPU N – křemík s příměsí As:



Čtyři valenční elektrony As se podílejí na vazbě se 4 sousedními atomy Si. Poslední elektron je prakticky volný a může zprostředkovat vedení elektrického proudu.

AKCEPTOR je příměs atomů, které mají nedostatek valenčních elektronů oproti vlastnímu polovodiči. Je-li vlastním polovodičem křemík, akceptorem jsou atomy prvků s 3 valenčními elektrony (B, Ga, In), zvyšující hustotu děr v polovodiči.

DĚROVÁ VODIVOST je taková vodivost polovodiče, kdy jako nositelé proudu převažují díry.

POLOVODIČE TYPU P jsou polovodiče s děrovou vodivostí. Díra se chová jako částice s pozitivním nábojem, proto se nazývají polovodiče typu P.

Polovodičová dioda

POLOVODIČOVÁ DIODA je součástka skládající se z polovodiče typu P (anody A) a z polovodiče typu N (katody K). Dioda zapojená v elektrickém obvodu má tu vlastnost, že ve směru P → N elektrický proud propouští; říkáme, že je zapojená v **PROPUSTNÉM SMĚRU**. V opačném směru N → P dioda elektrický proud prakticky nepropouští, říkáme, že je zapojená v **ZÁVĚRNÉM SMĚRU**. Tato závislost vodivosti diody na orientaci přiloženého napětí se nazývá **DIODOVÝ JEV**. Diody se nejčastěji používají v usměrňovacích obvodech.

V oblasti PN přechodu mezi polovodiči P a N se setkávají volné elektrony polovodiče typu N s dírami polovodiče typu P. Dochází zde k jejich rekombinaci. To způsobí, že u PN přechodu se polovodič P nabije záporně a odpuzuje další elektrony.

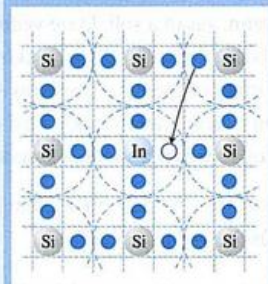
- Vzniká **HRADLOVÁ VRSTVA** s elektrickým polem, jehož intenzita brání dalšímu pronikání děr a elektronů do oblasti přechodu (obr. a).
- Zapojíme-li diodu v propustném směru (obr. b), začne se hradlová vrstva zužovat a při překročení tzv. prahového napětí U_{F0} zanikne. Začne docházet k dalším rekombinacím a diodou začne procházet proud.
- Zapojíme-li diodu v závěrném směru (obr. c), způsobí přiložené napětí pouze rozšíření hradlové vrstvy, která brání vedení proudu. V závěrném směru nesmí napětí překročit tzv. průrazné napětí U_{BR}, jinak by došlo ke zničení diody.

ZENEROVA DIODA se překročením průrazného napětí nezničí, dochází k nedestruktivnímu průrazu. Zenerovy diody se používají ve stabilizátorech stejnosměrného napětí.

LED (light emiting diode, **SVĚTELNÁ DIODA**) je polovodičová dioda vyráběná z průhledného arsenidu galia GaAs. Když PN přechodem prochází proud v propustném směru, nastává emise světelného záření (např. LED v „blikačkách" kol).

FOTODIODA je polovodičová dioda, jejíž konstrukce umožňuje přivádět na PN přechod světlo, které zde generuje páry elektron - díra. Využívá se jako zdroj elektrické energie v solárních článcích (str. 111, 178).

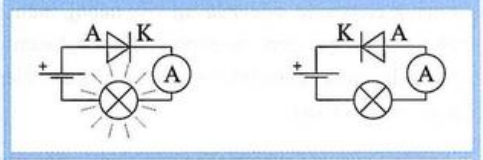
POLOVODIČ TYPU P – křemík Si s příměsí In.

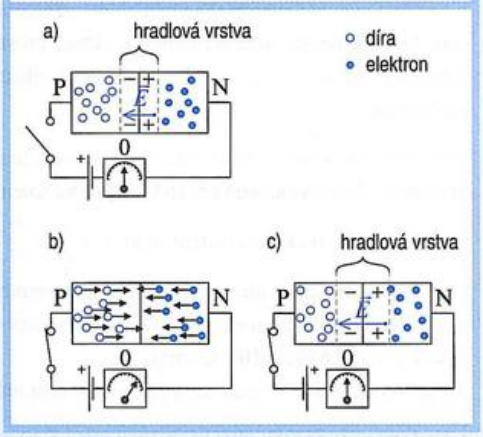


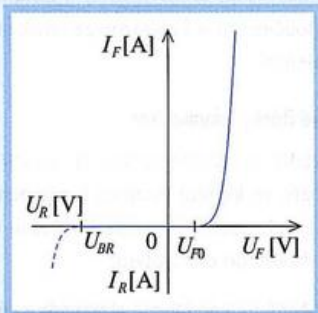
Tři valenční elektrony příměsi se podílejí na kovalentní vazbě se 3 atomy Si. V místě čtvrté vazby je díra, která může být zaplněna přeskokem elektronu z jiného atomu křemíku.

POLOVODIČOVÁ DIODA zapojena:

v propustném směru, v závěrném směru.



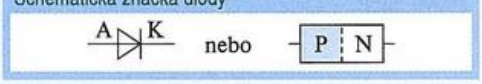




Voltampérová charakteristika křemíkové polovodičové diody.

U_F, I_F – napětí a proud v propustném směru,
U_R, I_R – napětí a proud v závěrném směru,
U_{F0} – prahové napětí, U_{BR} – průrazné napětí.

Schematická značka diody



Elektrický proud v kapalinách

Taveniny, roztoky kyselin, zásad a solí, které vedou elektrický proud, se nazývají ELEKTROLYTY. Vodivost elektrolytu způsobují kladné a záporné ionty (kationty + a anionty –), uváděné do pohybu elektrickým polem, které vzniká mezi elektrodami ponořenými do elektrolytu (mezi anodou a katodou).

ELEKTROLYTICKÁ DISOCIACE je děj, při kterém nastává rozpad látky na ionty způsobený rozpouštědlem.

Elektrolýza, Faradayovy zákony pro elektrolýzu

ELEKTROLÝZA je jev, kdy průchodem proudu elektrolytem dochází na elektrodách k látkovým změnám. Ionty, poté co dorazí k elektrodě, odevzdávají svůj náboj, mění se na atomy nebo molekuly, které se mohou buď vyloučit na povrchu elektrody, nebo chemicky reagovat s materiálem elektrody (popř. elektrolytu).

1. FARADAYŮV ZÁKON PRO ELEKTROLÝZU: Hmotnost m vyloučené látky je přímo úměrná náboji Q, který prošel povrchem elektrody, tj. $m = A \cdot Q = A \cdot I \cdot t$, kde A je elektrochemický ekvivalent.

ELEKTROCHEMICKÝ EKVIVALENT A je veličina vyjadřující hmotnost látky vyloučené při elektrolýze nábojem 1 C.

Pro elektrochemický ekvivalent platí $A = \frac{m}{Q} = \frac{M_m}{F \cdot z}$,

kde M_m je molární hmotnost, z je počet elementárních nábojů, které nese daný iont, F je FARADAYOVA KONSTANTA, $F = N_A \cdot e = 9{,}64853 \cdot 10^4\ \mathrm{C \cdot mol^{-1}}$,
N_A je Avogadrova konstanta, e je elementární náboj.

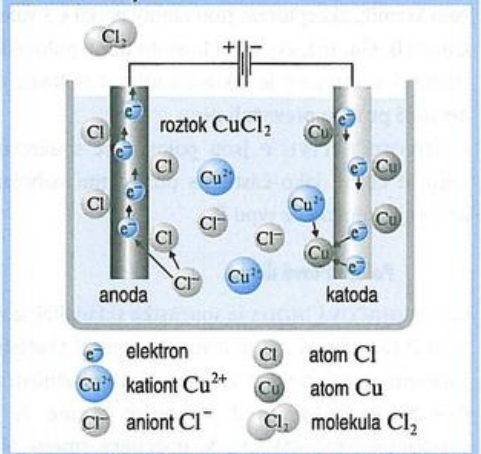
2. FARADAYŮV ZÁKON PRO ELEKTROLÝZU: Látková množství různých látek vyloučených při elektrolýze týmž nábojem jsou chemicky ekvivalentní.

Galvanické články, akumulátor

GALVANICKÝ neboli ELEKTROCHEMICKÝ ČLÁNEK je zdroj elektrického napětí, ve kterém dochází k přeměně chemické energie v energii elektrickou. Je tvořený dvěma elektrodami ponořenými do vhodného elektrolytu.

PRIMÁRNÍ GALVANICKÝ ČLÁNEK má elektrody z různých kovů. Mezi kovovou elektrodou a elektrolytem vzniká rozdíl potenciálů, který je u různých kovů různý. Výsledné napětí galvanického článku je dáno rozdílem potenciálů obou elektrod. Proces přeměny energie je nevratný, vybitý článek nelze prakticky znovu nabít.

ELEKTROLÝZA v roztoku $CuCl_2$ obsahujícím kationty Cu^{2+} a anionty Cl^-.



Elektrolýza má široké praktické použití. Používá se např. ke galvanickému pokovování nebo galvanickému leptání. Elektrolyticky se také vyrábějí některé kovy, např. hliník z Al_2O_3.

Ionty mohou nést náboje různé velikosti, např. K^+, Cl^- mají jeden elementární náboj, Cu^{2+}, SO_4^{2-} mají dva elementární náboje.

JEDNOTKOU ELEKTROCHEMICKÉHO EKVIVALENTU je $\mathrm{kg \cdot C^{-1}}$.

Odvození vztahu pro elektrochemický ekvivalent A:

$Q = N \cdot z \cdot e$, kde $N = n \cdot N_A$ je počet molekul vyloučených nábojem Q, n je počet molů: $Q = n \cdot N_A \cdot z \cdot e$,
$m = n \cdot M_m$ (str. 78).
Dosadíme do vztahu pro elektrochemický ekvivalent A a obdržíme:

$$A = \frac{m}{Q} = \frac{n \cdot M_m}{n \cdot N_A \cdot z \cdot e} = \frac{M_m}{N_A e \cdot z} = \frac{M_m}{F \cdot z}.$$

Chemicky ekvivalentní množství jsou taková množství různých látek, která se mohou v chemické sloučenině navzájem nahradit nebo se mohou beze zbytku sloučit.

PRIMÁRNÍ GALVANICKÉ ČLÁNKY

SUCHÝ ČLÁNEK je tvořen kladnou uhlíkovou elektrodou a vnější zápornou zinkovou elektrodou. Elektrolytem je roztok salmiaku NH_4Cl. Elektromotorické napětí je cca 1,5 V.

ALKALICKÉ ČLÁNKY mají delší životnost a lze z nich získat více elektrické energie. Elektrolytem je hydroxid draselný KOH, elektrody jsou z grafitu (+) a zinku (–).

SEKUNDÁRNÍ GALVANICKÝ ČLÁNEK (AKUMULÁTOR) je vratný elektrochemický článek, který je možno připojením k vnějšímu zdroji a průchodem elektrického proudu v opačném směru (než je směr proudu při vybíjení) uvést do nabitého stavu a pak z něj odebírat elektrický proud.

KAPACITA AKUMULÁTORU je celkový elektrický náboj, který akumulátor vydá při vybíjení, než se vybije, tj. než jeho napětí poklesne pod přípustnou hodnotu. Udává se v ampérhodinách (Ah).

OLOVĚNÝ AKUMULÁTOR je složený z olověných desek ponořených v roztoku kyseliny sírové. Svorkové napětí má přibližně 2 V. Má malý vnitřní odpor.

ALKALICKÝ AKUMULÁTOR má delší životnost a větší vnitřní odpor. Elektrolytem je roztok KOH, svorkové napětí je kolem 1,3 V.

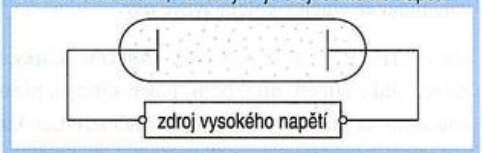
LITHIOVÝ AKUMULÁTOR je schopen dlouhodobého zatížení malými proudy.

Elektrický proud v plynech

ELEKTRICKÝ VÝBOJ je jev vznikající při průchodu elektrického proudu plynem. Podmínkou vzniku výboje je:

- existence volných elektronů a iontů v plynu,
- elektrická energie dodávaná do plynu.

Elektrickou energii lze do plynu ve výbojce dodávat dvěma elektrodami, na kterých je stejnosměrné napětí.



V případě korony jsou elektrodami kovový hrot a země.

NESAMOSTATNÝ ELEKTRICKÝ VÝBOJ je elektrický proud v plynu, který je podmíněn přítomností ionizátoru. Výboj zanikne v okamžiku, kdy ionizátor přestane působit.

SAMOSTATNÝ ELEKTRICKÝ VÝBOJ je výboj v plynu, který ke své existenci nepotřebuje přítomnost ionizátoru a udrží se vlastní ionizací. Elektrony a někdy i ionty jsou elektrickým polem urychleny natolik, že při srážkách ionizují neutrální molekuly a dochází k ionizaci nárazem.

IONIZACE PLYNU je vznik volných elektronů a iontů v plynu a to tak, že se některé molekuly rozštěpí na kladný iont a elektron působením ionizátoru nebo vzájemnými srážkami – vzniká **IONIZOVANÝ PLYN**. Děj opačný k ionizaci se nazývá **REKOMBINACE**.

OBLOUKOVÝ VÝBOJ je samostatný výboj mezi rozžhavenými elektrodami, charakteristický vysokými proudy a teplotami (tisíce kelvinů). Probíhá za atmosférického tlaku a používá se při obloukovém sváření kovů, na tavení látek apod.

IONIZÁTOR neboli **IONIZAČNÍ ČINIDLO** vyvolává ionizaci atomů a molekul. Ionizátorem je rentgenové nebo gama záření, proud elektronů ze žhavého kovu, proud částic alfa apod. Ionizátor předá atomu při interakci energii potřebnou k ionizaci; tato energie se nazývá **IONIZAČNÍ ENERGIE**. Plyny lze ionizovat také zahřátím na vysokou teplotu, čímž atomy a molekuly získají dostatečnou kinetickou energii na jejich ionizaci při vzájemných srážkách.

JISKROVÝ VÝBOJ je krátkodobý samostatný výboj, který vzniká při vysokém napětí mezi dvěma vodiči za atmosférického tlaku a je doprovázen zvukovými a světelnými efekty. Jiskra má podobu jasně svítících rozvětvujících se kanálků, ve kterých dochází k ionizaci při teplotě až 30 000 K.

IONIZACE NÁRAZEM je vznik volných elektronů a iontů při srážkách rychlých elektronů a iontů s molekulami plynu.

KORÓNA je samostatný trsovitý výboj, který vzniká v silně nehomogenním elektrickém poli okolo drátů, hran a hrotů s vysokým potenciálem. Vzniká také za atmosférického tlaku.

Nejznámějším **JISKROVÝM VÝBOJEM** je blesk, kterým se vyrovnává napětí (miliony voltů) mezi dvěma mraky nebo mezi mrakem a zemí. K jiskrovému výboji dochází mezi kontakty elektrických spínačů při spínání proudu, mezi elektrodami svíčky v zážehovém motoru automobilu atd.

DOUTNAVÝ VÝBOJ je samostatný výboj s viditelnou složkou, který lze pozorovat ve výbojkách (výbojových trubicích) za snížených tlaků. Probíhá při malých proudech (řádově miliampéry); teplota výbojky i elektrod je nízká. Doutnavý výboj (v xenonových, sodíkových, rtuťových výbojkách; v zářivkách) je úsporným zdrojem světla. Světlo výbojek je při daném příkonu asi 5krát intenzivnější než světlo klasických žárovek.

KATODOVÉ ZÁŘENÍ (neboli paprsky) je tok elektronů emitovaných z katody výbojky při velmi nízkém tlaku (méně než 2 Pa) a vysokém napětí na elektrodách (řádově 10 000 V).

KORÓNA způsobuje ztráty na vedeních vysokého napětí, ruší rozhlas a televizi.

DOUTNAVÝ VÝBOJ ve rtuťových parách v křemenných trubicích je zdrojem UV záření.

Nejrozšířenějším zařízením využívajícím **KATODOVÉ PAPRSKY** je televizní obrazovka.

5.3 Magnetické pole

Magnet, magnetické pole a indukční čáry

MAGNET je trvale nebo dočasně zmagnetované těleso, které je zdrojem magnetického pole. Magnet má SEVERNÍ PÓL (značí se N podle anglického slova *north*) a JIŽNÍ PÓL (značí se S, *south*). Nesouhlasné póly dvou různých magnetů se přitahují, souhlasné se odpuzují. Trvalý neboli PERMANENTNÍ MAGNET je zdrojem stálého magnetického pole. MAGNETKA je malý trvalý magnet otáčivý kolem svislé osy.

MAGNETICKÉ POLE se projevuje silovými účinky, tj. přitahuje železo (také kobalt, nikl, popř. jejich slitiny), působí magnetickou silou na jiné magnety (např. otáčí střelkou kompasu) i na pohybující se elektrické náboje (např. na vodič s elektrickým proudem). Na magnetky působí magnetická síla a otočí je do takové polohy, že jejich podélná osa ukazuje směr působící síly. Severní pól magnetek směřuje k jižnímu pólu magnetu, jižní pól k severnímu.
MAGNETICKÉ POLE existuje i v okolí vodiče, kterým prochází elektrický proud. Příčinou magnetického pole v okolí vodiče je pohybující se elektrický náboj. Magnetickou silou na sebe navzájem působí i dva vodiče s proudem.

STACIONÁRNÍ MAGNETICKÉ POLE je takové magnetické pole, které se nemění v čase, tj. veličiny charakterizující pole jsou konstantní. Stacionární magnetické pole se nachází v okolí nepohybujících se trvalých magnetů nebo v okolí nepohybujícího se vodiče se stálým proudem.

MAGNETICKÉ INDUKČNÍ ČÁRY jsou orientované křivky, jejichž tečna v každém bodě má směr magnetické indukce a také směr osy velmi malé magnetky umístěné v tomto bodě. Směr od jižního k severnímu pólu magnetky určuje orientaci indukční čáry. Magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené křivky a procházejí i magnetem. Jejich hustota v daném místě je úměrná velikosti magnetické indukce.

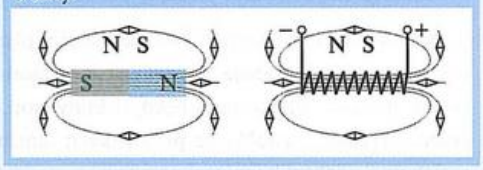
Magnetická síla, magnetická indukce

Nachází-li se v magnetickém poli vodič, kterým protéká proud, působí na něj MAGNETICKÁ SÍLA $\vec{F}_m$ (str. 123).
Je-li přímý vodič umístěn kolmo na magnetické indukční čáry, pak velikost magnetické síly je $F_m = B \cdot I \cdot l$,
kde B je konstanta úměrnosti, I je velikost proudu protékajícího vodičem, l je délka vodiče.
Konstanta úměrnosti B je velikost magnetické indukce $\vec{B}$.

Osnova kapitoly:

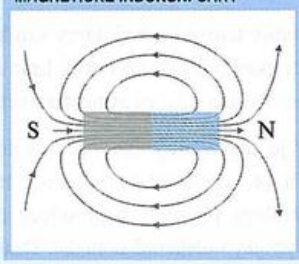
- Magnet, magnetické pole a indukční čáry
- Magnetická síla, magnetická indukce
- Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli
- Magnetické pole přímého vodiče a cívky
- Rovnoběžné vodiče s proudem, Hallův jev, měření magnetické indukce
- Magnetické vlastnosti látek, feromagnetismus
- Elektromagnetická indukce, magnetický indukční tok, nestacionární magnetické pole
- Faradayův zákon elektromagnetické indukce
- Vznik střídavého proudu
- Lenzův zákon
- Vlastní indukce, indukčnost cívky a její projevy
- Energie magnetického pole cívky

MAGNETICKÉ POLE kolem permanentního magnetu a cívky.



Magnetické pole kolem sebe vytváří i Země. V magnetickém poli Země se střelka kompasu (magnetka) natočí jedním svým koncem k severnímu geografickému pólu Země. Tento konec magnetky se tak podle toho nazývá **SEVERNÍ PÓL** (N). Opačný konec magnetky se nazývá **JIŽNÍ PÓL** (S). To znamená, že na severní polokouli leží jižní pól magnetického pole Země a na jižní polokouli severní pól.

MAGNETICKÉ INDUKČNÍ ČÁRY



Mají vně tyčového magnetu směr od severního pólu k jižnímu.

Je-li tyčový magnet obarven, pak platí, že tmavší konec označuje severní magnetický pól magnetu (je-li modro-červený, pak je severní pól označen modře). Je-li barevně označen pouze jeden konec tyčového magnetu, pak je tento pól severní.

MAGNETICKÁ INDUKCE $\vec{B}$ je fyzikální vektorová veličina, která charakterizuje magnetické pole a vyjadřuje silové účinky magnetického pole na pohybující se elektrické náboje.

Svírá-li přímý vodič s proudem I o délce l se směrem vektoru $\vec{B}$ úhel α, pak velikost **MAGNETICKÉ SÍLY** je $F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha$.

Směr magnetické síly je určen tím, že vektor síly $\vec{F}_m$ je kolmý na vodič i na vektor magnetické indukce $\vec{B}$, a orientaci vektoru magnetické síly lze určit Flemingovým pravidlem levé ruky. Směr a orientace vektoru magnetické indukce $\vec{B}$ v daném bodě magnetického pole je stejný jako směr tečny k magnetické indukční čáře a orientace magnetické indukční čáry v tomto bodě. V místě, kde je magnetická indukce největší, je nejsilnější také magnetické pole a jsou tam nejhustší magnetické indukční čáry.

Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli

Uvažujme, že v magnetickém poli o indukci $\vec{B}$ se pohybuje částice s nábojem Q rychlostí $\vec{v}$.

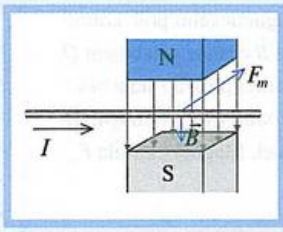
- Je-li vektor rychlosti kolmý na vektor $\vec{B}$, působí na částici **MAGNETICKÁ SÍLA** $\vec{F}_m$ o velikosti $F_m = |Q| \cdot v \cdot B$.
- Svírá-li vektor rychlosti $\vec{v}$ s vektorem $\vec{B}$ úhel α, působí na částici **MAGNETICKÁ SÍLA** o velikosti $F_m = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$.

Směr působící magnetické síly závisí na tom, zda má částice kladný, nebo záporný náboj.

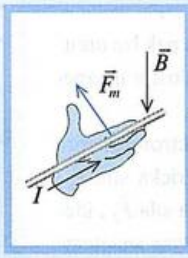
- Pohybuje-li se v magnetickém poli částice s kladným nábojem (obr. a), určí se směr působící magnetické síly pomocí Flemingova pravidla levé ruky. Směr proudu v tomto případě nahradí směr pohybu kladně nabité částice.
- Pohybuje-li se v magnetickém poli částice se záporným nábojem (obr. b), bude směr síly opačný, než jaký by platil pro kladně nabitou částici (její směr určíme podle předchozího případu).

Pro **MAGNETICKOU SÍLU** $\vec{F}_m$, která působí na částici s nábojem Q pohybující se rychlostí $\vec{v}$, obecně platí vztah: $\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B})$.

Výraz $\vec{X} = \vec{v} \times \vec{B}$ je vektorový součin, kde velikost vektoru $\vec{X}$ je dána součinem $X = v \cdot B \cdot \sin\alpha$ (α je úhel mezi vektory $\vec{v}$ a $\vec{B}$). Směr vektoru $\vec{X}$ je dán buď Flemingovým pravidlem levé ruky, anebo pravidlem pravotočivého šroubu.



MAGNETICKÁ SÍLA $\vec{F}_m$ působící na přímý vodič s proudem I.
Síla $\vec{F}_m$ je kolmá na vektor $\vec{B}$ i na směr proudu I.
Magnetická síla se nazývá též **AMPÉROVA SÍLA**.



FLEMINGOVO PRAVIDLO LEVÉ RUKY
Přiložíme-li k vodiči levou ruku tak, aby natažené prsty ukazovaly směr proudu a magnetické indukční čáry (resp. vektor $\vec{B}$) vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr a orientaci vektoru magnetické síly $\vec{F}_m$, která působí na vodič.

JEDNOTKOU MAGNETICKÉ INDUKCE je **TESLA** (T).

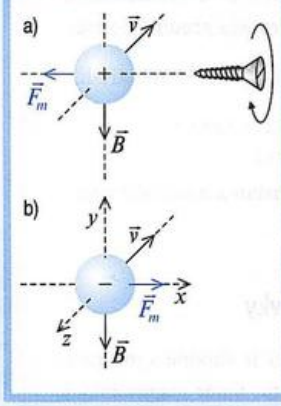
Ze vztahu pro $F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha$ plyne $B = \dfrac{F_m}{I \cdot l \cdot \sin\alpha}$,

tedy $\mathrm{T} = [B] = \dfrac{[F_m]}{[I]\,[l]\,[\sin\alpha]} = \dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}} = \dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \cdot \dfrac{\mathrm{s}}{\mathrm{m}} = \dfrac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} \cdot \dfrac{\mathrm{s}}{\mathrm{m}}$.

$\mathrm{T} = \mathrm{N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1} = V \cdot s \cdot m^{-2}}$

($\mathrm{A = C \cdot s^{-1}}$, str. 111; $\mathrm{N \cdot C^{-1} = V \cdot m^{-1}}$, str. 105)

SMĚR A ORIENTACE VEKTORU MAGNETICKÉ SÍLY $\vec{F}_m$ působící na částici s nábojem Q pohybující se rychlostí $\vec{v}$.



Vektory $\vec{v}$, $\vec{B}$ a $\vec{F}_m$ leží ve směrech os pravoúhlé souřadnicové soustavy.

PRAVIDLO PRAVOTOČIVÉHO ŠROUBU: Otáčíme-li pravotočivým šroubem od $\vec{v}$ k $\vec{B}$ (nutno otočit o ten úhel mezi $\vec{v}$ a $\vec{B}$, který je menší než π), šroub se zavrtává ve směru síly $\vec{F}_m$ působící na kladný náboj Q.

Odvození vztahu pro velikost magnetické síly:
Ve vodiči délky l kolmém k indukčním čarám magnetického pole se pohybuje částice s nábojem Q konstantní rychlostí v ve směru vodiče.

Vzdálenost l urazí částice za dobu $t = \dfrac{l}{v}$.

Proud ve vodiči je pak $I = \dfrac{|Q|}{t} = \dfrac{|Q| \cdot v}{l}$, takže

magnetická síla má velikost $F_m = B \cdot I \cdot l = B \cdot |Q| \cdot v$.

Vlétne-li do homogenního magnetického pole kolmo k vektoru magnetické indukce $\vec{B}$ částice s nábojem Q, bude na ni působit kolmo na směr pohybu stálá MAGNETICKÁ SÍLA $\vec{F}_m$. Částice se bude v tomto magnetickém poli pohybovat po kružnici. Magnetická síla $\vec{F}_m$ působí jako dostředivá síla

$\vec{F}_d = m\frac{v^2}{r}$, platí tedy $F_m = Q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$.

Měřením poloměru r trajektorie částice pak lze určit její hmotnost, známe-li její náboj, rychlost a magnetickou indukci pole.

Pohybuje-li se částice s nábojem v elektromagnetickém poli, působí na tuto částici elektrická síla $\vec{F}_e$ a magnetická síla $\vec{F}_m$ zároveň. Výsledná síla $\vec{F}_L$, která působí na částici, je dána vektorovým součtem těchto sil, $\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m$.

Síla $\vec{F}_L$ se nazývá LORENTZOVA SÍLA.

Magnetické pole přímého vodiče

Magnetické indukční čáry v okolí přímého vodiče s proudem mají tvar soustředných kružnic. Jejich směr se určí pomocí Ampérova pravidla pravé ruky pro přímý vodič.

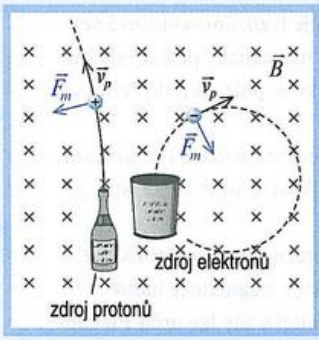
Velikost MAGNETICKÉ INDUKCE B ve vzdálenosti d od přímého vodiče, kterým protéká proud I, se určí jako $B = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I}{d}$, kde μ je PERMEABILITA prostředí, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, μ_0 je PERMEABILITA VAKUA, μ_r je RELATIVNÍ PERMEABILITA.

Permeabilita vakua μ_0 je konstanta a má hodnotu $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{N \cdot A^{-2}}$.

Magnetické pole cívky

Magnetické pole v okolí cívky je shodné s magnetickým polem tyčového magnetu. Směr magnetických indukčních čar v okolí cívky se určí pomocí Ampérova pravidla pravé ruky pro cívku.

Cívka s velkým počtem závitů, jejíž průměr je mnohem menší než její délka, se nazývá SOLENOID. Magnetické pole uvnitř solenoidu lze považovat za homogenní. Velikost magnetické indukce uvnitř solenoidu umístěného ve vakuu je: $B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l}$, kde I je proud protékající cívkou, N je počet závitů cívky a l je délka cívky.



POHYB PROTONU A ELEKTRONU V MAGNETICKÉM POLI

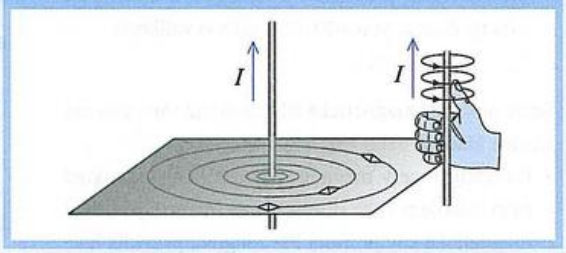
Ve skutečnosti je zakřivení dráhy elektronu víc než tisícinásobně větší než u protonu vzhledem k jejich rozdílné hmotnosti.

Pro vyznačení směru vektoru $\vec{B}$ směřujícího za nákresnu (za papír) a kolmého na ni používáme symbol ×.
Pro vyznačení směru vektoru směřujícího před nákresnu (ke čtenáři) a kolmého na ni používáme symbol •.

MAGNETICKÁ SÍLA může pohybující se částici s nábojem pouze vychylovat. Elektrická síla může částici nejen vychylovat, ale může ji i brzdit, nebo naopak zrychlovat. Magnetické pole se využívá při vychylování elektronového paprsku v televizní obrazovce.

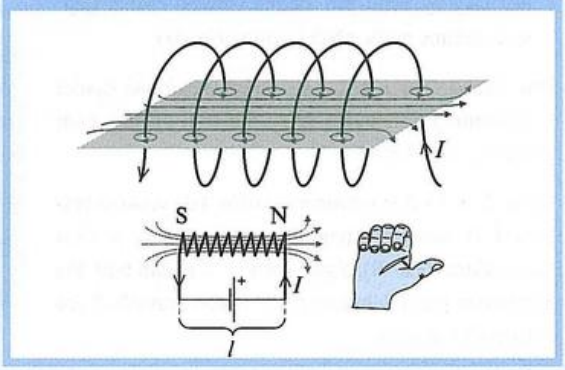
AMPÉROVO PRAVIDLO PRAVÉ RUKY PRO PŘÍMÝ VODIČ

Naznačíme-li uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby odtažený palec ukazoval směr proudu, pak pokrčené prsty naznačují směr magnetických indukčních čar.



AMPÉROVO PRAVIDLO PRAVÉ RUKY PRO CÍVKU

Naznačíme-li uchopení cívky do pravé ruky tak, aby pokrčené prsty ukazovaly směr proudu v závitech, pak odtažený palec ukazuje směr magnetických indukčních čar uvnitř závitů cívky.



Pro zesílení magnetického pole cívky se do ní vkládá jádro z oceli nebo jiné magneticky měkké feromagnetické látky (str. 127). Cívku navinutou na feromagnetickém jádře nazýváme ELEKTROMAGNET. Jako slabý elektromagnet se ovšem chová také cívka s proudem bez feromagnetického jádra.

Rovnoběžné vodiče s proudem

Nachází-li se rovnoběžně vedle sebe dva velmi dlouhé tenké vodiče s proudem, působí na sebe navzájem magnetickou silou $\vec{F}_m$, která je buď přitažlivá, nebo odpudivá, podle směru proudů ve vodičích:

- pokud rovnoběžnými vodiči protéká proud stejným směrem, pak se vodiče přitahují,
- pokud rovnoběžnými vodiči protéká proud opačným směrem, pak se vodiče odpuzují.

Pro velikost MAGNETICKÉ SÍLY $\vec{F}_m$, kterou na sebe působí úseky o délce l dvou velmi dlouhých rovnoběžných vodičů, platí vztah: $F_m = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot l$,

kde I_1, I_2 jsou proudy vodičů.

Na základě tohoto vztahu je definován jeden ampér:
Jeden AMPÉR je stálý proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi nimi stálou sílu $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na 1 metr délky vodiče.

Hallův jev

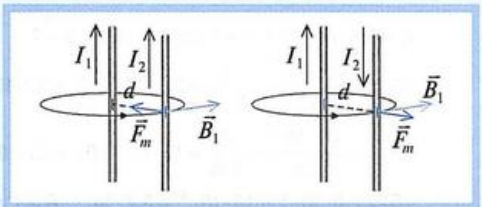
HALLŮV JEV je posun vodivostních elektronů ve vodiči, kterým prochází elektrický proud, působením magnetické síly a následně vznik příčného elektrického pole ve směru kolmém k vektoru magnetické indukce a ke směru elektrického proudu. Mezi protilehlými stranami vodiče vznikne rozdíl potenciálů, tzv. HALLOVO NAPĚTÍ U_H.

Platí $U_H = E \cdot d$, kde E je velikost intenzity elektrického pole vytvořeného posunem elektronů a d je šířka kovového proužku. Pro velikost elektrické síly $\vec{F}_e$ působící na elektron platí $F_e = E \cdot e$ (str. 105), kde e je náboj elektronu. Dosazením za E obdržíme pro velikost síly $\vec{F}_e$ vztah: $F_e = \frac{U_H}{d} \cdot e$.

Pro velikost magnetické síly $\vec{F}_m$ působící na elektron pohybující se rychlostí $\vec{v}_e$ platí $F_m = e \cdot v_e \cdot B$ (str. 123). Protože $F_e = F_m$, platí pro HALLOVO NAPĚTÍ vztah: $U_H = v_e \cdot B \cdot d$.

RELATIVNÍ PERMEABILITA vyjadřuje, jak se na zesílení ($\mu_r > 1$) nebo na zeslabení ($\mu_r < 1$) silových účinků magnetického pole vzhledem k vakuu ($\mu_r = 1$) podílí izotropní prostředí. Relativní permeabilita železa je 8 000 až 60 000, mědi 0,999824.

MAGNETICKÁ INDUKCE pole v okolí trvalých magnetů má velikost řádově 0,001–0,1 T, v mezeře mezi póly velkých elektromagnetů až několik jednotek T. Magnetická indukce pole Země má velikost přibližně 10^{-5} T.

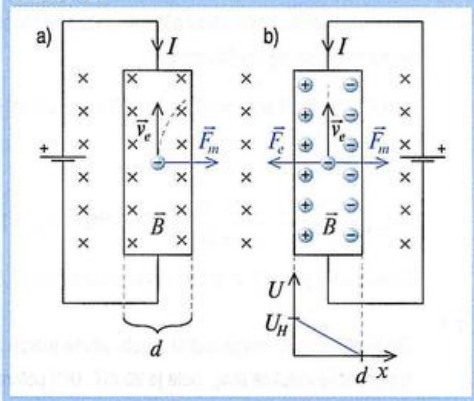


Vodič s proudem I_2 se nachází ve vzdálenosti d v magnetickém poli vodiče s proudem I_1. V tomto místě má po celé délce vodiče I_2 magnetické pole stejnou velikost: $B_1 = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d}$ (str. 124).

Pro velikost magnetické síly $\vec{F}_m$, kterou působí magnetické pole na druhý vodič o délce l, platí:

$F_m = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d} \cdot I_2 \cdot l$ (str. 123).

HALLŮV JEV



a) Po zapnutí proudu začne na elektrony o rychlosti $\vec{v}_e$ působit magnetická síla $\vec{F}_m$, která je vychyluje na pravou stranu kovového proužku.
b) Levá strana bude mít brzo vyšší potenciál a vzniklé elektrické pole působí na elektrony elektrickou silou $\vec{F}_e$. Po ustálení situace musí být $\vec{F}_e = -\vec{F}_m$. Magnetická indukce $\vec{B}$ směřuje za nákresnu, je znázorněna symbolem ×.

MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE

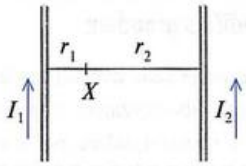
Známe-li rychlost pohybu elektronů, můžeme ze vztahu pro Hallovo napětí $U_H = v_e \cdot B \cdot d$ vypočítat, a tedy i měřit velikost magnetické indukce $\vec{B}$.

Víte, že rychlost pohybu elektronů v_e v kovovém vodiči s proudem lze změřit tak, že pohybujeme kovovým proužkem v opačném směru, než je směr rychlosti elektronů?

Jestliže se rychlost pohybujícího se proužku rovná právě rychlosti elektronů, Hallovo napětí bude rovné nule.

Př. 1

Urči velikost magnetické indukce v místě X (viz obrázek).
Proud $I_1 = 5$ A, $I_2 = 10$ A, $r_1 = 5$ cm, $r_2 = 15$ cm.
Směr proudů je vyznačen.



$I_1 = 5$ A; $I_2 = 10$ A; $r_1 = 5$ cm; $r_2 = 15$ cm; $B = ?$

$$\{B_1\} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{5}{0{,}05} = 2{,}0 \cdot 10^{-5};\ B_1 = 2{,}1 \cdot 10^{-5}\ \text{T}$$

$$\{B_2\} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{10}{0{,}15} = 1{,}3 \cdot 10^{-5};\ B_2 = 1{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{T}$$

$$\{B\} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} - 1{,}3 \cdot 10^{-5} = 0{,}7 \cdot 10^{-5};\ B = 7\ \mu\text{T}$$

- Magnetická indukce $\vec{B}$ v místě X je určena vektorovým součtem mag. indukcí $\vec{B}_1 + \vec{B}_2$. Mag. indukce $\vec{B}_1$ a $\vec{B}_2$ mají v místě X opačný směr, proto $B = |B_1 - B_2|$ a směr $\vec{B}$ bude shodný se směrem té z indukcí $\vec{B}_1$, nebo $\vec{B}_2$, která má větší velikost.

Velikost magnetické indukce je 7 μT. Její směr je shodný se směrem B_1, tzn. za nákresnu.

Př. 2

Urči, jak velkou silou působí magnetické pole o magnetické indukci $B = 20$ mT na vodič délky 20 cm, kterým protéká proud 500 mA. Vodič přitom svírá s vektorem $\vec{B}$ úhel 30 °.

$B = 20\ \text{mT} = 20 \cdot 10^{-3}$ T; $l = 20$ cm $= 0{,}2$ m; $I = 500$ mA $= 0{,}5$ A; $\alpha = 30°$; $F_m = ?$

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha;\ \{F_m\} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot \sin 30° = 0{,}001;\ F_m = 1\ \text{mN}$$

Magnetické pole působí na vodič silou o velikosti 1 mN.

Př. 3

Dvěma přímými rovnoběžnými vodiči, které jsou od sebe vzdáleny 2 cm, prochází proudy $I_1 = 20$ A a $I_2 = 25$ A.
Urči magnetickou sílu, která působí na část každého vodiče o délce 2,5 m, jestliže oba proudy mají:
a) stejný směr, **b)** opačný směr.

$d = 2$ cm $= 0{,}02$ m; $I_1 = 20$ A; $I_2 = 25$ A; $l = 2{,}5$ m; $F_m = ?$

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

$$\{F_m\} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{20 \cdot 25}{0{,}02} \cdot 2{,}5 = 0{,}0125;\ F_m = 12{,}5\ \text{mN}$$

- Síla se v obou případech vypočte stejně, jen bude mít jiný směr.

Vodiče se v případě a) přitahují silou o velikosti 12,5 mN, v případě b) se stejně velkou silou odpuzují.

Př. 4

Do homogenního magnetického pole vlétne proton rychlostí $5 \cdot 10^6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ kolmo k magnetickým indukčním čarám. Velikost magnetické indukce mag. pole je 20 mT. Urči poloměr kružnicové trajektorie protonu ($m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C).

$v = 5 \cdot 10^6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $B = 20\ \text{mT} = 20 \cdot 10^{-3}$ T; $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; $r = ?$

$$QvB = m_p \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m_p v}{eB}$$

$$\{r\} = \frac{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 5 \cdot 10^6}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 2{,}6;\ r = 2{,}6\ \text{m}$$

- Magnetická síla působící na proton je dostředivou silou.

Proton se bude v magnetickém poli pohybovat po kružnici o poloměru 2,6 m.

Magnetické vlastnosti látek, feromagnetismus

Látky můžeme podle jejich magnetických vlastností dělit na:

- DIAMAGNETICKÉ LÁTKY, které zeslabují magnetické pole, jejich relativní permeabilita je menší než 1, tj. $\mu_r < 1$,
- PARAMAGNETICKÉ LÁTKY mírně zesilují magnetické pole, jejich relativní permeabilita je mírně větší než 1, tj. $\mu_r > 1$,
- FEROMAGNETICKÉ LÁTKY, které silně zesilují magnetické pole, jejich relativní permeabilita je výrazně větší než jedna, tj. $\mu_r >> 1$. Mezi ně patří také FERIMAGNETICKÉ LÁTKY ($\mu_r = 10^2 - 10^3$), které mají mnohem větší elektrický odpor než kovové feromagnetické látky.

Pro každou feromagnetickou látku existuje tzv. CURIEOVA TEPLOTA t_C. Dosáhne-li feromagnetická látka této teploty, ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou. Curieova teplota má např. pro železo hodnotu $t_C(\mathrm{Fe}) = 770\ °\mathrm{C}$.

Feromagnetické látky se v magnetickém poli ZMAGNETIZUJÍ, tzn. stávají se magnetem a zůstávají jím i po zániku magnetického pole. Hodnota magnetické indukce magnetického pole tohoto magnetu se nazývá REMANENTNÍ MAGNETICKÁ INDUKCE $\vec{B}_r$. Podle velikosti remanentní (zbytkové) magnetické indukce se feromagnetické látky dělí na:

- MAGNETICKY TVRDÉ LÁTKY, které mají velkou hodnotu $\vec{B}_r$ a zůstávají magnetem i po zániku vnějšího pole,
- MAGNETICKY MĚKKÉ LÁTKY, které mají malou hodnotu $\vec{B}_r$ a ztrácejí vlastnost magnetu po zániku magnetického pole.

MAGNETIZACE látky nastává díky MAGNETICKÝM DOMÉNÁM, což jsou mikroskopické zmagnetované oblasti v látce. Tyto domény jsou orientovány nahodile, působením vnějšího magnetického pole se však orientují souhlasně a látka získává vlastnosti magnetu.

ELEKTROMAGNETICKÉ RELÉ je zařízení, které může být použito jako spínač. Slabým elektrickým proudem lze spínat pomocí relé obvody, ve kterých protékají proudy mnohem větší.

MAGNETICKÝ ZÁZNAM signálů a dat nastává po průchodu nahrávacím zařízením zmagnetizováním povrchu nosiče dat (např. pásky nebo diskety, které jsou pokryty feromagnetickým materiálem) proměnným magnetickým polem cívky. Prochází-li pak takto zmagnetizovaný nosič dat podobným čtecím zařízením, změny magnetického pole na nosiči vyvolávají elektromagnetickou indukcí změny proudu ve vinutí cívky a informaci uloženou na nosiči lze přečíst.

DIAMAGNETICKÉ LÁTKY jsou např. rtuť, voda, zlato, měď, bismut.

PARAMAGNETICKÉ LÁTKY jsou např. vzduch, platina, vápník, sodík, hliník.

FEROMAGNETICKÉ LÁTKY jsou např. kobalt, nikl, železo.

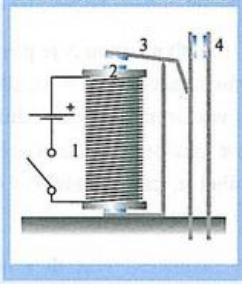
FERIMAGNETICKÉ LÁTKY, tzv. **FERITY**, jsou sloučeniny oxidu železa (Fe_2O_3) a oxidů některých jiných kovů a mají široké využití jako jádra cívek ve vysokofrekvenčních obvodech a také jako permanentní magnety.

FEROMAGNETISMUS se projevuje pouze u krystalických látek. Látka v plynném nebo kapalném stavu feromagnetické vlastnosti nemá.

MAGNETICKY MĚKKÉ LÁTKY se používají jako jádra cívek elektromagnetů (jeřáby v kovošrotech) nebo v transformátorech.

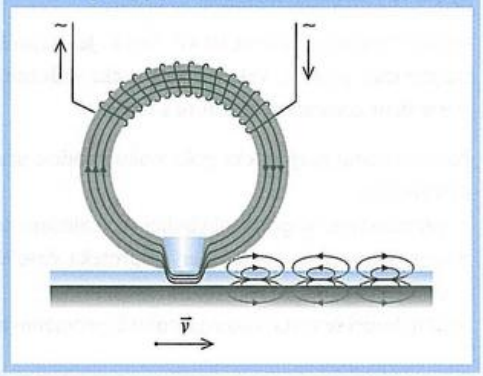
MAGNETICKY TVRDÉ LÁTKY se používají na výrobu trvalých magnetů.

ELEKTROMAGNETICKÉ RELÉ



Po sepnutí spínače prochází cívkou (1) s jádrem (2) proud. Vznikne elektromagnet, který přitáhne kotvu (3). Pohyb kotvy způsobí sepnutí kontaktů (4), a tím jiného elektrického obvodu.

ZÁZNAMOVÁ HLAVA je nahrávací zařízení tvořené kruhovou cívkou (toroidem), jejíž jádro je v místě pohybu nosiče dat přerušeno a vyplněno nemagnetickým materiálem. Magnetické indukční čáry vystupují z jádra ven a magnetizují povrch nosiče dat.



Elektromagnetická indukce

ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE je jev vzniku indukovaného elektrického pole vyvolaný časově proměnným (nestacionárním) magnetickým polem.
Následkem časově proměnného magnetického pole vzniká na koncích vodivé smyčky, která se v tomto poli nachází, INDUKOVANÉ ELEKTROMOTORICKÉ NAPĚTÍ U_i a uzavřeným obvodem prochází INDUKOVANÝ PROUD I_i.

Elektromagnetická indukce nastane také tehdy, je-li magnetické pole stacionární a uzavřená vodivá smyčka se v magnetickém poli pohybuje nebo deformuje tak, že na ploše S ohraničené smyčkou se mění magnetický tok Φ; také v tomto případě se indukuje v dané smyčce elektrický proud.

Anglický fyzik M. Faraday při experimentech s elektromagnetickou indukcí v r. 1831 zjistil, že ve vodivé smyčce se indukuje elektrické napětí, jestliže se mění počet magnetických indukčních čar procházejících plochou smyčky. Počet indukčních čar procházejících plochou uzavřené smyčky vyjadřuje skalární fyzikální veličina nazvaná MAGNETICKÝ INDUKČNÍ TOK nebo zkráceně MAGNETICKÝ TOK.

MAGNETICKÝ INDUKČNÍ TOK Φ plochou S je pro homogenní magnetické pole definován vztahem $\Phi = B \cdot S$, kde S je obsah rovinné plochy kolmé na vektor magnetické indukce $\vec{B}$.
Svírá-li normálový vektor plochy S ohraničené uzavřenou smyčkou s vektorem $\vec{B}$ úhel α, pak je indukční tok Φ touto smyčkou dán vztahem $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$.

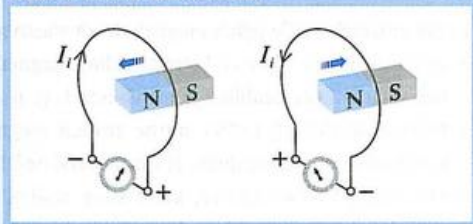
Obecně je MAGNETICKÝ INDUKČNÍ TOK Φ v homogenním magnetickém poli definován vztahem $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$, kde $\vec{B} \cdot \vec{S}$ je skalární součin vektorů $\vec{B}$ a $\vec{S}$, přičemž směr vektoru $\vec{S}$ je kolmý na rovinnou plochu S. Orientace vektoru $\vec{S}$ a orientace smyčky je dána Ampérovým pravidlem pravé ruky, kde pokrčené prsty ukazují orientaci smyčky kolem plochy S a vztyčený palec orientaci vektoru $\vec{S}$.

NESTACIONÁRNÍ MAGNETICKÉ POLE je časově proměnné magnetické pole, tj. vektor magnetické indukce $\vec{B}$ v daném místě není konstantní (mění se s časem).

Nestacionární magnetické pole v okolí vodivé uzavřené smyčky vyvolává:

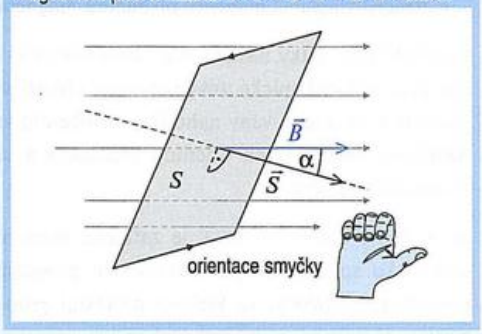
- permanentní magnet pohybující se vzhledem ke smyčce,
- nepohybující se vodič, kterým protéká časově proměnný elektrický proud,
- pohybující se vodič s konstantním či proměnným proudem.

ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE



Přibližujeme-li se magnetem k vodivé smyčce, začne obvodem procházet proud. Vzdalujeme-li se magnetem od smyčky, proud opět prochází obvodem, ale tentokrát v opačném směru. Pohybem magnetu se mění magnetické pole procházející smyčkou a tato změna INDUKUJE, tj. vyvolává, ve vodiči elektrický proud. Stejný jev nastane, jestliže bude magnet v klidu a budeme v magnetickém poli pohybovat vodičem.
Pohyb elektronů nastane, i když vodivá smyčka není uzavřena; pak se ve vodiči INDUKUJE elektrické pole a mezi konci (svorkami) vodivé smyčky vzniká elektromotorické napětí U_i. Napětí U_i určuje ve vodivé smyčce směr indukovaného proudu I_i od záporné svorky ke kladné stejně jako u elektrického zdroje (str. 111, 115).
Je-li magnet vůči vodiči v klidu, tj. magnetické pole je neproměnné (stacionární), vodičem neprotéká žádný proud.

MAGNETICKÝ INDUKČNÍ TOK Φ plochou S pro homogenní magnetické pole o indukci $\vec{B}$: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$.



JEDNOTKOU MAGNETICKÉHO INDUKČNÍHO TOKU
je WEBER (Wb).
$\mathrm{Wb} = [\Phi] = [B] \cdot [S] = \mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^2 = \mathrm{V} \cdot \mathrm{s}$

$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}$ (str. 123)

Magnetický indukční tok je skalární veličina.

M. Faraday ve svých experimentech nahradil trvalý magnet cívkou připojenou ke zdroji, která při zapnutí a vypnutí obvodu vytvořila časově proměnné magnetické pole.

Faradayův zákon elektromagnetické indukce

FARADAYŮV ZÁKON ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE (zkráceně FARADAYŮV INDUKČNÍ ZÁKON): Velikost elektromotorického napětí U_i indukovaného ve vodivé uzavřené smyčce je rovna rychlosti změny magnetického indukčního toku Φ plochou S ohraničenou touto smyčkou, tj. $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$,

kde $\Delta\Phi$ je změna magnetického toku za dobu Δt; doba Δt je velmi malá ($\Delta t \to 0$).

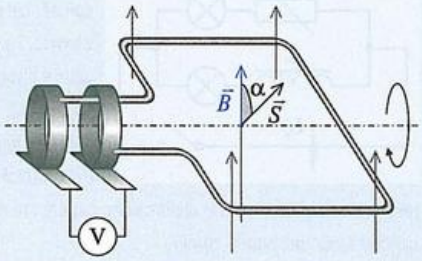
Směr indukovaného elektromotorického napětí U_i lze definovat jako směr indukovaného proudu I_i ve vodivé uzavřené smyčce.

Vznik střídavého proudu

V homogenním magnetickém poli o indukci $\vec{B}$ se otáčí smyčka konstantní úhlovou rychlostí ω. Magnetický indukční tok se pak harmonicky mění: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$, tj. $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\omega t$, kde S je plocha smyčky a úhel mezi vektorem indukce $\vec{B}$ a vektorem $\vec{S}$ je $\alpha = \omega t$. Harmonicky se pak rovněž mění i indukované napětí

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega BS \sin\omega t = U_m \sin\omega t,$$

kde U_m je amplituda napětí, $U_m = \omega BS$.



Otáčení jedné smyčky nebo celé cívky v magnetickém poli je princip, na jehož základě je v generátorech střídavého proudu v elektrárnách vyráběna elektrická energie.

Lenzův zákon

LENZŮV ZÁKON: Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že magnetické pole tímto proudem vzbuzené působí proti změně magnetického indukčního toku, která proud indukovala.

- Roste-li magnetický tok Φ uzavřenou vodivou smyčkou ($\Delta\Phi > 0$), má indukované napětí U_i takovou polaritu, že indukovaný proud I_i vytváří magnetické pole s opačným směrem indukčních čar.

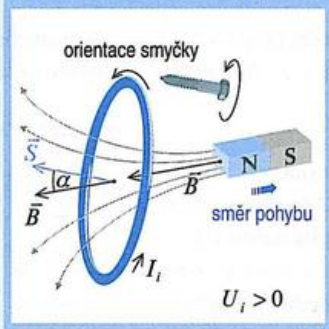
Rychlost změny magnetického toku Φ charakterizuje podíl $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Ve vztahu $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ je veličina U_i střední hodnotou elektromotorického napětí za dobu Δt.

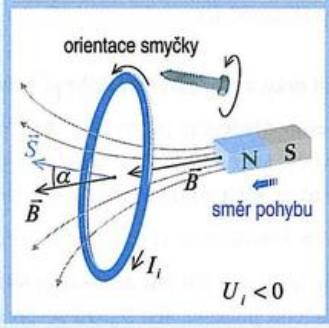
Pro $\Delta t \to 0$ tento vztah přechází v derivaci: $U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Směr indukovaného proudu I_i v uzavřené vodivé smyčce

Pro určení směru indukovaného proudu I_i volíme orientaci smyčky tak, aby vektor $\vec{S}$ měl stejný směr jako vektor magnetické indukce $\vec{B}$ vnějšího magnetického pole. Vektor $\vec{S}$ je kolmý na plochu proloženou smyčkou a jeho velikost je rovna ploše smyčky. Není-li vnější magnetické pole homogenní, úhel α mezi vektorem indukce $\vec{B}$ a vektorem $\vec{S}$ volíme tak, aby bylo $\alpha < 90°$, a pak platí:



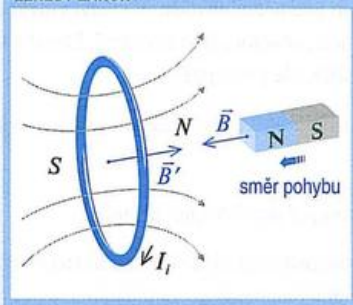
- Je-li $U_i > 0$, směr indukovaného proudu I_i souhlasí s orientací smyčky.
- Je-li $U_i < 0$, směr indukovaného proudu I_i není shodný s orientací smyčky.



ORIENTACE SMYČKY vzhledem ke směru vektoru $\vec{S}$ je dána **pravidlem pravé ruky**, kde pokrčené prsty ukazují orientaci smyčky a vztyčený palec směr vektoru $\vec{S}$.

Platí rovněž **pravidlo pravotočivého šroubu**, který se zavrtává ve směru vektoru $\vec{S}$ a jeho otáčení souhlasí s orientací smyčky.

LENZŮV ZÁKON



Pohyb trvalého magnetu dovnitř uzavřené smyčky indukuje proud, který z ní vytvoří elektromagnet působící proti pohybu trvalého magnetu, tzn. severní pól smyčky (N) je naproti severnímu pólu (N) trvalého magnetu. Směr indukovaného proudu vzhledem k orientaci indukčních čar magnetického pole smyčky lze zjistit z Ampérova pravidla pravé ruky pro cívku (str. 124).

- Klesá-li magnetický tok Φ uzavřenou vodivou smyčkou, tzn. $\Delta\Phi < 0$, má indukované napětí U_i takovou polaritu, že indukovaný proud I_i vytváří magnetické pole se stejným směrem indukčních čar.

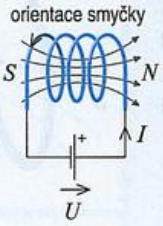
Vlastní indukce

Indukované elektrické pole vzniká v uzavřeném vodiči i při změnách magnetického pole, které jsou vyvolané změnami proudu ve vlastním vodiči. Tento jev se nazývá **VLASTNÍ INDUKCE**.

Prochází-li cívkou proud I, vznikne uvnitř závitů cívky magnetické pole. Magnetický indukční tok Φ plochou závitů je přímo úměrný proudu I, tj. $\Phi = L \cdot I$. Konstanta L charakterizující tuto vlastnost cívky se nazývá **INDUKČNOST**.

Jestliže se za dobu Δt změní proud o ΔI, změní se magnetický indukční tok cívkou o $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$ a v cívce se indukuje napětí:

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



- Pro $\Delta I < 0$ je $U_i > 0$ a směr U_i souhlasí se směrem proudu I (polarita napětí U_i je stejná jako polarita napětí U).
- Pro $\Delta I > 0$ je $U_i < 0$ a směr U_i není shodný se směrem proudu I (napětí U_i má opačnou polaritu než napětí U).

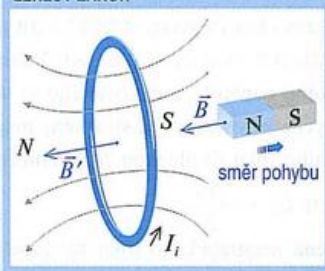
Projevy indukčnosti cívky, energie magnetického pole cívky

Indukčnost cívek se projevuje především při rychlých změnách elektrického napětí v obvodu, např. při spínání obvodu. Při sepnutí spínače vzroste proud ve větvi s rezistorem na ustálenou hodnotu $I = \frac{U_e}{R}$ okamžitě (indukčnost rezistoru je zanedbatelná). Ve větvi s cívkou se vlivem její indukčnosti indukuje napětí U_i, které má opačnou polaritu než U_e, to se projeví postupným narůstáním proudu v této větvi. Obdobný přechodný děj nastane i při přerušení obvodu. Ve větvi s cívkou se indukuje napětí se stejnou polaritou, jako má zdroj. Proud v této větvi nezanikne okamžitě, ale postupně.

ENERGIE MAGNETICKÉHO POLE CÍVKY bez feromagnetického jádra je $E_{mg} = \frac{1}{2}L \cdot I^2$,
kde L je indukčnost cívky, I procházející proud.

HUSTOTA ENERGIE HOMOGENNÍHO MAGNETICKÉHO POLE uvnitř cívky je $w_{mg} = \frac{B^2}{2\mu_0}$, kde B je indukce magnetického pole, μ_0 je permeabilita vakua uvnitř cívky. Hustota energie je množství energie připadající na jednotku objemu.

LENZŮV ZÁKON

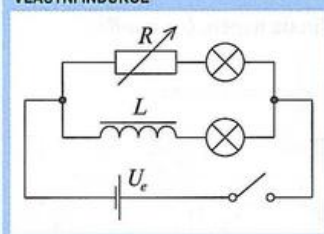


Pohyb trvalého magnetu směrem ven z uzavřené smyčky v ní indukuje proud, který ze smyčky vytvoří elektromagnet působící proti pohybu trvalého magnetu, tzn. jižní pól smyčky (S) je oproti severnímu pólu (N) trvalého magnetu (navzájem se přitahují). Směr indukovaného proudu vzhledem k orientaci indukčních čar magnetického pole smyčky lze zjistit z Ampérova pravidla pravé ruky pro cívku (str. 124).

JEDNOTKOU INDUKČNOSTI je **HENRY** (H). Vodič má indukčnost 1 H, jestliže se v něm při změně proudu o 1 A za 1 s indukuje napětí 1 V.

$$\mathrm{H} = [L] = \frac{[\Phi]}{[I]} = \mathrm{Wb \cdot A^{-1}} = \mathrm{V \cdot s \cdot A^{-1}} = \Omega \cdot \mathrm{s}$$

VLASTNÍ INDUKCE



Sepneme-li spínač, lze pozorovat, že ve větvi s cívkou se žárovka rozsvítí později. Příčinou tohoto jevu je vznik indukovaného elektrického napětí, které má opačný směr než napětí zdroje.

Indukčnost cívky L se zvyšuje s počtem závitů. Značných hodnot dosahuje u tlumivek, cívek s uzavřeným feromagnetickým jádrem.

Velké indukované napětí při přerušení obvodu vyvolává jiskrový výboj mezi kontakty spínače; výboj může např. způsobit explozi výbušné směsi zemního plynu a vzduchu.

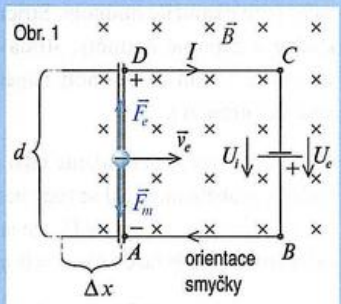
Protože při růstu I je $\Delta I > 0$ a $U = -U_i$, pro nárůst energie magnetického pole $\mathrm{d}E_{mg}$ za dobu $\mathrm{d}t$ platí:

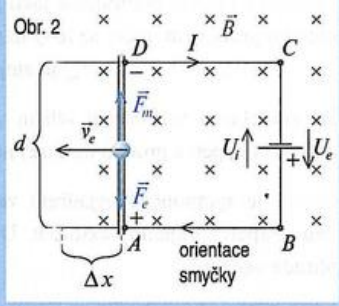
$$\mathrm{d}E_{mg} = U \cdot I\,\mathrm{d}t = -U_i \cdot I\,\mathrm{d}t = L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}I\,\mathrm{d}t = LI\,\mathrm{d}I.$$

Odtud integrací obdržíme $E_{mg} = \frac{1}{2}LI^2$.

Odvození **FARADAYOVA INDUKČNÍHO ZÁKONA** pro homogenní magnetické pole

Magnetické pole o indukci $\vec{B}$ je vytvořené proudem I_0, který prochází uzavřenou smyčkou. Podle Ohmova zákona platí $U_e = R_i I_0$, kde R_i je vnitřní odpor zdroje (předpokládáme, že odpor smyčky je nulový). Vektor indukce $\vec{B}$ podle Ampérova pravidla pravé ruky (str. 124) směřuje za nákresnu a je označen ×. Pohybuje-li se vodič *AD*, mění se velikost magnetického indukčního toku plochou smyčky a ve smyčce se indukuje elektromotorické napětí U_i. Podle 2. Kirchhoffova zákona platí $U_e + U_i = R_i I$.





Na obr. 1 se vodič *AD* pohybuje rychlostí $\vec{v}_e$ a na elektrony ve vodiči působí magnetická síla o velikosti $F_m = e \cdot v_e B$. Elektrony se pohybují k bodu *A*, kde se vytvoří záporný náboj, u bodu *D* kladný. Vzniká indukované elektrické pole o intenzitě E_i a na koncích vodiče *AD* se indukuje elektromotorické napětí U_i, jehož směr je stejný jako směr napětí U_e. Indukované napětí U_i zesílí původní proud I_0 na hodnotu I a ze vztahu $U_e + U_i = R_i I$ pak vyplývá, že $U_i > 0$. Magnetický indukční tok Φ plochou smyčky klesá, tedy $\Delta\Phi < 0$.

Na obr. 2 se vodič *AD* pohybuje rychlostí $\vec{v}_e$ opačným směrem a na elektrony ve vodiči působí magnetická síla o velikosti $F_m = e \cdot v_e B$. Elektrony se pohybují k bodu *D*, kde se vytvoří záporný náboj, u bodu *A* kladný. Vzniká indukované elektrické pole o intenzitě E_i a na koncích vodiče *AD* se indukuje elektromotorické napětí U_i, jehož směr je nesouhlasný se směrem napětí U_e. Indukované napětí U_i zeslabí původní proud I_0 na hodnotu I a ze vztahu $U_e + U_i = R_i I$ pak vyplývá, že $U_i < 0$. Magnetický indukční tok Φ plochou smyčky se zvyšuje, tedy $\Delta\Phi > 0$.

V obou případech pro indukované elektromotorické napětí U_i platí:

$|U_i| = E_i \cdot d = \frac{F_e}{e} \cdot d \Rightarrow F_e = e\frac{|U_i|}{d}$, kde $\vec{F}_e$ je elektrická síla působící na elektrony ve vodiči *AD*. $\vec{F}_e = -\vec{F}_m$, platí tedy $e\frac{|U_i|}{d} = e \cdot v_e \cdot B \Rightarrow |U_i| = B \cdot v_e \cdot d$.

$v_e \cdot d = \frac{|\Delta x|}{\Delta t} \cdot d = \frac{|\Delta x| \cdot d}{\Delta t} = \frac{|\Delta S|}{\Delta t}$, kde $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ je rychlost změny plochy vodivé smyčky *ABCD*.

Dosadíme do vztahu $U_i = B \cdot v_e d$ za $v_e d$ a obdržíme vztah: $|U_i| = B \cdot v_e d = B \cdot \frac{|\Delta S|}{\Delta t} = \frac{B \cdot |\Delta S|}{\Delta t} = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}$, kde $B \cdot \Delta S = \Delta\Phi$ je změna indukčního toku v důsledku změny plochy *S* vodivé smyčky *ABCD* za dobu Δt. Symbol *e* používáme zde ve významu $|e|$.

Protože pro $\Delta\Phi < 0$ platí $U_i > 0$ a pro $\Delta\Phi > 0$ platí $U_i < 0$, musí být ve vztahu mezi U_i a $\Delta\Phi$ znaménko minus, tedy $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Př. 5

V magnetickém poli se nachází kruhová smyčka o poloměru 2 cm. Normálový vektor plochy smyčky svírá s vektorem $\vec{B}$ úhel 30 °. Velikost mag. indukce je $B = 50$ mT. Urči mag. indukční tok touto smyčkou Φ.

$r = 2\text{ cm} = 0{,}02\text{ m}; \alpha = 30°; B = 50\text{ mT} = 50 \cdot 10^{-3}\text{ T}; \Phi = ?$

$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha; S = \pi \cdot r^2 \Rightarrow \Phi = B \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \cos\alpha\,\{\Phi\} = 50 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 0{,}02^2 \cdot \cos 30° = 5{,}4 \cdot 10^{-5}; \Phi = 54\ \mu\text{Wb}$

Magnetický indukční tok touto smyčkou je 54 μWb.

Př. 6

Magnetický indukční tok procházející cívkou s 200 závity se za dobu 0,5 s rovnoměrně změnil z 5 mWb na 1 mWb. Urči střední hodnotu indukovaného napětí na koncích cívky.

$N = 200; t = 0{,}5\text{ s}; \Phi_1 = 5\text{ mWb} = 5 \cdot 10^{-3}\text{ Wb}; \Phi_2 = 1\text{ mWb} = 10^{-3}\text{ Wb}; U_i = ?$

$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}\text{ Wb} = -0{,}004\text{ Wb}$

$U_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \{U_i\} = -200 \cdot \frac{-0{,}004}{0{,}5} = 1{,}6; U_i = 1{,}6\text{ V}$

Na koncích cívky se bude indukovat napětí o velikosti 1,6 V.

- Na každé vodivé smyčce se indukuje napětí o velikosti $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Tyto smyčky tvoří *N* zdrojů elektromotorických napětí zapojených za sebou (napětí sčítáme), proto celkové indukované napětí bude $U_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

5.4 Střídavý proud

Střídavý proud a střídavé napětí

O střídavém napětí (nebo proudu) mluvíme, jestliže se v čase mění jeho okamžité hodnoty. Střídavé napětí nabývá střídavě kladné a záporné hodnoty, střídavý proud mění pravidelně svůj směr. Okamžité hodnoty napětí označujeme u, okamžité hodnoty proudu i.

STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ definujeme jako proměnné napětí s harmonickým průběhem, mění se tedy harmonicky s časem t a platí $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, kde U_m je amplituda napětí a ω je úhlová frekvence, φ_0 je fáze v čase $t = 0$, $\varphi = \omega t + \varphi_0$ je fáze v čase t.

STŘÍDAVÝ PROUD definujeme jako proměnný proud s harmonickým průběhem, mění se tedy harmonicky s časem t a platí $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, kde I_m je amplituda proudu.

Ke grafickému znázornění veličin využíváme časový diagram (závislost napětí a proudu na čase) nebo FÁZOROVÝ DIAGRAM.

FÁZOR je symbolické vyjádření veličiny střídavého proudu nebo napětí rotujícím vektorem. Délka vektoru se rovná amplitudě veličiny.

Obvod střídavého proudu s rezistorem

Odpor R rezistoru v obvodu střídavého proudu je stejný jako v obvodu stejnosměrného proudu a nazývá se REZISTANCE. Pro proud i, který prochází elektrickým obvodem s odporem R a generátorem harmonického střídavého napětí $u = U_m \sin \omega t$, vyplývá z Ohmova zákona $u = Ri$ (str. 113), proto se také mění harmonicky, tj. $i = \frac{u}{R} = I_m \sin \omega t$, kde $I_m = \frac{U_m}{R}$ je amplituda proudu.

Rezistance nemá vliv na fázový rozdíl střídavého napětí a proudu. V jednoduchém obvodu s rezistorem mají napětí i proud stejnou fázi a jejich fázový rozdíl je nulový, $\Delta\varphi = 0$.

