gymnázium
jana nerudy

FYZIKA

pro II. ročník Gymnázia Jana Nerudy

Milan Rojko a kol.

Učebnice je určena jen pro vnitřní potřebu Gymnázia Jana Nerudy.

OBSAH

1. Elektrický proud 5

Elektrický proud v plynech 5

Elektrický proud v kapalinách 11

Elektrický proud v kovech a polovodičích 16

Elektrický proud a elektrické napětí 21

Elektrický odpor 27

Zapojování zdrojů 31

Výkon elektrického proudu 32

2. Elektrodynamika 36

Magnety 36

Magnetické pole vodičů s proudem 40

Silové působení magnetického pole na vodiče s proudem 44

Využití elektromagnetů 46

Elektromagnetická indukce 50

Transformátory 55

Generátory elektrického proudu 60

3. Akustika 65

Periodické děje 65

Mechanická vlna 68

Zvukové vlny 70

Ultrazvuk 73

Infrazvuk 73

Průběh zvukových vln 75

Stojaté vlny 77

Měření rychlosti zvuku 79

„Síla“ zvuku 81

4. Optika 84
Světlo jako vlna 84
Vlnová délka světla 85
Rozklad světla mřížkou 86
Světelné paprsky 89
Odraz světla 90
Rovinná zrcadla 91
Kulová zrcadla 94
Lom světla 100
Úplný (totální) odraz 102
Rozklad světla hranolem 103
Čočky 105
Optické přístroje 110
5. Atomistika 118
Modely atomu 118
Kvantování energie atomů a elektromagnetické vlny 120
Jádro atomu 121
Jaderné přeměny 124
Jaderné reakce 127
6. Astronomie 131
Sluneční soustava 131
Souhvězdí 135
Měření času a vzdáleností v astronomii 135
Hvězdy 137
Slunce 139

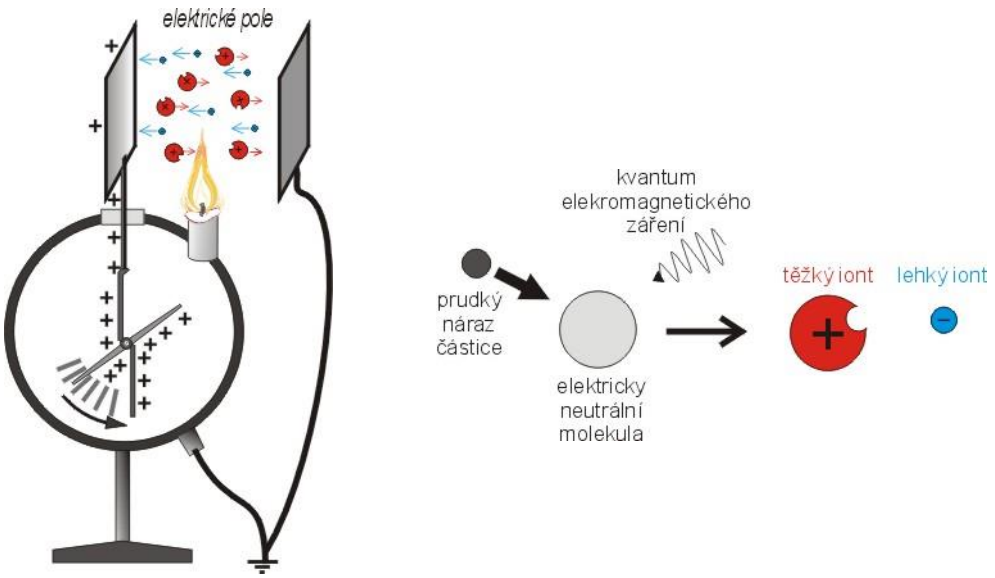
1. ELEKTRICKÝ PROUD

ELEKTRICKÝ PROUD V PLYNECH

NESAMOSTATNÝ VÝBOJ

Plyny jsou tvořeny elektricky neutrálními molekulami. Proto jsou za normálního tlaku a teploty velmi dobrými izolanty a jejich elektrická vodivost je zanedbatelná. Aby v plynu vznikl elektrický proud, musí být splněny stejné podmínky jako u ostatních látek. Plyn musí obsahovat pohyblivé částice s nábojem a musí být v elektrickém poli. Za těchto podmínek plyn vede elektrický proud a děje, které v něm probíhají, označujeme jako výboj v plynu.

Nosiči nábojů v plynu jsou kladné ionty a záporné ionty - elektrony, které vznikají při ději zvaném **ionizace plynu,** schematicky znázorněném na obrázku.

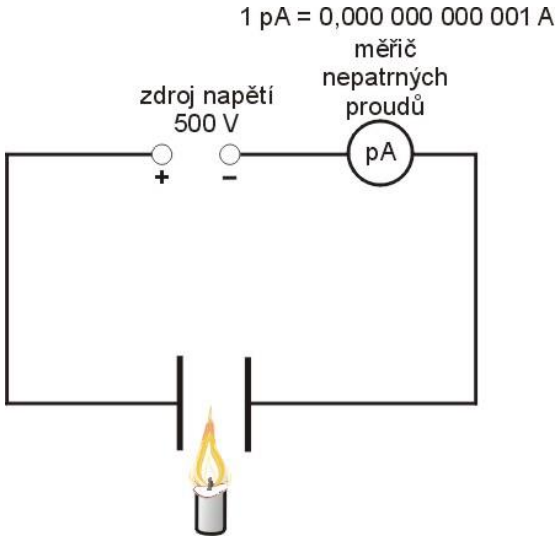


Příčinou ionizace plynu může být vysoká teplota (náraz rychle letící částice), působení ultrafialového, rentgenového nebo radioaktivního záření na molekuly plynu. Při ionizaci se z elektricky neutrální molekuly uvolňuje elektron (lehký iont) a zbytek molekuly tvoří kladný iont (těžký iont). Energii potřebnou k odtržení elektronů dodávají ionizátory (svíčka, radioaktivní preparát, UV lampa aj.).

Vzduch je vždy nepatrně ionizován účinkem kosmického záření a radioaktivity zemské kůry. Běžně vzniká v 1 cm^3 vzduchu každou sekundu přibližně 10 kladných iontů a elektronů.

Jakmile přestane působit ionizační činidlo, spojí se takřka ihned ionty kladné se zápornými na neutrální molekuly **(rekombinace)** a vodivost plynu zmizí.

Na obrázku je schéma obvodu, kterým demonstrujeme ionizaci vzduchu mezi deskami kondenzátoru a měření nepatrného proudu obvodem.



Popisované procesy nazýváme **nesamostatný výboj.** nastává v případě, kdy je ionizace vyvolána vnějším působením - ionizátorem. Jestliže toto působení zanikne, zanikne i výboj v plynu.

SAMOSTATNÝ VÝBOJ

Aby v plynu vznikl výboj a plynem procházel při daném napětí stálý proud bez působení ionizačního činidla, musí být splněny potřebné podmínky pro **ionizaci nárazem**. Elektrické pole musí být dostatečně silné a rychlost iontů se působením elektrické síly musí zvyšovat po dostatečně dlouhé dráze, než dojde ke srážce s molekulou plynu.

V plynu za normálního tlaku je střední volná dráha mezi srážkami iontů s molekulami plynu velmi krátká
(10^{-7} m tj. 0,0001 mm). Proto výboj v plynu za normálního tlaku vzniká až při vysokém napětí, kdy ho i na krátké dráze elektrické pole dostatečné urychlí, aby mohl ionizovat. Při prudkém nárazu na jinou molekulu vznikne těžký iont a volný elektron. Ty jsou zase urychleny a tak pořád dokola. Vznikne úplná „lavina“ nabitých částic. Tyto výboje jsou zpravidla provázeny světelnými jevy.

JISKROVÝ VÝBOJ

K jiskrovému výboji dochází nejčastěji ve vzduchu za atmosférického tlaku, při napětí tisíců voltů. Jiskrový výboj má vzhled úzkého, ostře svítícího, vlnícího se a rozvětveného výbojového kanálu, kterým projde řada krátkodobých proudových impulsů. Bývá doprovázen jak světelnými, tak i akustickými projevy.

V technické praxi se jiskrový výboj využívá u zážehových motorů nebo při jiskrovém obrábění tvrdých kovů.

Jiskrový výboj u indukční elektriky

V přírodě se jako jiskrový výboj vyskytuje blesk, jenž dosahuje délky až 10 km s průměrem výbojového kanálu až 0,4 m. Doba trvání blesku je řádově 10^{-4} s (0,0001 s) a okamžitá hodnota proudu může dosáhnout až 10^5 A (100 000 A). Napětí mezi místy, mezi nimiž blesk vznikl, dosahuje až 10^8 V (100 000 000 V). Odhaduje se, že na naší Zemi se ročně rozpoutá na 15 000 000 bouří. Teplota v dráze blesku dosahuje průměrně 20 000 °C, v určitých místech až 35 000 °C. Rozpínání vzduchu se projeví zahřměním. Zvuk se však šíří mnohem pomaleji než světlo, takže mezi bleskem a hromem je časová prodleva. Každý blesk je řadou několika proudových impulsů v témže výbojovém kanálu.

Napětí potřebné k jiskrovému výboji mezi dvojicí kuliček o poloměru 1 cm ve vzduchu za normálních podmínek	vzdálenost kuliček (mm)	1	2	10	50
	potřebné napětí přibližně (kV)	5	8	30	70

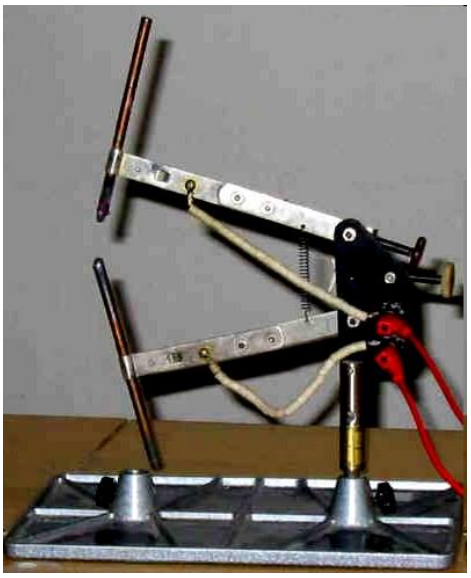
prvek	***ionizační energie***	***prvek***	***ionizační energie***	***výstupní práce***
vodík	13,6 eV	zinek	9,4 eV	4,3 eV
dusík	14,5 eV	uhlík	11,3 eV	4,8 eV
kyslík	13,6 eV	stříbro	7,6 eV	5,4 eV
neon	21,6 eV	měď	7,7 eV	5,0 eV
helium	24,6 eV	wolfram	8,0 eV	4,5 eV

Ionizační energie je energie potřebná na vytržení elektronu z elektronového obalu molekuly plynu (ionizaci).

Výstupní práce je energie potřebná na vytržení elektronu (volného „toulavého“) z krystalu tuhé látky.

Energii 1 eV (elektronvolt eV = 1,6 .10^{-19} J) získá elektron proběhnutím mezi body, mezi nimiž je napětí 1 V.

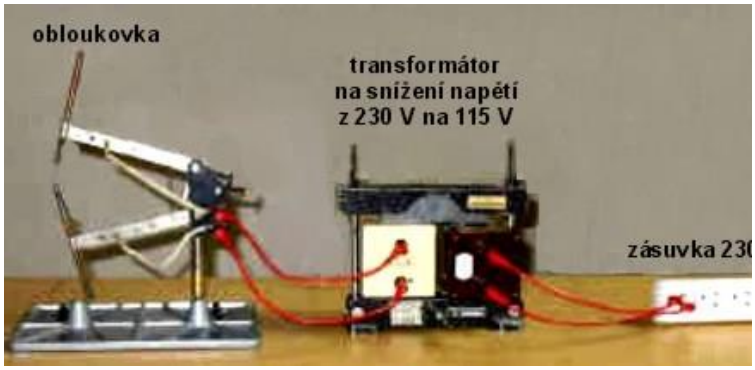
OBLOUKOVÝ VÝBOJ



Obloukový výboj ukázal následující pokus. Dvě uhlíkové tyčinky jsme upevnili v "nůžkách", které umožňují měnit vzdálenost konců tyčinek.

Tyčinky jsme připojili na napětí 120 V a přiblížili k sobě tak, aby se zlehka dotkly. Po jejich nažhavení jsme je od sebe na několik milimetrů oddálili. Mezi tyčinkami se rozhořel obloukový výboj. Proud ve výboji je velký (řádově 10 A).

Uspořádání pokusu je na obrázku.



Proč k výboji dochází? Tím, že se tyčinky dotknou, začne jimi procházet proud. V místě dotyku tyčinek se toto místo značně zahřívá. Tak se ionizuje vzduch v blízkosti tyčinek, a po jejich oddálení mezi nimi i nadále protéká proud – dochází k výboji v plynu. Ionty se emitují i z rozžhavených konců tyčinek - elektrod. Teplota elektrod je 3000 K - 5000 K. Elektrody poměrně rychle uhořívají. Výboj vydává intenzivní světlo, jež obsahuje ultrafialovou složku a je nebezpečné pro lidský zrak.

Obloukový výboj se dříve používal na svícení. Lampy se používaly na osvětlování budov, majáků, v promítacích přístrojích, světlometech. V těchto aplikacích jsou dnes nahrazeny, např. sodíkovými vysokotlakými výbojkami.

V soláriích se používají rtuťové výbojky, které vyzařují i UV záření vyvolávající ztmavnutí pleti

Dnes se obloukového výboje (proudy až v řádech desítek ampérů) používá ke sváření. Jednu elektrodu tvoří svařované předměty, druhá elektroda je svářecí drát, který drží svářeč v izolovaném držáku v ruce. Svářecí drát mívá obal ze struskotvorného materiálu zabraňujícího přístupu kyslíku, aby nedocházelo k okysličování.

VÝBOJ ZA SNÍŽENÉHO TLAKU

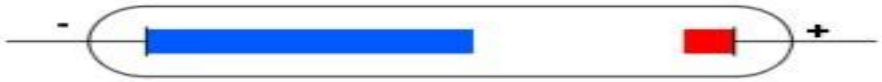
Při postupném snižování tlaku v trubici s dvěma proti sobě umístěnými elektrodami dochází k zajímavým jevům. Při normálním atmosférickém tlaku nevznikne žádný výboj, protože vzduch obsahuje jen nepatrný počet iontů.

Při snižování tlaku se objeví neklidný tenký načervenalý provazovitý výboj spojující obě elektrody.

Zředěním plynu jsme prodloužili volnou dráhu iontů natolik, že je i slabší pole dokáže roztlačit na dostatečnou kinetickou energii umožňující ionizovat nárazem neutrální molekuly.

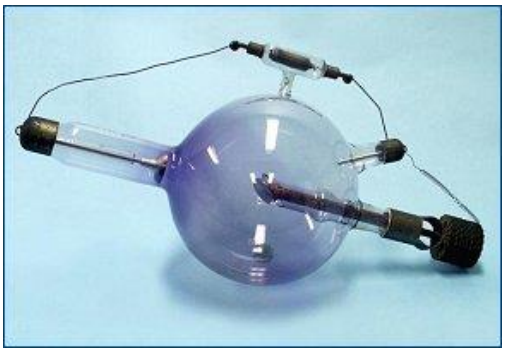
Při dalším snížení tlaku se provazcovitý klidný výboj rozšíří na celý průřez výbojové trubice.

Snížíme-li tlak ještě více, nabude výboj formy, kterou nazýváme doutnavý výboj. Kolem katody se vytvoří chomáč světla, tzv. katodové světlo. Okolo anody se vytvoří červená záře, tzv. kladný sloupec. Mezi oběma oblastmi je Faradayův tmavý prostor.



Při tlaku 0,1 Pa již nepatrný zbytek plynu v trubici nezáří, ale naproti katodě světélkuje sklo trubice. Ze záporné elektrody (katody) vystupuje přímočaře tzv. katodové záření a to dopadem na protější skleněnou stěnu vyvolává její zelené světlo. V roce 1889 Phillip Lenard zjistil, že katodové záření je tvořeno elektrony.

Při dostatečně vysokém napětí (silné pole) jsou elektrony z katody urychleny na tak velké energie, že při brždění před nárazem na překážku vyzařují rentgenové elektromagnetické záření.

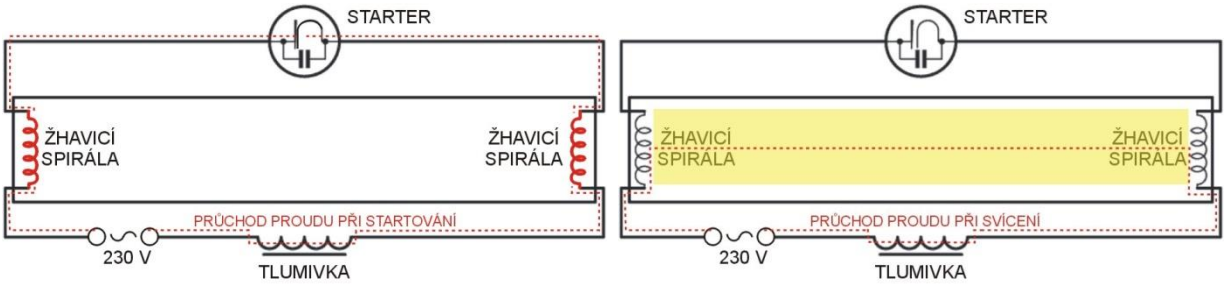


Na obrázku je rentgenka, jež se dříve používala i ve škole k demonstraci rentgenového záření. V současnosti je její používání ze zdravotních důvodů (zbytečné ozařování učitele a žáků) zakázáno.

ZÁŘIVKA

Zářivka je skleněná trubice se žhavícími elektrodami, naplněná velmi zředěnými rtuťovými parami a argonem. V nich nastává doutnavý výboj, který ale září převážně v neviditelném ultrafialovém světle. Toto záření dopadá na stěny trubice, jež jsou obvykle pokryty světélkujícím práškem - luminoforem. Tato látka pohlcuje ultrafialové záření a sama září ve viditelné oblasti. Zářivka tak svítí.

Pro výboj v plynu platí, že čím větší proud protéká, tím je odpor výbojky menší, a docházelo by proto při samotném připojení zářivky ke zdroji napětí ke vzniku tak velkého elektrického proudu, že by došlo ke zničení zářivky. Proud musí být zářivkou zapojenou v obvodu vhodným způsobem brzděn. Používané „brzdy“ jsou tlumivky (cívky s jádrem), dnes i elektronické obvody v patici úsporné žárovky.



Pro zapálení (start) slouží u klasické zářivky startér.

Ten při sepnutí vypínače pouští proud do spirál elektrod, které se rozžhaví a vyzařují (emitují) elektrony.