Výkon střídavého proudu v obvodu s rezistorem

Pro výkon stejnosměrného proudu platí $P = UI = RI^2$. Je-li u okamžitá hodnota napětí a i okamžitá hodnota proudu, pak pro OKAMŽITOU HODNOTU VÝKONU p střídavého proudu platí: $p = ui = Ri^2 = RI_m^2 \sin^2 \omega t = P_m \sin^2 \omega t$, tedy $p = P_m \sin^2 \omega t$, kde $P_m = RI_m^2$ je amplituda výkonu.

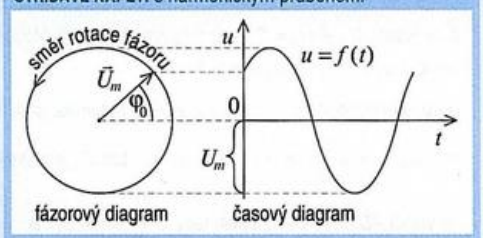
STŘEDNÍ HODNOTA VÝKONU P střídavého proudu $i = I_m \sin \omega t$ v obvodu s rezistorem je $P = \frac{1}{2} RI_m^2 = \frac{1}{2} U_m I_m$.

Osnova kapitoly:

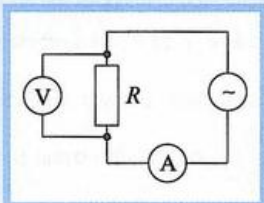
- Střídavý proud a střídavé napětí, obvod střídavého proudu s rezistorem (výkon střídavého proudu), efektivní hodnoty střídavého proudu a napětí
- Obvod střídavého proudu s cívkou, s kondenzátorem
- Složený obvod střídavého proudu, výkon střídavého proudu, přehled obvodů střídavého proudu
- Generátor střídavého proudu, alternátor
- Trojfázová soustava střídavého napětí
- Trojfázový asynchronní elektromotor
- Transformátor

Vztah mezi úhlovou frekvencí ω a frekvencí f (resp. periodou T) je $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ (str. 93).

STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ s harmonickým průběhem.

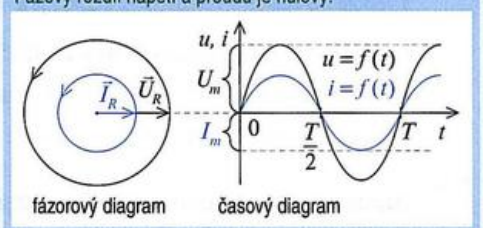


Vektor označený $\vec{U}_m$ se nazývá FÁZOR (též str. 137).

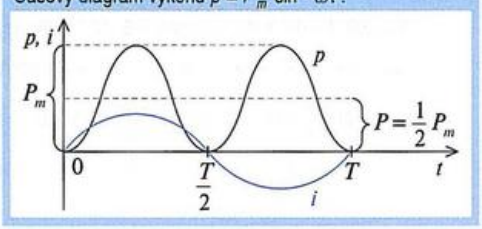


OBVOD STŘÍDAVÉHO PROUDU S REZISTOREM

Časový diagram napětí a proudu, $U_m = |\vec{U}_R|$, $I_m = |\vec{I}_R|$. Fázový rozdíl napětí a proudu je nulový.



Časový diagram výkonu $p = P_m \sin^2 \omega t$.



EFEKTIVNÍ HODNOTA STŘÍDAVÉHO PROUDU I je hodnota odpovídající stejnosměrnému proudu, který má v obvodu s rezistorem stejný výkon jako střídavý proud $i = I_m \sin \omega t$.
Efektivní hodnota střídavého proudu je dána vztahem:
$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, I_m$, kde I_m je amplituda proudu.

EFEKTIVNÍ HODNOTA STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ U je hodnota odpovídající stejnosměrnému napětí, pro které má elektrický proud v obvodu s rezistorem stejný výkon jako střídavý proud $i = I_m \sin \omega t$. Efektivní hodnota střídavého napětí je dána vztahem: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, U_m$, kde U_m je amplituda napětí.

Pro **VÝKON STŘÍDAVÉHO PROUDU** P v obvodu s rezistorem platí: $P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$.

Střední hodnota **VÝKONU STŘÍDAVÉHO PROUDU**:
$P = \frac{1}{2} R I_m^2 = \frac{1}{2} U_m I_m = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = UI \Rightarrow$
efektivní hodnota střídavého proudu $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$
a střídavého napětí $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Měřicí přístroje na měření veličin střídavého proudu (např. voltmetry a ampérmetry) jsou obvykle cejchovány v efektivních hodnotách. Napětí sítě, tzn. efektivní napětí sítě, je 230 V. Z toho vyplývá, že amplituda napětí sítě je $U_m = 230 \cdot \sqrt{2} \doteq 325$ V.

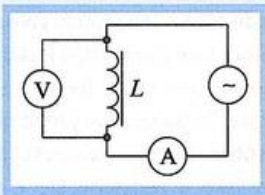
JEDNOTKOU VÝKONU je **WATT** (W), (str. 37, 115).

Obvod střídavého proudu s cívkou

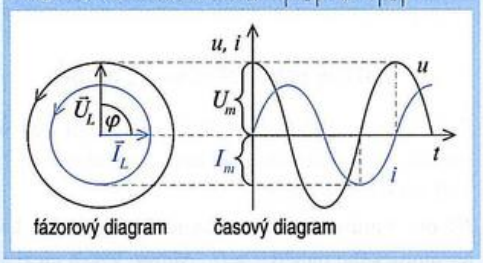
Cívka o indukčnosti L je připojena ke generátoru harmonického napětí $u = U_m \sin \omega t$. Vlivem vlastní indukce se na cívce indukuje napětí $u_i = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ (str. 130), přičemž napětí u_i má opačnou polaritu než rostoucí napětí u. Následkem toho proud i dosahuje maximální hodnoty později než napětí u, vzniká fázový rozdíl $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (platí pro nulový odpor cívky) a okamžitá hodnota střídavého proudu je $i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$.
Mezi amplitudou střídavého proudu I_m a amplitudou střídavého napětí U_m platí: $I_m = \frac{U_m}{X_L}$, kde konstanta $X_L = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}$ se nazývá **INDUKTANCE** nebo **INDUKTIVNÍ REAKTANCE**.

Pro **INDUKTANCI** platí vztah: $X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L$, kde f, resp. ω je frekvence, resp. úhlová frekvence střídavého proudu.

V cívce se energie elektrického proudu nemění na teplo jako u rezistoru, ale v energii magnetického pole cívky.
Skutečné cívky mají kromě indukčnosti také odpor. Je-li odpor malý ($R << X_L$), můžeme odpor cívky zanedbat. Jestliže je odpor srovnatelný s induktancí, má obvod vlastnosti cívky a rezistoru zapojených do série.



OBVOD STŘÍDAVÉHO PROUDU S CÍVKOU
V cívce se proud zpožďuje za napětím o $\frac{\pi}{2}$, fázový rozdíl je kladný.
Diagramy napětí a proudu, $U_m = |\vec{U}_L|$, $I_m = |\vec{I}_L|$.



Podle 2. Kirchhoffova zákona platí: $u + u_i = 0$, tedy $u = -u_i = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$. Pro $\Delta t \to 0$ platí $u = -u_i = L \frac{di}{dt}$, tedy $u = U_m \sin \omega t = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{U_m}{L} \sin \omega t$. Z této rovnice lze odvodit vztah $i = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$.

JEDNOTKOU INDUKTANCE je **OHM** (Ω).

Př. 1

Urči induktanci cívky s indukčností 280 mH, prochází-li jí střídavý proud o frekvenci 50 Hz a o amplitudě 400 mA.
Urči amplitudu a efektivní hodnotu napětí na cívce.

$L = 280$ mH $= 0{,}28$ H; $f = 50$ Hz; $I_m = 400$ mA $= 0{,}4$ A; $X_L = ?$; $U_m = ?$; $U = ?$

$X_L = 2\pi f L$
$\{X_L\} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}28 = 87{,}95$
$X_L \doteq 88\ \Omega$

$X_L = \frac{U_m}{I_m} \Rightarrow U_m = X_L \cdot I_m$
$\{U_m\} = 88 \cdot 0{,}4 = 35{,}2$; $U_m \doteq 35$ V

$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$
$\{U\} = \frac{35}{\sqrt{2}} = 24{,}75$ $\quad U \doteq 25$ V

Induktance cívky je 88 Ω. Amplituda napětí je 35 V, efektivní hodnota napětí 25 V.

Obvod střídavého proudu s kondenzátorem

Kondenzátor je připojen ke generátoru harmonického napětí $u = U_m \sin \omega t$. Pro okamžitou hodnotu střídavého proudu platí: $i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Vzniká fázový rozdíl $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, napětí se zpožďuje za proudem.

Mezi amplitudou střídavého proudu I_m a napětí U_m platí vztah: $I_m = \frac{U_m}{X_C}$ nebo $X_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}$, kde se konstanta X_C nazývá **KAPACITANCE** nebo **KAPACITNÍ REAKTANCE**.

Pro **KAPACITANCI** platí vztah $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$, kde f je frekvence, resp. ω úhlová frekvence střídavého proudu.

Kondenzátor se v obvodu střídavého proudu chová jako prvek s odporem. Kondenzátory lépe propouštějí elektrické signály vyšších frekvencí, naopak pro nízké frekvence střídavého proudu kapacitance roste. Stejnosměrný proud pak přes kondenzátor neprochází vůbec. Energie elektrického proudu se však nemění na teplo jako u rezistoru, ale v energii elektrického pole mezi deskami kondenzátoru.

Složený obvod střídavého proudu

Pokud jsou v obvodu se střídavým proudem zapojeny za sebou rezistor, cívka i kondenzátor, nazýváme ho **SÉRIOVÝ OBVOD *RLC*** (**OBVOD S *RLC* V SÉRII**).

Na obr. vpravo je sériový obvod *RLC* připojen ke generátoru harmonického napětí $u = U_m \sin \omega t$. Vztah mezi amplitudami napětí a proudu v obvodu určíme pomocí fázorového diagramu, kde $\vec{U}_R, \vec{U}_L, \vec{U}_C$ jsou fázory otáčející se v čase. Jejich velikosti U_{Rm}, U_{Lm}, U_{Cm} jsou amplitudy napětí na rezistoru, cívce a kondenzátoru. Platí pro:

- rezistor; napětí a proud mají stejnou fázi, takže fázor napětí $\vec{U}_R$ má stejný směr jako fázor proudu $\vec{I}_m$,
- kondenzátor; proud předbíhá napětí o 90°, takže fázor napětí $\vec{U}_C$ je zpožděn o 90° za fázorem proudu $\vec{I}_m$,
- cívku; proud je zpožděn za napětím o 90°, takže fázor napětí $\vec{U}_L$ předbíhá o 90° před fázorem proudu $\vec{I}_m$.

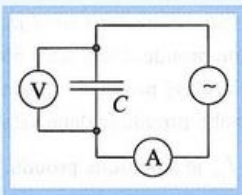
Použitím Pythagorovy věty vypočítáme velikost $\vec{U}_m$, tedy amplitudu výsledného napětí: $U_m^2 = U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2$.

Dosadíme za U_{Rm}, U_{Lm}, U_{Cm} a obdržíme pro U_m vztah:

$U_m^2 = (RI_m)^2 + (X_L I_m - X_C I_m)^2 =$

$U_m^2 = I_m^2 (R^2 + (X_L - X_C)^2)$, kde $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$,

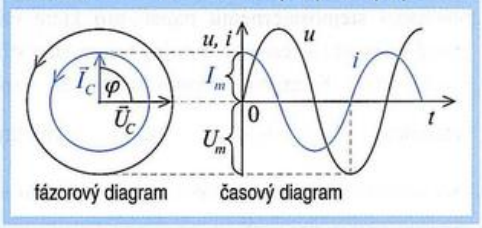
tedy $U_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.



OBVOD STŘÍDAVÉHO PROUDU S KONDENZÁTOREM

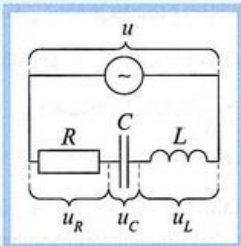
Proud předbíhá napětí, fázový rozdíl je záporný, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$.

Diagramy napětí a proudu, $U_m = |\vec{U}_C|$, $I_m = |\vec{I}_C|$.



Okamžitá hodnota proudu $i = \frac{dq}{dt}$ (str. 111) v obvodu souvisí s nabíjením kondenzátoru vztahem $q = C \cdot u$ (str. 109, q je náboj na kondenzátoru a C jeho kapacita). Dosazením do vztahu $q = C \cdot u$ za u obdržíme $q = C \cdot U_m \sin \omega t$. Dosadíme do vztahu pro proud i a obdržíme $i = \omega C \cdot U_m \cos \omega t = \omega C \cdot U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

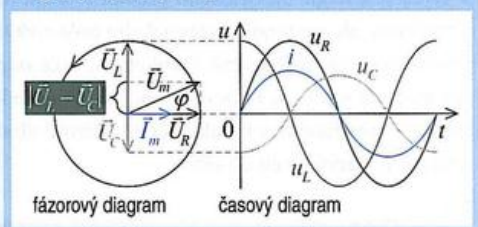
JEDNOTKOU KAPACITANCE je **OHM** (Ω).



SÉRIOVÝ OBVOD RLC

Výsledné okamžité napětí u je podle Ohmova zákona součtem okamžitých napětí na rezistoru u_R, kondenzátoru u_C a cívce u_L, tj. $u = u_R + u_C + u_L$.

Diagramy napětí a proudu.



Okamžité hodnoty napětí u, u_R, u_L, u_C a proudu i jsou projekce odpovídajících rotujících fázorů $\vec{U}_m, \vec{U}_R, \vec{U}_L, \vec{U}_C$ a $\vec{I}_m$ na svislou osu a platí:

$\vec{U}_m = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$,

$U_{Rm} = |\vec{U}_R|$, $U_{Lm} = |\vec{U}_L|$, $U_{Cm} = |\vec{U}_C|$,

$U_m = |\vec{U}_m|$, $I_m = |\vec{I}_m|$.

Obvod jako celek charakterizuje jediná veličina Z, která se nazývá **IMPEDANCE**. Platí:

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

kde U_m, I_m jsou amplitudy střídavého napětí a proudu.

Pro složené obvody se střídavými proudy lze definovat také **EFEKTIVNÍ HODNOTY NAPĚTÍ** U a **PROUDU** I pomocí stejných vztahů jako pro obvod s rezistorem (str. 133):

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, U_m, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, I_m,$$

kde U_m je amplituda napětí na svorkách zdroje střídavého napětí, kde I_m je amplituda střídavého proudu v obvodu.

Pro **IMPEDANCI** Z pak platí vztah: $Z = \frac{U}{I}$,

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

Vztah pro impedanci lze upravit na formální tvar Ohmova zákona $I = \frac{U}{Z}$ anebo $U = Z \cdot I$.

Pro **FÁZOVÝ POSUN** φ (fázový rozdíl) proudu vzhledem k napětí v RLC obvodu platí: $\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$ anebo $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$.

Rezonance v sériovém obvodu RLC

Impedance Z v RLC obvodu závisí na úhlové frekvenci ω. **REZONANCE** v buzeném RLC obvodu nastává, jestliže je $X_L = X_C$, impedance Z tehdy nabývá minimální hodnoty $Z = R$, fázový rozdíl napětí a proudu je nulový a proud I nabývá hodnoty maximální. Frekvence, při které k rezonanci dochází, se nazývá **REZONANČNÍ FREKVENCE** f_0.

Pro rezonanční frekvenci platí: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,

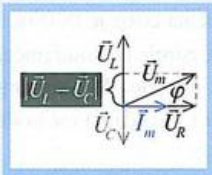
resp. pro úhlovou rezonanční frekvenci platí: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Výkon střídavého proudu

Do obvodu RLC dodává elektrickou energii zdroj střídavého napětí. Část dodané energie je uložena v elektrickém poli kondenzátoru, část v magnetickém poli cívky a část se spotřebovává v rezistoru (tj. ve spotřebiči). V ustáleném stavu zůstává časová střední hodnota energie uložené v kondenzátoru a v cívce konstantní. Elektrická energie se přenáší jen od zdroje k rezistoru a v něm se spotřebuje (přemění se v teplo nebo v užitečnou práci).

ČINNÝ VÝKON střídavého proudu odpovídá té části elektrické energie dodané zdrojem, která se v obvodu za jednotku času mění v teplo nebo v užitečnou práci (např. v elektromotoru).

JEDNOTKOU IMPEDANCE je **OHM** (Ω).



Pro **FÁZOVÝ POSUN** φ proudu a napětí v obvodu RLC vyplývá z fázorového diagramu vztah: $\cos\varphi = \frac{U_R}{U_m} = \frac{I_m R}{I_m Z} = \frac{R}{Z}$.

Dále pro **FÁZOVÝ POSUN** φ platí vztah:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{I_m X_L - I_m X_C}{I_m R},$$

což dává $\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$.

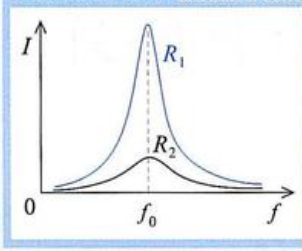
Někdy je fázor $\vec{U}_m$ označován symbolem $\vec{U}$.
Nutno si uvědomit rozdíl:
U – efektivní napětí,
U_m – amplituda napětí a současně velikost fázoru $\vec{U}_m$.

REZONANČNÍ FREKVENCI ω_0 lze snadno určit po vyčíslení rovnosti $X_L = X_C$. Dosadíme za X_L, X_C, tedy

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

$$4\pi^2 f_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

REZONANČNÍ KŘIVKY buzeného sériového obvodu RLC



Proud I nabývá maxima pro rezonanční frekvenci $\omega_0 = 2\pi f_0$, maximum křivky klesá s rostoucím odporem R ($R_2 > R_1$).

Pro **ČINNÝ VÝKON** platí $P = RI^2 = RI \cdot I$ (str. 133), kde I je efektivní hodnota střídavého proudu v RLC obvodu, R je odpor spotřebiče.

Dosadíme za $I = \frac{U}{Z}$ a obdržíme $P = UI\frac{R}{Z}$.

Dosadíme za $\frac{R}{Z} = \cos\varphi$, kde φ je fázový posun střídavého napětí a proudu.

Pak pro činný výkon platí $P = UI\cos\varphi$, kde U je efektivní hodnota střídavého napětí na svorkách zdroje.

Činný výkon závisí na velikosti účiníku φ:

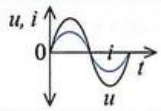
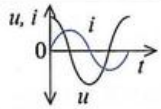
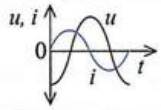
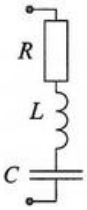
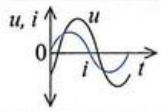
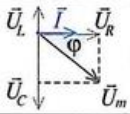
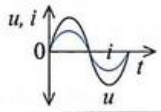
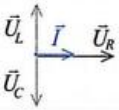
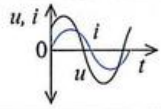
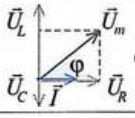
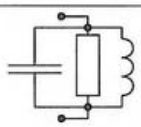
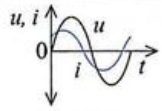
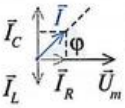
- maximální výkon je pro $\varphi = 0$, tj. $\cos\varphi = 1$,
- nulový výkon je pro $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$, tj. $\cos\varphi = 0$.

Pro **ČINNÝ VÝKON** P platí $P = UI\cos\varphi$, kde U, I jsou efektivní hodnoty střídavého napětí na svorkách zdroje a střídavého proudu v RLC obvodu. Veličina $\cos\varphi$ je **ÚČINÍK**, který určuje účinnost přenosu energie ze zdroje do spotřebiče, φ je fázový posun střídavého napětí a proudu. Nejvyšší možný výkon střídavého proudu v obvodu s impedancí má hodnotu $P_z = UI$ a nazývá se **ZDÁNLIVÝ VÝKON**.

JEDNOTKOU VÝKONU je **WATT** (str. 133).

Obvod RLC nazýváme také obvod s impedancí. Na proud odpovídající výkonu $P_z = UI$ musí být dimenzováno vedení, kterým je spotřebič připojen k elektrické síti.

Přehled obvodů střídavého proudu

SCHÉMA ZAPOJENÍ	IMPEDANCE OBVODU	ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDU A NAPĚTÍ	FÁZOROVÝ DIAGRAM PROUDU A NAPĚTÍ
	R		$\varphi = 0$
	$X_L = \omega L$		$\varphi = +\frac{\pi}{2}$
	$X_C = \frac{1}{\omega C}$		$\varphi = -\frac{\pi}{2}$
	$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$		 $\varphi < 0$
			 $\varphi = 0$, $\vec{U}_m = \vec{U}_R$
			 $\varphi > 0$
	$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$		 $\varphi < 0$

Př. 2

Urči kapacitanci kondenzátoru s kapacitou 280 μF, prochází-li jím střídavý proud o frekvenci 50 Hz a amplitudě 400 mA. Urči amplitudu a efektivní hodnotu napětí na kondenzátoru.

$C = 280\ \mu\text{F} = 2{,}8 \cdot 10^{-4}\ \text{F};\ f = 50\ \text{Hz};\ I_m = 400\ \text{mA} = 0{,}4\ \text{A};\ X_C = ?;\ U_m = ?;\ U = ?$

$X_C = \frac{1}{2\pi fC};\ \{X_C\} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-4}} = 11{,}37;\ X_C = 11{,}37\ \Omega$

$X_C = \frac{U_m}{I_m} \Rightarrow U_m = X_C \cdot I_m;\ \{U_m\} = 11{,}37 \cdot 0{,}4 = 4{,}56;\ U_m = 4{,}55\ \text{V}$

$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}};\ \{U\} = \frac{4{,}55}{\sqrt{2}} = 3{,}253$

$U = 3{,}22\ \text{V}$

Kapacitance kondenzátoru je 11,37 Ω. Amplituda napětí je 4,55 V, efektivní hodnota napětí 3,22 V.

Př. 3

Ke svorkám zdroje střídavého napětí o amplitudě 325 V je připojen spotřebič o výkonu 8 kW. Spotřebičem prochází proud o amplitudě 68 A. Urči fázový rozdíl napětí a proudu v obvodu.

$U_m = 325\ \text{V};\ P = 8\ \text{kW} = 8\ 000\ \text{W};\ I_m = 68\ \text{A};\ \varphi = ?$

$$P = UI\cos\varphi = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos\varphi = \frac{1}{2} U_m I_m \cos\varphi \Rightarrow \cos\varphi = \frac{2P}{U_m I_m};\ \cos\varphi = \frac{2 \cdot 8\ 000}{325 \cdot 68} \doteq 0{,}724 \Rightarrow \varphi \doteq 44°$$

Fázový rozdíl mezi napětím a proudem je asi 44 °.

Generátor střídavého proudu

Elektrická energie se vyrábí v elektrárnách přeměnou mechanické (či jiné) energie na elektrickou. Generátor střídavého proudu, který slouží k výrobě elektrické energie, se nazývá TROJFÁZOVÝ ALTERNÁTOR. Elektrická energie je v alternátoru vyráběna tak, že mezi třemi masivními cívkami (stator) rotuje velký elektromagnet (rotor) napájený stejnosměrným proudem ze samostatného dynama zvaného budič. Otáčivým pohybem magnetického pole rotoru se na cívkách indukují harmonická napětí, tato napětí jsou časově posunuta o jednu třetinu periody. Pro okamžité hodnoty těchto napětí platí:

$$u_1 = U_m \sin\omega t,$$

$$u_2 = U_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right),$$

$$u_3 = U_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right).$$

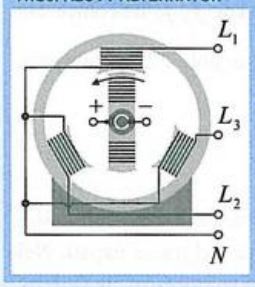
Trojfázová soustava střídavého napětí

K přenosu elektrické energie a rozvodu elektrického proudu se nejčastěji používá TROJFÁZOVÁ SOUSTAVA střídavých napětí, založená na poznatku, že součet okamžitých hodnot střídavých napětí je stále nulový: $u_1 + u_2 + u_3 = 0$. Jeden konec každé z cívek alternátoru je spojen do společného uzlu. Vodič spojený s uzlem se nazývá NULOVACÍ VODIČ N. Druhé konce cívek alternátoru jsou vyvedeny jednotlivě, tyto tři vodiče se nazývají FÁZOVÉ VODIČE.

Mezi fázovými vodiči a nulovacím vodičem jsou FÁZOVÁ NAPĚTÍ u_1, u_2, u_3. Napětí mezi libovolnými dvěma fázovými vodiči se nazývají SDRUŽENÁ NAPĚTÍ u_{12}, u_{23}, u_{13}, přičemž efektivní hodnota sdruženého napětí je $\sqrt{3}$krát větší než efektivní hodnota fázového napětí. V elektrické rozvodné síti jsou fázová napětí 230 V a sdružená napětí 398 V, proto se používá označení sítě 3×400 V / 230 V.

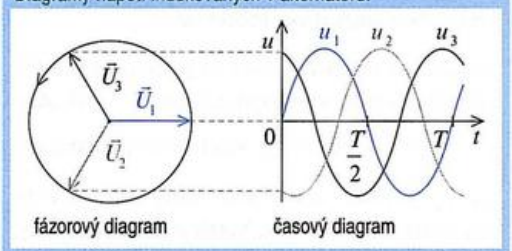
Dříve používané trojfázové napětí 3×380 V / 220 V nebylo v souladu s normou EU.

TROJFÁZOVÝ ALTERNÁTOR



V alternátoru se netočí cívka, ale elektromagnet (na rozdíl od principu popsaného na str. 129). Z cívek statoru jsou vyvedeny tři FÁZOVÉ VODIČE L_1, L_2, L_3 a NULOVACÍ VODIČ N, který je zpravidla uzemněn.

Diagramy napětí indukovaných v alternátoru.

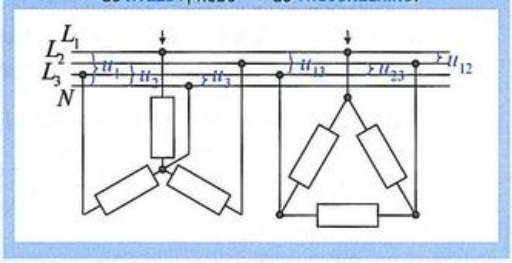


$\vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_3 = \vec{0}$ $\qquad$ $u_1 + u_2 + u_3 = 0$

FÁZOR je symbolické vyjádření veličiny střídavého proudu nebo napětí vektorem. Délka vektoru se rovná amplitudě veličiny a úhel mezi dvěma vektory je rovný fázovému rozdílu odpovídajících veličin.

DYNAMO je generátorem stejnosměrného proudu.

Spotřebiče konstruované na větší výkon se připojují současně ke všem fázovým vodičům. Jejich elektrický obvod má tři stejné části. Tyto spotřebiče pak můžeme zapojit buď do HVĚZDY, nebo do TROJÚHELNÍKU.



Trojfázový asynchronní elektromotor

TROJFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ ELEKTROMOTOR se skládá ze statoru, který má podobnou konstrukci jako stator alternátoru (tři masivní cívky L_1, L_2, L_3), a z rotoru, který tvoří válec s drážkami, v nichž je uloženo vinutí.

Čím je zatížení asynchronního elektromotoru větší, tím pomaleji se rotor otáčí, proto je definována veličina **SKLUZ** $s = \frac{f_p - f_r}{f_p}$, kde f_p je frekvence otáčení otáčivého magnetického pole a f_r je frekvence otáčení rotoru.

Transformátor

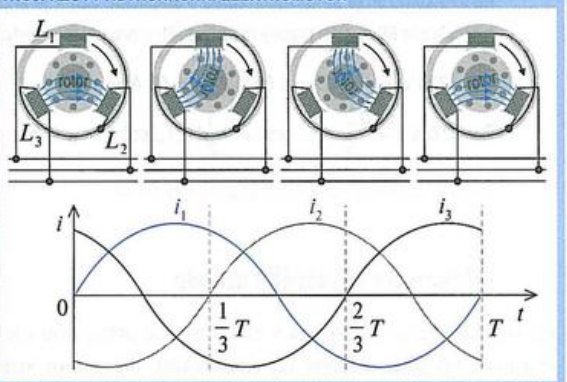
TRANSFORMÁTOR je zařízení, které umožňuje snižovat, popř. zvyšovat střídavé elektrické napětí. Nejjednodušší transformátor je jednocestný. Je složený ze dvou cívek (primární a sekundární) na společném jádře z magneticky měkké oceli.

Označíme-li efektivní napětí na primární cívce U_1 a efektivní napětí na sekundární cívce U_2, pak platí $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$, kde N_1 je počet závitů primární cívky, N_2 je počet závitů sekundární cívky a k je **TRANSFORMAČNÍ POMĚR**. Vztah platí za podmínky, že transformátor pracuje naprázdno, bez zatížení.

Podle zákona zachování energie musí být příkon $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$ vstupující do transformátoru roven výkonu $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ odebíranému ze sekundární cívky, tj. $U_1 I_1 \cos\varphi_1 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ (při zanedbání ztrát). Zpravidla je $\cos\varphi_1 \approx \cos\varphi_2 \approx 1$, tedy platí $U_1 I_1 = U_2 I_2$; proudy se transformují v opačném poměru než napětí.

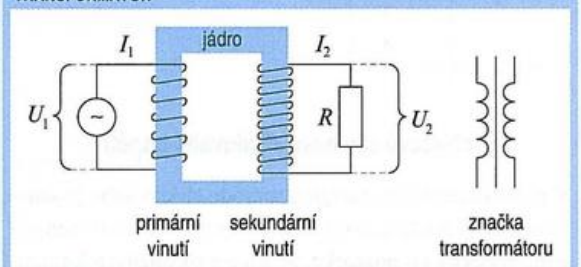
ÚČINNOST transformátoru je definována podílem výkonu P_2, který můžeme odebírat ze sekundární cívky, a příkonu P_1 transformátoru, tj. $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

TROJFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ ELEKTROMOTOR



Přivedeme-li na cívky statoru trojfázové napětí, uvnitř se vytvoří točivé magnetické pole, které indukuje ve vinutí rotoru silné proudy. Podle Lenzova zákona tyto proudy vytvářejí magnetické pole, které působí proti otáčení magnetického pole statoru, a rotor se roztočí. Bude se však otáčet s frekvencí menší, než s jakou se točí magnetické pole mezi cívkami statoru, jinak by se proudy ve vinutí neindukovaly. Asynchronní elektromotory mají výhodu jednoduché konstrukce, nevýhodou je prakticky nemožnost regulovat otáčky. Používají se proto tam, kde není třeba otáčky regulovat, např. na pohon čerpadel.

TRANSFORMÁTOR



TRANSFORMAČNÍ POMĚR určuje transformaci nahoru/dolů:

- Je-li $k > 1$, jde o **TRANSFORMACI NAHORU**, napětí na sekundární cívce je větší než napětí na primární cívce.
- Je-li $k < 1$, jde o **TRANSFORMACI DOLŮ**, napětí na sekundární cívce je menší než napětí na primární cívce.

Př. 5

Příkon transformátoru je 0,8 kW, účinnost je 96 %. Jaký proud prochází v sekundárním obvodu, jestliže napětí na sekundární cívce je 120 V?

$P_1 = 0{,}8\ \text{kW} = 800\ \text{W}; \eta = 96\ \% = 0{,}96; U_2 = 120\ \text{V}; I_2 = ?$

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1}{U_2 \cdot I_2} \Rightarrow I_2 = \frac{P_1}{\eta \cdot U_2}; \{I_2\} = \frac{800}{0{,}96 \cdot 120} = 6{,}94; I_2 = 6{,}94\ \text{A}$$

V sekundárním obvodu prochází proud 6,94 A.

5.5 Elektromagnetické kmitání, elektromagnetické pole a vlnění

Elektromagnetické kmitání

Zdrojem střídavého napětí s harmonickým průběhem a nízkou frekvencí (např. 50 Hz) jsou alternátory v elektrárnách. Zdrojem střídavých napětí různých frekvencí jsou ELEKTROMAGNETICKÉ OSCILÁTORY. Střídavé proudy a napětí, jejichž zdrojem jsou tyto oscilátory, označujeme jako ELEKTROMAGNETICKÉ KMITÁNÍ.

Elektromagnetický oscilátor

Nejjednodušším elektromagnetickým oscilátorem je obvod tvořený cívkou a kondenzátorem, tzv. OSCILAČNÍ OBVOD neboli *LC* OSCILÁTOR. Napětí u a proud i se mění harmonicky: $u = U_m \cos\omega t$, $i = I_m \sin\omega t$. Říkáme, že obvod kmitá neboli OSCILUJE a příslušné změny elektrického pole kondenzátoru a magnetického pole cívky se nazývají ELEKTROMAGNETICKÉ KMITY.

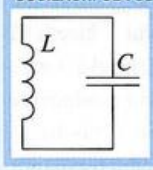
Při nabití kondenzátoru se mezi jeho deskami vytvoří elektrické pole a jeho energie představuje energii oscilátoru v počátečním okamžiku. V čase $t = 0$ je mezi deskami kondenzátoru napětí $u = U_m$ a proud i procházející cívkou je nulový. Kondenzátor se nyní začne vybíjet přes cívku, napětí u klesá, proud i roste a změna proudu vyvolá na cívce indukované napětí u_i působící podle Lenzova zákona proti napětí na kondenzátoru (str. 129, 130). Následkem toho se kondenzátor vybije až za určitou dobu (odpovídající čtvrtině periody T), tehdy proud i dosahuje maximální hodnoty I_m a napětí $u = 0$. Energie elektrického pole kondenzátoru se zcela změnila na energii magnetického pole cívky.

V okamžiku $t = \frac{T}{4}$, kdy je kondenzátor zcela vybit, začne proud v obvodu klesat, což na cívce vyvolá vznik indukovaného napětí s opačným směrem, které nedovolí, aby proud náhle zanikl. Tento proud opět nabíjí kondenzátor. V okamžiku odpovídajícím polovině periody je kondenzátor zcela nabit (s tím rozdílem, že nyní je nabit opačně). Napětí mezi deskami $u = -U_m$ a proud i v obvodu je opět nulový. Celý děj se analogicky opakuje, až dospěje do původního stavu za dobu odpovídající jedné periodě T.

Osnova kapitoly:

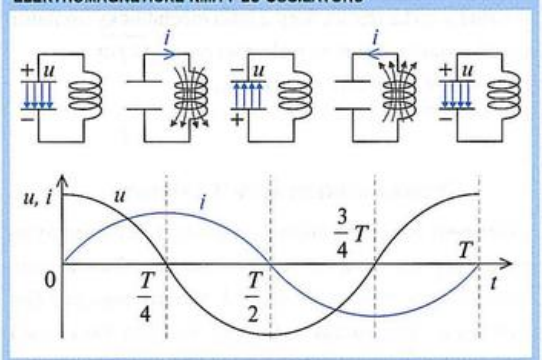
- Elektromagnetické kmitání, elektromagnetický oscilátor,
- Energie elektromagnetického oscilátoru, perioda a frekvence kmitů, nucené kmitání, rezonance, vazba oscilátorů
- Elektromagnetické pole, elektromagnetické vlnění, dipól
- Přenos signálů elektromagnetickými vlnami, přenosová soustava, radiokomunikace, vysílač a přijímač, anténa

OSCILAČNÍ OBVOD – *LC* OSCILÁTOR – *LC* OBVOD

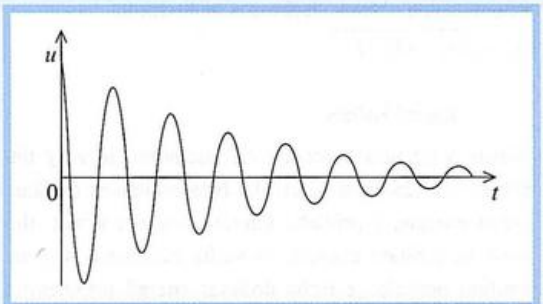


Parametry tohoto jednoduchého oscilačního obvodu jsou indukčnost cívky L a kapacita kondenzátoru C (v obecném případě i odpor R obvodu).

ELEKTROMAGNETICKÉ KMITY *LC* OSCILÁTORU



Elektromagnetické kmity *LC* oscilátoru jsou harmonické a proud i v obvodu je opožděn za napětím u (mezi deskami kondenzátoru): $i = I_m \sin\omega t = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$; fázový posun je $\frac{\pi}{2}$, což odpovídá $\frac{T}{4}$.



ELEKTROMAGNETICKÉ KMITÁNÍ oscilačního obvodu je v obecném případě tlumené. Příčinou tlumení je odpor R oscilačního obvodu, který způsobuje hlavně odpor vinutí cívky. V něm se energie elektrického a magnetického pole přeměňuje postupně na vnitřní (tepelnou) energii vodičů obvodu.

Analogie mezi elektromagnetickým a mechanickým oscilátorem, energie elektromagnetického oscilátoru

V mechanickém oscilátoru tvořeném tělesem a pružinou rozlišujeme dva druhy energie: jednak potenciální energii E_p napnuté nebo stlačené pružiny, jednak kinetickou energii pohybujícího se tělesa E_k. Tabulka ukazuje také dva druhy energie v kmitajícím obvodu *LC*, jednak energii elektrického pole kondenzátoru E_{el}, jednak energii magnetického pole cívky E_{mg}. Můžeme vidět analogii mezi dvojicemi: potenciální + kinetická energie mechanického oscilátoru a magnetická + elektrická energie obvodu *LC*, přičemž náboji q odpovídá výchylka y a proudu i odpovídá rychlost v. Oscilační obvod *LC* je tedy analogický mechanickému oscilátoru (soustava těleso + pružina), kde kondenzátor odpovídá pružině a cívka tělesu. Stejně jako mechanický oscilátor kmitá s vlastní úhlovou frekvencí $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ (str. 94), tak i *LC* oscilátor kmitá s VLASTNÍ ÚHLOVOU FREKVENCÍ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Perioda a frekvence kmitů LC oscilátoru

Můžeme-li zanedbat odpor *LC* obvodu, jeho jedinými parametry jsou *L* a *C*. Kmitání tohoto obvodu označujeme jako VLASTNÍ KMITÁNÍ elektromagnetického oscilátoru. Thomsonův vztah pro VLASTNÍ FREKVENCI elektromagnetického oscilátoru je $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Thomsonův vztah pro VLASTNÍ PERIODU elektromagnetického oscilátoru je $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Odpor *R* vinutí cívky způsobuje nejenom postupné tlumení vlastních kmitů oscilačního obvodu, ale také zmenší jejich úhlovou frekvenci na hodnotu $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - (R/2L)^2}$.

Nucené kmitání

Vlastní kmitání skutečného *LC* oscilátoru je vždy tlumené; v počátečním okamžiku byla oscilátoru dodána určitá energie, v průběhu kmitání dochází vlivem tlumení ke ztrátám energie, až kmity zaniknou. Aby se kmitání udrželo, je třeba dodávat energii připojením oscilátoru ke generátoru střídavého napětí G. Oscilátor bude pak kmitat s úhlovou frekvencí harmonického napětí generátoru $u = U_m \sin \omega t$. Je-li tato frekvence ω odlišná od vlastní úhlové frekvence ω_0 oscilátoru, takové kmitání se pak nazývá NUCENÉ KMITÁNÍ elektromagnetického oscilátoru.

ENERGIE PRVKŮ OSCILÁTORŮ			
MECHANICKÝ OSCILÁTOR		ELEKTROMAGNETICKÝ *LC* OSCILÁTOR	
těleso + pružina		cívka + kondenzátor	
prvek	energie	prvek	energie
pružina (str. 96)	$E_p = \frac{1}{2}ky^2$	kondenzátor (str. 110)	$E_{el} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C}\right)q^2$
těleso (str. 96)	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	cívka (str. 130)	$E_{mg} = \frac{1}{2}L \cdot i^2$
$v = \frac{dy}{dt}$ (str. 93)		$i = \frac{dq}{dt}$ (str. 111)	

Energie elektrického pole kondenzátoru se periodicky mění v energii magnetického pole cívky a naopak. V případě netlumeného kmitání je součet energie elektrického pole kondenzátoru a energie magnetického pole cívky v každém okamžiku konstantní.

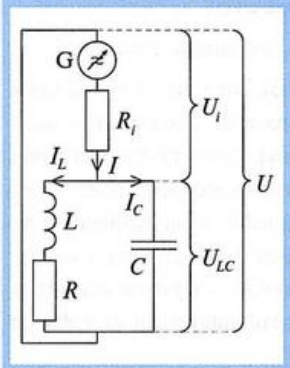
Vztah pro VLASTNÍ ÚHLOVOU FREKVENCI ω_0 kmitů elektromagnetického *LC* oscilátoru (a odtud vztah i pro vlastní frekvenci a vlastní periodu) lze odvodit z toho, že amplituda napětí U_L na cívce je stejná jako amplituda napětí U_C na kondenzátoru: $U_m = U_L = U_C \Rightarrow X_L I_m = X_C I_m$ (str. 133, 134, 135) $\Rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, tedy $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Perioda a frekvence VLASTNÍCH KMITŮ oscilačního *LC* obvodu závisí jen na jeho parametrech a nezávisí na podmínkách, za nichž bylo kmitání vzbuzeno.

IMPEDANCE BUZENÉHO *RLC* OBVODU

Prvky obvodu *LC* jsou připojeny ke generátoru střídavého napětí G paralelně. Pro amplitudu napětí generátoru platí: $U_m = U_i + U_{LC}$. Impedance obvodu *RLC* je dána vztahem:

$$Z = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{\sqrt{1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}}.$$



X_L – induktance cívky, obvykle je $R << X_L, X_C$ – kapacitance kondenzátoru, R – odpor vinutí cívky, R_i – vnitřní odpor zdroje.

Impedance *Z* obvodu *LRC* je největší pro vlastní frekvenci ω_0, pak $Z_0 = L/RC$, $X_{L0} = X_{C0} = \sqrt{L/C}$ a proudy I_L a I_C jsou téměř stejné. Proud *I* je pak mnohem menší než I_L, resp. I_C. Obvodem pak prochází nejmenší proud, který nahrazuje ztráty v odporu *R* vinutí cívky.

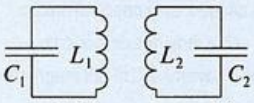
Je-li frekvence nuceného kmitání ω stejná jako frekvence ω_0 vlastních kmitů, nastává REZONANCE oscilátoru s generátorem, amplituda nucených kmitů U_{LC} dosahuje maximální hodnoty a malý budicí proud I z generátoru udržuje velký proud v obvodu LC. Proud I nahrazuje ztráty v odporu R vinutí cívky.

LC oscilátor připojený ke zdroji harmonického střídavého napětí se nazývá také BUZENÝ obvod LC nebo BUZENÝ LC OSCILÁTOR (buzený oscilační obvod).

Vazba a rezonance elektromagnetických oscilátorů

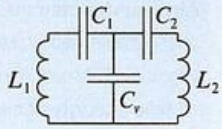
VAZBA LC oscilátorů je zapojení umožňující přenos střídavého elektrického napětí (proudu) z jednoho obvodu do druhého. Na obrázku je INDUKČNÍ VAZBA a KAPACITNÍ VAZBA. První obvod se nazývá OSCILAČNÍ OBVOD, druhý obvod, který přijímá signál, se nazývá REZONANČNÍ OBVOD. Je-li vlastní frekvence rezonančního obvodu stejná jako vlastní frekvence oscilačního obvodu, jsou oba obvody v REZONANCI.

indukční vazba

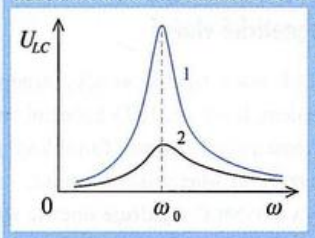


oscilační obvod — rezonanční obvod

kapacitní vazba



REZONANČNÍ KŘIVKY BUZENÉHO LC OBVODU.



Protože je impedance Z obvodu LC největší pro vlastní frekvenci ω_0, amplituda napětí U_{LC} dosahuje také maximální hodnoty pro frekvenci ω_0; vyplývá to ze vztahu:
$U = U_i + U_{LC} = R_i I + ZI$ (obvykle je vnitřní odpor generátoru $R_i << Z$).
Tlumení kmitů je úměrné odporu vinutí cívky. Je-li tlumení větší, je maximum rezonanční křivky nižší (2), než je-li tlumení menší (1).

REZONANCE je využívána např. při ladění rozhlasových stanic. Otočným kondenzátorem měníme vlastní frekvenci LADICÍHO oscilačního obvodu v rádiu. Je-li tato frekvence odlišná od frekvence signálu, který přichází do obvodu z antény, impedance obvodu je nízká a signál je obvodem zkratován. V momentě, kdy je vlastní frekvence shodná s frekvencí přijímaného signálu, dojde k rezonanci, oscilační obvod se s touto frekvencí rozkmitá a signál je dále zpracován v zesilovači (str. 145).

Př. 1

Oscilační obvod je tvořen cívkou o indukčnosti 20 mH a kondenzátorem s měnitelnou kapacitou od 450 nF do 800 nF. Urči rozsah frekvencí vlastního kmitání obvodu.

$L = 20\ \text{mH} = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{H};\ C_1 = 45\ \text{nF} = 4{,}5 \cdot 10^{-8}\ \text{F};\ C_2 = 80\ \text{nF} = 8{,}0 \cdot 10^{-8}\ \text{F};\ f_{01} = ?;\ f_{02} = ?$

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \qquad f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}}$$

$$\{f_{01}\} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 10^{-2} \cdot 4{,}5 \cdot 10^{-8}}} = 5\,306 \qquad \{f_{02}\} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-8}}} = 3\,980$$

$f_{01} = 5{,}306\ \text{kHz}$ $\qquad f_{02} = 3{,}98\ \text{kHz}$

Oscilátor může kmitat na frekvencích 4,0 kHz až 5,3 kHz.

Př. 2

Elektromagnetický oscilátor je tvořen kondenzátorem o kapacitě 0,4 μF a cívkou o indukčnosti 250 mH. Tento oscilátor je v rezonanci s jiným oscilačním obvodem, jehož kondenzátor má kapacitu 15 μF. Urči indukčnost cívky v druhém obvodu.

$C_1 = 0{,}4\ \mu\text{F} = 4 \cdot 10^{-7}\ \text{F};\ L_1 = 250\ \text{mH} = 0{,}25\ \text{H};\ C_1 = 15\ \mu\text{F} = 1{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{F};\ L_1 = ?$

$$f_1 = f_2 \Rightarrow \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \Rightarrow \sqrt{L_1C_1} = \sqrt{L_2C_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_2 = \frac{C_1}{C_2}L_1 \Rightarrow \{L_2\} = \frac{4 \cdot 10^{-7}}{1{,}5 \cdot 10^{-5}} \cdot 0{,}25 = 6{,}666 \cdot 10^{-3};\ L_2 = 6{,}666\ \text{mH}$$

- Aby docházelo k rezonanci, musí být frekvence obou obvodů stejná.

Cívka v druhém oscilačním obvodu má indukčnost asi 6,7 mH.

Elektromagnetické pole, elektromagnetické vlnění

ELEKTROMAGNETICKÉ POLE bylo teoreticky předpovězeno J. C. Maxwellem, který v r. 1873 zobecnil známé poznatky o elektřině a magnetismu a formuloval je v rovnicích, které nazýváme Maxwellovy rovnice.

PRVNÍ MAXWELLOVA ROVNICE vyjadřuje obecně souvislost mezi intenzitou elektrického pole $\vec{E}$ a elektrickým nábojem Q. Jejím důsledkem je např. Coulombův zákon (str. 105).

DRUHÁ MAXWELLOVA ROVNICE vyjadřuje poznatek, že tok magnetické indukce $\vec{B}$ libovolnou uzavřenou plochou (např. povrchem koule) je roven nule.

TŘETÍ MAXWELLOVA ROVNICE je zevšeobecněním Faradayova indukčního zákona a vyjadřuje skutečnost, že elektrické pole může vznikat jako důsledek změny magnetického pole nejenom ve vodičích, ale také ve vakuu a v nevodivém prostředí.

ČTVRTÁ MAXWELLOVA ROVNICE vyjadřuje skutečnost, že magnetické pole vzniká jako důsledek elektrického proudu a také jako důsledek změny elektrického pole.

Z Maxwellových rovnic vyplývá skutečnost, že elektrické a magnetické pole může existovat ve vakuu a v látkovém prostředí i v případě, že není vytvořeno elektrickými náboji. Obě pole jsou neoddělitelně spjata a vytvářejí jediné ELEKTROMAGNETICKÉ POLE, které není statické, ale šíří se prostorem jako ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ. Maxwellova teorie umožnila vypočítat všechny vlastnosti tohoto pole včetně rychlosti šíření elektromagnetických vln, a ta byla k údivu jeho a jiných fyziků rovna rychlosti světla (která byla v té době již změřena experimentálně).

ELEKTROMAGNETICKÁ VLNA má dvě navzájem neoddělitelné složky: elektrickou, která je popsána vektorem $\vec{E}$, a magnetickou, té odpovídá vektor $\vec{B}$. Oba vektory jsou na sebe kolmé a současně jsou kolmé na směr šíření vlny. Elektromagnetické vlnění je postupné příčné a rovinnou vlnu postupující ve směru osy x lze popsat harmonickými funkcemi;

$$E = E_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = E_m \sin\omega\left(t - \frac{x}{v}\right),$$

$$B = B_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = B_m \sin\omega\left(t - \frac{x}{v}\right),$$ T je perioda, ω úhlová frekvence, v je rychlost šíření vlny, f je frekvence (rovnice postupné vlny, str. 98).

Elektřina a magnetismus před Maxwellem

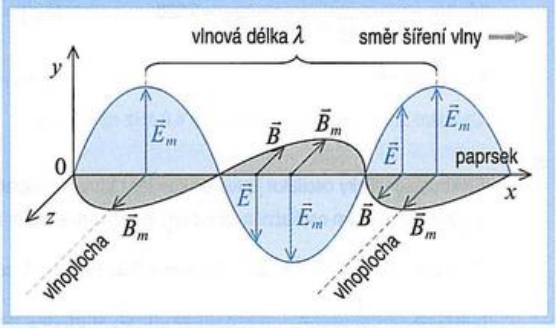
ELEKTRODYNAMIKA zabývající se elektrickými a magnetickými jevy se dlouho podobala mechanice. Zákony a veličiny elektrodynamiky popisující elektrické a magnetické pole byly podobné jako zákony a veličiny gravitačního pole. Zdrojem elektrického a magnetického pole byly elektrické náboje, resp. permanentní magnety, stejně jako zdrojem gravitačního pole byla hmotná tělesa.

Prvním náznakem, že **zdrojem elektrického pole** může být i něco jiného než elektrický náboj, byl objev elektromagnetické indukce. M. Faraday v r. 1831 zjistil, že **elektrické pole** v uzavřené smyčce **může být vytvořené změnou magnetického pole** (str. 129, Faradayův indukční zákon; vztah mezi napětím). Protože se ve fyzice často uplatňuje princip symetrie, geniální skotský fyzik James Clerk Maxwell vyslovil předpoklad, že existuje i opačný jev: **měnící se elektrické pole vytváří pole magnetické** (čtvrtá Maxwellova rovnice).

Z PRVNÍ MAXWELLOVY ROVNICE vyplývá, že zdrojem elektrického pole s neuzavřenými elektrickými siločárami je elektrický náboj. Z DRUHÉ MAXWELLOVY ROVNICE vyplývá, že magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené, tj. nemají začátek ani konec v nějakém „magnetickém náboji". Magnetický náboj tedy neexistuje, což odpovídá zkušenosti, že nelze oddělit severní a jižní pól magnetu od sebe a tak vytvořit magnetický monopól.

Ze TŘETÍ A ČTVRTÉ MAXWELLOVY ROVNICE vyplývá, že elektrické a magnetické pole, jehož zdrojem není elektrický náboj, existuje jen tehdy, když se jak intenzita $\vec{E}$, tak i magnetická indukce $\vec{B}$ neustále mění, přičemž změna intenzity $\vec{E}$ vyvolává vznik indukce $\vec{B}$ a opačně.

ELEKTROMAGNETICKÁ VLNA – Maxwell ze svých rovnic odvodil, že elektromagnetické vlny jsou příčné ke směru šíření a vektor magnetické indukce $\vec{B}$ je kolmý na vektor intenzity $\vec{E}$.



Vlnoplochy rovinné vlny jsou rovnoběžné roviny, lze je pozorovat daleko od zdroje vlnění.

Pro vlnovou délku platí: $\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$, $\omega = 2\pi f$.

RYCHLOST elektromagnetické vlny ve vakuu $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$,

kde ε_0 je permitivita vakua, μ_0 permeabilita vakua.

Rychlost v elektromagnetické vlny v nevodivém homogenním izotropním látkovém prostředí má velikost $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$,

kde ε je permitivita prostředí a μ permeabilita prostředí, ε_r je relativní permitivita prostředí, μ_r relativní permeabilita prostředí.

Další charakteristické vlastnosti elektromagnetického vlnění

POLARIZACE: Směr vektorů $\vec{E}$ a $\vec{B}$ se při šíření elektromagnetické vlny nemění, vektory kmitají v rovinách, které jsou na sebe kolmé. Rovina, v níž kmitá vektor elektrické intenzity $\vec{E}$, se nazývá **ROVINA KMITŮ**. Jestliže se rovina kmitů nemění, vlna je lineárně polarizována.

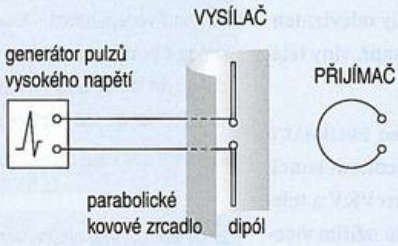
ODRAZ A OHYB VLNĚNÍ: Elektromagnetické vlnění, které dopadá na překážku z vodivého materiálu, se odráží, přičemž platí zákon odrazu vlnění. Při dopadu na hranu překážky se elektromagnetické vlnění šíří i za překážku do prostoru geometrického stínu, tj. projevuje se jeho difrakce (ohýbá se).

INTERFERENCE: Dospějí-li do určitého místa dvě elektromagnetické vlny zároveň, pak spolu interferují, tj. skládají se.

Je-li dráhový rozdíl Δl dvou vln stálý a platí-li $\Delta l = 2k\frac{\lambda}{2}$, pak je amplituda výsledné vlny větší (str. 99). Platí-li $\Delta l = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, pak je amplituda výsledné vlny menší.

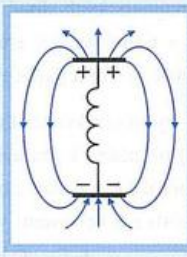
Experimentální důkaz existence elektromagnetického pole

Důsledky Maxwellovy teorie byly natolik revoluční a znepokojující, že Německá akademie věd vypsala v r. 1879 cenu za experimentální ověření teorie. V soutěži zvítězil německý fyzik H. R. Hertz. Vynalezl zdroj a přijímač elektromagnetických vln a v r. 1887 se mu podařilo existenci těchto vln experimentálně prokázat. Jako vysílač použil **DIPÓL**, tedy nejjednodušší LC oscilátor, který byl nabíjen pulzy vysokého napětí. Ve středu byly malé kuličky, mezi kterými po dosažení dostatečné výšky napětí přeskočila jiskra, a po dobu trvání jiskrového výboje se dipól délky 25 cm rozkmital tlumenými kmity o frekvenci přibližně $6 \cdot 10^8$ Hz, přičemž vyzařoval elektromagnetické vlnění. Přijímačem vln byla vodivá smyčka se stejnou frekvencí vlastních kmitů a mezi jejími konci při rezonanci s vysílačem přeskakovaly jiskry.



Ve vakuu je rychlost elektromagnetické vlny $c = 299\,792\,458\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \doteq 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

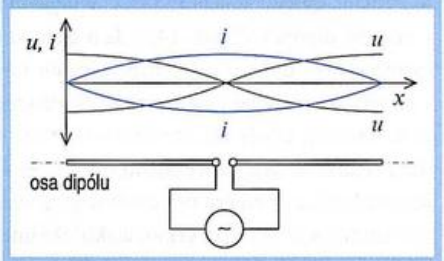
Z hlediska mechanického obrazu světa, který přetrvával v elektrodynamice po celou dobu od Newtona po Maxwella, působily elektrické a magnetické síly stejně jako gravitační okamžitě na dálku a nebylo zřejmé, jakým způsobem je silové působení mezi tělesy, mezi náboji, mezi magnety a elektrickými proudy zprostředkováno. Až objev a experimentální důkaz elektromagnetického pole prokázal, že vzájemné silové působení mezi nabitými tělesy je zprostředkováno tímto polem konečnou rychlostí c (ve vakuu). Toto působení se nazývá **ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE**.



ZDROJEM ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ je např. LC oscilátor s rozevřenými deskami kondenzátoru. Elektrické pole pak může vystupovat do prostoru a obvod vyzařuje elektromagnetické vlny.

Rychlost elektromagnetické vlny c (ve vakuu) a amplitudy elektrického E_m a magnetického pole B_m jsou spojeny vztahem: $\frac{E_m}{B_m} = c$.

DIPÓL je anténa ve tvaru tyče – může být vysílačem i přijímačem elektromagnetických vln.



DIPÓL je jednoduchý oscilační obvod. Konce dipólu se nabíjejí proudem jako desky kondenzátoru a vodivá tyč odpovídá cívce. Průběh napětí a proudu podél dipólu je harmonický a vytváří stojatou vlnu; kmitny napětí u jsou na koncích a kmitna proudu i je ve středu. Vlnová délka vlastních kmitů dipólu $\lambda = 2d$, kde d je délka dipólu, proto se nazývá také **PŮLVLNNÝ DIPÓL**. Pro praktické použití je dipól ve středu rozpojen a na tyto konce se přivádí vysílaný signál.

Přenos signálů elektromagnetickými vlnami

Pro přenos signálů a komunikační účely se využívají elektromagnetické vlny o frekvencích $3 \cdot 10^4$ Hz až $3 \cdot 10^{11}$ Hz, které se nazývají RÁDIOVÉ VLNY, též radiovlny. Komunikace prostřednictvím radiovln se nazývá RADIOKOMUNIKACE.

SIGNÁL je jev nesoucí v sobě informaci, která je odeslána odesílatelem a má být sdělena příjemci. Signálem nazýváme také fyzikální děj (např. kmitání elektrického obvodu), který je formou vlnění přenášen z jednoho místa na druhé (např. z antény vysílače do přijímače apod.).

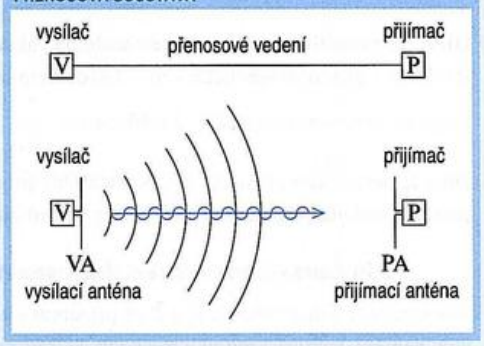
K přenosu signálů z jednoho místa na druhé slouží PŘENOSOVÁ SOUSTAVA. Elektrické, resp. optické signály lze přenášet elektrickým vedením, resp. optickým kabelem. V případě tzv. bezdrátového přenosu signálů je přenosová soustava tvořena vysílačem elektromagnetických vln (V) včetně vysílací antény (VA), prostorem, v němž se šíří elektromagnetické vlny, a přijímačem (P) včetně přijímací antény (PA).

Ve VYSÍLAČI se kmity z vysokofrekvenčního zdroje (např. kmitajícího LC oscilátoru) přenášejí k anténě, ze které je signál vysílán, obvykle pomocí dvouvodičového vedení. Vlnění postupuje konečnou rychlostí c a ve vedení vzniká postupná vlna popsaná rovnicí $u = U_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$, kde u je okamžitá hodnota napětí v čase t ve vzdálenosti x od zdroje kmitů, U_m je amplituda napětí oscilátoru, T je perioda a λ je vlnová délka vlnění, c je rychlost šíření elektromagnetických vln. Při přenosu elektrického signálu dvouvodičovým vedením vzniká mezi vodiči a v jejich blízkém okolí elektromagnetické pole.

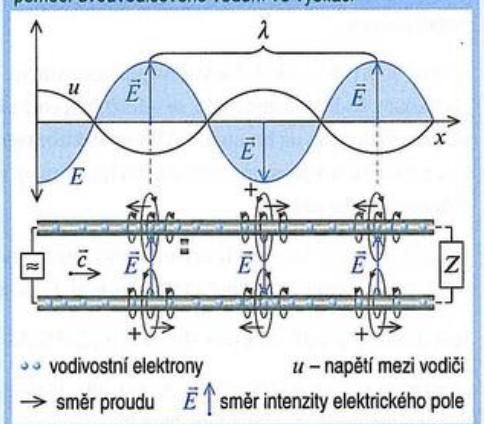
K vysílání signálu slouží ANTÉNA, v nejjednodušším případě v podobě dipólu (str. 143). Je-li délka d dipólu rovna polovině vlnové délky λ vysílaného signálu ($d = \lambda/2$), dipól je v rezonanci a energie vyzařovaného elektromagnetického vlnění je největší. Dipól má SMĚROVÉ ÚČINKY, tj. elektromagnetický signál je nejvíce vyzařován do směrů kolmých k ose dipólu, kdežto ve směru osy dipól nevyzařuje. Dipól vyzařuje POLARIZOVANÉ VLNY, tj. vektor elektrické intenzity $\vec{E}$ kmitá ve směru osy dipólu (str. 143). V ČR jsou vlny v televizním pásmu polarizovány vodorovně, proto jsou dipóly televizních antén orientovány též vodorovně (v Anglii jsou např. vlny televizního vysílání polarizovány svisle).

Pro dlouhé, střední a krátké vlny se používá jako PŘIJÍMACÍ ANTÉNA také drát nebo kovový prut, který je na jednom konci uzemněn (str. 145). Vyšší účinnosti antén pro VKV a televizní pásma elektromagnetických vln se dosahuje užitím vícenásobných dipólů a odrazového zrcadla ve tvaru kovové mříže.

PŘENOSOVÁ SOUSTAVA

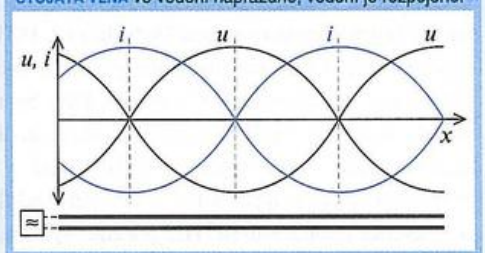


PŘENOS ELEKTRICKÉHO SIGNÁLU
pomocí dvouvodičového vedení ve vysílači



Aby se vlnění neodráželo od konce vedení, musí být jeho energie úplně pohlcena impedancí Z připojenou na konci; pak bude mít proud ve vedení stejnou fázi jako napětí.

STOJATÁ VLNA ve vedení naprázdno, vedení je rozpojeno.



Na konci vedení dochází k odrazu vlnění, které se pak skládá s postupnou vlnou, a ve vedení vzniká stojaté vlnění. Na konci vedení má proud trvale nulovou hodnotu, vzniká tedy uzel proudu, ale kmitna napětí. Fázový rozdíl mezi napětím a proudem je $\frac{\pi}{2}$.

DIPÓL sloužící jako anténa se nazývá také ELEKTROMAGNETICKÝ DIPÓL. Používá se jako vysílací i přijímací anténa.

Na fokusaci vln směrem k anténě se používají parabolická kovová zrcadla, zejména u vln s vlnovou délkou decimetry až centimetry.

Radiokomunikace

RADIOKOMUNIKAČNÍ SOUSTAVA je přenosová soustava uzpůsobená pro přenos informací.

Ve **VYSÍLAČI** se nízkofrekvenčním (nf) signálem (hudba, mluvené slovo) moduluje v modulátoru M vysokofrekvenční signál (vf) přicházející z oscilátoru O. Modulovaný vysokofrekvenční signál se zesílí v koncovém zesilovači K a vysílací anténou A je vyzářen do prostoru.

V praxi se používají tři hlavní druhy modulace:

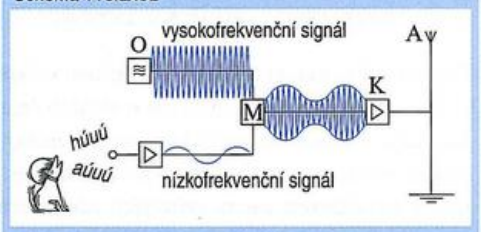
- **AMPLITUDOVÁ MODULACE** (AM) pro dlouhé, střední a krátké vlny a také pro obrazový signál televizního vysílání; nízkofrekvenčním signálem (nf) se mění amplituda vysokofrekvenčního signálu (vf);
- **FREKVENČNÍ MODULACE** (FM) pro VKV, audiosignál televize, signál mobilních telefonů; nízkofrekvenčním signálem se mění frekvence vysokofrekvenčního signálu;
- **IMPULZNÍ MODULACE** je modulace vysokofrekvenčního signálu digitálním signálem (sledem impulzů 0, 1). Převod akustického signálu do digitální formy se používá u mobilních telefonů v síti GSM.

V rozhlasovém nebo televizním **PŘIJÍMAČI** je vstupní částí přijímací anténa (A), která zachytává elektromagnetická vlnění všech frekvencí. Ladicí obvod (LO) vybere jednu z nich a získaný vysokofrekvenční signál je zesílen vysokofrekvenčním zesilovačem (VF). Pak je demodulován demodulátorem (D), tj. nízkofrekvenční signál se oddělí od vysokofrekvenčního (např. usměrněním). K nízkofrekvenčnímu zesilovači (NF) postupuje jen signál nízkofrekvenční, který v sobě nese žádanou informaci (např. akustický signál, obrazový signál).

ŠÍŘENÍ RÁDIOVÝCH VLN – vlnový charakter rádiových vln se projevuje ohybem vlnění podél zemského povrchu u dlouhých a středních vln, takže příjem je možný i v členitém terénu. Příjem krátkých vln je možný na dlouhé vzdálenosti prostřednictvím odrazu od ionosféry. Pro příjem velmi krátkých vln (VKV) a televize je potřebná přímá viditelnost mezi přijímačem a vysílačem, jejich signál proniká i do budov, pokud není odstíněn vodivou konstrukcí. Platí to také pro příjem signálu mobilních telefonů.

Odraz vlnění využívají radary, jejich vysílané impulzy se odrážejí od kovových ploch a jsou anténou radaru zachyceny.

Schéma **VYSÍLAČE**



O – zdroj kmitů vysoké frekvence, M – modulátor, K – koncový zesilovač, A – anténa.

AMPLITUDOVÁ (AM) a **FREKVENČNÍ** (FM) **MODULACE**

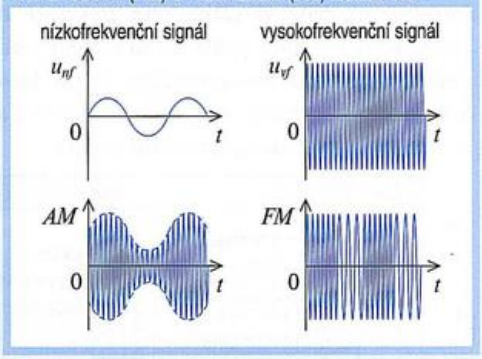
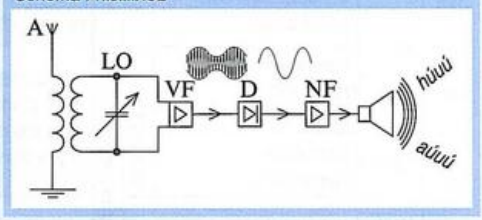


Schéma **PŘIJÍMAČE**



PŘEHLED RADIOKOMUNIKAČNÍCH PÁSEM		
Radiokomunikační pásmo	Frekvence f, MHz	Vlnová délka λ, metry
dlouhé vlny	0,149–0,284	2 000–1 060
střední vlny	0,526–1,606	570–186
krátké vlny	3,95–26,1	75,9–11,5
I. televizní pásmo	41–68	7,3–4,4
VKV rozhlas	86–108	3,5–2,8
III. televizní pásmo	174–230	1,72–1,30
IV. a V. tel. pásmo	470–790	0,64–0,38
mobilní telefony	900 a 1 800	0,33 a 0,167
satelitní vysílání	řádově 10 GHz	≈ 3 cm

Platí: $\lambda = c/f$; $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m/s

5.6 Elektromagnetické záření

Zabýváme-li se elektromagnetickým vlněním v souvislosti se zdroji, které ho vyzařují, mluvíme o různých druzích záření, např. o záření rádiovém, které vysílají antény a jiné rádiové zdroje, tepelném záření rozžhavených těles, světelném a ultrafialovém záření světelných zdrojů, rentgenovém záření vznikajícím při dopadu rychlých elektronů na kovové povrchy, radioaktivním záření apod. Všechny druhy elektromagnetického vlnění vyzařované různými zdroji nazýváme souhrnně ELEKTROMAGNETICKÝM ZÁŘENÍM. Podle vlnové délky ve vakuu, resp. frekvence elektromagnetického vlnění a podle zdrojů záření rozlišujeme několik druhů elektromagnetického záření, které spolu vytvářejí SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ. Spektrum obsahuje tyto druhy záření:

	λ [m]	druh záření			zdroj	
km	10^2	dlouhé, střední, krátké	rozhlasové vlny	rádiové záření	elektrická zařízení	elektromagnetické oscilátory
m	1	VKV, UHV	televizní a rozhlasové vlny			
mm	10^{-2}	mikrovlny (mobilní telefony, radar, satelitní přenosy)				elektrické oscilátory (klystrony, magnetrony)
	10^{-4}	infračervené záření (IR)		optické záření	elektrická zařízení	tělesa s teplotou $T > 0$ K, rozžhavená tělesa, výboje v plynech
µm	10^{-6}	světlo				
nm	10^{-8}	ultrafialové záření (UV)				
	10^{-10}	rentgenové záření (RTG)				rentgenové lampy
	10^{-12}					
	10^{-14}	záření gama (γ-záření)			jádra atomů	radioaktivní nuklidy, anihilace

Rádiové záření

RÁDIOVÉ ZÁŘENÍ je elektromagnetické vlnění, které má vlnovou délku v rozmezí 10^4-10^{-3} m. Nejčastějším zdrojem rádiového záření je elektromagnetický oscilátor, u mikrovln speciální mikrovlnné generátory (klystrony, magnetrony). Rádiové záření se používá k přenosu rozhlasového a televizního signálu, k radiokomunikaci pomocí vysílaček, k přenosu signálu mobilních telefonů. Mikrovlny se používají pro směrové spoje (retranslace mezi pozemními stanicemi), pro satelitní přenosy, v radarové technice pro radiolokaci, v mikrovlnných troubách apod.

Osnova kapitoly:

- Spektrum elektromagnetického záření
- Rádiové záření, infračervené záření, světlo, ultrafialové záření, luminiscence; rentgenové a gama záření
- Přenos energie elektromagnetickým vlněním, fotometrie
- Elektromagnetické záření látek, spektra látek
- Záření černého tělesa, Planckův zákon

Od ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ nutno odlišit ZÁŘENÍ ČÁSTICOVÉ, např. radioaktivní záření alfa (alfa-částice) a beta (elektrony) vyzařované jádry atomů, neutronové záření v reaktorech, katodové záření apod.

SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ		
druh záření	frekvence f [Hz]	λ [m]
rádiové záření:	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^{11}$	$10^4 - 10^{-1}$
– dlouhé vlny (DV)	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	$10^4 - 10^3$
– střední vlny (SV)	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	$10^3 - 10^2$
– krátké vlny (KV)	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	$10^2 - 10$
– VKV (VHF)	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$	$10 - 1$
– mikrovlny (UHF)	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$	$1 - 10^{-1}$
– mikrovlny (SHF)	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$
druh záření	frekvence f [Hz]	λ [nm]
optické záření:	$3{,}0 \cdot 10^{11} - 3{,}9 \cdot 10^{17}$	$10^6 - 1$
– infračervené záření	$3{,}0 \cdot 10^{11} - 3{,}9 \cdot 10^{14}$	$10^6 - 760$
– světlo	$3{,}9 \cdot 10^{14} - 7{,}9 \cdot 10^{14}$	$760 - 380$
– ultrafialové záření	$7{,}9 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	$380 - 1$
rentgenové záření	$6 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$	$5 - 10^{-3}$
záření gama	$3 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{22}$	$10^{-2} - 10^{-5}$

VKV – velmi krátké vlny pro rozhlasové a televizní vysílání; VHF – very high frequency, UHF – ultra high frequency, SHF – super high frequency.

Vlnová délka $\lambda = c/f$; $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m/s

Výše uvedené dělení je pouze orientační, mezi jednotlivými typy záření neexistuje pevná hranice, proto se mohou i částečně překrývat. Stejně tak nejsou pevné hranice pro označení jednotlivých typů; někdy se pod mikrovlny zařazují také ultrakrátké vlny (UHF), někdy ne. Hranice mezi SHF a IR také není přesná.

RADAR je elektronické zařízení pro zjišťování a zaměřování polohy pozemních a vzdušných objektů. Princip radiolokace je založen na přímočarém šíření mikrovln a jejich odrazu od vodivých překážek.

Radary slouží nejen pro zjišťování polohy letadel a lodí, ale také mraků v meteorologii apod.

RÁDIOVÉ VLNY lze dále dělit na:

- DLOUHÉ VLNY (DV) s vlnovou délkou λ nad 1 000 m,
- STŘEDNÍ VLNY (SV) s λ v rozmezí 100 m – 1000 m,
- KRÁTKÉ VLNY (KV) s λ v rozmezí 10 m – 100 m,
- VELMI KRÁTKÉ VLNY (VKV) s λ v rozmezí 10 m – 1 m,
- ULTRA KRÁTKÉ VLNY (UHF) s λ v rozmezí 1 m – 10 cm,
- MIKROVLNY (SHF) s vlnovou délkou mezi 10 cm – 1 mm.

Optické záření

OPTICKÉ ZÁŘENÍ je elektromagnetické záření s vlnovými délkami v rozmezí přibližně 1 mm až 1 nm (10^{-3} m až 10^{-9} m). V této oblasti vlnových délek se uplatňují zákony optiky (např. zákony odrazu, lomu atd.). Rozděluje se na tři druhy záření: INFRAČERVENÉ záření, VIDITELNÉ záření (světlo) a ULTRAFIALOVÉ záření.

Optické záření vyzařují všechna tělesa s termodynamickou teplotou vyšší, než je absolutní nula, zvláště pak zahřátá tělesa. Spektrum záření je spojité, čárové nebo pásové (str. 150). Záření se spojitým spektrem má největší intenzitu při vlnové délce λ_{max} (str.151, Wienův posunovací zákon), přičemž λ_{max} se s rostoucí teplotou tělesa posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám (vyšším frekvencím).

INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ (IR) je elektromagnetické záření, které má vlnové délky v rozmezí 10^{-3} m–760 nm. Frekvence leží pod frekvencí červeného světla, proto infračervené (infra znamená „pod", IR je zkratka podle „infrared radiation").

SVĚTLO je elektromagnetické záření o vlnových délkách 380 nm až 760 nm, tj. zaujímá jen úzkou oblast ve spektru elektromagnetického záření viditelnou lidským okem. Zdrojem světla jsou tělesa zahřátá na teplotu vyšší než přibližně 525 °C, elektrické výboje v plynech (str. 121), luminiscence. Zdrojem monochromatického světla jsou lasery (str. 191).

ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ (UV) je záření s vlnovou délkou kratší než fialové světlo a delší než 1 nm, tj. v rozmezí 380 nm – 1 nm. Frekvence leží nad frekvencí fialového světla, proto ultrafialové (ultra znamená „nad"). Ultrafialové záření má zkratku UV podle anglického názvu „ultraviolet". Zdrojem UV záření jsou tělesa zahřátá na velmi vysokou teplotu (např. Slunce, obloukový výboj) nebo speciální výbojky naplněné párami rtuti.

Ultrafialové záření je pohlcováno obyčejným sklem, proto se UV výbojky zhotovují ze skla křemenného. Sluneční UV záření je částečně pohlcováno v horních vrstvách atmosféry ozonovou vrstvou (str. 209), která tím chrání život na Zemi před jeho škodlivými účinky.

RADAR, též RADIOLOKÁTOR, vysílá vlny o vlnových délkách 1 až 50 cm v krátkých impulzech a měří dobu t, která uplynula od vyslání impulzu. Vzdálenost objektu l je dána vztahem $l = \frac{1}{2} c \cdot t$, kde c je rychlost světla. Rychlost objektu se určuje na základě Dopplerova jevu.

Přenos hovorů v síti mobilních telefonů se uskutečňuje na frekvencích 900 MHz a 1 800 MHz.

INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ se pro své tepelné účinky nazývá též TEPELNÝM ZÁŘENÍM – ozařované těleso se zahřívá. Infračervené záření je vyzařováno všemi předměty o teplotě vyšší, než je absolutní nula (str. 151). Pro praktické účely se využívá tepelné záření, jež je vyzařováno tepelnými zdroji, např. infrazářiči používanými k topení. Pro infračervené záření platí stejné optické zákony (odrazu, lomu atd.) jako pro světlo. Infračervené dalekohledy slouží k „vidění" ve tmě – rozlišují lidi, zvířata a zahřátá tělesa od chladnějšího pozadí.

Zdrojem světla v žárovce jsou excitované atomy (str. 150, 185) wolframového vlákna zahřátého na vysokou teplotu (nad 1 300 °C).

(FOTO)LUMINISCENCE je jev, při němž záření o kratší vlnové délce, dopadající na vrstvu látky nazývané LUMINOFOR vyvolává vznik záření o delší vlnové délce. Např. zdrojem světla zářivky není přímo elektrický výboj v trubici zářivky. Výboj je zdrojem UV záření, které dopadá na vnitřní stěnu zářivky pokryté luminiscenční vrstvou. Tato vrstva při dopadu UV záření vydává viditelné světlo. LUMINISCENCE je proces, kdy látka vyzařuje světlo v důsledku jiné než tepelné excitace atomů (str. 185). Kromě fotoluminiscence známe např. radioluminiscenci vyvolanou katodovým zářením, bioluminiscenci světlušek atd.

ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ je příčinou vzniku pigmentu v lidské kůži (projevuje se to zhnědnutím) a podporuje vznik vitamínu D.
UV záření, především záření o krátkých vlnových délkách, rozkládá organické molekuly. Ničí mikroorganismy, a proto se používá pro sterilizaci velkých předmětů a prostor. Též vzduch na horách, u moře, na poušti, kde je dostatek slunce, obsahuje méně mikrobů a virů. UV záření poškozuje buňky vyšších organismů. Velké dávky způsobují vznik rakoviny kůže a poškozují oči.

Rentgenové záření

RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ (RTG záření) je elektromagnetické záření, jehož vlnové délky leží v intervalu přibližně $5 \cdot 10^{-9}$ m až 10^{-12} m (5 nm až 10^{-3} nm). Vzniká při dopadu rychlých elektronů na kovovou elektrodu, přičemž se jejich energie mění na energii vyzařovaných elektromagnetických vln.

Podle vlnové délky lze rentgenové záření dělit na:

- MĚKKÉ s delšími vlnovými délkami neboli BRZDNÉ RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ, které vzniká při brzdění pohybu elektronů dopadajících velkou rychlostí na povrch kovu, vyzařují ho elektrony narážející na atomy, jeho spektrum je spojité;
- TVRDÉ, které má kratší vlnové délky a jeho vlastnosti jsou podobné γ-záření. Nazývá se také CHARAKTERISTICKÉ RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ, vyzařují ho excitované (vzbuzené) atomy kovu, které získaly energii díky dopadajícím elektronům. Spektrum charakteristického záření je čárové.

Rentgenové záření proniká látkami a je v nich částečně absorbováno (pohlcováno), přičemž prvky s vyšším atomovým číslem pohlcují rentgenové záření lépe.

Záření gama (γ-záření)

Záření gama je elektromagnetické záření s vlnovou délkou menší než 10^{-11} m. Je součástí radioaktivního záření, které emitují (vysílají) atomová jádra při radioaktivních přeměnách, vzniká také při jaderných reakcích a anihilaci částic.

Přenos energie elektromagnetickým vlněním

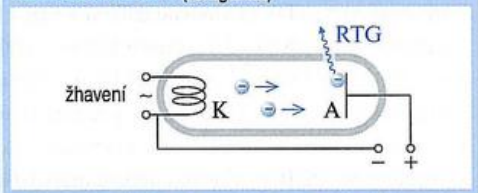
ZÁŘIVÝ TOK Φ_e je výkon vysílaný zdrojem, přenášený v prostoru nebo předávaný tělesu jako elektromagnetické záření, tj. $\Phi_e = \frac{E_{elmg}}{\Delta t}$, kde E_{elmg} je energie elektromagnetického vlnění vyzářená zdrojem, přenesená prostorem nebo dopadající na těleso za čas Δt.

ZÁŘIVÝ VÝKON je celkový zářivý tok vyzařovaný zdrojem záření (kupř. hvězdou). Používá se v astrofyzice (str. 214).

INTENZITA ZÁŘENÍ (VYZAŘOVÁNÍ) plošného zdroje M_e je definována jako $M_e = \frac{\Phi_e}{S}$, kde Φ_e je zářivý tok elektromagnetického vlnění vysílaný do prostoru povrchem plošného zdroje o ploše S. Intenzita záření M_e je rovna množství energie vyzářené jednotkou plochy povrchu zdroje za jednu sekundu.

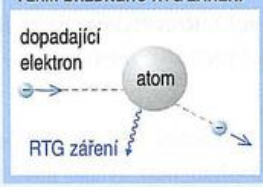
INTENZITA OZAŘOVÁNÍ E_e je definována vztahem $E_e = \frac{\Phi_e}{S}$, kde Φ_e je zářivý tok elektromagnetického vlnění dopadající na plochu tělesa o velikosti S.

RENTGENOVÁ LAMPA (rentgenka)



Elektrony vylétající ze žhavené katody jsou urychlovány potenciálovým rozdílem (10 až 400 kV mezi katodou K a anodou A) a dopadají na anodu.

Vznik BRZDNÉHO RTG ZÁŘENÍ



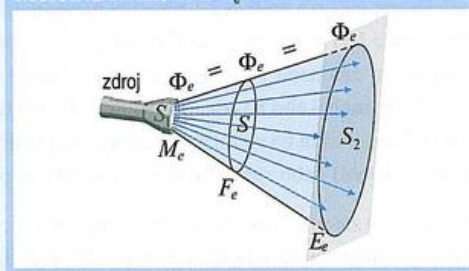
Elektron se srazí s atomem katody, ztrácí část své energie, a ta se přemění na foton elektromagnetického záření.

Kosti mající převahu vápníku (Ca) pohlcují RTG záření více než svaly a tkáně (převážně H_2O). Kosti se pak jeví na rentgenovém snímku světlejší.

Krystaly se vzhledem k rentgenovému záření chovají jako difrakční mřížka vzhledem ke světlu (str. 158). Z ohybových obrazců, které vzniknou po průchodu RTG záření krystalem, se zkoumá uspořádání atomů v krystalu a také se studují rentgenová spektra.

JEDNOTKOU ZÁŘIVÉHO TOKU je watt (W).
JEDNOTKOU ZÁŘIVÉHO VÝKONU je watt (W).
JEDNOTKOU INTENZITY ZÁŘENÍ (VYZAŘOVÁNÍ) a INTENZITY OZAŘOVÁNÍ je watt na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$).

INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ M_e, INTENZITA OZAŘOVÁNÍ E_e, HUSTOTA ZÁŘIVÉHO TOKU F_e



Plochami S_1, S a S_2 prochází stejný zářivý tok Φ_e. Protože je $S_1 < S < S_2$, platí

$$M_e = \frac{\Phi_e}{S_1} > F_e = \frac{\Phi_e}{S} > E_e = \frac{\Phi_e}{S_2}.$$

HUSTOTA ZÁŘIVÉHO TOKU $F_e = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{E_{elmg}}{S \cdot \Delta t}$, kde E_{elmg} je energie, kterou elektromagnetické vlnění přenese plochou S za čas Δt ve směru kolmém na plochu.

F_e je tok energie (tj. množství energie), kterou elektromagnetické vlnění přenáší jednotkovou plochou kolmou na směr šíření vlnění za jednu sekundu. Vztah platí za předpokladu, že tok energie je konstantní, resp. pro $\Delta t \to 0$.

ZDROJ ZÁŘENÍ je objekt, který vysílá elektromagnetické záření. Rozlišujeme **BODOVÉ ZDROJE** záření, jejichž plošnou velikost lze zanedbat, a **PLOŠNÉ ZDROJE** záření.

ZÁŘIVOST bodového zdroje, též **INTENZITA ZÁŘENÍ** I_e, je definována vztahem $I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$, kde Φ_e je zářivý tok, jenž vychází ze zdroje v daném směru do prostorového úhlu Ω.

INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ L_e malého plošného zdroje do jednotkového prostorového úhlu je dána vztahem $L_e = \frac{\Phi_e}{S \cdot \Omega}$, kde Φ_e je zářivý tok vyzařovaný do prostorového úhlu Ω povrchem plošného zdroje o ploše S.

SPEKTRÁLNÍ INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ (ZÁŘENÍ) H_λ plošného zdroje do jednotkového prostorového úhlu je dána vztahem $H_\lambda = \frac{\Delta L_e}{\Delta \lambda}$.

Fotometrie

FOTOMETRIE se zabývá měřením energie přenášené optickým zářením a jeho detekcí především z hlediska účinků záření na zrak. **FOTOMETRICKÉ VELIČINY** charakterizují přenos energie optického záření a jeho účinek na zrak.

SVĚTELNÝ TOK Φ_v charakterizuje intenzitu zrakového vjemu normálního oka vyvolaného zářivým tokem Φ_e.

SVÍTIVOST I_v bodového zdroje je definována jako $I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega}$, kde Φ_v je světelný tok, který zdroj vysílá do prostorového úhlu Ω. Pro svítivost se používá též symbol I.

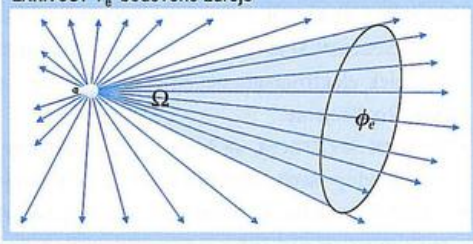
OSVĚTLENÍ E_v plochy S, na kterou dopadá světelný tok Φ_v, je definováno vztahem $E_v = \frac{\Phi_v}{S}$.

Je-li zářivý výkon světelného zdroje Φ_e a jeho celkový světelný tok Φ_v, pak **SVĚTELNÁ ÚČINNOST** zdroje je definována jako podíl $\frac{\Phi_v}{\Phi_e}$ v $lm \cdot W^{-1}$ (v lumenech na watt).

Jednotkou **HUSTOTY ZÁŘIVÉHO TOKU** je watt na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$).

Pro hustotu zářivého toku F_e vyplývá z Maxwellovy teorie vztah: $F_e = \frac{1}{2\mu_0} E_m B_m$, kde E_m, B_m jsou amplitudy elektromagnetické vlny (str. 142) a μ_0 je permeabilita vakua. Dosadíme-li za $B_m = \frac{E_m}{c}$ (str. 143), obdržíme vztah: $F_e = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c}$, tedy energie přenášená elektromagnetickým zářením je tím větší, čím je větší amplituda elektromagnetické vlny.

ZÁŘIVOST I_e bodového zdroje



JEDNOTKOU INTENZITY ZÁŘENÍ I_e (zářivosti zdroje) je watt na steradián ($W \cdot sr^{-1}$).
JEDNOTKOU INTENZITY VYZAŘOVÁNÍ L_e je $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.
JEDNOTKOU SPEKTRÁLNÍ INTENZITY VYZAŘOVÁNÍ H_λ je $W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1}$.

JEDNOTKOU SVĚTELNÉHO TOKU je **LUMEN** (lm). Světelný tok 1 lumen je vyzařován všesměrovým zdrojem o svítivosti 1 kandela do prostorového úhlu 1 steradián, $1\ lm = 1\ cd \cdot sr$.

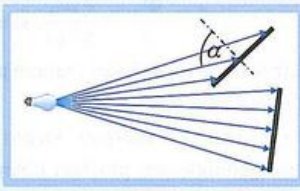
JEDNOTKOU SVÍTIVOSTI je **KANDELA** (cd). Jedna kandela je svítivost zdroje, který vysílá monochromatické záření o frekvenci $5{,}4 \cdot 10^{14}$ Hz (vlnová délka 555 nm ve vakuu) a jehož zářivost je $1/683\ W \cdot sr^{-1}$ (wattů na steradián). Kandela patří mezi základní jednotky soustavy SI.

JEDNOTKOU OSVĚTLENÍ i **HUSTOTY SVĚTELNÉHO TOKU** je **LUX** (lx). Jeden lux je osvětlení plochy o velikosti $1\ m^2$, na kterou dopadá světelný tok 1 lumen; $1\ lx = 1\ lm \cdot m^{-2}$. Osvětlení měříme **LUXMETREM** (využívá se fotoefekt).

Z definice lumenu a kandely vyplývá, že maximální hodnota světelné účinnosti může být $683\ lm \cdot W^{-1}$. Světelná účinnost stowatové žárovky je $17\ lm \cdot W^{-1}$ a 23watové fluorescenční žárovky $74\ lm \cdot W^{-1}$.

Pro OSVĚTLENÍ E dané plochy světlem z bodového zdroje o svítivosti I platí vztah $E = \frac{I \cos\alpha}{r^2}$, kde r je vzdálenost plochy od zdroje, α je úhel dopadu světla na plochu.

OSVIT (EXPOZICE) H je definován vztahem $H = \overline{E} \cdot \Delta t$, kde $\overline{E}$ je střední hodnota osvětlení po dobu Δt, po kterou je fotografický film osvětlen.



OSVĚTLENÍ plochy závisí na úhlu dopadu světla α.

JEDNOTKOU OSVITU je **LUXSEKUNDA** (lux · s), je to osvětlení plochy 1 m^2 1 lumenem po dobu 1 s.

Elektromagnetické záření látek

Na rozdíl od rádiových vln, které jsou vyzařované elektrickými zařízeními, optické a rentgenové záření vysílají molekuly a atomy (při přechodech z vyšších energetických hladin na nižší). Toto záření lze nazvat ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ LÁTEK.

EMISNÍ SPEKTRUM je tvořené souborem frekvencí, resp. vlnových délek elektromagnetického vlnění, které daná látka vyzařuje. Rozlišujeme:

- SPOJITÉ SPEKTRUM, ve kterém jsou obsaženy elektromagnetické vlny všech vlnových délek (z určitého intervalu),
- ČÁROVÉ SPEKTRUM obsahující jen některé vlnové délky, tzv. SPEKTRÁLNÍ ČÁRY,
- PÁSOVÉ SPEKTRUM, které je tvořené velkým množstvím spektrálních čar ležících v těsné blízkosti (někdy téměř nerozlišitelných), jeho zdrojem jsou vyzařující molekuly.

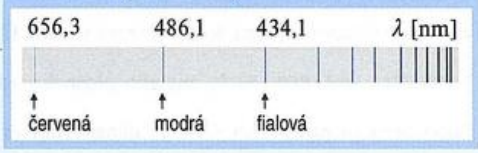
ČÁROVÉ SPEKTRUM vyzařují plyny a páry prvků při vysokých teplotách, např. při elektrickém výboji. Elektrony v atomech, které díky vysoké teplotě látky získají energii, přeskočí na vyšší energetické hladiny (tj. atomy jsou EXCITOVÁNY) a při přechodech z vyšších energetických hladin zpět na nižší jsou vyzařovány elektromagnetické vlny (fotony).

SPEKTRÁLNÍ ČÁRY jsou charakteristické pro každý prvek. Analýzou čárových spekter lze přesně stanovit chemické složení látek. Toho se využívá při SPEKTRÁLNÍ ANALÝZE.

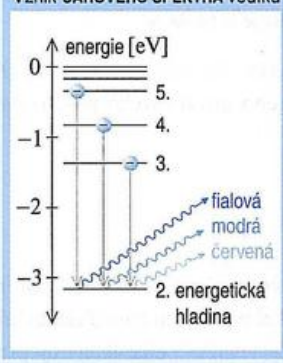
SPOJITÉ SPEKTRUM vyzařují pevné látky a kapaliny, jeho příčinou je vzbuzení (excitace) kmitajících molekul na vyšší energetické hladiny a jejich přechody na hladiny nižší, přičemž se vyzáří elektromagnetická vlna (foton). Čím je teplota látky vyšší, tím vyšších energetických hladin dosahují kmitající molekuly při excitaci a tím vyšší je energie a frekvence vyzářených fotonů při přechodech molekul na nižší hladiny.

ABSORPČNÍ SPEKTRUM je tvořeno souborem temných čar (tzv. absorpčních čar), popř. pásů s různými vlnovými délkami ve spojitém spektru, které vznikají při průchodu světla látkou (např. plynem) jako důsledek pohlcování záření atomy a molekulami. Ty čáry, které prvek vyzařuje v emisním čárovém spektru, odpovídají pohlceným čarám v absorpčním spektru.

ČÁROVÉ SPEKTRUM vzniká rozkladem optického záření v spektroskopu (str. 155) na jednotlivé vlnové délky, které pak na grafickém záznamu vytvářejí **SPEKTRÁLNÍ ČÁRY**. Na obrázku jsou spektrální čáry Balmerovy série atomu vodíku (str. 184).



Vznik **ČÁROVÉHO SPEKTRA** vodíku



Elektron v atomu při přeskoku ze 3. na 2. hladinu vyzáří foton o vlnové délce 656,3 nm, při přeskoku ze 4. na 2. hladinu vyzáří foton o vlnové délce 486,1 nm atd. (str. 184, 185).

Energie elektromagnetických vln (fotonů) je úměrná jejich frekvenci (str. 151) a nepřímo úměrná vlnové délce.

V bílém světle jsou obsaženy elektromagnetické vlny všech vlnových délek viditelného světla, tvoří tedy **SPOJITÉ SPEKTRUM**.

Velký význam pro studium Slunce a horních vrstev zemské atmosféry mají absorpční čáry vzniklé ve slunečním spektru při průchodu plynným obalem Slunce a ovzduším Země. Tyto čáry známe pod jménem FRAUNHOFEROVY ČÁRY, odpovídají spektrálním čarám prvků v obalu Slunce a atmosféře Země.

Přechod od emisního spektra k absorpčnímu se nazývá OBRÁCENÍM SPEKTRA.

Záření černého tělesa

TEPELNÉ ZÁŘENÍ je optické záření emitované (vysílané) látkou v důsledku **TEPELNÉ EXCITACE** atomů (str. 185), při které atomy zahřívané látky srážkami získávají vyšší energii, a tu pak vyzařují ve formě elektromagnetického záření.

KIRCHHOFFŮV ZÁKON VYZAŘOVÁNÍ říká, že zářivost tělesa při dané frekvenci záření je úměrná jeho absorpční schopnosti, tj. schopnosti pohlcovat záření této frekvence. Spojité spektrum, které vyzařují reálná tělesa, nezávisí tedy jenom na jejich teplotě, ale také na dalších vlastnostech, např. na jejich absorpční schopnosti. Proto se k popisu vyzařování těles zavádí fyzikální model, tzv. **ČERNÉ TĚLESO**, které dokonale pohlcuje veškeré dopadající elektromagnetické záření. Vyzařování černého tělesa pak závisí jen na jeho termodynamické teplotě.

Pro vyzařování černého tělesa platí následující zákony:

- **STEFAN-BOLTZMANNŮV ZÁKON**
  Intenzita vyzařování černého tělesa M_e je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty T černého tělesa, tj. $M_e = \sigma T^4$, kde $\sigma = 5{,}6705 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$. Konstanta σ se nazývá Stefan-Boltzmannova konstanta.
- **WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON**
  Maximum spektrální intenzity vyzařování připadá na vlnovou délku λ_{max}, která se s rostoucí termodynamickou teplotou T posouvá ke kratším vlnovým délkám, tj. $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$, kde $b = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}$.
- **PLANCKŮV ZÁKON**
  Spektrální intenzita vyzařování H_λ povrchu černého tělesa o termodynamické teplotě T je dána vztahem:
  $$H_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1},$$ kde k je Boltzmannova konstanta, c je rychlost světla, λ vlnová délka a h je Planckova konstanta, $h = 6{,}626\,075 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$.

ENERGIE FOTONU je rovna součinu $h \cdot f$ a je to nejmenší kvantum energie, které může látka vyzářit nebo pohltit jako elektromagnetické vlnění o frekvenci f.

Př. 1

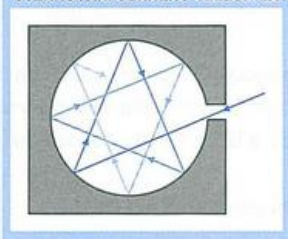
Slunce vyzařuje maximum energie zářením o vlnové délce přibližně $\lambda_{max} = 500\ \mathrm{nm} = 5 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$. Urči povrchovou teplotu Slunce za předpokladu, že Slunce září jako černé těleso.

$\lambda_{max} = 500\ \mathrm{nm} = 5 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$; $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}$; $T = ?$

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \Rightarrow T = \frac{b}{\lambda_{max}}; \{T\} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} = 5\,800$$

Povrchová teplota Slunce je asi 5 800 K.

VYZAŘOVÁNÍ ČERNÉHO TĚLESA lze nejlépe realizovat



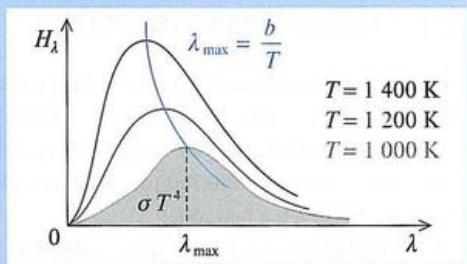
pomocí malého otvoru v dutině, jejíž vnitřní povrch tvoří matná černá plocha (černá pohlcuje nejlépe). Záření, které dopadá dovnitř malým otvorem, se po opakovaných odrazech pohltí. Otvor dutiny pak vyzařuje záření stejně jako černé těleso.

Pohlcení dopadajícího záření pozorujeme u otevřených oken, díváme-li se na ně z ulice.

Závislost spektrální intenzity vyzařování černého tělesa H_λ na teplotě T a vlnové délce λ byla dlouho známa na základě experimentů. Všechny pokusy o teoretické odvození funkce $H_\lambda(\lambda, T)$, které vycházely jenom z klasické fyziky, byly neúspěšné. Až v r. 1900 se Maxu Planckovi podařilo na základě **KVANTOVÉ HYPOTÉZY** (odporující klasické fyzice), že energie elektromagnetického záření je vyzařována nebo pohlcována nespojitě – v kvantech (fotonech), odvodit správný vztah, který odpovídal experimentálním křivkám.

PLANCKŮV ZÁKON

Závislost spektrální intenzity vyzařování černého tělesa H_λ na vlnové délce λ:



Maximum vyzařování λ_{max} se s rostoucí teplotou posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám (k vyšším frekvencím). Souhlasí to se známou zkušeností, že tělesa vysílají při zvyšování teploty nejprve infračervené záření, pak začínají svítit při teplotě asi 525 °C tmavorudou barvou. Se stoupající teplotou přechází barva žhavého tělesa od červené ke žluté a při teplotě asi 1 300 °C do bílé. Obsah šedé plochy je roven σT^4.

Není náhodou, že lidské oko nejlépe vnímá světlo o vlnové délce, která odpovídá maximu vyzařování Slunce.

6.0 Optika

OPTIKA se zabývá optickým zářením (především světlem), zákonitostmi jeho šíření a fyzikálními ději při vzájemné interakci optického záření a látky. Optiku lze dělit na:

- vlnovou optiku,
- paprskovou neboli geometrickou optiku,
- kvantovou optiku.

VLNOVÁ OPTIKA studuje šíření optického záření (především světla), přičemž vychází z jeho vlnové podstaty jako elektromagnetického vlnění. Zabývá se typicky vlnovými jevy, jako jsou interference a difrakce (ohyb) světla, ale také odrazem, lomem a disperzí z vlnového hlediska.

PAPRSKOVÁ OPTIKA vychází z jednoduchého modelu světla jako svazku paprsků. Paprsky se šíří v homogenním izotropním optickém prostředí přímočaře, navzájem se neovlivňují a na rozhraní prostředí se odrážejí a lámou podle zákonů odrazu a lomu.

KVANTOVÁ OPTIKA se zabývá kvantovými vlastnostmi optického záření, které se projevují především při interakci světla a optického záření s látkou, tj. při vyzařování a pohlcování světla. Při těchto fyzikálních dějích se energie optického záření vyzařuje nebo pohlcuje nespojitě – v kvantech. Optické záření má nejen vlnový, ale také částicový charakter, je tvořeno fotony, jež mají hybnost a energii.

Osnova kapitoly:

- Optika, vlnová, paprsková a kvantová optika
- Vlnové vlastnosti světla, optická prostředí
- Odraz a lom světla, zákon odrazu a lomu
- Disperze, spektroskop, spektrální analýza
- Interference, difrakce (ohyb světla)
- Polarizace

Víte, že paprsková optika je jednou z nejstarších oblastí fyziky a původně byla součástí geometrie? Již Eukleides ve 3. století př. n. l. formuloval zákon odrazu světla a Ptolemaios se zabýval lomem světla kolem r. 140.

PAPRSKOVÁ OPTIKA se nazývá také geometrickou optikou. Její součástí je **ZOBRAZOVACÍ OPTIKA**, zabývající se praktickým využitím teoretických poznatků při konstrukci zařízení sloužících k vytváření a přenosu optického obrazu.

KVANTOVÁ OPTIKA neboli **KVANTOVÁ TEORIE ZÁŘENÍ** vznikla jako odezva na neschopnost klasické fyziky vysvětlit a teoreticky zdůvodnit záření černého tělesa (str. 151), spektra prvků (str. 150), fotoefekt (str. 177), tedy jevy projevující se při interakci záření s látkou, a tím se podílela na vzniku kvantové fyziky.

6.1 Vlnové vlastnosti světla

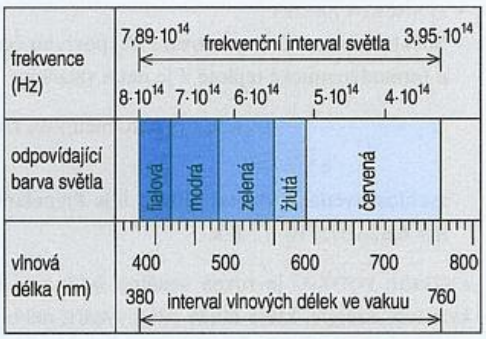
SVĚTLO je elektromagnetické vlnění o frekvencích v rozmezí $3{,}95 \cdot 10^{14}$–$7{,}89 \cdot 10^{14}$ Hz. Světla různých frekvencí vyvolávají v lidském oku různé barevné vjemy. Vlnová délka světla ve vakuu leží v intervalu 380–760 nm. Rychlost šíření světla ve vakuu se značí c a má hodnotu:

$c = 299\,792\,458\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \doteq 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Rychlost šíření světla v jiných prostředích je vždy menší.

Vztah mezi vlnovou délkou λ světla a frekvencí f je: $\lambda = \frac{c}{f}$.

Frekvence světla se v jiných prostředích nemění, mění se jen vlnová délka λ podle vztahu $\lambda = \frac{v}{f}$, kde v je rychlost světla v daném prostředí.

Tělesa, která vyzařují světlo, se nazývají **SVĚTELNÉ ZDROJE**. Rozlišujeme **BODOVÉ ZDROJE**, jejichž plošnou velikost lze zanedbat, a **PLOŠNÉ ZDROJE**.



Bílé světlo (zářivky, žárovky, Slunce) je složené z barevných světel všech vlnových délek nebo vzniká mísením červené, zelené a modré u barevné televize (RGB – red, green, blue).

Rychlost světla ve vzduchu je prakticky stejná jako ve vakuu. Rychlost šíření světla je:

- $2{,}25 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ ve vodě,
- $1{,}5 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ až $2{,}0 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ ve skle.

Prostředí (vakuum nebo jakákoliv látka), kterým se světlo šíří, nazýváme **OPTICKÉ PROSTŘEDÍ**. Optické prostředí může mít různý vliv na šíření světla, které může být látkou pohlcováno a rozptylováno, dále může mít různé optické vlastnosti. Podle toho pak rozlišujeme různé druhy těchto prostředí.

- **ČIRÉ PROSTŘEDÍ** je optické prostředí, v němž optické záření není pohlcováno ani rozptylováno.
- **PRŮHLEDNÉ PROSTŘEDÍ** je optické prostředí, v němž k rozptylu světla nedochází, světlo je částečně pohlcováno. Jestliže jsou pohlcovány jen některé vlnové délky, jedná se o průhledné **PROSTŘEDÍ ZBARVENÉ**.
- **PRŮSVITNÉ PROSTŘEDÍ** (matné) je optické prostředí, v němž dochází k částečnému rozptylu světla.
- **NEPRŮHLEDNÉ PROSTŘEDÍ** je optické prostředí, kterým světlo neprochází (je pohlcováno nebo se odráží).

- **HOMOGENNÍ OPTICKÉ PROSTŘEDÍ** má ve všech svých místech stejné optické vlastnosti (průhlednost, index lomu).
- **IZOTROPNÍ PROSTŘEDÍ** je optické prostředí, v němž se světlo šíří všemi směry stejnou rychlostí.
- **ANIZOTROPNÍ PROSTŘEDÍ** je optické prostředí, v němž rychlost šíření světla závisí na jeho směru.

Dvě optická prostředí můžeme porovnávat podle jejich indexu lomu. Ze dvou prostředí je **OPTICKY HUSTŠÍ** to, které má větší index lomu. Prostředí s menším indexem lomu se nazývá **PROSTŘEDÍ OPTICKY ŘIDŠÍ**.

V **HOMOGENNÍM IZOTROPNÍM PROSTŘEDÍ** se světlo bodového zdroje šíří v kulových vlnoplochách. Je-li bodový zdroj světla ve velké vzdálenosti, můžeme vlnoplochy považovat za rovinné. **VLNOPLOCHA** je plocha, na níž leží body, do kterých vlnění dospělo ze zdroje za tutéž dobu (jejíž body kmitají se stejnou fází). **PAPRSKY** jsou přímky kolmé na vlnoplochu a udávají směr šíření vlnění.

Odraz a lom světla

Dopadá-li světlo na **ROZHRANÍ** dvou optických prostředí (o různých indexech lomu), pak se částečně odráží a částečně prochází z jednoho prostředí do druhého.

INDEX LOMU optického prostředí n je veličina daná poměrem rychlosti světla ve vakuu c a rychlosti světla v v daném prostředí: $n = \frac{c}{v}$.

ZÁKON ODRAZU

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou prostředí pod úhlem α, odráží se s úhlem α'. Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α, tj. $\alpha = \alpha'$. Odražený paprsek leží v **ROVINĚ DOPADU**.

ABSORPCE světla nastává, jestliže je světlo nebo některé jeho vlnové délky (např. u barevných skel) pohlcováno prostředím.

ROZPTYL světla nastává, jestliže prostředí nepravidelně mění směr šíření světla.

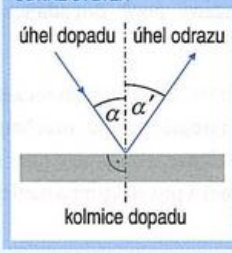
IZOTROPNÍ PROSTŘEDÍ je např. sklo, **ANIZOTROPNÍ PROSTŘEDÍ** vytvářejí např. některé krystaly (křemen, islandský vápenec).

Termín „světlo" se kvůli jeho flexibilitě často užívá i pro neviditelné optické záření (infračervené a ultrafialové).

Optická hustota a hustota látky jsou dva různé pojmy.

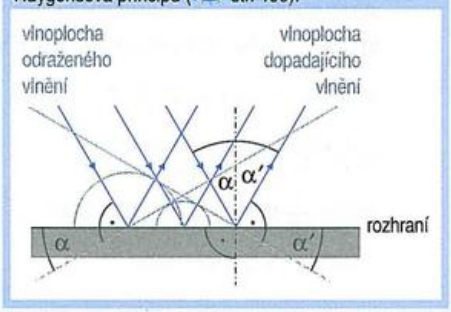
INDEX LOMU prostředí určuje, kolikrát se světlo šíří rychleji ve vakuu než v daném prostředí. Pro všechna prostředí je index lomu $n \geq 1$ (rovnost nastane pro vakuum). Index lomu závisí i na frekvenci (barvě) světla.

ODRAZ SVĚTLA



ROVINA DOPADU je určena dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu. **KOLMICE DOPADU** je přímka vztyčená kolmo na rozhraní v místě dopadu.

ODRAZ ROVINNÉ VLNOPLOCHY odvozený pomocí Huygensova principu (str. 100).



ZÁKON LOMU

Dopadá-li paprsek z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2, dochází k lomu paprsku. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu. Úhel dopadu značíme α, úhel lomu značíme β. Pro tyto úhly přitom platí

ZÁKON LOMU (Snellův zákon): $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$.

LOM KE KOLMICI nastává při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, tzn. $\beta < \alpha$.

LOM OD KOLMICE nastává při přechodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, tzn. $\beta > \alpha$.

ÚPLNÝ ODRAZ nastává při lomu světla od kolmice ($n_1 > n_2$) při mezním úhlu dopadu α_m (a při všech větších úhlech). Je-li při lomu světla úhel dopadu $\alpha = \alpha_m$, pak $\beta = 90°$. Pokud je při lomu světla úhel dopadu $\alpha > \alpha_m$, k lomu světla nedochází. Úhel α_m se nazývá **MEZNÍ ÚHEL**.

Je-li řidším prostředím vzduch, pak platí: $\sin\alpha_m = \frac{1}{n_1}$.

Pro rozhraní voda – vzduch je mezní úhel necelých 48°.

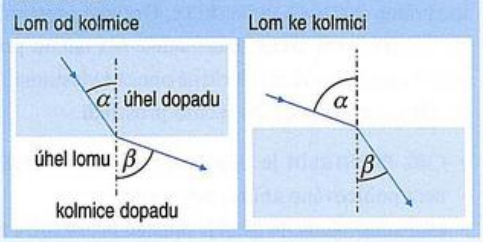
REFRAKTOMETR je přístroj pro měření indexu lomu založený na měření mezního úhlu α_m.

OPTICKÉ VLÁKNO (též vláknový vlnovod) je tenké vlákno z čistého křemenného skla se stěnami umožňujícími úplný odraz světla. V důsledku úplných vnitřních odrazů se světlo šíří uvnitř optického vlákna.

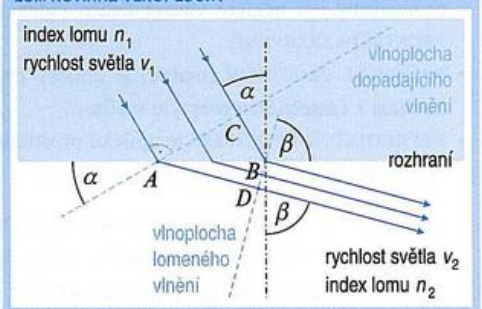
Při odrazu a lomu světla platí **ZÁKON ZÁMĚNNOSTI PAPRSKŮ**, tzn. dopadající a odražený, popř. dopadající a lomený paprsek lze vzájemně zaměnit.

ZÁKONY ODRAZU a **LOMU** elektromagnetického vlnění, tedy i světla, lze odvodit (stejně jako u mechanického vlnění) z Huygensova principu. Tyto zákony tedy platí nejen pro světlo, ale také pro optické záření a pro elektromagnetické i mechanické vlnění.

LOM SVĚTLA



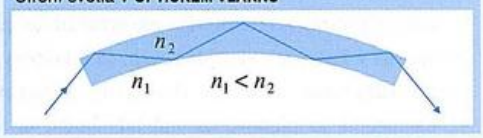
LOM ROVINNÉ VLNOPLOCHY



$$\sin\alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{v_1\Delta t}{AB},\ \sin\beta = \frac{AD}{AB} = \frac{v_2\Delta t}{AB} \Rightarrow$$

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

Šíření světla v **OPTICKÉM VLÁKNU**



Příklady indexů lomu některých prostředí:

n (vzduch) = 1,000 272 ≐ 1

n (voda) = $\frac{3\cdot10^8\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}}{2{,}25\cdot10^8\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}} = 1{,}33$

Př. 1

Světlo dopadá ze vzduchu na sklo pod úhlem 40°. Index lomu skla je 1,55.

a) Urči úhel lomu.

b) Urči mezní úhel, vychází-li světlo ze skla do vzduchu.

a) $\alpha = 40°$; $n_1 = 1$; $n_2 = 1{,}55$; $\beta = ?$

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

$$\sin\beta = \frac{1}{1{,}55}\sin 40° = 0{,}415 \Rightarrow \beta = 24{,}5°$$

Světlo se láme pod úhlem 24,5°.

b) n_1 (sklo) = 1,55; $n_2 = 1$; $\alpha_m = ?$

$$\sin\alpha_m = \frac{1}{n_1}$$

$$\sin\alpha_m = \frac{1}{1{,}55} = 0{,}645 \Rightarrow \alpha_m = 40{,}2°$$

Mezní úhel pro rozhraní sklo – vzduch je asi 40,2°.

Disperze

Světla různých frekvencí (tedy i různých barev) se v daném prostředí šíří různou rychlostí, proto mají i různé indexy lomů. Vlivem odlišných indexů lomů se tato monofrekvenční světla při vstupu do prostředí různě lámou. Tento jev se nazývá **DISPERZE**.

Index lomu prostředí závisí na frekvenci světla a při normální disperzi se s rostoucí frekvencí zvětšuje.

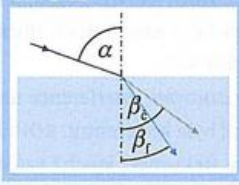
Pomocí **DISPERZE** na trojbokém hranolu se lze přesvědčit, že bílé světlo se skládá ze světel barevných. Za hranolem vznikne barevné spektrum. Tato světla již nelze dále rozkládat.

SPEKTROSKOP je přístroj pro pozorování spekter, založený na rozkladu světla hranolem (hranolový spektroskop) nebo na ohybu světla na optické mřížce (mřížkový spektroskop, str. 157, 158). **SPEKTROGRAF** je spektroskop, který zaznamenává spektrum na fotografické desce nebo pomocí jiného záznamového zařízení. **SPEKTROMETR** umožňuje měření frekvence spektrálních čar ve spektru.

V prostředí s indexem lomu n se světlo šíří se stejnou frekvencí jako ve vakuu, ale s menší vlnovou délkou. **VLNOVÁ DÉLKA SVĚTLA** λ je v prostředí s indexem lomu n určena vztahem $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, kde λ_0 je vlnová délka světla ve vakuu.

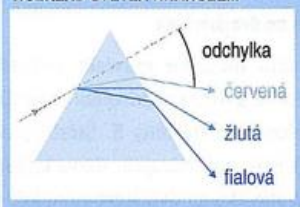
MONOFREKVENČNÍ neboli **MONOCHROMATICKÉ SVĚTLO** je viditelné optické záření jedné frekvence (jedné barvy).

DISPERZE



Nejvíce se láme paprsek fialového světla (úhel lomu je β_f), nejméně paprsek červeného světla (úhel lomu $\beta_č$).

ROZKLAD SVĚTLA HRANOLEM



Je důležitým poznatkem, který se využívá při **SPEKTRÁLNÍ ANALÝZE**. Každý prvek má své specifické emisní čárové spektrum (str. 150) a analýzou čárových spekter lze přesně stanovit chemické složení látek.

Pro barevný vjem je podstatná frekvence světla, a ne jeho vlnová délka.

Odvození vlnové délky světla λ v prostředí s indexem lomu n (str. 152, 153):

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

Př. 2

Urči frekvenci žlutého světla, které se šíří ve vzduchu s vlnovou délkou 580 nm.

$\lambda = 580\ \text{nm} = 580 \cdot 10^{-9}\ \text{m} = 5{,}8 \cdot 10^{-7}\ \text{m}; c = 3 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}; f = ?$

$c = f \cdot \lambda \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda}; \{f\} = \frac{3 \cdot 10^8}{5{,}8 \cdot 10^{-7}} = 5{,}2 \cdot 10^{14}; f = 5{,}2 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$

Ve vakuu je frekvence tohoto světla $5{,}2 \cdot 10^{14}$ Hz.

Př. 3

Červené světlo má ve vakuu frekvenci $4 \cdot 10^{14}$ Hz. Urči jeho frekvenci a vlnovou délku ve skle s indexem lomu 1,65.

$c = 3 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}; f_0 = 4 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}; n = 1{,}65; f = ?; \lambda = ?$

$c = f_0 \cdot \lambda_0 \Rightarrow \lambda_0 = \frac{c}{f_0}$

$\{\lambda_0\} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{14}} = 4{,}5 \cdot 10^{-7}; \lambda_0 = 450\ \text{nm}$

- Vypočteme vlnovou délku červeného světla ve vakuu. Frekvence vlnění zůstává konstantní.

$f = f_0$

$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}; \{\lambda\} = \frac{7{,}5 \cdot 10^{-7}}{1{,}65} = 4{,}5 \cdot 10^{-7}; \lambda = 450\ \text{nm}$

- Vypočteme vlnovou délku červeného světla ve skle.

Frekvence světla ve skle bude stejná, tj. $4 \cdot 10^{14}$ Hz, a vlnová délka se zmenší na 450 nm.

Interference

Dvě elektromagnetické vlny (což zahrnuje i světlo), které zároveň dospějí do určitého místa, spolu interferují (skládají se) podobně jako mechanické vlny (str. 98), tj. sčítají se jejich okamžité hodnoty elektrické a magnetické složky. Skládání vlnění nazýváme INTERFERENCE.

Podmínkou k trvalému pozorování interference na daném místě je, aby dopadající vlnění byla koherentní. KOHERENTNÍ jsou dvě světelná vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl v daném místě je konstantní, tj. nemění se s časem.

Interference na dvojštěrbině

Skládání dvou vlnění můžeme vysvětlit INTERFERENCÍ NA DVOJŠTĚRBINĚ, kterou osvětlíme zdrojem monofrekvenčního světla o vlnové délce λ ze štěrbiny S. Štěrbiny S_1 a S_2 (šířka každé z nich je d) jsou pak zdrojem dvou koherentních vln, které se skládají na stínítku za dvojštěrbinou, kde pozorujeme interferenční obrazce. Za podmínky $d << \lambda$ dochází na stínítku k mezním situacím:

- Vlnění se setkávají se stejnou fází. V místě vznikne INTERFERENČNÍ MAXIMUM, na stínítku pozorujeme maxima jako světlá místa. Dráhový rozdíl vlnění je $\Delta l = k\lambda$, kde $k = 0, \pm 1, \pm 2...$ udává řád maxima (vlnění, str. 99).
- Vlnění se setkávají s opačnou fází. V místě vznikne INTERFERENČNÍ MINIMUM, na stínítku pozorujeme minima jako tmavá místa. Dráhový rozdíl vlnění je $\Delta l = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0, \pm 1, \pm 2...$ udává řád minima (str. 99).

Změna fáze při odrazu

Lom světla na rozhraní dvou prostředí nikdy nezpůsobí fázovou změnu. Ale odraz světla, v závislosti na indexu lomu na obou stranách rozhraní, může tuto změnu způsobit. Nastávají přitom dvě situace:

- Šíří-li se dopadající vlna v prostředí opticky řidším (tj. s menším indexem lomu, kde je rychlost šíření vlny větší), při odrazu od opticky hustšího prostředí nastává změna fáze, tj. fázové posunutí o $\frac{1}{2}$ vlnové délky (tj. o $\frac{\lambda}{2}$).
- Šíří-li se dopadající vlna v prostředí opticky hustším (tj. s větším indexem lomu, rychlost šíření vlny je menší), při odrazu od opticky řidšího prostředí nenastává změna fáze.

Interference na tenké vrstvě

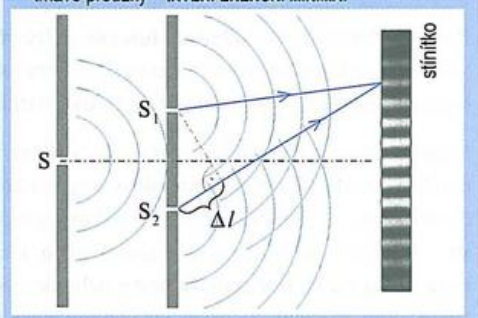
Ke skládání vlnění dochází při odrazu na tenké vrstvě, např. na mýdlové bublině. Skládají se paprsky odražené od horního rozhraní (paprsek 2) a dolního rozhraní tenké vrstvy (paprsek 3).

Světla dvou různých světelných zdrojů, jakými jsou např. žárovky, nejsou koherentní, protože vlny z těchto zdrojů jsou vyzařovány náhodně a nezávisle na sobě různými atomy, tedy fázové rozdíly se rychle a náhodně mění.

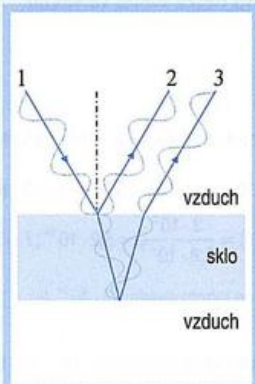
INTERFERENCE NA DVOJŠTĚRBINĚ

Na stínítku pozorujeme:

- světlé proužky – INTERFERENČNÍ MAXIMA,
- tmavé proužky – INTERFERENČNÍ MINIMA.



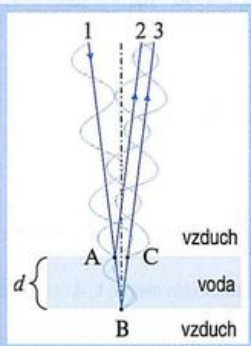
Osvětlíme-li úzkou štěrbinu S slunečním světlem, světelná vlna se za štěrbinou v důsledku difrakce rozšíří do všech směrů a osvětlí obě štěrbiny S_1 a S_2 koherentním světlem. Štěrbiny S_1 a S_2 osvětlené přímým slunečním světlem nejsou zdroji koherentních vlnění.



ZMĚNA FÁZE PŘI ODRAZU

Vzduch je opticky řidší prostředí, sklo je opticky hustší prostředí.

odraz od prostředí	fázové posunutí
opticky hustšího	$\frac{\lambda}{2}$
opticky řidšího	0



INTERFERENCE NA TENKÉ VRSTVĚ

Paprsek 1 dopadá na horní rozhraní, částečně se odráží (paprsek 2), částečně prochází a odráží se od dolního rozhraní (paprsek 3).

Osvětlíme-li tenkou vrstvu monofrekvenčním světlem o vlnové délce λ a pozorujeme odražené paprsky, vidíme světlá a tmavá místa. Při interferenci může dojít k následujícím dvěma mezním situacím:

- Paprsky 2 a 3 se setkávají se stejnou fází. V místě setkání paprsků 2 a 3 vznikne **INTERFERENČNÍ MAXIMUM**, místo AC je pro pozorovatele světlé. Pro interferenční maximum platí: $2nd = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, kde d je tloušťka tenké vrstvy, n je index lomu světla ve vrstvě, $k = 0, \pm 1, \pm 2...$ udává řád maxima.
- Paprsky 2 a 3 se setkávají s opačnou fází. V místě setkání vznikne **INTERFERENČNÍ MINIMUM**, místo AC je pro pozorovatele tmavé. Pro interferenční minimum platí $2nd = k\lambda$, kde d je tloušťka tenké vrstvy, n je index lomu světla ve vrstvě, $k = 0, \pm 1, \pm 2...$ udává řád minima.

Nulté interferenční maximum ($k = 0$) pro interferenci odraženého světla na tenké vrstvě závisí na tloušťce vrstvy a vlnové délce podle vztahu $\lambda = 4nd$. Pro vrstvy různé tloušťky tedy nastává maximum pro různé vlnové délky, a proto pozorovatel vidí na vrstvě nestejné tloušťky (např. u mýdlové blány) osvětlené bílým světlem různobarevné pruhy nebo skvrny.

Ke zvláštnímu případu dochází, když je vrstva tak tenká, že její tloušťka je mnohem menší než vlnová délka ($d << \lambda$). Pak lze dráhový rozdíl $2d$ zanedbat a fázový rozdíl mezi paprskem 2 a 3 je pouze důsledkem změny fáze při odrazu paprsku 2. Nastává interferenční minimum ($k = 0$), tj. vrstva je v odraženém světle tmavá bez ohledu na vlnovou délku a intenzitu světla, které ji osvětluje.

NEWTONOVA SKLA jsou tvořena skleněnou deskou a ploskovypuklou čočkou. Umožňují pozorovat interferenci na tenkých vrstvách a měřit vlnovou délku světla.

INTERFERENCI NA TENKÉ VRSTVĚ můžeme pozorovat i v prošlém světle. Je-li tenká vrstva z opticky hustšího materiálu umístěná ve vzduchu (např. mýdlová blána), pro maxima a minima platí opačné podmínky než pro odražené světlo.

INTERFERENCE NA TENKÉ VRSTVĚ

Odvození vztahů pro interferenční maxima a minima za předpokladu, že všechny tři paprsky jsou téměř kolmé k vrstvě:

Paprsek 3 projde dráhu ABC a setká se s paprskem 2, který po odrazu změnil fázi.

- **INTERFERENČNÍ MAXIMUM** vznikne, je-li dráhový rozdíl $2d$ rovný lichému počtu půlvln vzhledem k tomu, že paprsek 2 má opačnou fázi, tj. $2d = (2k+1)\frac{\lambda_v}{2}$ (vlnění, str. 99), kde $\lambda_v = \frac{\lambda}{n}$ je vlnová délka světla ve vrstvě s indexem lomu n, λ je vlnová délka světla ve vzduchu (přibližně rovná vlnové délce ve vakuu). Tedy $2nd = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

  Výraz $2nd$ se nazývá **OPTICKÁ DRÁHA**, je větší než skutečná dráha světla v tenké vrstvě.
- **INTERFERENČNÍ MINIMUM** vznikne, je-li dráhový rozdíl $2d$ rovný sudému počtu půlvln vzhledem k tomu, že paprsek 2 má opačnou fázi, tj. $2d = k\lambda_v$. Dosazením za λ_v obdržíme vztah $2nd = k\lambda$.

NEWTONOVA SKLA zkonstruoval I. Newton. Mezi čočkou a skleněnou deskou je vrstva vzduchu proměnné tloušťky, na níž dochází k interferenci světla odraženého od obou rozhraní této tenké vrstvy. Interferenční obrazec pro monofrekvenční světlo tvoří tmavé a světlé kroužky.

Př. 4

Na hladině vody je olejová skvrna tloušťky 0,25 μm. Jakou barvu bude mít skvrna v odraženém bílém světle dopadajícím kolmo na skvrnu? Index lomu oleje je 1,45 a vody 1,33.

$d = 0{,}25\ \mu\text{m} = 0{,}25 \cdot 10^{-6}\ \text{m} = 2{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$; $n_0(\text{vzduch}) = 1$; $n_1(\text{olej}) = 1{,}45$; $n_2(\text{voda}) = 1{,}33$

$2n_1d = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{4n_1d}{2k+1}$; pro $k = 0$: $\lambda_0 = 4n_1d \Rightarrow \lambda_0 = 4 \cdot 1{,}45 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-7} = 1{,}45 \cdot 10^{-6} = 1\,450$ nm

pro $k = 1$: $\lambda_1 = \frac{4 \cdot 1{,}45 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 1 + 1} = 4{,}83 \cdot 10^{-7}$; $\lambda_1 = 483$ nm

pro $k = 2$: $\lambda_2 = \frac{4 \cdot 1{,}45 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 2 + 1} = 2{,}9 \cdot 10^{-7}$; $\lambda_2 = 290$ nm

- První paprsek se jednou odrazí od opticky hustšího prostředí (od oleje). Druhý paprsek se odráží od vody, která je opticky řidší než olej, proto pro interferenční maxima platí $2n_1d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

Na olejové skvrně nastanou tři maxima pro tři různé vlnové délky. Jediná vlnová délka, která odpovídá viditelnému světlu, je 483 nm (odpovídá jí modrá barva). Skvrna tedy bude mít modrou barvu.

Difrakce

DIFRAKCE neboli OHYB vlnění je jev, při kterém se vlnění dostává i do oblasti geometrického stínu (za překážkou se paprsky světla „ohýbají"). Ohyb lze například pozorovat, když prochází světlo štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla. Za štěrbinou se na stínítku objeví difrakční neboli ohybové obrazce, tj. světlé a tmavé proužky různé šířky.

Ohyb světla na štěrbině

Dopadá-li monofrekvenční světlo na úzkou štěrbinu, můžeme za ní na vzdáleném stínítku pozorovat difrakční obrazce. Poloha prvního minima N_1 je dána vztahem $\sin\alpha = \frac{\lambda}{b}$, kde b je šířka štěrbiny, λ je vlnová délka dopadajícího světla. Čím užší bude tedy štěrbina, tím vzdálenější budou od sebe minima N_1 a tím širší bude maximum M_0, tedy ohyb bude pro užší štěrbinu výraznější.

Ohyb na dvou štěrbinách

Při ohybu na dvojštěrbině lze na stínítku pozorovat ohybový obrazec, který je kombinací dvou jevů. Široká maxima a minima jsou způsobena ohybem na štěrbině. V každém širokém maximu lze pozorovat soustavu dalších užších maxim a minim, která jsou způsobena interferencí světla ze dvou štěrbin.

Difrakční (optická) mřížka

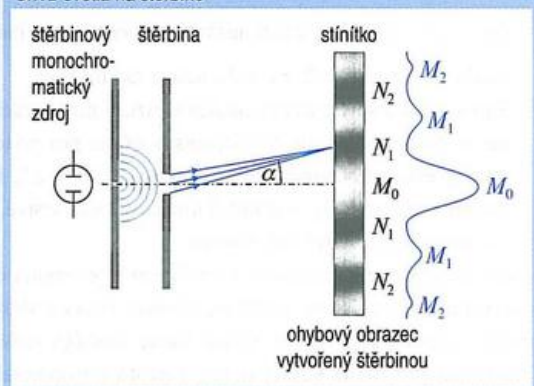
DIFRAKČNÍ (OPTICKÁ) MŘÍŽKA je tvořena velkým počtem stejně širokých rovnoběžných štěrbin umístěných vedle sebe. Vzdálenost štěrbin b se nazývá MŘÍŽKOVÁ KONSTANTA nebo PERIODA mřížky.

Ohybový obrazec vytvořený mřížkou má úzká interferenční maxima, ta jsou tím zřetelnější, čím je menší perioda mřížky. Při kolmém dopadu monofrekvenčního světla o vlnové délce λ na mřížku platí pro interferenční maxima podmínka $\sin\alpha = k\frac{\lambda}{b}$, kde k určuje řád maxima $M_0, M_1, M_2 \ldots$; $k = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$ a úhel α určuje směr, ve kterém maximum vznikne.

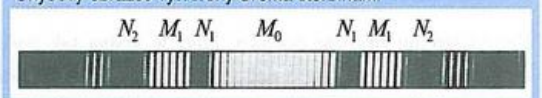
Ze vztahu pro interferenční maxima platí, že maximum 0. řádu je stejné pro všechny vlnové délky, maxima vyšších řádů jsou různá pro různé vlnové délky. Dopadá-li na mřížku bílé světlo, je maximum 0. řádu bílé. Maxima vyšších řádů jsou barevná, symetricky rozmístěna na obě strany od maxima 0. řádu. Blíže středu jsou maxima fialového světla, dále leží maxima červeného světla, mezi nimi jsou maxima ostatních barev. Každé maximum řádu vyššího než nultého pak tvoří barevné spektrum.

V důsledku DIFRAKCE jsou rozlišovací schopnosti optických mikroskopů omezeny. Blízké bodové objekty obrazu vidíme v mikroskopu obklopené tmavými a světlými kroužky a nelze je dobře rozlišit.

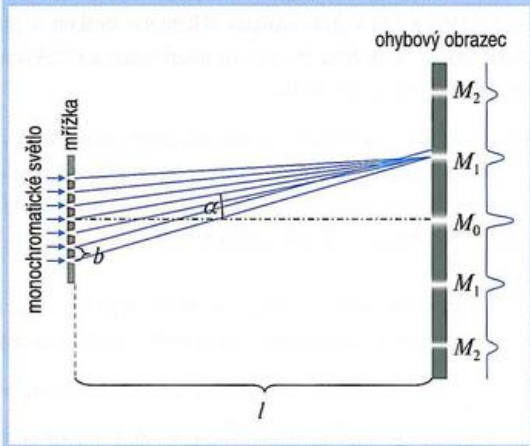
OHYB světla na štěrbině



Ohybový obrazec vytvořený dvěma štěrbinami



DIFRAKČNÍ MŘÍŽKA je tvořena soustavou jemných vrypů (100 až 1 000 vrypů na milimetr) na povrchu skleněné planparalelní destičky. Sklo mezi vrypy tvoří štěrbiny.



Vztah pro interferenční maxima $\sin\alpha = k\frac{\lambda}{b}$ platí pod podmínkou, že vzdálenost l stínítka od mřížky je mnohem větší než její velikost.

MŘÍŽKOVÝ SPEKTROSKOP s difrakční mřížkou se používá k určení vlnových délek spektrálních čar v spektrální analýze. Mřížka na odraz je tvořena vrypy na vyleštěném povrchu. Jemné vrypy o šířce 0,5 μm na kompaktním disku dělají z disku difrakční mřížku.

Polarizace

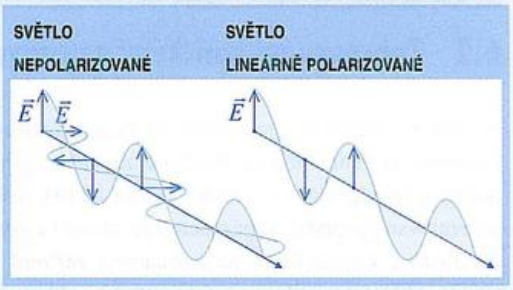
Světlo je postupné příčné elektromagnetické záření. Vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}$ je vždy kolmý na směr šíření světla, ale v případě NEPOLARIZOVANÉHO SVĚTLA mění zcela nahodile svůj směr. V případě LINEÁRNĚ POLARIZOVANÉHO SVĚTLA kmitá vektor $\vec{E}$ neustále v jedné rovině, tzv. ROVINĚ KMITŮ (str. 143).

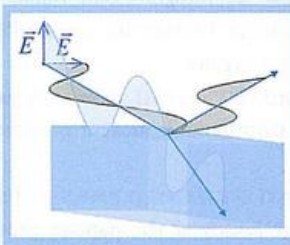
Světlo lze polarizovat několika způsoby:

- POLARIZACE SVĚTLA ODRAZEM A LOMEM
  Světlo se částečně polarizuje při odrazu. Při určitém úhlu dopadu, nazývá se BREWSTERŮV ÚHEL, je odražené světlo zcela lineárně polarizované tak, že vektor $\vec{E}$ kmitá v rovině kolmé k rovině dopadu (rovnoběžně s rozhraním). Při lomu světla dochází k částečné polarizaci a $\vec{E}$ kmitá v rovině rovnoběžné s rovinou dopadu.

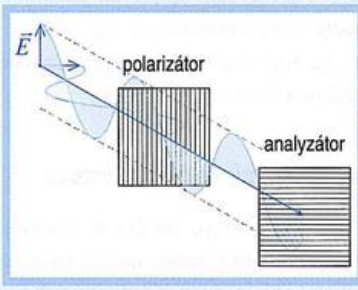
- POLARIZACE SVĚTLA POLAROIDEM
  (polarizačním filtrem neboli polarizátorem)
  V praxi se k polarizaci používají speciální polarizační filtry, které jsou tvořeny rovnoběžnými dlouhými molekulami v průhledné umělé hmotě. Světlo, které necháme procházet polarizátorem, je zcela lineárně polarizované a rovina shodná s rovinou kmitů polarizovaného světla se nazývá polarizační rovina polarizátoru. Vložíme-li do cesty tomuto světlu druhý filtr (analyzátor), lze pozorovat, že při určitém natočení analyzátoru světlo prakticky neprochází.

- POLARIZACE SVĚTLA DVOJLOMEM
  Světelný paprsek se na rozhraní s krystalem islandského vápence při tzv. dvojlomu rozdělí na dva paprsky: ŘÁDNÝ a MIMOŘÁDNÝ PAPRSEK, v důsledku anizotropie krystalu. Oba paprsky jsou lineárně polarizované, jejich směry polarizace (tj. roviny kmitů) jsou na sebe kolmé.





POLARIZACE SVĚTLA ODRAZEM A LOMEM
Velikost Brewsterova úhlu α_B závisí na indexech lomu obou prostředí tvořících rozhraní, na němž se světlo odráží. Pro rozhraní vzduch – sklo ($n_{sklo} = 1{,}5$) je $\alpha_B = 57°$.



POLARIZACE SVĚTLA POLAROIDEM

Některé látky (např. cukry) jsou opticky aktivní a stáčejí ROVINU KMITŮ polarizovaného světla. Toho lze využít např. k měření koncentrace látek tzv. POLARIMETREM.

Rybáři používají polarizační brýle (polarizační rovina filtru brýlí je kolmá k rovině světla odraženého od hladiny) k tomu, aby eliminovali polarizované světlo odražené od vodní hladiny. Tyto brýle jim umožňují vidět pod vodu.

Př. 5

Pomocí difrakční optické mřížky s periodou $b = 10\ \mu m$ byl vytvořen monofrekvenčním světlem na stínítku ve vzdálenosti $l = 3$ m od mřížky difrakční obrazec. První ohybové maximum vzniklo 13,5 cm od maxima nultého řádu. Urči vlnovou délku světla.

$b = 10\ \mu m = 10 \cdot 10^{-6}\ m = 10^{-5}\ m;\ l = 3\ m;\ k = 1;\ x = 13{,}5\ cm = 0{,}135\ m;\ \lambda = ?$

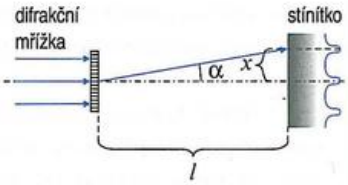
$b \sin\alpha = k\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{b \sin\alpha}{k}$, pro $k = 1$ je $\lambda = b \sin\alpha$

Z obrázku plyne: $\sin\alpha = \operatorname{tg}\alpha = \frac{x}{l} \Rightarrow \lambda = b\frac{x}{l}$

$\{\lambda\} = 10^{-5} \cdot \frac{0{,}135}{3} = 4{,}5 \cdot 10^{-7};\ \lambda = 450\ nm$

Použité světlo mělo vlnovou délku 450 nm.

- Protože úhel α je velmi malý, můžeme $\sin\alpha$ nahradit výrazem $\operatorname{tg}\alpha$.



6.2 Zobrazování optickými soustavami

PAPRSKOVÁ neboli GEOMETRICKÁ OPTIKA je založena na paprskovém modelu světla, při kterém se zanedbává jeho vlnová podstata (předpokládá se nulová vlnová délka). Světlo je reprezentováno paprsky vycházejícími ze zdrojů i z osvětlených předmětů a dopadajícími na záznamová zařízení (stínítko, sítnice oka, fotoemulze na fotografickém filmu, digitální snímač obrazu v digitálním fotoaparátu apod). Pro světlo a světelné paprsky platí 4 zákony.

- ZÁKON PŘÍMOČARÉHO ŠÍŘENÍ SVĚTLA: Světelné paprsky se šíří v homogenním izotropním optickém prostředí přímočaře.
- PRINCIP NEZÁVISLOSTI SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ: Paprsky se navzájem neovlivňují; jestliže se dva paprsky protínají, postupují dále nezávisle jeden na druhém.
- ZÁKON ODRAZU: Na rozhraní optických prostředí se paprsky odrážejí podle zákona odrazu (str. 153).
- ZÁKON LOMU: Na rozhraní optických prostředí se paprsky lámou podle zákona lomu (str. 154).

Optické zobrazení, optická soustava

OPTICKÉ ZOBRAZENÍ je postup, kterým se získávají optické obrazy bodů nebo předmětů pomocí optické soustavy.

PŘEDMĚT je fyzikální objekt, z jehož jednotlivých bodů vycházejí svazky rozbíhavých světelných paprsků, které pak vstupují do zobrazovacího zařízení (např. do oka, do fotoaparátu, do lupy apod.) a vytvářejí obraz předmětu.