Zhruba za sekundu se startér vypne a elektrony vyzářené z elektrod spustí lavinu nárazových ionizací molekul zředěných plynů v trubici. Při ní molekuly plynu vyzařují světlo a UV záření. To se v prášku – **luminoforu** na stěnách trubice pohlcuje a luminofor je přemění na světelné záření požadované barvy.

Všechny popsané fáze rozsvícení zářivky probíhají velmi rychle, ale určité zpoždění mezi stisknutím vypínače zářivky a jejím rozsvícením můžeme pozorovat.

ÚLOHY:

1. Popište hlavní rozdíl mezi samostatným a nesamostatným výbojem v plynu.

2. Popište procesy, které probíhají při zážehu zářivky a poté při jejím svícení.

3. Vysvětlete, proč samostatný výboj v plynu může probíhat ve slabším elektrickém poli při dostatečném zředění plynu tj. při jeho dostatečně nízkém tlaku.

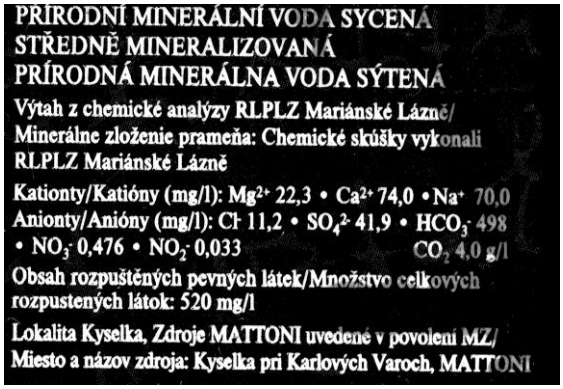
4. Popište změny výboje, jež můžete pozorovat při snižování tlaku plynu ve výbojové trubici.
http://www.youtube.com/watch?v=NzR_H3x6HX0

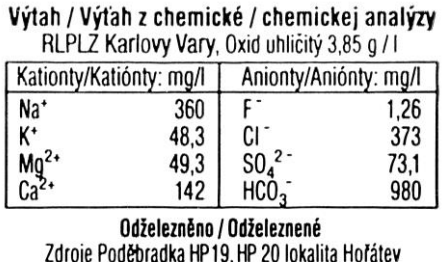
http://www.youtube.com/watch?v=IHJi0WJ-_wA&feature=related

ELEKTRICKÝ PROUD V KAPALINÁCH

V kapalinách stejně jako v plynech je vodivost podmíněna existencí pohyblivých iontů. V destilované vodě je nepatrný počet iontů H_3O^+ a OH^-, a proto je téměř nevodivá. Pramenitá voda i voda z vodovodu obsahují řadu iontů látek ve vodě rozpuštěných, díky čemuž je jejich vodivost podstatně vyšší.

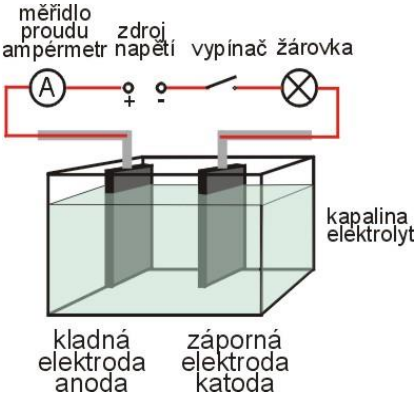
Ještě větší počet nabitých částic obsahují stolní minerální vody. Na etiketách vidíte jejich zastoupení v miligramech na litr vody u MATTONKY a PODĚBRADKY.





Na obrázku je sestava, kterou jsme vodivost kapalin zkoumali.

Největší proud jsme naměřili, když jsme do vody nasypali kuchyňskou sůl.

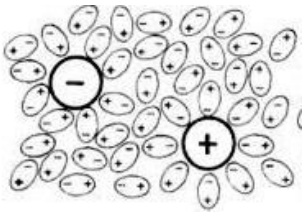


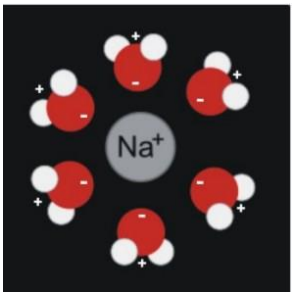
Ukázka výsledků měření:

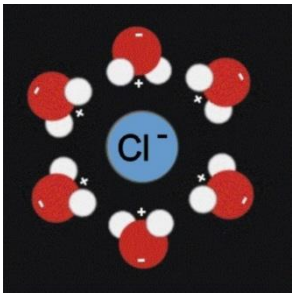
napětí zdroje: 10 V	elektrody uhlíkové
elektrolyt voda z vodovodu	elektrický proud I = 2 mA
elektrolyt minerálka MATTONI	elektrický proud I = 10 mA
elektrolyt vodný roztok NaCl	elektrický proud I = 200 mA

Otázka, již ještě musíme zodpovědět: jak se z krystalů soli, v nichž jsou ionty pevně svázány, stanou ionty pohyblivé. Je to vlivem elektrického pole vytvářeného zdrojem, nebo z jiných příčin?

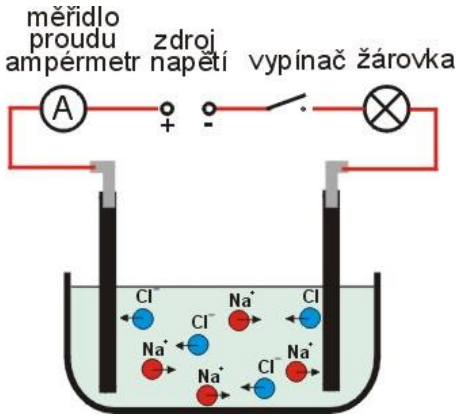
Proces rozpouštění, tj. vytahování iontů z krystalu, má na svědomí samotná voda. Molekuly vody jsou dipóly (polární molekuly), a tak svým nahromaděním u iontů soli (Na^+ a Cl^-)je vytahují z povrchu krystalu.







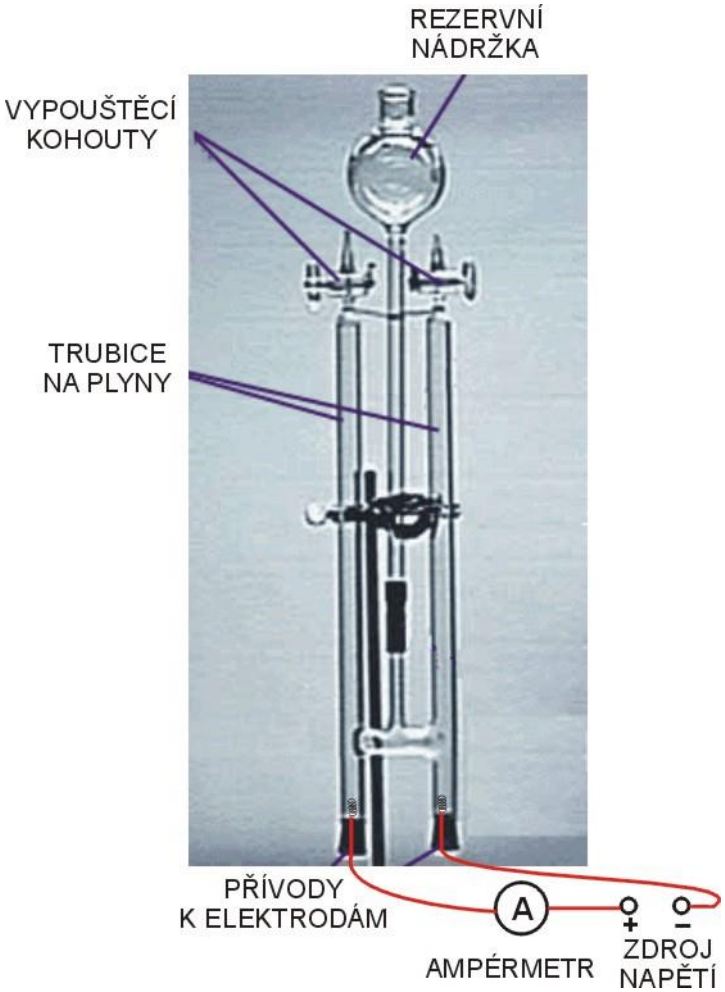
Obrázky schematicky ukazují podstatu rozpouštění ve vodě.



Při elektrolýze roztoku NaCl jsme u kladné elektrody cítili zápach vylučovaného chlóru. Sodík na záporné elektrodě reagoval s vodou na hydroxid sodný NaOH, který způsobil fialové zbarvení fenolftaleinu.

ELEKTROLÝZA VODY

Elektrickým proudem jsme vodu okyselenou H_2SO_4 rozkládali na plyny vodík a kyslík. Školní přístroj (Hofmanův) na demonstraci rozkladu vody je na obrázku.



Transport elektrického náboje uskutečňují ionty kyseliny sírové ($H_2SO_4 \rightarrow H^+$, H^+ SO_4^{--}), které se přenosu zúčastňují, ale kyselina sama zůstává v roztoku beze změny.

Elektrolýzou se dá z vody vyrábět kyslík a vodík i průmyslově. Na výrobu $1m^3$ vodíku tímto způsobem je ale zapotřebí až 5kWh elektrické energie, tedy je zde problém značné energetické náročnosti. Proto je tento způsob výroby používán tam, kde je přebytek elektrické energie z vodních elektráren.

Elektrolytická výroba kovů - elektrometalurgie. V roce 1854 zavedl v Anglii **Robert Wilhelm Bunsen** průmyslovou elektrolytickou výrobu některých čistých kovů z přírodních rud, jež se v přírodě vyskytují převážně v podobě sloučenin, např. oxidů. Příkladem je hliníková ruda bauxit, v podstatě oxid hlinitý. V krystalu uvězněné ionty se uvolňují roztavením směsi rudy s potřebnými přísadami

v uhlíkové vaně, která je zápornou elektrodou. Anodu tvoří uhlíkové tyče ponořené do taveniny. Kladné ionty hliníku, jež se roztavením z bauxitu uvolní, při elektrolýze elektrické pole směrují ke kladnému dnu vany. Zde se ionty Al^{3+} vybíjejí na elektricky neutrální hliník, který se odtud roztavený vypouští. Nevýhodou této technologie je opět velká spotřeba elektrické energie. Podobně se vyrábí např. hořčík, sodík, vápník.

Elektrolytické čištění kovů umožňuje odstranit z kovu nežádoucí příměsi. Např. pro elektrotechnické účely je potřebná dostatečně čistá měď, poněvadž její odpor je podstatně nižší než odpor surové mědi vyráběné v hutích. Z mědi určené k elektrolytickému čištění se zhotovují tlusté desky, jež se vloží do elektrolytické vany jako kladné elektrody. Zápornou elektrodou je tenká deska z čisté mědi. Jako elektrolyt se používá vodný roztok síranu měďnatého. Elektrolýza probíhá při určitém napětí, při němž se na záporné elektrodě vylučuje čistá měď a ostatní příměsi klesají ke dnu jako kal. Záporné ionty SO_4^{--} „vytahují“ z kladné měděné elektrody do roztoku další ionty mědi, které jsou opět transportovány k druhé elektrodě. Podobným způsobem se získávají i jiné kovy, např. nikl a zinek.

Galvanické pokovování je důležitý technologický postup, při němž se výrobky z méně ušlechtilých kovů pokrývají vrstvou ušlechtilejšího kovu, např. chrómu, který je odolnější proti korozi. To má značný význam pro snížení škod, jež vznikají nežádoucí korozí kovových materiálů.

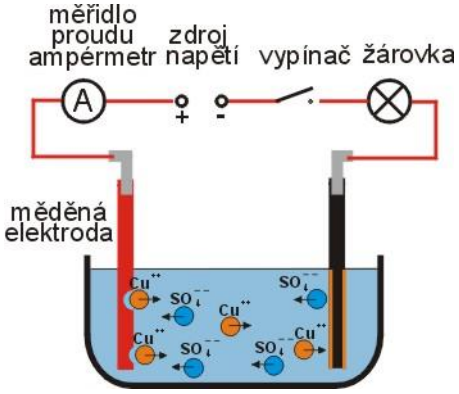


Schéma pokusu na pokovování mědí je na obrázku.

Kladnou elektrodou je měděná deska, elektrolytem roztok $CuSO_4$ (modrá skalice). Na záporné elektrodě se měď vylučuje, z kladné měděné elektrody vytahují měď záporné ionty SO_4^{--} do elektrolytu.

Elektrický proud lidským tělem

Protože tekutiny lidského těla obsahují ionty, může jím procházet elektrický proud. Hranice, při které začíná člověk průchod proudu vnímat je kolem 1 mA, nebezpečné účinky jsou nad hodnotou 10 mA.

Faradayův zákon elektrolýzy

Položme si otázku, kolik látky (jaká bude její hmotnost) se při elektrolýze vyloučí na katodě.

Počet vyloučených atomů bude zřejmě dán elektrickým nábojem *Q* spotřebovaným na přeměnu iontů, jež přicestovaly ke katodě na neutrální atomy. Tento náboj „přiteče“ proudem *I* za dobu *t.*

($Q = I \cdot t$).

Bude tedy:

hmotnost vyloučené látky = A · elektrický proud · doba průchodu proudu ,

vzorcem $m = A \cdot I \cdot t$

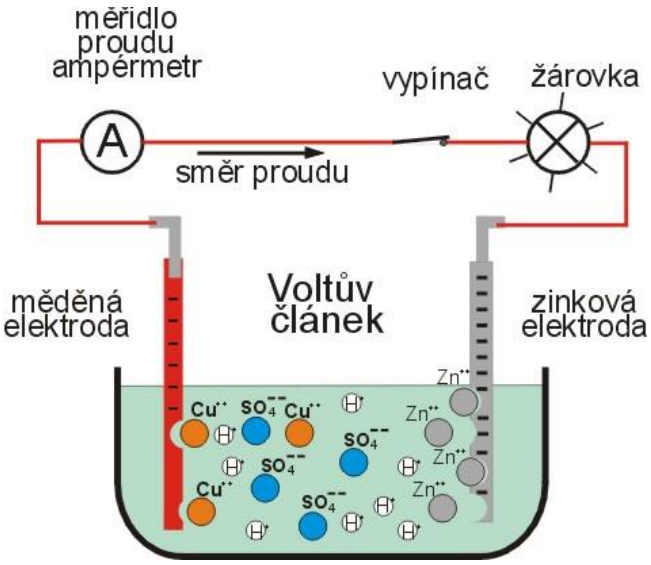
kde ***A*** je konstanta charakterizující látku, která se vylučovala (elektrochemický ekvivalent).

Jednotkou elektrochemického ekvivalentu je $\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{s}} = \mathrm{kg}\cdot\mathrm{C}^{-1}\right]$.

Konstanta ***A*** nás informuje, jaká je hmotnost látky vyloučené proudem 1 ampér za 1 sekundu.

Galvanické články

Naplníme-li nádobu zředěnou kyselinou sírovou H_2SO_4, pak budou její molekuly ve vodě rozděleny na dva kladné ionty H^+ H^+ a záporný iont SO_4^{--}.



Jestliže do zředěné kyseliny sírové vložíme zinkovou elektrodu, začne se postupně zinek rozpouštět, ionty Zn^{++} budou vstupovat do elektrolytu. V zinkové elektrodě tak vznikne nerovnováha kladných a záporných nábojů. Bude na ní přebytek záporného náboje, zatímco v elektrolytu převáží kladný náboj. Ponoříme-li do roztoku ještě měděnou elektrodu, dojde u ní ke stejnému jevu.

Protože se zinková elektroda bude rozpouštět více, bude na ní větší převaha záporného náboje (elektronů) než na elektrodě měděné. Mezi elektrodami vznikne elektrické napětí. Když elektrody vodivě spojíme, bude obvodem procházet elektrický proud.

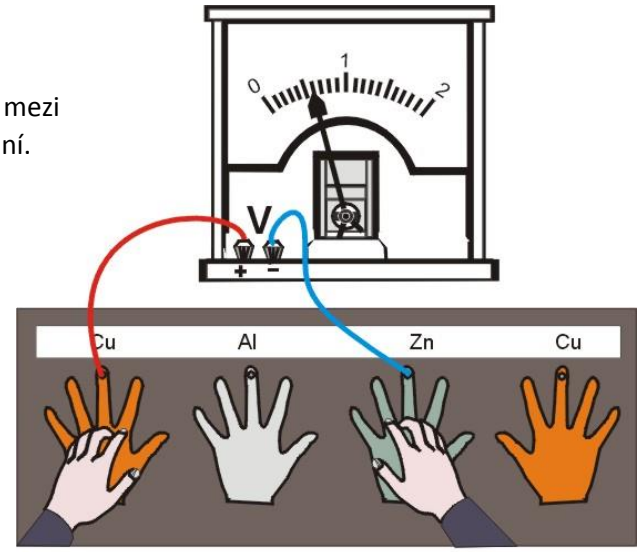
Počáteční napětí mezi měděnou a zinkovou elektrodou (cca 1 V) při provozu klesá, jelikož na měděné elektrodě se vylučuje vodík. Vzniká tak článek *vodík – zinek* místo *měď – zinek*.

Níže uvedená tabulka uvádí složení a některé vlastnosti běžných článků.

Název článku	Elektrody	Elektrolyt	Napětí	Poznámka
Voltův článek	+ měď Cu − zinek Zn	kyselina sírová H_2SO_4	1,1 V	historicky první zdroj stálého elektrického proudu (1800)
Leclancheův článek	+ uhlík C − zinek Zn	salmiak NH_4Cl a burel MnO_2	1,5 V	obyčejné baterie
alkalický článek	+ burel MnO_2 − zinek Zn	hydroxid draselný KOH	1,2 V	kvalitnější baterie
zinko-stříbrný článek	+ stříbro Ag − zinek Zn	hydroxid draselný KOH	2,2 V	velmi kvalitní baterie
Bunsenův článek	+ uhlík C − zinek Zn	kyselina sírová H_2SO_4	1,9	větší proudy

Akumulátory				
olověný akumulátor	+ oxid olovičitý PbO_2 − olovo Pb	kyselina sírová H_2SO_4	2,2 V	možný odběr velkých proudů
Ni - Fe akumulátor	+ nikl Ni − ocel Fe	hydroxid draselný KOH	1,2 V	nízká účinnost, odolnost proti zkratu

Pokusem jsme ukázali, že elektrické napětí vzniká mezi různými kovy, i když je „elektrolytem“ jen pot dlaní.



ÚLOHY

1. Kolik atomů Na se při elektrolýze roztoku chloridu sodného vyloučí na katodě proudem

   I = 100 mA za 1 minutu? Náboj iontu Na^+ je $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

2. Jaká bude hmotnost stříbra vyloučeného na katodě proudem 250 mA a procházejícího roztokem $AgNO_3$ 2 hodiny? ($A_{Ag} = 1{,}118 \cdot 10^{-6}$ kg · C^{-1}).