OBRAZ je množina bodů, v nichž se skutečně nebo zdánlivě protínají paprsky vycházející z jednotlivých bodů zobrazovaného předmětu a procházející zobrazovacím zařízením.

OPTICKÁ SOUSTAVA (ZOBRAZOVACÍ ZAŘÍZENÍ) je jakékoli zařízení, které mění chod paprsků (vycházejících z jednotlivých bodů předmětu), přičemž je jím vytvářen obraz předmětu. Ke změně směru paprsků odrazem nebo lomem dochází na OPTICKÉ PLOŠE, která je rozhraním optických prostředí.

Obraz A' bodu A, který je zdrojem rozbíhajících se světelných paprsků, vznikne pomocí optické soustavy. Paprsky vycházející z OPTICKÉ SOUSTAVY mohou přitom vytvořit:

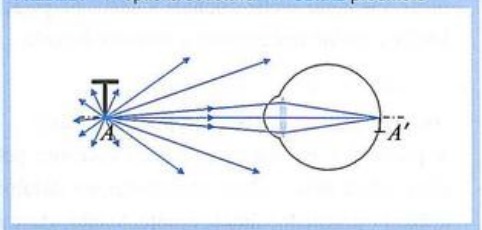
- sbíhavý svazek a v průsečíku sbíhavých paprsků vzniká SKUTEČNÝ OBRAZ A'. Skutečný obraz můžeme zachytit na stínítku.
- rozbíhavý svazek, pak obraz bodu A nelze zachytit na stínítku, ale přesto oko obraz vidí. Obraz A' pozorujeme v průsečíku, který sestrojíme zpětným prodloužením rozbíhajících se paprsků. Jde o tzv. ZDÁNLIVÝ OBRAZ A'.

Osnova kapitoly:

- Paprsková optika, zákony šíření světla
- Optické zobrazování, optická soustava
- Zobrazení rovinným zrcadlem
- Zobrazení kulovým zrcadlem, příčné zvětšení
- Zobrazení tenkou čočkou, zobrazovací rovnice
- Oko, lupa, zorný úhel, úhlové zvětšení
- Mikroskop, dalekohled

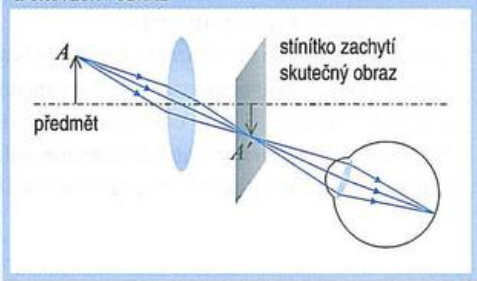
SVĚTELNÝ PAPRSEK je přímka kolmá na vlnoplochu světelného vlnění a udává směr šíření světla. Svazek světelných paprsků je soubor paprsků rovnoběžných, sbíhavých nebo rozbíhavých.

PŘEDMĚT → optická soustava → OBRAZ předmětu

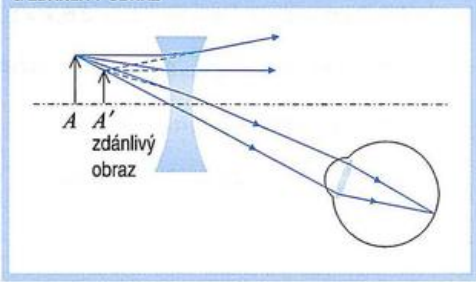


Paprsky vycházejí z bodu A viditelného předmětu všemi směry. Čočka oka (optická soustava) změní úzký rozbíhavý svazek paprsků na sbíhavý a vytvoří na sítnici obraz bodu A (značí se A') i celý obraz předmětu.

OPTICKÁ SOUSTAVA vytvářející sbíhavý svazek paprsků a SKUTEČNÝ OBRAZ



OPTICKÁ SOUSTAVA vytvářející rozbíhavý svazek paprsků a ZDÁNLIVÝ OBRAZ



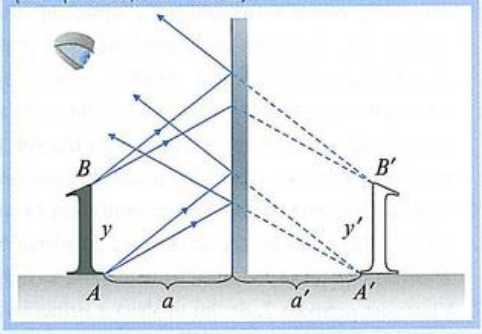
Zobrazení rovinným zrcadlem

ZRCADLO je hladká optická plocha odrážející více než 90 % dopadajícího světla, pro které platí zákon odrazu světla. Povrch zrcadel bývá z vysoce vyleštěné tenké vrstvy kovu nebo z vrstvy cínového amalgamu nanesené na hladké skleněné desce.

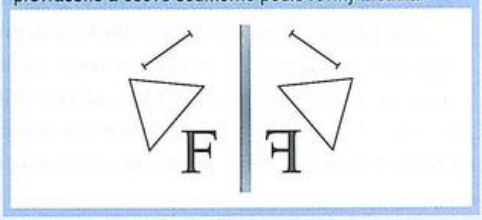
ROVINNÉ ZRCADLO je hladká rovinná plocha (část roviny) odrážející světelné paprsky.

Odrazem světelných paprsků od rovinného zrcadla vznikají rozbíhavé svazky. Vzniklý obraz $A'B'$ předmětu AB bude proto zdánlivý. Okem pozorujeme obraz A' bodu A v průsečíku zpětně prodloužených paprsků, tj. v prostoru za zrcadlem. Při geometrické konstrukci využíváme vlastnosti, že vzdálenost bodu A před zrcadlem je stejná jako vzdálenost bodu A' za zrcadlem. Obraz vytvořený rovinným zrcadlem je vždy zdánlivý, vzpřímený, stejně veliký jako předmět a souměrně sdružený s předmětem podle roviny zrcadla.

Zobrazení předmětu **ROVINNÝM ZRCADLEM**
(AB – předmět; $A'B'$ – obraz)



Předměty zobrazené v rovinném zrcadle jsou stranově převrácené a osově souměrné podle roviny zrcadla.



Zobrazení kulovým zrcadlem

KULOVÉ (SFÉRICKÉ) ZRCADLO je vytvořeno na povrchu části optické kulové plochy. Podle toho, na které straně je zrcadlicí plocha, rozlišujeme **DUTÉ ZRCADLO** (na vnitřní straně kulové plochy) a **VYPUKLÉ ZRCADLO** (vnější strana kulové plochy).

STŘED KŘIVOSTI C zrcadla je střed kulové zrcadlicí plochy.

POLOMĚR KŘIVOSTI r je poloměr křivosti optické kulové plochy zrcadla, $r = |CV|$.

VRCHOL ZRCADLA V je zvolený bod na jeho povrchu, kterým prochází optická osa zrcadla.

OPTICKÁ OSA o je přímka procházející středem křivosti C a vrcholem V zrcadla, $o = \leftrightarrow CV$.

OHNISKO dutého zrcadla F je bod na optické ose, v němž se paprsky rovnoběžné s optickou osou protínají po odrazu od zrcadla. Stejně tak paprsky jdoucí přes ohnisko se odrážejí rovnoběžně s optickou osou.

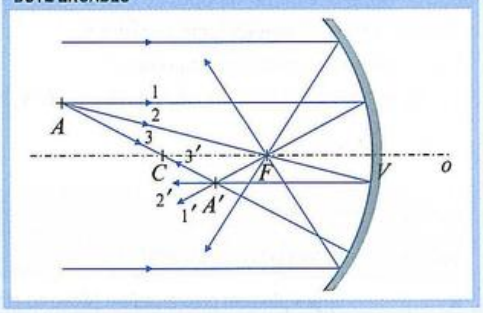
OHNISKO vypuklého zrcadla F je bod na optické ose, v němž se protínají přímková prodloužení paprsků rovnoběžných s optickou osou po odrazu od zrcadla.

OHNISKOVÁ VZDÁLENOST $f = \frac{r}{2} = |FV|$ je vzdálenost mezi ohniskem a vrcholem zrcadla.

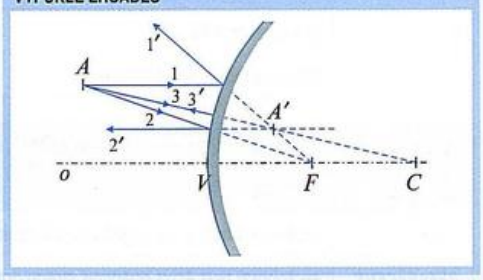
PARAXIÁLNÍ PAPRSKY jsou paprsky v blízkosti optické osy svírající s ní tak malé úhly α, že hodnoty $\sin\alpha$ a $\mathrm{tg}\,\alpha$ lze nahradit hodnotami úhlů α v radiánech. Paraxiální paprsky zaručují ideální optické zobrazení.

PARAXIÁLNÍ PROSTOR je prostor v blízkosti optické osy, v němž se šíří paraxiální paprsky. Označuje se také jako nitkový nebo Gaussův prostor.

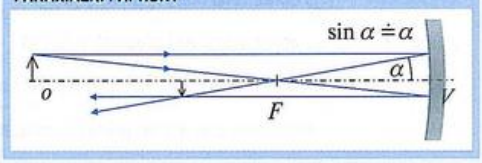
DUTÉ ZRCADLO



VYPUKLÉ ZRCADLO



PARAXIÁLNÍ PAPRSKY



Ke geometrické konstrukci obrazu vytvořeného **KULOVÝM ZRCADLEM** používáme tři **VÝZNAČNÉ PAPRSKY**:

1. Paraxiální paprsky rovnoběžné s optickou osou, které se odrážejí tak, že procházejí ohniskem F. V případě dutého zrcadla se skutečně protínají v ohnisku, proto je ohnisko dutého zrcadla skutečné. V případě vypuklého zrcadla dostaneme průsečík až zpětným prodloužením odražených paprsků (za zrcadlem). Ohnisko vypuklého zrcadla je zdánlivé.
2. Paraxiální paprsky procházející ohniskem (v případě dutého zrcadla) nebo mířící do ohniska (v případě vypuklého zrcadla), které se odrážejí rovnoběžně s optickou osou. Vlastnost paprsků 2. druhu vyplývá z principu záměnnosti chodu paprsků 1. druhu (str. 154).
3. Paprsky procházející středem křivosti C (v případě dutého zrcadla) nebo mířící do středu křivosti (v případě vypuklého zrcadla) dopadají na kulové zrcadlo kolmo, proto se odrážejí zpět přímo přes střed křivosti (duté zrcadlo), anebo jejich prodloužení jde přes střed křivosti (vypuklé zrcadlo).

PŘEDMĚTOVÁ VZDÁLENOST a je vzdálenost vrcholu V zrcadla od bodu A zobrazovaného předmětu ležícího na optické ose, $a = |AV|$.

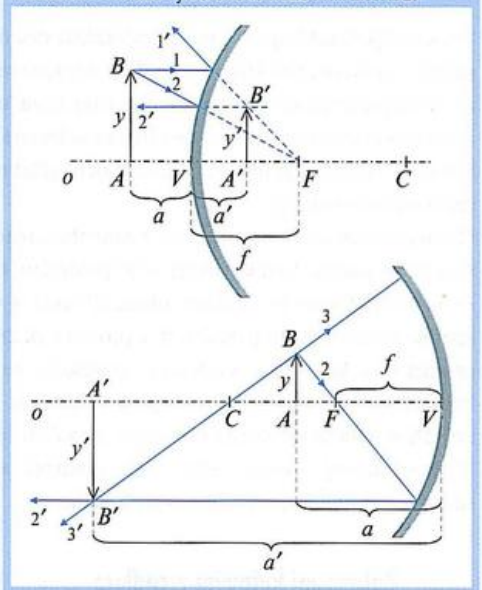
OBRAZOVÁ VZDÁLENOST a' je vzdálenost vrcholu V zrcadla od bodu A' obrazu ležícího na optické ose, $a' = |A'V|$.

VÝŠKU PŘEDMĚTU označujeme znakem y.

VÝŠKU OBRAZU označujeme znakem y'.

PŘÍČNÉ ZVĚTŠENÍ Z je definováno jako poměr výšky obrazu a výšky předmětu, tj. $Z = \frac{y'}{y}$.

Konstrukce obrazu vytvořeného **KULOVÝMI ZRCADLY**



Pro konstrukci obrazu postačují dva význačné paprsky. Třetí význačný paprsek můžeme použít ke kontrole správnosti geometrické konstrukce.

Dále při konstrukci obrazu využíváme poznatek, že bod ležící na optické ose se zobrazí opět na optickou osu.

PŘEDMĚTOVÁ VZDÁLENOST a je vždy kladná, protože předmět za zrcadlem nelze zobrazit.

ZNAMÉNKOVÁ KONVENCE		
VELIČINA	MÁ KLADNOU HODNOTU	MÁ ZÁPORNOU HODNOTU
a	je-li předmět před zrcadlem (vlevo od zrcadla)	nelze
a'	je-li obraz před zrcadlem (vlevo od zrcadla)	je-li obraz za zrcadlem (vpravo od zrcadla)
f	pro duté zrcadlo	pro vypuklé zrcadlo
y	předmět leží nad optickou osou	předmět leží pod optickou osou

VLASTNOSTI OBRAZU PŘI OPTICKÉM ZOBRAZENÍ KULOVÝM ZRCADLEM		
OBRAZ JE	JESTLIŽE	
PŘÍMÝ	se zobrazí bod A' na stejnou stranu optické osy jako bod A, tj. $Z > 0$	
PŘEVRÁCENÝ	se zobrazí bod A' na opačnou stranu optické osy než bod A, tj. $Z < 0$	
ZVĚTŠENÝ	je obraz větší než předmět, tj. $\|Z\| > 1$	Je-li $\|Z\| = 1$, pak je obraz stejně velký jako předmět.
ZMENŠENÝ	je obraz menší než předmět, tj. $\|Z\| < 1$	
SKUTEČNÝ	leží bod A' přímo v průsečíku odražených paprsků před zrcadlem	
ZDÁNLIVÝ	dostaneme bod A' jako průsečík při zpětném prodloužení odražených paprsků za zrcadlo	

ZOBRAZOVACÍ ROVNICE KULOVÉHO ZRCADLA pro zobrazení v paraxiálním prostoru má tvar: $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}=\frac{2}{r}$.

Zobrazovací rovnice platí pro duté i vypuklé zrcadlo, ale je třeba dodržovat **ZNAMÉNKOVOU KONVENCI** (str. 162).

Je-li obrazová vzdálenost $a'>0$, pak je obraz skutečný a leží před zrcadlem. Je-li $a'<0$, pak je obraz zdánlivý a leží za zrcadlem.
Pro duté zrcadlo je $f>0$, pro vypuklé $f<0$.

Pro **PŘÍČNÉ ZVĚTŠENÍ** zrcadla platí vztahy:

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

Vztahy pro příčné zvětšení lze odvodit z podobnosti trojúhelníků $A'B'C$, ABC (obr. str. 162) a ze zobrazovací rovnice kulového zrcadla.

ZOBRAZOVÁNÍ KULOVÝMI ZRCADLY					
Zrcadlo	Poloha předmětu	Poloha obrazu	Velikost obrazu	Zvětšení	Obraz je:
duté, $f>0$	$a>r$	$r>a'>f$	$\lvert y'\rvert<\lvert y\rvert$	$\lvert Z\rvert<1$	převrácený ($Z<0$) a skutečný ($a'>0$)
	$a=r$	$a'=r$	$\lvert y'\rvert=\lvert y\rvert$	$\lvert Z\rvert=1$	převrácený ($Z<0$) a skutečný ($a'>0$)
	$r>a>f$	$a'>r$	$\lvert y'\rvert>\lvert y\rvert$	$\lvert Z\rvert>1$	převrácený ($Z<0$) a skutečný ($a'>0$)
	$a=f$	$a'\to\infty$	$\lvert y'\rvert\to\infty$	$\lvert Z\rvert\to\infty$	v nekonečnu
	$f>a>0$	$a'<0$	$\lvert y'\rvert>\lvert y\rvert$	$Z>1$	vzpřímený ($Z>0$) a zdánlivý ($a'<0$)
vypuklé, $f<0$	$a>0$	$f<a'<0$	$\lvert y'\rvert<\lvert y\rvert$	$Z<1$	vzpřímený ($Z>0$) a zdánlivý ($a'<0$)

Př. 1

Předmět o velikosti 1 cm je umístěn ve vzdálenosti 6 cm od kulového zrcadla s poloměrem křivosti 8 cm. Vypočti zvětšení a urči vlastnosti obrazu, je-li zrcadlo: **a)** duté, **b)** vypuklé.

a) $y=1\,\text{cm};\ a=6\,\text{cm};\ f=\frac{r}{2}=4\,\text{cm};\ Z=?$

$Z=-\frac{f}{a-f},\ Z=-\frac{4}{6-4}=-2$

$Z=\frac{y'}{y}\Rightarrow y'=Z\cdot y,\ \{y'\}=-2\cdot 1=-2;\ y'=-2\,\text{cm}$

Obraz je zvětšený ($y'=-2$ cm), převrácený (Z je záporné) a skutečný.

b) $y=1\,\text{cm};\ a=6\,\text{cm};\ f=\frac{r}{2}=-4\,\text{cm};\ Z=?$

$Z=-\frac{f}{a-f},\ Z=-\frac{4}{6-(-4)}=0{,}4$

$Z=\frac{y'}{y}\Rightarrow y'=Z\cdot y,\ \{y'\}=0{,}4\cdot 1=0{,}4;\ y'=0{,}4\,\text{cm}$

Obraz je zmenšený ($y'=0{,}4$ cm), přímý (Z je kladné) a zdánlivý.

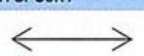
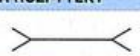
Zobrazení tenkou čočkou

Při zobrazování pomocí čoček se uplatňuje lom světelných paprsků, na rozdíl od zrcadel, kde se uplatňoval pouze odraz paprsků. Čočky jsou obvykle vyrobeny ze skla nebo z materiálu, který má větší index lomu než okolní prostředí. Čočky dělíme na:

- **SPOJNÉ ČOČKY (SPOJKY)**, které mění rovnoběžný svazek paprsků po průchodu na svazek sbíhavý (jsou ve středu tlustější),
- **ROZPTYLNÉ ČOČKY (ROZPTYLKY)**, které mění rovnoběžný svazek paprsků po průchodu na svazek rozbíhavý (jsou ve středu tenčí).

TENKÁ ČOČKA je čočka, jejíž tloušťka je zanedbatelná oproti ohniskové vzdálenosti.

Dutovypuklá nebo vypuklodutá spojka se nazývá také **MENISKUS**.

ZNAČKA SPOJKY	ZNAČKA ROZPTYLKY
	

	název čočky	r_1	r_2
	dvojvypuklá spojka	+	+
	ploskovypuklá spojka	∞	+
	dutovypuklá spojka	−	+
	vypuklodutá spojka	+	−
	dvojdutá rozptylka	−	−
	ploskodutá rozptylka	∞	−
	vypuklodutá rozptylka	+	−
	dutovypuklá rozptylka	−	+

Poloměry r_1, r_2 str. 164, znaménková konvence str. 165.

STŘEDY KŘIVOSTI C_1, C_2 jsou středy křivosti kulových optických ploch, které čočku ohraničují.

OPTICKÁ OSA čočky o je přímka procházející středy křivosti.

VRCHOLY ČOČKY V_1, V_2 jsou průsečíky optické osy s optickými plochami ohraničujícími čočku.

POLOMĚRY KŘIVOSTI čočky r_1, r_2 jsou poloměry křivosti optických ploch ohraničujících čočku (znaménka r_1, r_2, znaménková konvence, tab. str. 165).

OPTICKÝ STŘED čočky je střed úsečky $V_1 V_2$.

OHNISKO ČOČKY F, resp. F' je bod na optické ose, v němž se světelné paprsky rovnoběžné s optickou osou protínají po průchodu čočkou. Stejně tak paprsky jdoucí ohniskem se po průchodu čočkou lámou tak, že postupují s optickou osou rovnoběžně.

PŘEDMĚTOVÝ PROSTOR je prostor, ve kterém je umístěn předmět, z tohoto prostoru vstupují do čočky světelné paprsky. Obvykle je nalevo od čočky.

OBRAZOVÝ PROSTOR je prostor, do kterého vstupují světelné paprsky po průchodu čočkou. Obrazový prostor leží obvykle napravo od čočky. Leží v něm skutečný obraz.

Paprsky v předmětovém prostoru rovnoběžné s optickou osou směřují po průchodu spojkou do **OBRAZOVÉHO OHNISKA** F'. Vzdálenost $|F'O| = f'$ nazýváme **OBRAZOVÁ OHNISKOVÁ VZDÁLENOST**.

Paprsky procházející **PŘEDMĚTOVÝM OHNISKEM** F spojky v předmětovém prostoru se při průchodu čočkou lámou tak, že jsou rovnoběžné s optickou osou. Vzdálenost $|OF| = f$ nazýváme **PŘEDMĚTOVÁ OHNISKOVÁ VZDÁLENOST**.

PARAXIÁLNÍ PAPRSKY jsou paprsky v blízkosti optické osy svírající s ní tak malé úhly α, že hodnoty $\sin\alpha$ a $\mathrm{tg}\,\alpha$ lze nahradit hodnotami úhlů α v radiánech (str. 161). Paraxiální paprsky zaručují ideální optické zobrazení.

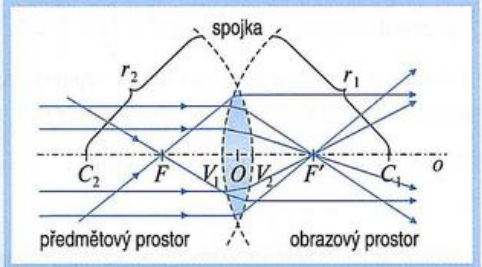
PARAXIÁLNÍ PROSTOR je prostor v blízkosti optické osy, v němž se šíří paraxiální paprsky.

OHNISKOVÁ VZDÁLENOST čočky f je vzdálenost ohniska od optického středu čočky O. Je-li v předmětovém i obrazovém prostoru stejné prostředí, platí pro tenkou čočku $f = f'$, tj. předmětová ohnisková vzdálenost je shodná s obrazovou ohniskovou vzdáleností.

PŘEDMĚTOVÁ VZDÁLENOST a je vzdálenost optického středu čočky O od bodu A zobrazovaného předmětu ležícího na optické ose, $a = |AO|$.

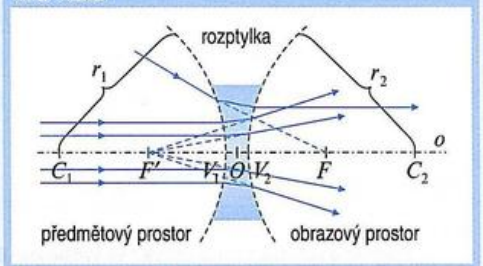
OBRAZOVÁ VZDÁLENOST a' je vzdálenost optického středu čočky O od bodu A' obrazu ležícího na optické ose, $a' = |A'O|$.

SPOJKA



Rovnoběžné paprsky se po průchodu spojkou protínají v **OBRAZOVÉM OHNISKU** F' (ohnisko je skutečné).

ROZPTYLKA

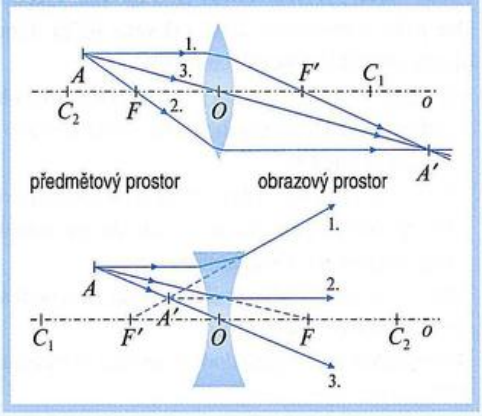


Rovnoběžné paprsky jsou po průchodu rozptylkou rozbíhavé a při zpětném prodloužení se protínají v zdánlivém **OBRAZOVÉM OHNISKU** F', které leží v předmětovém prostoru.

U rozptylky leží **PŘEDMĚTOVÉ OHNISKO** F v obrazovém prostoru a sbíhavé paprsky, které do něj míří, jsou po průchodu rozptylkou rovnoběžné s optickou osou.

Optická plocha vymezená poloměrem křivosti r_1 je v předmětovém prostoru, plocha vymezená poloměrem r_2 je v obrazovém prostoru. Není-li řečeno jinak, předmětový prostor je prostor vlevo od čočky.

ZOBRAZENÍ ČOČKAMI

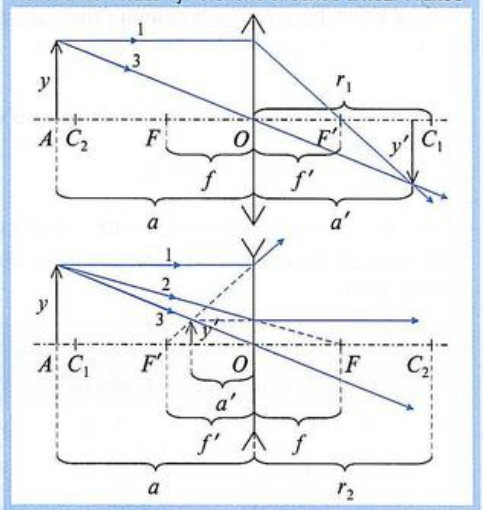


VÝŠKU PŘEDMĚTU označujeme znakem y.
VÝŠKU OBRAZU označujeme znakem y'.
PŘÍČNÉ ZVĚTŠENÍ Z je definováno jako poměr výšky obrazu a výšky předmětu: $Z = \frac{y'}{y}$.

Ke geometrické konstrukci obrazu vytvořeného **TENKOU ČOČKOU** používáme tři **VÝZNAČNÉ PAPRSKY**:

1. Paprsky v předmětovém prostoru rovnoběžné s optickou osou, které se při průchodu čočkou lámou tak, že u spojky směřují do obrazového ohniska F' v obrazovém prostoru anebo u rozptylky směřuje jejich zpětné prodloužení do obrazového ohniska F' v předmětovém prostoru.
2. Paprsky procházející předmětovým ohniskem F spojky v prostoru předmětovém se při průchodu čočkou lámou tak, že jsou v obrazovém prostoru rovnoběžné s optickou osou. Paprsky v předmětovém prostoru rozptylky směřující do předmětového ohniska F se při průchodu čočkou lámou tak, že v obrazovém prostoru jdou rovnoběžně s optickou osou.
3. Paprsky procházející optickým středem O, které při průchodu čočkou nemění svůj směr.

Konstrukce obrazu vytvořeného **SPOJKOU** a **ROZPTYLKOU**



Pro konstrukci obrazu postačují dva význačné paprsky. Třetí význačný paprsek můžeme použít ke kontrole správnosti geometrické konstrukce.
Dále při konstrukci obrazu využíváme poznatek, že bod ležící na optické ose se zobrazí opět na optickou osu.

ZNAMÉNKOVÁ KONVENCE		
VELIČINA	...MÁ KLADNOU HODNOTU	...MÁ ZÁPORNOU HODNOTU
a	je-li předmět vlevo od čočky (před čočkou)	je-li předmět vpravo od čočky (za čočkou)
a'	je-li obraz vpravo od čočky (obraz je skutečný)	je-li obraz vlevo od čočky (obraz je zdánlivý)
f	$f > 0$ pro spojky	$f < 0$ pro rozptylky
y	nad optickou osou	pod optickou osou
y'	nad optickou osou	pod optickou osou
r_1, r_2	je-li příslušná optická plocha vypuklá vzhledem k okolnímu prostředí	je-li příslušná optická plocha dutá vzhledem k okolnímu prostředí
r_1, r_2	Pozn.: Vypuklé optické plochy má spojka, duté optické plochy má rozptylka na obrázcích na str. 164. Ale dutovypuklá spojka v tabulce na str. 163 má horní plochu dutou, dolní plocha je vypuklá.	

OPTICKÁ MOHUTNOST φ je převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti čočky f. Pro optickou mohutnost platí:

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

kde n_1 je index lomu okolního prostředí, n_2 je index lomu čočky. Okolní prostředí čočky je nejčastěji vzduch, proto $n_1 = 1$.

Při výpočtu optické mohutnosti nebo ohniskové vzdálenosti je třeba dodržovat **ZNAMÉNKOVOU KONVENCI**.

JEDNOTKOU OPTICKÉ MOHUTNOSTI je m^{-1} nebo **DIOPTRIE** (D). Jednu dioptrii mají čočky s ohniskovou vzdáleností 1 metr. Optická mohutnost spojek je kladná (spojky mají kladné dioptrie). Optická mohutnost rozptylek je záporná (rozptylky mají záporné dioptrie).

Je-li jedna stěna čočky plochá (např. $r_1 \to \infty$), pak $\frac{1}{r_1} \to 0$ a $\varphi = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot \frac{1}{r_2}$.

ZOBRAZOVACÍ ROVNICE PRO TENKOU ČOČKU umístěnou ve vzduchu pro zobrazení v paraxiálním prostoru má tvar:

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

Pro **PŘÍČNÉ ZVĚTŠENÍ TENKÉ ČOČKY** Z platí tyto vztahy:

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

Při výpočtu pomocí zobrazovací rovnice a vztahů pro zvětšení tenké čočky je třeba dodržovat **ZNAMÉNKOVOU KONVENCI** (str. 165).

VLASTNOSTI OBRAZU při zobrazení čočkou:

- Je-li $Z<0$, je obraz převrácený.
  Je-li $Z>0$, je obraz přímý.
- Je-li $|Z|>1$, je obraz zvětšený.
  Je-li $|Z|<1$, je obraz zmenšený.
- Vzniká-li obraz protnutím sbíhajících se paprsků, je skutečný a leží v obrazovém prostoru.
- Vzniká-li obraz protnutím rozbíhajících se paprsků, je zdánlivý a leží v předmětovém prostoru.

ZOBRAZOVÁNÍ ČOČKAMI

Čočka	Poloha předmětu	Poloha obrazu	Velikost obrazu	Zvětšení	Obraz je:
spojka, $f>0$	$a>r$	$r>a'>f$	$\lvert y'\rvert<\lvert y\rvert$	$\lvert Z\rvert<1$	převrácený ($Z<0$) a skutečný ($a'>0$)
	$a=r$	$a'=r$	$\lvert y'\rvert=\lvert y\rvert$	$\lvert Z\rvert=1$	převrácený ($Z<0$) a skutečný ($a'>0$)
	$r>a>f$	$a'>r$	$\lvert y'\rvert>\lvert y\rvert$	$\lvert Z\rvert>1$	převrácený ($Z<0$) a skutečný ($a'>0$)
	$a=f$	$a'\to\infty$	$\lvert y'\rvert\to\infty$	$\lvert Z\rvert\to\infty$	v nekonečnu
	$f>a>0$	$a'<0$	$\lvert y'\rvert>\lvert y\rvert$	$Z>1$	vzpřímený ($Z>0$) a zdánlivý ($a'<0$)
rozptylka, $f<0$	$a>0$	$f<a'<0$	$\lvert y'\rvert<\lvert y\rvert$	$Z<1$	vzpřímený ($Z>0$) a zdánlivý ($a'<0$)

VADY ZOBRAZENÍ čoček, též **ABERACE ZOBRAZENÍ** jsou odchylky od dokonalého zobrazení.

- **OTVOROVÁ VADA** se projevuje tím, že bod se nezobrazí jako bod, ale jako ploška.
- **BAREVNÁ VADA** se projevuje tím, že bod se zobrazuje jako různobarevná ploška.
- **ASTIGMATISMUS** se projevuje zkreslením obdélníku tak, že jeho vrcholy změní polohu, protáhnou se nebo potlačí.

Vady zobrazení se korigují pomocí čočkových soustav, které se skládají z čoček odlišných vlastností.

OTVOROVÁ VADA je způsobená tím, že reálné svazky světelných paprsků nejsou paraxiální.

BAREVNÁ VADA je důsledkem závislosti indexu lomu světla na jeho vlnové délce, proto je poloha ohniska pro každou barvu jiná. Nejblíže čočky je ohnisko pro fialové světlo, nejdál je ohnisko pro červené světlo.

ASTIGMATISMUS vzniká při úzkém neosovém svazku paprsků.

Př. 2

Urči ohniskovou vzdálenost a optickou mohutnost dutovypuklé čočky o poloměrech křivosti 50 cm a 80 cm. Použité sklo má index lomu 1,6.

Úloha má dvě řešení:

1) dutovypuklá spojka $r_1=-80\text{ cm}=-0{,}8\text{ m}$; $r_2=50\text{ cm}=0{,}5\text{ m}$; $n_2=1{,}6$; $n_1=1$

2) dutovypuklá rozptylka $r_1=-50\text{ cm}=-0{,}5\text{ m}$; $r_2=80\text{ cm}=0{,}8\text{ m}$; $n_2=1{,}6$; $n_1=1$

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

- Úlohu řešíme pro okolní prostředí – vzduch, tedy $n_1=1$.

1) $\{\varphi\}=\left(\frac{1{,}6}{1}-1\right)\cdot\left(\frac{1}{-0{,}8}+\frac{1}{0{,}5}\right)=0{,}45$

$\varphi=0{,}45\text{ D}$

2) $\{\varphi\}=(1{,}6-1)\cdot\left(\frac{1}{-0{,}5}+\frac{1}{0{,}8}\right)=-0{,}45$

$\varphi=-0{,}45\text{ D}$

Rozptylka má optickou mohutnost −0,45 dioptrie, spojka +0,45 dioptrie.

Př. 3

Spojná čočka vytváří na stínítku obraz, který je dvakrát větší než předmět.
Vzdálenost mezi čočkou a stínítkem je 24 cm. Urči ohniskovou vzdálenost čočky.

$a' = 24$ cm; $Z = -2$; $f = ?$

$$Z = -\frac{a'-f}{f} \Rightarrow f = \frac{a'}{1-Z}; \{f\} = \frac{24}{1-(-2)} = 8; f = 8 \text{ cm}$$

Ohnisková vzdálenost spojné čočky je 8 cm.

Pokud spojka vytvoří obraz na stínítku, znamená to, že je skutečný, ale tento skutečný obraz spojky je vždy převrácený, proto $Z = -2$.

Oko

OKO je z hlediska optiky tvořené spojnou čočkou (čočkovou soustavou) s měnitelnou ohniskovou vzdáleností, která vytváří obrazy předmětů na sítnici uvnitř oka. Obrazy jsou zmenšené, převrácené a skutečné.

OPTICKÁ MOHUTNOST oka se pohybuje mezi 60 až 70 dioptriemi a mění se v závislosti na akomodaci.

OPTICKÁ SOUSTAVA OKA je tvořena rohovkou, očním mokem, oční čočkou a sklivcem. Oční čočka samotná má optickou mohutnost v rozmezí 22 až 32 dioptrií.

AKOMODACE (přizpůsobení) oka je schopnost měnit jeho optickou mohutnost tak, aby se předměty nacházející se v různých vzdálenostech zobrazily vždy na sítnici. Díváme-li se na vzdálené předměty, oční čočka má malé zakřivení a akomodace oka je menší. Pozorujeme-li předměty blízké, oční čočka má velké zakřivení a akomodace oka je větší.

DALEKÝ neboli **VZDÁLENÝ BOD OKA** je bod na optické ose oka, který se zobrazí ostře na sítnici oka při minimální (nulové) akomodaci. Pro zdravé oko se tato vzdálenost blíží k nekonečnu. **BLÍZKÝ BOD OKA** je bod na optické ose, který se ostře zobrazí na sítnici při maximální akomodaci. Je to nejmenší vzdálenost, na kterou může oko akomodovat. Pro zdravé oko je tato vzdálenost přibližně 15 cm.

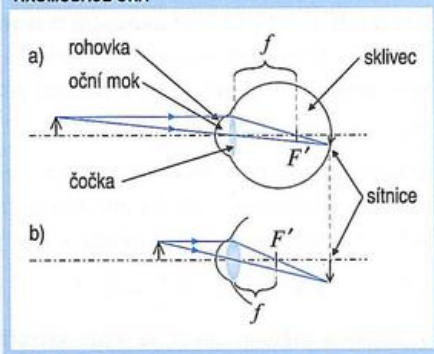
KONVENČNÍ ZRAKOVÁ VZDÁLENOST d je nejmenší vzdálenost oka od předmětu, z níž lze číst, psát a pozorovat předměty delší dobu bez velké únavy. Dohodou je konvenční zraková vzdálenost stanovena na $d = 25$ cm.

KRÁTKOZRAKOST oka se projevuje tím, že daleký bod oka je v konečné vzdálenosti, tj. obrazy vzdálených předmětů (nacházejících se za dalekým bodem) vznikají před sítnicí a oko tyto předměty vidí rozmazaně. Blízký bod je posunut blíže k oku. Vada se koriguje brýlemi s rozptylkami.

DALEKOZRAKOST oka se projevuje tím, že blízký bod je posunut dále od oka a při minimální (nulové) akomodaci oka vznikají obrazy vzdálených předmětů za sítnicí. Vada se koriguje brýlemi se spojkami.

ZORNÝ ÚHEL τ svírají paprsky vycházející z okrajových bodů předmětu procházející optickým středem oční čočky.

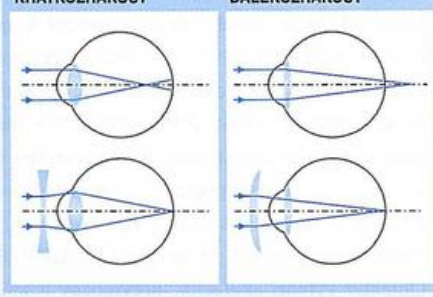
AKOMODACE OKA



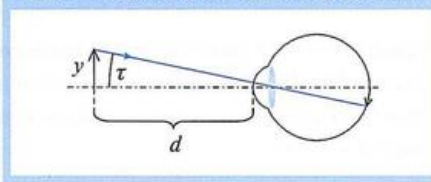
a) menší akomodace – díváme-li se na vzdálené předměty, ohnisková vzdálenost f je větší;
b) větší akomodace – nablízko (blízké předměty), ohnisková vzdálenost f je menší.

Vzdálený a blízký bod oka se s věkem mění. Vzdálený bod se přibližuje, blízký vzdaluje.

KRÁTKOZRAKOST **DALEKOZRAKOST**



ZORNÝ ÚHEL τ – oko je schopno rozlišit dva body, jestliže je vidí pod zorným úhlem $\tau > 1'$. Je-li $\tau < 1'$, oba body splývají. Vidí-li oko dva body vzdálené 25 cm pod úhlem $\tau = 1'$, jejich vzájemná vzdálenost je 0,072 mm.



Lupa

Zorný úhel, pod kterým vidíme předmět okem, lze zvětšit pomocí optických přístrojů. Optické přístroje charakterizuje jejich **ÚHLOVÉ ZVĚTŠENÍ** $\gamma = \frac{\tau'}{\tau}$, kde τ je zorný úhel při pozorování okem, τ' je zvětšený zorný úhel při pozorování optickým přístrojem.

LUPA je nejjednodušší optický přístroj, její optickou soustavu tvoří jediná spojná čočka s ohniskovou vzdáleností f, přičemž obvykle je $f < d = 25$ cm (konvenční zraková vzdálenost). Umístíme-li malý pozorovaný předmět těsně před ohnisko, lupou vytvoříme zdánlivý, přímý a zvětšený předmět.

Pro **ÚHLOVÉ ZVĚTŠENÍ LUPY** pak platí: $\gamma \doteq \frac{d}{a}$.

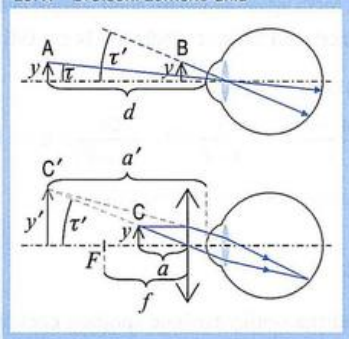
V ideálním případě by měl být obraz vytvořený lupou alespoň v takové vzdálenosti a' od oka, aby nedocházelo k jeho únavě, tj. $|a'| = d = 25$ cm. Pro tuto vzdálenost platí pro **ÚHLOVÉ ZVĚTŠENÍ LUPY** vztah: $\gamma \doteq \frac{d}{a} = \frac{d}{f} + 1$.

Zdánlivý a zvětšený obraz se může vytvořit také ve vzdálenosti $a' \to \infty$, přibližujeme-li předmět těsně k ohnisku lupy (vyplývá to ze zobrazovací rovnice spojky, str. 166).

Pro **ÚHLOVÉ ZVĚTŠENÍ LUPY** pak platí vztah: $\gamma \doteq \frac{d}{f}$.

Zvětšení lupy je omezeno vadami čoček. Maximální úhlové zvětšení lupy je asi 6krát.

LUPA – zvětšení zorného úhlu



Zorný úhel τ předmětu nacházejícího se v konvenční zrakové vzdálenosti d (poloha A) lze zvětšit na τ', přiblížíme-li předmět blíže k oku (poloha B). Oko však není schopno akomodovat se na tak malou vzdálenost. Přiložením lupy těsně před oko zdánlivě posuneme předmět dál od oka, aniž se změní jeho zorný úhel τ' (poloha C').

Odvození vztahu pro úhlové zvětšení lupy γ:

Pro malé úhly τ, τ' platí (obr. nahoře):

$\tau \doteq \operatorname{tg}\tau = \frac{y}{d}$, $\tau' \doteq \operatorname{tg}\tau' = \frac{y}{a}$.

Pro úhlové zvětšení platí: $\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\frac{y}{a}}{\frac{y}{d}} = \frac{d}{a}$.

Dosazením za a ze zobrazovací rovnice (str. 166), kde položíme $a' = -d$, obdržíme druhý vztah pro úhlové zvětšení lupy. Dosazením za $a = f$ do prvního vztahu obdržíme třetí vztah pro úhlové zvětšení lupy.

Mikroskop

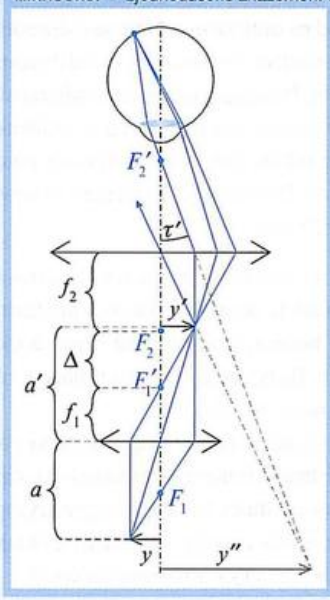
MIKROSKOP je optický přístroj určený k pozorování velmi malých předmětů, jejichž velikost je pod mezí rozlišitelnosti pouhým okem. Optická soustava mikroskopu se skládá ze dvou spojných čoček. První spojka má malou ohniskovou vzdálenost, nachází se blíže pozorovanému objektu a nazývá se **OBJEKTIV**. Druhá spojka má větší ohniskovou vzdálenost, nachází se v blízkosti oka a nazývá se **OKULÁR**.

Pozorovaný předmět se umístí v blízkosti ohniska objektivu. Objektiv vytvoří skutečný, převrácený a zvětšený obraz. Mikroskop je konstruován tak, aby tento obraz vznikl v blízkosti ohniska okuláru. Okulár tak funguje jako lupa, kterou si pozorovatel prohlíží obraz vytvořený objektivem.

ÚHLOVÉ ZVĚTŠENÍ MIKROSKOPU je $\gamma = \frac{\Delta \cdot d}{f_1 \cdot f_2}$,

kde Δ je **OPTICKÝ INTERVAL**, což je vzdálenost ohnisek okuláru a objektivu $|F_1F_2|$, f_1 je ohnisková vzdálenost objektivu, f_2 je ohnisková vzdálenost okuláru, d je konvenční zraková vzdálenost ($d = 25$ cm).

MIKROSKOP – zjednodušené znázornění optické soustavy



Předmět o velikosti y je umístěn v blízkosti ohniska objektivu F_1, který vytvoří reálný obraz o velikosti y' těsně vedle ohniska okuláru F_2. Okulár vytvoří zdánlivý zvětšený obraz o velikosti y''.

Vztah pro úhlové zvětšení mikroskopu $\gamma = \frac{|y'|}{y} \cdot \frac{d}{f_2} = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{d}{f_2}$ ukazuje, že toto úhlové zvětšení je součinem příčného zvětšení objektivu $|Z_{\text{objektiv}}| = \frac{|y'|}{y} = \frac{\Delta}{f_1} = \frac{|a' - f_1|}{f_1}$ a úhlového zvětšení okuláru $\gamma_{\text{okulár}} = \frac{d}{f_2}$, tj. $\gamma = Z_{\text{objektiv}} \cdot \gamma_{\text{okulár}}$.

Mikroskopem lze dosáhnout maximální **ÚHLOVÉ ZVĚTŠENÍ** přibližně 2 000. Tuto hranici není možné překročit v důsledku difrakce světla, která **ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST** mikroskopu omezuje (str. 158), tj. nejmenší předměty, které lze pomocí mikroskopu rozeznat, mají velikost rovnu přibližně polovině vlnové délky fialového světla (200 nm = $2 \cdot 10^{-7}$ m). **ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST** optické soustavy je převrácená hodnota **ROZLIŠENÍ**, tj. nejmenší vzdálenosti dvou bodů, jejichž obrazy vytvořené soustavou lze rozlišit jako obrazy různé.

Dalekohled

DALEKOHLED je optický přístroj sloužící k pozorování vzdálených předmětů tím, že zvětšuje jejich zorný úhel. Optická soustava dalekohledu se skládá z objektivu a okuláru.

REFRAKTOR je dalekohled, jehož objektivem je spojka.

Dalekohled, jehož objektivem je duté zrcadlo, se nazývá **REFLEKTOR (NEWTONŮV DALEKOHLED)**.

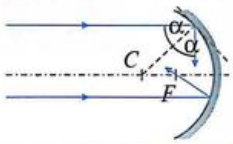
Základním typem refraktorů je **HVĚZDÁŘSKÝ (KEPLERŮV) DALEKOHLED**. Objektivem je spojka s velkou ohniskovou vzdáleností f_1. Okulár je spojka s malou ohniskovou vzdáleností f_2. Obraz velmi vzdáleného předmětu vzniká v ohnisku F_1' objektivu. Tento obraz pozorujeme okulárem pod zvětšeným zorným úhlem. Takto vzniklý obraz je převrácený, při pozorování hvězd to ovšem nevadí. Pro úhlové zvětšení hvězdářského dalekohledu zaostřeného na nekonečno platí $\gamma = \frac{f_1}{f_2}$.

Dalším typem refraktoru je **HOLANDSKÝ (GALILEŮV) DALEKOHLED**. Liší se od Keplerova dalekohledu tím, že jako okuláru je použito rozptylky. Obraz pozorovaný Galileovým dalekohledem je přímý. Pro úhlové zvětšení platí $\gamma = \frac{f_1}{|f_2|}$.

Př. 4

Paraxiální paprsky rovnoběžné s optickou osou procházejí po odrazu ohniskem dutého kulového zrcadla. Platí to také pro paprsky, které nejsou paraxiální?

Neplatí! Čím jsou tyto paprsky dál od optické osy, tím blíž k vrcholu zrcadla se lámou, protože platí zákon odrazu.



Odvození vztahu pro úhlové zvětšení mikroskopu γ:

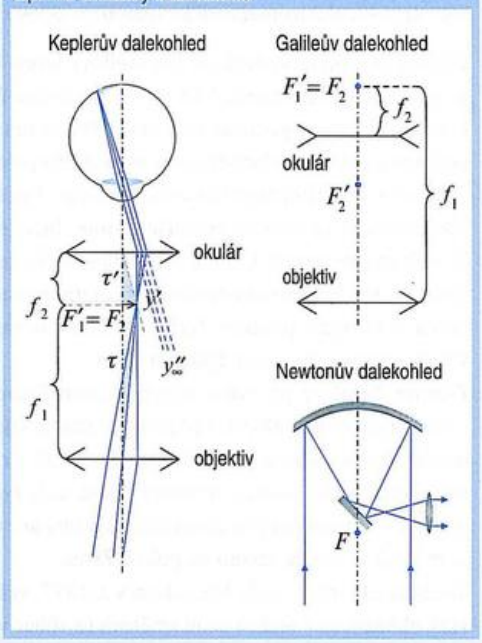
$\gamma = \frac{\tau'}{\tau}$; $\tau \doteq \operatorname{tg}\tau = \frac{y}{d}$; $\tau' \doteq \operatorname{tg}\tau' \doteq \frac{|y'|}{f_2} \Rightarrow$

$\Rightarrow \gamma = \frac{|y'|}{y} \cdot \frac{d}{f_2}$. Ze vztahu pro příčné zvětšení tenké čočky (str. 166) plyne $\frac{|y'|}{y} = \frac{a' - f_1}{f_1} \doteq \frac{\Delta}{f_1}$.

Dosadíme do výrazu pro γ a obdržíme vztah:

$\gamma = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{d}{f_2}$.

Optické soustavy dalekohledů

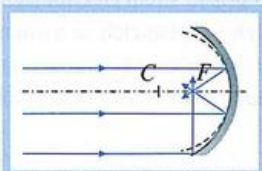


Odvození úhlového zvětšení dalekohledu γ:

$\gamma = \frac{\tau'}{\tau}$; $\tau \doteq \operatorname{tg}\tau = \frac{y'}{f_1}$; $\tau' \doteq \operatorname{tg}\tau' = \frac{y'}{f_2}$.

Dosadíme za τ a τ' do vztahu pro úhlové zvětšení a obdržíme vztah $\gamma = \frac{f_1}{f_2}$.

TRIEDR je Keplerův dalekohled, v němž se obraz převrátí průchodem optickými hranoly.



PARABOLICKÉ ZRCADLO je tvořené rotačním paraboloidem. Paprsky rovnoběžné s optickou osou procházejí po odrazu ohniskem parabolického zrcadla. Využívá se v reflektorech.

7.0 Speciální teorie relativity

Proč vznikla speciální teorie relativity?

Fyzika se na základě MECHANICKÉHO OBRAZU SVĚTA, o jehož správnosti nikdo nepochyboval, rozvíjela úspěšně 200 let. Jedním z hlavních výsledků Maxwellovy teorie elektromagnetického pole však bylo zjištění, že elektrické a magnetické silové působení se v prostoru šíří **konečnou rychlostí**, která je rovna rychlosti šíření elektromagnetických vln (Maxwellova teorie str. 142, elektromagnetická interakce str. 143).

Dalším důležitým výsledkem Maxwellovy teorie bylo zjištění, že světlo je elektromagnetické vlnění v rozsahu 380–760 nm. Poznání elektromagnetické podstaty světla, a tím i sjednocení teoretické optiky s elektrodynamikou ve druhé polovině 19. století patří k největším objevům ve fyzice vůbec. Fyzikové si tehdy představovali, že světelné vlnění je vlastně vlnění **éteru**, kterým je zaplněn celý vesmír. O éteru se předpokládalo, že je absolutně klidný, a pro fyziku reprezentoval absolutní prostor. Rychlost světla byla podle představ fyziků rychlostí šíření světelného vlnění v tomto absolutně klidném éteru.

Protože Země se při svém pohybu kolem Slunce vzhledem k éteru pohybuje rychlostí přibližně 30 km za sekundu, podle mechanického zákona o skládání rychlostí (str. 19) se rychlost světla měla skládat s rychlostí Země, tedy rychlost světla měřená ve směru pohybu Země měla být jiná než rychlost světla měřená ve směru kolmo na pohyb Země.

Tento rozdíl měřil A. A. Michelson v r. 1887, veškeré pokusy však ukázaly, že v těchto dvou směrech (a vůbec ve všech směrech bez ohledu na směr pohybu Země) byla rychlost světla úplně stejná. I když se fyzikové představy éteru nakonec vzdali, ve fyzice zůstal neřešitelný problém potvrzovaný mnoha experimenty: **pro rychlost pohybu světelného a elektromagnetického vlnění neplatí klasický zákon o skládání rychlostí.**

Fyzika se octla v úzkých a musel se objevit vědec, který se nebál říci, že **rychlost světla je stejná ve všech inerciálních soustavách** bez ohledu na jejich rychlost. Tento fakt odporující klasické mechanice položil za jeden z pilířů nové teorie. Tímto vědcem byl A. Einstein, který v r. 1905 publikoval práci, v níž zobecnil Maxwellovu teorii pro případ šíření elektromagnetických vln ve vztažných soustavách pohybujících se rovnoměrně přímočaře. Tato práce byla základem SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY, která vytvořila nový relativistický obraz světa.

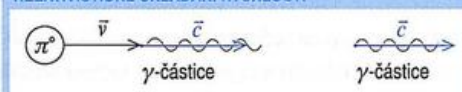
Osnova kapitoly:

- Proč vznikla speciální teorie relativity?
- Principy speciální teorie relativity
- Relativistická kinematika
- Relativnost současnosti, dilatace času
- Kontrakce délky
- Relativistické skládání rychlostí
- Relativistická dynamika
- Relativistická hmotnost a hybnost, klidová hmotnost a energie
- Einsteinův vztah mezi energií a hmotností

MECHANICKÝ OBRAZ SVĚTA (str. 22, 28), který byl součástí klasické mechaniky, zahrnoval tyto modely prostoru, času a interakce mezi fyzikálními objekty:

1. představu absolutního prostoru, který existuje nezávisle na tom, co se v něm děje, na tom, jaké síly v něm působí;
2. představu absolutního času, který plyne sám o sobě nezávisle na hmotě a pohybu a žádné jevy jej neovlivňují;
3. síly působící okamžitě na dálku, tj. silové působení mezi fyzikálními objekty se šíří nekonečnou rychlostí.

RELATIVISTICKÉ SKLÁDÁNÍ RYCHLOSTÍ



experimentální fakt: $\vec{v} + \vec{c} \stackrel{?}{=} \vec{c}$

V experimentu v r. 1964 fyzikové v CERNu* zkoumali elementární částice π^0 (neutrální piony) pohybující se rychlostí $v = 0{,}999c$ vzhledem k laboratoři. Každý pion vyslal při svém rozpadu γ-záření o rychlosti c. Rychlost vyzářené γ-částice vzhledem k laboratoři by měla být podle zákona skládání rychlostí platného v klasické mechanice (str. 19) rovna $1{,}999c$. Ve skutečnosti byla tato rychlost rovna jen rychlosti c. Tyto a jiné experimenty potvrdily, že rychlost elektromagnetického záření je ve dvou různých inerciálních vztažných soustavách vždy stejná bez ohledu na to, jakou rychlostí se pohybují vůči sobě navzájem.

* CERN je evropská laboratoř fyziky elementárních částic poblíž Ženevy

Rychlost světla $c \doteq 300\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}} = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Principy speciální teorie relativity (STR)

Speciální teorie relativity je založena na dvou principech:

1. PRINCIP STÁLÉ RYCHLOSTI SVĚTLA: Ve všech inerciálních vztažných soustavách má rychlost světla ve vakuu stejnou velikost, která nezávisí na směru šíření a na pohybu světelného zdroje.
2. PRINCIP RELATIVITY: Ve všech inerciálních vztažných soustavách mají fyzikální zákony stejný tvar.

Z principu relativity vyplývá, že žádným fyzikálním pokusem provedeným uvnitř inerciální vztažné soustavy nelze rozhodnout, zda se tato soustava vzhledem k jiné soustavě pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem, nebo je v klidu.

Speciální teorie relativity rozšířila platnost Galileiho PRINCIPU RELATIVITY (str. 28), který se vztahoval na zákony mechaniky, na všechny fyzikální zákony. Rozšířený princip relativity formuloval již několik let před A. Einsteinem francouzský fyzik H. J. Poincaré jako požadavek, aby Maxwellovy rovnice (str. 142) a vůbec všechny fyzikální zákony, mají-li být správné, měly ve všech inerciálních vztažných soustavách stejný tvar. Vyplývá to z principu, že žádná inerciální soustava nemůže být preferována jako absolutní, protože všechny jsou z fyzikálního hlediska rovnocenné a přírodní zákony musejí být stejné pro všechny pozorovatele nacházející se v kterékoliv z těchto soustav.

7.1 Relativistická kinematika

RELATIVISTICKÁ KINEMATIKA je součástí speciální teorie relativity a popisuje pohyby fyzikálních objektů vzhledem k pohybujícím se inerciálním vztažným soustavám pro jakékoliv rychlosti menší nebo rovné rychlosti světla. Nejznámějšími výsledky relativistické kinematiky jsou:

- relativnost současnosti,
- dilatace času (relativistické zpomalení chodu hodin),
- kontrakce délky (relativistické zkrácení délky),
- relativistické skládání rychlostí.

RELATIVITA nebo RELATIVNOST z hlediska speciální teorie relativity znamená, že např. délka fyzikálního objektu, jeho hmotnost a čas v objektu, který se vzhledem k Zemi pohybuje velkou rychlostí, mohou být jiné z pohledu pozorovatele nacházejícího se v tomto objektu než z pohledu pozorovatele na Zemi.

Relativnost současnosti

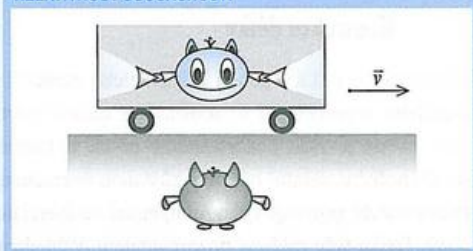
Z principu stálé rychlosti světla plyne RELATIVNOST SOUČASNOSTI: Dvě současné události, které nastaly v různých místech zvolené inerciální vztažné soustavy, obecně nejsou současné v jiné inerciální vztažné soustavě, tzn. to, co je současné pro jednoho pozorovatele, nemusí být současné pro jiného pozorovatele.

Současnost dvou nesoumístných událostí je tedy relativní. V některé inerciální vztažné soustavě tyto události mohou být současné, v jiné ne. Absolutní současnost dvou událostí (tj. jsou-li dvě události současné v jedné inerciální vztažné soustavě, pak jsou současné i ve všech ostatních inerciálních vztažných soustavách) v relativistické kinematice tedy neplatí.

SOUMÍSTNÉ UDÁLOSTI jsou události nastávající v dané inerciální soustavě na tomtéž místě. NESOUMÍSTNÉ UDÁLOSTI jsou události, které se nestaly na stejném místě.

Jestliže však dvě současné události nastaly ve stejném místě dané inerciální soustavy, pak jsou současné ve všech inerciálních vztažných soustavách.

RELATIVNOST SOUČASNOSTI



Ve vagonu vlaku, který jede stálou rychlostí, stojí uprostřed člověk se dvěma baterkami, jednou namířenou na stěnu ve směru jízdy, druhou na stěnu proti směru jízdy. Obě baterky zároveň rozsvítí. Z jeho pohledu dopadnou paprsky světla na stěny současně (světlo musí urazit oběma směry stejnou vzdálenost). Z pohledu vnějšího pozorovatele, který se nepohybuje, ale tyto dopady současné nejsou. Oba paprsky se vzhledem k němu pohybují opět stejnou rychlostí, ale jednomu z nich jde stěna „naproti" a druhému „utíká". Události pro pozorovatele venku nejsou současné.

Dilatace času

DILATACE ČASU je relativistické zpomalení chodu hodin, které se vzhledem k pozorovateli pohybují.
Pozorovatel P pozoruje určitý děj ve vztažné soustavě S', která se vzhledem k soustavě S pohybuje rychlostí $\vec{v}$. Pozorovatel P naměří dobu trvání tohoto děje Δt. Pozorovatel P' nacházející se v soustavě S' naměří dobu trvání téhož děje $\Delta t'$. Pro naměřené doby platí $\Delta t' < \Delta t$ a dále vztah:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$ kde c je velikost rychlosti světla.

DILATACE ČASU znamená, že časový interval Δt mezi dvěma nesoumístnými událostmi je vždy delší než časový interval $\Delta t'$ mezi těmito událostmi měřený pozorovatelem, pro kterého jsou obě události soumístné. Z hlediska pozorovatele P jsou události „vyslání světelného signálu" a „příjem světelného signálu" nesoumístné, z hlediska pozorovatele P' jsou tyto události soumístné.

Dilatace času byla v r. 1971 ověřena pomocí atomových hodin, které byly přenášeny letadlem kolem Země a vzhledem k hodinám na Zemi se zpozdily o 203 ns.

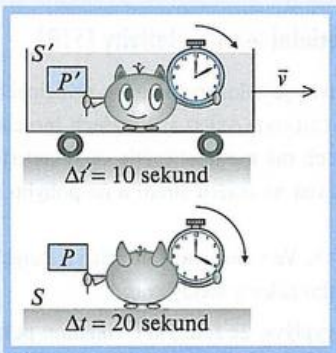
Pro rychlosti v mnohem menší, než je rychlost světla c, je $t \doteq t'$, čili v klasické (newtonovské) mechanice, kde pracujeme s malými rychlostmi, můžeme předpokládat, že čas plyne ve všech inerciálních soustavách stejně.

Kontrakce délky

KONTRAKCE DÉLKY neboli relativistické zkrácení délky předmětu v pohybující se soustavě je dalším relativistickým jevem, je však pozorovatelný pouze u rozměrů ve směru pohybu, ostatní rozměry zůstanou nezměněny.
Pozorovatelé pozorují tyč v pohybující se inerciální soustavě. Délka tyče měřená pozorovatelem, vzhledem k němuž je tyč v klidu, je l', délka měřená pozorovatelem, vzhledem k němuž se tyč pohybuje, je l.
Platí $l < l'$ a velikost zkrácení je dána vztahem:

$$l = l'\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$ kde v je velikost rychlosti pohybující se soustavy, c je rychlost světla.

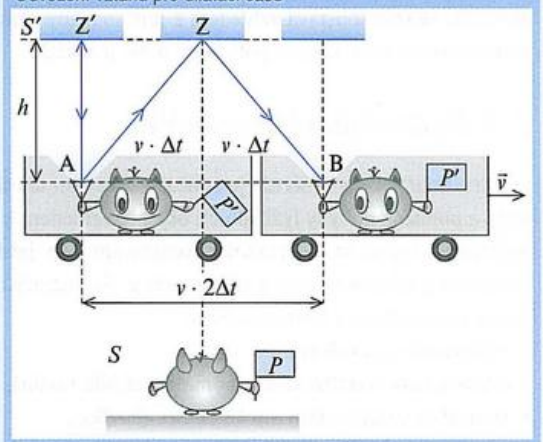
Pro rychlosti $v << c$ platí $l \doteq l'$, čili v klasické (newtonovské) mechanice, kde pracujeme s malými rychlostmi, můžeme předpokládat, že rozměry fyzikálních objektů jsou ve všech inerciálních soustavách stejné.



DILATACE ČASU

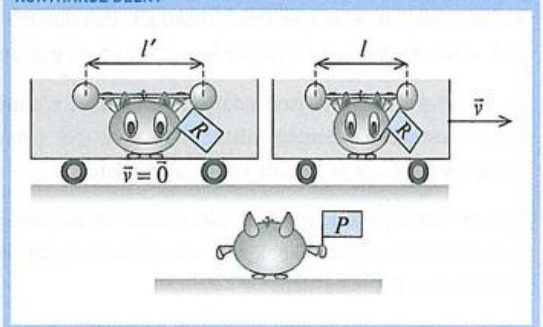
Hodiny pohybující se vzhledem k pozorovateli P jdou z jeho pohledu pomaleji než hodiny, které jsou vzhledem k tomuto pozorovateli v klidu.

Odvození vztahu pro dilataci času



Soustava S' se pohybuje rychlostí $\vec{v}$. Pozorovatel P' vyšle světelný signál kolmo na směr pohybu, který se odrazí od zrcátka a vrátí se zpět za čas $2\Delta t' = \frac{2h}{c}$, z čehož plyne $c \cdot \Delta t' = h$.
Z hlediska pozorovatele P, vzhledem k němuž se soustava S' pohybuje, projde světelný signál dráhu AZB rovnu $2\sqrt{h^2 + (v \cdot \Delta t)^2}$, kde $2\Delta t$ je čas naměřený pozorovatelem P. Protože i v jeho soustavě se světlo pohybuje rychlostí c, platí $c \cdot 2\Delta t = 2\sqrt{h^2 + (v \cdot \Delta t)^2}$. Dosazením za h obdržíme vztah $c \cdot \Delta t = \sqrt{(c \cdot \Delta t')^2 + (v \cdot \Delta t)^2}$, z čehož plyne vztah pro dilataci času.

KONTRAKCE DÉLKY



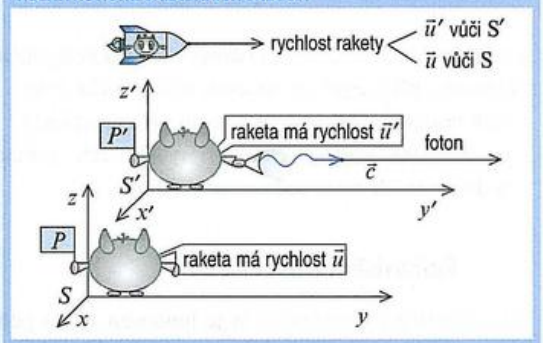
Relativistické skládání rychlostí

Inerciální vztažná soustava S' se pohybuje rychlostí $\vec{v}$ (tzv. unášivou rychlostí) vůči jiné soustavě S. Těleso nebo elementární částice se pohybuje rychlostí $\vec{u}'$ vzhledem k soustavě S' a rychlostí $\vec{u}$ vzhledem k soustavě S. Jsou-li rychlosti $\vec{v}$, $\vec{u}$ a $\vec{u}'$ rovnoběžné, platí pro jejich velikosti

EINSTEINŮV VZOREC: $u = \dfrac{u' + v}{1 + \dfrac{u'v}{c^2}}$.

Einsteinův vzorec pro relativistické skládání rychlostí platí nejen pro hmotná tělesa a částice, ale také pro fotony a byl již mnohokrát experimentálně ověřen; např. při rozpadu elementárních částic letících rychlostmi blízkými rychlosti světla (obr. s textem str. 170). Pokud je velikost rychlosti v pohybující se soustavy S' a velikost rychlosti tělesa u' vůči této soustavě mnohem menší než rychlost světla ($v << c$, $u' << c$), přechází relativistický Einsteinův vzorec ve vzorec platný v klasické fyzice, tj. $u = u' + v$. Platnost klasické (newtonovské) fyziky je omezená jen na případy těles pohybujících se malými rychlostmi ve srovnání s rychlostí světla.

RELATIVISTICKÉ SKLÁDÁNÍ RYCHLOSTÍ



Vyšle-li pozorovatel P' světelný signál (foton) o rychlosti c, jeho rychlost vzhledem k pozorovateli P bude mít rovněž velikost c. Přesvědčíme se o tom dosazením do Einsteinova vzorce za $u' = c$.

$$u = \frac{u' + v}{1 + \dfrac{u'v}{c^2}} = \frac{c + v}{1 + \dfrac{cv}{c^2}} = \frac{c + v}{\dfrac{c^2 + cv}{c^2}} = \frac{c + v}{\dfrac{c(c + v)}{c^2}} = c$$

Relativistickým skládáním rychlostí nelze překročit rychlost světla. Jestliže jedna (nebo obě) ze skládaných rychlostí u' nebo v se rovná c, pak i výsledná rychlost $u = c$.

SVĚTELNÝ ROK (ly nebo l. y. – light year) je jednotka délky používaná pro kosmické vzdálenosti. 1 ly = $9{,}460\,528 \cdot 10^{15}$ m, je to vzdálenost, kterou urazí světlo za 1 TROPICKÝ ROK (365 d 5 h 48 min 45,7 s). Průměr naší Galaxie je $9{,}8 \cdot 10^4$ ly.

Př. 1

Předpokládejme, že kosmická loď letí ze Země do centra naší galaxie podsvětelnou rychlostí $v = 0{,}999999c$. O kolik let zestárnou kosmonauté, než se dostanou do cíle své cesty?

Centrum naší galaxie je vzdáleno přibližně $2{,}7 \cdot 10^4$ l. y., tj. 27 000 světelných roků. Cesta kosmické lodi bude trvat $0{,}999999^{-1} \cdot 27\,000$ l. y. = 27 000,03 let, ovšem měřeno hodinami na Zemi. Tedy $\Delta t \doteq 27\,000$ let.

Hodiny na kosmické lodi naměří čas $\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}} = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \dfrac{(0{,}999999c)^2}{c^2}}$, kde $\Delta t \doteq 27\,000$ let.

$$\{\Delta t'\} = 27\,000 \cdot \sqrt{1 - 0{,}999999^2} = 27\,000 \cdot \sqrt{1 - 0{,}999998} = 27\,000 \cdot \sqrt{0{,}000002} = 27\,000 \cdot 0{,}00141 = 38{,}07$$

$\Delta t' = 38$ let

Kosmonauté zestárnou přibližně o 38 let.

Př. 2

Kosmická loď má na Zemi délku 100 m. Při své cestě do centra galaxie letí kolem hvězdy Vega rychlostí $v = 0{,}999999c$. Jakou délku kosmické lodi by naměřil hypotetický pozorovatel ve vztažné soustavě Vegy?

$l' = 100$ m; $l = ?$

$$l = l' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \{l\} = l' \cdot \sqrt{1 - \frac{(0{,}999999c)^2}{c^2}} = l' \cdot \sqrt{1 - 0{,}999999^2} = 100 \cdot 0{,}00141 = 0{,}141$$

$l = 0{,}141$ m $= 14{,}1$ cm

Hypotetický pozorovatel ve vztažné soustavě Vegy, vůči které letí kosmická loď rychlostí $0{,}999999c$, by naměřil její délku rovnu 14,1 cm.

7.2 Relativistická dynamika

RELATIVISTICKÁ DYNAMIKA je dynamika těles pohybujících se rychlostmi, při kterých se projevují relativistické jevy:

- relativistická hmotnost tělesa roste s jeho rychlostí;
- relativistická energie tělesa při rychlostech blížících se rychlosti světla roste nade všechny meze.

Relativistická hmotnost

RELATIVISTICKÁ HMOTNOST m je hmotnost tělesa pohybujícího se v dané inerciální vztažné soustavě rychlostí $\vec{v}$ a je dána vztahem: $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, kde m_0 je KLIDOVÁ HMOTNOST tělesa, tj. jeho hmotnost ve vztažné soustavě, vzhledem k níž je v klidu, c je rychlost světla ve vakuu, v je velikost rychlosti. Obecně platí $m \geq m_0$.

Při malých rychlostech ($v << c$) se $m \doteq m_0$, při velmi velkých rychlostech, jestliže se $v \to c$, roste relativistická hmotnost tělesa m nade všechny meze, tj. $m \to \infty$.

ZÁKON ZACHOVÁNÍ HMOTNOSTI (pro relativistickou hmotnost): Celková relativistická hmotnost izolované soustavy těles je konstantní.

Relativistická hybnost

Protože v relativistické fyzice není hmotnost konstantní veličina, pro velikost RELATIVISTICKÉ HYBNOSTI pohybujícího se tělesa platí vztah $p = m \cdot v = \dfrac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$.

ZÁKON ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI (pro relativistickou hybnost): Celková relativistická hybnost izolované soustavy těles je konstantní.

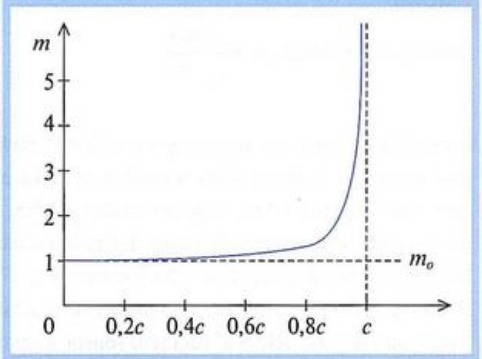
Vztah mezi energií a hmotností

RELATIVISTICKÁ ENERGIE tělesa E je energie tělesa pohybujícího se v dané inerciální vztažné soustavě rychlostí $\vec{v}$ a je dána vztahem $E = mc^2$, kde m je relativistická hmotnost, c je rychlost světla ve vakuu. Tento vztah mezi relativistickou energií E a hmotností m se nazývá EINSTEINŮV VZTAH MEZI HMOTNOSTÍ A ENERGIÍ.

KLIDOVÁ ENERGIE tělesa E_0 je jeho energie v inerciální vztažné soustavě, v níž je těleso v klidu, a je dána vztahem $E_0 = m_0 c^2$, kde m_0 je klidová hmotnost tělesa.

Hmotnost tělesa m v klasické fyzice je veličina konstantní a nezávislá na jeho rychlosti.

RELATIVISTICKÁ HMOTNOST tělesa m roste s jeho rychlostí.



m_0 – klidová hmotnost tělesa

Ze vztahu pro relativistickou hmotnost vyplývá, že rychlost světla ve vakuu je mezní rychlost, která nemůže být žádným tělesem s nenulovou klidovou hmotností dosažena ani překročena. Jestliže by totiž bylo $v = c$, musela by hmotnost $m = \infty$, což je nemožné.

Na základě vztahu pro relativistickou hmotnost se konstruují urychlovače (str. 199) urychlující elementární částice až na rychlosti blízké rychlosti světla. Při těchto rychlostech se projevuje relativistický nárůst jejich hmotnosti a správná funkce urychlovačů potvrzuje správnost relativistického vztahu.

POHYBOVÝ STAV fyzikálního objektu v relativistické mechanice charakterizuje relativistická hybnost, a ne rychlost jako v klasické mechanice (str. 15, 30).

V klasické mechanice je hybnost tělesa definována vztahem $\vec{p}_0 = m_0 \cdot \vec{v}$, kde m_0 je setrvačná (klidová) hmotnost tělesa a $\vec{v}$ jeho rychlost vzhledem k dané vztažné soustavě.

Při jakékoliv změně celkové energie tělesa o ΔE dojde též ke změně jeho hmotnosti o Δm, přičemž platí vztah $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Dodáme-li tělesu energii, zvýšíme tím také jeho hmotnost.

Pro výpočty v kvantové mechanice lze ze vztahů pro relativistickou energii E a hybnost p odvodit užitečný vztah:

$$E = m_0 c^2 \sqrt{1 + \frac{p^2}{m_0^2 c^2}}.$$

Relativistická energie tělesa E je součtem jeho klidové energie E_0 a kinetické energie E_k, tj. $E = E_0 + E_k = m_0 c^2 + E_k$.

RELATIVISTICKÁ KINETICKÁ ENERGIE E_k je tedy dána vztahem:

$$E_k = (m - m_0)c^2 = m_0 c^2 \left(\sqrt{1 + \frac{p^2}{m_0^2 c^2}} - 1 \right).$$

Také v relativistické fyzice platí **ZÁKON ZACHOVÁNÍ ENERGIE**: Celková energie izolované soustavy je konstantní.

Einsteinův vztah $E = mc^2$ a anihilace, resp. její opak, tj. vznik páru „elektron – pozitron" z γ-částice, potvrzují, že **LÁTKA** (tj. hmotné částice a tělesa) a **POLE** (např. elektromagnetické pole) jsou dvě **FORMY HMOTY** (str. 13).

Při srážce elektronu s pozitronem* dochází k úplné přeměně jejich hmotnosti na energii, která se vyzáří jako γ-záření (tj. γ-částice). Této přeměně se říká **ANIHILACE**** a je to přeměna látky (tj. hmotných částic) na jinou formu hmoty – na elektromagnetické pole. Stejně tak vznikají z vysokoenergetických γ-částic, tj. formy elektromagnetického vlnění o vysoké frekvenci, páry elektron – pozitron.

* pozitron – antičástice k elektronu (str. 198)

** anihilace znamená „zmizení" hmoty

Při rychlostech $v << c$ platí $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \to 0$.

V klasické fyzice je tedy změna hmotnosti tělesa při změně jeho energie zanedbatelná a hmotnost tělesa považujeme za konstantní veličinu nezávislou na energii.

Př. 3

Kosmická loď letí ze sluneční soustavy rychlostí 0,9c, kde c je rychlost světla ve vakuu. Vyšle rádiový signál směrem k Zemi a jiný směrem ke kosmické lodi, která letí před ní. Jaká bude rychlost těchto rádiových signálů, které se šíří prostorem od sebe, každý rychlostí světla, vzhledem ke sluneční soustavě?

Vztažná soustava S je pevně spojená se sluneční soustavou, vztažná soustava S' je kosmická loď letící rychlostí $v = 0{,}9c$ od Země.

Rychlost rádiového signálu šířícího se z kosmické lodi směrem k lodi před ní je $u' = c$, rychlost téhož signálu vzhledem k soustavě S je u.

Podle Einsteinova vztahu pro relativistické skládání rychlostí platí: $u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$. Za u' dosadíme c, za v dosadíme 0,9c.

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} = \frac{c + 0{,}9c}{1 + \frac{c \cdot 0{,}9c}{c^2}} = \frac{1{,}9c}{1 + \frac{0{,}9c^2}{c^2}} = \frac{1{,}9c}{1 + 0{,}9} = c$$

Rychlost rádiového signálu šířícího se z kosmické lodi směrem k Zemi je $u' = -c$, rychlost téhož signálu vzhledem k soustavě S je u. Záporné znaménko znamená, že rychlost u' má opačný směr než rychlost v.

Za u' dosadíme $-c$, za v dosadíme 0,9c. Pak platí: $u = \frac{u' + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} = \frac{-c + 0{,}9c}{1 - \frac{c \cdot 0{,}9c}{c^2}} = \frac{-0{,}1c}{1 - 0{,}9} = -c.$

Oba rádiové signály se šíří rychlostí světla (vzhledem ke sluneční soustavě), jeden směrem k Zemi, druhý směrem od Země.

Př. 4

Jádro těžkého vodíku (deuteronu) se skládá z neutronu a protonu. Klidová hmotnost neutronu je $m_{0n} = 1{,}6748 \cdot 10^{-27}$ kg, klidová hmotnost protonu je $m_{0p} = 1{,}6725 \cdot 10^{-27}$ kg a klidová hmotnost deuteronu je $m_{0d} = 3{,}3433 \cdot 10^{-27}$ kg. Deuteron lze rozštěpit na neutron a proton dodáním energie. Urči energii, kterou je potřeba dodat na rozbití deuteronu (tzv. vazební energii).

$m_{0n} = 1{,}6748 \cdot 10^{-27}$ kg; $m_{0p} = 1{,}6725 \cdot 10^{-27}$ kg; $m_{0d} = 3{,}3433 \cdot 10^{-27}$ kg; $c = 3 \cdot 10^8$ m · s^{-1}; $\Delta m = ?$; $\Delta E = ?$

$\Delta m = m_{0p} + m_{0n} - m_{0d} \Rightarrow \{\Delta m\} = 1{,}6725 \cdot 10^{-27} + 1{,}6748 \cdot 10^{-27} - 3{,}3433 \cdot 10^{-27} = 4 \cdot 10^{-30}$; $\Delta m = 4.10^{-30}$ kg

$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \Rightarrow \{\Delta E\} = 4 \cdot 10^{-30} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 3{,}6 \cdot 10^{-13}$; $\Delta E = 3{,}6 \cdot 10^{-13}$ J $= 2{,}25$ MeV

• 1 MeV $= 10^6$ eV; 1 eV $= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J (str. 177)

Na rozbití deuteronu je potřeba dodat energii 2,25 MeV.

8.0 Fyzika mikrosvěta

Osnova kapitoly:

- Členění fyzikálních objektů podle velikosti
- Fyzika mikrosvěta, kvantová fyzika
- Hranice klasické fyziky
- Mikrofyzikální obory: molekulová, atomová a jaderná fyzika, fyzika elementárních částic

Členění fyzikálních objektů podle velikosti

Fyzikální objekty lze dělit podle velikosti na tři kategorie:

- MAKROFYZIKÁLNÍ OBJEKTY neboli MAKROOBJEKTY jsou objekty přímo pozorovatelné (tj. přístupné přímému pozorování okem, optickým mikroskopem nebo dalekohledem průměrné velikosti). Patří mezi ně všechna pozemská tělesa, planety i hvězdy. Mezi makroobjekty patří také objekty, které není možné přímo pozorovat a zkoumáme jenom jejich makrofyzikální (např. silové) projevy (např. gravitační pole, elektromagnetické pole). Mezi makroobjekty dále patří makrosystémy, tj. objekty přímo pozorovatelné a složené z obrovského množství molekul, atomů, iontů anebo elektronů, např. plyny, kapaliny, plazma (str. 7).
- MIKROFYZIKÁLNÍ OBJEKTY neboli MIKROOBJEKTY (se souhrnným názvem „MIKROSVĚT") jsou zčásti přístupny pozorováním nejmodernějšími elektronovými a iontovými mikroskopy, zčásti lze jejich existenci dokázat experimentálními metodami založenými na fyzikálních teoriích. Mezi mikroobjekty patří zejména molekuly, atomy, ionty, atomová jádra a elementární částice.
- MEGAFYZIKÁLNÍ OBJEKTY jsou galaxie, skupiny galaxií a vesmír jako celek.

MAKROFYZIKA zkoumá fyzikální jevy na úrovni makroobjektů, jejich obecné vlastnosti a interakce mezi nimi (str. 17). K makrofyzice patří celá klasická fyzika s výjimkou molekulové fyziky (kinetické teorie látek).

FYZIKA MIKROSVĚTA zahrnuje především

- molekulovou fyziku,
- atomovou fyziku neboli fyziku elektronového obalu,
- jadernou fyziku,
- fyziku elementárních částic neboli částicovou fyziku,
- fyziku pevných látek.

Teoretickým základem všech oborů fyziky mikrosvěta je KVANTOVÁ FYZIKA.

FYZIKA MEGASVĚTA zahrnuje především astrofyziku a relativistickou kosmologii, zabývá se stavem a vývojem vesmíru.

Hranice klasické fyziky

Klasická fyzika zahrnující mechaniku, termodynamiku, molekulovou fyziku a elektrodynamiku dokázala v 19. století vysvětlit téměř všechny pozorované jevy. Měla ale své hranice a nedokázala najít odpovědi na některé otázky, např.:

- Jak vznikají spektra jednotlivých prvků?
- Proč jsou prvky seřazeny tak, jak se objevují v periodické tabulce prvků?
- Co je podstatou chemických vazeb umožňujících spojování atomů v molekuly?
- Proč svítí hvězdy?
- Proč některé látky vedou elektrický proud, a jiné ne?

Kromě toho se objevily další nevysvětlené jevy. Jedním z nich bylo záření černého tělesa a kvůli teoretickému vysvětlení musela být přijata hypotéza odporující klasické fyzice, která předpokládala, že energie elektromagnetického záření je vyzařována nebo pohlcována nespojitě – v kvantech (str. 151). Dále byly zjištěny další jevy z pozic klasické fyziky nevysvětlitelné, např. fotoelektrický a Comptonův jev (str. 177, 178).

Odpovědi na nezodpovězené otázky klasické fyziky dala až KVANTOVÁ FYZIKA, která se zabývá mikrofyzikálními objekty a její zákonitosti jsou odlišné od zákonů makrosvěta.

Jednotlivé obory fyziky mikrosvěta se člení podle objektů, které zkoumají:

- ATOMOVÁ FYZIKA (fyzika elektronového obalu) popisuje stavbu atomů, vysvětluje spektra prvků, emisi a absorpci světla, seřazení prvků v periodické tabulce a chemické vazby.
- JADERNÁ FYZIKA se zabývá stavbou atomových jader, jadernými reakcemi, radioaktivitou (emise záření α, β, γ atomovými jádry).
- FYZIKA ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC studuje stavbu a chování (reakce) nejmenších mikroobjektů známých ve fyzice.
- FYZIKA PEVNÝCH LÁTEK se zabývá strukturou a vlastnostmi pevných látek, které lze vysvětlit někdy jen pomocí kvantové fyziky.

8.1 Základní poznatky kvantové fyziky

Kvantová hypotéza

PLANCKOVA KVANTOVÁ HYPOTÉZA: Elektromagnetické vlnění (tedy i světlo) je vyzařováno nebo pohlcováno atomy vždy v určitých dávkách, tzv. kvantech (tedy záření vyzařované nebo pohlcované atomy nemůže mít libovolnou energii). Tato kvanta, která se od r. 1926 nazývají FOTONY, mají energii

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

kde f je frekvence a λ vlnová délka elektromagnetického záření, c je rychlost světla ve vakuu, h je PLANCKOVA KONSTANTA, $h = 6{,}626\,075 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s} = 4{,}136\,127 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{eV \cdot s}$.

Fotoelektrický jev (fotoefekt)

FOTOELEKTRICKÝ JEV (FOTOEFEKT) je uvolnění elektronů z látky působením elektromagnetického záření. Světlo nebo optické záření s dostatečně velkou frekvencí, které dopadá na kov, vyráží z povrchu kovu elektrony.

Poznatky zjištěné při experimentech s fotoelektrickým jevem:

- Maximální kinetická energie $E_{k,max}$ elektronů uvolněných z povrchu kovu při fotoefektu nezávisí na intenzitě dopadajícího záření, ale na jeho frekvenci; je tím větší, čím větší je frekvence záření.
- Pro každý kov existuje jistá MEZNÍ FREKVENCE f_0 dopadajícího záření a platí, že elektrony jsou emitovány (uvolněny) pouze při frekvenci f, která je větší nebo rovna této mezní frekvenci, tj. pro $f \geq f_0$. Pro frekvence $f_2 \geq f_0$ je pak počet uvolněných elektronů (tedy i proud procházející obvodem) přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření. Pro frekvence $f_1 < f_0$ k uvolnění elektronů nedojde ani při jakkoli velké intenzitě dopadajícího záření.

Selhání klasické fyziky při vysvětlení fotoefektu

Z klasické teorie elektromagnetického pole vyplývá, že maximální kinetická energie uvolňovaných elektronů by měla záviset na intenzitě dopadajícího záření (vztahy pro hustotu zářivého toku a intenzitu ozařování, str. 149). Dále z klasické fyziky vyplývá, že elektrony by měly být emitovány světlem libovolně nízké frekvence, pokud jim dodáme dost energie, tedy pokud použijeme dostatečně intenzivní zdroj světla.

Tímto způsobem však fotoefekt neprobíhá a klasická fyzika to nedokázala nijak vysvětlit.

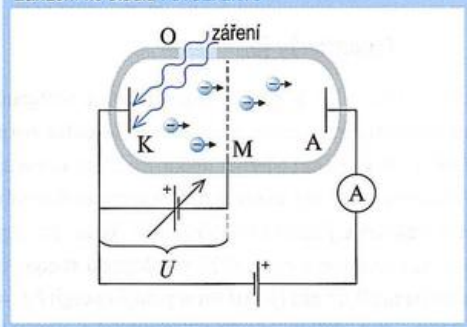
Osnova kapitoly:

- Kvantová hypotéza
- Fotoelektrický jev, Comptonův jev, fotony
- Vlnové vlastnosti částic, de Broglieovy vlny
- Kvantová mechanika, vlnová funkce

Za počátek vzniku KVANTOVÉ FYZIKY lze považovat objev radiačního zákona, který oznámil 14. prosince 1900 v Berlíně Max Planck. Důvodem je Planckova formulace KVANTOVÉ HYPOTÉZY umožňující teoretické odvození radiačního zákona, který vysvětlil vyzařování černého tělesa (str. 151).

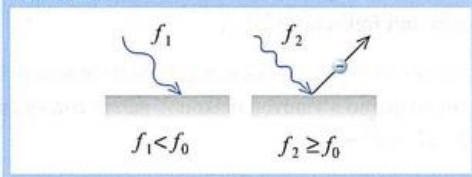
V kvantové fyzice používáme také vhodnější jednotku energie ELEKTRONVOLT (eV).
1 eV je energie, kterou získá elektron, jestliže je urychlen potenciálovým rozdílem 1 V (např. mezi kovovými destičkami, mezi nimiž je napětí 1 V);
$1\ \mathrm{eV} = 1{,}602\,177 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$.

Zařízení ke studiu FOTOEFEKTU



O – okénko, K – katoda, A – anoda, M – mřížka, A – ampérmetr (měří velikost proudu). Dopadající záření uvolňuje z kovové katody elektrony, které dopadají na anodu, a obvodem pak protéká elektrický proud. Záporné napětí U na mřížce, jehož velikost se dá regulovat, elektrony brzdí a při hodnotě $U = U_b$ odpovídající jejich maximální kinetické energii $E_{k,max}$ je proud protékající obvodem nulový, což umožňuje tuto energii měřit; $E_{k,max} = e \cdot U_b$, kde e je náboj elektronu.

FOTOEFEKT



Vysvětlení fotoefektu pomocí kvantové hypotézy

Fotoelektrický jev objasnil v roce 1905 A. Einstein s využitím Planckovy kvantové hypotézy. Předpokládal, že elektromagnetická rovinná vlna s frekvencí f (a vlnovou délkou λ) se při dopadu na látku chová jako soubor částic, tzv. světelných kvant. Tato kvanta byla posléze nazvána **FOTONY**.

Při fotoelektrickém jevu odevzdá dopadající foton celou svou energii jedinému elektronu v kovu. Elektron část této energie spotřebuje na uvolnění se z kovu a zbytek energie mu zbude jako jeho kinetická energie.

ROVNICE FOTOEFEKTU má tvar $hf = W_v + E_k$,

kde hf je energie fotonu, W_v je výstupní práce a $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ je kinetická energie elektronu vystupujícího z látky.

VNĚJŠÍ FOTOELEKTRICKÝ JEV (VNĚJŠÍ FOTOEFEKT) je jev, kdy jsou elektrony uvolňovány působením dopadajícího optického záření ven z kovu. Kromě vnějšího fotoefektu existuje i **VNITŘNÍ FOTOELEKTRICKÝ JEV**, kdy elektrony uvolněné z vazeb zůstávají uvnitř látky.

Comptonův jev

COMPTONŮV JEV je pružný rozptyl fotonů rentgenového záření na volných elektronech, přičemž vlnová délka rozptýleného záření λ' je větší než vlnová délka λ záření dopadajícího. Tedy frekvence f' (a též energie hf') rozptýleného záření je menší než frekvence f záření dopadajícího. Tento jev poprvé pozoroval A. Compton v roce 1923 při dopadu rentgenového záření s frekvencí 0,07 nm (jehož fotony mají energii $hf = 17{,}8$ eV) na uhlíkovou destičku, na níž pak dochází k rozptylu (záření se odráží do všech směrů) a také ke změně frekvence záření.

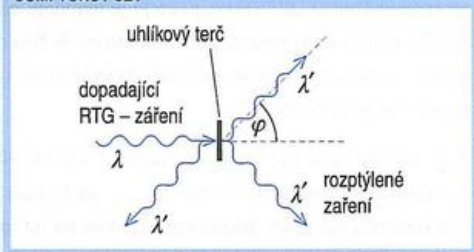
Vysvětlení Comptonova jevu je opět možné jen pomocí kvantové hypotézy. Fotony rentgenového záření se při srážce s elektrony v uhlíku projevují jako částice. Nastává pružná srážka fotonu o rychlosti c s nehybným elektronem a pro tuto srážku platí zákon zachování energie i zákon zachování hybnosti (str. 30, 174, 175). Pro frekvenci f' fotonu odraženého pod určitým úhlem pak platí rovnice $hf = hf' + E_k$, kde f je frekvence dopadajícího záření, h je Planckova konstanta a E_k je kinetická energie elektronu po srážce. Rozptýlené záření tedy musí mít frekvenci $f' < f$.

COMPTONŮV POSUV $\Delta\lambda$ je rozdíl mezi vlnovou délkou λ záření dopadajícího a vlnovou délkou λ' záření rozptýleného, tj. $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$.

VÝSTUPNÍ PRÁCE W_v je rovna energii nutné k uvolnění elektronu z kovu. Výstupní práce má velikost $W_v = h \cdot f_0$, kde f_0 je **MEZNÍ FREKVENCE**.

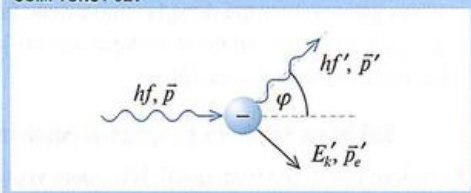
Na základě **VNITŘNÍHO FOTOELEKTRICKÉHO JEVU** pracuje **FOTOREZISTOR** (str. 118), v němž se po ozáření sníží jeho odpor, a obvodem, ve kterém je zapojen, prochází proud úměrný intenzitě dopadajícího záření; dále **FOTODIODA** (str. 119), v níž se po ozáření na PN přechodu generují elektrony a sníží její odpor v závěrném směru. Fotodioda jako fotočlánek je zdrojem elektrické energie v solárních článcích. Fotorezistory umožňují měřit intenzitu dopadajícího světla v luxmetrech a expozimetrech, využívají se jako fotobuňky na ovládání mechanismů u výtahových dveří. Fotoefektu se dále využívá v televizních kamerách a v kopírovacích přístrojích.

COMPTONŮV JEV



RTG záření se po dopadu na uhlíkový terč rozptyluje do všech směrů, přičemž je $\lambda' > \lambda$. Protože $\lambda = \frac{c}{f}$, je frekvence rozptýleného záření f' menší než frekvence dopadajícího záření f, tj. $f' < f$.

COMPTONŮV JEV



Platí také zákon zachování hybnosti $\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e$.

Pro **COMPTONŮV POSUV** lze ze zákona zachování energie a zákona zachování hybnosti odvodit vztah $\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\varphi)$, kde m_0 je klidová hmotnost elektronu, c rychlost světla, h je Planckova konstanta a φ je úhel rozptylu. Veličina $\frac{h}{m_0 c}$ se nazývá **COMPTONOVA VLNOVÁ DÉLKA ELEKTRONU**.

Fotony

Elektromagnetické záření má nejen vlnový, ale také částicový charakter, tj. někdy se projevuje jako soubor částic (zejména při interakci s látkou). Tyto částice se nazývají **FOTONY**, pohybují se ve vakuu rychlostí světla, mají svou energii a hybnost, přičemž klidová hmotnost fotonu je nulová.

ENERGIE FOTONU je dána vztahem $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

HYBNOST FOTONU je dána vztahem: $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot f}{c}$,

kde h je Planckova konstanta, f je frekvence a λ vlnová délka fotonu (elektromagnetické vlny), c je rychlost světla ve vakuu.
Směr hybnosti fotonu je určen směrem šíření elektromagnetické vlny.
Vztah mezi energií E a hybností p fotonu je: $E = p \cdot c$.

Vlnově-korpuskulární povaha světla (fotonů)

Korpuskulární (částicová) teorie ohyb světla (str. 158) vysvětlit nedovede. Představa, že veliké soubory fotonů se navzájem při průchodu štěrbinou nebo dvojštěrbinou ovlivňují, a tak vznikají interferenční obrazce, byla vyvrácena Taylorovým experimentem v r. 1909, který byl později mnohokrát zopakován. Vlnová teorie naproti tomu nedovede vysvětlit fotoefekt, Comptonův jev, záření černého tělesa, optická spektra prvků a vůbec všechny jevy, v nichž probíhá interakce světla s látkou.
Proto je nutno postulovat, že elektromagnetické vlnění má také **KORPUSKULÁRNÍ** (částicový) charakter a fotony nejsou pouze částice, ale mají také **VLNOVÝ** charakter.

FOTONY jsou částice mikrosvěta a projevují se při interakci světla s látkou. Fotony vznikají ve zdroji světla a zanikají v místě, kde světlo interaguje s pevnou látkou (např. na stínítku). Mezi zdrojem a stínítkem se světlo pohybuje ne jako tok fotonů, ale jako elektromagnetická vlna, která na dvojštěrbině interferuje a svými interferenčními maximy a minimy určuje pravděpodobnost dopadu fotonů na stínítko. Pravděpodobnost dopadu je nejvyšší tam, kde jsou maxima, nejnižší je tam, kde jsou interferenční minima.

Odvození vztahu mezi energií a hybností fotonu:
Podle speciální teorie relativity je relativistická energie a hybnost částice dána vztahy $E = mc^2$ a $p = m \cdot v$, kde m je relativistická hmotnost (str. 174). Násobíme-li vztah $p = mv$ rychlostí c, obdržíme $pc = mvc$. Umocněním tohoto vztahu a vztahu pro energii na druhou a jejich vzájemným odečtením dostaneme vztah mezi energií a hybností: $E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$. Protože foton musí mít nulovou klidovou hmotnost (jinak by se nemohl pohybovat rychlostí světla), platí $E^2 = p^2c^2$, tedy $E = p \cdot c$.
Pro hybnost p fotonu tedy platí: $p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot f}{c}$.

Experiment G. I. Taylora
V Taylorově experimentu s ohybem světla na dvojštěrbině je zdroj světla natolik slabý, že další foton je emitován až poté, co předcházející foton dopadl na stínítko. Přesto se na stínítku stále vytvářejí interferenční proužky, pokud pokus probíhá dostatečně dlouho (až několik měsíců).
Z výsledků tohoto pokusu vyvstávají otázky:
Když se mezi zdrojem a stínítkem pohybuje jediný foton, kterou štěrbinou prochází? Jak tento foton „ví", že se někde vyskytuje další štěrbina, a že tedy může interferovat? Jak tento foton „ví", že za ním bude následovat množství dalších fotonů a jak s nimi může interferovat?
Odpovědi na otázky vyplývající z Taylorova experimentu nelze najít, protože otázky jsou nesprávně položené a vyplývají z poznatků klasické fyziky, které člověk nabyl ze zkušeností a experimentů získaných v makrosvětě. Pro objekty mikrosvěta platí jiné zákony než v klasické fyzice.

Př. 1

Výstupní práce elektronů pro sodík je 2,3 eV. S jakou kinetickou energií budou vyletovat elektrony z povrchu sodíkové katody, když na ni dopadá ultrafialové záření s vlnovou délkou 300 nm?

$W_v = 2{,}3\ \text{eV} = 2{,}3 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 3{,}685 \cdot 10^{-19}\ \text{J};\ \lambda = 300\ \text{nm} = 3 \cdot 10^{-7}\ \text{m};\ E_k = ?;\ c = 3 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$h\frac{c}{\lambda} = W_v + E_k \Rightarrow E_k = h\frac{c}{\lambda} - W_v$

$\{E_k\} = 6{,}626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} - 3{,}685 \cdot 10^{-19} = 2{,}941 \cdot 10^{-19};\ E_k = 2{,}941 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 1{,}836\ \text{eV}$

Kinetická energie uvolněných elektronů je asi 1,8 eV. Rychlost těchto elektronů je $8{,}035 \cdot 10^5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. 803,5 km/s.

Vlnové vlastnosti částic

DE BROGLIEOVA HYPOTÉZA

Každé volně se pohybující částici s energií E a hybností p lze přiřadit rovinnou vlnu s frekvencí f a vlnovou délkou λ.

DE BROGLIEOVY VZTAHY udávají souvislost mezi energií E, hybností p, frekvencí f a vlnovou délkou λ částice:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad f = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h},$$

kde m je relativistická hmotnost částice, v je její rychlost, c je rychlost světla ve vakuu, h je Planckova konstanta.

Vlnová délka λ se nazývá **DE BROGLIEOVA VLNOVÁ DÉLKA** pohybující se částice a vlny přiřazené těmto částicím se nazývají **DE BROGLIEOVY VLNY**.

Potvrzení existence de Broglieových vln

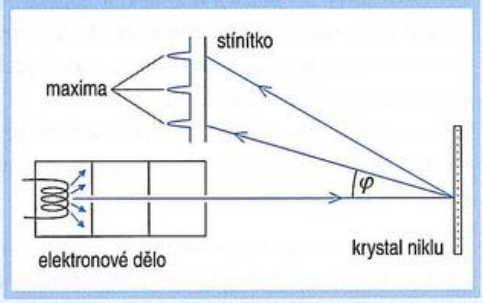
De Broglieovu hypotézu o existenci vlnových vlastností hmoty poprvé experimentálně ověřili v roce 1927 C. J. Davisson a L. H. Germer v USA a nezávisle na nich G. P. Thomson z Aberdeenské univerzity ve Skotsku. Vlnová podstata elektronů byla v roce 1961 demonstrována i pokusem s difrakcí elektronů na dvojštěrbině, kde byla na stínítku rovněž pozorována interferenční maxima a minima.

V současné době považujeme vlnovou podstatu hmoty za samozřejmou. Podobně jako elektrony a fotony se chovají i protony, neutrony, ale také atomy a molekuly. Difrakce elektronů nebo neutronů se běžně používá pro studium atomové struktury látek i pro zjišťování prostorového uspořádání atomů v molekulách. **ELEKTRONOVÉ** a **IONTOVÉ MIKROSKOPY** používají místo světla svazky elektronů, popř. iontů. Díky mnohem menší vlnové délce elektronů a iontů mají značně větší **ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST** v porovnání s mikroskopy optickými (str. 169). Elektronové mikroskopy dosahující rozlišení 10^{-7}–10^{-9} m umožňují pozorování virů. Rastrovací tunelový mikroskop dosahující rozlišení $2 \cdot 10^{-10}$ m umožňuje fyzikům „vidět" atomy a molekuly.

Víte, že fyzikové objevují nové přírodní zákony také díky tomu, že předpokládají v přírodě **SYMETRII**? M. Faraday např. zjistil, že proměnné magnetické pole vytváří pole elektrické (str. 128). J. C. Maxwell pak předpokládal, že proměnné elektrické pole vytváří pole magnetické, což se skutečně potvrdilo (str. 142). Svazek světla je vlna, ale energii a hybnost přenáší prostřednictvím částic – fotonů. Francouzský fyzik Louis de Broglie v r. 1924 navrhl rovněž na základě **SYMETRIE** smělou hypotézu, že každý pohybující se svazek částic mikrosvěta má vlnovou délku a frekvenci, pro které platí stejné vztahy jako pro fotony.

Experimentální důkaz de Broglieových vln

V experimentech Davissona, Germera a Thomsona dopadal svazek rychlých elektronů na krystal niklu, který se chová jako difrakční optická mřížka (na odraz) s velmi malou periodou (mřížkovou konstantou, str. 158), srovnatelnou s vlnovou délkou elektronů. Rozptýlené elektrony byly registrovány v závislosti na úhlu rozptylu φ. Přitom byla pozorována interferenční maxima a minima podobně jako při difrakci světla.



Fyzikální objekty (hmotné částice, resp. fotony), u nichž se projevují při jejich pohybu vlnové, resp. kvantové vlastnosti, se nazývají **VLNOVÉ** nebo **KVANTOVÉ OBJEKTY**, popř. **MIKROČÁSTICE**.

Př. 2

Dosažitelná **ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST** optického mikroskopu je dána vlnovou délkou světla; to znamená, že nejmenší detail, který můžeme rozlišit, má velikost přibližně rovnu vlnové délce. Chceme-li „vidět" dovnitř atomu pomocí elektronového mikroskopu (atom má průměr kolem 0,1 nm = 10^{-10} m), znamená to, že musíme rozlišit detaily o velikosti 0,01 nm, tj. 10^{-11} m. Použijeme-li tedy elektronový mikroskop, jakou nejmenší energii elektronů potřebujeme?

Vlnová délka λ elektronového svazku musí být minimálně $\lambda = 10^{-11}$ m. Z de Broglieova vztahu $p = \frac{h}{\lambda}$ vypočteme hybnost $\{p\} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{10^{-11}} = 6{,}63 \cdot 10^{-23}$ a dosadíme do vztahu pro relativistickou kinetickou energii E_k (str. 175):

$$E_k = m_0c^2\left(\sqrt{1+\frac{p^2}{m_0^2c^2}}-1\right); m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}.$$ Dosazením za m_0, p, c vypočteme $E_k = 14{,}8$ keV.

Elektrony musí mít energii minimálně 14,8 keV.

Kvantová mechanika

KVANTOVÁ MECHANIKA je fyzikální teorie popisující vlastnosti a chování částic mikrosvěta a od klasické mechaniky se odlišuje především popisem stavu fyzikálních objektů. STAV mikročástic v kvantové mechanice není popsán jejich polohou a hybností, jak je tomu v klasické mechanice, ale VLNOVOU FUNKCÍ $\psi(x,y,z,t)$ podobně, jako je postupná elektromagnetická vlna popsána harmonickou funkcí (str. 142).

Při přesně definovaných vnějších podmínkách pak kvantová mechanika umí vypočítat pomocí SCHRÖDINGEROVY ROVNICE vlnovou funkci, tj. stav mikročástice v libovolném časovém okamžiku.

VLNOVÁ FUNKCE $\psi(x,y,z,t)$ popisuje de Broglieovu vlnu mikročástice, přičemž PRAVDĚPODOBNOST výskytu mikročástice v malém objemu ΔV kolem bodu se souřadnicemi x, y, z je $P = |\psi(x,y,z)|^2 \cdot \Delta V$, kde $\Delta V = (x + \Delta x)\cdot(y + \Delta y)\cdot(z + \Delta z)$.

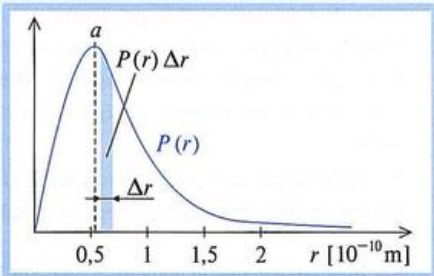
Čtverec absolutní hodnoty vlnové funkce $|\psi(x,y,z,t)|^2$ se nazývá HUSTOTA PRAVDĚPODOBNOSTI výskytu mikročástice.

Je-li elektron v atomu vodíku v základním stavu, jeho vlnová funkce $\psi(r)$ závisí jen na vzdálenosti r od středu jádra. Proto také hustota pravděpodobnosti výskytu elektronu závisí jenom na vzdálenosti r. Pravděpodobnost $P(r)\Delta r$, že elektron se nachází mezi dvěma soustřednými kulovými plochami, jejichž poloměry jsou r a $r + \Delta r$, je dána vztahem $P(r)\Delta r = 4\pi r^2 \psi^2(r)\Delta r$. Velikost pravděpodobnosti $P(r)\Delta r$ pro danou hodnotu r vyjadřuje modrý obdélník se stranami Δr a $P(r)$. Lze vidět, že nejpravděpodobnější poloha elektronu je ve vzdálenosti $r = a$ od středu jádra, kde a je Bohrem vypočtený poloměr vodíkového atomu.

HEISENBERGŮV PRINCIP NEURČITOSTI říká, že mikročástici nelze současně přiřadit polohu a hybnost s neomezenou přesností. Je-li Δx neurčitost pro měření x-ové souřadnice mikročástice a Δp neurčitost měření hybnosti ve směru osy x, pak platí: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ je redukovaná PLANCKOVA KONSTANTA.

FYZIKA při zkoumání přírody postupuje tak, že se snaží nejprve popsat STAV fyzikálního objektu a pak najít ROVNICE, které umožní vypočítat všechny stavy, v nichž se fyzikální objekt může nacházet. Mechanika např. ze znalosti stavu, tj. ze znalosti polohy a hybnosti hmotného bodu, umí pomocí 2. NPZ (nebo pomocí zákonů zachování energie a hybnosti) vypočítat jeho polohu a hybnost v libovolném čase (str. 29). Termodynamika umí ze znalosti počátečního stavu ideálního plynu (který je popsán tlakem, objemem a teplotou) vypočítat pomocí stavové rovnice stav konečný (str. 74) apod.

Jednotkou hustoty pravděpodobnosti $|\psi|^2$ je m^{-3}.



Funkce $P(r)$, Bohrův poloměr a (str. 188, 189).

Pohybuje-li se volná částice konstantní hybností $\vec{p}$ ve směru osy x, pak $\Delta p = 0$, tj. hybnost je určena přesně.

Z HEISENBERGOVA PRINCIPU NEURČITOSTI pak plyne, že $\Delta x \to \infty$, tedy polohu částice není možné určit a slova „poloha částice" ztrácejí smysl. Částice se „nachází" kdekoli podél osy x.

Př. 3

a) Urči vlnovou délku de Broglieovy vlny pro kočku o hmotnosti 1 kg, která přes otevřené dveře skáče na myš rychlostí 5 m · s^{-1}. Projeví se vlnové vlastnosti kočky?

b) Předpokládejme, že Planckova konstanta v nějakém imaginárním kvantovém světě má hodnotu $h = 6{,}626$ J · s, tedy 10^{34} krát větší. Chovala by se tato kočka jako kvantový objekt?

a) $m = 1\,\text{kg}$; $v = 5\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\lambda = ?$; $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ $\{\lambda\} = \frac{6{,}626\cdot 10^{-34}}{1\cdot 5} = 1{,}325\cdot 10^{-34}$; $\lambda = 1{,}3\cdot 10^{-34}$ m

„Vlnová délka" této kočky je $1{,}3\cdot 10^{-34}$ m. Tato hodnota vlnové délky je mnohem menší, než je rozměr jádra atomu, proto se vlnové vlastnosti kočky neprojeví.

b) Jestliže by Planckova konstanta měla hodnotu 6,626 J · s, vlnová délka kočky by byla 1,3 m a kočka by se chovala jako kvantový objekt. Tato „kvantová kočka" by se při svém skoku na myš „šířila" jako vlna a přistála by náhodně kdekoliv v okolí myši. Až svazek mnoha tisíc „kvantových koček" by měl šanci myš chytit, samozřejmě jen tehdy, pokud by „byla umístěna" v interferenčním maximu svazku.

8.2 Atomová fyzika

Stavba atomu, modely atomu

ATOM je základní stavební částice látky, která je chemicky nedělitelná, tj. nemění se při chemických reakcích. Atom se skládá z ATOMOVÉHO JÁDRA a ELEKTRONOVÉHO OBALU, v němž je u elektricky neutrálního atomu tolik elektronů, kolik je v jádře protonů. Počet protonů Z v jádře se nazývá PROTONOVÉ ČÍSLO (též ATOMOVÉ ČÍSLO) a určuje elektrický náboj jádra $Q = Ze$ (více str. 192).

Na základě zákonů chemického slučování formuloval anglický chemik J. Dalton v roce 1803 ATOMOVOU HYPOTÉZU, která byla později potvrzena:

- Prvky se skládají z velmi malých dále chemicky nedělitelných částeček (atomů). Atomy téhož prvku jsou stejné, atomy různých prvků se liší svými vlastnostmi.
- Při chemických reakcích se atomy nemění (nevznikají ani nezanikají), dochází pouze k jejich přeskupování.
- Spojením atomů vznikají molekuly. Molekuly určitého typu tvoří chemickou sloučeninu. V dané sloučenině připadá na atom jednoho prvku vždy stejný počet atomů jiného prvku.

ELEKTRON byl první experimentálně objevenou částicí, která je součástí atomu. Objevu elektronu předcházel objev KATODOVÉHO ZÁŘENÍ (str. 121) J. Plückerem v roce 1859. Postupně se pokusy prokázalo, že KATODOVÉ PAPRSKY jsou hmotné elektricky záporně nabité částice (J. J. Thomson v r. 1897), které J. Stoney v roce 1900 nazval ELEKTRONY. Protože elektrony byly z látky emitovány také při termoemisi a při fotoefektu (str. 177, 178), bylo zřejmé, že mají svůj původ v atomu. Pokusy s vychylováním elektronů v elektrických a magnetických polích určil J. J. Thomson také MĚRNÝ NÁBOJ elektronu, tj. poměr elektrického náboje elektronu $-e$ a hmotnosti m. Velikost elektrického náboje elektronu, tj. ELEMENTÁRNÍ NÁBOJ zjistil experimentálně R. A. Millikan v r. 1911.

ELEMENTÁRNÍ NÁBOJ se značí e a má hodnotu $e = 1{,}602\,177 \cdot 10^{-19}$ C (str. 104). Ze znalosti elementárního a měrného náboje lze vypočítat HMOTNOST ELEKTRONU $m_e = 9{,}109\,390 \cdot 10^{-31}$ kg.

Osnova kapitoly:

- Stavba atomu, Rutherfordův a Bohrův model atomu
- Kvantově mechanický model atomu vodíku
- Kvantová čísla, Pauliho princip, stavba elektronového obalu
- Laser, spontánní a stimulovaná emise

Filozofové Leukippos a Démokritos ve starém Řecku formulovali hypotézu, že látka se skládá z ATOMŮ, tj. částic, které není možné dělit na menší částice („atomos" znamená nedělitelný).

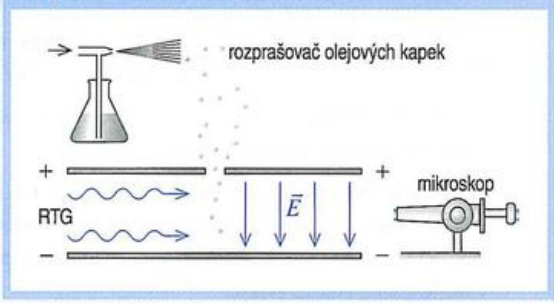
FILOZOFICKÝ ATOMISMUS opět vzkřísil ve středověku opat francouzského kláštera P. Gassendi a z představy o atomové a molekulové struktuře plynu vycházel Daniel Bernoulli v r. 1738 (a později R. Clausius v r. 1857) při odvození základní rovnice kinetické teorie plynů (str. 79).

TERMOEMISE je emise (uvolňování) elektronů z povrchu pevných těles při vysoké teplotě. Např. elektrony jsou emitovány z rozžhaveného vlákna žárovky nebo z povrchu rozžhavené katody vakuové elektronky.

THOMSONŮV MODEL ATOMU (J. J. Thomson, 1897):
Atom je kladně nabitá koule, ve které jsou rovnoměrně rozptýleny elektrony. Atomy jsou navenek neutrální; kladný a záporný náboj v atomu je stejný. Thomsonův model je někdy nazýván také PUDINKOVÝ MODEL (elektrony jsou rozloženy v atomu podobně jako rozinky v anglickém pudinku).

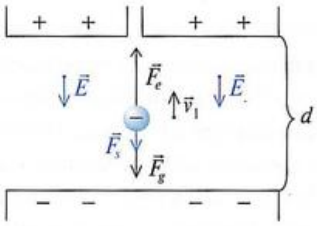
MĚRNÝ NÁBOJ elektronu $-e/m$ lze určit z poloměru kruhové trajektorie elektronu v magnetickém poli (pohyb částice s elektrickým nábojem v magnetickém poli, str. 123, 124), $e/m = -1{,}759 \cdot 10^{11}\ \mathrm{C \cdot kg^{-1}}$.

ELEMENTÁRNÍ NÁBOJ stanovil R. A. Millikan měřením rychlosti pádu nebo stoupání elektricky nabitých kapiček oleje v elektrickém poli kondenzátoru. Zjistil, že všechny kapičky nesou náboj, který je celočíselným násobkem tzv. elementárního náboje (př. 1, str. 183).



Př. 1

Postup při určení elementárního náboje v Millikanově pokusu



1. Mezi deskami kondenzátoru není elektrické pole a kapička oleje o poloměru r padá rychlostí v_0; platí $F_g = F_s$, kde $F_s = 6\pi\eta r v_0$ je Stokesova síla (str. 56) působící proti směru pohybu a $F_g = mg$ je gravitační síla, tj. platí vztah $mg = 6\pi\eta r v_0$.
2. Vzduch mezi deskami kondenzátoru je ionizován rentgenovým zářením a ionty, popř. elektrony ulpívají na povrchu kapiček. Přivedeme-li na desky kondenzátoru elektrické napětí U, vznikne mezi nimi elektrické pole o intenzitě $E = U/d$ (str. 107) a na záporně nabitou kapičku, která má náboj Q_1, působí elektrická síla o velikosti $F_e = E \cdot Q_1$ (str. 105). Je-li tato síla dostatečně veliká, kapička se pohybuje směrem vzhůru rychlostí $\vec{v}_1$ a platí $F_e = F_s + F_g$, kde $F_g = mg$ je gravitační síla a $F_s = 6\pi\eta r v_1$ je Stokesova síla, tj. platí vztah $EQ_1 = mg + 6\pi\eta r v_1$.
3. Kapička při svém pohybu zachytává ionty, popř. elektrony a mění tedy svůj náboj. Změní-li se náboj kapičky např. na hodnotu Q_2, pohybuje se jinou rychlostí $\vec{v}_2$ a platí vztah $EQ_2 = mg + 6\pi\eta r v_2$. Odečtením obou vztahů obdržíme vztah

   $E(Q_2 - Q_1) = 6\pi\eta r(v_2 - v_1)$ a dosazením za $6\pi\eta r = \dfrac{mg}{v_0}$ (vztah v bodě 1) získáme výsledek

   $\Delta Q = (Q_2 - Q_1) = \dfrac{mg}{Ev_0}(v_2 - v_1)$; tedy ze známých hodnot naměřených rychlostí $\vec{v}_0, \vec{v}_1, \vec{v}_2$, intenzity elektrického pole E a hmotnosti kapičky m lze vypočítat rozdíl elektrických nábojů ΔQ.
4. R. A. Millikan zjistil, že naměřené rozdíly ΔQ jsou vždy celočíselným násobkem jisté nejmenší hodnoty rovné tzv. elementárnímu náboji $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.

Rutherfordův model atomu

E. Rutherford zjistil v roce 1911 na základě experimentů tyto poznatky o atomu:

- **ATOM** má kladně nabité **JÁDRO** a **ELEKTRONOVÝ OBAL** tvořený záporně nabitými elektrony; v jádře je soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu.
- **JÁDRO** atomu je mnohem menší než celý atom; jádro atomu má průměr řádově 10^{-14} m až 10^{-15} m, kdežto průměr celého atomu je řádově 10^{-10} m.
- U elektricky neutrálního atomu je velikost kladného náboje jádra stejná jako velikost záporného náboje elektronového obalu.

Př. 2

Výpočet velikosti atomu zlata (Au)

Molární hmotnost (str. 78) zlata $M_m = 196{,}967$ g/mol.

Počet atomů v 1 molu zlata je $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$ (N_A je Avogadrova konstanta, str. 78).

Počet atomů N_1 v jednotce objemu (např. v 1 cm^3) vypočítáme pomocí úměrnosti: $N_1 = N_A \dfrac{\rho}{M_m}$, kde $\rho = 19{,}32\ \text{g/cm}^3$ je hustota zlata.

Dosadíme do vzorce:

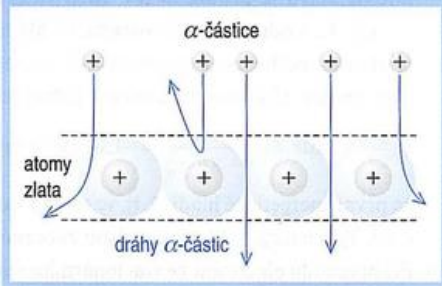
$$N_1 = 6{,}022 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}\,\frac{19{,}32\,\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}}{196{,}967\,\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 5{,}9 \cdot 10^{22}\,\text{cm}^{-3}.$$

V 1 cm^3 je tedy $5{,}9 \cdot 10^{22}$ atomů zlata a na jeden atom pak připadá objem $\dfrac{1}{5{,}9 \cdot 10^{22}}\,\text{cm}^3 = 16{,}95 \cdot 10^{-24}\,\text{cm}^3$.

Průměr atomu zlata je přibližně $2{,}57 \cdot 10^{-8}$ cm $= 2{,}57 \cdot 10^{-10}$ m.

RUTHERFORDŮV MODEL ATOMU

E. Rutherford v r. 1911 ostřeloval velmi tenkou zlatou fólii α-částicemi (jsou to jádra He a mají kladný náboj). Pokud by platil Thomsonův pudinkový model, měly by se α-částice průchodem skrz fólii vychylovat jen nepatrně. Při pokusech však docházelo také k velkým odchylkám od původního směru, některé α-částice se dokonce odrážely zpět. Z toho lze usoudit, že veškerý kladný náboj atomu je soustředěn v jádře atomu, které je značně menší než celý atom.



Podle počtu α-částic, které prolétají fólií bez odchylky, určil E. Rutherford velikost jádra atomu na řádově 10^{-14} m až 10^{-15} m.

Protože elektron je 1 837krát lehčí než atom vodíku, je elektronový obal atomu mnohem lehčí než celý atom, tedy většina hmoty atomu je soustředěná v atomovém jádře.

Nedostatky Rutherfordova modelu atomu

RUTHERFORDŮV MODEL ATOMU předpokládal, že kolem kladně nabitého jádra krouží elektrony se záporným nábojem, a proto je nazýván také **PLANETÁRNÍ MODEL** (elektrony obíhají jádro podobně jako planety obíhají Slunce). Tento model ovšem měl jeden veliký nedostatek – odporoval zákonům klasické fyziky. Elektron pohybující se po kružnici kolem jádra by měl (podle Maxwellovy teorie) vyzařovat spojité elektromagnetické záření, tím by ztrácel kinetickou energii, rychle by se přibližoval k jádru a asi za 10^{-10} sekundy by s ním měl splynout. Atom tvořený jádrem a obíhajícími elektrony by tedy musel být nestabilní.

Nicméně atomy se chovají úplně opačně. Patří mezi nejstabilnější objekty, které známe, a vyzařují diskrétní (nespojité) optické záření (emisní spektra, str. 150).

Dále Rutherfordův model nijak nevysvětloval přesnou zákonitost spektrálních čar emisního spektra vodíku popsanou Balmer-Rydbergovým vztahem ani emisní spektra ostatních prvků.

Tento problém se pokusil vyřešit dánský fyzik Niels Bohr, který fakt, že elektrony obíhají jádro po stabilních drahách a přitom nevyzařují světlo, položil jako jeden z postulátů svého nového modelu atomu formulovaného v roce 1913.

Bohrův model atomu

1. Atom je stabilní soustava složená z kladně nabitého jádra a z elektronového obalu. V jádře je soustředěna téměř celá hmotnost atomu (obr. str. 186).
2. Elektron se může bez vyzařování energie pohybovat kolem jádra jen po určitých drahách, tj. může se nacházet pouze v určitých kvantových stacionárních stavech. Každému kvantovému stavu je přiřazeno tzv. **HLAVNÍ KVANTOVÉ ČÍSLO** $n = 1, 2, 3...$ a odpovídá mu energetická hladina E_n.
3. U atomu vodíku jsou **ENERGETICKÉ HLADINY** E_n (tj. hodnoty energie elektronu vázaného k jádru) dány vztahem:
   $E_n = \frac{E_1}{n^2}$, kde $E_1 = -\frac{m_e e^4}{8h^2\varepsilon_0^2} = -13{,}6$ eV je energie elektronu na první energetické hladině, tj. ve stavu s kvantovým číslem $n = 1$. Tyto energetické hladiny jsou záporné.
4. Při přechodu elektronu ze stacionárního stavu o energii E_n do stavu o nižší energii E_m může atom **EMITOVAT** (vyzářit) kvantum elektromagnetického záření (foton) o frekvenci f_{nm} určené vztahem $hf_{nm} = E_n - E_m$. Tento jev se nazývá **EMISE**. Naopak při **ABSORPCI** (pohlcení) takového fotonu přejde atom ze stavu, který má energii E_m, do stavu o vyšší energii E_n.

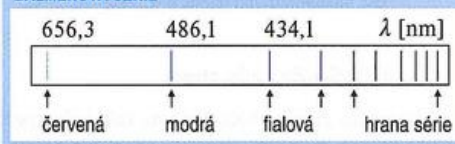
EMISNÍ ČÁROVÉ SPEKTRUM VODÍKU je tvořené spektrálními čarami (tj. vlnovými délkami) optického záření (viditelného, ultrafialového a infračerveného). Spektrální čáry jsou seskupeny do pěti sérií (skupin) a pro jejich frekvence f platí **BALMERŮV-RYDBERGŮV VZTAH**

$$f = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad n > m; \quad n, m = 1, 2, 3...,$$

který na základě experimentálních údajů formuloval v roce 1885 J. J. Balmer (pro $m = 2$) a později pro $m = 1, 2, 3, 4, 5$ J. R. Rydberg. $R = 3{,}289\,842 \cdot 10^{15}$ Hz je Rydbergova frekvence. Frekvence $f_m = \frac{R}{m^2}$ (pro $n \to \infty$) se nazývá **HRANA SÉRIE**.

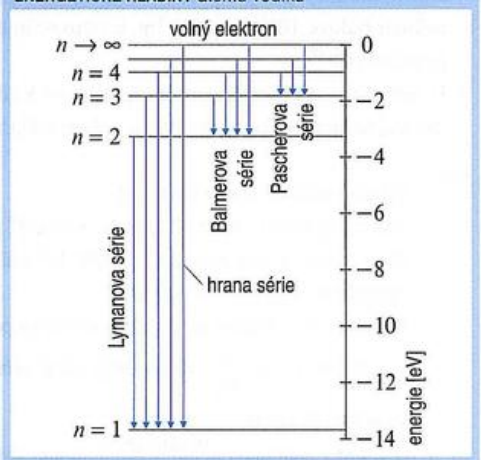
SPEKTRÁLNÍ SÉRIE byly nazvány podle svých objevitelů:
pro $m = 1$ série Lymanova (ultrafialové světlo),
pro $m = 2$ série Balmerova (viditelné světlo),
pro $m = 3$ Paschenova (infračervené záření),
pro $m = 4$ Brackettova (infračervené záření),
pro $m = 5$ Pfundova (infračervené záření).

BALMEROVA SÉRIE



Hraně $f_2 = \frac{R}{2^2} = 8{,}22 \cdot 10^{14}$ Hz Balmerovy série odpovídá vlnová délka $\lambda_2 = 364{,}6$ nm.

ENERGETICKÉ HLADINY atomu vodíku



Záporná hodnota energetických hladin E_n znamená, že na uvolnění elektronu z atomu je mu nutno dodat kladnou energii rovnu alespoň absolutní hodnotě E_n. Šipky znázorňují přechody z vyšších energetických hladin na nižší, při nichž atom emituje světlo.

5. Pro poloměry r_n kruhových drah elektronu pohybujícího se kolem jádra odvodil Bohr vztah $r_n = a \cdot n^2$, kde n je hlavní kvantové číslo, $a = \dfrac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$ je BOHRŮV POLOMĚR vodíkového atomu, $a = 0{,}529 \cdot 10^{-10}$ m.

Frekvence, resp. vlnové délky spektrálních čar vypočítané podle Bohrova modelu atomu jsou ve velmi dobré shodě s experimentem. Dalším důkazem kvantování energií vázaných stavů elektronů v atomu rtuti je FRANCKŮV-HERTZŮV EXPERIMENT provedený v letech 1912–1914.

Stacionární stav elektronu v elektronovém obalu atomu s nejnižší hodnotou energie E_1 se nazývá ZÁKLADNÍ STAV a má hlavní kvantové číslo $n = 1$. Stavy elektronu s vyšší hodnotou energie E_n se nazývají EXCITOVANÉ STAVY a jejich hlavní kvantové číslo $n > 1$.

Atom, jehož alespoň jeden elektron se nachází v excitovaném stavu, se nazývá EXCITOVANÝ ATOM a říkáme o něm, že se nachází v EXCITOVANÉM STAVU. Proces přechodu atomu do excitovaného stavu se nazývá EXCITACE. Rozlišujeme několik druhů excitace, nejobvyklejší jsou:

- TEPELNÁ EXCITACE – tepelný pohyb atomů má za následek jejich srážky, při nichž dochází k excitaci některých atomů,
- EXCITACE ATOMU PŘI ABSORPCI fotonu o frekvenci f_{nm}, kde $hf_{nm} = E_n - E_m$, E_m je energie základního stavu a E_n je energie excitovaného stavu atomu.

Proces přechodu atomu z excitovaného stavu do základního stavu (nebo do stavu o nižší energii) se nazývá DEEXCITACE.

Energetické hladiny E_n pro $n = 1, 2, 3...$ jsou záporné a odpovídající stavy VÁZANÝCH elektronů se nazývají VÁZANÉ STAVY. Energie vázaných stavů je kvantována, tj. nabývá jen určitých hodnot, a energetické spektrum je diskrétní.

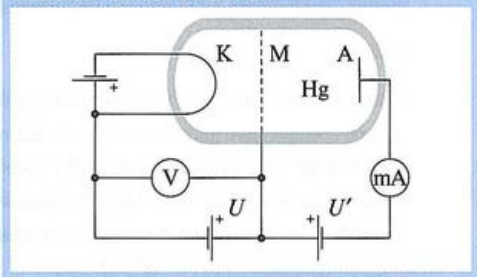
VAZEBNÍ ENERGIE je energie vázaných stavů elektronu a je rovna energii, kterou nutno vynaložit, aby elektron byl odtržen od jádra. Elektron s kladnou energií $E \geq 0$ je VOLNÝ, tj. není k jádru vázán a může se vzdálit libovolně daleko.

Odtržení elektronu od jádra způsobené zářením, nárazem atomu na jiné atomy, popř. molekuly nazýváme IONIZACE. Nejmenší energie, kterou musíme dodat elektronu vázanému k jádru, aby nastala ionizace, se nazývá IONIZAČNÍ ENERGIE.

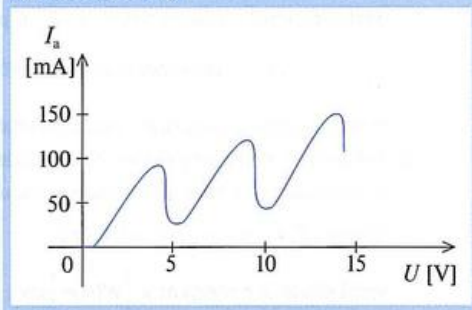
IONT vznikne z atomu nebo molekuly tímto způsobem:

- KATIONT vznikne IONIZACÍ, tj. odtržením jednoho nebo více záporných elektronů. Tento iont má kladný náboj a značí se X^+, X^{2+} atd., kde X je značka prvku.
- ANIONT vznikne připojením jednoho, resp. více elektronů k neutrální molekule nebo atomu a má záporný náboj. Značí se X^-, X^{2-}, kde X je značka prvku nebo sloučeniny.

FRANCKŮV-HERTZŮV EXPERIMENT



Výbojová trubice je naplněna párami rtuti. Mezi žhavenou katodou K (zdroj elektronů) a anodou A je mřížka M s kladným napětím U, které urychluje elektrony vylétající z katody. Elektrony prolétají skrz mřížku, dopadají na anodu a vytvářejí anodový proud I_a.



Závislost proudu I_a na urychlujícím napětí U ukazuje, že dochází k pravidelným poklesům proudu pro celočíselné násobky napětí $U = n \cdot 4{,}89$ V, $n = 1, 2, 3...$

Vysvětlení: Energie základního stavu atomu rtuti $E_1 = -10{,}40$ eV, energie prvního excitovaného stavu $E_2 = -5{,}51$ eV. Rozdíl energetických hladin je $\Delta E = E_2 - E_1 = 4{,}89$ eV. Elektrony při srážkách excitují atomy rtuti a ztrácejí část (rovnu $\Delta E = 4{,}89$ eV) své kinetické energie. K anodě se pak nedostanou a anodový proud poklesne.

Atomy rtuti se po srážce vracejí do základního stavu a energii 4,89 eV vyzáří jako foton o odpovídající vlnové délce $\lambda = 253{,}7$ nm. Toto záření bylo skutečně pozorováno.

IONIZAČNÍ ENERGIE atomu vodíku v základním stavu je 13,6 eV.

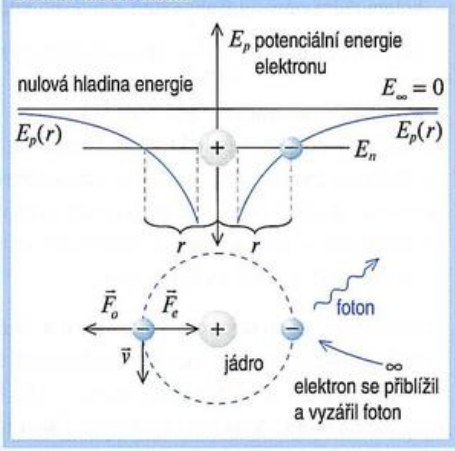
KATIONT draslíku K^+, resp. mědi Cu^{2+} vznikl odtržením jednoho, resp. dvou elektronů od atomu. **ANIONT** Cl^-, resp. SO_4^{2-} vznikl připojením jednoho, resp. dvou elektronů k neutrálnímu atomu Cl, resp. molekule SO_4.

Př. 3

Bohrův model atomu – odvození vztahu pro energetické hladiny $E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\cdot\frac{1}{n^2}$.

1. Atom vodíku vznikne např. připojením volného elektronu s nulovou energií k jádru (protonu). Elektron se pak nachází ve vzdálenosti r od středu jádra a energie $W(r)$, kterou získal přiblížením se k jádru na tuto vzdálenost, je podle zákona zachování energie číselně rovna potenciální energii:
$W(r) = |E_p(r)|$, tedy $W(r) = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r}$.
2. N. Bohr řešil problém vodíkového atomu podle klasické mechaniky jako pohyb elektronu v poli centrálních sil. Protože podle Bohrova modelu elektron v atomu krouží kolem jádra, působí na něj odstředivá síla $\vec{F}_o$ a současně je přitahován k jádru elektrickou silou $\vec{F}_e$, přičemž platí $\vec{F}_o = -\vec{F}_e$, tj. platí rovnice $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$. Násobením této rovnice veličinou r a porovnáním s výrazem pro energii $W(r)$ obdržíme vztah $W(r) = mv^2$.
3. Energie $W(r)$, kterou volný elektron získal přiblížením se k jádru na vzdálenost r, se zčásti promění na kinetickou energii elektronu $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}W(r)$ a zčásti se vyzáří jako foton o energii $hf' = \frac{1}{2}W(r) = \frac{1}{2}mv^2$.
4. Pro energii $W(r)$ stanovil Bohr **kvantovací podmínku**: $W(r) = mv^2 = n\cdot h\cdot f$, kde n je přirozené číslo, h je Planckova konstanta, f je frekvence oběhu elektronu na kruhové dráze kolem jádra. Kvantovací podmínku upravíme dosazením za $v = \omega r$ (str. 18) a $\omega = 2\pi f$ na tvar $mv\omega r = mv2\pi f r = n\cdot h\cdot f$ a vykrácením frekvencí f obdržíme vztah: $2\pi mvr = n\cdot h$.
5. Z upravené rovnice $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r} = mv^2$ (bod 2) plyne pro rychlost vztah $v^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 rm}$ a z kvantovací podmínky (bod 4) plyne vztah $v^2 = \left(\frac{nh}{2\pi mr}\right)^2$. Porovnáním obou vztahů odvodíme Bohrův vzorec pro „dovolené" poloměry kruhových drah elektronu: $r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2}n^2$ $(n = 1, 2, 3...)$.
6. Dosazením poloměru r_n do vztahu pro energii $W(r)$ (bod 1) obdržíme vztah $W(r_n) = -\frac{me^4}{4\varepsilon_0^2 h^2}\cdot\frac{1}{n^2}$. Protože energie elektronu E_n na dráze s poloměrem r_n se rovná polovině získané energie $W(r_n)$ (zbytek byl vyzářen), pro energii elektronu E_n vázaného ve vodíkovém atomu na dráze s kvantovým číslem n platí vztah: $E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\cdot\frac{1}{n^2}$.

Bohrův model atomu



Vztah pro potenciální energii elektronu nacházejícího se v centrálním poli kladného jádra je $E_p(r) = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r}$, kde e je elementární náboj, r je vzdálenost elektronu od středu jádra, ε_0 je permitivita vakua (str. 107).

Elektrická síla $F_e = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r^2}$ (str. 105).

Odstředivá síla $F_o = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$ (str. 33), kde v je velikost rychlosti pohybu elektronu na kruhové dráze kolem jádra, m je hmotnost elektronu, $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvence a f je frekvence kruhového pohybu elektronu.

Upravíme-li kvantovací podmínku $2\pi mvr = n\cdot h$ do tvaru $2\pi r = n\frac{h}{mv}$, vidíme, že na kruhové trajektorii o poloměru r je uložen celý počet de Broglieových vlnových délek $\lambda = \frac{h}{mv}$.

Víte, že Bohr kvantovací podmínku pro energii postuloval tak, aby výpočet frekvencí spektrálních čar byl ve shodě s naměřenými údaji?
Když pak de Broglie zjistil, že **dovolené dráhy** elektronu (tj. dráhy, které splňují kvantovací podmínku) jsou ty, na něž se vejde celistvý počet vlnových délek $\lambda = \frac{h}{mv}$, byl odtud jen krůček k přiřazení vlnové délky hmotným částicím.

Bohrův model atomu – přednosti a nedostatky

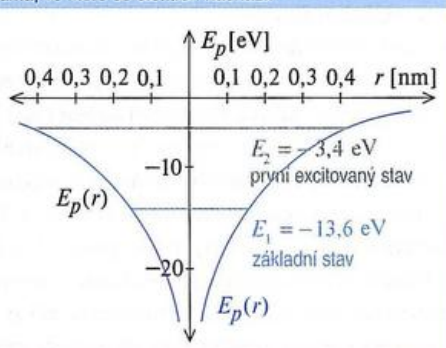
Přednosti: Model velmi dobře popisuje energetické hladiny elektronu v atomu vodíku, přechody mezi nimi a vysvětluje emisi a absorpci optického záření. Termíny „energetická hladina", „základní a excitovaný stav", „hlavní kvantové číslo" byly zavedeny správně a lze je používat do dnešní doby. Dokonce i průměr atomu přibližně 10^{-10} m (Bohrův poloměr, str. 185) odpovídá skutečnosti.

Nedostatky: Bohrův model atomu je PLANETÁRNÍ, stejně jako Rutherfordův model a Maxwellova teorie předpovídá, že takový atom nemůže existovat (podrobněji str. 184, Rutherfordův model). Kvantovací podmínka je aplikována dodatečně z důvodu, aby model odpovídal experimentálním údajům. Model atomu je „placatý", a to je v rozporu se známými fakty, že atom má v základním stavu kulovou symetrii.

Tyto nedostatky odstranil kvantově-mechanický model atomu, který vytvořil v r. 1926 E. Schrödinger.

Elektron v potenciálové jámě

Závislost potenciální energie $E_p(r)$ elektronu na vzdálenosti r od středu jádra v atomu vodíku. Závislost je vynesena napravo i nalevo, aby byla naznačena potenciálová jáma, ve které se elektron nachází.



Kvantově-mechanický model atomu vodíku

KVANTOVĚ-MECHANICKÝ MODEL atomu vyplynul z řešení Schrödingerovy rovnice (str. 181) pro elektron v centrálním elektrickém poli jádra atomu. Elektron je vázán k jádru, protože se nachází v **potenciálové jámě**, a podle požadavků kvantové mechaniky může existovat pouze v jednom z diskrétních stacionárních kvantových stavů. Tyto stacionární stavy jsou popsány VLNOVOU FUNKCÍ $\psi(x,y,z)$, která je řešením SCHRÖDINGEROVY ROVNICE.

Čtverec absolutní hodnoty vlnové funkce, tj. $|\psi(x,y,z)|^2$, udává HUSTOTU PRAVDĚPODOBNOSTI výskytu elektronu v daném stacionárním stavu, tj. skutečnost, že elektron se nachází v určitém místě atomu udaném souřadnicemi x, y, z.

PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU P elektronu v malém objemu $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ kolem bodu, jehož souřadnice jsou x, y, z, je součin čtverce absolutní hodnoty vlnové funkce $|\psi|^2$ a tohoto objemu ΔV, tj. $P = |\psi|^2 \Delta x \Delta y \Delta z$.

STACIONÁRNÍ STAV elektronu se nazývá stav, který je charakterizován konstantní hodnotou několika veličin (parametrů) úplně popisujících stav částice (str. 181), přičemž ostatní veličiny se mohou měnit (v klasické mechanice) nebo nejsou přesně určeny (v kvantové mechanice). V kvantově-mechanickém modelu atomu je například veličinou popisující stav elektronu energie, přičemž o jeho přesné poloze nemůžeme říci nic (str. 188). Z matematického hlediska je vlnová funkce $\psi(x,y,z)$ popisující stacionární stav řešením tzv. bezčasové Schrödingerovy rovnice, neobsahující jako proměnnou čas t.

Elektron v potenciálové jámě lze částečně porovnat s napjatou strunou upevněnou na obou koncích (str. 99). Na struně vzniknou stojatá vlnění, jejichž vlnové délky nejsou libovolné, protože musí splňovat podmínku, aby se na strunu vešel celistvý násobek půlvln. Stejně tak vlnová délka VÁZANÉHO ELEKTRONU, tj. „uvězněného" v potenciálové jámě, může nabývat pouze diskrétní hodnoty (Bohrova kvantovací podmínka, str. 186) a řešení Schrödingerovy rovnice skutečně vede k nalezení pouze diskrétních stacionárních stavů (spektrum energetických hladin je nespojité).