3. Jak velký náboj Q musí projít roztaveným bauxitem, aby se vyloučilo m = 10 kg hliníku? ($A_{Al} = 0{,}093 \cdot 10^{-6}$ kg·C^{-1}).

4. a) Jaký je elektrochemický ekvivalent mědi A_{Cu}, jestliže se proudem I = 500 mA, procházejícím roztokem $CuSO_4$ po dobu t = 5 h, zvětšila hmotnost katody z m_1 = 157 g na hodnotu m_2 = 160 g.

   b) Jak velký elektrický náboj Q ionty Cu^{++} přitom přenesly.

   c) Kolik iontů Cu^{++} se přenosu zúčastnilo. (elementární náboj e = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C)

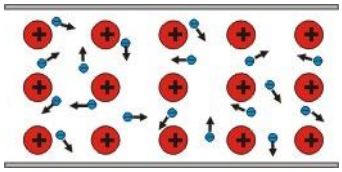
5. Jak dlouho musí procházet elektrický proud I = 200 mA Hofmanovým přístrojem, aby se na katodě vyloučil 0,9 μg ($V \approx$ 100 ml) vodíku? ($A_H = 0{,}01 \cdot 10^{-6}$ kg·C^{-1}).

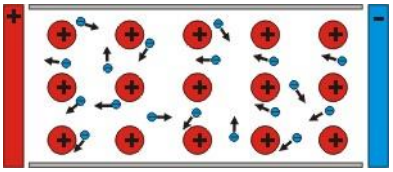
6. Jak velký proud procházel elektrolytem (roztok $ZnSO_4$), jestliže se za hodinu vyloučily na katodě m = 25 mg zinku. ($A_{Zn} = 0{,}339 \cdot 10^{-6}$ kg·C^{-1}).

ELEKTRICKÝ PROUD V KOVECH A POLOVODIČÍCH

ELEKTRICKÝ PROUD V KOVECH

Kov je tvořen kladnými ionty (uspořádanými do mřížky), mezi kterými se téměř volně chaoticky pohybují volné (vodivostní) elektrony (tzv. elektronový plyn). Rychlost jejich neuspořádaného pohybu elektronů je obrovská – 10^5 m/s až 10^6 m/s. Elektrony přitom narážejí do kladných iontů mřížky.





Po připojení ke zdroji napětí vznikne ve vodiči elektrické pole, které působí na elektrony. Začne převažovat **uspořádaný pohyb elektronů** ve směru působení elektrického pole**.**

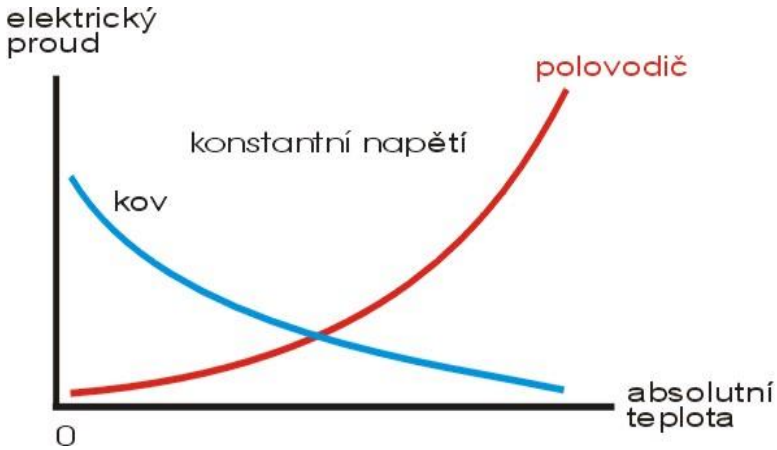
ELEKTRICKÝ PROUD V POLOVODIČÍCH

Polovodiče (nejznámější příklad je křemík Si a germanium Ge) vedou elektrický proud mnohonásobně hůř než kovy, ale mnohem lépe než nevodiče.

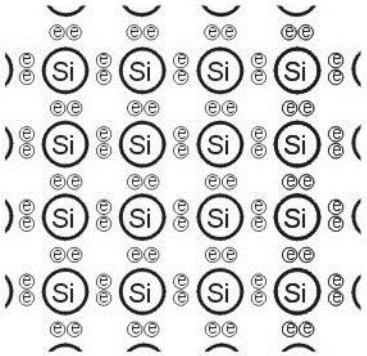
Pro ilustraci srovnáme elektrický proud trojicí stejně tenkých a stejně dlouhých tyčinek z cínu, germania a skla jako reprezentantů kovů, polovodičů a nevodičů. Připojením tyčinek ke zdroji napětí 1 V budou elektrické proudy tyčinkami I_{Sn} = 100 A, I_{Ge} = 1 mA (10^{-3}A), I_{SKLO} = 1 fA (10^{-15}A).

Dalším důležitým rozdílem mezi vlastnostmi kovů a polovodičů je změna jejich vodivosti při zvyšování teploty. Zatímco vodivost kovů se s růstem teploty zhoršuje (při stálém napětí a při rostoucí teplotě proud klesá), u polovodičů je chování obrácené. S růstem teploty se vodivost polovodičů zlepšuje, proud roste.

Schematicky to znázorňují grafy.

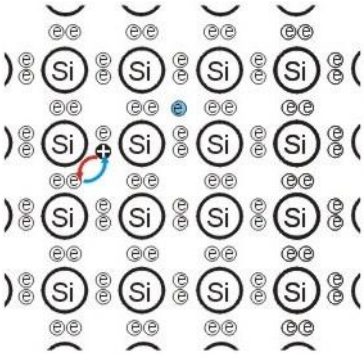


Proces vedení v polovodičích nyní zjednodušeně vysvětlíme na křemíku.



Každý atom křemíku má čtyři valenční elektrony (vnější elektrony ve vrstvě nejvíce vzdálené, a tudíž nejméně vázané k jádru). V krystalu jsou sousední atomy svázány dvojicemi elektronů, každý atom své valenční elektrony sdílí se sousedy, a tak drží krystal pohromadě.

Čistý křemík má při teplotě absolutní nuly (-273,15 °C) vazby svazující tomy pevné, protože téměř ustává tepelný pohyb atomů. Krystal se chová jako izolant (má téměř nulovou elektrickou vodivost), nejsou v něm volně pohyblivé nabité částice.



Začneme-li krystal zahřívat, atomy začnou více kmitat a některé z elektronů se mohou z vazeb utrhnout. V krystalu se objeví elektrony toulající se po krystalu a prázdná místa u atomu, od kterého se elektron odtrhl (díry).

Atom bez uniklého elektronu může ze sousedního elektronového elektron na prázdné místo získat, a tak se díra přemístí k sousedovi. Díra se chová jako pohyblivá částice s kladným nábojem, toulavý elektron je pohyblivá částice se záporným nábojem. Jelikož elektrony přeskakují z díry do díry, jeví se nám toto přeskakování elektronů zároveň i jako pohyb děr.

Popsaný proces se nazývá **generace páru elektron–díra** (vznikla dvojice nabitých částic, jež se mohou pohybovat po krystalu, a tak přenášet proud).

Uvedený mechanismus popisující vedení proudu v polovodičích a nazývá se **vlastní vodivost.**

Látky, které vedou tímto způsobem, se nazývají **vlastní polovodiče**.

Teď už je pochopitelná různá závislost vodivosti na teplotě u kovů a polovodičů.

U kovových vodičů se při stálém napětí s rostoucí teplotou elektrický proud zmenšuje (více srážek volných elektronů s ionty mřížky).

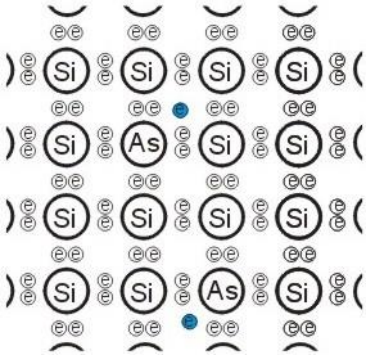
U polovodičů při stálém napětí s rostoucí teplotou elektrický proud roste (větší energie atomů v mřížce, tj. větší rozkmity), a tím více vzniká pohyblivých elektronů a děr.

PŘÍMĚSOVÉ POLOVODIČE

Příměsové polovodiče vznikají například „znečištěním“ polovodičů ze skupiny IVA (Si, Ge) atomy ze skupiny IIIA (Al, Ga, In) nebo ze skupiny VIA (P, As).

5 B Bor 10,81	6 C Uhlík 12,011	7 N Dusík 14,007
13 Al Hliník 26,982	14 Si Kremík 28,086	15 P Fosfor 30,974
31 Ga Gallium 69,72	32 Ge Germanium 72,59	33 As Arsen 74,922
49 In Indium 114,82	50 Sn Cín 114,69	51 Sb Antimon 121,75
81 Tl Thallium 204,38	82 Pb Olovo 207,2	83 Bi Bismut 208,98

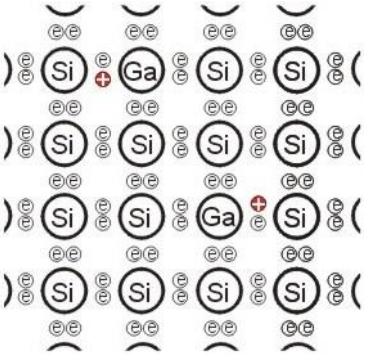
Všimněme si, k čemu dojde „znečištěním“ krystalu křemíku atomy arzénu (As). Jeden z pěti valenčních elektronů arzénu nemá u okolních atomů křemíku partnera do páru, zůstane sám, není vázán do vazeb a může se volně pohybovat po krystalu. Každý z atomů příměsi takto poskytne jeden elektron. V krystalu se pohybuje velké množství volných elektronů, krystal získal **příměsovou negativní (elektronovou) vodivost.**



Vznikl polovodič typu n.

Atomy příměsi darují elektrony, říká se jim **donory.** Pohled do tabulky prvků ukazuje, že dalšími donory mohou být atomy fosforu (P), antimonu (Sb) a bismutu (Bi) z pravého sloupce vedle mateřských prvků Si a Ge.

Jiná situace nastane, pokud „znečistíme“ křemík (nebo germanium) atomy prvků se třemi valenčními elektrony (**Al, Ga,In**) z levého sloupce Mendělejevovy tabulky. Atom Ga má pouze tři valenční elektrony, neposkytne jednomu z okolních atomů křemíku elektron do páru. Vznikne opět díra, která se může volně pohybovat po krystalu.



Každý z atomů příměsi takto vyprodukuje jednu díru, krystal získal **příměsovou pozitivní (děrovou) vodivost.**

Vznikl polovodič typu p.

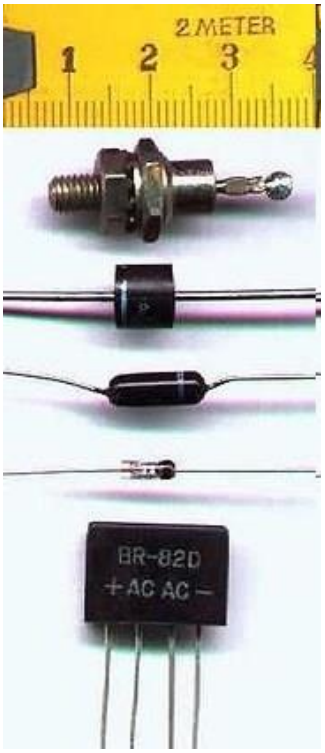
Atomy příměsi odebírají okolním atomům elektrony, říká se jim proto **akceptory.**

Příměsové polovodiče mají větší vodivost než polovodiče vlastní, protože mají více pohyblivých nosičů náboje (každý atom příměsi znamená jeden pohyblivý náboj). Čím větší je množství příměsi, tím větší je vodivost materiálu. „Přidávání“ příměsí se provádí do taveniny, z níž rostou při výrobě krystaly polovodiče.

POLOVODIČOVÁ DIODA

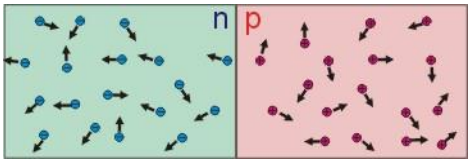
Polovodičová dioda je elektronická součástka, která má charakteristickou vlastnost v tom, že jedním směrem proud propouští, zatímco v opačném (závěrném) směru proud neprochází.

Na obrázku je několik provedení polovodičových diod.

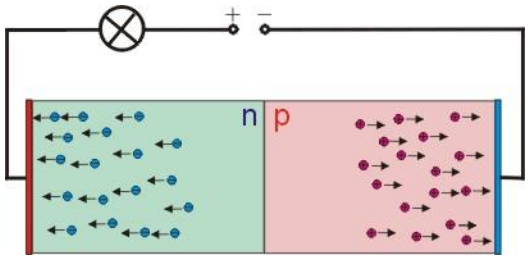


Modelově polovodičovou ukazuje obrázek, na němž jsou pro přehlednost zakresleny jen pohyblivé nosiče nábojů, volné elektrony a díry bez pevných iontů mřížky.

Diodu tvoří dvojice polovodičů – typ **n** je v kontaktu s typem **p**.

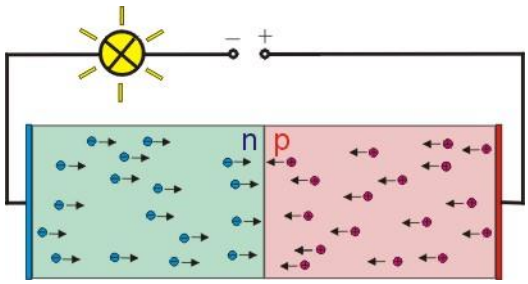


Zapojením do obvodu, jak ukazuje další obrázek, dojde k pohybu elektronů i děr ve směru od společného rozhraní. Na elektrony i díry působí elektrické pole tak, že u styku nezbývají žádné volné nabité částice – proud je diodou přerušen.



Diodou neprochází elektrický proud.

Zaměníme-li polaritu zdroje napětí, bude situace opačná. Elektrony i díry jsou elektrickým polem tlačeny k rozhraní a v blízkosti tohoto přechodu rekombinují. Na okraji polovodiče **p** stále vznikají nové díry, do polovodiče **n** proudí zase nové elektrony tlačené z kovového vodiče polem, které vytváří zdroj napětí.



Diodou prochází elektrický proud.

ÚLOHY

1. a) Jakou příměsí při růstu krystalu germánia vznikne polovodič typu N? Čím je tvořen elektrický proud v tomto polovodiči?

   b) Jakou příměsí při růstu krystalu germánia vznikne polovodič typu P? Čím je tvořen elektrický proud v tomto polovodiči?

2. Podejte vysvětlení, proč příměrové polovodiče vedou za stejných podmínek elektrický proud lépe než polovodiče vlastní.

3. Určete typ (N nebo P) příměrových polovodičů

   křemík s příměsí arzénu

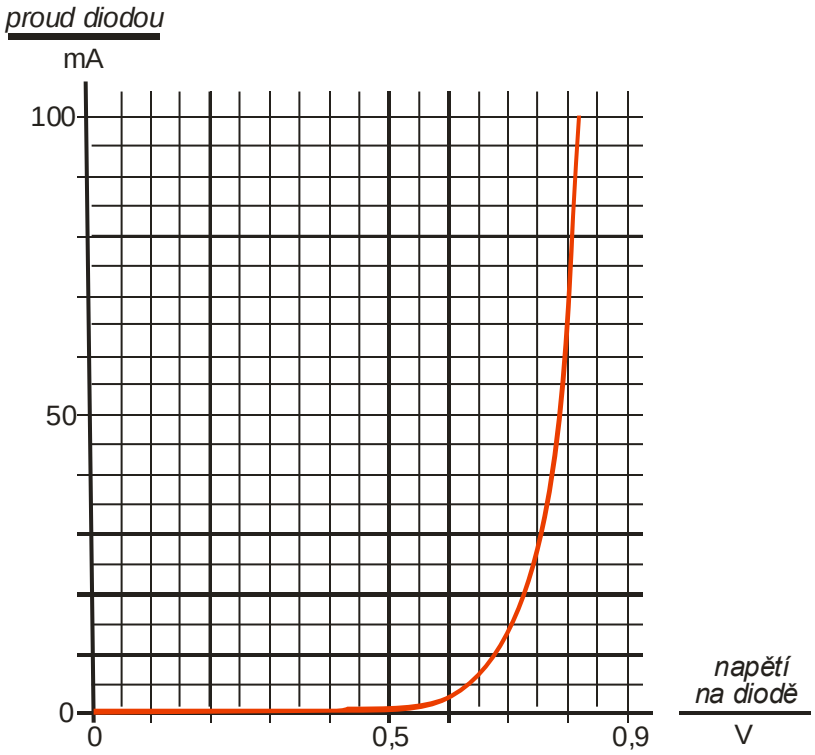
   germánium s příměsí fosforu

5 B Bor 10,81	6 C Uhlík 12,011	7 N Dusík 14,007
13 Al Hliník 26,982	14 Si Kremík 28,086	15 P Fosfor 30,974
31 Ga Gallium 69,72	32 Ge Germanium 72,59	33 As Arsen 74,922
49 In Indium 114,82	50 Sn Cín 114,69	51 Sb Antimon 121,75
81 Tl Thallium 204,38	82 Pb Olovo 207,2	83 Bi Bismut 208,98

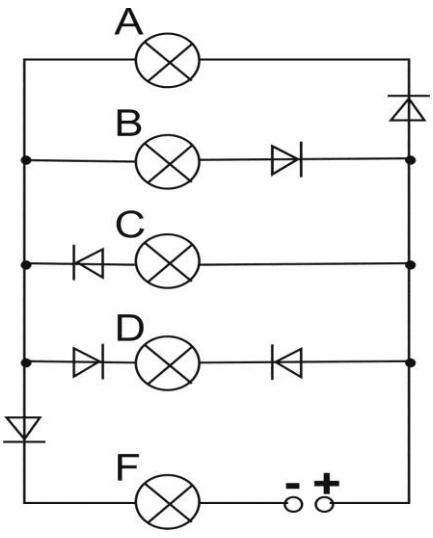
4. Z grafu *I*(*U*) (tzv. charakteristika diody) určete:

a) proud diodou při napětí 0,4 V a 0,8 V.