U struny ovšem energie kmitání závisí na amplitudě podobně jako u mechanického oscilátoru (str. 96), kdežto u elektronu jeho energie na amplitudě de Broglieovy vlny nezávisí. Jeho energie je úměrná frekvenci de Broglieovy vlny (str. 180).

VOLNÝ ELEKTRON má energetické spektrum spojité, tj. jeho energie může nabývat libovolné hodnoty.

Obdobou STACIONÁRNÍHO STAVU elektronu vázaného v atomu je POHYBOVÝ STAV izolovaného tělesa v klasické mechanice (str. 15, 28), který se nemění, přestože se těleso pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem; jeho energie je rovněž konstantní.

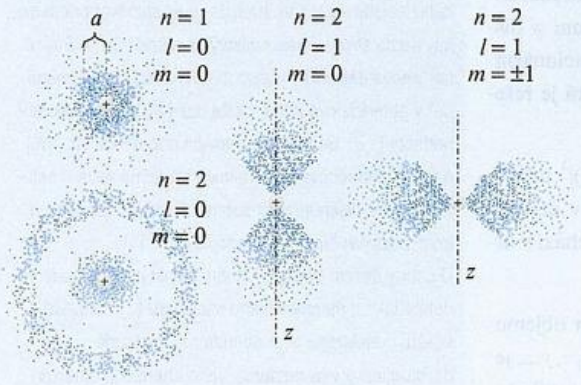
Kvantová čísla, vlnové funkce stacionárních stavů

Vlnové funkce ψ vyplývající z řešení Schrödingerovy rovnice pro jeden elektron v centrálním elektrickém poli (str. 105) jádra atomu jsou charakterizovány třemi kvantovými čísly:

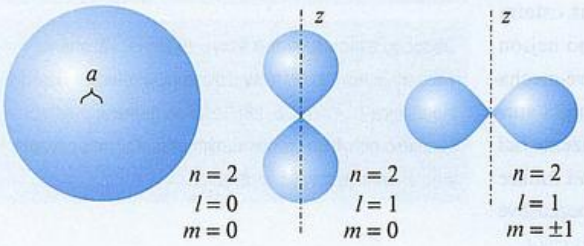
- HLAVNÍM KVANTOVÝM ČÍSLEM n, které určuje energii příslušného stacionárního stavu elektronu a nabývá hodnot $n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$
- ORBITÁLNÍM neboli VEDLEJŠÍM KVANTOVÝM ČÍSLEM l, které souvisí s orbitálním momentem hybnosti elektronu a pro dané n nabývá **dovolených hodnot** $l = 0, 1, 2, \ldots, n-1$,
- MAGNETICKÝM KVANTOVÝM ČÍSLEM m, které souvisí s magnetickým dipólovým momentem elektronu a pro dané l nabývá **dovolených hodnot** $m = \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm l$.

Dovolené hodnoty kvantových čísel pro $n = 1, 2, 3$ jsou uvedeny v tabulce. Vlnová funkce pro elektron v centrálním poli se nazývá též ORBITAL a tímto termínem se někdy (zejména pro aplikace v chemii) označuje také její grafické znázornění. Jako grafické znázornění vymezuje ORBITAL prostor s přibližně 90% až 99% pravděpodobností výskytu elektronu kolem jádra.

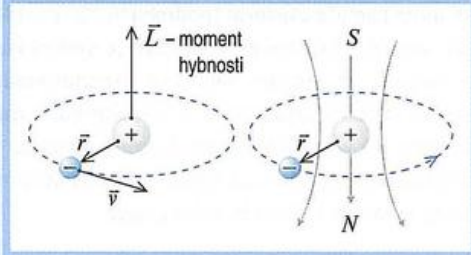
Znázornění hustoty pravděpodobnosti $|\psi(x, y, z)|^2$ výskytu elektronu bodovým grafem, který poskytuje obraz „polohy" elektronu jako „elektronového oblaku" pro základní stav ($n = 1$) a pro první excitovaný stav ($n = 2$) atomu vodíku:



Znázornění hustoty pravděpodobnosti $|\psi(x, y, z)|^2$ výskytu elektronu v atomu vodíku pomocí ORBITALŮ vymezujících prostor výskytu kolem jádra s 90% pravděpodobností:



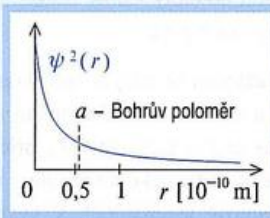
Elektron v atomu má také ORBITÁLNÍ MOMENT HYBNOSTI a MAGNETICKÝ DIPÓLOVÝ MOMENT, které jsou rovněž kvantovány. Vyplývají z řešení Schrödingerovy rovnice a lze je přiblížit našemu myšlení pomocí Bohrova modelu atomu. ORBITÁLNÍ MOMENT HYBNOSTI je moment hybnosti elektronu „obíhajícího" kolem jádra (str. 33). MAGNETICKÝ DIPÓLOVÝ MOMENT souvisí s tím, že „obíhající" elektron tvoří uzavřenou elektrickou smyčku (malinkou cívku o jednom závitu, str. 124), která se chová jako velmi malý magnet, tj. MAGNETICKÝ DIPÓL.



Skutečnost, že atomy jsou mikroskopicky malé magnety (magnetické dipóly), vysvětluje magnetické vlastnosti látek. Kvantování magnetického dipólového momentu bylo experimentálně prokázáno Stern-Gerlachovým pokusem na atomech stříbra v roce 1922.

DOVOLENÉ HODNOTY KVANTOVÝCH ČÍSEL l, m PRO HLAVNÍ KVANTOVÉ ČÍSLO $n = 1, 2, 3$

kvantové číslo		
hlavní n	vedlejší l	magnetické m
$n = 1$	$l = 0$	$m = 0$
$n = 2$	$l = 0$	$m = 0$
	$l = 1$	$m = 0, \pm 1$
$n = 3$	$l = 0$	$m = 0$
	$l = 1$	$m = 0, \pm 1$
	$l = 2$	$m = 0, \pm 1, \pm 2$



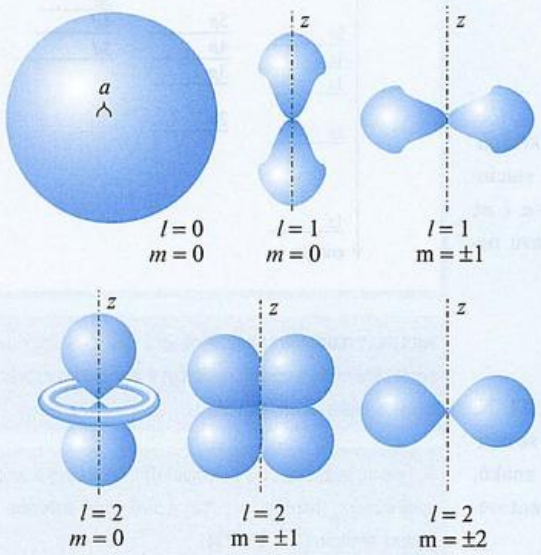
Vlnová funkce základního stavu elektronu v atomu vodíku pro $n = 1, l = 0, m = 0$ má tvar:

$$\psi(r) = \pi^{-\frac{1}{2}} a^{-\frac{3}{2}} e^{-\frac{r}{a}},$$

kde veličina a je BOHRŮV POLOMĚR (str. 185), r je vzdálenost od středu jádra.

Vymezení ORBITALU pro základní stav: elektron se nachází s 90% pravděpodobností uvnitř kulové plochy o poloměru $r = 2{,}67\,a = 1{,}41 \cdot 10^{-10}$ m.

Znázornění hustoty pravděpodobnosti $|\psi(x, y, z)|^2$ výskytu elektronu v atomu vodíku pro hlavní kvantové číslo $n = 3$ a pro všechna dovolená kvantová čísla $l = 0, 1, 2$, $m = 0, \pm 1, \pm 2$ pomocí ORBITALŮ:



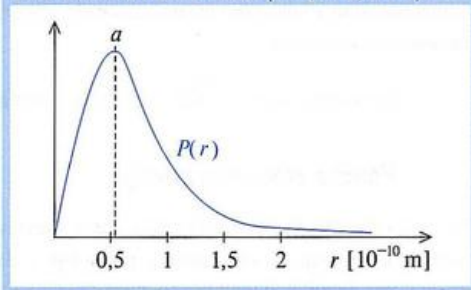
SPIN elektronu je kromě hmotnosti a náboje další základní vlastnosti elektronu (str. 200). Spin se významně projevuje při výstavbě elektronového obalu atomu. Elektron v atomu charakterizuje SPINOVÉ MAGNETICKÉ KVANTOVÉ ČÍSLO m_s, které nabývá dvou hodnot: $m_s = \frac{1}{2}$ nebo $m_s = -\frac{1}{2}$.

Kvantová čísla

Nachází-li se v elektronovém obalu atomu jeden nebo více elektronů, jejich STACIONÁRNÍ KVANTOVÉ STAVY jsou popsány čtyřmi kvantovými čísly n, l, m, m_s:

STACIONÁRNÍ KVANTOVÉ STAVY ELEKTRONŮ V ATOMU			
KVANTOVÉ ČÍSLO	symbol	dovolené hodnoty	vyjadřuje
hlavní	n	1, 2, 3, 4, 5, ...	energii a vzdálenost od jádra
vedlejší (orbitální)	l	0, 1, 2, ..., $n - 1$	orbitální moment hybnosti
magnetické	m	$\pm 1, \pm 2, \ldots, \pm l$	magnetický dipólový moment
spinové magnetické	m_s	$\pm 1/2$	spin elektronu

Radiální hustota pravděpodobnosti $P(r)$ základního stavu elektronu v atomu vodíku ($n = 1, l = 0, m = 0$).



Veličina $P(r)\Delta r = 4\pi r^2 \psi^2(r)\Delta r$ vyjadřuje pravděpodobnost výskytu elektronu v objemu mezi dvěma soustřednými kulovými plochami, jejichž poloměry jsou r a $r + \Delta r$. Největší pravděpodobnost $P(a)$ je pro Bohrův poloměr a.

V obrázcích orbitalů je **osa symetrie** z. Nachází-li se atom ve vnějším magnetickém poli, osu symetrie určí magnetická indukce a pak lze stavy s různým magnetickým kvantovým číslem m rozlišit. Jinak jsou tyto stavy, které mají také stejnou energii, nerozlišitelné a elektron se může nacházet ve stavu, který je jejich kombinací.

SPIN $\vec{S}$ neboli **spinový moment hybnosti** si lze pomocí klasické fyziky představit jako projev rotace elektronu kolem jeho osy. Velikost spinu

$|\vec{S}| = \hbar\sqrt{S(S+1)}$, kde $S = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \ldots$

je SPINOVÉ KVANTOVÉ ČÍSLO, $\hbar$ je redukovaná Planckova konstanta (str. 181). V atomu může spin elektronu nabývat dvou hodnot podle vztahu $S_z = m_s\hbar$,

kde $m_s = \pm\frac{1}{2}$ je **SPINOVÉ MAGNETICKÉ KVANTOVÉ ČÍSLO.**

Všechny stavy se stejnou hodnotou hlavního kvantového čísla n tvoří SLUPKU. Ve slupce je $2n^2$ stavů.

Označení slupek písmeny:

n	1	2	3	4	5	6	7	...
	K	L	M	N	O	P	Q	...

Všechny stavy se stejnou hodnotou hlavního kvantového čísla n a vedlejšího kvantového čísla l tvoří PODSLUPKU. Všechny stavy v jedné podslupce mají stejnou energii. V podslupce je $2(2l + 1)$ stavů.

Označení orbitálních kvantových čísel l písmeny:

l	0	1	2	3	4	5	...
	s	p	d	f	g	h	...

PODSLUPKY a odpovídající energetické hladiny v elektronovém obalu atomu s jedním nebo více elektrony jsou označovány kombinací hlavního a vedlejšího kvantového čísla, které je nahrazeno příslušným písmenem:

hlavní kvantové číslo — **1s** — vedlejší kvantové číslo

Pauliho vylučovací princip

PAULIHO VYLUČOVACÍ PRINCIP říká, že v soustavě elektronů tvořících elektronový obal atomu může být v daném stacionárním kvantovém stavu popsaném kvantovými čísly n, l, m, m_s nejvýše jeden elektron (tj. v jednom kvantovém stavu nemohou být současně dva elektrony).

Stavba elektronového obalu

ELEKTRONOVÝ OBAL atomu je tvořen **SLUPKAMI** K, L, M, N, O, ... s hlavními kvantovými čísly $n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$, které se dělí na **PODSLUPKY**. Podslupky jsou označovány dvojicí znaků, např. 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, kde první znak je hlavní kvantové číslo n a druhý znak označuje vedlejší kvantové číslo l (označení podslupky, str. 189).

Podslupky jsou obsazovány elektrony podle Pauliho vylučovacího principu.

V jedné podslupce může být nejvýše $2(2l + 1)$ elektronů.

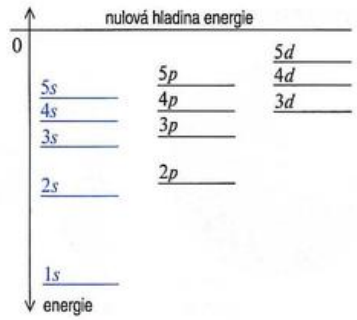
V jedné slupce může být nejvýše $2n^2$ elektronů.

OBSAZOVÁNÍ SLUPEK A PODSLUPEK ELEKTRONY PODLE PAULIHO VYLUČOVACÍHO PRINCIPU

kvantová čísla				označení podslupky	počet elektronů	
n	l	m	m_s		v podslupce	ve slupce
1	0	0	± 1/2	1s	2	2
2	0	0	± 1/2	2s	2	8
	1	−1, 0, 1	± 1/2	2p	6	
3	0	0	± 1/2	3s	2	18
	1	−1, 0, 1	± 1/2	3p	6	
	2	−2, −1, 0, 1, 2	± 1/2	3d	10	
4	0	0	± 1/2	4s	2	32
	1	−1, 0, 1	± 1/2	4p	6	
	2	−2, −1, 0, 1, 2	± 1/2	4d	10	
	3	−3, −2, −1, 0, 1, 2, 3	± 1/2	4f	14	

Celková soustava elektronů, které vytvářejí elektronový obal atomu, se nazývá **ELEKTRONOVOU KONFIGURACÍ** daného prvku.

ENERGETICKÉ HLADINY elektronů v atomu lithia. Hladina 4s je níže než 3d.



PAULIHO VYLUČOVACÍ PRINCIP obecně říká, že v soustavě nerozlišitelných fermionů může být v jednom kvantovém stavu nejvýše jeden fermion.

FERMIONY jsou částice s poločíselnými spinovými kvantovými čísly m_s (např. $m_s = \pm 1/2$) a patří k nim elektron, proton, neutron (str. 204).

BOSONY jsou částice s celočíselnými spinovými kvantovými čísly ($m_s = 0, 1, \ldots$), patří k nim např. fotony.

PRINCIP NEROZLIŠITELNOSTI ČÁSTIC říká, že identické částice, které mají všechny charakteristiky stejné, nelze rozlišit. Např. dva elektrony nelze nijak rozlišit, není možné je označit, jako např. dvě zcela podobná dvojčata, která můžeme rozlišit pomocí oblečení.

ELEKTRONOVÁ KONFIGURACE se znázorňuje pomocí rámečkových diagramů:

$m_s = \frac{1}{2}$ [↑↓] $m_s = -\frac{1}{2}$

Atom uhlíku $_6C$ v základním stavu (má šest elektronů):

$(1s)^2$ [↑↓] $(2s)^2$ [↑↓] $(2p)^2$ [↑][↑][ ]

Atom uhlíku $_6C^*$ v excitovaném stavu:

$(1s)^2$ [↑↓] $(2s)^1$ [↑] $(2p)^3$ [↑][↑][↑]

Elektronová konfigurace se zapisuje podle vzoru:

$(1s)^2 (2s)^2 (1p)^6$

označení podslupky — počet elektronů v podslupce

Pro stavbu elektronového obalu atomu platí kromě Pauliho vylučovacího principu též PRINCIP MINIMÁLNÍ ENERGIE: Energetické hladiny s nižší energií se obsazují dříve než energetické hladiny s energií vyšší.

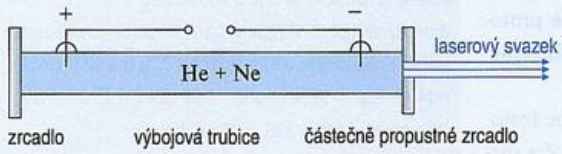
Protože elektrony v elektronovém obalu atomu na sebe vzájemně působí, některé energetické hladiny s vyšším hlavním kvantovým číslem n mají nižší energii než hladiny s nižším kvantovým číslem n (obr. str. 190). Při obsazování podslupek (resp. energetických hladin) pak platí pravidlo: nejprve se začínají obsazovat podslupky s menším součtem $n + l$, v případě rovnosti součtu podslupky s nižším n.

Slupky a podslupky elektronového obalu s nižšími kvantovými čísly nazýváme VNITŘNÍ. Vnější (pod)slupka, která je obsazována jako poslední, se nazývá VALENČNÍ VRSTVA a její elektrony nazýváme VALENČNÍ.

VALENČNÍ ELEKTRONY určují chemické vlastnosti prvku.

Laser

Konstrukci laseru lze ukázat na helium-neonovém laseru:



Výbojkou naplněnou směsí helia a neonu protéká proud elektronů, které se srážejí s atomy He, ty se pak srážejí s atomy Ne a atomy neonu emitují laserové světlo, které se odráží od rovnoběžných zrcadel na koncích výbojky. Mnohonásobnými odrazy se zesiluje jen svazek světla rovnoběžný s osou výbojky. Jedno ze zrcadel je částečně propustné, takže laserové světlo jím prochází a vytváří laserový svazek.

LASERY využívají STIMULOVANÉ EMISE. Princip jejich práce lze také ukázat na helium-neonovém laseru.

Atomy helia se srážkami s elektrony dostávají do metastabilního stavu o energii $E_3 = 21{,}61$ eV. V důsledku dlouhé doby života tohoto stavu je ve směsi obou plynů dostatek excitovaných atomů helia, ty srážkami excitují atomy neonu, které se pak nacházejí v excitovaném stavu o energii $E_2 = 21{,}66$ eV. Spontánní emise jediného fotonu při přechodu atomu neonu ze stavu o energii E_2 do stavu o energii E_1 stimuluje emisi dalšího fotonu; řetězová reakce stimulované emise fotonů a jejich odrazy mezi rovnoběžnými zrcadly vytvoří koherentní svazek červeného světla. Atomy neonu spontánní emisí rychle přecházejí ze stavu o energii E_1 do základního stavu o energii $E_0 = 0$ eV a jsou připraveny na další excitaci.

Obsazování energetických hladin

Elektronová konfigurace 18 elektronů argonu $_{18}Ar$ je $(1s)^2\,(2s)^2\,(2p)^6\,(3s)^2\,(3p)^6$. Elektronový obal draslíku $_{19}K$ má 19 elektronů. Protože hladina $4s$ má nižší energii nežli hladina $3d$, 19. elektron obsadí hladinu $4s$. Elektronová konfigurace draslíku tedy je: $(1s)^2\,(2s)^2\,(2p)^6\,(3s)^2\,(3p)^6\,(4s)^1$.

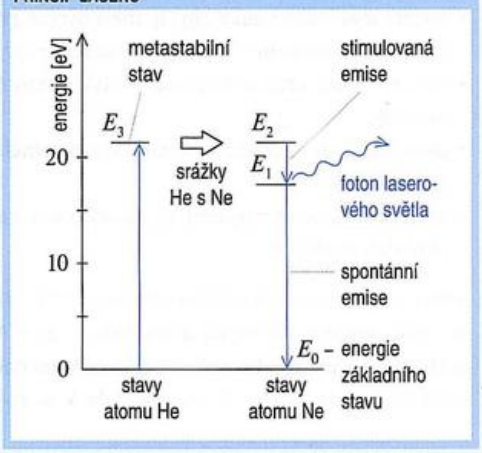
U vzácných plynů He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn je VALENČNÍ VRSTVA zcela zaplněna elektrony a tyto prvky jsou chemicky téměř netečné. Naproti tomu u alkalických kovů Li, Na, K, Rb, Cs, Fr je ve VALENČNÍ VRSTVĚ jeden elektron, navíc slabě vázaný, a tyto prvky jsou chemicky velmi reaktivní.

SPONTÁNNÍ EMISE je proces samovolného vyzáření fotonu excitovaným atomem (nebo molekulou).

STIMULOVANÁ EMISE nastává, když na atom v excitovaném stavu o energii E_n dopadne foton o frekvenci f_{nm}. Při dopadu tohoto stimulujícího fotonu přejde atom do nižšího stavu E_m a přitom vyzáří další foton o stejné frekvenci, přičemž $hf_{nm} = E_n - E_m$. Oba fotony, emitovaný i původní, jsou zcela identické, tj. vlny spojené s těmito dvěma fotony mají stejnou frekvenci, fázi, polarizaci a směr šíření; tj. jsou KOHERENTNÍ.

Střední doba trvání excitovaného stavu atomů, tj. střední doba od jejich excitace po spontánní emisi, je obvykle kolem 10^{-8} s. Pro některé excitované stavy je tato doba až 10^5 krát delší (kolem 10^{-3} s). Tyto stavy s „dlouhou" dobou života se nazývají METASTABILNÍ STAVY.

PRINCIP LASERU



8.3 Jaderná fyzika

Složení atomového jádra

ATOMOVÉ JÁDRO se skládá z PROTONŮ a NEUTRONŮ, které nazýváme společným názvem NUKLEONY. Počet protonů v jádře udává PROTONOVÉ ČÍSLO Z (též ATOMOVÉ ČÍSLO). Protonové číslo určuje kladný elektrický náboj jádra $Q = Ze$ a je to současně pořadové číslo chemického prvku v periodické soustavě prvků ($e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C je elementární náboj).

Počet neutronů v jádře udává NEUTRONOVÉ ČÍSLO N, celkový počet nukleonů vyjadřuje NUKLEONOVÉ ČÍSLO A (též HMOTNOSTNÍ ČÍSLO), platí: $A = Z + N$.

Protonové a nukleonové číslo jsou charakteristikami jádra atomu a zapisujeme je symbolem prvku ve tvaru ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ nebo ve tvaru $\mathrm{X}(A)$, kde X je značka prvku.

Rozlišujeme názvy:

- CHEMICKÝ PRVEK je látka tvořená atomy, jejichž jádra mají stejné protonové číslo Z, mohou však mít různý počet neutronů (tedy i nukleonů). Prvek zapisujeme symbolem ${}_{Z}\mathrm{X}$.
- NUKLID je tvořený atomy, jejichž jádra mají stejné protonové číslo Z i stejné nukleonové číslo A. Nuklid zapisujeme symbolem ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, kde X je značka prvku.
- IZOTOPY jsou různé nuklidy téhož prvku. Dva různé izotopy ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ a ${}^{A'}_{Z}\mathrm{X}$ prvku ${}_{Z}\mathrm{X}$ mají stejné protonové číslo Z a různá nukleonová čísla, $A \neq A'$, tedy i různou hmotnost.

Vlastnosti atomových jader

Pro poloměr R atomového jádra, které má nukleonové číslo A, platí závislost: $R = R_0 \sqrt[3]{A}$, kde $R_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-15}$ m.

JADERNÉ SÍLY jsou přitažlivé síly působící mezi nukleony v jádře atomu, drží pohromadě atomové jádro. Jaderné síly:

- působí mezi všemi nukleony, tj. mezi dvěma protony, mezi protonem a neutronem i mezi dvěma neutrony,
- jsou mnohem větší než odpudivé elektrostatické síly mezi protony,
- jsou silami velmi krátkého dosahu srovnatelného s velikostí jádra (asi 10^{-15} m),
- projevují vlastnost nasycení, tj. působí pouze na malý počet okolních nukleonů.

HMOTNOSTNÍ SCHODEK B (též HMOTNOSTNÍ ÚBYTEK) je rozdíl mezi součtem klidových hmotností $Z \cdot m_p + N \cdot m_n$ všech nukleonů tvořících jádro nuklidu ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ a skutečnou hmotností jádra m_j, tj. $B = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_j$, kde $N = A - Z$.

Osnova kapitoly:

- Složení atomového jádra, nuklid, izotop
- Vlastnosti atomových jader, jaderné síly, vazební energie
- Jaderné reakce – štěpení, řetězová reakce, fúze
- Radioaktivita, radioaktivní záření
- Jaderná fyzika v praxi, jaderná elektrárna, reaktor

PROTON je částice s kladným elementárním elektrickým nábojem $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C, jeho hmotnost $m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1{,}0073\ m_u = 938{,}272\ \mathrm{MeV}/c^2$.
NEUTRON je elektricky neutrální částice o hmotnosti $m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1{,}0087\ m_u = 939{,}566\ \mathrm{MeV}/c^2$, kde m_u je atomová hmotnostní konstanta (str. 78).
V jaderné fyzice se hmotnost částic udává též v MeV/c^2
$1\ \mathrm{MeV}/c^2 = 1{,}782\,662 \cdot 10^{-30}$ kg.
Značka protonu je p (nebo ${}^{1}_{1}\mathrm{p}$), neutronu n (nebo ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$).

Přírodní PRVKY jsou obvykle směsí různých izotopů. Např. přírodní uran je směsí 99,28 % uranu 238 (izotop ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$), 0,71 % uranu 235 (izotop ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$) a přibližně 0,01 % U (234). Uran 235 slouží jako jaderné palivo v reaktorech. Jádro IZOTOPU ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ má 92 protonů a $143 = 235 - 92$ neutronů. Jádro izotopu ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ má též 92 protonů a $146 = 238 - 92$ neutronů.

Ionizujeme-li dva různé IZOTOPY téhož prvku a vzniknou-li kladné ionty o stejném náboji, budou se v magnetickém poli $\vec{B}$ pohybovat po kružnicích s různými poloměry v důsledku jejich odlišné hmotnosti. Těžší nuklidy po kružnici s větším poloměrem, lehčí po kružnici s menším poloměrem (magnetická síla, str. 124). Tímto způsobem byly objeveny různé izotopy a zařízení založené na tomto principu sloužící k měření hmotnosti izotopů se nazývá HMOTNOSTNÍ SPEKTROMETR.

Objem atomového jádra V je úměrný nukleonovému číslu A, tj. $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \cdot A$, jak to vyplývá ze vzorce $R = R_0 \sqrt[3]{A}$.

HMOTNOSTNÍ SCHODEK
Hmotnost atomového jádra je vždy menší než součet klidových hmotností volných nukleonů, z nichž je toto jádro složeno. Při vytváření jádra z jednotlivých nukleonů se energie uvolňuje, a tím se jeho hmotnost snižuje (podle Einsteinova vztahu mezi energií a hmotností, str. 174). Na rozbití jádra na nukleony je nutno energii jádru dodat.

VAZEBNÍ ENERGIE JÁDRA E_j je energie, kterou je třeba jádru dodat, aby se rozdělilo na jednotlivé nukleony. Je to současně energie, která by se uvolnila při vzniku jádra z volných nukleonů.
Platí $E_j = B \cdot c^2$, kde B je hmotnostní schodek.
VAZEBNÍ ENERGIE NA JEDEN NUKLEON ε_j je definována vztahem $\varepsilon_j = \frac{E_j}{A}$.

Jaderné reakce

Přeměna jádra vyvolaná vzájemnou interakcí (např. srážkou) s jinými jádry nebo částicemi se nazývá **JADERNÁ REAKCE**.

- **ENDOENERGETICKÉ REAKCE** jsou jaderné reakce, při kterých je potřeba dodávat energii.
- **EXOENERGETICKÉ REAKCE** jsou jaderné reakce, při kterých se energie uvolňuje. Mají praktický význam v jaderné energetice.

Jaderné reakce dělíme na dva druhy:

- **JADERNÉ ŠTĚPENÍ** je štěpná jaderná reakce, při níž dochází k rozštěpení atomového jádra na nová lehčí jádra, tzv. fragmenty.
- **JADERNÁ SYNTÉZA (FÚZE)** je jaderná reakce, při níž dochází ke slučování lehčích jader na jádra těžší.

Exoenergetické **JADERNÉ ŠTĚPENÍ** může probíhat pouze pro jádra těžší, než jsou jádra Fe (graf). Z praktického hlediska existují čtyři nuklidy, tzv. **ŠTĚPNÉ MATERIÁLY**, při kterých se uvolňuje vysoká energie a lze je využít v jaderné energetice: dva izotopy uranu U(235), U(233) a dva izotopy plutonia Pu(239), Pu(241).

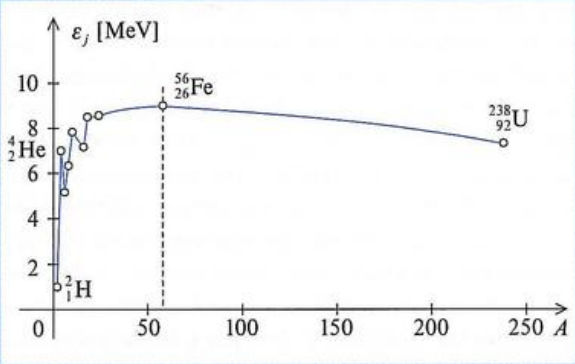
JADERNÉ ŠTĚPENÍ URANU 235 nastává po pohlcení pomalého neutronu a probíhá více způsoby,

např.: $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba}^{*} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr}^{*} + 3({}^{1}_{0}\mathrm{n})$,

nebo $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{94}_{38}\mathrm{Sr}^{*} + {}^{140}_{54}\mathrm{Xe}^{*} + 2({}^{1}_{0}\mathrm{n})$.

Rychlé neutrony uvolněné při jaderné reakci jsou zpomalovány srážkami s jádry atomů uranu nebo v jaderném reaktoru srážkami s jádry atomů **MODERÁTORU**. Zpomalené neutrony štěpí další jádra uranu 235, počet neutronů i počet rozštěpených jader lavinovitě narůstá a za jistých podmínek (str. 195) nastává **ŘETĚZOVÁ JADERNÁ REAKCE**.

Závislost **VAZEBNÍ ENERGIE** ε_j připadající na jeden nukleon na nukleonovém čísle A.



Pro nukleonové číslo $A < 56$ můžeme spojováním (syntézou) dvou lehčích jader vytvářet jádro těžší, které je ve většině případů stabilnější, a uvolňovat přitom jadernou energii. Naopak štěpením jader těžkých prvků vznikají lehčí stabilnější jádra a opět se uvolňuje energie.

Schematický zápis **JADERNÉ REAKCE**:

$$^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X} + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{x} \rightarrow {}^{A_3}_{Z_3}\mathrm{Y} + {}^{A_4}_{Z_4}\mathrm{y} + \ldots$$

X je jádro vstupující do reakce, x je částice nebo druhé jádro vstupující do reakce; Y, y jsou produkty reakce, tj. nově vzniklá jádra, resp. částice (může jich být i více).

Při jaderných reakcích platí **ZÁKONY ZACHOVÁNÍ ENERGIE A HMOTNOSTI**, tj. celková relativistická energie, resp. hmotnost částic vstupujících do reakce se zachovává. Při jaderných reakcích platí také
ZÁKON ZACHOVÁNÍ NÁBOJE: $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$ a
ZÁKON ZACHOVÁNÍ POČTU NUKLEONŮ: $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$.

První jaderná reakce byla uskutečněna E. Rutherfordem v roce 1919 a byla to reakce $^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$.

Objev neutronu: Neutronové záření bylo pozorováno při ozařování lehkých prvků (Be, B, Li) částicemi α (jádry He) v r. 1930 až 1932 (str. 198). Např. při ostřelování jader berylia částicemi α probíhá jaderná reakce $^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$ ($^{1}_{0}\mathrm{n}$ je značka neutronu). Značka protonu je $^{1}_{1}\mathrm{p}$ nebo $^{1}_{1}\mathrm{H}$.

V **MODERÁTORU** (ve vodě, v parafínu nebo v grafitu) se neutrony srážejí s jádry lehkých prvků, např. s jádry vodíku nebo s jádry uhlíku, a tím se účinně zpomalují.

Fragmenty jaderné reakce označené* jsou vysoce nestabilní a rozpadají se β-rozpadem na stabilnější nuklidy.

JADERNÁ SYNTÉZA (FÚZE) nastává při slučování jader lehkých prvků, např. vodiku, helia, lithia, berylia, uhlíku, dusíku atd. Aby jaderná syntéza proběhla, je třeba dodat **AKTIVAČNÍ ENERGII** na překonání odpudivých elektrických sil mezi kladně nabitými jádry. Tuto energii lze prakticky dodat např. zahřátím na velmi vysokou teplotu 10^7 K. Reakce jaderné fúze se pak nazývá **TERMOJADERNÁ REAKCE (FÚZE)**. Energie uvolněná při reakci je mnohonásobně vyšší než aktivační energie. Termojaderné reakce jsou zdrojem energie vyzařované Sluncem a hvězdami. Řízená **termojaderná reakce deuteron-deuteronová** je možným zdrojem levné energie v budoucnosti. **DEUTERON** je jádro **DEUTERIA**, tzv. těžkého vodíku (používá se též značka D). Deuterium je dostupné v neomezeném množství v mořské vodě ve formě těžké vody D_2O.

Radioaktivita

RADIOAKTIVITA je samovolná (spontánní) **JADERNÁ PŘEMĚNA** (též **JADERNÝ ROZPAD**) nestabilního izotopu určitého prvku na izotop jiného prvku, která je doprovázena emisí radioaktivního záření. Podle typu emitovaného záření mluvíme někdy o **ROZPADU** α, **ROZPADU** β nebo **ROZPADU** γ.
Nestabilní nuklidy, které projevují radioaktivitu, se nazývají **RADIONUKLIDY**. Rozlišujeme **PŘIROZENÉ RADIONUKLIDY** vyskytující se v přírodě (je jich asi 50) a **UMĚLÉ RADIONUKLIDY** připravené člověkem pomocí jaderných reakcí (je jich kolem 1 500). Podle toho rozlišujeme **PŘIROZENOU** nebo **UMĚLOU RADIOAKTIVITU**.

RADIOAKTIVNÍ ZÁŘENÍ je záření emitované (vysílané) atomovým jádrem při přeměně jádra (též radioaktivní přeměně).
Základní druhy radioaktivního záření:

- **ZÁŘENÍ** α je tok jader helia ${}^4_2He$, nazývaných též částice α, s kladným nábojem, přičemž kinetická energie všech částic je pro daný rozpad konstantní. Při vyzáření α-částice z jádra dojde k jaderné přeměně: ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\alpha$.
- **ZÁŘENÍ** β je tok elektronů, nazývaných též částice β^-, nebo pozitronů, tj. částic β^+. Jejich kinetická energie má spojité spektrum od nuly až po maximální hodnotu charakteristickou pro daný rozpad. Při vyzáření částice β^- z jádra dojde k jaderné přeměně: ${}^A_ZX \rightarrow {}_{Z+1}^{\ A}Y + {}^0_{-1}e + \overline{\nu}_e$, kde $\overline{\nu}_e$ je elektronové antineutrino. Při vyzáření částice β^+ dojde k jaderné přeměně: ${}^A_ZX \rightarrow {}_{Z-1}^{\ A}Y + {}^0_1e + \nu_e$, kde ν_e je elektronové neutrino.
- **ZÁŘENÍ** γ je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou $\lambda \leq 10^{-10}$ m. Je ze všech záření nejpronikavější.
- **NEUTRONOVÉ ZÁŘENÍ** je proud letících neutronů. Toto záření nenese náboj, proto je také velmi pronikavé.

SLUNCE obsahuje obrovské množství vodíku, který je postupně spalován jadernou syntézou na helium. První reakcí je fúze dvou protonů, při níž vzniká deuterium ${}^2_1H$ a pozitron e^+: ${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu$ (ν je neutrino). Druhou reakcí je syntéza deuteronu ${}^2_1H$ s protonem: ${}^2_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma$ a poslední reakce je:
${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + {}^1_1H + {}^1_1H$.

Deuteron-deuteronová jaderná syntéza:
${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n$; $E_r = 3{,}27$ MeV
${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_1H + {}^1_1H$; $E_r = 4{,}03$ MeV
Při druhé reakci vzniká triton ${}^3_1H$ (jádro tritia), který se pak slučuje s deuteriem v reakci: ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$; $E_r = 17{,}59$ MeV, kde E_r je energie uvolněná při reakci.

RADIOAKTIVITU uranu objevil v roce 1896 A. H. Becquerel. **PŘIROZENOU RADIOAKTIVITU** zkoumali manželé Curieovi. V r. 1898 objevili radium, které se rozpadem α rozpadá podle schématu: ${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^4_2He$.
UMĚLOU RADIOAKTIVITU objevili manželé Joliot-Curieovi v r. 1934 při ostřelování hliníku částicemi α:
${}^4_2He + {}^{27}_{13}Al \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^1_0n$. Jádra fosforu se spontánně měnila β^+-rozpadem v jádra křemíku:
${}^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^0_1e + \nu$.

RADIOAKTIVNÍ ZÁŘENÍ při průchodu látkou ionizuje atomy i molekuly a současně se zeslabuje. **ZÁŘENÍ** α se pohltí tlustým papírem nebo vrstvou vzduchu několik centimetrů silnou. **ZÁŘENÍ** β lze pohltit hliníkovým plechem. Na zeslabení a pohlcení **ZÁŘENÍ** γ se používají silné vrstvy materiálů obsahujících těžké prvky, např. olovo. **NEUTRONOVÉ ZÁŘENÍ** nejlépe pohlcují materiály, které obsahují jádra srovnatelné hmotnosti, jako má neutron, např. voda (H). Záření α i β se v elektrickém i magnetickém poli vychyluje, záření γ a neutronové záření se v elektrickém ani v magnetickém poli nevychylují.

ČÁSTICE β^- (elektron) vzniká při přeměně neutronu na proton uvnitř jádra: $n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e$.
ČÁSTICE β^+ (pozitron) vzniká při přeměně protonu na neutron uvnitř jádra: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$.

ELEKTRON označujeme ${}^0_{-1}e$ nebo e^-,
POZITRON (str. 198) označujeme ${}^0_1e$ nebo e^+.
NEUTRINO (str. 198) označujeme ν, jeho různé druhy ν_e, resp. $\overline{\nu}_e$ (str. 204).

AKTIVITA A radioaktivního zářiče vyjadřuje počet radioaktivních přeměn (rozpadů) ve vzorku daného radionuklidu za jednu sekundu. Jednotkou aktivity je **BECQUEREL** (Bq).
1 Bq = 1 rozpad za sekundu.

ZÁKON RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNY (dříve **ZÁKON RADIOAKTIVNÍHO ROZPADU**): Aktivita A radioaktivního zářiče je přímo úměrná počtu dosud nepřeměněných jader N daného radionuklidu, tedy $A(t) = \lambda \cdot N(t)$, kde λ je přeměnová konstanta. Zákon radioaktivní přeměny vyjádřen pomocí veličiny N má tvar $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, počet nerozpadlých jader $N(t)$ tedy klesá exponenciálně s časem. Aktivita A radioaktivního zářiče klesá také exponenciálně s časem $A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

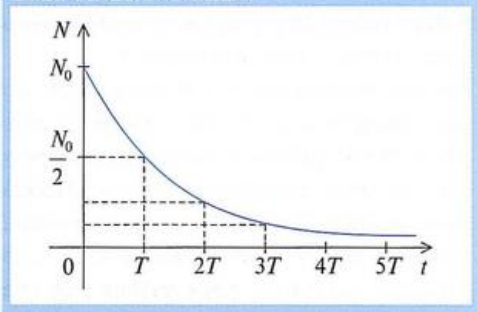
POLOČAS ROZPADU T (též **POLOČAS PŘEMĚNY**) je doba, za niž se rozpadne (přemění) polovina původního počtu jader.

Platí: $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}$.

RADIOAKTIVNÍ HODINY V ARCHEOLOGII

Zákon radioaktivní přeměny se využívá k určování stáří archeologických předmětů organického původu. Ve vzduchu je jisté konstantní množství radioaktivního uhlíku $^{14}_{6}C$, který vzniká z dusíku vlivem kosmického záření a rozpadá se s poločasem rozpadu 5 370 roků. Tento uhlík ve formě CO_2 přechází do rostlin a potravou do všech živých organismů. Po odumření přestává organismus radioaktivní uhlík přijímat a obsah $^{14}_{6}C$ klesá podle zákona radioaktivní přeměny. Změřením množství uhlíku $^{14}_{6}C$ v archeologickém nálezu je tedy možné zjistit jeho stáří (v intervalu do 60 000 let).

ZÁKON RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNY



Vyjádříme-li aktivitu A v diferenciálním tvaru jako změnu počtu dosud nerozpadlých jader,

tj. $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} \Rightarrow -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$, pak řešením

této rovnice zákon radioaktivní přeměny nabývá tvaru:
$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

Pro **POLOČAS ROZPADU** T plyne z podmínky $e^{-\lambda \cdot T} = \frac{1}{2}$

vztah $\lambda \cdot T = \ln 2$.

POLOČAS ROZPADU je veličina charakterizující radioizotop a může nabývat hodnot od zlomku sekundy až po miliardy let; např. poločas rozpadu izotopu Ra(221) je 31 s, u izotopu Ra(226) objeveného M. Curie-Sklodowskou je to 1 622 let, poločas rozpadu paliva pro jaderné elektrárny uranu 235 je $8{,}91 \cdot 10^8$ let.

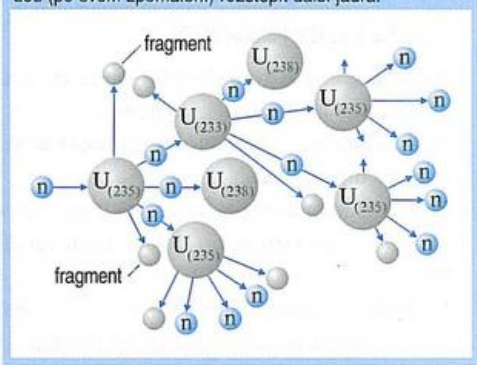
Jaderná fyzika v praxi

ŘETĚZOVÁ JADERNÁ REAKCE nemůže vzniknout v přírodním uranu, který je směsí izotopů uranu 238 (99,28 %), uranu 235 (0,71 %) a uranu 234 (přibližně 0,01 %). Důvodem je skutečnost, že uran 238 velmi účinně pohlcuje zpomalené neutrony (o energii kolem 7 eV), aniž by došlo ke štěpné reakci. Proto se různými technologickými postupy zvyšuje v přírodním uranu podíl U(235) a tímto způsobem upravený uran nazýváme **OBOHACENÝ URAN**.

NEŘÍZENÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE nastává v nadkritickém množství čistého uranu 235 nebo jiného štěpného materiálu (např. plutonia 239). Neutron rozštěpí jádro, uvolněné neutrony po svém zpomalení štěpí další jádra, počet rozštěpených jader lavinovitě narůstá, v krátkém časovém okamžiku se uvolňuje obrovské množství energie a dochází k jadernému výbuchu. Na principu spojení dvou podkritických hmotností v nadkritickou je založena konstrukce **JADERNÉ BOMBY** (v hovorovém jazyce nazývané též **ATOMOVÁ BOMBA**).

Je-li celkové množství uranu malé, neutrony z něj uniknou dříve, než jsou srážkami zpomaleny, a řetězová reakce nenastane. **KRITICKÁ HMOTNOST** (též **KRITICKÉ MNOŽSTVÍ**) je nejmenší hmotnost uranu 235 (nebo jiného štěpného materiálu) postačující k uskutečnění řetězové jaderné reakce.

ŘETĚZOVÁ JADERNÁ REAKCE vznikne, je-li hmotnost štěpného materiálu nadkritická, neutrony neunikají ven a můžou (po svém zpomalení) rozštěpit další jádra.



Jaderná elektrárna

Energie jaderné štěpné reakce je prakticky využívána v JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH.

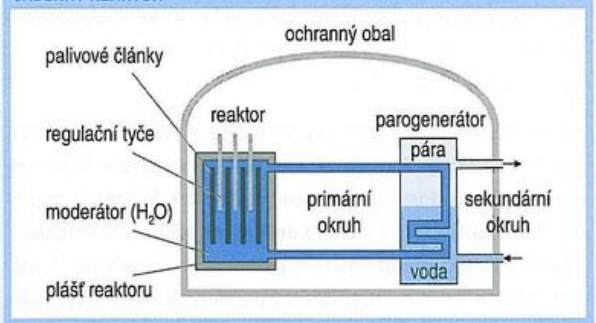
Zdrojem energie je JADERNÝ REAKTOR, ve kterém jsou uloženy PALIVOVÉ ČLÁNKY se štěpným materiálem. Svazky palivových článků jsou obklopeny MODERÁTOREM zpomalujícím neutrony. Moderátorem je nejčastěji voda, která současně odvádí z reaktoru teplo vzniklé při jaderné reakci, a to PRIMÁRNÍM OKRUHEM. Aby v reaktoru probíhala ŘÍZENÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE, část uvolněných neutronů je pohlcována REGULAČNÍMI TYČEMI, které se podle potřeby zasouvají do AKTIVNÍ ZÓNY reaktoru. Jaderný reaktor je obklopen PLÁŠTĚM, který plní funkci ochrany před zářením. Celý reaktor a jeho primární okruh je kvůli bezpečnosti umístěn v ochranném betonovém obalu.

MNOŽIVÝ JADERNÝ REAKTOR kromě výroby energie vyrábí také nový štěpný materiál – plutonium 239, které vzniká v plášti obklopujícím aktivní zónu. Plášť je složen z přírodního uranu nebo vyhořelého jaderného paliva. Uran 238 pohlcuje neutrony unikající z reaktoru a mění se po dvou rozpadech β^- na plutonium 239:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{239}_{92}\mathrm{U}^* \rightarrow ^{239}_{93}\mathrm{Np}^* + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{239}_{93}\mathrm{Np}^* \rightarrow ^{239}_{94}\mathrm{Pu} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_e$$

JADERNÝ REAKTOR



ŠTĚPNÝM MATERIÁLEM bývá nejčastěji obohacený uran obsahující alespoň 3 % uranu 235 nebo plutonium 239.

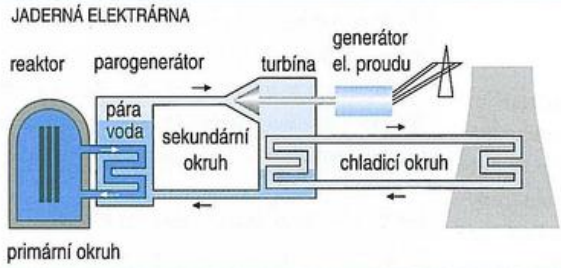
Jako MODERÁTOR ke zpomalování neutronů kromě vody slouží také těžká voda D_2O, grafit nebo helium.

REGULAČNÍ TYČE se nejčastěji vyrábějí z kadmia, které dobře pohlcuje neutrony, nebo z oceli s příměsí bóru.

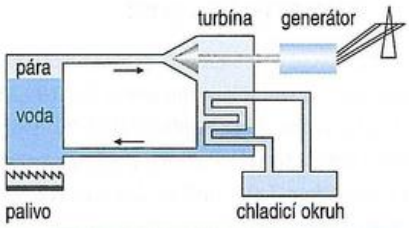
AKTIVNÍ ZÓNA je místo, kde dochází k řízené řetězové jaderné reakci. Je tvořena palivovými články, moderátorem a regulačními tyčemi a je uzavřena v tlakové nádobě.

PRIMÁRNÍ OKRUH je tvořen tlakovou nádobou, ve které jsou uloženy palivové články, moderátor a regulační tyče, dále potrubím, čerpadlem a parogenerátorem, kde voda o vysoké teplotě a tlaku (600 K, 1 500 kPa) odevzdává teplo vodě sekundárního okruhu, která se mění v páru. Pára vyrobená v parogenerátoru proudí SEKUNDÁRNÍM OKRUHEM do turbíny poháněnící generátor elektrického proudu. Radioaktivní primární okruh je od sekundárního oddělen, aby se radioaktivita nedostávala do okolí.

JADERNÁ ELEKTRÁRNA



UHELNÁ ELEKTRÁRNA



Další využití jaderné fyziky

- V medicíně se používá radioaktivního záření a radionuklidů k léčení zhoubných nádorů.
- Pomocí radionuklidů lze sledovat koloběh látek v živých organismech.
- Pod vlivem radioaktivního záření řada materiálů mění své vlastnosti (křehne, mění barvu apod.).
- Měříme-li zeslabení intenzity záření prošlého vrstvou materiálu, můžeme určit její tloušťku.

- Radioaktivní záření vyzařované radionuklidem a zacílené na zhoubný nádor jej zničí.
- Do vody nebo do krevního oběhu se přidá neškodný radionuklid, jehož koloběh v rostlině nebo v lidském těle pak můžeme pomocí detekce radioaktivního záření sledovat.
- Ozářením bylo např. zbarveno sklo na budově Nové scény Národního divadla v Praze.
- DEFEKTOSKOPIE odhaluje pomocí radioaktivního záření skryté vady materiálu, např. dutiny v kovovém odlitku.

Ochrana před účinky radioaktivního záření

Ochrana před škodlivými účinky radioaktivního záření se provádí současně dvěma způsoby:

- záření se odstíní, tj. mezi zdrojem záření a člověkem je vložena vrstva materiálu, který radioaktivní záření pohlcuje a zeslabuje;
- množství záření přijaté pracovníkem v radioaktivním provozu je měřeno DOZIMETRY, pravidelně vyhodnocováno a roční přijatá dávka nesmí překročit dovolenou hodnotu (0,5 rad pro RTG záření).

Přijatá dávka je množství radiační energie skutečně pohlcené určitým objektem, např. lidským tělem.

- Laboranti u rentgenu jsou po dobu expozice rentgenového snímku odděleni od rentgenu olověnou deskou.
- Radioaktivní záření reaktoru je odstíněno jeho pláštěm.
- Osobní DOZIMETR obsahuje např. film s fotografickou emulzí a podle zčernání emulze lze určit celkovou dávku záření.

Jednotkou přijaté dávky je GRAY (Gy), starší jednotkou je RAD. 1 gray (Gy) = 1 J · kg^{-1} = 100 rad. Dávka γ-záření 3 Gy je smrtelná pro polovinu zasažených osob.

Detekce radioaktivního záření

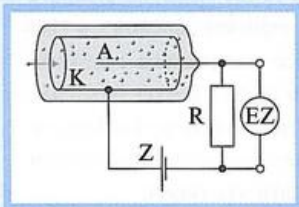
DETEKTOR radioaktivního záření je přístroj sloužící k registraci částic záření anebo k měření jeho intenzity. DETEKCE radioaktivního záření je založena na interakci částic záření s látkou detektoru.

Podle typu interakce rozlišujeme např.:

- detektory, v nichž částice ionizují detekční látku, kterou je plyn (v plynovém počítači, v mlžné komoře) nebo kapalina (v bublinové komoře),
- detektory, v nichž dopadající částice zvyšují počet nosičů elektrického náboje (např. v polovodičovém detektoru),
- detektory, v nichž částice vyvolávají chemické změny detekční látky (např. zčernání jaderné fotografické emulze),
- scintilační detektory, v nichž dopadající částice vyvolají světelné záblesky, tzv. scintilace.

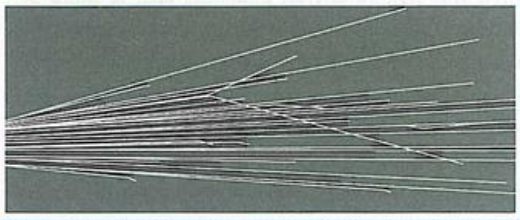
Podle účelu detekce částic rozlišujeme:

- POČÍTAČE ČÁSTIC, tj. detektory registrující počty dopadajících částic (např. plynový, polovodičový, scintilační detektor),
- DRÁHOVÉ DETEKTORY zobrazující stopu dráhy prolétávající částice (např. mlžná komora, bublinová komora, jaderná fotografická emulze).



GEIGER-MÜLLERŮV POČÍTAČ je plynový počítač částic obsahující plyn o nízkém tlaku. Prolétající částice ionizuje molekuly plynu, vzniklé elektrony jsou elektrickým polem mezi katodou K a anodou A urychleny a nárazem ionizují další molekuly. Vznikne proudový impulz, který je registrován elektrickým zařízením EZ. GM počítač počítá jednotlivé impulzy a podle jejich četnosti je určována intenzita záření.

Stopy částic v MLŽNÉ KOMOŘE



MLŽNÁ KOMORA obsahuje přesycenou páru. Proletí-li tímto prostředím částice záření, ionizuje molekuly páry a ionty se stávají kondenzačními jádry. Na nich se vytvářejí mikroskopické kapičky a ty vyznačují trajektorii částice.

BUBLINOVÁ KOMORA obsahuje přehřátou kapalinu, která začne podél dráhy částice vřít (v důsledku ionizace molekul) a stopa částice je vyznačena bublinkami páry.

JADERNÁ EMULZE je citlivá fotografická emulze, v níž prolétávající částice způsobí chemickou změnu bromidu stříbrného. Tlustá vrstva emulze umožňuje zjišťovat dráhu částic.

Př. 1 **Radioaktivní hodiny v archeologii:** Pergamen s textem bible nalezený v Palestině obsahuje 78,5 % původní hodnoty radionuklidu $^{14}_{6}C$ (původní hodnota je množství nacházející se v živém organismu). Urči stáří pergamenu.

$$N(t) = 0{,}785 \cdot N(0);\ T = 5\,370 \text{ let};\ t = ?;\ N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow t = -\frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{N(t)}{N(0)}\right) = -\frac{T}{\ln 2}\ln\left(\frac{N(t)}{N(0)}\right)$$

(str. 195)

$$\{t\} = -\frac{5\,370}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{0{,}785 \cdot N(0)}{N(0)}\right) = -\frac{5\,370}{\ln 2} \cdot \ln 0{,}785 = 1\,875;\ t = 1\,875 \text{ r}$$

Stáří pergamenu je přibližně 1 870 let.

8.4 Fyzika elementárních částic

Historie objevů elementárních částic

Do roku 1930 byly známy jen dva druhy elementárních částic: protony nacházející se v jádrech atomů a elektrony. V roce 1930 Paul Dirac na základě kvantové teorie a pohybových rovnic elektronu předpověděl, že k elektronu musí existovat antičástice s kladným nábojem; tato částice byla nazvána POZITRON. Dále v tomto roce objevili Bothe a Becker záření neutrálních částic vznikající při bombardování lehkých prvků částicemi α. Tyto neutrální částice identifikoval v roce 1932 J. Chadwick jako NEUTRONY.

Existenci NEUTRINA jako částice bez elektrického náboje s nulovou hmotností předpokládal v roce 1930 W. Pauli, který touto hypotézou vysvětlil záhadu rozpadu β (str. 194). Podle zákona zachování energie by každá částice β emitovaná jádrem při β-rozpadu měla mít stejnou energii podobně, jako je tomu při α-rozpadu. Měření ukazovala, že energie částic β nabývá hodnot od nuly až po jistou maximální energii Q charakteristickou pro daný rozpad. Pauli tedy předpokládal, že zbylou energii odnáší neutrino a součet energie β-částice a neutrina je roven Q. Neutrina lehce procházejí látkou, dokonce i Země je pro ně „průhledná". Jejich detekce je nesmírně těžká, a proto první neutrina byla zachycena speciálními detektory až v roce 1953 F. Reinesem a C. J. Cowanem.

MEZONY předpověděl Hideki Yukava v roce 1935 jako ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE umožňující vzájemné silové působení mezi nukleony v jádře atomu. Mezonům přisoudil nenulovou klidovou hmotnost, protože silové pole, jehož kvanta jsou hmotné částice, dává síly krátkého dosahu na rozdíl od fotonů, kde jejich nulová hmotnost má za následek elektromagnetické síly působící „do dálky". Původní předpoklad, že zprostředkující částicí by mohl být elektron, vedl ve výpočtech k jaderným silám o velikosti 10^{10}krát menší než síly pozorované. Proto hmotnost mezonu, kterou vypočetl Yukava, je přibližně 230krát větší než hmotnost elektronu. Mezony byly poprvé objeveny v kosmickém záření v roce 1937.

Fyzika ve třicátých letech 20. století znala proton, elektron, neutron, pozitron, neutrino a mezon. Kvantová teorie s jejich pomocí úspěšně vysvětlovala strukturu atomu,

Osnova kapitoly:

- Neutron, pozitron, neutrino, mezon; urychlovače částic
- Fyzikální charakteristiky a vlastnosti částic
- Základní fyzikální interakce, zprostředkující částice
- Kritéria třídění částic
- Fyzikální zákony mikrosvěta, zákony zachování
- Systém elementárních částic, fundamentální a složené částice, kvarkový model, stavba hmoty

POZITRON objevil Carl Anderson v kosmickém záření v roce 1932. Při setkání elektronu s pozitronem (tj. hmoty a antihmoty) dochází k ANIHILACI: elektron s pozitronem zaniknou, přičemž vzniknou dva fotony o energii $m_e c^2 = 0{,}51\,\text{MeV}$ (m_e je klidová hmotnost elektronu).

Objev neutronu: V roce 1930 zjistili Bothe a Becker, že při bombardování lehkých prvků (Be, B, Li, str. 193) částicemi α vzniká pronikavé záření částic bez náboje o energii 5 MeV. Irene a Frederic Joliot-Curie v roce 1931 zjistili, že tyto částice (o nichž se předpokládalo, že jsou to fotony) předávají při srážkách jádrům vodíku tak velikou hybnost, že jejich energie by musela být 50 MeV. Tento paradox rozřešil v roce 1932 J. Chadwick. Vypočetl (podle zákonů zachování energie a hybnosti) hmotnost těchto částic, která byla rovna přibližně hmotnosti protonů, a stal se tak objevitelem neutronu.

Elektrodynamika vysvětlovala vzájemné silové působení elektricky nabitých těles pomocí elektromagnetického pole (str. 142), které je tvořeno fotony (str. 178, 201).

KVANTOVÁ ELEKTRODYNAMIKA vysvětlila vzájemné silové působení dvou elektronů jako interakci pomocí fotonů, které si elektrony vzájemně vyměňují. Tyto fotony nelze detekovat, protože jsou emitovány jedním elektronem a okamžitě zachyceny druhým elektronem.

Fotony umožňující vzájemné silové působení dvou elektrických nábojů se nazývají ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE.

Existencí zprostředkující částice se dnes ve fyzice vysvětluje jakékoliv silové pole umožňující silové působení mezi hmotnými částicemi. Podobný princip „zprostředkující částice" platí kupř. u kopané, kde hráče „drží pohromadě" skutečnost, že si „vyměňují" míč.

KOSMICKÉ ZÁŘENÍ je záření, které na Zemi dopadá z kosmického prostoru. Obsahuje částice α, vysokoenergetické částice γ a různé další elementární částice. Kosmické záření pochází z hvězd a jader galaxií, jeho zdrojem jsou též výbuchy supernov.

jádro atomu, α- i β-rozpad. Tyto částice fyzikové považovali ze elementární, tj. základní stavební prvky atomových jader a atomů, které nejsou složeny z menších částic. Postupně však byly nalezeny další a další částice, nejprve v kosmickém záření, později při srážkách protonů, elektronů a jiných částic urychlených na vysoké energie v URYCHLOVAČÍCH. Dále se zjistilo, že některé částice považované za elementární se rozpadají na jiné částice, a objevila se otázka, které částice jsou vlastně elementární. V současné době zná fyzika kolem 280 částic. FUNDAMENTÁLNÍ neboli ZÁKLADNÍ se nazývají částice, které nemají vnitřní strukturu, tj. nejsou složeny z jiných částic. Přitom se i tyto částice mohou při srážkách proměňovat v jiné částice. Název „elementární částice" zůstal vyhrazen pro ostatní mikročástice, někdy se tak nazývají všechny mikročástice; terminologie zde není sjednocena.

Urychlovače mikročástic

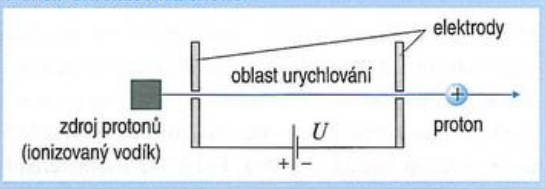
Mikročástice (obvykle protony, elektrony, deuterony nebo částice α) urychlené v urychlovačích narážejí na pevný terčík nebo se srážejí se vstřícným svazkem částic, které jsou také urychleny. Při srážkách vznikají různé jiné elementární částice, které jsou detekovány pomocí detektorů. Tímto způsobem fyzika objevuje nové elementární částice a studuje jejich vlastnosti.

PRINCIP URYCHLOVAČE ČÁSTIC: Mikročástice s elektrickým nábojem Q se nechá prolétnout mezi místy s potenciálovým rozdílem U, což zvýší její kinetickou energii o hodnotu QU. Pro získání dostatečně vysoké energie se částice nechá procházet místem s rozdílem potenciálů U mnohokrát. Urychlovače dělíme na:

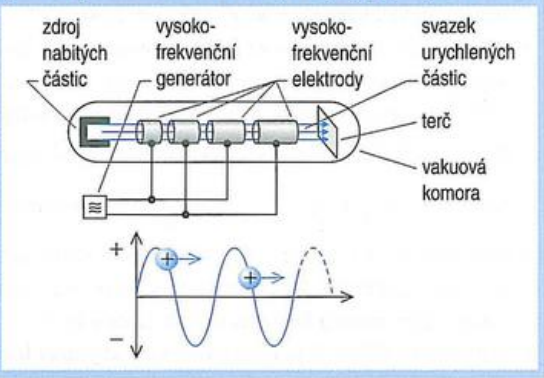
- LINEÁRNÍ – trajektorii částice je přímka,
- KRUHOVÉ – trajektorii urychlované částice je kružnice nebo spirála.

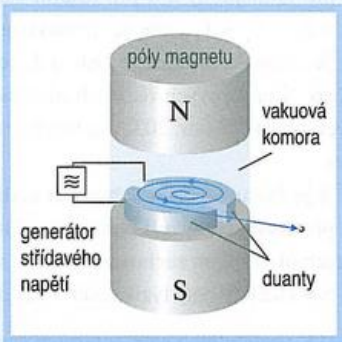
Moderní lineární urychlovače mají délku několika kilometrů a mohou částicím dodat energii do 1 000 MeV. Kruhové urychlovače jsou schopny dodat částicím energii několika TeV (1 TeV $= 10^{12}$ eV). Urychlovač LHC v evropském CERNu dodá částicím (např. iontům olova) energii až 1 200 TeV, což při srážkách umožní vytvoření kvark-gluonového plazmatu na dostatečně dlouhou dobu (str. 201). LHC – Large Hadron Collider; do provozu bude uvedený v r. 2007.

PRINCIP URYCHLOVAČE ČÁSTIC



LINEÁRNÍ URYCHLOVAČ je tvořen trubicí obsahující řadu válcových elektrod připojených k vysokofrekvenčnímu generátoru. Postupující elektromagnetická vlna tlačí nabité částice vpřed (podobně jako mořská vlna surfaře) a zvyšuje jejich rychlost.





CYKLOTRON je kruhový urychlovač. Částice se pohybují mezi póly velkého magnetu, jehož magnetické pole je udržuje na kruhové dráze (str. 124). Mikročástice jsou urychlovány elektrickým polem mezi půlkruhovými elektrodami (duanty), k nimž je připojeno střídavé napětí. Konstantní frekvence je volena tak, aby napětí změnilo polaritu přesně za dobu, kterou částice potřebuje na prolétnutí půlkruhové dráhy od jedné štěrbiny ke druhé. Protože rychlost částice se zvyšuje, její trajektorie (od zdroje částic až po opuštění urychlovače) je spirálová.

Hranice urychlení u protonového cyklotronu je přibližně 50 MeV, protože relativistická hmotnost částice roste v důsledku rychlosti blížící se rychlosti světla a frekvence obíhání se mění. Proto moderní urychlovače – SYNCHROTRONY a FÁZOTRONY – používají proměnné frekvence střídavého urychlovacího napětí, mají tvar prstence a proměnná je i velikost magnetického pole udržujícího částice na kruhové dráze.

Fyzikální charakteristiky a vlastnosti elementárních částic

FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY elementární částice jsou fyzikální veličiny nebo jim odpovídající kvantová čísla, které určují, jaké má tato částice vlastnosti a v jakém stavu se nachází. Podle souboru fyzikálních charakteristik částice můžeme též určit, o jakou částici se jedná. Fyzikální charakteristiky elementárních částic jsou:

- **KLIDOVÁ HMOTNOST** m_0 částice je její hmotnost v inerciální vztažné soustavě, vůči níž je částice v klidu.
- **KLIDOVÁ ENERGIE** E_0 částice je její energie v inerciální vztažné soustavě, v níž je částice v klidu, a je dána Einsteinovým vztahem $E_0 = m_0c^2$ (str. 174).
- **ELEKTRICKÝ NÁBOJ** Q – ve fyzice elementárních částic se nejčastěji udává v násobcích elementárního náboje e.
- **SPIN** $\vec{S}$ je vlastní moment hybnosti částice; jeho velikost je $|\vec{S}| = \hbar\sqrt{S(S+1)}$, kde S je spinové kvantové číslo nabývající hodnot $S = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}, \ldots, \hbar = \frac{h}{2\pi}$ je redukovaná Planckova konstanta (str. 181, 189). Velmi často se místo formulace „spinové kvantové číslo částice je..." používá pouze zjednodušená formulace „spin částice je...".
- **LEPTONOVÉ ČÍSLO** L je kvantové číslo nabývající hodnoty +1 pro leptony, –1 pro antileptony a 0 pro ostatní částice. Leptonové číslo $L = L_e + L_\mu + L_\tau$, kde L_e je elektronové leptonové číslo, L_μ je mionové leptonové číslo a L_τ je tauonové leptonové číslo. V částicových reakcích platí zákon zachování leptonového čísla (str. 203) pro všechny typy fyzikálních interakcí.
- **BARYONOVÉ ČÍSLO** B je kvantové číslo nabývající hodnoty +1 pro baryony, –1 pro antibaryony a 0 pro ostatní částice. V částicových reakcích platí zákon zachování baryonového čísla (str. 203) pro všechny typy fyzikálních interakcí.
- **STŘEDNÍ DOBA ŽIVOTA** nestabilních elementárních částic je dána **ZÁKONEM ROZPADU** $N(t) = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$, kde N_0 je původní množství částic v čase $t = 0$, $N(t)$ je množství nerozpadlých částic v čase t, $\exp(x)$ je funkce e^x, $e = 2{,}718\ldots$ je Eulerovo číslo. **STŘEDNÍ DOBA ŽIVOTA** τ, nazývaná též **DOBA ŽIVOTA** elementárních částic, je doba, za kterou se rozpadne přibližně 63,2 % původního množství daného druhu elementárních částic.
- **PODIVNOST** s (strangeness) je kvantové číslo, které charakterizuje **PODIVNÉ ČÁSTICE**. Pro tyto částice má hodnotu různou od nuly $s = \pm 1, \pm 2, \ldots$, pro všechny ostatní $s = 0$. Podivné částice obsahují ve své struktuře podivný kvark (strange, str. 204).

Mnohé fyzikální veličiny ve fyzice elementárních částic jsou zavedeny pouze ve formě **KVANTOVÉHO ČÍSLA**, např. leptonové číslo, baryonové číslo apod. Některé veličiny mající velikost a směr jsou též charakterizovány kvantovým číslem, kupř. spin $\vec{S}$ je obvykle charakterizován kvantovým číslem S.

KLIDOVÁ HMOTNOST částice se udává v atomových hmotnostních jednotkách u (str. 78). Klidová hmotnost protonu $m_p = 1{,}0073 \cdot u$, kde $u = 1{,}660\,540 \cdot 10^{-27}$ kg. Hmotnost částice v jednotkách u udává přibližně její velikost ve srovnání s hmotností protonu.
KLIDOVÁ ENERGIE elementárních částic se udává obvykle v jednotkách MeV.

Při částicových reakcích se **SPINY** částic sčítají buď paralelně ↑↑ (tj. spiny jsou souhlasně orientovány), anebo antiparalelně ↑↓ (jejich spiny jsou orientovány opačně). Např. volný neutron se rozpadá na proton, elektron a antineutrino: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.

Orientace spinu: ↑ | ↑ ↑ ↓

Spin všech částic v reakci je $\frac{1}{2}$. Spinový moment hybnosti se zachovává, protože např. spiny elektronu a antineutrina jsou opačně orientovány, a výsledný spin částic na pravé straně je $\frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$.

LEPTONOVÉ ČÍSLO $L_e = +1$ pro elektron a elektronové neutrino, $L_e = -1$ pro pozitron a pozitronové antineutrino, $L_e = 0$ pro všechny ostatní částice. Stejná pravidla platí pro mionovou rodinu leptonů: $L_\mu = +1$ pro mion μ^- a mionové neutrino ν_μ, $L_\mu = -1$ pro antimion μ^+ a antineutrino $\bar{\nu}_\mu$ a také pro tauonovou rodinu leptonů $\tau^-, \nu_\tau, \tau^+, \bar{\nu}_\tau$ (str. 204).

Nestabilní elementární částice se rozpadají podle stejného zákona, jako je zákon radioaktivní přeměny $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ (str. 195). Mezi rozpadovou konstantou λ a **STŘEDNÍ DOBOU ŽIVOTA** τ platí vztah $\lambda = \frac{1}{\tau}$, pro poločas rozpadu platí $T = 0{,}693\tau$.

Počet rozpadlých částic v čase $t = \tau$ je $N_0 - N(t) = N_0 \cdot (1 - e^{-1}) = 0{,}6321 N_0$.

Základní fyzikální interakce

Moderní fyzika zná čtyři základní druhy sil, kterými na sebe částice vzájemně působí. Tyto síly fyzika nazývá interakcemi.