b) napětí na diodě při proudu 10 mA a 80 mA

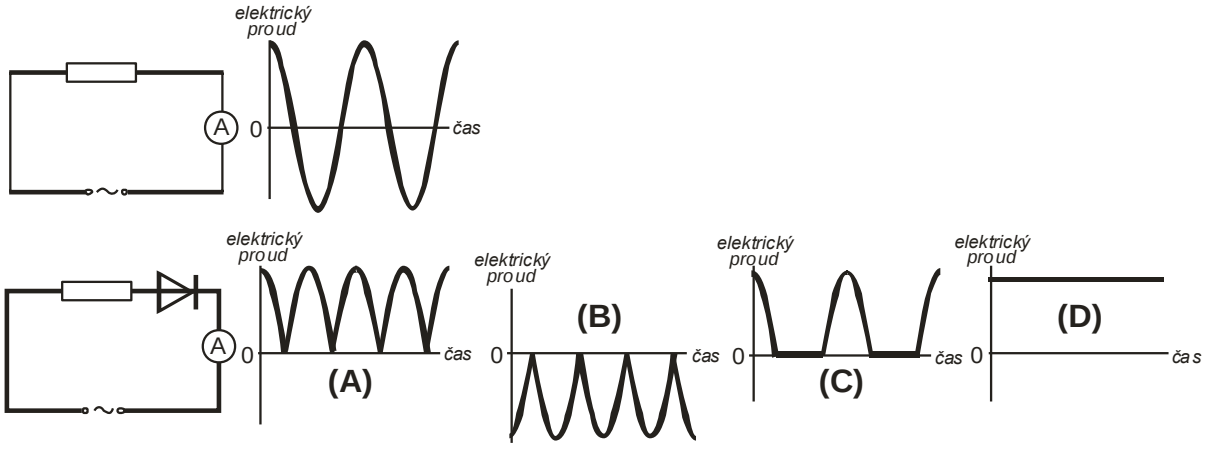


5. Které ze žárovek v obvodu s diodami budou svítit?



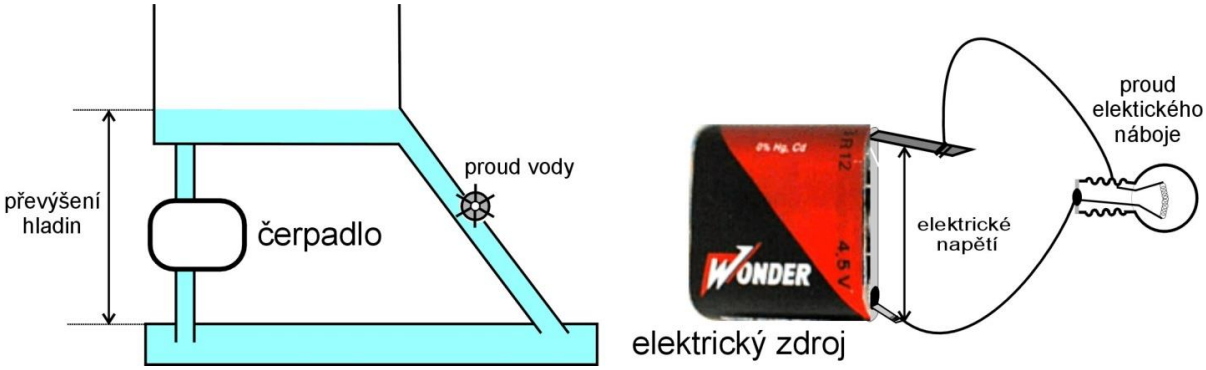
6. V obvodu se zdrojem střídavého proudu ukazuje průběh proudu horní graf.

Který ze spodních grafů ukazuje průběh proudu v obvodu doplněném diodou?



ELEKTRICKÝ PROUD A ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ

Elektrický proud a elektrické napětí jsou fyzikální veličiny, které používáme k popisu elektrických dějů. Jaký je jejich obsah a co vlastně vyjadřují, nám pomůže objasnit srovnání toku elektrického proudu s tokem vody.



Elektrické napětí (baterie nebo jiného zdroje) popisuje „popoháněcí“ schopnost zdroje vyvolat proudění elektrického náboje obvodem, podobně jako rozdíl hladin vody vytvářený čerpadlem vyvolává proudění vody.

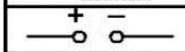
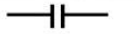
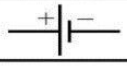
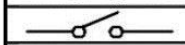
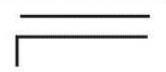
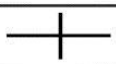
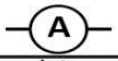
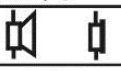
Elektrický proud popisuje, jak velký elektrický náboj protéká obvodem (na obrázku např. vláknem žárovky) za 1 sekundu, podobně jako u vodního proudu průtok představuje objem vody protékající potrubím za sekundu.

značka elektrického napětí *U* jednotka elektrického napětí 1 V (volt)

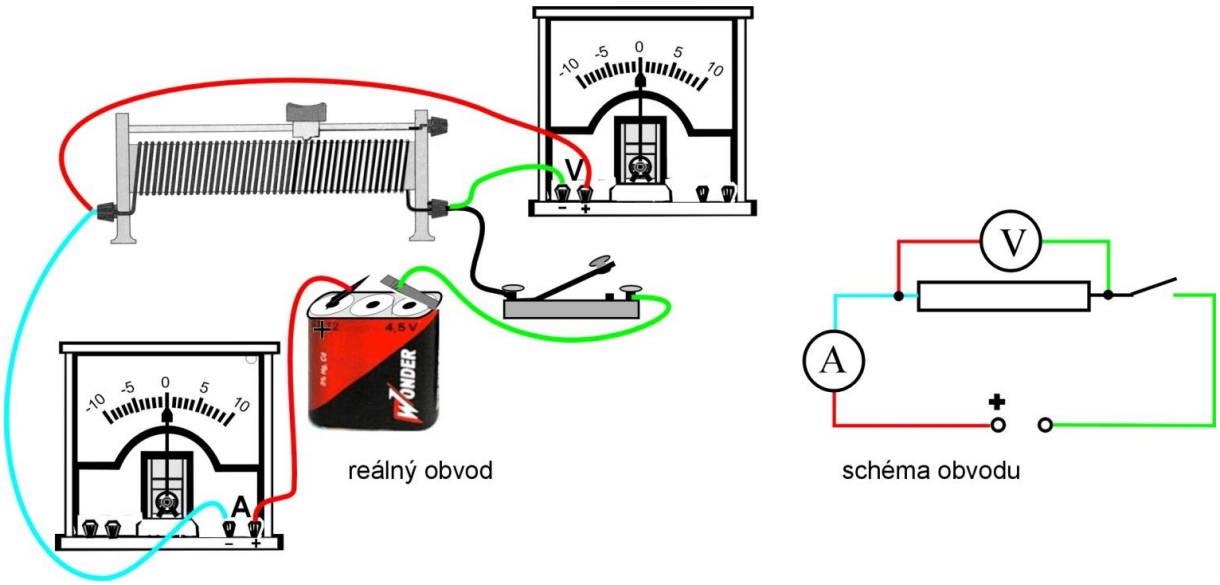
značka elektrického proudu *I* jednotka elektrického napětí 1 A (ampér)

Schematický popis elektrických obvodů

Pro znázornění elektrických obvodů používáme schematické značky.

Značka	Zařízení	Značka	Zařízení
	zdroj elektrického napětí ss		kondenzátor
	monočlánek		cívka
	pojistka		motor
	žárovka		zvonek
	sepnutý spínač		zdroj stř. napětí
	rozepnutý spínač		uzemění
	vodič – se ve schématech znázorňuje jako přímé nebo pravoúhlé lomené čáry, nepoužívají se šikmé čáry ani křivky		voltmetr
	nevodivé křížení dvou vodičů		ampérmetr
	vodivé křížení dvou vodičů		dioda
	rezistor		LED dioda
	rezistor s proměnným odporem.		repro a sluchátko
	dělič napětí (potenciometr)		mikrofon

Na obrázku je reálný obvod a vedle něho schéma, na němž jsou pro lepší přehlednost vodiče znázorněny barvami. V normálních schématech jsou vodiče černé úsečky.



MULTIMETRY

Na měření proudu, napětí a dalších veličin se používají v praxi většinou tzv. multimetry. Jsou to měřicí přístroje, kde veličinu, kterou chceme měřit, volíme natáčením knoflíku voliče a vhodnou dvojicí vstupních zdířek.

Na obrázku je jednodušší žákovský multimetr a dražší profesionální multimetr.

Při nastavení voliče na OUT je na dolní dvojici zdířek výstupní pulzující signál o frekvenci 50 pulsů za 1 s.

Údaje, na něž ukazuje volič žákovského multimetru, udávají maximální měřitelnou hodnotu (tzv. rozsah). Na obrázku je nastaveno měření ss napětí do 1 000 V.

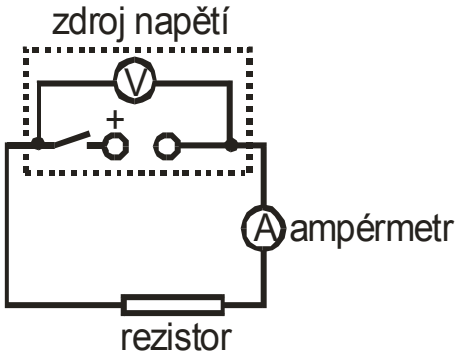
LABORATORNÍ PRÁCE Ohmův zákon - s ukázkou výsledků

Studium závislosti proudu na napětí pro kovový vodič

Úkol: Zjistěte pokusně, jak závisí elektrický proud procházející vodičem (rezistorem) na napětí.

Postup měření:

1. Rezistor o určité kvalitě a ampérmetr připojíme ke zdroji napětí.



2. Napětí zdroje *U* zvyšujeme od 0 V po 1 V až na hodnotu 10 V. Hodnoty proudu *I* prvním rezistorem zapisujeme do tabulky.

3. Stejné měření a zápis provedeme pro druhý rezistor.

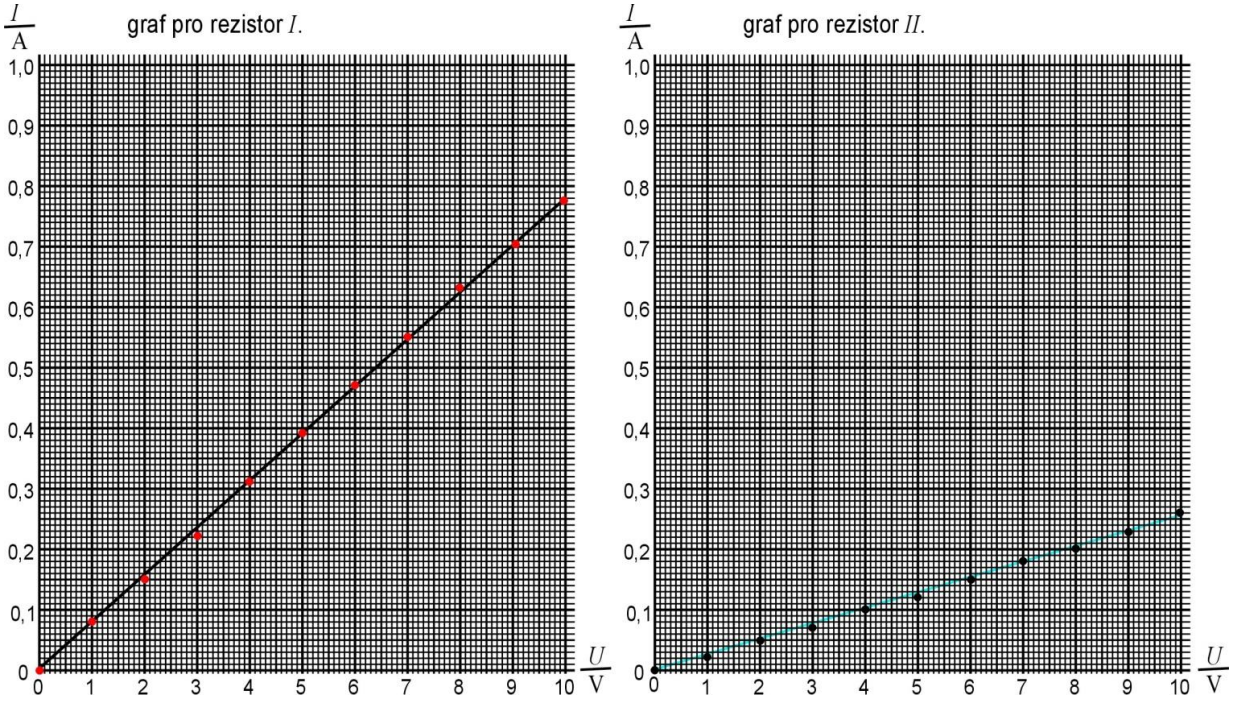
1. rezistor

U (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (A)	0	0,07	0,15	0,22	0,31	0,39	0,47	0,55	0,63	0,70	0,78

2. rezistor

U (V)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	9	9,5
I (A)	0	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,18	0,20	0,23	0,26

4. Naměřené hodnoty pro první a druhý rezistor zakreslíme do grafů.



5. Naměřenými body proložte polopřímky a určete jejich sklon $R = \frac{U}{I} \cdots [R] = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \Omega(\mathrm{ohm})$

$R_{1EXP} = 13\ \Omega$ $R_{2EXP} = 38\ \Omega$

6. Změřte odpory obou rezistorů multimetrem. $R_{1MULT} = 12{,}8\ \Omega$ $R_{2MULT} = 36{,}5\ \Omega$

7. Přečtěte i nominální údaj o odporu na rezistoru a porovnejte všechny tři hodnoty.

Měření ukázalo, že druhý rezistor je horší vodič, protože se při stejném růstu napětí zvětšuje procházející proud pomaleji. Řekneme, že rezistor II. má větší elektrický odpor. Velikost odporu jsme určili podílem *U*/*I*. Jednotka odporu vyjádřená pomocí jednotky proudu a napětí je tedy $\Omega = \mathrm{V/A}$.

Grafy vyjadřují Ohmův zákon graficky.

Slovně formulovaný Ohmův zákon:

Elektrický proud rezistorem je přímo úměrný napětí vloženém mezi jeho konci.

Ohmův zákon vzorcem: $I = \frac{U}{R}\ nebo\ U = R \cdot I\ nebo\ R = \frac{U}{I}$

U je napětí na rezistoru (V)

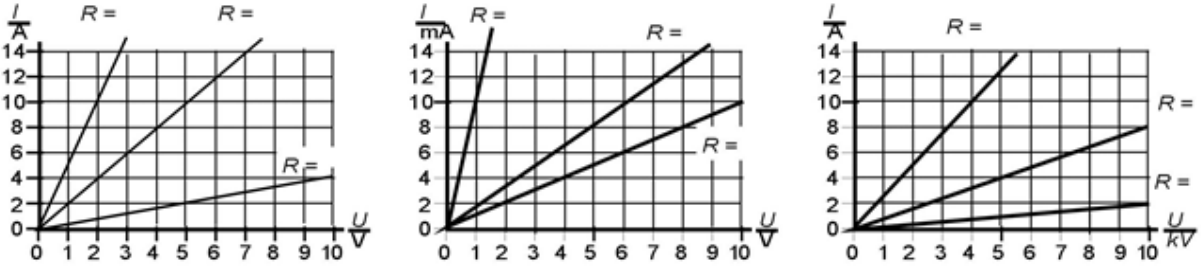
I je proud rezistorem (A)

R je odpor rezistoru (Ω)

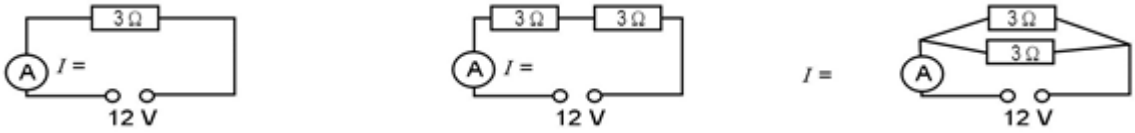
Rezistory slouží v elektronických zařízeních k nastavení vhodného proudu v daném obvodu.

ÚLOHY

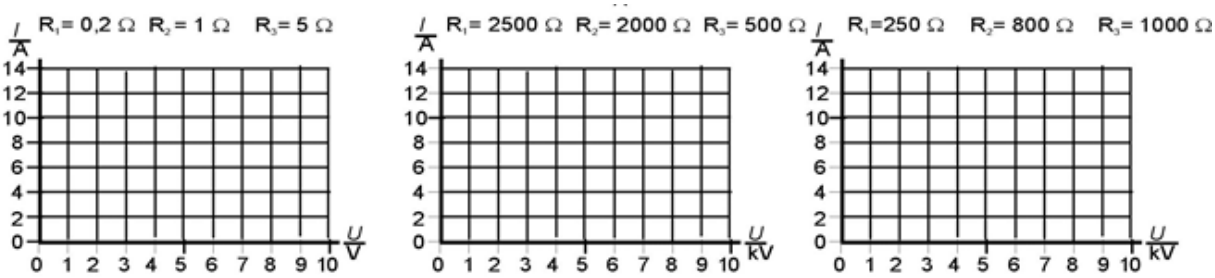
1. a) K jednotlivým charakteristikám doplňte odpory pomocí Ohmova zákona



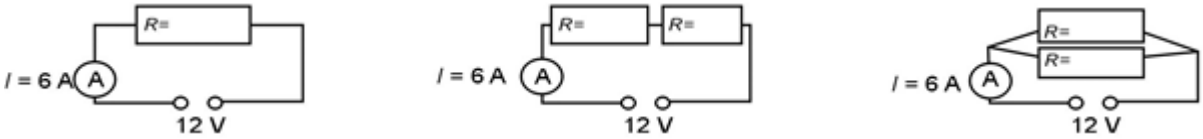
b) K jednotlivým obvodům doplňte hodnotu proudu, kterou ukazuje ampérmetr.



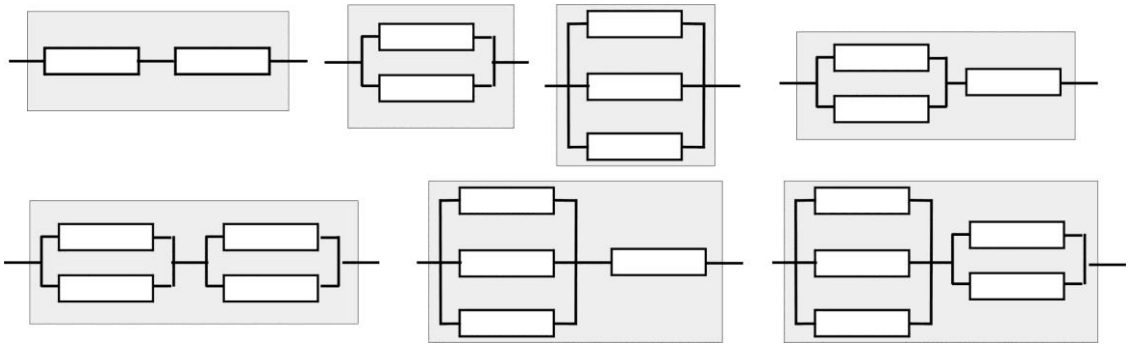
c) K daným hodnotám odporů dokreslete charakteristiky. (Vyberte jedno vhodné napětí a vypočtěte příslušný proud, nebo obráceně ke zvolenému proudu vypočtěte napětí.)



d) K jednotlivým obvodům doplňte hodnotu odporu. Všechny rezistory v obvodu mají stejný odpor, ale v jednotlivých obvodech se liší.



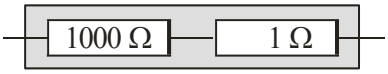
2. Určete odpory „krabiček“, které obsahují rezistory v zapojení znázorněné schématy. Všechny rezistory v krabičkách mají stejný odpor $R = 6\ \Omega$.



3. Nakreslete „krabičku“ se zapojením 3 stejných rezistorů, každý o odporu 12 Ω, aby byl odpor krabičky 4 Ω, 18 Ω a 36 Ω.
4. Vyberte správnou odpověď.

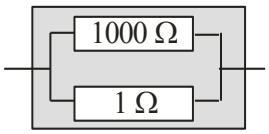
Při zapojení dvou rezistorů (podle obrázku vpravo) bude odpor krabičky přibližně

(A) 1000 Ω
(B) 1 Ω
(C) 500 Ω



Při zapojení dvou rezistorů (podle obrázku vpravo) bude odpor krabičky přibližně

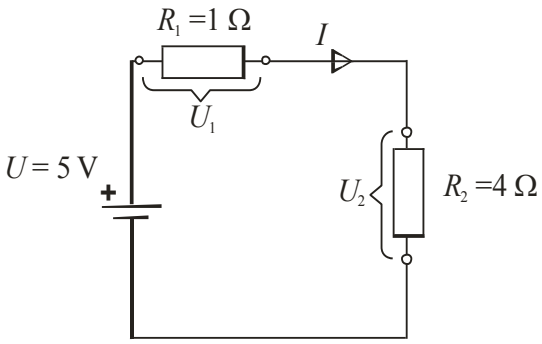
(A) 1000 Ω
(B) 1 Ω
(C) 500 Ω



5. Žárovičkou prochází při připojení k baterii o napětí U = 6 V proud I = 0,3 A. Jaký má při tom vlákno žárovky odpor? Změřený odpor žárovky multimetrem byl ale jen 3 Ω ? Dokážete vysvětlit tento rozpor?

6. Vyberte, který z grafů nejlépe vystihuje charakteristiku vlákna žárovky.

7. Ke zdroji s napětím 5 V je připojen odpor R_1 = 1 Ω a připojen spotřebič s odporem R_2 = 4 Ω. Vypočítejte proud obvodem a napětí na obou odporech.



ELEKTRICKÝ ODPOR

Jak už jsme zjistili, různé vodiče (rezistory) kladou elektrickému proudu, jenž jimi prochází, různý odpor. Při stálé teplotě je to veličina konstantní.

Položme si otázku, které vlastnosti drátu (tím v podstatě rezistor je) jeho odpor určují. I zde nám odpověď napovědělo srovnání elektrického proudu vodičem s proudem vody potrubím.

Čím delší je potrubí, tím větší klade odpor proudící vodě.

Čím větší je průřez potrubí, tím snadněji jím voda protéká.

Průtok závisí i na kvalitě potrubí, tj. jak hladké jsou jeho stěny, zda uvnitř nejsou překážky a podobné „vodní brzdy“.

Můžeme tedy vyslovit hypotézu o závislosti odporu:

odpor vodiče = *materiálová konstanta* $\cdot \frac{délka\ vodiče}{plocha\ průřezu}$, vzorcem: $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$

R … odpor vodiče (Ω)

l …délka vodiče (m)

S … plocha průřezu vodiče (m^2)

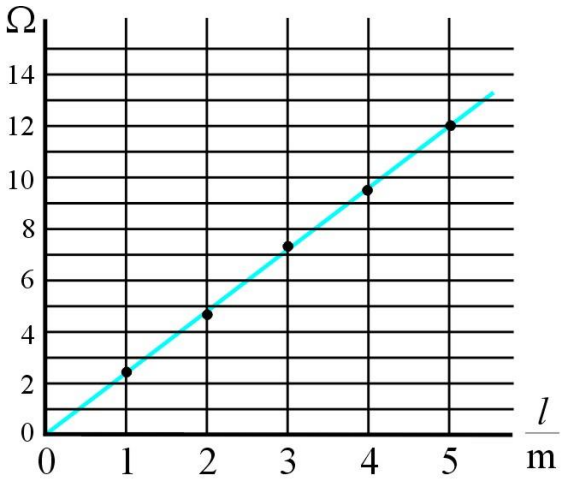
ρ … měrný odpor materiálu vodiče (Ω·m)

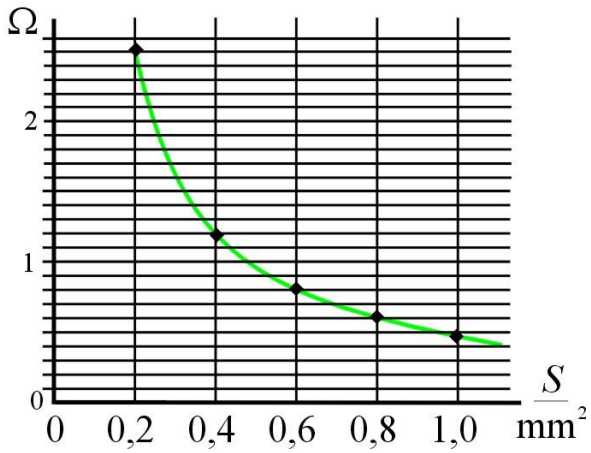
Měrný odpor ρ (rezistivita) udává, jak velký odpor klade průchodu proudu „vodič“ z daného materiálu, jenž je 1 m dlouhý a má průřez 1 m^2 (jde tedy o krychli). Už z toho je zřejmé, že hodnoty měrného odporu pro běžné vodiče budou velmi malé.

látka	měrný odpor ρ
stříbro	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ω·m
měď	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ω·m
hliník	$2{,}9 \cdot 10^{-8}$ Ω·m
wolfram	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$ Ω·m
konstantan (54%Cu+45%Ni+1%Mn)	$50 \cdot 10^{-8}$ Ω·m
grafit	$800 \cdot 10^{-8}$ Ω·m

Grafy popisují výsledky našich měření závislosti odporu na délce pro drát (*S* = 2 mm^2)

a měření závislosti odporu na průřezu vodiče pro drát délky *l* = 1 m pro konstantan.

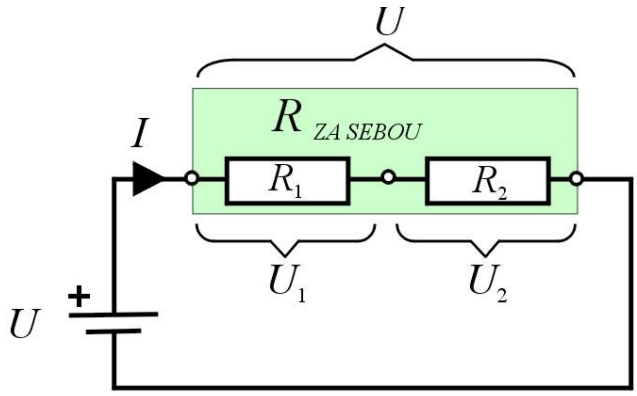


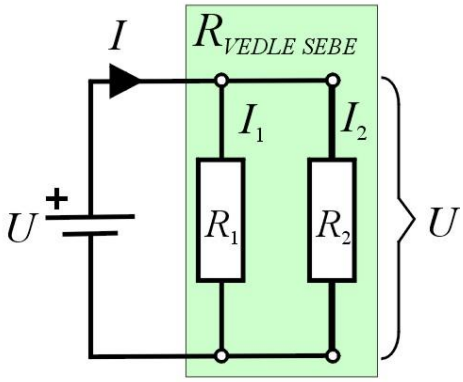


Zapojování rezistorů

Existují dvě základní zapojení rezistorů v elektrickém obvodu.

Při zapojení rezistorů **za sebou (sériové zapojení)** prochází celý elektrický proud každým z rezistorů. Sami jste odhadli, že v takovém případě bude mít „krabička“ s takto zapojenými rezistory odpor rovný součtu jednotlivých rezistorů. Pokus, který jsme provedli, tuto hypotézu potvrdil.





$$R_{ZA\ SEBOU} = R_1 + R_2$$

$$\frac{1}{R_{VEDLE\ SEBE}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Při zapojení rezistorů **vedle sebe (paralelní zapojení)** se proud větví. Celkový proud je součtem proudů ve větvích. $I = I_1 + I_2$. Přitom je napětí na obou rezistorech stejné.

Přepíšeme-li rovnici $I = I_1 + I_2$ pomocí Ohmova zákona, dostaneme $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$, po zkrácení U výsledný vzorec $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Vzorce platí v obdobném tvaru i pro tři a více rezistorů.

Z výsledku je vidět, že výsledný odpor při zapojení za sebou je vždy větší než kterýkoli z odporů.

Při zapojení vedle sebe je výsledný odpor vždy menší než nejmenší z odporů.

Regulace proudu reostatem

Závislost odporu na délce vodiče umožňuje jednoduchou regulaci elektrického proudu.

Na obrázku je reostat, jímž je možné měnit plynule odpor, a tím i proud procházející žárovkou.

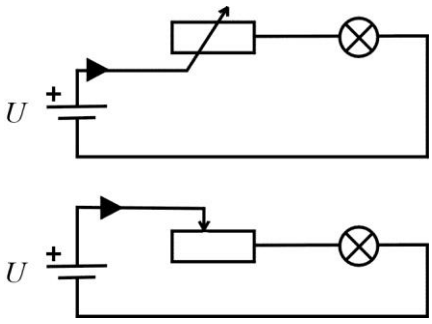
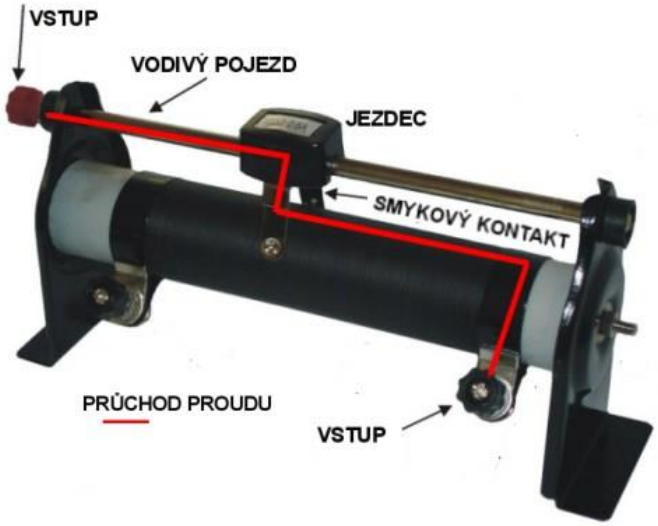
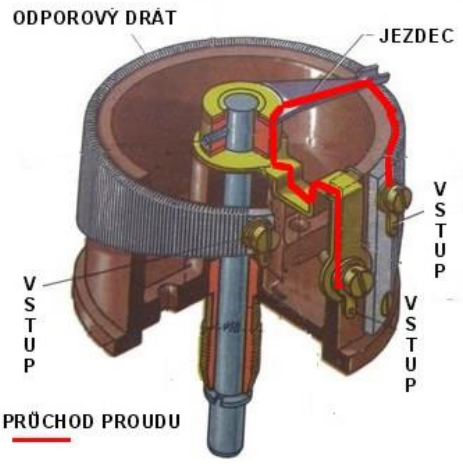


schéma obvodu s reostatem



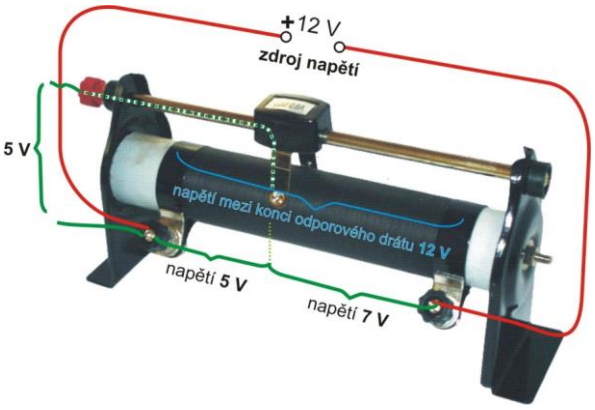
V principu stejné a technicky podobné provedení představuje tzv. potenciometr, kde je odporový drát namotán místo na válci na prstenci, jak ukazuje obrázek.



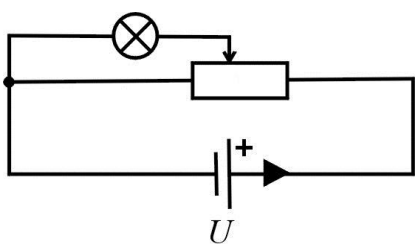
Regulace napětí děličem napětí

Součástky, které popisuje předcházející odstavec, můžeme v jiném zapojení do obvodu použít k regulaci napětí.

Fungování děliče napětí je vidět na obrázku vpravo. Napětí 12 V mezi konci odporového drátu je rozděleno na napětí 5 V mezi levým koncem a jezdcem (výstup červená horní zdířka a levá dolní zdířka) a na napětí 7 V (výstup červená horní zdířka a pravá dolní zdířka).



Na obrázku vpravo je schéma obvodu, kde je děličem možné měnit plynule napětí na žárovce, a tím měnit její jas.



ÚLOHY:

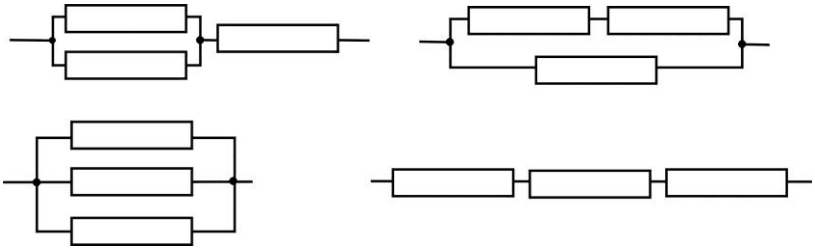
1. Jaký odpor bude mít hliníkový vodič, jenž má průřez (tj. obsah kolmého řezu) 25 mm^2 a délku 5 km?

2. Konstantanový drát o průměru 3,6 mm má odpor 6,25 Ω. Jakou má délku?

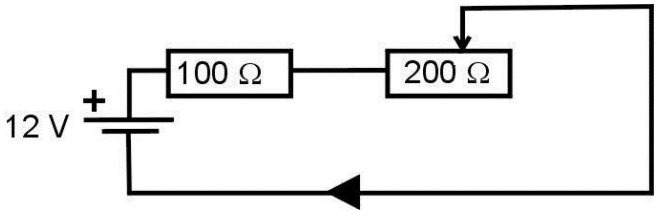
3. Měděné vedení má průřez S_{Cu} = 0,3 mm^2. Jaký průřez S_{Al} musí mít stejně dlouhé vedení z hliníku, aby mělo stejný odpor?

4. Nakreslete schéma zapojení tří stejných rezistorů o odporu R_1 = 12 Ω, aby odpor soustavy byl R = 8 Ω.

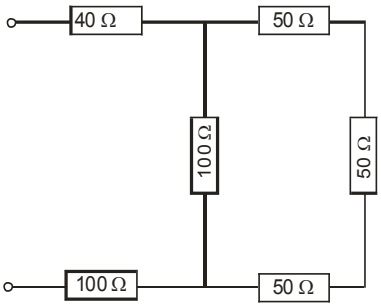
Vyberte výpočtem ze 4 možností:



5. Jaký je nejvyšší a nejnižší proud můžeme nastavit potenciometrem v obvodu podle schématu? Jaký proud poteče obvodem, když je jezdec uprostřed?



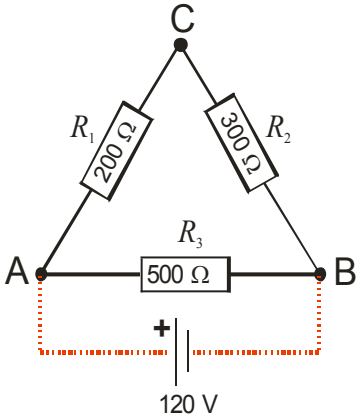
6. Vypočítejte výsledný odpor sítě šesti rezistorů.



7. Tři rezistory jsou zapojeny podle schématu na obrázku. Určete proudy všemi rezistory a napětí na všech rezistorech, je-li zdroj připojen

a) mezi body A a B b) mezi body B a C c) mezi body A a C.

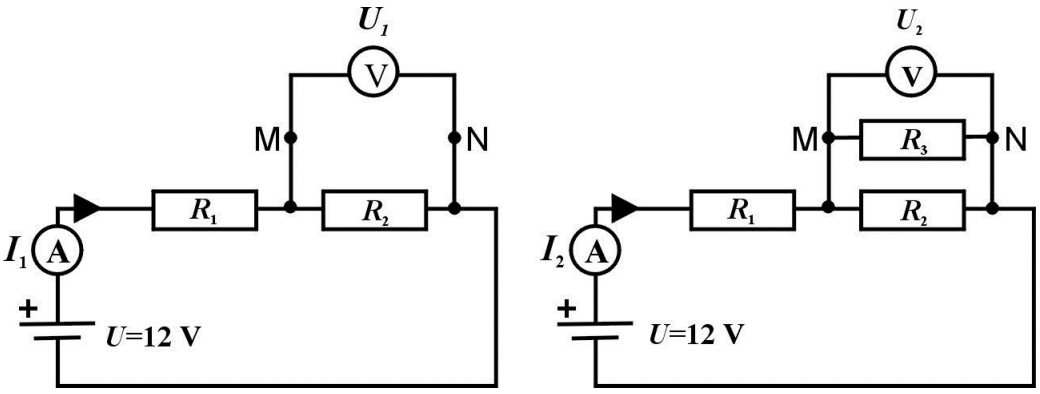
Určete celkový proud odebíraný z baterie a celkový odpor.



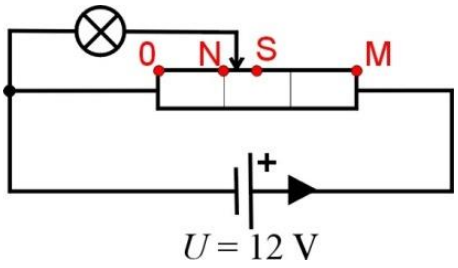
8. V elektrickém obvodu podle obrázku jsou dva stejné rezistory o odporech $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$, napětí zdroje $U = 12$ V.

a) Jaký proud I_1 naměří ampérmetr a jaké napětí U_1 voltmetr?

b) Mezi body M a N zařadíme třetí stejný rezistor o odporu $R_3 = 100\ \Omega$. Jaký proud I_2 naměří nyní ampérmetr a jaké napětí U_2 voltmetr?