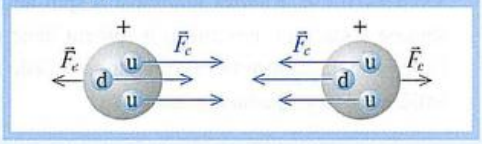
- **SILNÁ INTERAKCE** je síla působící mezi kvarky a udržující pohromadě hadrony (např. nukleony). Je nejsilnější ze všech známých sil. Zprostředkujícími částicemi jsou **GLUONY**. Mají spin roven jedné a předpokládá se, že jejich klidová hmotnost je nulová podobně jako u fotonů. Gluony nebyly zatím experimentálně pozorovány, vědcům se ale při srážkách částic s velmi vysokou energií podařilo vytvořit na zlomky sekundy tzv. kvark-gluonové plazma. Mezi nukleony v jádře působí **JADERNÁ SÍLA**, která je zbytkovým projevem silné interakce, proto se jaderná síla nazývá též **ZBYTKOVÁ SILNÁ INTERAKCE**.
- **SLABÁ INTERAKCE** je síla působící na všechny částice a je zodpovědná nikoliv za stabilitu mikročástic, ale za jejich rozpad. Po gravitační síle je druhou nejslabší silou. Zprostředkujícími částicemi jsou **INTERMEDIÁLNÍ BOSONY** W^+, W^- a Z^0. Mají spin roven jedné a jsou to velmi „těžké" částice, protože jejich klidová hmotnost je 86,5 až 97,9 u.
- **ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE** je síla působící mezi částicemi (nebo tělesy) s elektrickým nábojem. Nositeli elektromagnetické interakce jsou **FOTONY** – kvanta elektromagnetického pole. Mají nulovou klidovou hmotnost a spin roven jedné. Elektromagnetická síla je druhou nejsilnější interakcí ze všech známých sil. Její dosah je neomezený, a projevuje se proto v mikrosvětě i makrosvětě.
- **GRAVITAČNÍ INTERAKCE** je síla, kterou na sebe působí všechny hmotné objekty. Tato síla je ze všech známých sil nejslabší a při interakci částic v mikrosvětě se zanedbává. Její dosah je neomezený a projevuje se významně až mezi fyzikálními objekty s velkou hmotností. Gravitační interakce je zprostředkována částicemi, které se nazývají **GRAVITONY** a mají nulovou klidovou hmotnost. Gravitony nebyly zatím experimentálně prokázány.

Moderní fyzika vysvětluje síly působící mezi částicemi jako jejich vzájemnou **INTERAKCI** prostřednictvím jiných částic, tzv. nositelů vzájemného působení. Částice, které umožňují vzájemné silové působení dvou fyzikálních objektů, se nazývají též **ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE** (str. 198).

Síle působící mezi kvarky se říká též **BAREVNÁ SÍLA**, protože kvarky nesou **BAREVNÝ NÁBOJ** (colour charge), (str. 205). Teorie popisující barevnou sílu se nazývá **KVANTOVÁ CHROMODYNAMIKA**.

KVARK-GLUONOVÉ PLAZMA je další skupenství hmoty s teplotou nad 10^{12} K, kdy se kvarky a gluony chovají jako volné částice. Objev kvark-gluonového plazmatu v evropském CERNu byl oznámen 10. února 2000.

Dva protony v jádře na sebe vzájemně působí odpudivou elektrickou silou $\vec{F}_e$. Přesto drží pohromadě, protože jejich kvarky se přitahují barevnou silou $\vec{F}_c$, která je mnohem větší. Tato síla je **ZBYTKOVÁ SILNÁ INTERAKCE** a známe ji jako **JADERNOU SÍLU**.



SLABÁ INTERAKCE je kupř. zodpovědná za samovolný rozpad neutronu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ anebo za přeměnu protonu na neutron uvnitř jádra při β-rozpadu: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$.

ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE je zodpovědná za stabilitu atomů (modely atomu, str. 183 až 187) a molekul, kde jako zbytková interakce vytváří chemické vazby mezi atomy.

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ INTERAKCE A ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE

INTERAKCE	relativní velikost síly (přibližně)		dosah [m]	zprostředkující částice	hmotnost zprostředkujících částic [u]
SILNÁ	1		∞	gluony g	0
ZBYTKOVÁ SILNÁ**		10^{-6}	10^{-15}	mezony π^+, π^-, π^0 (piony)	0,15 ($\pi^\pm$); 0,145 (π^0)
ELEKTROMAGNETICKÁ	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-8}$	∞	fotony γ	0
SLABÁ	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-15}	10^{-18}*	intermediální bosony $W^\pm, Z^0$	86,5 ($W^\pm$); 97,9(Z^0)
GRAVITAČNÍ	10^{-42}	10^{-48}	∞	gravitony G	0
** JADERNÁ SÍLA mezi nukleony	*2k	*2n	*dosah je teoreticky větší, ovšem slabá interakce je zanedbatelná		
	*2k – velikost síly platí pro 2 kvarky v nukleonu; *2n – platí pro 2 nukleony v jádře				

Kritéria třídění částic

Částice můžeme třídit:
1. podle spinu na fermiony nebo bosony;
2. podle interakce neboli podle toho, jaká síla na ně působí;
3. podle toho, jsou-li to částice nebo antičástice.

1. Podle spinu třídíme částice na fermiony a bosony:

- FERMIONY mají poločíselný spin $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \ldots$
  a platí pro ně PAULIHO VYLUČOVACÍ PRINCIP.
- BOSONY mají celočíselný spin $S = 0, 1, 2, 3, \ldots$
  a Pauliho vylučovací princip pro ně neplatí.

2. Podle interakce třídíme částice na hadrony a leptony:

- HADRONY jsou částice, mezi nimiž působí silná interakce. Hadrony dále dělíme podle spinu na:
  - BARYONY, které jsou fermiony, tj. mají poločíselný spin,
  - MEZONY, které jsou bosony, tj. mají celočíselný spin.
- LEPTONY jsou částice, mezi nimiž silná interakce nepůsobí a dominantní je slabá interakce.

3. K libovolné elementární částici c existuje také odpovídající ANTIČÁSTICE $\bar{c}$. Klidová hmotnost a spin antičástice jsou shodné s klidovou hmotností a spinem dané částice, elektrický náboj, baryonové číslo, leptonové číslo a podivnost antičástice jsou opačného znaménka.

Fyzikální zákony mikrosvěta

Elementární částice můžou být volné nebo vázané.
VÁZANÉ ČÁSTICE jsou součástí částicových struktur vyššího řádu, kterými jsou kupř. atomy, jádra atomů, nukleony, mezony apod. Vázané částice můžou být v různých kvantových stavech a jsou-li to fermiony, platí pro ně Pauliho vylučovací princip.

PAULIHO VYLUČOVACÍ PRINCIP
V soustavě nerozlišitelných fermionů může být v jednom kvantovém stavu nejvýše jeden fermion (str. 190).

VOLNÉ ČÁSTICE můžou být stabilní nebo nestabilní.
Nestabilní částice se po jisté době rozpadají na jiné částice.

ROZPAD je reakce, do které vstupuje jedna částice, tj. proces, při němž z jedné částice vznikne jedna nebo více částic jiných. Pro rozpad platí ZÁKON ROZPADU (str. 200).

Při vzájemných srážkách volných částic probíhají částicové reakce. ČÁSTICOVÁ REAKCE je proces, při němž z částic, které se setkají při srážce (tj. částice vstupující do reakce), vznikne jedna nebo více částic jiných (částice vystupující z reakce).

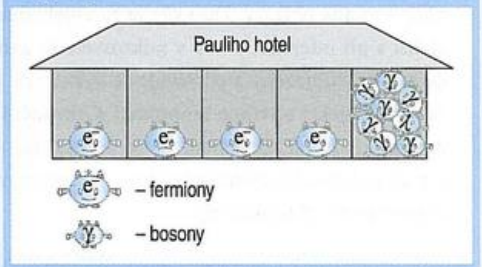
Stabilní FERMIONY (elektrony, protony, neutrony) jsou stavebními prvky hmoty: vytvářejí atomy a molekuly.

BOSONY jsou všechny zprostředkující částice, které jsou nositeli vzájemného silového působení, dále též všechny mezony.

BARYONY jsou např. protony a neutrony.
MEZONY jsou např. piony (mezony s označením π^+, π^-, π^0) umožňující vzájemné silové působení mezi nukleony v jádře atomu.
LEPTONY jsou kupř. elektrony, pozitrony a neutrina.

ANTIČÁSTICÍ k elektronu je pozitron, který má stejnou klidovou hmotnost a spin. Elektrický náboj pozitronu je ovšem kladný a jeho leptonové číslo záporné. Antičásticí k protonu je antiproton, jeho elektrický náboj je záporný, baryonové číslo také. Antineutron se liší od neutronu záporným baryonovým číslem. Výjimkou mezi elementárními částicemi je foton, který antičásticí nemá.

PAULIHO VYLUČOVACÍ PRINCIP
Fermiony se v „Pauliho hotelu" chovají jako nároční hosté, kteří odmítají sdílet s jinými fermiony jeden „pokoj" – kvantový stav. „Hosté" bosony ochotně zaplní celý pokoj.



PRINCIP NEROZLIŠITELNOSTI ČÁSTIC
Jakékoliv dvě totožné částice jsou, na rozdíl od makroskopických objektů, zcela stejné a nelze je žádným způsobem označit ani rozlišit jednu od druhé. Např. dva elektrony jsou zcela stejné. (Není možné je od sebe odlišit a nelze je označit tak jako dva stejné automobily výrobním číslem nebo rozlišit oděvem jako dvě zcela podobná dvojčata.) Říkáme, že elementární částice jsou NEROZLIŠITELNÉ.

Pro **ČÁSTICOVÉ REAKCE** platí kromě zákonů platných v makrosvětě (zákon zachování energie, zákon zachování hybnosti a momentu hybnosti, zákon zachování elektrického náboje) i další zákony zachování:

- **ZÁKON ZACHOVÁNÍ BARYONOVÉHO ČÍSLA**: Mohou probíhat pouze takové částicové reakce, při kterých se celkové baryonové číslo nemění, tj. součet baryonových čísel částic do reakce vstupujících je roven součtu baryonových čísel částic z reakce vystupujících.
- **ZÁKON ZACHOVÁNÍ LEPTONOVÉHO ČÍSLA**: Mohou probíhat pouze takové částicové reakce, při kterých se celkové leptonové číslo nemění, tj. součet leptonových čísel částic do reakce vstupujících je roven součtu leptonových čísel částic z reakce vystupujících.
- V mikrosvětě platí zákon zachování momentu hybnosti v podobě **ZÁKONA ZACHOVÁNÍ SPINOVÉHO MOMENTU HYBNOSTI** (též **ZÁKON ZACHOVÁNÍ SPINU**): Součet spinů částic vstupujících do reakce je roven součtu spinů částic z reakce vystupujících, přičemž spiny se mohou sčítat paralelně nebo antiparalelně (str. 200).
- **ZÁKON ZACHOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE** v mikrosvětě má jednoduchou podobu. Elektrické náboje částic se uvádějí v jednotkách „elementární náboj" (tj. v násobcích elementárního náboje e, str. 182, 200). Součet elektrických nábojů částic vstupujících do reakce je roven součtu elektrických nábojů částic vystupujících z reakce.

Zákony zachování baryonového a leptonového čísla, zákon zachování spinu i zákon zachování elektrického náboje platí pro všechny částicové reakce, v nichž mezi částicemi působí silná, slabá i elektromagnetická interakce. Nejslabší gravitační interakci lze při částicových reakcích zanedbat.

- **ZÁKON ZACHOVÁNÍ PODIVNOSTI**: Součet podivností částic vstupujících do reakce je roven součtu podivností částic vystupujících z reakce. Zákon zachování podivnosti platí pouze pro reakce, v nichž mezi částicemi působí silná interakce. Podivnost se nezachovává, působí-li mezi částicemi slabá interakce.

V počátcích studia elementárních částic byly zkoumány srážky mezi protony a piony, mezi nimiž nastává silná interakce např. $p + \pi^- \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ nebo $p + \pi^+ \rightarrow K^+ + \Sigma^-$. Očekávalo se, že vzniklé mezony K^0, K^+ a hyperony Λ^0, Σ^- se budou rozpadat působením silné interakce stejně rychle, jako vznikaly (doba reakce byla kolem 10^{-22} s). Produkty reakce se však chovaly podivně. Rozpadaly se mnohem pomaleji vlivem slabé interakce. Proto je fyzikové nazvali **PODIVNÉ ČÁSTICE**.

ČÁSTICOVÉ REAKCE se někdy označují názvem **ČÁSTICOVÉ INTERAKCE** a je nutné odlišit tento název od termínu fyzikální interakce (str. 201).

Rozpad neutronu na proton a elektron probíhá podle reakce: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, přičemž platí

zákon zachování baryonového čísla	$B_n = B_p + B_e + B_{\bar{\nu}}$ $1 = 1 + 0 + 0$
zákon zachování leptonového čísla	$L_n = L_p + L_e + L_{\bar{\nu}}$ $0 = 0 + 1 - 1$
zákon zachování spinu	$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$
zákon zachování elektrického náboje	$0 = +1 - 1 + 0$

$B_n = +1$ je baryonové číslo neutronu, $B_p = +1$ je baryonové číslo protonu, $B_e = 0$, $B_{\bar{\nu}} = 0$ jsou baryonová čísla elektronu, resp. antineutrina. $L_n = 0$ a $L_p = 0$ jsou leptonová čísla neutronu a protonu, $L_e = +1$ je leptonové číslo elektronu, $L_{\bar{\nu}} = -1$ je leptonové číslo antineutrina. Spiny všech částic jsou 1/2; na pravé straně rovnice se spiny elektronu a antineutrina sčítají antiparalelně.

Při srážkách protonů s protony nebyla nikdy pozorována reakce $p + p \rightarrow 2e^+ + 2\nu_e$, protože i když se při ní zachovává leptonové číslo, spin, elektrický náboj i energie*, změnilo by se baryonové číslo, což reakci vylučuje.

* Energii odpovídající rozdílu hmotnosti protonů a pozitronů by odnesly v podobě kinetické energie produkty reakce.

Kvantové číslo **PODIVNOST** se při srážce protonu s pionem v reakci $p + \pi^+ \rightarrow K^+ + \Sigma^-$ zachovává, protože při srážce působí mezi částicemi p, π^+ silná interakce.
Platí: $s_p + s_{\pi^+} = s_{K^+} + s_{\Sigma^-}$, tj.

$$0 + 0 = +1 - 1.$$

Při rozpadu mezonu $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ působením slabé interakce se podivnost nezachovává
Platí: $s_{K^+} \neq s_{\mu^+} + s_{\nu_\mu}$, tj.

$$+1 \neq 0 + 0.$$

Doba života mezonu K^+ je $1{,}237 \cdot 10^{-8}$ s.

ZÁKONY ZACHOVÁNÍ jsou empirická pravidla popisující částicové reakce. Každá reakce splňující zákony musí probíhat. Neprobíhá-li, zakazuje ji nějaký dosud neznámý zákon.

Systém elementárních částic

SYSTÉM ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC

FUNDAMENTÁLNÍ ČÁSTICE – nemají vnitřní strukturu (tj. nejsou složeny z jiných částic)

Základní stavební prvky látky								Nositelé vzájemného silového působení částic			
LEPTONY				**KVARKY**				**ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE**			
Leptony jsou fermiony, mají spin 1/2.				Kvarky q a antikvarky $\bar{q}$ jsou fermiony, mají spin 1/2.				Zprostředkující částice jsou bosony, mají spin 1, pouze graviton má spin 2			
částice a její symbol	hmotnost [u]	el. náboj [e]	antičástice	částice a její symbol	hmotnost [u]	el. náboj [e]	antičástice	částice	symbol	hmotnost [u]	el. náboj [e]
elektron e^-	$5{,}5 \cdot 10^{-4}$	−1	e^+	nahoru (up) u	0,0054	$+\frac{2}{3}$	$\bar{u}$	gluon	G	0	0
elektronové neutrino ν_e	$< 6 \cdot 10^{-8}$	0	$\bar{\nu}_e$	dolů (down) d	0,0107	$-\frac{1}{3}$	$\bar{d}$	intermediální bosony	W^-	86,5	−1
mion μ^-	0,1134	−1	μ^+	půvabný (charm) c	1,610	$+\frac{2}{3}$	$\bar{c}$		W^+	86,5	+1
mionové neutrino ν_μ	$< 6 \cdot 10^{-4}$	0	$\bar{\nu}_\mu$	podivný (strange) s	0,215	$-\frac{1}{3}$	$\bar{s}$		Z^0	97,9	0
tauon τ^-	1,915	−1	τ^+	horní (top) t	≈193	$+\frac{2}{3}$	$\bar{t}$	foton	γ	0	0
tauonové neutrino ν_τ	< 0,06	0	$\bar{\nu}_\tau$	dolní (bottom) b	4,616	$-\frac{1}{3}$	$\bar{b}$	graviton	g	0	0
leptonové číslo $L = +1$	Leptony mají nulovou podivnost.		leptonové číslo $L = -1$	baryonové číslo $B = +\frac{1}{3}$	Podivný kvark má podivnost rovnou −1, ostatní kvarky 0.		$B = -\frac{1}{3}$	Zprostředkující částice vytvářejí silová pole a vážou základní stavební prvky látky dohromady.			

HADRONY – ČÁSTICE SLOŽENÉ Z KVARKŮ A ANTIKVARKŮ

BARYONY qqq, resp. **ANTIBARYONY** $\bar{q}\,\bar{q}\,\bar{q}$ jsou fermiony a mají baryonové číslo $B = +1$, resp. $B = -1$.

název	symbol	složení	hmotnost [u]	el. náboj [e]	spin	podivnost
proton	p	uud	1,0073	+1	1/2	0
neutron	n	udd	1,0087	0	1/2	0
antiproton	$\bar{p}$	$\bar{u}\,\bar{u}\bar{d}$	1,0073	−1	1/2	0
lambda	Λ^0	uds	1,1976	0	1/2	−1
sigma⁻	Σ^-	dds	1,2853	−1	1/2	−1
sigma⁺	Σ^+	uus	1,2769	+1	1/2	−1
ksi⁰	Ξ^0	uss	1,4116	0	1/2	−2
ksi⁻	Ξ^-	dss	1,4185	−1	1/2	−2
omega⁻	Ω^-	sss	1,7952	−1	3/2	−3

MEZONY $q\bar{q}$ jsou bosony a mají baryonové číslo $B = 0$.

název	symbol	složení	hmotnost [u]	el. náboj [e]	spin	podivnost
pion	π^0	$u\bar{u}$	0,1449	0	0	0
pion	π^+	$u\bar{d}$	0,1499	+1	0	0
pion*	π^-	$d\bar{u}$	0,1499	−1	0	0
kaon*	K^+	$u\bar{s}$	0,5300	+1	0	+1
kaon	K^-	$s\bar{u}$	0,5300	−1	0	−1
kaon	K^0	$d\bar{s}$	0,5343	0	0	+1
kaon	$\bar{K}^0$	$s\bar{d}$	0,5343	0	0	−1
rho⁺	ρ^+	$u\bar{d}$	0,8266	+1	1	0
B-nula	B^0	$d\bar{b}$	5,6672	0	0	0

HYPERONY jsou baryony těžší než nukleony.
NUKLEONY jsou protony, neutrony a jejich antičástice.

*Pion π^- je antičásticí k pionu π^+. Kaon K^- je antičásticí ke kaonu K^+; $\bar{K}^0$ je antičásticí ke K^0.

Fyzika zná kolem 120 baryonů a 140 mezonů.

Klidová hmotnost částic v tabulce je udávána v atomových hmotnostních jednotkách u (str. 200) u = $1{,}660\,540 \cdot 10^{-27}$ kg (odpovídající klidová energie je 931,494 MeV).
Elektrický náboj je udáván v násobcích elementárního náboje e = $1{,}602\,177 \cdot 10^{-19}$ C (str. 182).

Elementárními částicemi se původně nazývaly ty částice, jež byly pokládány za nedělitelné (bez vnitřní struktury), např. proton, elektron, neutron atd. (str.199). V současné době se názvem „elementární" označují obvykle všechny mikročástice, tedy také hadrony a mezony, někdy též zprostředkující částice, zatímco částice bez vnitřní struktury se nazývají fundamentální neboli základní.

Systém elementárních částic

Systém elementárních částic je tvořen těmito částicemi:

- FUNDAMENTÁLNÍ (neboli BODOVÉ) ČÁSTICE, které nemají vnitřní strukturu a dělí se dále na:
  - stavební prvky hmoty, tj. LEPTONY a KVARKY q (mají poločíselný spin a jsou to fermiony),
  - částice zprostředkující vzájemné silové působení leptonů a kvarků, tzv. ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE (mají celočíselný spin a jsou to bosony).
- HADRONY – částice složené z kvarků, které se dělí dále na:
  - BARYONY tvořené třemi kvarky qqq (resp. antibaryony tvořené třemi antikvarky $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$). Baryony jsou fermiony a člení se ještě na nukleony a hyperony.
  - MEZONY tvořené páry kvark-antikvark $q\bar{q}$.

Kvarkový model

Kvarky jsou fundamentální částice a patří mezi základní stavební prvky látky. Z kvarků jsou složeny baryony a mezony. Kvarky i antikvarky mají spin 1/2 a dále:

- baryonové číslo $B = +1/3$ pro kvarky, $B = -1/3$ pro antikvarky,
- elektrický náboj je roven násobkům 1/3 elementárního náboje e.

Pravidla pro skládání kvarků do hadronů:

- Baryonové číslo složených částic musí být rovno $B = \pm 1$ (pro baryony, resp. antibaryony) nebo $B = 0$ (pro mezony).
- Elektrický náboj složených částic musí nabývat celočíselné hodnoty elementárního náboje.
- Spiny se mohou skládat paralelně nebo antiparalelně. Antiparalelním skládáním spinů může z kvarků vzniknout jiná částice nežli paralelním. Tím se odlišují mezony $\pi^+ = u\bar{d}$ a $\rho^+ = u\bar{d}$ (str. 200, tab. str. 204).

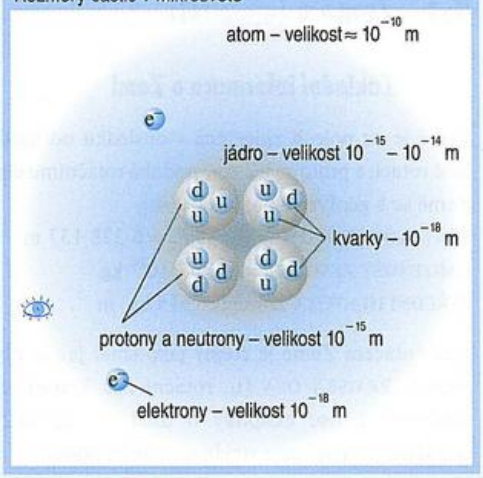
Stavba hmoty

Stabilní fundamentální fermiony (elektrony a kvarky) jsou základními stavebními prvky veškeré látky. Existence čtyř základních fyzikálních interakcí a platnost Pauliho vylučovacího principu jim umožňuje vytvářet nukleony, jádra, atomy, molekuly a vyšší strukturní celky až po galaxie.

Pokud by Pauliho princip neplatil, všechny elektrony v obalu atomu by kupř. obsazovaly základní stav. Pak by chemické vazby (tak, jak je známe) nebyly možné a molekuly by se pravděpodobně z atomů nevytvářely.

Na druhé straně, zprostředkující částice, které jsou nositeli vzájemného silového působení, jsou bosony, a právě tato skutečnost jim umožňuje vytvářet silová pole.

Rozměry částic v mikrosvětě



Kvarky mají tzv. BAREVNÝ NÁBOJ, jenž může nabývat tří hodnot: červené, zelené a modré pro kvarky a antičervené, antizelené a antimodré pro antikvarky. Mezi kvarky působí v důsledku jejich barevného náboje přitažlivá BAREVNÁ SÍLA, která je mnohem silnější nežli elektrická síla a váže kvarky dohromady. Barevná síla se od jiných sil odlišuje a chování dvou kvarků připomíná síly mezi kuličkami spojenými silnou pružinou. Jsou-li kvarky velmi blízko, nepůsobí na sebe téměř žádnou silou. Pokud je chceme od sebe oddálit, síla mezi nimi prudce roste. Tento jev se nazývá ASYMPTOTICKÁ VOLNOST KVARKŮ a právě za jeho vysvětlení byla v roce 2004 udělena Nobelova cena. Kvarky se skládají tak, že složené částice mají neutrální barevný náboj, tj. „bílou barvu",

- kupř. červená + zelená + modrá = bílá
- nebo červená + antičervená = bílá apod.

Stavba protonu podle kvarkového modelu

KVARKY PROTON	
u + u + d = uud	
Baryonové číslo:	$\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = +1$
Elektrický náboj:	$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$
Spin:	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$

$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
$uud \rightarrow udd + e^+ + \nu_e$
$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$

Přeměna protonu na neutron při β-rozpadu uvnitř jádra je přeměna u-kvarku na d-kvark.

9.1 Země a její okolí

Základní informace o Zemi

Země je na pólech zploštěná v důsledku odstředivé síly vyvolané rotací, a proto se její tvar podobá rotačnímu elipsoidu. Tvar Země se v geofyzice nazývá GEOID.

ROVNÍKOVÝ POLOMĚR Země $R_Z = 6\,378\,137$ m.

HMOTNOST ZEMĚ $M_Z = 5{,}9737 \cdot 10^{24}$ kg.

STŘEDNÍ HUSTOTA Země je $5{,}515\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

Směr otáčení Země je stejný jako směr jejího obíhání okolo Slunce. ZEMSKÁ OSA (tj. rotační osa Země) je nakloněna vzhledem k ose ekliptiky o úhel $\alpha = 23°26'21''$. Náklon zemské osy způsobuje střídání ročních období.

HVĚZDNÝ DEN je doba jedné otáčky Země o 360°, která trvá 23 hodin, 56 minut a 4,09 sekundy. SLUNEČNÍ DEN je doba mezi dvěma po sobě následujícími okamžiky, kdy je Slunce nejvýše na obloze, tj. doba, za kterou se opakuje poledne. Sluneční den trvá 24 hodin.

EKLIPTIKA je dráha Země kolem Slunce, má tvar elipsy s velmi malou výstředností $\varepsilon = 0{,}016$ (str. 41). Osa ekliptiky je kolmice na rovinu ekliptiky (tj. rovinu proloženou ekliptikou) procházející ohniskem, v němž se nachází Slunce.

Pro pozorovatele na Zemi se jeví Slunce, Měsíc a hvězdy jako body a objekty na obloze. OBLOHA je definována jako pomyslná kulová plocha, na niž se promítají všechny kosmické objekty. SVĚTOVÉ PÓLY jsou body, ve kterých zemská osa protíná oblohu. Okolo světových pólů se hvězdná obloha otáčí z hlediska pozorovatele na Zemi.

Zemské nitro a kůra

Vnitřní struktura Země:

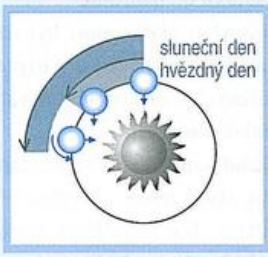
- Zemské JÁDRO je vnitřní část Země. Jeho průměrná hustota je $10\,800\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, teplota se pohybuje od 3 000°C na rozhraní pláště a jádra až po 8 000°C ve středu Země. VNĚJŠÍ JÁDRO je z důvodu vysokých teplot kapalné, VNITŘNÍ JÁDRO je opět pevné v důsledku extrémně vysokých tlaků.
- Zemský PLÁŠŤ je část Země od spodní hranice zemské kůry až k jádru v hloubce 2 900 km. Dělí se na SVRCHNÍ PLÁŠŤ sahající do hloubky 1 000 km a SPODNÍ PLÁŠŤ. Hustota pláště se pohybuje od $3\,300\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ v nejsvrchnější části po $5\,600\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ na spodní hranici pláště.
- Zemská KŮRA je nejsvrchnější část Země. Její tloušťka je 30 až 40 km pod kontinenty a 5 až 10 km pod dny oceánů.

Osnova kapitoly:

- Základní informace o Zemi
- Zemské nitro a kůra; putování kontinentů
- Okolí Země, Měsíc
- Atmosféra Země

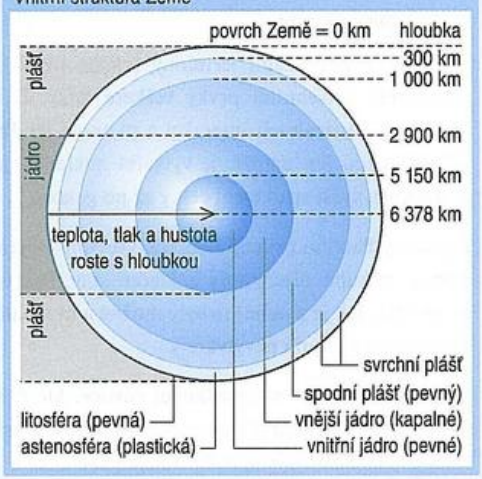
Rotační poloosa Země a je o 21 km kratší než rovníková poloosa $b = R_Z$.

Obíhání Země okolo Slunce



SLUNEČNÍ DEN je přibližně o 4 minuty delší než HVĚZDNÝ DEN. Působením slapového tření se rotace Země pozvolna zpomaluje (o 0,000017 sekundy za rok).

Vnitřní struktura Země



- Horní část SVRCHNÍHO PLÁŠTĚ spolu se zemskou kůrou je pevná a nazývá se LITOSFÉRA. Její tloušťka je 100 až 150 km pod kontinenty a několik desítek km pod oceány. Litosféra je tvořena několika pevnými TEKTONICKÝMI neboli LITOSFÉRICKÝMI DESKAMI.
- Pod litosférou se rozprostírá plastická ASTENOSFÉRA, na které plavou lehčí tektonické desky. Astenosféra je dole teplejší a nahoře chladnější, proto v ní vznikají svislé KONVEKČNÍ PROUDY, které se při povrchu mění na vodorovné a unášejí přitom tektonické desky rychlostí přibližně několik centimetrů za rok.

Posunují-li se TEKTONICKÉ DESKY proti sobě, jejich okraje se nazývají DESTRUKTIVNÍ a nastávají dvě možnosti:

- desky se zvedají a na těchto místech vznikají HORSKÉ ŘETĚZY (např. Alpy, Kavkaz, Himálaj, A na obr.);
- jedna deska se podsouvá pod druhou; kromě vzniku pohoří a řetězů ostrovů (kupř. Andy, Filipíny, Aleuty, C na obr.) vznikají také HLUBOKOMOŘSKÉ PŘÍKOPY.

Vzdalují-li se tektonické desky od sebe, jejich okraje se nazývají KONSTRUKTIVNÍ. Na těchto místech KONVEKCE vynáší nahoru materiál pláště a vytváří se nové mořské dno (kupř. středoatlantický hřbet v Atlantickém oceánu, B na obr.).

PUTOVÁNÍ KONTINENTŮ je důsledkem pohybu tektonických desek. Před 180 miliony let tvořily všechny kontinenty jeden celek zvaný Pangea. Z Pangey postupným štěpením vznikaly kontinenty a jejich pomalým vzdalováním pak současný stav.

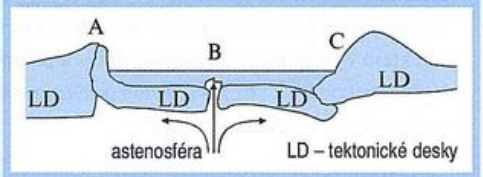
Na destruktivních okrajích tektonických desek vznikají častá ZEMĚTŘESENÍ. Při vzájemném pohybu desky tlačí na sebe, vzniká v nich napětí, které se pak v HYPOCENTRU náhle uvolňuje a projevuje se otřesy země. EPICENTRUM je místo na zemském povrchu nacházející se nad hypocentrem.
Při zemětřesení vznikají v hypocentru SEIZMICKÉ VLNY, které se šíří Zemí na velké vzdálenosti. Seizmické vlny jsou podélné (P-vlny) a příčné (S-vlny) s periodou 0,1 až několik Hz.
Kromě zemětřesení se na destruktivních okrajích tektonických desek projevuje též SOPEČNÁ ČINNOST.

MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ je důsledkem existence kapalného kovového jádra. Jeho vznik vysvětlujeme rotací Země a konvekčními proudy v železném vnějším jádře, které je elektricky vodivé. Vznikají tím elektrické proudy, které v slabém magnetickém poli Slunce a Galaxie indukují silnější magnetické pole Země (tzv. DYNAMOVÝ JEV). V intervalech $10^5 - 10^6$ let dochází k přepólování magnetického pole Země. Za posledních 45 milionů let přepólování nastalo více než 150krát.

ZEMSKÉ JÁDRO je tvořeno převážně železem a niklem. Má vysokou teplotu nejen jako pozůstatek původní teploty celé Země v dobách jejího vzniku, ale též v důsledku radioaktivní přeměny prvků, hlavně uranu a thoria.

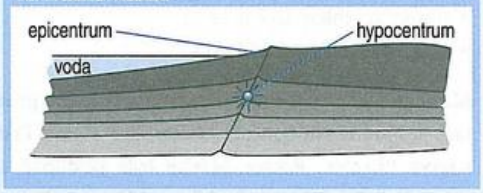
TEKTONICKÉ DESKY

KONVEKČNÍ PROUDY

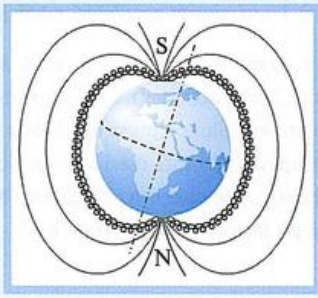


V důsledku pohybu euroasijské a severoamerické desky od sebe se Amerika od Evropy vzdaluje rychlostí několika centimetrů za rok.

Vznik **ZEMĚTŘESENÍ**



Rychlost **SEIZMICKÝCH VLN** se mění na rozhraní kůry a pláště, stejně tak na rozhraní pláště a jádra. Protože zemským jádrem se nešíří příčné seizmické vlny, ale pouze vlny podélné, usuzujeme z toho, že jádro je kapalné. (Kapalinou se šíří pouze podélné vlny, a ne příčné.)



MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ
Poblíž severního geografického pólu leží jižní magnetický pól.

Okolí Země

MAGNETOSFÉRA je oblast, ve které se významně projevuje vliv magnetického pole Země na elektricky nabité částice. Zabraňuje rychlým elektronům a protonům ze Slunce, aby dopadaly na zemský povrch tím, že v magnetickém poli působící Lorentzova síla vyvolává jejich pohyb po šroubovici, jejíž osa sleduje magnetické indukční čáry (str. 207). Částice přibližující se v blízkosti magnetických pólů k zemskému povrchu se srážejí s atomy a molekulami vzduchu, předávají jim energii a excitují je. Excitované částice pak vyzařují viditelné světlo (str. 185, 150). Vzniká tak POLÁRNÍ ZÁŘE.

UMĚLÉ DRUŽICE Země (satelity) se využívají k různým účelům:

- SPOJOVÉ DRUŽICE přenášejí telefonní hovory, televizní signály a počítačová data. Bývají nejčastěji geostacionární.
- NAVIGAČNÍ DRUŽICE vysílají údaje, na jejichž základě lze určit zeměpisné souřadnice (letadel, lodí atd.). GLOBÁLNÍ POZIČNÍ SYSTÉM (zkratka GPS) je tvořen systémem 24 družic, které vysílají informace o své dráze a palubním čase.
- METEOROLOGICKÉ DRUŽICE sledují povětrnostní jevy a umožňují předpovídat počasí.

Měsíc

Základní údaje o Měsíci:

- poloměr je 1 738 km;
- střední vzdálenost od Země je 384 400 km;
- hmotnost = $7{,}36 \cdot 10^{22}$ kg ≐ 1/81 hmotnosti Země;
- tíhové zrychlení 1,67 $m \cdot s^{-2}$;
- úniková rychlost 2,38 $km \cdot s^{-1}$.

Měsíc je otočen k Zemi stále stejnou stranou, protože doba rotace je shodná s dobou jeho oběhu okolo Země. Taková rotace se nazývá VÁZANÁ. Rotace Měsíce byla postupně zpomalována slapovými silami, které působily na Měsíc především na začátku jeho vývoje. V důsledku pomalé rotace jsou na Měsíci velké rozdíly povrchových teplot (+100 °C ve dne, –190 °C v noci).

SLAPY, tj. příliv a odliv mořské vody, jsou způsobeny slapovou silou. SLAPOVÁ SÍLA $\vec{F}_s$ je výslednicí přitažlivé síly Měsíce $\vec{F}_M$ a odstředivé síly $\vec{F}_o$ vznikající v důsledku oběhu Země kolem společného těžiště T soustavy těles „Země a Měsíc".

ZATMĚNÍ SLUNCE, resp. MĚSÍCE nastává, když se Měsíc při svém oběhu kolem Země dostane na jednu přímku se Zemí a Sluncem. Při zatmění Slunce musí být Měsíc v novu, při zatmění Měsíce v úplňku. Protože mezi rovinou oběhu Měsíce kolem Země a ekliptikou je úhel cca 5 °, zatmění Měsíce, resp. Slunce nenastává při každém úplňku, resp. novu.

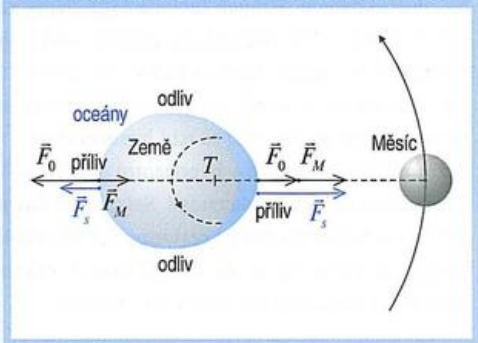
KRUHOVÁ RYCHLOST satelitů obíhajících Zemi v blízkosti jejího povrchu je 7,9 $km \cdot s^{-1}$ a s rostoucí vzdáleností, od Země se snižuje (str. 41). Kruhová rychlost geostacionárních družic je např. 3,074 $km \cdot s^{-1}$.

(GEO)STACIONÁRNÍ DRUŽICE obíhají Zemi nad rovníkem a mají oběžnou dobu 24 hodin. Z hlediska pozorovatele na Zemi permanentně „visí" nad určitým místem zemského povrchu (str. 41).

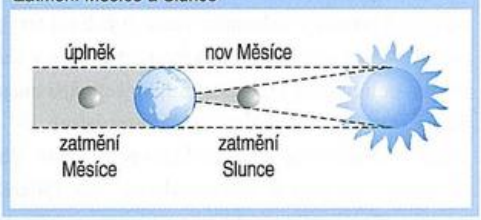
GPS PŘIJÍMAČE z rozdílů mezi časy vyslání a přijetí signálů konkrétních družic určí jejich vzdálenosti od přijímače a následně vypočítají svou zeměpisnou polohu.

Povrch MĚSÍCE je pokryt velkým množstvím kráterů, které vznikaly po dopadech těles z kosmu přibližně před 4 miliardami let. Tmavá místa na povrchu Měsíce jsou rozsáhlé planiny a nazývají se moře.

SLAPOVÁ SÍLA $\vec{F}_s = \vec{F}_M + \vec{F}_o$. Země a Měsíc tvoří soustavu dvou těles, která obíhají kolem společného těžiště T.



Zatmění Měsíce a Slunce



Atmosféra Země

ATMOSFÉRA ZEMĚ (plynný obal Země, též OVZDUŠÍ) je tvořena směsí plynů, která objemově obsahuje přibližně 78 % dusíku N_2, 21 % kyslíku O_2, 1 % tvoří z větší části argon Ar, dále pak oxid uhličitý CO_2, vodík, helium, neon, xenon, radon, ozon a stopová množství dalších plynů. Atmosféra dále obsahuje vodu ve formě vodní páry, mlžných kapiček a ledových částic tvořících oblaka a též pevné částice (prach).

ATMOSFÉRA ZEMĚ se vertikálně člení na:

- TROPOSFÉRU sahající od zemského povrchu do výšek 9 až 17 km. Troposféra je charakterizovaná tím, že teplota v ní klesá s nadmořskou výškou přibližně o 0,6 K na 100 m.
- STRATOSFÉRU sahající od horní hranice troposféry až do výšky přibližně 50 km a je charakterizována tím, že pokles teploty s výškou se v ní zastavuje a přechází v růst.
- MEZOSFÉRU sahající od horní hranice stratosféry do výšky 80 km (teplota v ní klesá) a TERMOSFÉRU sahající do výšky asi 500 km (teplota v ní opět stoupá). IONOSFÉRU tvoří vrstvy ionizovaného plynu ve výškách nad 60 km.

SKLENÍKOVÝ EFEKT je oteplení nižších vrstev atmosféry v důsledku toho, že ovzduší Země dobře propouští sluneční záření dopadající na zemský povrch (který se tím ohřívá) a účinně pohlcuje tepelné vyzařování z povrchu Země.

TLAKOVÁ NÍŽE je oblast nižšího tlaku vzduchu. Má centrum, ve kterém je atmosférický tlak (str. 52) nižší než v okolí.
TLAKOVÁ VÝŠE je oblast vyššího tlaku vzduchu. V jejím centru je atmosférický tlak vyšší než v okolí.
Mezi tlakovou výší a níží je rozdíl tlaků, který způsobuje v dolní části atmosféry proudění vzduchu z oblasti vyššího tlaku do oblasti nižšího tlaku. V oblasti TLAKOVÉ VÝŠE vzduch klesá shora dolů, při sestupu se adiabaticky zahřívá, a proto je pro tlakovou výš charakteristické suché počasí s malou oblačností. V oblasti TLAKOVÉ NÍŽE vzduch stoupá, adiabaticky se ochlazuje a vodní pára v něm obsažená se sráží. Proto je pro tlakovou níž charakteristické deštivé počasí.

ATMOSFÉRICKÁ FRONTA je rozhraní mezi dvěma masivními vzduchovými oblastmi v atmosféře, které se liší teplotou vzduchu. TEPLÁ FRONTA je rozhraní mezi oblastí teplého vzduchu pohybující se směrem k oblasti studeného vzduchu, přičemž se obvykle nad ni nasouvá. STUDENÁ FRONTA je rozhraní mezi oblastí studeného vzduchu pohybující se směrem k oblasti teplého vzduchu, přičemž se obvykle pod ni podsouvá.

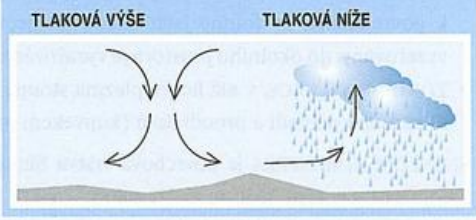
TROPOSFÉRA tvoří 90 % hmotnosti atmosféry a sahá do výšky 9 km nad póly až 17 km nad rovníkem. Ve středních zeměpisných šířkách sahá do výšky přibližně 11 km.

STRATOSFÉRA tvoří asi 9 % hmotnosti atmosféry. V dolní části má teplotu asi 220 K, od 30 km pak stoupá až na 300 K. Ve stratosféře se nachází OZONOVÁ VRSTVA obsahující ozon, který pohlcuje UV záření (str. 147). Ozon O_3 je rozkládán atomy chloru a fluoru uvolňujícími se rozkladem freonů, které se používají ve sprejích a chladicích zařízeních. Úbytek stratosférického ozonu se nazývá OZONOVÁ DÍRA. Jeden atom chloru Cl nebo fluoru F může rozložit miliony molekul ozonu.

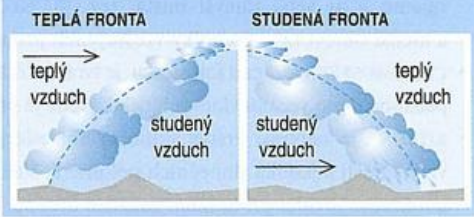
IONOSFÉRA vzniká ionizací molekul a atomů působením kosmického záření, slunečního větru a UV záření (str. 198, 210). Odraz rádiových vln od ionosféry se využívá při rádiovém spojení na krátkých vlnách (str. 147).

Tepelné záření zemského povrchu je pohlcováno zejména vodními párami a SKLENÍKOVÝMI PLYNY (CO_2, SO_2) obsaženými v atmosféře. Růst koncentrace těchto plynů v důsledku spalování fosilních paliv (uhlí, ropy a zemního plynu) vzbuzuje obavy z globálního oteplování troposféry.

Atmosférické proudění vzduchu



ATMOSFÉRICKÉ FRONTY



9.2 Sluneční soustava

SLUNEČNÍ SOUSTAVA je tvořena Sluncem a dále:

- planetami obíhajícími okolo Slunce a měsíci těchto planet;
- planetkami (asteroidy) v pásu mezi Marsem a Jupiterem;
- transneptunickými tělesy (TNO);
- kometárními jádry v Oortově oblaku;
- kometami, meteoroidy, meteorickými roji apod.

Slunce

SLUNCE je hvězda hlavní posloupnosti (str. 215), která vznikla přibližně před 4,57 miliardami let. Je součástí Galaxie, od jejíhož středu je vzdáleno přibližně 8 200 parseků a obíhá jej rychlostí 220 km/s. Základní údaje o Slunci:

- poloměr Slunce $R_\odot = 695\,550$ km,
- hmotnost Slunce $M_\odot = 1{,}989 \cdot 10^{30}$ kg $= 332\,959 \cdot M_Z$,
- střední hustota $\rho_\odot = 1\,410$ kg $\cdot$ m^{-3},
- tíhové zrychlení na povrchu Slunce 274 m $\cdot$ s^{-2},
- úniková rychlost na povrchu Slunce 617,7 km $\cdot$ s^{-1},
- teplota na povrchu Slunce $T_\odot = 5\,770$ K (str. 151),
- ZÁŘIVÝ VÝKON SLUNCE $L_\odot = 3{,}84 \cdot 10^{26}$ W.

Slunce je tvořeno plazmou obsahující jádra vodíku, helia a volné elektrony. Zdrojem energie vyzařované Sluncem jsou termojaderné reakce. Vnitro Slunce je tvořeno:

- JÁDREM, v němž probíhají termonukleární reakce; teplota v jádře je kolem 13,5 až 15 milionů kelvinů;
- RADIAČNÍ VRSTVOU, v níž energie z jádra postupně proniká k povrchu tak, že fotony jsou látkou pohlcovány a opět vyzařovány; do okolního prostoru je vyzařována fotosférou.
- ZÓNOU KONVEKCE, v níž horká plazma stoupá vzhůru, kde se zářením ochladí a proudí dolů (konvekční proudy).

SLUNEČNÍ ATMOSFÉRA je povrchová vrstva Slunce dostupná našemu pozorování. Dělí se na tři vrstvy:

- FOTOSFÉRA je povrchová vrstva, z níž přichází naprostá většina světla, které vidíme při pohledu na Slunce. Pozorujeme v ní větší tmavší místa, tzv. SLUNEČNÍ SKVRNY a menší GRANULE – vrcholky vzestupních proudů plazmy.
- CHROMOSFÉRA leží nad fotosférou, je tvořena řídkou plynnou plazmou a pro většinu vlnových délek světla je průhledná.
- KORÓNA je nejvyšší vrstva sluneční atmosféry a sahá do vzdálenosti několika slunečních poloměrů. Velmi slabě září a můžeme ji vidět při úplném zatmění Slunce. Teplota v ní přesahuje milion stupňů, proto elektrony, protony i jádra helia s nejvyšší kinetickou energií unikají z koróny do meziplanetárního prostoru a vytvářejí tzv. SLUNEČNÍ VÍTR.

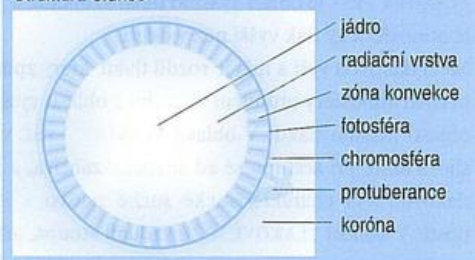
Osnova kapitoly:

- Slunce
- Planety, měření vzdálenosti planet
- Planetky, komety, TNO, meteoroidy, meteory
- Vznik a vývoj sluneční soustavy

V nitru SLUNCE probíhají v důsledku vysokých teplot a tlaků TERMOJADERNÉ REAKCE, při nichž se jádra vodíku postupně proměňují na jádra helia (str. 194). Nejprve jadernou syntézou protonů vzniká deuteron ^2_1H, pozitron e^+ a neutrino ν: $^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu$. Druhou reakcí je syntéza deuteronu ^2_1H s protonem: $^2_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma$. Poslední reakce je: $^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + {}^1_1H + {}^1_1H$. Energie, která se reakcemi uvolňuje, postupuje ke slunečnímu povrchu a nakonec je FOTOSFÉROU vyzařována do okolního prostoru.

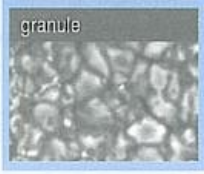
ZÁŘIVÝ VÝKON SLUNCE $L_\odot$ (tj. energii vyzařovanou Sluncem za 1 s, str. 148) vypočetl již v roce 1838 anglický astronom J. Herschel. Nechal slunečními paprsky ohřát vodu a ze změny její teploty za daný čas vypočetl hustotu zářivého toku $F_\odot$ slunečních paprsků dopadajících na povrch Země. Zářivý výkon $L_\odot = 4\pi R_{SZ}^2 \cdot F_\odot$, kde R_{SZ} je střední vzdálenost Země od Slunce. Hodnota $F_\odot$ se pohybuje v intervalu 1 361 až 1 369 W $\cdot$ m^{-2} v důsledku změn sluneční aktivity i vzdálenosti od Země.

Struktura Slunce



SLUNEČNÉ ŠKVRNY mohou být velké až desítky tisíc km.

Jsou způsobeny silným magnetickým polem, které zpomaluje konvekci žhavé plazmy z nitra na povrch Slunce. Proto je jejich teplota nižší než teplota okolí (asi o 1 500 K).



GRANULE mají velikost kolem 1000 km. Kde plazma stoupá vzhůru, jsou světlejší. Jejich okraje, kde chladnější plazma proudí dolů, jsou tmavější.

SLUNEČNÍ AKTIVITA úzce souvisí s počtem slunečních skvrn. Je tím větší, čím je skvrn na Slunci více. Počet skvrn a tedy i slunečná aktivita se mění v jedenáctiletém cyklu; má maxima, kdy je na povrchu Slunce velké množství skvrn, a minima, kdy může být Slunce úplně beze skvrn. Sluneční aktivita má také dlouhodobější výkyvy: tzv. Středověké maximum dosahovala v létech 1050 až 1250, pak se začala snižovat a její opětovný pomalý nárůst pozorujeme v posledních 150 letech. Naměřené průměrné hodnoty počtu slunečních skvrn jsou v současnosti dokonce vyšší než kdykoliv předtím.

Sluneční aktivita se projevuje různými jevy. Jsou to:

- ERUPCE – veliká náhlá zjasnění chromosféry způsobená změnami magnetického pole, přičemž vzniká silné elektrické pole, které urychlí nabité částice (zejména elektrony a protony) na vysokou rychlost.
- PROTUBERANCE – obrovské výtrysky plazmy dlouhé tisíce kilometrů a sahající až do koróny. Jejich tvar udržuje lokální magnetické pole Slunce i nekolik dnů až týdnů.

MAGNETICKÉ POLE Slunce je vytvořené elektrickými proudy, které jsou způsobeny vzájemným posuvem plazmy rotující rozdílnými rychlostmi – rovníková oblast Slunce se otáčí rychleji, nežli místa od rovníku vzdálenější.

Při **ERUPCÍCH** vzniká silné elektromagnetické záření a rychlý proud nabitých částic. Když tyto částice dorazí k Zemi, působí na geomagnetické pole a vznikají tzv. GEOMAGNETICKÉ BOUŘE a intenzivnější polární záře.

Víte, že v začátcích 2. tisíciletí byla sluneční aktivita mnohem vyšší a klima Země teplejší? Vikingové tehdy pojmenovali dnešní ledové Grónsko Zelenou zemí, protože tam rostla tráva a bylo možné chovat dobytek.

Víte, že v létech 1450 až 1700 byla sluneční aktivita v průměru nižší nežli předtím i potom? V téže době byla v Evropě velmi chladná léta a dlouhé mrazivé zimy. Proto se toto období nazývá i Malá doba ledová.

Na zamyšlení: Současné globální oteplování troposféry Země může být spojeno nejenom se skleníkovým efektem v důsledku spalování fosilních paliv, ale také s nárůstem sluneční aktivity.

Planety

Planety lze rozdělit do dvou skupin na:

- PLANETY ZEMSKÉHO TYPU – TERESTRIÁLNÍ PLANETY: Merkur, Venuše, Země, Mars;
- OBŘÍ PLANETY – Jupiter, Saturn, Uran a Neptun.
- Devátou planetou je PLUTO, jenž byl objeven v roce 1930. Má relativně „veliký" měsíc Cháron o průměru 1 212 km.

PLANETY ZEMSKÉHO TYPU mají menší velikost a vyšší hustotu ve srovnání s obřími planetami. Všechny mají podobné chemické složení: přibližně 30 % kyslíku, 30 % železa, 15 % křemíku a asi 13 % hořčíku.

OBŘÍ PLANETY (též **JOVIÁLNÍ** planety tj. podobné Jupiteru) se liší od planet zemského typu. Jsou mnohem větší, mají menší hustotu a nemají pevný povrch. Jsou tvořeny vodíkem, heliem a malým množstvím ostatních prvků.

PLUTO je vzhledem na svou excentrickou orbitu, velikost a fyzikální vlastnosti zařazován také k velkým tělesům Kuiperova pásu nacházejícího se za drahou Neptuna.

PLANETA	STŘED. VZDÁLENOST OD SLUNCE		OBĚŽNÁ DOBA	ROVNÍKOVÝ	HMOTNOST v násobcích	STŘEDNÍ	POČET
	V KILOMETRECH	V AU	OKOLO SLUNCE	PRŮMĚR	hmot. Země	HUSTOTA	MĚSÍCŮ
Merkur	57 909 176	0,387 099	87,969 d	4 879 km	0,055	5 427 kg · m^{-3}	0
Venuše	108 208 926	0,723 332	224,701 d	12 104 km	0,815	5 204 kg · m^{-3}	0
Země	149 597 887,5	1,0	365,256 d	12 756 km	1,00	5 515 kg · m^{-3}	1
Mars	227 936 637	1,523 662	686,960 d	6 805 km	0,107	3 934 kg · m^{-3}	2
Jupiter	778 412 027	5,203 363	11,864 r	142 984 km	317,893	1 326 kg · m^{-3}	63*
Saturn	1 426 725 413	9,537 070	29,449 r	120 536 km	95,162	687 kg · m^{-3}	46*
Uran	2 870 972 220	19,191 264	84,073 r	51 118 km	14,536	1 318 kg · m^{-3}	27*
Neptun	4 498 252 900	30,068 964	164,883 r	49 528 km	17,147	1 638 kg · m^{-3}	13*
Pluto	5 906 376 272	39,481 687	248,086 r	2 306 km	0,002	2 030 kg · m^{-3}	3

1 AU = 149 597 870 km (str. 42, 217); 1 d = 86 400 sekund (definice dne podle SI); 1 r = 365,25 d (dnů)
*Astronomická pozorování a vesmírná sonda Cassini objevily další měsíce obřích planet. Jejich počet není oficiálně ustálen.

Planety zemského typu

MERKUR má průměr jen o málo větší než Měsíc, nemá atmosféru a okolo své osy se otáčí velmi pomalu. Denní teploty dosahují hodnot přes 430 °C, v noci je teplota až −170 °C.

VENUŠE se otáčí okolo své osy jednou za 243 dní opačným směrem než ostatní planety. Má oproti Zemi mnohem hustší atmosféru tvořenou 96,5 % CO_2, dusíkem a stopovými množstvími CO, Ar, He, H_2O.

MARS má rudou barvu, která je způsobena obsahem Fe_2O_3 v půdě. Marťanský den trvá 24 hodin, 39 minut a 36 s. Mars má řídkou atmosféru tvořenou 95,32 % CO_2, dále dusíkem, argonem, malým množstvím kyslíku, CO a vodních par. Denní teploty mohou vystoupit až k 0 °C, noční dosahují −90 °C. Mars má dva malé měsíce, Deimos (o průměru 46,9 km) a Phobos (18,8 km).

Obří planety

JUPITER je největší obří planetou. Nemá pevný povrch; jeho atmosféra z vodíku a helia je směrem ke středu stále hustší, až se stává kapalnou, a v centru, kde panují obrovské tlaky, je pravděpodobně kovový vodík. V atmosféře vidíme řadu světlejších a tmavších pásů a vírů, její průměrná teplota je −130 °C.

SATURN je podobný Jupiteru s tím rozdílem, že má viditelné prstence. Jsou tvořeny prachem a kameny obíhajícími v rovině Saturnova rovníku. Teplota na povrchu je −180 °C. Bližší planety až po Saturn byly známy už ve starověku.

URAN byl objeven F. W. Herschelem v r. 1781. Na rozdíl od ostatních planet je osa Uranu takřka paralelní s ekliptikou. Jeho modrá barva je výsledkem pohlcování červeného světla metanem v horní vrstvě atmosféry. Teplota na povrchu je −214 °C.

NEPTUN byl poprvé pozorován v roce 1846. Jeví se modře ze stejného důvodu jako Uran. Teplota na povrchu je −220 °C.

Měření vzdálenosti planet

Pozorujeme-li planetu M ze dvou různých míst A, B na Zemi, vidíme její obraz vzhledem ke vzdálené hvězdě H posunut o úhel $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$. Protože vzhledem k nesmírné vzdálenosti hvězd se úhel $\varepsilon \to 0$, platí $\alpha = \gamma$ a ze známé vzdálenosti obou míst A, B na Zemi vypočteme vzdálenost d planety M.

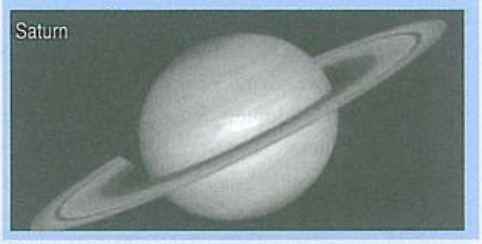
Atmosféra Venuše způsobuje výrazný skleníkový jev, který je příčinou vysoké průměrné teploty (462 °C) na jejím povrchu. **Víte, že** atmosférický tlak na povrchu Venuše je 90krát vyšší než na Zemi?

V polárních oblastech **MARSU** se vytvářejí polární čepičky z tuhého CO_2 a malého množství ledu.

Víte, že nejvyšší hora ve sluneční soustavě, 27 km vysoký Mons Olympus, leží právě na Marsu?

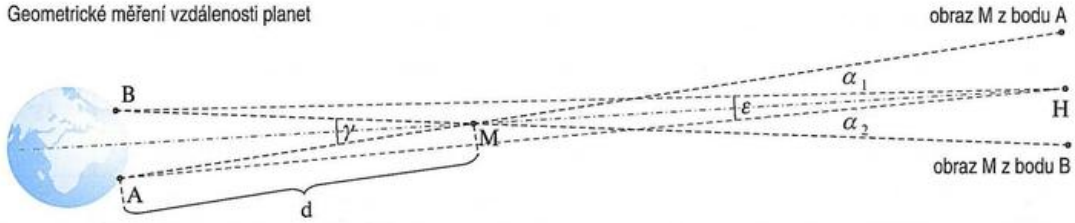
Nejznámějším útvarem na **JUPITERU** je Velká červená skvrna. Je to obrovský atmosférický vír. Byl pozorován již v r. 1664.

Pás prstenců **SATURNU** je široký asi 250 000 km a tlustý 3 km. Kosmické sondy zjistily, že slabé prstence mají všechny obří planety.



Po objevení **URANU** bylo zjištěno, že jeho oběžná dráha vykazuje gravitační poruchy. Proto se astronomové domnívali, že musí existovat vzdálenější planeta, která dráhu Uranu ovlivňuje. Pomocí Newtonových zákonů vypočítali její orbitu a na předpovězeném místě oblohy byl nalezen Neptun.

Geometrické měření vzdálenosti planet



Planetky, komety, TNO, meteoroidy

PLANETKY (též ASTEROIDY) jsou tělesa o rozměrech 0,1 km až 1 000 km obíhající okolo Slunce v pásu mezi Marsem a Jupiterem. Jejich složení je podobné jako u planet zemského typu. Je jich několik set tisíc a první objevenou planetkou byl Ceres o průměru 933 km. Zvláštní skupinu tvoří **potenciálně nebezpečné asteroidy** - planetky větší než 150 metrů, které se přibližují k oběžné dráze Země.

TRANSNEPTUNICKÁ TĚLESA (TNO - Trans Neptunian Objects) jsou objekty, jejichž oběžná dráha se nachází převážně za drahou Neptuna. V současnosti se dělí na tři skupiny:

- KUIPERŮV PÁS je pás malých kamenných a ledových těles. Jeho vnitřní okraj leží ve vzdálenosti 30 AU a vnější asi 50 AU od Slunce. Přicházejí z něj také některé komety.
- Disk rozptýlených objektů (SDOs - scattered disk objects), jejichž dráhy jsou silně excentrické. Perihelium mají ve vzdálenosti od 35 AU, afelium 60 až 1 000 AU od Slunce.
- OORTŮV OBLAK obsahuje kometární jádra a nachází se ve vzdálenosti 50 000 až 100 000 AU od Slunce.

KOMETY jsou tělesa o rozměrech nanejvýš několik desítek kilometrů a od planetek se liší tím, že obíhají kolem Slunce po značně excentrických elipsách s periodou několika let až tisíce roků. V periheliu se mohou přiblížit Slunci blíž než Venuše, jejich afelium může být několik desítek AU až 100 000 AU.

METEOROIDY jsou tělesa do velikosti několika stovek metrů. Vletí-li do atmosféry Země, třením se rozžhaví a na obloze pak vidíme světelnou stopu jejich trajektorie, tzv. METEOR. Velmi jasný meteor se nazývá BOLID. Pokud se meteoroid v atmosféře zcela nevypaří, dopadne na zem jako METEORIT.

Vznik a vývoj sluneční soustavy

Slunce vzniklo asi před 4,7 miliardami roků smršťováním mlhoviny, které bylo zahájeno pravděpodobně vnějším podnětem: rázovou vlnou od blízké supernovy, silným impulzem záření vzniklého při srážce galaxií apod. Vzniklo hustější jádro, z něj PROTOHVĚZDA a kolem ní PROTOPLANETÁRNÍ DISK, který byl zárodkem planetárního systému.

Slunce vzniklé z protohvězdy setrvá na hlavní posloupnosti vývoje hvězd ješte 5 miliard roků. Po spotřebování vodíku se stane červeným obrem, po „vyhoření" všeho jaderného paliva bílým trpaslíkem a nakonec černým trpaslíkem (str. 216) Protože sluneční soustava obsahuje také těžké prvky, předpokládá se, že původní mlhovina byla obohacena prvky vymrštěnými do mezihvězdného prostoru při výbuchu supernovy*.

* Supernovy jsou „továrnou" na výrobu prvků těžších železa a „distribuční firmou" všech prvků vzniklých v nitru hvězd (str. 216).

PLANETKY jsou pravděpodobně zbytky těles, jejichž shlukováním se tvořily dnešní planety zemského typu. Kulový tvar mají pouze planetky o průměru větším než 600 km. Gravitační síla pak překoná soudržnost hornin a vytvaruje těleso do podoby koule.

Víte, že asteroid 99942 Apophis se v roce 2029 přiblíží k Zemi na vzdálenost 30 000 kilometrů?

V **KUIPEROVĚ PÁSU** jsou i relativně velká tělesa. Objekt 2005 FY_9 objevený v r. 2005 má průměr kolem 1 800 km. Mnohá SDOs byla vychýlena gravitačním působením vnějších planet, zejména Neptunu. Vzdálená Sedna (SDO o průměru asi 1 500 km) má afelium 975 AU.

KOMETY jsou tvořeny směsí zmrzlých plynů a prachu. V blízkosti Slunce zmrzlé plyny sublimují a spolu s prachem vytvářejí okolo JÁDRA komety oblak zvaný KOMA a ve směru od Slunce dlouhý OHON, který svítí odraženým slunečním světlem. Ohony komet se ohýbají směrem od Slunce tlakem světla a slunečního větru.

METEORICKÉ ROJE jsou proudy meteoroidů obíhající kolem Slunce po stálých eliptických drahách. Prochází-li Země meteorickým rojem, vidíme na obloze více meteorů než jindy. Poněvadž dráhy meteoroidů jsou rovnoběžné, z pohledu pozorovatele na Zemi vyletují meteory z jednoho místa na obloze, které se nazývá RADIANT. Meteorické roje vznikají obvykle rozpadem komety.

Před přibližně 5 miliardami roků byl na místě **SLUNEČNÍ SOUSTAVY** obrovský oblak plynu obsahující vodík, helium a asi 1 až 2 % atomů jiných prvků. Vytvořené jádro s větší hustotou k sobě postupně přitahovalo stále víc a víc látky. Molekuly padající do jádra získávaly působením gravitační síly kinetickou energii, která se srážkami molekul a atomů proměňovala v tepelnou energii. Teplota v jádře stoupala, začalo zářit a vznikla **PROTOHVĚZDA**. Přibližně při teplotě 10^7K se „zažehla" termojaderná reakce a vzniklo Slunce. V rotujícím oblaku okolní látky – **PROTOPLANETÁRNÍM DISKU** se postupně spojovaly atomy v molekuly a molekuly ve větší celky. Dále od Slunce vznikaly krystalky zmrzlých plynů, které se spojovaly, přitahovaly další molekuly a krystaly, vznikala velká jádra obřích planet, která k sobě přitáhla i meziplanetární vodík a helium z okolí. Blíže Slunci vznikala zrna z molekul těžších prvků, jejich spojováním planetesimály a zárodky planet (protoplanety) a postupně celé planety pozemského typu.

9.3 Hvězdy, galaxie, vesmír

Charakteristiky hvězd

ZÁŘIVÝ VÝKON L je veličina udávající celkovou energii, kterou hvězda vyzáří za 1 sekundu (str. 148, 210).

EFEKTIVNÍ TEPLOTA hvězdy je teplota jejího povrchu definovaná jako teplota černého tělesa, které má stejný zářivý výkon L jako pozorovaná hvězda. Efektivní teplota T_{ef} je určena vztahem $L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4$ vyplývajícím ze Stefan-Boltzmannova zákona (str. 151), kde R je poloměr hvězdy.

SPEKTRUM ZÁŘENÍ hvězdy je obvykle absorpční spektrum. Toto spektrum je tvořené souborem absorpčních čar s různými vlnovými délkami ve spojitém spektru, které je částečně podobné spektru záření černého tělesa (str. 150, 151).

Jasnost hvězdy charakterizuje hustota světelného toku F_v: $F_v = \frac{\Phi_v}{S}$, kde Φ_v je světelný tok z hvězdy (v místě, kde ji pozorujeme - na Zemi nebo na oběžné dráze okolo Země), který prochází plochou S, kolmou na směr paprsků.

HVĚZDNÁ VELIKOST m (**MAGNITUDA**) je bezrozměrová veličina udávající jasnost hvězdy na obloze. Je definována vztahem $m = -2{,}5\log(F_v/F_{v0})$, kde F_v je světelný tok z hvězdy v místě pozorování, $F_{v0} = 2{,}54 \cdot 10^{-6}$ lx (lux) je světelný tok odpovídající magnitudě nula. $F_v = 1$ lux pro magnitudu $m = -14$.
Pro rozdíl magnitud m_1 a m_2 dvou hvězd H_1, H_2 platí **POGSONOVA ROVNICE**: $m_1 - m_2 = -2{,}5\log(F_{v1}/F_{v2})$, kde F_{v1}, F_{v2} jsou světelné toky z hvězd H_1, H_2 v místě pozorování.

ABSOLUTNÍ HVĚZDNÁ VELIKOST - ABSOLUTNÍ MAGNITUDA M je dána vztahem $M = m + 5 - 5\log d$ ❶, kde d je vzdálenost hvězdy od Země v parsecích. M je hvězdná velikost, kterou by hvězda měla ve vzdálenosti 10 parseků od Země.

BOLOMETRICKÁ HVĚZDNÁ VELIKOST (magnituda) m_{bol} je definována vztahem $m_{bol} = -2{,}5\log(F_e/F_{e0})$, kde F_e je zářivý tok z hvězdy v místě pozorování, F_{e0} je zářivý tok odpovídající magnitudě nula ($F_{e0} = 2{,}54 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$).

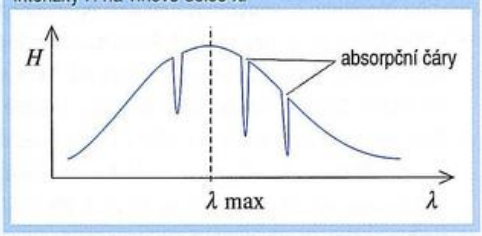
BOLOMETRICKÁ MAGNITUDA $M_{bol} = m_{bol} + 5 - 5\log d$ ❶.
Mezi bolometrickou magnitudou M_{bol} a zářivým výkonem L hvězdy H platí vztah: $M_{bol} = M_{bol\,0} - 2{,}5\log(L/L_0)$ ❷.
$M_{bol\,0}$ je bolometrická magnituda referenční hvězdy H_0 o zářivém výkonu L_0 (obvykle Slunce, $M_{bol\,\odot} = 4{,}75$), s kterou zářivý výkon a magnitudu hvězdy H porovnáváme.
Mezi M_{bol} a M platí vztah $M_{bol} = M + BC(T_{ef})$ kde BC je **BOLOMETRICKÁ KOREKCE**, ktorá závisí na typu hvězdy a její teplotě (pro Slunce $BC_\odot = -0{,}07$).

Osnova kapitoly:

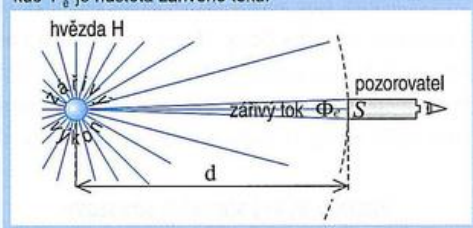
- Charakteristiky hvězd, zářivý výkon, teplota, spektrum záření, jasnost, hvězdná velikost
- Vznik, vývoj a zánik hvězd
- Galaxie, vesmír
- Vznik a vývoj vesmíru

JEDNOTKOU ZÁŘIVÉHO VÝKONU je **WATT** (W).

SPEKTRUM ZÁŘENÍ hvězdy – závislost spektrální intenzity H na vlnové délce λ.



Vzdálená hvězda H má zářivý výkon L, který vyzařuje do celého okolního prostoru. Část tohoto záření dopadá na okulár dalekohledu jako zářivý tok Φ_e. Pro tok záření Φ_e světla z hvězdy H dopadajícího kolmo na plochu S platí: $\Phi_e = L\frac{S}{4\pi d^2} \Rightarrow F_e = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{L}{4\pi d^2}$,
kde F_e je hustota zářivého toku.