9. Jak se bude měnit jas žárovky v obvodu sestaveném podle schématu na obrázku, posuneme-li jezdec děliče vpravo? Jaké bude napětí U_M na žárovce, když bude jezdec v bodě M? Jaké napětí U_S bude na žárovce, když bude jezdec ve středu S? Jaké bude napětí U_N na žárovce, když bude jezdec v bodě N? Jaké bude napětí U_0 na žárovce, když bude jezdec v bodě 0 ?

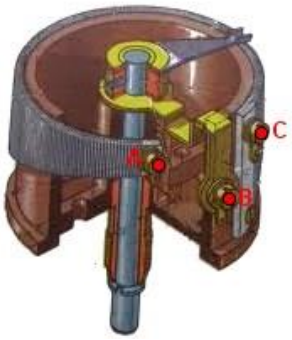


10.

Ke kterým z bodů A, B, C děliče napětí má být připojen zdroj napětí?

a) Ke kterým z bodů A, B, C děliče napětí má být připojen spotřebič, aby při otáčení jezdcem proti směru hodinových ruček napětí na spotřebiči rostlo?

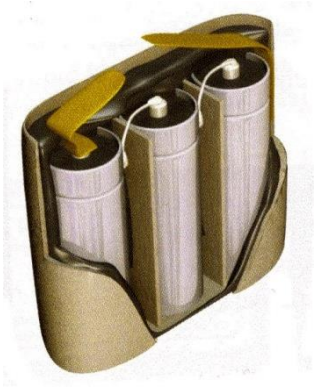
b) Ke kterým z bodů A, B, C děliče napětí má být připojen spotřebič, aby při otáčení jezdcem proti směru hodinových ruček napětí na spotřebiči klesalo?



ZAPOJOVÁNÍ ZDROJŮ

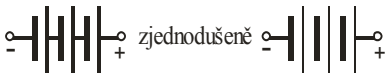
Když si prohlédneme plochou baterii, u které jsme odstranili horní kryt, uvidíme, že ji tvoří 3 články. Drátky, jimiž jsou propojeny, spojují vždy střední kladnou uhlíkovou elektrodu se zinkovým pláštěm, který je kladnou elektrodou. Měření voltmetrem nám potvrdilo, že jednotlivé nabité články mají napětí 1,5 V, zatímco celá baterie má trojnásobné napětí.

Stejně jsou propojeny jednotlivé články v baterce nebo v akumulátoru.



V akumulátoru na obrázku je spojeno 10 NiFe článků, z nichž každý má napětí 1,2 V, tj. celkem 12 V.

Schematická značka zapojení 3 článků za sebou (sériově) je na obrázku.



Takovému zapojení říkáme stejně jako u rezistorů zapojení za sebou – sériové.

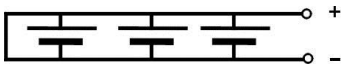
Pro výsledné napětí *U* baterie se třemi články za sebou platí: $U = U_1 + U_2 + U_3$ a obdobně pro více článků.

Důležité upozornění!!! Nesmíme u článku přímo spojit jeho kladný pól s jeho záporným pólem, ani krajní póly baterie.

Vytvořili bychom krátké spojení a velký proud by v krátké době články zničil.

Méně časté zapojení článků je zapojení vedle sebe – paralelně. Je možné ho použít v případě, že potřebujeme získat ze dvou stejných zdrojů krátkodobě větší proud, nebo zvětšit „výdrž“ zdroje. Napětí takového zdroje je stejné jako napětí jeho jednotlivých částí.

Schematická značka zapojení 3 článků vedle sebe (paralelně) je na obrázku.



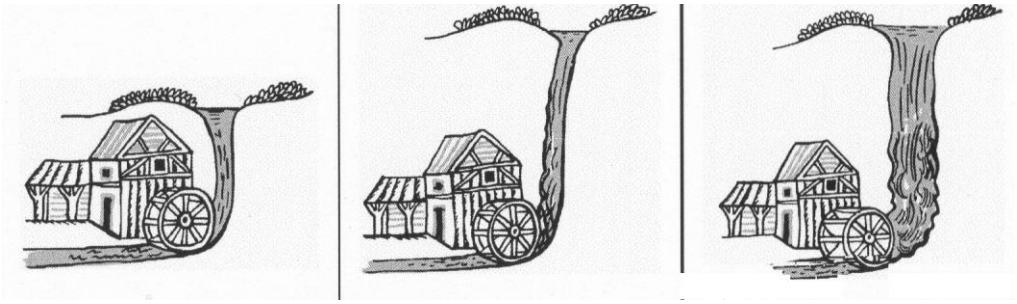
I stejné články není vhodné zapojovat vedle sebe, pokud nejsou stejně vybité, protože pak nemají přesně stejné napětí a více nabitý článek se přes méně nabitý vybíjí. Raději se proto takovému spojení vyhýbáme.

VÝKON ELEKTRICKÉHO PROUDU

I při hledání odpovědi na tuto otázku nám pomůže srovnání elektrického proudu s proudem vody.

Na čem závisí výkon, který můžeme získat z proudící vody? Bude to patrně dáno jednak množstvím protékající vody. Elektrárny se nestavějí na malých potůčcích, nýbrž na řekách s větším průtokem. Výkon elektrárny postavené na řece ale bude jistě záviset na rozdílu hladin nad a pod elektrárnou. Vždyť to určuje, s jakou energii voda na turbínu odevzdává.

Výkon vodních elektráren tedy závisí jednak na průtoku a jednak na rozdílu hladin.



voda padá z výšky 3 m 200 litrů za sekundu	voda padá z výšky 6 m 200 litrů za sekundu	voda padá z výšky 6 m 600 litrů za sekundu

Orlická přehrada na Vltavě pracuje s průtokem až 600 krychlových metrů za sekundu při rozdílu výšky vodních hladin (spádu) 70 metrů a má špičkový výkon téměř 400 MW.

Vzpomeňte si, že množství protékající vody za sekundu jsme přirovnávali k elektrickému proudu a rozdíl hladin má u vodního toku podobný význam jako elektrické napětí.

Proto u elektrického proudu očekáváme správně vztah:

výkon elektrického proudu = elektrický proud · elektrické napětí.

vzorcem:

$P = U \cdot I$ nebo užitím Ohmova zákona $P = \frac{U^2}{R}$ resp. $P = R \cdot I^2$

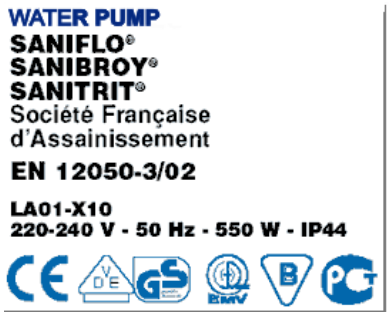
kde P …výkon elektrického proudu spotřebovaný spotřebičem (na konání práce nebo na ohřev apod.) (W)

U … napětí na spotřebiči (V) I … proud spotřebičem (A) R … odpor spotřebiče (Ω)

Poznámka: Někdy se u elektrospotřebičů setkáváme s jednotkou výkonu V.A (voltampér), což je totéž co W (watt).

Skoro na všech elektrických spotřebičích najdeme údaj o elektrickém příkonu. Je to výkon elektrického proudu, který spotřebič ke své činnosti potřebuje. Bývá tam také údaj o napětí, pro něž je spotřebič určen. Téměř nikdy tam ale není údaj o velikosti proudu. Ten teď umíte snadno vypočítat.

Na spodní trojici obrázků jsou údaje o napětí a příkonu vodního čerpadla, žárovky a elektromotoru.



Z hodnot napětí a příkonu na štítcích vychází pro hodnoty proudu:

Pro čerpadlo $I_{ČERPADLO} = \frac{P}{U} = \frac{550\,\mathrm{W}}{230\,\mathrm{V}} = 2{,}4\,\mathrm{A}$ žárovku $I_{ŽAROVKA}$ = 0,17 A, elektromotor I_{MOTOR} = 3,1 A.

U elektromotoru i čerpadla se ovšem příkon mění podle zatížení.

ELEKTRICKÁ ENERGIE

Víme, že výkon elektrického proudu (tak jako jakýkoli výkon) informuje o práci (energii) připadající na časovou jednotku, tj. na 1 sekundu.

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

Z toho je zřejmé, že energie (práce) elektrického proudu za delší čas je dána součinem výkonu a doby *t*, po kterou je daný výkon dodáván:

$$E = U \cdot I \cdot t \quad \text{nebo podle Ohmova zákona} \quad E = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad \text{nebo} \quad E = R \cdot I^2 \cdot t$$

kde

E …. elektrická energie dodaná elektrickým proudem do spotřebiče (J = V·A·s)

U … napětí na spotřebiči (V)

I ….. proud spotřebičem (A)

t …. doba průchodu proudu (s)

R …. odpor spotřebiče (Ω)

V praxi se často používá pro elektrickou energii místo jednotky joule (J) jednotka kilowatthodina.

Kilowatthodina je kilo· watt· hodina = 1000 ·W ·3600 s = 3 600 000 W·s = 3 600 000 J

Účinnost elektrického spotřebiče

Elektrické spotřebiče nevyužijí užitečně všechnu spotřebovanou elektrickou energii.

I v tomto případě hodnotíme úspornost zařízení podle procenta využité energie – účinností.

$$\eta = \frac{využitá\ energie}{dodaná\ elektrická\ energie} = \frac{využitý\ výkon}{dodaný\ výkon\ (příkon)}$$

ÚLOHY:

1. Doplňte chybějící údaje v tabulce:

Spotřebič	Napětí $\frac{U}{\mathrm{V}}$	Proud $\frac{I}{A}$	Odpor $\frac{R}{\Omega}$	Příkon $\frac{P}{\mathrm{W}}$
1. Žárovka I	4,0		20,0	
2. Žárovka II	120,0	0,25		
3. Žárovka III	220,0			55,0
4. Žehlička I	120,0			360,0
5. Žehlička II		2,0		440,0
6. Televizor	220,0	0,72		
7. Vysavač		1,35	156,0	
8. Elektrická kamna I	120,0		30,0	
9. Elektrický zářič		4,0	55,0	
10. Ždímačka	220,0			130,0
11. Odporová pec	220,0	37,7		
12. El. lokomotiva		50,0	60,0	

2. Jaký proud prochází žárovkou 100 W/ 240 V?

3. Na jaké maximální napětí U_{max} může být připojen rezistor 12 Ω/ 3 W? Jaký snese maximální proud?

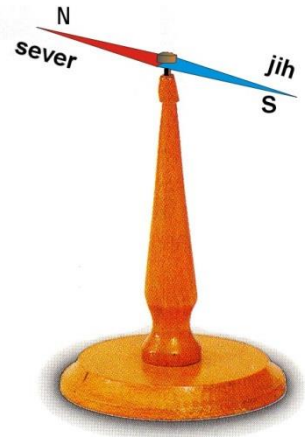
4. Porovnejte elektrický proud $I_{ŽAROVKA}$ žárovkou 240V/40 W a žárovičkou $I_{ŽAROVIČKA}$ do baterky 3,5 V/ 0,6 W.

5. Jakou energii E (v joulech a kilowatthodinách) spotřebuje varná konvice 1,5 kW/240V při provozu Δt = 4 minuty?
   a) Jak velký proud I prochází konvicí?
   b) Jak velký elektrický náboj Q „proteče“ topným tělískem konvice?
   c) Jak velká je účinnost ohřevu η, jestliže se při tom ohřál 1 litr vody v konvici o $\Delta T = 70\ ^{o}C$?

2. ELEKTRODYNAMIKA

MAGNETY

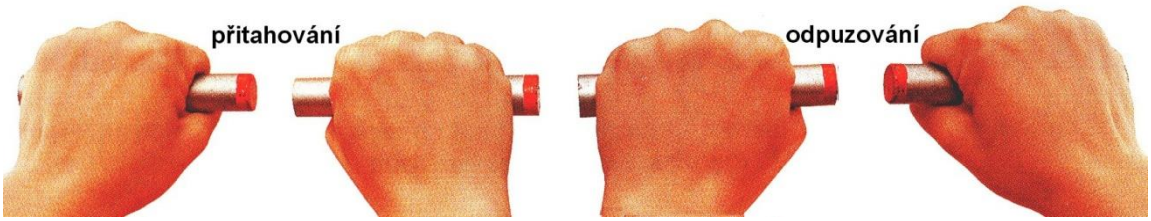
Jistě všichni znáte kovové stálé magnety a některé jejich vlastnosti.



Nejvíce přitahují ocelové hřebíčky konce magnetu, tzv. póly magnetu.

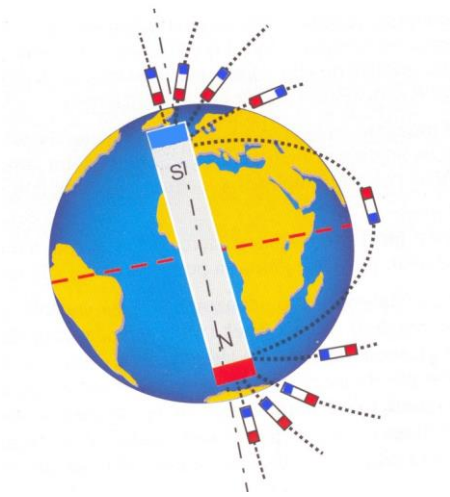
Póly magnetu označujeme písmeny N (north – sever) a S (south – jih) podle toho, jak se magnet natočí, když se může vodorovně otáčet.

Dva magnety se přitahují, když jsou k sobě natočeny opačnými póly. Když jsou u sebe souhlasné póly, pak se magnety odpuzují.



Tato vlastnost znamená, že když je magnetka přitahována tak, že její červený pól N míří severně, musí být u severního zeměpisného pólu zemský „modrý“ magnetický pól - tedy jižní magnetický pól.

(Nesmí nám vadit, že zeměpisci se s tím nechtějí smířit a na mapách označují magnetický pól Země jako severní, i když u magnetky souhlasí, že pól mířící k severu je severní.)

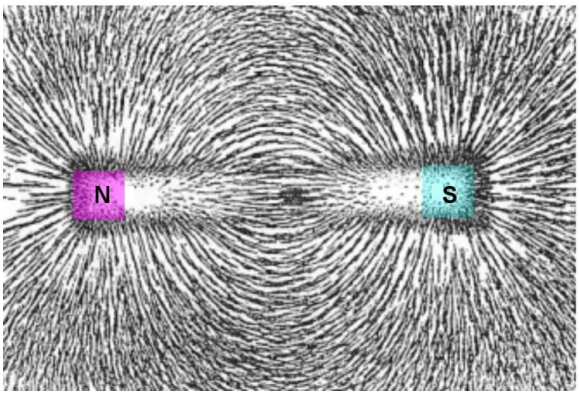


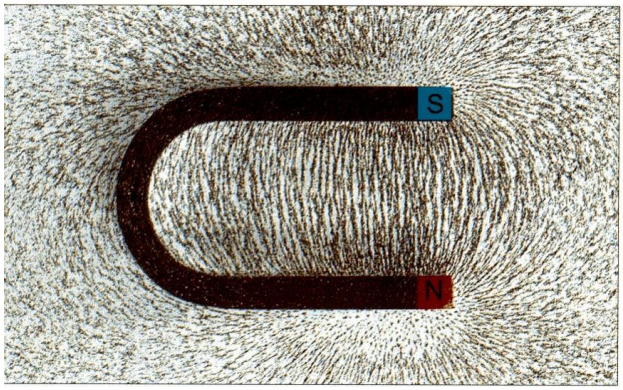
Už jsme poznali, že působení gravitace na dálku je zprostředkováno **gravitačním polem** kolem Země.

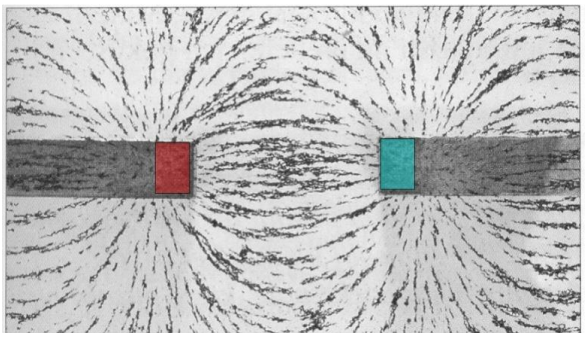
Působení nabitých těles je vyvoláno **elektrickým polem**, které je obklopuje.

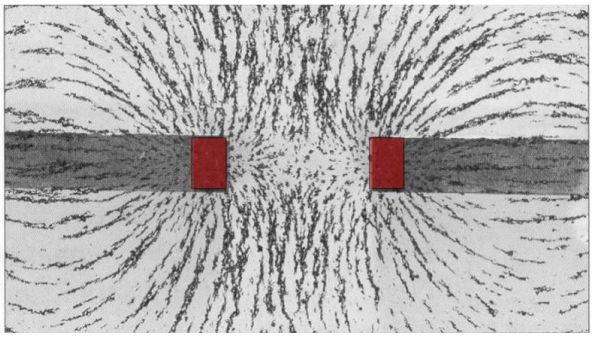
Také za působením magnetů je ukryto **magnetické pole**, jež kolem sebe magnety vytvářejí.

Podobně jako jsme stopovali elektrické pole krupicí v oleji, zviditelnili jsme průběh magnetického pole ocelovými pilinami.









Piliny se v magnetickém poli zmagnetovaly, staly se magnetickými dipóly a zřetězily se. Vymodelovaly tak průběh magnetických siločar. Abychom odlišili magnetické siločáry od siločar pole gravitačního a elektrického, nazýváme je **indukční čáry**. Také u indukčních čar volíme jejich směr, i když **jsou to uzavřené křivky**.

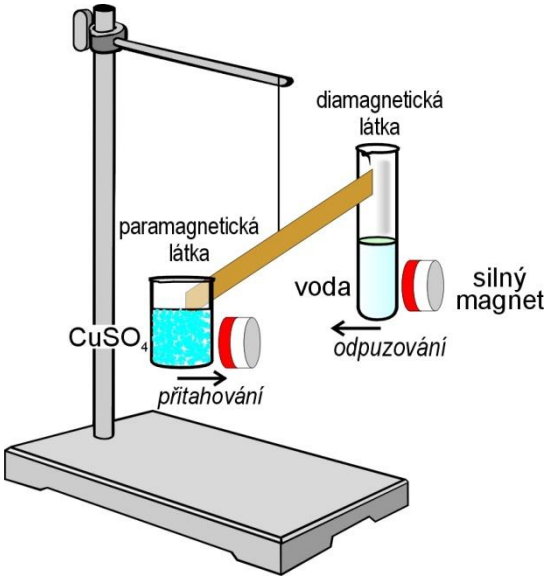
Indukční čáry orientujeme tak, že vystupují ven z pólu severního a vstupují do jižního pólu magnetu.

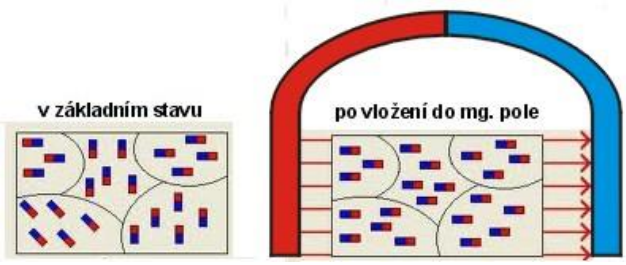
Proč na některé látky magnety působí, zatímco u ostatních takové působení nepozorujeme?

Zjednodušený model vypadá takto: Elektrony v atomech všech látek vytvářejí elementární magnetická pole. Tato pole se skládají a vytvářejí výsledné magnetické pole atomu. Podle uspořádání částí pak může dojít k různému výsledku.

Diamagnetické látky (např. uhlík, měď, síra, zlato, voda) jsou složeny z částic, jejichž výsledný magnetismus je nulový. Pokud se diamagnetická látka ocitne v magnetickém poli, změní se poněkud uspořádání elektronových obalů atomů látky, vzniknou magnetické dipóly, jejichž magnetické pole působí **proti** směru vnějšího magnetického pole. Od magnetu jsou proto slabě odpuzovány.

Paramagnetické látky (hliník, platina, modrá skalice) jsou z atomů nebo molekul, které mají magnetické vlastnosti. Náhodná orientace částicových magnetů způsobená jejich tepelnými kmity ale způsobuje celkový nulový magnetismus. Když se látka dostane do magnetického pole, dojde k částečnému natáčení jejich dipólů **do směru** vnějšího magnetického pole. Látka je proto magnetem slabě přitahována.



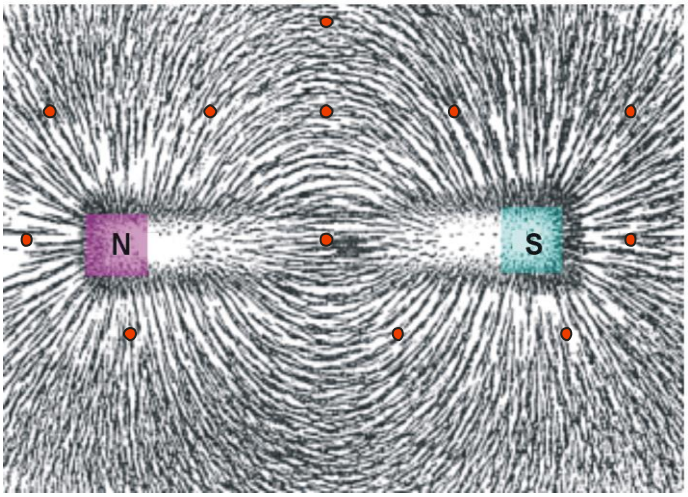


Ve **feromagnetických látkách** (železo, kobalt, nikl a některé slitiny) vznikají ostrůvky (tzv. magnetické domény), v nichž jsou částicové magnety shodně nasměrovány.

Dostane-li se taková látka do magnetického pole, zvětšují se tyto oblasti. Při silném poli se celé oblasti skokem natáčejí do směru vnějšího magnetického pole. Někdy dojde až k úplnému „učesání“ domén, jak ukazuje schematický obrázek. Proto magnety takové látky silně přitahují.

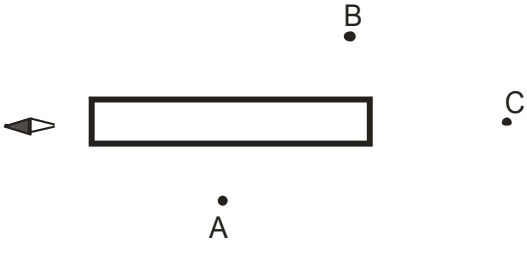
ÚLOHY:

1. Jak se natočí magnetka v bodech vyznačených červeně na obrázku?

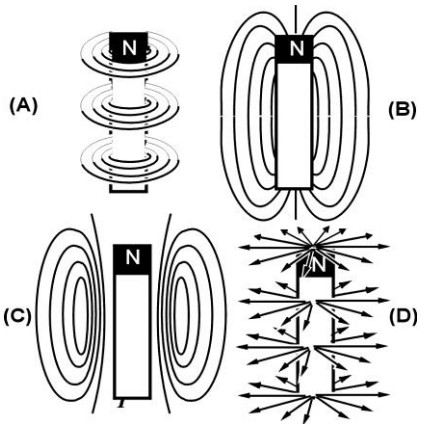


2. Navrhněte, jakými způsoby by bylo možné narušit magnetické domény a jejich „učesání“, to znamená odmagnetovat zmagnetovaný předmět.

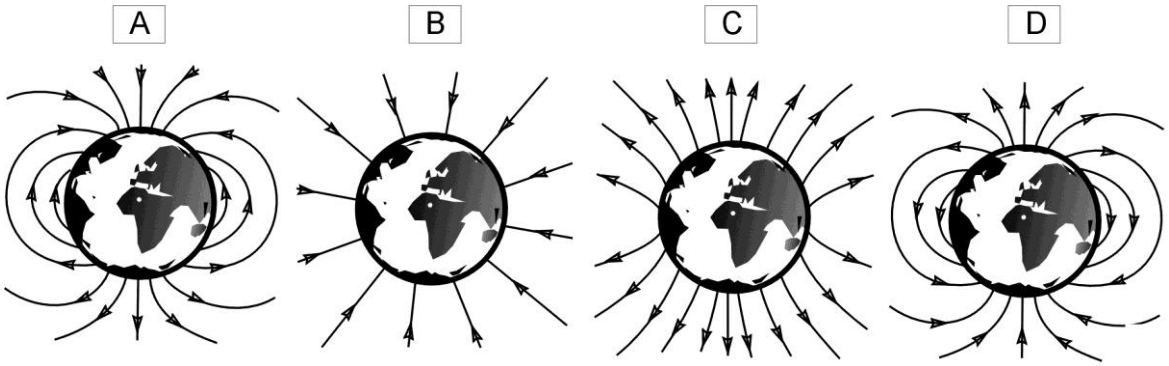
3. Určete póly magnetu. Nakreslete, jak se natočí magnetky v bodech A, B a C.



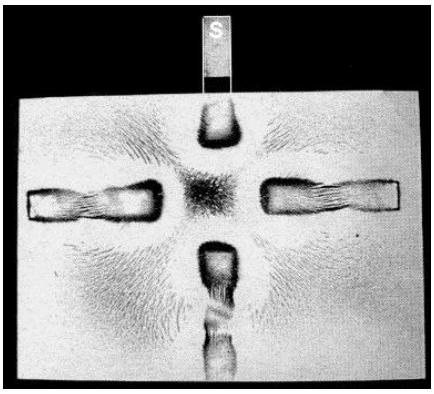
4. Vyberte z obrázků **(A), (B), (C), (D)** ten, na kterém je nejlépe zakresleno magnetické pole tyčového magnetu.

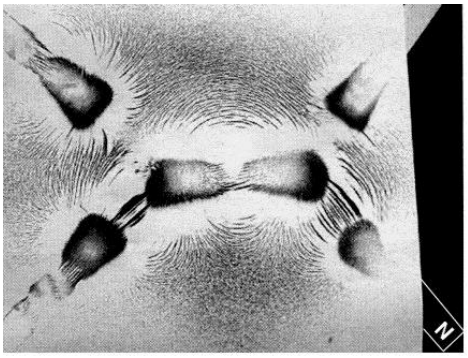


5. Vyberte z obrázků **(A), (B), (C), (D)** ten, na kterém je nejlépe zakresleno magnetické pole Země.

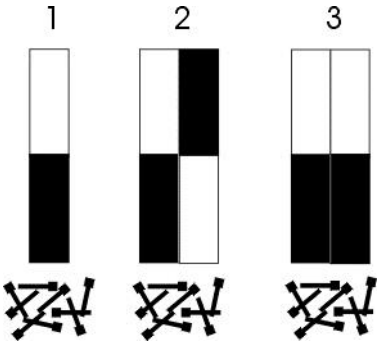


6. Podle průběhu indukčních čar určete póly všech magnetů

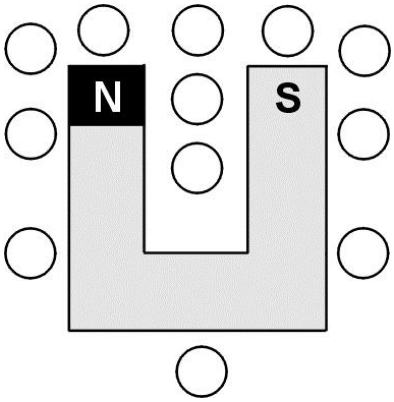




7. Ve které situaci se přitáhne nejvíce špendlíků a ve které nejméně?



8. Dokreslete natočení magnetek ◅► kolem U magnetu.



MAGNETICKÉ POLE VODIČŮ S PROUDEM

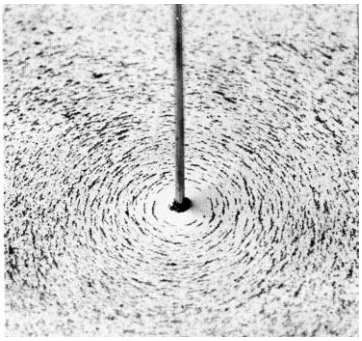
Již víme, že všechny kovy jsou tvořeny ionty uspořádanými do pravidelných staveb. Kromě elektronů vázaných jadry v kovech existují volné „toulavé“ elektrony vytvářející tzv. „elektronový plyn“. Tyto elektrony rejdí neuspořádaně, chaoticky mřížkou tvořenou ionty.

Vynořuje se tím otázka: Pohybující elektrony vytvářejí ve svém okolí magnetická pole. Proč ale magnetické pole za běžných podmínek, např kolem měděného drátu, nepozorujeme?

Odpověď jste našli sami. Pohyb elektronů je zcela chaotický – magnetická pole se v součtu vzájemně vykompenzují.

To provokuje další otázku: Je možné docílit situace, aby k vyrušení nedošlo? I zde jste nalezli odpověď.

Připojením drátu ke zdroji elektrického napětí, např. k baterii, dojde k tomu, že pohyb elektronů přestane být zcela neuspořádaný. Převládne pohyb směrem ke kladnému pólu baterie, a tak vznikne kolem vodiče nenulové magnetické pole.



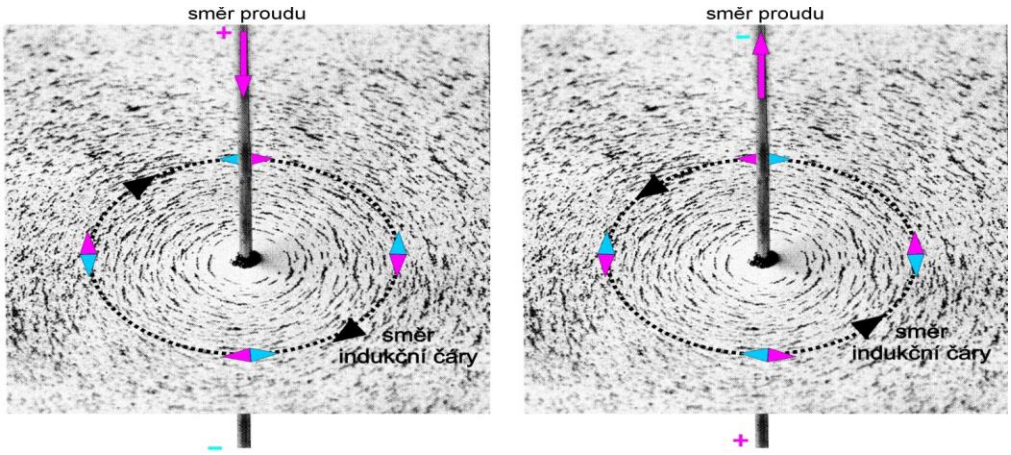
Pokusem, který je na obrázku, jsme svou hypotézu potvrdili.

Výsledek ukazuje současně i pravdivost tvrzení, že indukční čáry popisující magnetické pole jsou uzavřené křivky. U přímého vodiče jsou to kružnice se středem na vodiči, rovina čar je vždy kolmá na vodič.

Zbývá ještě určit směr indukčních čar. Magnetické póly Země, jenž nám pomáhaly u magnetů, nemáme k dispozici.

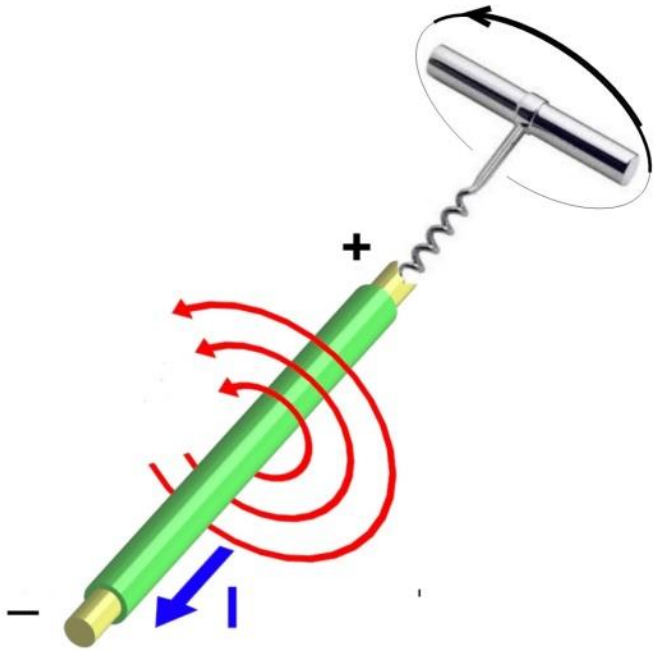
Použili jsme proto malou magnetku, kterou jsme postavili vedle drátu.

Výsledek ukazují dvojice obrázků.



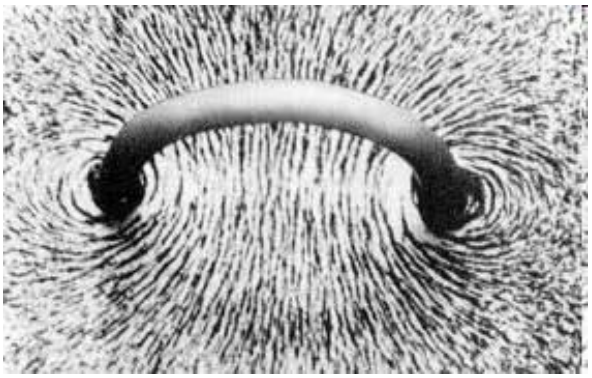
K určování orientace indukčních čar slouží různá pravidla. My budeme používat tzv. **pravidlo vývrtky**.

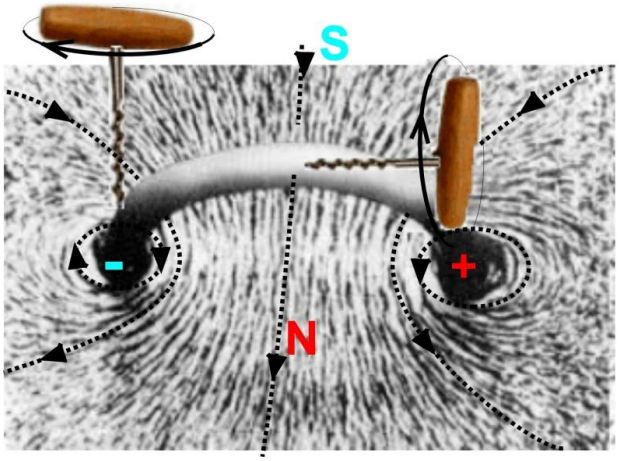
Zavrtáváme-li vývrtku do směru proudu, smysl otáčení vývrtky ukazuje orientaci indukčních čar.



MAGNETICKÉ POLE KRUHOVÉHO ZÁVITU

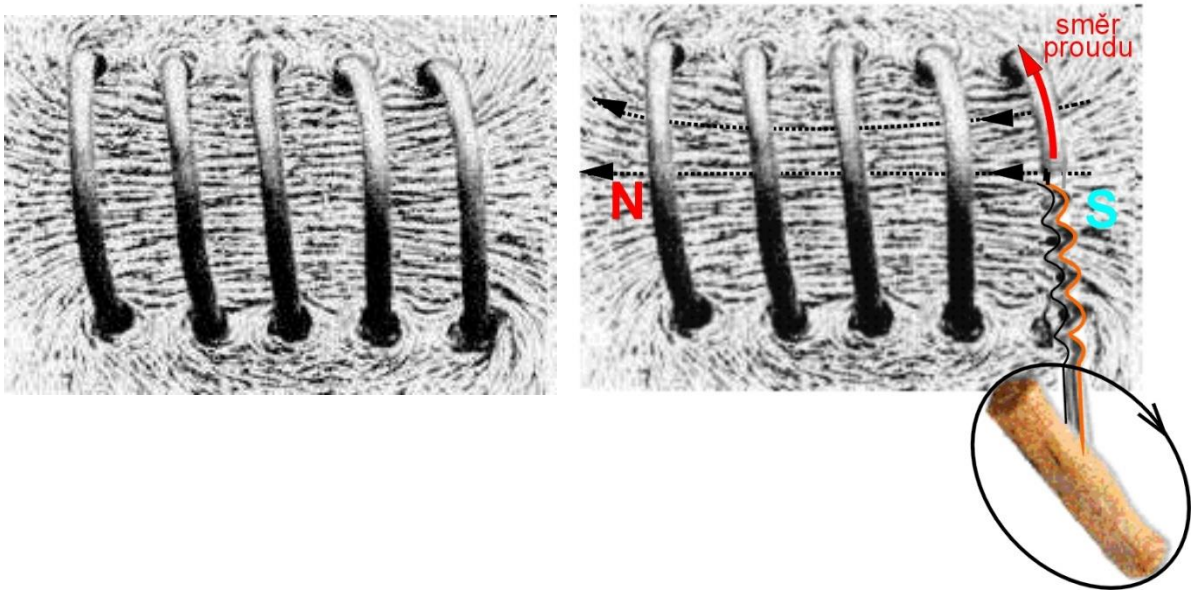
I v tomto případě nám průběh indukčních čar zviditelnily ocelové piliny. K určení orientace indukčních čar znova posloužila vývrtka.