Ze vztahu pro F_e je odvozen důležitý vztah ❷, který se používá pro výpočty týkající se hvězd. Umožňuje např. vypočítat ze zjištěného zářivého výkonu L hvězdy H (str. 217) její magnitudu M_{bol}, pomocí bolometrické korekce absolutní magnitudu M a ze změřené magnitudy m určit pomocí vztahu ❶ vzdálenost hvězdy. Využívají se k tomu známé hodnoty zářivého výkonu a bolometrické magnitudy referenční hvězdy H_0.

Hvězdy podle jejich velikostí roztřídil již starověký astronom Hipparchos: jasnost hvězd první velikosti byla přibližně 100-krát větší než jasnost hvězd šesté velikosti. Současnou škálu vytvořil v roce 1 856 N. R. Pogson. Logaritmická definice **MAGNITUDY** s číselným koeficientem −2,5 byla zvolena tak, aby rozdílu 5 magnitud odpovídal poměr světelných resp. zářivých toků 100 : 1.

Vznik, vývoj a zánik hvězd

Stabilní hvězda je termodynamická soustava (str. 65) nacházející se v rovnovážném stavu, jenž je popsán stavovými veličinami a rovnicemi. Jejich teoretické řešení a astronomická pozorování přinesly řadu závěrů, např.:

- **ZÁŘIVÝ VÝKON** hvězd L roste s jejich **HMOTNOSTÍ** M;
- **TEPLOTA** v nitru hvězdy je řádově miliony kelvinů, teplota na povrchu je několik tisíc až několik desítek tisíc kelvinů;
- teplota v nitru i na povrchu hvězdy je přibližně přímo úměrná hmotnosti hvězdy a nepřímo úměrná jejímu poloměru;
- závislost zářivého výkonu L na efektivní povrchové teplotě hvězdy T_{ef} ukazuje **HERTZSPRUNGŮV-RUSSELLŮV DIAGRAM** (HR diagram).

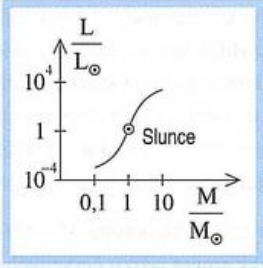
V HR diagramu leží největší počet pozorovaných hvězd v pásu, kterému se říká **HLAVNÍ POSLOUPNOST**. Kromě toho existují **ČERVENÍ OBŘI** (červené hvězdy s nízkou teplotou a velkým poloměrem) a **NADOBŘI** (hvězdy s velkým zářivým výkonem a obrovským poloměrem). Dále lze pozorovat **BÍLÉ TRPASLÍKY** (velmi malé hvězdy s vysokou teplotou). Hvězdy lze pozorovat i mimo popsané pásy a místa, ale pouze v malém množství. Souvisí to s vývojem hvězd, během něhož hvězda mění svou teplotu i zářivý výkon a posouvá se po HR diagramu, přičemž nejdelší dobu stráví na hlavní posloupnosti.

Vznik hvězd a jejich vývoj na hlavní posloupnosti

Vlivem gravitačních sil se začne smršťovat obrovský oblak obsahující vodík, malé množství helia a dalších prvků. Při smršťování se oblak silně zahřívá (vznik Slunce, str. 213) a vzniká **PROTOHVĚZDA**, která silně září. V HR diagramu se nachází nad hlavní posloupností. Její teplota stoupá, až dosáhne hodnoty přibližně 10^7 K, kdy se „zapálí" termojaderná reakce (jaderná syntéza vodíku na helium, str. 194, 210) a vznikne hvězda. Tato hvězda se nachází na **HLAVNÍ POSLOUPNOSTI**, kde setrvá několik milionů až desítky miliard roků v závislosti na její hmotnosti.

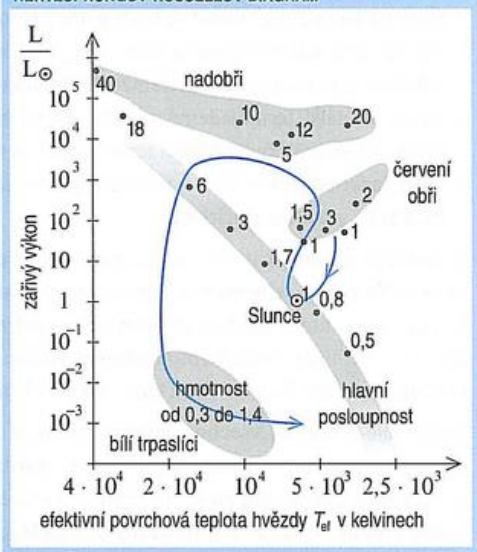
Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti

ČERVENÍ OBŘI vznikají z hvězd o hmotnosti $M < 5M_\odot$. V jejich centru se postupně vytvoří heliové jádro a jaderná syntéza vodíku probíhá pouze ve vrstvě nad tímto jádrem. Hvězda značně zvětší svůj objem, její povrchová vrstva má nizkou teplotu a svítí červeně. Proto se nazývá **ČERVENÝ OBR**. Současně se heliové jádro vlastní gravitací začne smršťovat, jeho teplota na úkor gravitační potenciální energie vzroste a zažehne se reakce: ${}^4_2\mathrm{He} + {}^4_2\mathrm{He} \rightarrow {}^8_4\mathrm{Be}$, ${}^4_2\mathrm{He} + {}^8_4\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_6\mathrm{C} + 2\gamma$.



Závislost **ZÁŘIVÉHO VÝKONU** hvězd L na jejich hmotnosti M. Čím má hvězda větší hmotnost, tím má také vyšší teplotu. $L_\odot$, $M_\odot$ – zářivý výkon a hmotnost Slunce.

HERTZSPRUNGŮV-RUSSELLŮV DIAGRAM



Čísla udávají hmotnost hvězd v násobcích **HMOTNOSTI SLUNCE** $M_\odot$. Modrá linie naznačuje vznik a postupný vývoj Slunce.

Má-li **PROTOHVĚZDA** hmotnost $M < 0{,}085\ M_\odot$, její teplota nedosáhne hodnoty potřebné k zapálení termojaderné reakce. Tomuto útvaru se říká **HNĚDÝ TRPASLÍK**. Vyzařuje v infračervené oblasti, postupně chladne, až se nakonec změní v černého trpaslíka.

Hvězdy na hlavní posloupnosti

Hvězda o **HMOTNOSTI SLUNCE** $M_\odot$ setrvá na **HLAVNÍ POSLOUPNOSTI** přibližně 10 miliard roků.

Hvězda o hmotnosti $M = 0{,}5M_\odot$ má zářivý výkon $L = 0{,}1L_\odot$, tedy polovinu svého „paliva" spotřebovává 10krát pomaleji. Na **HLAVNÍ POSLOUPNOSTI** setrvá 5krát déle, tedy 50 miliard roků.

Naopak hvězda o hmotnosti $M = 10M_\odot$, která má zářivý výkon $L = 10^4 L_\odot$, setrvá na **HLAVNÍ POSLOUPNOSTI** pouze 10 milionů roků, protože desetinásobek svého „paliva" spotřebovává 10 000krát rychleji.

Po vytvoření uhlíkového jádra se může zapálit další reakce, při níž se uhlík mění na kyslík a hořčík, závisí to ovšem na hmotnosti hvězdy. Slunce kupř. skončí u syntézy uhlíku a pak se začne měnit v bílého trpaslíka. Při zvětšování objemu bývají vnější vrstvy často vyvrženy do prostoru a vytvářejí útvary, které astronomie zná jako PLANETÁRNÍ MLHOVINY.

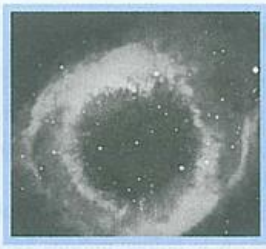
NADOBŘI vznikají z hvězd o hmotnosti $M > 5M_\odot$ a probíhá u nich podobný **cyklický proces** jako u červených obrů:

- termojaderná syntéza lehčích atomových jader vytváří těžší jádra až do té doby, dokud se lehčí jádra nespotřebují;
- pak se termojaderná syntéza zastavuje, jádro hvězdy se působením gravitace smršťí, přičemž jeho teplota vzroste;
- zapálí se další termojaderná reakce, jejímž palivem jsou jádra vytvořená předcházející termojadernou syntézou;
- termojaderná reakce se po vyhoření paliva zastaví, jádro hvězdy se gravitací smršťí atd.

U nadobrů o hmotnosti $M > 8M_\odot$ tento cyklus postupuje až do té doby, dokud se nevytvoří jádro hvězdy obsahující železo. Protože slučováním atomových jader železa nelze získat energii (str. 193), další termonukleární reakce se nezapálí. U nadobrů s nižší hmotností se tento cyklus ukončí dříve.

Spotřebuje-li hvězda všechno jaderné palivo a další termonukleární reakcie se nezapálí, nastane gravitační kolaps, tj. hvězda se působením gravitace zhroutí do sebe:

1. Je-li v tomto stavu hmotnost hvězdy $M < 1{,}4M_\odot$, v jejím nitru se vytvoří degenerovaný plyn – látka, ve které jsou atomy natlačeny těsně na sebe. Vytvoří se BÍLÝ TRPASLÍK, hvězda s vysokou teplotou a velikostí srovnatelnou s velikostí Země.
2. Ve hvězdách s větší hmotností vznikne extrémně stlačené neutronové jádro. Z jádra se k povrchu hvězdy začne šířit rázová vlna a nastane exploze, která vymrští vnější vrstvy hvězdy do prostoru. Tento jev astronomové nazývají SUPERNOVA typu II. Po výbuchu této supernovy zůstává obvykle jádro o obrovské hustotě tvořené pouze neutrony a nastávají dvě možnosti:
   - Je-li hmotnost jádra $M < 2M_\odot$, jeho kolaps se zastaví a existuje dál jako NEUTRONOVÁ HVĚZDA, jež je vytvořena z neutronů, má poloměr kolem 10 km, nesmírně velikou hustotu, rychle rotuje a vysílá rádiové vlny, které astronomové registrují jako pulzy s periodou do několika sekund. Proto se tato hvězda nazývá také PULZAR.
   - Je-li po výbuchu SUPERNOVY II hmotnost jádra $M > 2M_\odot$, jeho kolaps se nezastaví a vznikne ČERNÁ DÍRA, jejíž gravitační pole je natolik silné, že pohltí všechno, co do ní spadne, a nemůže z ní uniknout ani světlo. Proto ji nemůžeme vidět a víme o ní pouze díky její silné gravitaci.



PLANETÁRNÍ MLHOVINA Helix v souhvězdí Aquarius

V jejím centru je vidět hvězdu, z které mlhovina vznikla.

Velikost a zářivý výkon **NADOBRŮ** jsou mnohem větší než u červených obrů.

Hustota bílých trpaslíků je řádově milionkrát větší než hustota Slunce. **BÍLÍ TRPASLÍCI** nemají zdroj energie, proto chladnou a stanou se **ČERNÝMI TRPASLÍKY**. Výjimkou jsou **DVOJHVĚZDY** vytvořené bílým trpaslíkem a obrem, kde dochází k přenosu látky z obra na trpaslíka, kterého hmotnost se pak postupně zvyšuje. Po překročení hranice 1,4 $M_\odot$ se trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy, uvolní se obrovské množství energie a nastane exploze, kterou pozorujeme jako SUPERNOVU typu Ia.

Vnější vrstvy hvězdy vymrštěné do mezihvězdného prostoru při explozi **SUPERNOVY** se dále rozpínají. Krabí mlhovina v souhvězdí Býka vznikla výbuchem supernovy v r. 1054. V jejím středu se nachází nejmladší známý pulzar.

Zářivý výkon supernovy je přibližně stejně velký jako zářivý výkon všech hvězd galaxie dohromady.

Prvky těžší než vodík až po prvky s hmotnostním číslem 56 (železo) se vytvářejí termojadernými reakcemi uvnitř červených obrů, resp. nadobrů. Při výbuchu **SUPERNOVY** se tvoří také prvky o hmotnostním čísle vyšším než 56, a to spojováním lehčích jader navzájem i s neutrony. Všechny tyto prvky jsou pak při výbuchu supernovy vyvrženy do mezihvězdného prostoru.

NEUTRONOVÁ HVĚZDA má hustotu řádově stomiliónkrát větší než bílý trpaslík (přibližně $4 \cdot 10^{17}\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$).

ČERNÉ DÍRY byly zjištěny pozorováním některých dvojhvězd tvořených nadobrem a „neviditelnou" hvězdou, jejíž hmotnost překračuje hodnotu $2M_\odot$. Nejedná se tedy o neutronovou hvězdu ani bílého nebo černého trpaslíka.

Měření vzdálenosti hvězd

Roční PARALAXA hvězdy je úhel α, pod kterým by z dané hvězdy byla vidět úsečka o délce 1 AU kolmá ke směru pohledu. Mezi vzdáleností d hvězdy od Země vyjádřenou v parsecích a paralaxou vyjádřenou v úhlových vteřinách″ platí vztah: $d = \frac{1}{\alpha}$.

1 PARSEK (pc) je vzdálenost, které odpovídá paralaxa 1″.

CEFEIDY jsou proměnné hvězdy, jejichž zářivý výkon, tedy i jasnost se periodicky mění. Perioda změn jasnosti je tím větší, čím je vyšší zářivý výkon hvězdy. Ze změřené periody lze vypočítat zářivý výkon L, z něj magnitudu M_{bol} a po změření magnitudy m lze určit vzdálenost hvězdy d (str. 214). Pomocí cefeid lze určit vzdálenost do několika Mpc, tj. hvězd naší skupiny i blízkých skupin galaxií. Pro měření ještě větších vzdáleností se používají SUPERNOVY typu Ia, jejichž zářivý výkon L lze vypočítat teoreticky a je prakticky vždy stejný.

Galaxie a hvězdokupy

GALAXIE je seskupení desítek milionů až miliard hvězd, mezihvězdného plynu a prachu obíhajících okolo galaktického jádra. Galaxie podle tvaru dělíme na několik typů, např.:

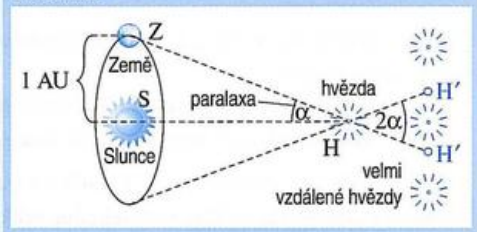
- ELIPTICKÁ GALAXIE má tvar elipsy bez vnitřní struktury;
- SPIRÁLNÍ GALAXIE se spirálně zatočenými rameny.

HVĚZDOKUPA je seskupení stovek až statisíců hvězd stejného stáří. Podle tvaru dělíme hvězdokupy na několik typů, např.:

- KULOVÁ HVĚZDOKUPA má 10^3 až 10^5 starých hvězd tvořících kulové seskupení o průměru 20 až 100 pc. Hvězdy kulových hvězdokup vznikaly z jednoho oblaku původní látky vesmíru vytvořené v počátcích éry látky (str. 219).
- OTEVŘENÁ HVĚZDOKUPA je seskupení řádově stovek mladých hvězd. Otevřenou hvězdokupou jsou kupř. Plejády v souhvězdí Býka.

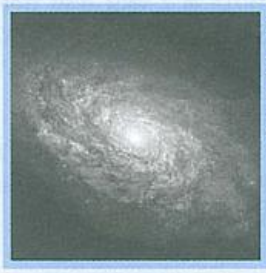
NAŠE GALAXIE má tvar plochého disku s několika SPIRÁLNÍMI RAMENY, v nichž je zvýšená hustota hvězd, mezihvězdného plynu a prachu. V jednom ze spirálních ramen se nachází i Slunce. Na obloze vidíme spirální ramena jako Mléčnou dráhu. Ve středu Galaxie je GALAKTICKÉ JÁDRO se zvýšenou hustotou hvězd, v jehož středu je černá díra o hmotnosti $3{,}7 \cdot 10^6 M_\odot$ (hmotnosti Slunce). Ke Galaxii patří i kulové hvězdokupy, které neleží v galaktickém disku a jsou rozloženy v kouli, jíž se říká GALAKTICKÉ HALO. Hmotnost Galaxie je přibližně $4 \cdot 10^{41}$ kg.

PARALAXA



Pozorujeme-li blízkou hvězdu H z protilehlých bodů dráhy Země (např. 1. ledna a 1. července), její obraz H′ se vzhledem k vzdáleným hvězdám posune o úhel 2α.
1 AU – ASTRONOMICKÁ JEDNOTKA – je s přesností 0,00001% rovná velké poloose eliptické trajektorie Země (str. 42). 1 pc = $3{,}085\,678 \cdot 10^{16}$ m.

Atmosféra Země znemožňuje měřit paralaxy $\alpha < 0{,}01''$. Satelit Hipparchos dokázal změřit paralaxy dalších hvězd s přesností 0,001″. Měření vzdálenosti hvězd pomocí paralaxy je tedy možné pouze do 1 000 pc, což je blízké okolí Země; nedá se tak měřit vzdálenost galaxií.

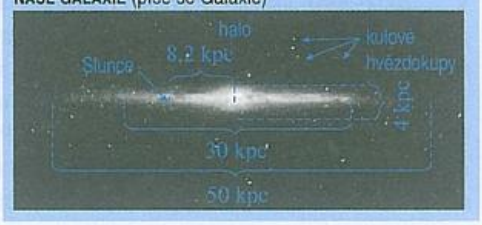


SPIRÁLNÍ GALAXIE o průměru 30 kpc. Podobný tvar má i naše Galaxie.

KULOVÁ HVĚZDOKUPA M13 v souhvězdí Herkula je dobře viditelná i malým dalekohledem.

Velikost typické galaxie se pohybuje okolo 30 kpc.

NAŠE GALAXIE (píše se Galaxie)



Vesmír

Vesmír je tvořen GALAXIEMI, které se seskupují ve větší gravitačně vázané objekty:

- SKUPINY o velikosti 1 Mpc obsahující desítky galaxií,
- KUPY o velikosti okolo 5 Mpc obsahující tisíce galaxií.

Kromě galaxií zná astronomie od r. 1960 i KVAZARY, velmi vzdálené kvazistelární objekty s mimořádně velikým zářivým výkonem (okolo 10^{41} W, což je výkon tisíce galaxií). Předpokládá se, že ve svém středu mají gigantickou černou díru o hmotnosti miliard $M_\odot$ (hmotnosti Slunce). Některé z nich jsou jádry galaxií, jiné mají kolem sebe oblaky vodíku apod.

Podle Newtonových zákonů by měla oběžná rychlost objektů vzdálených od jádra galaxie klesat s jejich rostoucí vzdáleností od jádra podobně jako u planet naší sluneční soustavy, (str. 42). Měření oběžné rychlosti hvězdokup v galaxiích pomocí DOPPLEROVA JEVU ukázalo, že s rostoucí vzdáleností od centra se téměř nemění. Vysvětluje se to tím, že v galaxiích existuje kromě hvězd ještě SKRYTÁ neboli TEMNÁ HMOTA, kterou nevidíme a která značně zvyšuje jejich celkovou hmotnost. TEMNÁ HMOTA je z větší části tvořena objekty MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects), což mohou být černé díry, bílí, hnědí a černí trpaslíci.

Vesmír se rozpíná

HUBBLŮV ZÁKON $v = H \cdot d$ objevil v roce 1929 E. J. Hubble na základě měření ČERVENÉHO POSUVU; v je rychlost vzdalování se galaxie a d její vzdálenost od pozorovatele,
H je HUBBLOVA KONSTANTA, $H = (71 \pm 4)\ \mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$.
Hubblův zákon říká, že galaxie se vzdalují od nás tím rychleji, čím jsou od nás vzdálenější.
Hubblova konstanta znamená, že dvě galaxie vzdálené 1 megaparsek se vzdalují od sebe rychlostí přibližně $71\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.
Vesmír se tedy rozpíná a před 13 až 14 miliardami roků byly všechny objekty vesmíru těsně u sebe. Rozpínání vesmíru jako důsledek Einsteinovy obecné teorie relativity (str. 43) předpověděl ještě v roce 1922 ve svém kosmologickém modelu A. Friedman. Podle tohoto modelu jako i novějších kosmologických teorií by se měla rychlost rozpínání snižovat v důsledku přitažlivé gravitační síly působící mezi galaxiemi.
V r. 2002–2003 ukázaly měření vzdálenosti a červeného posuvu supernov, které se nacházejí od nás více než 5 miliard světelných roků, že jejich rychlost je menší, než vyplývá z Hubblova zákona. Z toho plyne, že asi před 5 miliardami roků se expanze vesmíru opět začala zrychlovat. Podle současných kosmologických modelů to způsobuje ENERGIE VAKUA, neboli TEMNÁ ENERGIE, která působí jako odpudivá síla a má na expanzi vesmíru opačný účinek nežli gravitace.

KVAZARY patří k nejvzdálenějším objektům, které astronomie zná. Objekt J1148+5251 objevený v roce 2004 má ve svém středu kvazar o hmotnosti přes 3 miliardy $M_\odot$ (hmotností Slunce), který se nachází uprostřed obrovského oblaku vodíku. Od Země je vzdálen asi 13 miliard světelných roků, tj. jeho světlo vstupující do našich teleskopů opustilo kvazar před 13 miliardami roků.

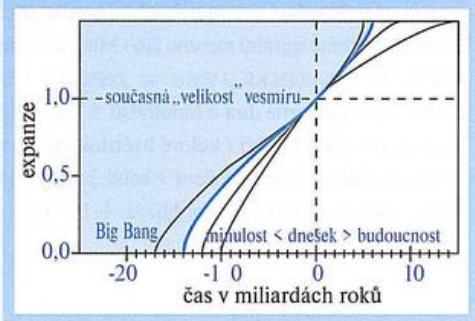
Výsledky měření vesmírné sondy WMAP uveřejněné 11. 2. 2003 umožnily zjistit složení našeho vesmíru:

- Hmota hvězd a jiných svítících objektů tvoří pouze 1 %,
- ostatní TEMNÁ HMOTA (planety, MACHO, mezihvězdný prach a plyn) tvoří pouze 3 %,
- TEMNÁ HMOTA neznámého složení (neutrina, axiony postulované kvantovou chromodynamikou atd.) tvoří 23 %,
- ENERGIE VAKUA (tzv. TEMNÁ ENERGIE) tvoří až 73 %.

Pohybuje-li se hvězda směrem k nám, bude námi pozorovaná frekvence vlnění vyšší než frekvence vlnění, kterou zdroj vyzařuje. Pohybuje-li se zdroj směrem od nás, bude tato frekvence nižší a vlnová délka větší (str. 103). Tento jev nazýváme DOPPLERŮV JEV, resp. DOPPLERŮV POSUV vlnové délky. Ve spektrech vzdálených galaxií a kvazarů nastává Dopplerův posuv absorpčních čar spektra směrem k delším vlnovým délkám – tedy směrem k červené části spektra – proto se nazývá ČERVENÝ POSUV. Z jeho velikosti můžeme určit rychlost pohybu hvězdy a tím i celé galaxie.

Uvedená hodnota HUBBLOVY KONSTANTY byla určena pečlivým proměřením vzdálenosti a rychlosti 31 galaxií pomocí cefeid a supernov typu Ia uskutečněným na HST (Hubble Space Telescope) v roce 1999 a z měření fluktuací reliktního záření sondou WMAP v roce 2003.

Průběh rozpínání vesmíru podle teoretických kosmologických modelů uvažujících existenci ENERGIE VAKUA. Modrá křivka udává průběh potvrzený měřením.



Stáří vesmíru

Zjistíme-li z červeného posuvu, že rychlost kvazaru je v, pak podíl $\frac{d}{v} = t$ určuje přibližně dobu, která uplynula od začátku rozpínání vesmíru (d je vzdálenost kvazaru od nás).

Z Hubblova zákona plyne, že $t = \frac{d}{v} = \frac{1}{H}$, tedy převrácená hodnota HUBBLOVY KONSTANTY udává přibližné stáří vesmíru: Dosadíme-li do vztahu hodnotu $H = (71 \pm 4)\ \mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$, za $\mathrm{Mpc} = 3{,}086 \cdot 10^{19}\,\mathrm{km}$, potom $t = (13{,}8 \pm 0{,}8)$ miliardy roků.

Big Bang – velký třesk a vývoj vesmíru

$t \approx 0 - 10^{-43}\,\mathrm{s}$ VELKÝ TŘESK: Vesmír byl na samém počátku své existence nesmírně malý – menší než elektron, jeho průměr byl asi $10^{-35}\,\mathrm{m}$. Panovaly v něm extrémní podmínky – měl obrovskou teplotu, hustotu a energii.

$t \approx 10^{-43} - 10^{-34}\,\mathrm{s}$ INFLAČNÍ EXPANZE: V tomto období se expanze vesmíru v průběhu doby $(10^{-36} - 10^{-34})$ sekundy prudce zrychlila – jeho rozměry se tehdy zvětšily zhruba 10^{30}krát; teplota klesla na $10^{27}\,\mathrm{K}$.

$t \approx 10^{-34} - 10^{-10}\,\mathrm{s}$ ÉRA ELEKTROSLABÝCH INTERAKCÍ: Vesmír byl horkým plazmatem tvořený převážně kvarky a antikvarky.

$t \approx 10^{-10} - 1\,\mathrm{s}$ ÉRA HADRONŮ A LEPTONŮ: Silná interakce způsobila, že z kvarků se začaly vytvářet hadrony (protony, neutrony, hyperony a jejich antičástice), objevily se elektrony. Částice a antičástice se srážely a docházelo k jejich anihilaci. Zůstaly pouze částice hmoty, antihmota se anihilací s hmotou proměnila v záření. Teplota vesmíru klesla na $6 \cdot 10^9$.

$t \approx 1\,\mathrm{s} - 300\,000$ let ÉRA ZÁŘENÍ: Z protonů a neutronů začala vznikat atomová jádra vodíku, deuteria, helia a lithia, protože jaderná síla – zbytková silná interakce „uvěznila" nukleony v jádrech. Vesmír se zaplnil látkou a rychle se dále rozpínal. Ovšem hustota látky během celé této doby nedovolovala fotonům, aby urazily velkou vzdálenost, protože byly při srážkách s látkou absorbovány. Vesmír byl pro své vlastní záření „neprůhledný". Ke konci období teplota vesmíru poklesla přibližně na $10^3\,\mathrm{K}$.

$t \approx$ od 300 000 let do současnosti ÉRA LÁTKY: Hustota látky se snížila a fotony pak volně procházely vesmírem, který se stal pro záření „průhledným" – elektromagnetické záření se oddělilo od látky. Elektrony se začaly vázat s jádry a vytvářet atomy. Vlivem gravitačních sil se atomy začaly shlukovat a přibližně 200 milionů let po velkém třesku se začaly vytvářet hvězdy, hvězdokupy a galaxie. Největší hvězdy brzo ukončily svůj život jako supernovy a z jejich látky vyvrhnuté do okolního prostoru vznikaly hvězdy druhé generace a jejich planetární systémy (str. 215, 216).

Podle rychlosti spalování vodíku v nejstarších hvězdách kulových hvězdokup odhadujeme jejich věk, tedy i stáří vesmíru přibližně na 11 až 12 miliard roků.

Přesnější údaj pro STÁŘÍ VESMÍRU t vyplývající z kosmologického modelu expanze vesmíru potvrzeného měřením sondy WMAP je $t = (13{,}7 \pm 0{,}2)$ miliardy roků.

WMAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe – kosmická sonda, která uskutečnila podrobné měření reliktního záření a jeho fluktuací v roce 2002.

Fyzikové se snaží popsat stav a vývoj vesmíru v čase $t < 10^{-43}$ pomocí teorie, která by byla sjednocením všeobecné teorie relativity a kvantové teorie; populárně se nazývá Teorie všeho – Theory of everything (TOE). Pro teplotu vyšší než 10^{32} K musely být všechny čtyři základní fyzikální interakce (str. 201) spojené v jednu UNIVERZÁLNÍ INTERAKCI.

V čase 10^{-43}s byla teplota vesmíru asi 10^{32} K a z univerzální interakce se oddělila gravitační síla; slabá, elektromagnetická a silná interakce zůstaly ještě spojené. V čase 10^{-34} sekundy se oddělila silná interakce od tzv. ELEKTROSLABÉ INTERAKCE. Elektromagnetická a slabá interakce se rozdělily v čase 10^{-10}sekundy.

V roce 1979 byla udělena Nobelova cena za teorii, která ukázala, že elektromagnetická síla a slabá interakce jsou projevem jediné ELEKTROSLABÉ INTERAKCE.

Obraz ÉRY ZÁŘENÍ popsal jako první G. Gamov v r. 1948. Teorie předpovídá relativní četnosti nuklidů H, ^{2}He, ^{3}He, ^{4}He, ^{7}Li vytvořených v éře záření. Tyto četnosti jsou v souhlasu se složením látky v nejstarších hvězdách kulových hvězdokup, které vznikly z původní látky vesmíru.

Pozůstatkem (reliktem) po oddělení elektromagnetického záření od látky na konci ÉRY ZÁŘENÍ a počátku ÉRY LÁTKY je tzv. RELIKTNÍ ZÁŘENÍ, které homogenně zaplňuje celý vesmír. Původní teplota záření, která byla na začátku éry látky asi 10^3 K, postupně klesala a v současnosti dosahuje hodnoty 2,725 K. Reliktní záření bylo objeveno v r. 1965. Přichází na Zem téměř rovnoměrně ze všech směrů a je téměř izotropní. Malé odchylky od izotropnosti zjištěné satelitem COBE v r. 1992 souvisejí se skutečností, že vesmír na konci éry záření nebyl úplně homogenní.

Rejstřík

A

aberace zobrazení 166
absorpce fotonu 184
absorpce světla 153
adiabata 74
afelium 41
akce 30
akceptor 119
akomodace 167
aktivita radioaktivního zářiče 195
aktivita sluneční 211
akumulátor 120, 121
akustika 101
alternátor trojfázový 137
ampér 111, 125
ampérmetr 111
amplituda kmitavého pohybu 92
anihilace 175, 198
aniont 120, 185
anomálie vody 61, 86
anténa 144, 145
antibaryon 204
antičástice 202, 204
antiproton 204
apogeum 41
astenosféra 206
asteroid 213
astigmatismus 166
atmosféra 52
atmosféra sluneční 210
atmosféra Země 209
atom 182, 183
atom excitovaný 185
atomismus filozofický 182

B

barva zvuku 101
baryon 202, 204, 205
becquerel 195
bimetal 61
bod hmotný 14
bod kritický 90
bod oka blízký 167
bod oka daleký (vzdálený) 167
bod rosný 91
bod vody trojný 60, 90
bolid 213
bomba atomová, jaderná 195
boson 190, 202, 204
boson intermediální 201, 204

C

centrifuga 33
coulomb 104
cyklotron 199
čáry Fraunhoferovy 150
čáry indukční magnetické 122
čáry spektrální 150
částice 194
částice bodové 205
částice elementární 198
částice elementární základní 199
částice fundamentální 199, 204, 205
částice vázaná 202
částice volná 202
částice zprostředkující 198, 201, 204, 205
čerpadlo tepelné 70
činidlo ionizační 121
činnost sopečná 206
číslo atomové 182, 192
číslo baryonové 200
číslo hmotnostní 192
číslo kvantové 188, 189, 200
číslo kvantové hlavní 184, 188
číslo kvantové magnetické 188, 188
číslo kvantové orbitální (vedlejší) 188
číslo kvantové spinové 189, 200
číslo leptonové 200
číslo neutronové 192
číslo protonové 192
článek elektrochemický 120
článek galvanický 111, 120, 121
článek palivový 196
čočka 163, 165

D

dalekohled 169
dalekozrakost 167
decibel 101
deexcitace 185
defektoskopie 196
deformace pevného tělesa 57, 58, 86, 87
délka vlnová 98, 142
délka vlnová de Broglieova 180
délka vlnová světla 155
délka vrhu 20
den hvězdný 206
den sluneční 206
deprese kapilární 85
deska litosférická, tektonická 206
desublimace 88
detekce radioaktiv. záření 196
detektor dráhový 196
deuterium (deuteron) 194
děj adiabatický 67, 74
děj izobarický 67, 73
děj izochorický 67, 72
děj izotermický 67, 72
děj kruhový (cyklický) 67
děj nevratný 68
děj rovnovážný 65
děj termodynamický 65, 67
děj vratný 68
diagram časový 92, 93, 94, 99, 101
diagram fázorový 132
diagram fázový 90
diagram Hertzsprungův-Russellův 215
diagram kruhového děje 67
diagram pracovní 34, 75
dielektrikum 104, 109
difrakce 100, 158
difuze 76
dilatace času 172
dioda polovodičová 119
dioda světelná 119
dioda Zenerova 119
dioptrie 165
dipól 143, 144
dipól elektrický 109
dipól elektromagnetický 144
dipól magnetický 188
dipól půlvlnný 143
díra černá 216
díra ozonová 209
disociace elektrolytická 120
disperze 155
doba kmitu 92, 142
doba oběžná 40, 42
doba tepelného motoru 70
doba vrhu 20
doba výstupu 19
doba života střední 200
doména magnetická 127
donor 118
dopružování 58
dozimetr 196
dozvuk 102
dráha 14
dráha úhlová 17
dráha volná střední 79
dráhy dovolené 186
družice meteorologická 208
družice navigační 208
družice spojová 208
družice geostacionární 41
družice umělá 208
dvojice sil 45
dynamika 13, 22
dynamika harmonického pohybu 94
dynamika relativistická 174
dynamika tuhého tělesa 49
dynamo 137

E

efekt skleníkový 209
ekliptika 206
ekvivalent elektrochemický 120
elektrárna jaderná 196
elektrodynamika kvantová 198
elektrolyt 120
elektrolýza 120
elektromagnet 125
elektromotor trojfázový asynchronní 138
elektron 104, 124, 182, 185, 188, 194, 204
elektron v potenciálové jámě 187
elektron valenční 191
elektron vázaný 185, 187
elektron volný 185, 187
elektronvolt 177
elektroskop 104
elementární náboj 182, 183
elevace kapilární 85
emise fotonu 184
emise spontánní 191
emise stimulovaná 191
emulze jaderná 196
energie 36, 200
energie aktivační 194
energie elektrická kondenzátoru 110
energie elektromagnetického oscilátoru 140
energie fotonu 179, 151
energie ionizační 185, 121
energie kinetická (pohybová) 35
energie kinetická oscilátoru 96
energie kinetická relativistická 175
energie kinetická tepelného pohybu 80, 82
energie kinetická otáčivého pohybu 49
energie kinetická ideální kapaliny 55
energie klidová 174
energie magnetického pole cívky 130
energie mechanická 35, 36
energie oscilátoru 96
energie potenciální 35
energie potenciální pružnosti 35
energie potenciální tíhová 35
energie potenciální elektrického pole 106
energie potenciální bodového náboje 106
energie potenciální oscilátoru 96
energie potenciální tlaková 55
energie povrchová kapaliny 84
energie relativistická 174
energie temná, vakua 218
energie tepelná 65
energie vazební 77, 185
energie vazební jádra 193
energie vnitřní 65, 66
energie vnitřní ideálního plynu 80, 81, 82
entropie 69
epicentrum 206
éra hadronová 219
éra látky 219
éra leptonová 219
éra záření 219
erupce 211
éter 170
excentricita numerická 41
excitace 185
excitace atomu 185
excitace tepelná 185, 151
expanze 70
expanze inflační 219
expozice 150

F

faktor chladicí 71
farad 109
fáze 88
fáze kmitavého pohybu 93
fáze vlnění 98
fázor 132, 137
fázotron 199
fermion 190, 202
feromagnetismus 127
formy hmoty 175
fotodioda 119
fotoefekt 177, 178
fotočlánek 111
fotometrie 149
foton 177, 178, 179, 201, 204
fotorezistor 118
fotosféra 210
frekvence 18
frekvence kmitavého pohybu 92, 93
frekvence kmitů LC oscilátoru 140
frekvence mezní 177, 178
frekvence rezonanční 135
frekvence střídavého proudu 132
frekvence úhlová vlastní 94
frekvence vlastní oscilátoru 140
frekvence vlastního kmitání 94, 95
frekvence vyšší harmonická 99
frekvence základní stojatého vlnění 99
fronta atmosférická 209
funkce rozdělovací 81
funkce vlnová 181, 187, 188
fúze jaderná 193, 194
fyzika 7
fyzika aplikovaná 8
fyzika atomová 176, 182
fyzika elementárních částic 176, 198
fyzika experimentální 8
fyzika jaderná 176, 192
fyzika kvantová 176, 177
fyzika megasvěta 176
fyzika mikrosvěta 176
fyzika molekulová 59, 76
fyzika pevných látek 176
fyzika praktická 8
fyzika statistická 59
fyzika teoretická 8

G

galaxie 217, 218
galaxie eliptická 217
galaxie spirální 217
generátor střídavého proudu 137
geoid 206

gluon 201, 204
GPS 208
gravitace 38
graviton 201, 204
GUT 219

H

hadron 202, 204, 205
halo galaktické 217
henry 130
hertz 18, 92
hladina 52
hladina energetická 184, 190
hladina intenzity zvuku 101
hladina nulová potenciální energie 35
hladina volná 52
hlasitost zvuku 102
hlava záznamová 127
hluk 101
hmota 13
hmota temná 218
hmotnost 10, 29
hmotnost Země 206
hmotnost atomová poměrná 78
hmotnost atomová relativní 78
hmotnost elektronu 182
hmotnost klidová 174, 200, 204
hmotnost molární 78
hmotnost molekulová poměrná 78
hmotnost molekulová relativní 78
hmotnost neutronu 192
hmotnost protonu 192
hmotnost relativistická 174
hodiny radioaktivní 195, 197
hodnota střídavého napětí efektivní 135
hodnota střídavého proudu efektivní 135
hodnoty dovolené 188
hrana překotná 46
hrana série 184
hustoměr 53
hustota energie magnetického pole 130
hustota energie elektrického pole 110
hustota ozařování spektrální 149
hustota plošná elektrického náboje 108
hustota pravděpodobnosti 187, 181, 189
hustota vyzařování spektrální 149
hustota záření spektrální 149
hustota zářivého toku 148, 149, 214
hvězda 214
hvězda neutronová 216
hvězdokupa 217
hybnost 29, 30, 179
hybnost relativistická 174
hyperon 204
hypocentrum 206
hypotéza atomová 182
hypotéza de Broglieova 180
hypotéza kvantová 151, 177
hystereze elastická 58

CH

charakter částice vlnový 179, 180
charakter vlnění korpuskulární 179
charakteristika fyzikální 200
charakteristika voltampérová 112
charakteristika voltampérová diody 119
charakteristika zatěžovací 113
chladnička 70, 71
chromodynamika kvantová 201
chromosféra 210
chyby mezní 12
chyby měření 11

I

impedance 135, 140
impuls síly 30
index lomu 100, 153
indukce elektromagnetická 128
indukce elektrostatická 108
indukce magnetická 122, 123, 124, 125, 127
indukce vlastní 130
indukčnost 130
induktance 133
infrazvuk 102
intenzita elektrického pole 105, 106
intenzita gravitačního pole 39
intenzita ozařování 148, 149
intenzita vyzařování 148, 149
intenzita záření 149
intenzita zvuku 101
interakce 7, 22, 201
interakce částicová 202
interakce elektromagnetická 22, 143, 201
interakce elektroslabá 219
interakce fyzikální 22, 201
interakce gravitační 201
interakce silná 22, 201
interakce slabá 22, 201
interakce univerzální 219
interference elektromagnetických vln 143
interference světla 156, 157
interference vlnění 98
ionizace 121, 185
ionizátor 121
ionosféra 209
iont 120, 185
izobara 73
izochora 73
izolant 104 , 109
izolované těleso 28
izoterma 72
izotop 192

J

jádro atomu 182, 183, 192
jádro galaxie 217
jádro komety 213
jádro zemské 206
jáma potenciálová 187
jasnost hvězdy 214
jednotka aktivity 195
jednotky fyzikální veličiny 9, 10, 11
jednotka hmotnostní atomová 78, 204
jednotka měřicí 9
jev Comptonův 178
jev diodový 119
jev Dopplerův 103, 218
jev fotoelektrický 177
jev fyzikální 7
jev Hallův 125
jev kapilární 85
jev pohybový 7
jev statický 7, 13
jev termodynamický 7
jistič 113
joule 35
Jupiter 211, 212

K

kalorie 62
kalorimetr 63
kandela 149
kaon 204
kapacita akumulátoru 121
kapacita tepelná 62
kapacita tepelná měrná 62
kapacita tepelná molární 62, 82, 80, 81
kapacita vodiče elektrická 109
kapacitance 134
kapalina 50, 77, 84
kapalnění 89
kationt 120, 185
kelvin 61
kilowatthodina 37
kinematika 13
kinematika relativistická 171
kladka 48
kladkostroj 48
klec Faradayova 108
klid 13
klín 47
kmitání 92
kmitání elektromagnetické 139
kmitání harmonické 93
kmitání mechanické 92
kmitání mechanického oscilátoru 94
kmitání nucené 96
kmitání LC oscilátoru 140
kmitání tlumené 92
kolmice dopadu 100
kolo na hřídeli 48
koma 213
kometa 213
komora bublinová 196
komora mlžná 196
komprese 70
kondenzace 89
kondenzátor 110, 134
konfigurace elektronová 190
konstanta 12
konstanta Avogadrova 74, 78, 82
konstanta Boltzmannova 80, 82
konstanta Faradayova 120
konstanta gravitační 38
konstanta hmotnostní atomová 78
konstanta Hubblova 218, 219
konstanta mřížková 158
konstanta Planckova 177, 181
konstanta plynová 74, 75
konstanta Poissonova 74
konstanta univerzální 12
kontakt tepelný 60
kontinuum 57
kontrakce délky 172
konvekce 206
konvence znaménková 162, 163, 165
koróna 121, 210
krátkozrakost 167
krystalizace 89
kupa galaxií 218
kůra zemská 206
kvarky 204, 205
kvazar 218
kyvadlo 95
křivka balistická 21
křivka deformace 58
křivka rezonanční 96, 135, 141
křivka sublimační 90
křivka syté páry 90
křivka tání 90

L

ladička 101
lampa rentgenová 148
laser 191
látka 13, 175
látka amorfní 77, 86, 88
látka diamagnetická 127
látka feromagnetická 127
látka krystalická 77, 86, 88
látka magneticky měkká 127
látka magneticky tvrdá 127
látka paramagnetická 127
látka pevná 77
látka pracovní tepelného stroje 70
LED 119
lepton 202, 204, 205
litosféra 206
lom rovinné vlnoplochy 154
lom světla 153, 154
lom vlnění 100
lumen 149
luminiscence 147
luminofor 147
lupa 168
lux 149
luxmetr 149
luxsekunda 150

M

mach 103
MACHO 218
magnet 122
magnetizace látky 127
magnetka 122
magnetosféra 208
magnituda 214
makrofyzika 176
makroobjekt 176
makrostav 69
makrosystém 7, 59, 69
Mars 211, 212
materiál štěpný 193, 196
materiál elastický 57
materiál křehký 57
materiál plastický 57
materiál pružný 57
maximum interferenční 99, 156
mechanika 13
mechanika kapalin 50
mechanika kontinua 57
mechanika kvantová 181
mechanika plynů 50
mechanika pružných těles 57
Merkur 211, 212
meteor 213
meteorit 213
meteoroid 213
metoda termodynamická 59
metody měřicí 11
mez pevnosti 57, 87
mez pružnosti 57, 87
mezní úhel 154
mezon 198, 202, 204, 205
mezosféra 209
Měsíc 208
měření 11
měření indukce magnetické 126
měření teploty 60
měření vzdálenosti planet 212
mikročástice 180
mikroobjekt 176
mikroskop 168
mikroskop elektronový 180
mikroskop iontový 180
mikrosvět 176
mikrovlny 146, 147
minimum interferenční 99, 156
mion 204
mlhovina planetární 216
množství látkové 74, 78
model atomu 182
model atomu Bohrův 184, 186
model atomu kvantově-mechanický 187
model atomu Rutherfordův 183
model atomu Thomsonův 182
model ideálního plynu 79
model izolovaného tělesa 28

model kvarkový 205
moderátor 193, 196
modul objemové pružnosti 58, 87
modul pružnosti v tahu 58, 87
modul Youngův 58
modulace amplitudová 145
modulace frekvenční 145
modulace impulzní 145
mohutnost optická 165, 167
mol 74, 78
moment dvojice sil 45
moment hybnosti 33
moment hybnosti orbitální 188
moment hybnosti spinový 189
moment magnetický 188
moment setrvačnosti 49
moment síly 44
monokrystal 86
motor proudový 71
motor raketový 71
motor reaktivní 71
motor tepelný 70, 71
motor zážehový 71
mřížka difrakční 158
mřížka krystalová 86
mřížka optická 158

N

náboj barevný 201
náboj elektrický 104, 200
náboj elektrický indukovaný 108
náboj elektronu měrný 182
nadkupa galaxií 218
nadobr 215
nádoby spojené 52
napětí 57, 87, 106
napětí elektrické 106, 107, 111
napětí elektromotorické 111
napětí elektromotorické indukované 128
napětí fázové 137
napětí Hallovo 125
napětí na vodiči 111
napětí naprázdno 111
napětí normálové 57, 87
napětí povrchové kapaliny 84
napětí sdružené 137
napětí střídavé 132
napětí svorkové 111
napětí v tahu 57, 87
Neptun 211, 212
nerozlišitelnost částic 202
neutrino 194, 198, 204
neutron 192, 198, 204
nevodič 109
newton 22
níže tlaková 209
nukleon 192, 204
nuklid 192

O

obal elektronový 182, 183, 190
objekt fyzikální 7
objekt kvantový (vlnový) 180
objekt makrofyzikální 176
objekt megafyzikální 176
objekt mikrofyzikální 176
objektiv 168
objem molární 78
oblak Oortův 210
obloha 206
obr červený 215
obraz předmětu 160, 162
obraz světa fyzikální 7
obraz světa mechanický 22, 170
obraz zmenšený 162
obraz zvětšený 162
obsazování energetických hladin 191
obtékání těles 56
obvod elektrický 111, 113, 114
obvod LC 139, 141
obvod oscilační 139, 141
obvod rezonanční 141
obvod sériový LCD 134
odchylka průměrná 12
odchylka směrodatná 12
odpor elektrický 112
odpor elektrický měrný 112
odpor prostředí 23
odpor tepelný 64
odpor valivý 23, 26
odraz elektromagnetických vln 143
odraz rovinné vlnoplochy 153
odraz světla 153
odraz úplný 154
odraz vlnění 100
odraz zvuku 102
odsluní 41
ohm 112, 133
ohnisko kulového zrcadla 161
ohnisko spojky 164
ohon komety 213
ohyb elektromagnet. vln 143
ohyb světla 158
ohyb vlnění 100
oko 167
okruh primární 196
okruh sekundární 196
okulár 168
optická osa 164
optický střed 164
optický interval 168, 169
optika 152
optika geometrická 160
optika kvantová 152
optika paprsková 152, 160
optika vlnová 152
optika zobrazovací 152
orbital 188, 189
orientace smyčky 129
osa optická 161
osa symetrie 189
osa zemská 206
oscilátor elektromagnetický (LC) 139, 141
oscilátor mechanický 92
osvit 150
osvětlení 149, 150
ovzduší 209
ozvěna 102

P

pád volný 19
páka 47
paprsek 100, 153
paprsek mimořádný 159
paprsek paraxiální 161, 164
paprsek světelný 160
paprsek význačný 162, 165
paprsek řádný 159
paprsky katodové 121, 182
pára 90
pára podchlazená 91
pára přehřátá 91
pára sytá 90
paradox hydrodynamický 55
paradox hydrostatický 52
paralaxa 217
parametr 8
parametr mřížkový 86
parsek 217
pás Kuiperův 210
pascal 50
pásmo radiokomunikační 145
pásmo televizní 145
perigeum 41
perihelium 41
perioda 18, 92
perioda kmitů LC oscilátoru 140
perioda mřížky 158
perioda vlastního kmitání 94
perioda vlnění 98, 142
permeabilita 124
permeabilita relativní 124, 125
permeabilita vakua 124
permitivita 105
permitivita relativní 105, 109
permitivita vakua 105
perpetuum mobile druhého druhu 68
perpetuum mobile prvního druhu 66
píšťala 101
pion 204
plášť zemský 206
planetka 213
planety 211
plazma 88, 210
plocha ekvipotenciální 106, 107
plocha optická 160
plování těles 53
Pluto 211, 212
plyn 50, 52, 77, 82
plyn ideální 50, 82
podivnost 200
podmínka kvantovací 186
podslupka 189, 190
podtlak 55
počítač částic 196
počítač Geiger-Müllerův 196
pohyb 13
pohyb Brownův 76
pohyb kmitavý 92
pohyb křivočarý 14
pohyb mechanický 13
pohyb nerovnoměrný 14
pohyb otáčivý 14,17, 44
pohyb po kružnici 17
pohyb posuvný 14, 44
pohyb přímočarý 14
pohyb přímočarý rovnoměrně zpomalený 17
pohyb přímočarý rovnoměrně zrychlený 15
pohyb přímočarý rovnoměrný 15
pohyb rotační 44
pohyb rovnoměrný 14
pohyb tepelný 76
pohyb translační 44
pojistka 113
pokus Franckův-Hertzův 185
pokus Torricelliho 52
pól jižní magnetu 122
pól severní magnetu 122
polarimetr 159
polarizace atomová 109
polarizace dielektrika 109
polarizace elektromagnetické vlny 143
polarizace orientační 109
polarizace světla 159
pole 13, 175
pole elektrické 104, 105, 106, 142
pole elektrické centrální 105
pole elektrické homogenní 106
pole elektrické radiální 105
pole elektromagnetické 22, 139, 142
pole gravitační 22, 38
pole gravitační centrální 39
pole gravitační homogenní 39
pole gravitační Slunce 39
pole gravitační Země 38
pole magnetické 122, 142
pole magnetické cívky 124
pole magnetické nestacionární 128
pole magnetické přímého vodiče 124
pole magnetické stacionární 122
pole magnetické Země 207
pole tíhové 27, 40
poločas přeměny 195
poločas rozpadu 195
poloha tělesa rovnovážná 46
poloměr atomu Bohrův 185, 188
poloměr Země rovníkový 206
poloměr zrcadla 161
poloměry křivosti čočky 164
polovodič 118, 119
póly světové 206
poměr transformační 138
posloupnost hlavní 215
postup teoretický 8
posun fázový 135
posuv Dopplerův 218
posuv červený 218
potenciál elektrický 106, 107
potenciál elektrický homogenního pole 107
potenciál elektrický radiálního pole 106
potenciometr 114
pozitron 194, 198
pozorování 8
práce 34, 66
práce elektrické síly 106, 107
práce elektrického proudu 115
práce kladná 34, 35, 66
práce mechanická 34
práce vykonaná plynem 75, 82
práce výstupní 178
práce záporná 34, 35, 66
práh bolesti 102
práh slyšení 102
pravděpodobnost výskytu částice 181
pravděpodobnost výskytu elektronu 187
pravidlo Ampérovo pravé ruky 124
pravidlo Flemingovo levé ruky 123
pravidlo mechaniky zlaté 48
pravidlo pravé ruky 18, 33, 44, 129
pravidlo pravotočivého šroubu 18, 129
princip fyzikální 8
princip Huygensův 100
princip minimální energie 191
princip nerozlišitelnosti částic 190, 202
princip neurčitosti Heisenbergův 181
princip nezávislosti pohybů 19
princip nezávislosti světelných paprsků 160
princip Pauliho vylučovací 190, 202
princip relativity 171
princip relativity Galileův 28
princip stálé rychlosti světla 171
princip superpozice 94, 98
prodloužení relativní 58
prostor absolutní 28
prostor obrazový 164
prostor paraxiální 161, 164
prostor předmětový 164
prostředí optické 153
prostředí spojité 57
protohvězda 213, 215
proton 104, 124, 192, 204
protonové číslo 182
protuberance 211
proud elektrický 111
proud elektrický v kapalinách 120
proud elektrický v plynech 121

proud elektrický v polovodičích 118
proud indukovaný 128
proud konvekční 206
proud střídavý 129, 132
proudění kapalin 54, 55, 56
proudnice 54
průměr aritmetický 12
průtok objemový 54
průvodič 17
průvodič planety 41
prvek chemický 192
pulzar 216
putování kontinentů 206
předmět 160
přeměna jaderná 194
přenos elektrického signálu 144
přenos energie elektromagnetickým vlněním 148
přenos tepla 64
přesnost měření 12
přetížení 32
přijímač 144, 145
příkon 37
příkon spotřebiče 115
přísluní 41

R

radar 146, 147
radián 17
radioaktivita 194
radiokomunikace 145
radiolokátor 147
radionuklid 194
radiovlny 144
rameno dvojice sil 45
rameno valivého odporu 26
rázy 94, 102
reakce 30
reakce částicová 202, 203
reakce jaderná 193
reakce jaderná řetězová 193,195, 196
reakce termojaderná 194, 210
reaktance induktivní 133
reaktance kapacitní 134
reaktor jaderný 196
reflektor 169
refraktometr 154
refraktor 169
rekombinace 118
relativita 171
relativnost současnosti 171
relé elektromagnetické 127
reostat 114
rezistance 112, 132
rezistivita 112
rezistor 112
rezonance 96, 102, 135, 141
rok světelný 173
rotace vázaná 208
rovina dopadu 100, 153
rovina kmitů 143, 159
rovina nakloněná 47
rovnice Bernoulliho 55
rovnice fotoefektu 178
rovnice harmonického pohybu 93
rovnice kalorimetrická 63
rovnice kinetické teorie plynů 79, 82
rovnice kontinuity 54
rovnice Maxwellovy 142
rovnice pohybová 29
rovnice pohybová harmonického pohybu 94
rovnice postupné vlny 98
rovnice Schrödingerova 181, 187
rovnice složené vlny 98
rovnice stavová ideálního plynu 74, 75, 82
rovnice stavová reálného plynu 75
rovnice zobrazovací tenké čočky 166
rovnice zobrazovací kulového zrcadla 163
rovnováha tepelná 60
rozdělení Maxwellovo 81, 82
rozklad síly 25
rozklad světla hranolem 155
rozlišení 169
rozměr fyzikální veličiny 9
rozměry částic v mikrosvětě 205
rozpad 202
rozpad alfa 194
rozpad beta 194
rozpad gama 194
rozpad jaderný 194
rozpínavost plynů teplotní 73
rozptyl světla 153
rozptylka 163
roztažnost teplotní 61, 73, 86
rychlost šíření vlnění 98
rychlost šíření zvuku 102
rychlost elektromagnetické vlny 143, 170
rychlost fázová 98
rychlost harmonického kmit. pohybu 93
rychlost kruhová 40, 42, 208
rychlost nadzvuková 103
rychlost okamžitá 14, 18
rychlost parabolická 41
rychlost průměrná 14
rychlost střední kvadratická 79, 80, 82
rychlost úhlová 18
rychlost úniková 41, 42, 43
rychlost výtoková 55
rychlosti kosmické 41, 42

S

Saturn 211, 212
schodek hmotnostní 192
schopnost rozlišovací 180
série Balmerova 184
série spektrální 184
setrvačník 49
setrvačnost 28
sféra vzájemného působení 84
SHF 146, 147
síť elektrická 114
siemens 112
signál 144
síla 13, 22
síla Ampérova 123
síla barevná 201, 205
síla deformační 57
síla dostředivá 23, 27, 29
síla elektrická 22, 104, 105
síla gravitační 22, 38, 39
síla jaderná 22, 192, 201
síla Lorentzova 124
síla magnetická 22, 122, 123, 124, 125
síla Newtonova 56
síla odporová 22, 23, 26, 56
síla odporová aerodynamická 56
síla odporová hydrodynamická 56
síla odstředivá 33
síla povrchová 84
síla pružnosti 57
síla setrvačná 31, 32
síla slapová 208
síla Stokesova 56
síla tahová 23
síla tíhová 27, 40
síla tlaková 22, 23, 50
síla tlaková atmosférická 52
síla tlaková hydrostatická 52
síla třecí 22, 23, 26
síla vztlaková 23, 53
siločára 38
siločára elektrického pole 106
síly kohezní 76
síly mezimolekulové 76
skla Newtonova 157
skládání kmitavých pohybů 94
skládání pohybů a rychlostí 19
skládání rychlostí relativistické 170, 173
skládání sil 23, 24, 25
skluz 138
skupenství 63, 88
skupenství kapalné 88
skupenství pevné 88
skupenství plynné 88
skupina galaxií 218
skvrna sluneční 210, 211
slapy 208
Slunce 210
slupka 189, 190, 191
směr propustný 119
směr svislý 40
směr závěrný 119
smyčka uzavřená sítě elektrické 114, 115
solenoid 124
součinitel odporu těles 56
součinitel rozpínavosti teplotní 73
součinitel smykového tření 26
součinitel tepelné vodivosti 64
součinitel teplotní délkové roztažnosti 61, 86
součinitel teplotní elektrického odporu 112
součinitel teplotní objemové roztažnosti 61, 73, 86
soustava adiabaticky izolovaná 83
soustava optická 160, 167
soustava přenosová 144
soustava radiokomunikační 145
soustava sluneční 210
soustava termodynamická 59, 60, 62, 65, 83
soustava těles 30, 36
soustava trojfázová střídavého napětí 137
soustava vztažná 14
soustava vztažná inerciální 28
soustava vztažná neinerciální 31, 32, 33
spektrograf 155
spektrometr 155
spektroskop 155
spektroskop mřížkový 158
spektrum absorpční 150
spektrum čárové 150, 184
spektrum elektromagnetického záření 146
spektrum emisní 150, 184
spektrum pásové 150
spektrum spojité 150
spin 189, 200
spirální rameno 217
spojení nakrátko 113
spojení elektrických zdrojů 114
spojka 163
spotřebič elektrický 111
srážka pružná 30
spektrum záření hvězdy 214
stabilita tělesa 46
statika 13
statika tuhého tělesa 45
stav beztíže 32
stav elektronu stacionární 187
stav excitovaný 185
stav fyzikálního objektu 7, 181
stav ideálního plynu 72
stav kvantový stacionární 189
stav metastabilní 191
stav mikročástice 181
stav pohybový 13, 15, 30, 174
stav termodynamické rovnováhy 65
stav termodynamické soustavy 65
stav vázaný 185
stav základní 185
stavba atomu 182
stavba elektronového obalu 190
stavba hmoty 205
stáří vesmíru 219
stratosféra 209
stroj Carnotův 70
stroj jednoduchý 47
stroj parní 71
stroj tepelný 67, 70
stroj tepelný cyklický (kruhový) 68, 70
struna 101
stupeň Celsia 61
stupeň Fahrenheita 61
střed křivosti zrcadla 161
střed sil 24
středy křivosti čočky 164
sublimace 88
supernova 216, 217
supravodivost 114
svítivost 149
světlo 146, 147, 152, 159
synchrotron 199
syntéza jaderná 193, 194
systém elementárních částic 204, 205
systém globální poziční 208
systém termodynamický 60
šíření rádiových vln 145
šroub 47
štěpení jaderné 193

T

takt tepelného motoru 70
tání 88
tauon 204
tekutina 50
tekutost 50
teorie 8
teorie látek kinetická 59
teorie plynů kinetická 59, 76, 79
teorie relativity speciální 170
teorie záření kvantová 152
teplo 62, 63, 66
teplo Joulovo 115
teplo kladné 62, 66
teplo skupenské 63
teplo skupenské kapalnění 63, 89
teplo skupenské kondenzace 63, 89
teplo skupenské měrné 63, 88, 89
teplo skupenské molární 63
teplo skupenské sublimace 89
teplo skupenské tání 63, 88
teplo skupenské tuhnutí 63, 89
teplo skupenské varu 90
teplo skupenské vypařování 63, 89
teplo záporné 62, 66
teploměr 60, 61
teplota 60
teplota Celsiova 60
teplota Curieova 127
teplota Fahrenheitova 61
teplota hvězdy 214
teplota rosného bodu 91
teplota tání 88

teplota termodynamická 60, 65
teplota varu 90
termika 59, 60
termistor 118
termodynamika 59
termočlánek 111
termoemise 182
termosféra 209
tesla 123
těžiště 27, 45
těžnice 45
tíha 27
těleso černé 151
těleso elektricky nabité 104
těleso pevné 57, 87
těleso tuhé 44, 87
tlak atmosférický 52
tlak hydrostatický 52
tlak kapilární 85, 86
tlak v tekutině 50, 51, 52
TNO 213
TOE 218
tok magnetický indukční 128
tok světelný 149
tok tepelný 64
tok zářivý 148
tón 101
trajektorie 14
trajektorie eliptická 41
trajektorie parabolická 41
transformátor 138
troposféra 209
trpaslík černý 216
trpaslík bílý 215, 216
tuhnutí 88, 89
tuhost pružiny 35
turbína parní 71
turbína plynová 71
tyč regulační 196
třída přesnosti 12

U

úbytek hmotnostní 192
úbytek napětí 112
účinek síly otáčivý 44
účinky směrové 144
účinnost 37
účinnost Carnotova stroje 70
účinnost chladničky 71
účinnost elektrického zdroje 115
účinnost spotřebiče 115
účinnost tepelného stroje 67
účinnost transformátoru 138
události nesoumístné 171
události soumístné 171
úhel Brewsterův 159
úhel dopadu 100
úhel elevační 20
úhel lomu 100
úhel zorný 167
UHF 146, 147
ultrazvuk 102
Uran 211, 212
uran 193
uran obohacený 195
urychlovač mikročástic 199
urychlovač mikročástic kruhový 199
urychlovač mikročástic lineární 199
uzel sítě elektrické 114

V

vada barevná 166
vada otvorová 166
vada zobrazení 166
var 90
vazba indukční 141
vazba kapacitní 141
vedení tepla 64
vektor polohový 14
veličina dějová 62, 66
veličina fotometrická 149
veličina fyzikální 8, 9
veličina fyzikální hodnota 9
veličina fyzikální jednotka měřicí 9
veličina fyzikální bezrozměrová 9
veličina skalární 9
veličina stavová 62, 66
veličina vektorová 9
velikost atomu 183
velikost hvězdná 214
Venuše 211, 212
vesmír 218
VHF 146, 147
viskozita dynamická 56
věta momentová 44
věta Steinerova 49
větev sítě elektrické 114
vítr sluneční 210
VKV 145, 146, 147
vlákno optické 154
vlastnosti světla vlnové 152
vlhkost vzduchu 91
vlna elektromagnetická 142
vlna elektromagnetická stojatá 144
vlnění elektromagnetické 139, 142
vlnění harmonické postupné 98
vlnění mechanické 97
vlnění stojaté 99, 100
vlnění zvukové 101
vlnoplocha 100, 153
vlny de Broglieovy 180
vlny dlouhé 145
vlny krátké 145
vlny polarizované 144
vlny rádiové 144, 147
vlny seizmické 206
vlny střední 145
vlny ultrakrátké 147
vlny velmi krátké 147
vodič elektrický 104
vodič fázový 137
vodič nulovací 137
vodič v elektrickém poli 108
vodivost elektrická 112
vodivost polovodiče 118, 119
volt 107
voltmetr 111
vrchol zrcadla 161
vrh šikmý vzhůru 20
vrh svislý vzhůru 19
vrh vodorovný 20
vrstva hradlová 119
vrstva ozonová 209
vrstva povrchová 84
vrstva valenční 191
výše tlaková 209
výška obrazu 162
výška předmětu 162
výška tónu 101
výška výstupu 19, 21
výška zvuku 101
výšku obrazu 165
výšku předmětu 165
výboj doutnavý 121
výboj elektrický 121
výboj jiskrový 121
výboj obloukový 121
výchylka 92
výchylka okamžitá 92
výkon 37
výkon elektrického proudu 115, 116
výkon spotřebiče 115
výkon střídavého proudu 132, 135, 136
výkon zářivý 148
výkon zářivý hvězdy 214, 215
výkon zářivý Slunce 210
výměna tepelná 60
vypařování 89
vysílač 144, 145
výslednice sil 23
výstřednost číselná 41
vyzařování černého tělesa 151
vzdálenost konvenční zraková 167
vzdálenost obrazová 162, 164
vzdálenost ohnisková 161, 164
vzorec Torricelliho 55
vztah Balmerův-Rydbergův 184
vztah definiční 10
vztah Einsteinův 173, 174
vztah Mayerův 81
vztahy de Broglieovy 180
watt 37, 133, 148
wattsekunda 37
weber 128

Z

zákon akce a reakce 30
zákon Archimedův 53
zákon Avogadrův 74
zákon Boylův-Mariottův 72
zákon Charlesův 72
zákon Coulombův 105
zákon Faradayův indukční 129, 131
zákon fyzikální 8
zákon Gay-Lussacův 73
zákon gravitační 38
zákon Hookův 58
zákon Hubblův 218
zákon Joulův-Lenzův 115
zákon Lenzův 129
zákon lomu 160
zákon lomu světla 154
zákon lomu vlnění 100
zákon odrazu 153, 160
zákon odrazu vlnění 100
zákon Ohmův 112, 113
zákon Pascalův 51
zákon Planckův 151
zákon Poissonův 74
zákon přímočarého šíření světla 160
zákon radioaktivní přeměny 195
zákon radioaktivního rozpadu 195
zákon rozpadu 200, 202
zákon růstu entropie 69
zákon setrvačnosti 28
zákon síly 29
zákon skládání rychlostí 19
zákon Stefan-Boltzmannův 151
zákon vyzařování Kirchhoffův 151
zákon Wienův posunovací 151
zákon zachování baryonového čísla 202
zákon zachování elek. náboje 104, 193, 202
zákon zachování energie 36, 175
zákon zachování energie mechanické 36
zákon zachování hmotnosti 174
zákon zachování hybnosti 30, 174
zákon zachování leptonového čísla 202
zákon zachování momentu hybnosti 33
zákon zachování podivnosti 203
zákon zachování počtu nukleonů 193
zákon zachování spinu 202
zákon záměnnosti paprsků 154
zákony Faradayovy pro elektrolýzu 120
zákony Keplerovy 41
zákony Kirchhoffovy 115
zákony pohybové Newtonovy 28, 29, 30
zákony termodynamické 60, 66, 68
zapojení do hvězdy 137
zapojení do trojúhelníku 137
zapojení kondenzátorů 110,
zapojení potenciometru 114
zapojení reostatu 114
zapojení rezistorů 112, 113
zatmění Slunce a Měsíce 208
záznam magnetický 127
zázněje 102
záře polární 208
záření částicové 146
záření černého tělesa 151
záření elektromagnetické 146, 150
záření gama 146, 147, 148
záření infračervené 146, 147
záření katodové 121, 182
záření kosmické 198
záření neutronové 194
záření optické 146, 147
záření radioaktivní 194
záření rádiové 146, 147
záření reliktní 219
záření rentgenové 146, 147, 148
záření tepelné 64, 147, 151
záření ultrafialové 146, 147
zářivost 149
zařízení hydraulické 51
zařízení pneumatické 51
zařízení zobrazovací 160
zdroj elektrického napětí 111, 113
zdroj elektrického pole 142
zdroj elektrický 111
zdroj světla 152
zdroj záření 149
zdroje zvuku 101
Země 206, 211, 212
zemětřesení 206
zkrat 113
změna fáze při odrazu 156
změna skupenství 63
zobrazení kulovým zrcadlem 161
zobrazení optické 160
zobrazení optickou soustavou 160
zobrazení rovinným zrcadlem 161
zobrazení tenkou čočkou 163, 164, 166
zóny aktivní 196
zrcadlo 161
zrcadlo kulové (sférické) 161, 162
zrcadlo parabolické 169
zrcadlo rovinné 161
zrychlení 15
zrychlení dostředivé 18
zrychlení gravitační 38, 39
zrychlení kmitavého pohybu 93
zrychlení normálové 15
zrychlení tečné 15
zrychlení tíhové 19, 40
zvětšení lupy úhlové 168
zvětšení mikroskopu úhlové 168
zvětšení příčné 162, 163, 165, 166
zvětšení úhlové 168
zvuk 101

Odmaturuj!

z fyziky

Snadnému porozumění a zapamatování textu napomáhá přehledné a netradiční grafické zpracování publikace:

pojmy a definice

osnova kapitoly

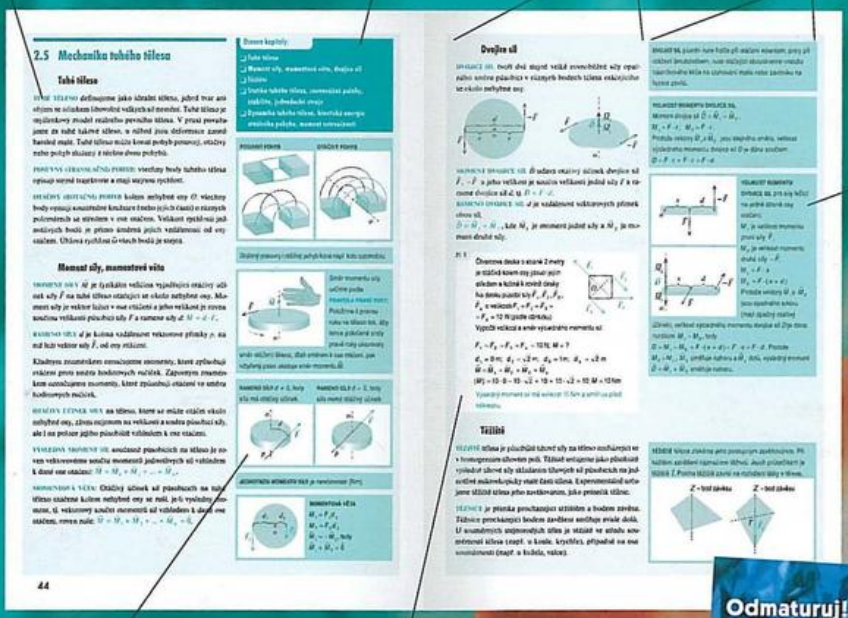
hlavní text

doplňující informace k textu

poznámka, příklad nebo odvození

názorné obrázky

řešené příklady



V edici Odmaturuj vycházejí publikace:

ISBN 80-7358-058-6