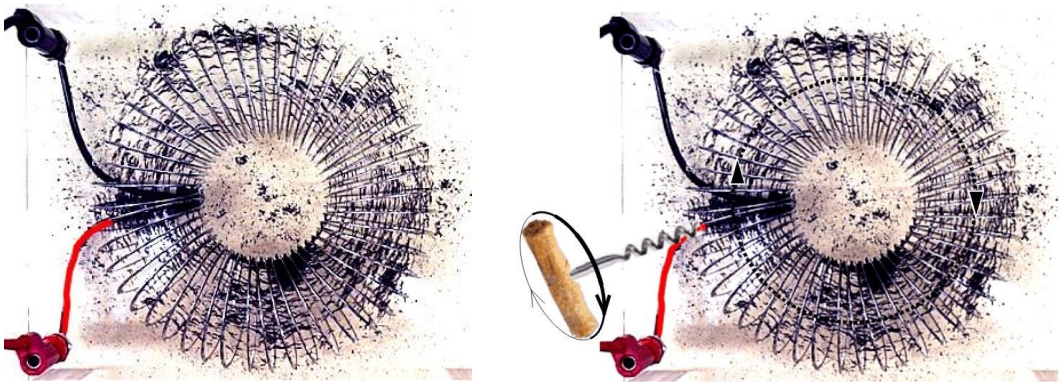
MAGNETICKÉ POLE CÍVKY

Totéž pro cívku s proudem.



MAGNETICKÉ POLE TOROIDU

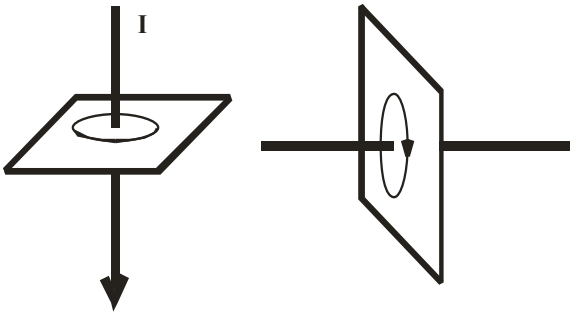
Podobně zjistíme průběh magnetického pole a orientaci indukčních čar u toroidu.



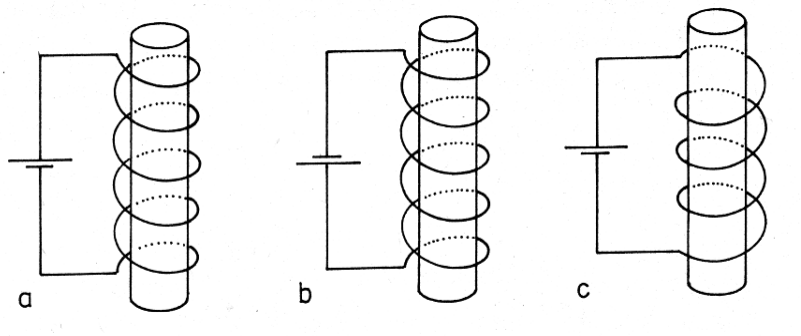
ÚLOHY:

1. U levého obrázku určete orientaci indukční čáry.

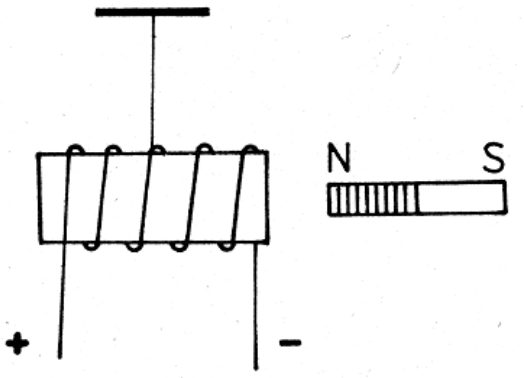
   U pravého obrázku určete směr proudu.



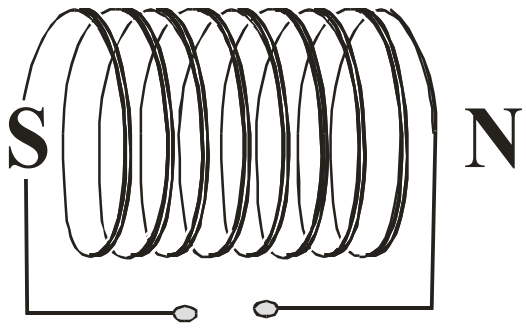
2. Určete póly cívek s proudy:



3. Určete magnetické póly cívky a rozhodněte, zda bude magnet cívku přitahovat, nebo odpuzovat.

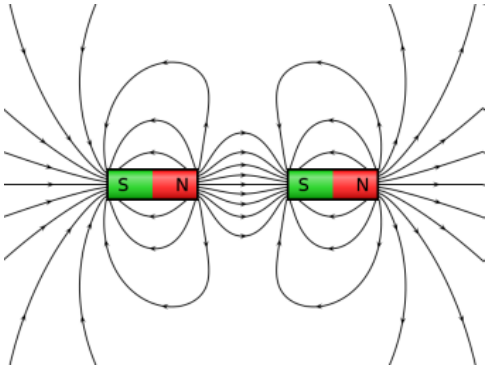


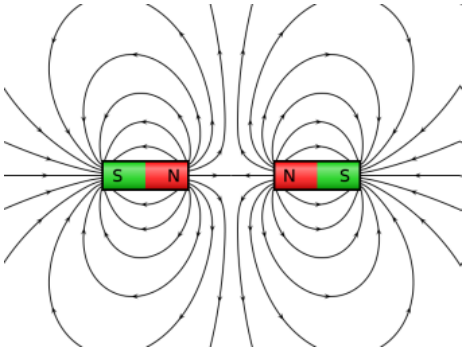
4. Určete směr proudu a póly zdroje napětí.



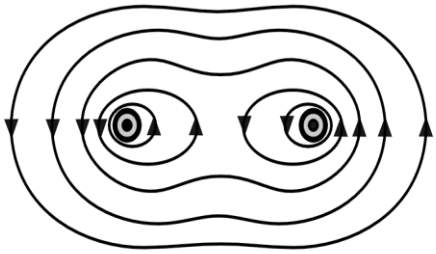
SILOVÉ PŮSOBENÍ MAGNETICKÉHO POLE NA VODIČE S PROUDEM

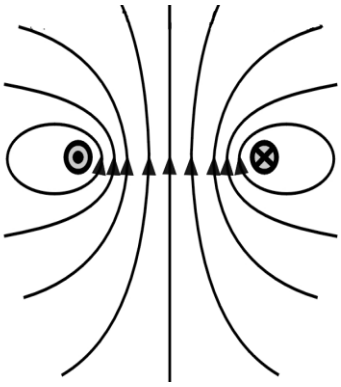
Pilinové obrazce, kterými jsme mapovali magnetická pole tyčových magnetů, nám ukázaly magnetické indukční čáry jako neviditelné ručičky. Ty působí podélně přitažlivými silami, zatímco do stran působí odpudivě, jako by se odstrkovaly lokty...





Podobné situace pozorujeme i v případě, že svými magnetickými poli na sebe působí vodiče s proudem.

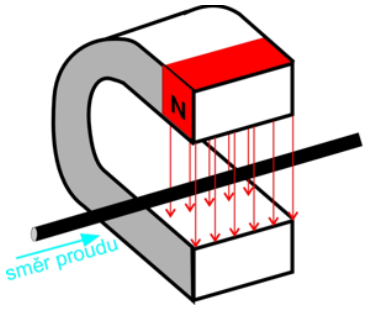


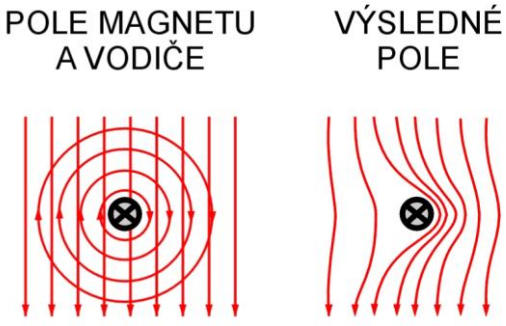


U vodičů se souhlasnými směry proudu se v oblasti mezi vodiči pole zeslabují. Vnější silnější pole tlačí vodiče k sobě.

U vodičů s opačnými proudy se v oblasti mezi vodiči pole zesilují, pole odtlačuje vodiče od sebe.

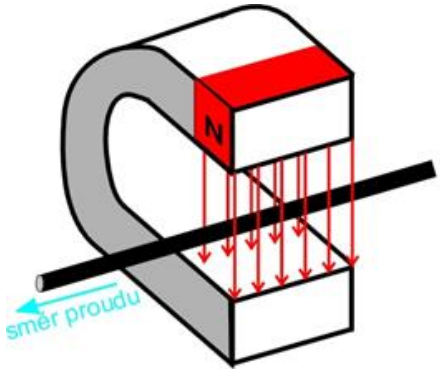
Také působení pole podkovovitého magnetu na přímý vodič probíhá stejně:

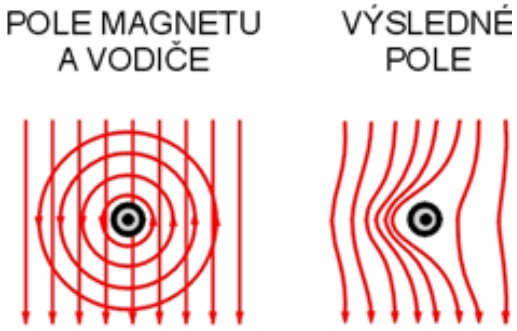




Na levé straně jsou pole opačnš orientovaná a zeslabují se. Vpravo od vodiče míří indukční čáry pole magnetu i vodiče směrem dolů a „zahušťují“ pole. Vodič je vtlačován do magnetu.

Při změně proudu v opačný směr bude i silové působení opačného směru.





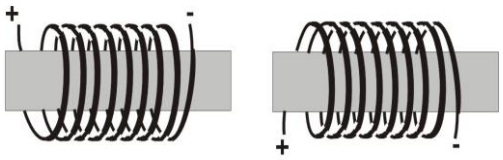
Zajímavá situace nastane, pokud vodič s proudem směřuje ve směru indukčních čar pole magnetu. Výsledné magnetické pole obklopující vodič je ze všech stran stejné, a proto na vodič silově nepůsobí.

To stojí za zapamatování!

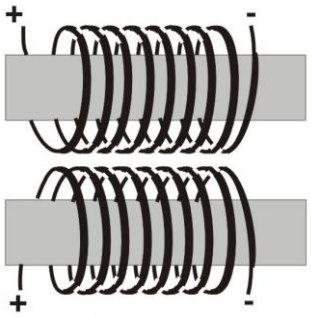
Magnetické pole nepůsobí na vodič s proudem, pokud vodič směřuje podél indukční čáry.

ÚLOHY:

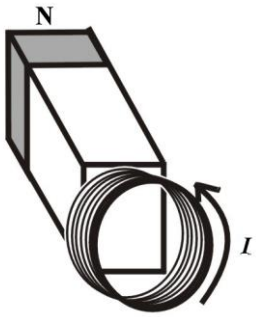
1. Jak na sebe budou působit cívky na obrázku?



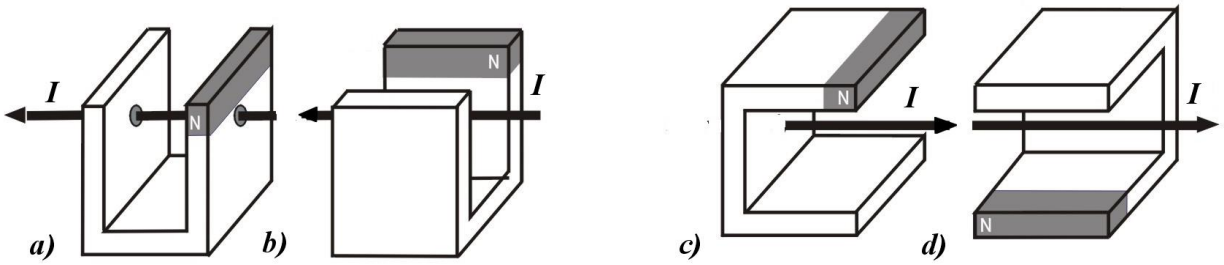
2. Jak na sebe budou působit cívky na obrázku?



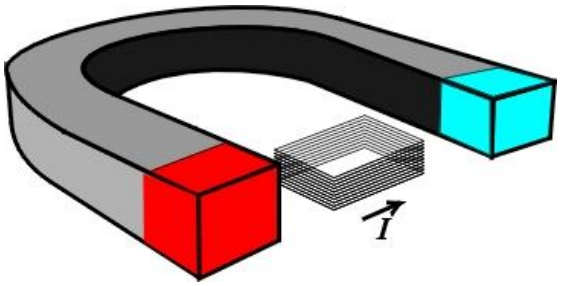
3. Jak bude silově působit pole magnetu na cívku s proudem?



4. Rozhodněte, jakým směrem bude působit magnetické pole magnetu na úsek vodiče, který do pole zasahuje.



5. Jak působí pole magnetu na cívku s proudem, umístěnou, jak ukazuje obrázek?



VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETŮ

Magnetické upínání

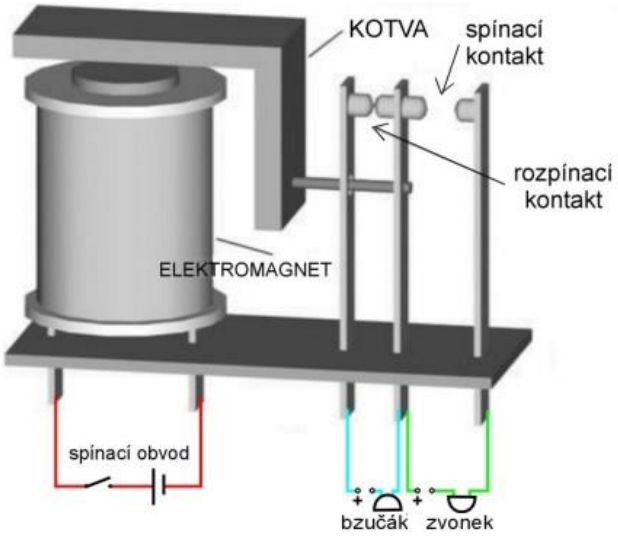
Ocelové předměty se na některých obráběcích strojích uchycují pomocí silných elektromagnetů, umístěných pod povrchem upínací desky.

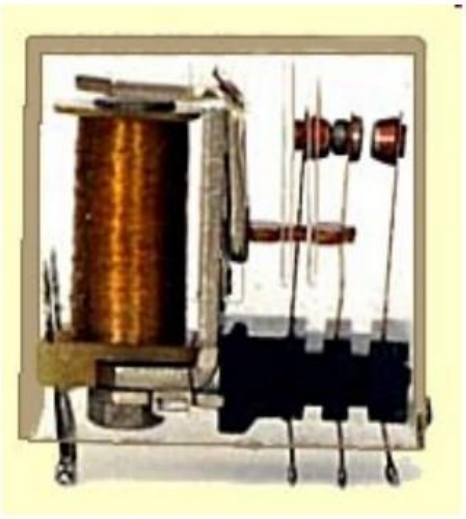
Elektromagnetický jeřáb

Na jeřábu je zavěšen silný elektromagnet, zpravidla ve tvaru zvonu. Pokud jeho cívkou prochází proud, elektromagnet přitahuje ocelové předměty a jeřáb je může přenášet bez dalšího upevňování.

Elektromagnetické relé

Relé se skládá z elektromagnetu a jednoho nebo několika kontaktů, jak ukazuje obrázek. Průchodem proudu cívkou se přitáhne k jádru kotva, a ta rozpojí rozpínací kontakty a spojí kontakty spínací. Po vypnutí proudu se kontakty opět vrátí do původního stavu. Na obrázku je relé v zapojení, které jsme použili při školním pokusu.

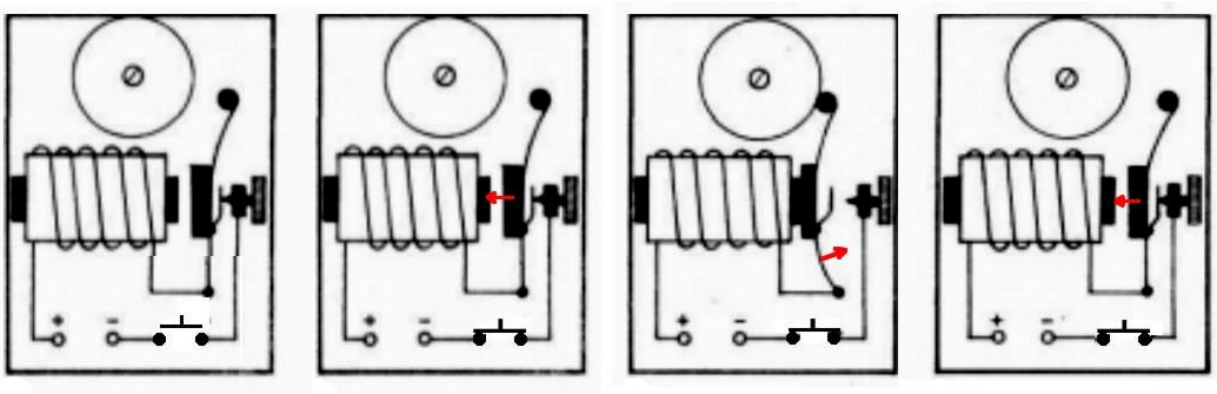




Relé se používá zejména v případech, kdy malým proudem ve spínacím obvodu ovládáme spínání velkých proudů (např. startér automobilu).

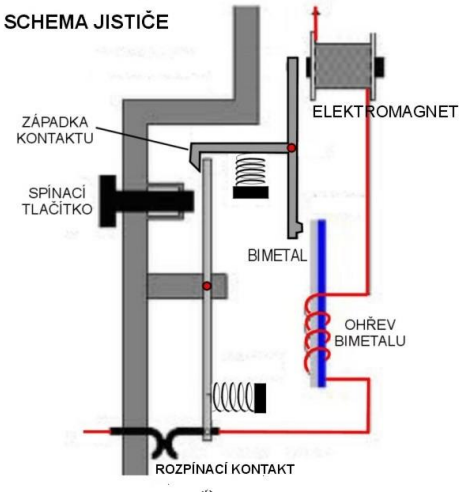
Zvonek

Stisknutím tlačítka začne elektromagnetem procházet proud, jádro se zmagnetuje a přitáhne ocelovou kotvu na pružném pásku. Palička na jeho konci udeří do zvonku a současně se přeruší kontakt. Magnetické pole zanikne, pružný pásek kotvu vzdálí od jádra, obvod se opět spojí a celý děj se opakuje.



Elektromagnetický jistič

Jistič nahrazuje dříve běžné tavné pojistky, např. v bytech. Na obrázku je znázorněn stav, kdy proud postupně prochází rozpínacími kontakty, spirálou bimetalu a cívkou elektromagnetu. Vznikne-li v obvodu zkrat, pak silný proud v elektromagnetu přitáhne kotvu, západka se uvolní, dolní pružina rozpojí kontakty a obvod se přeruší.

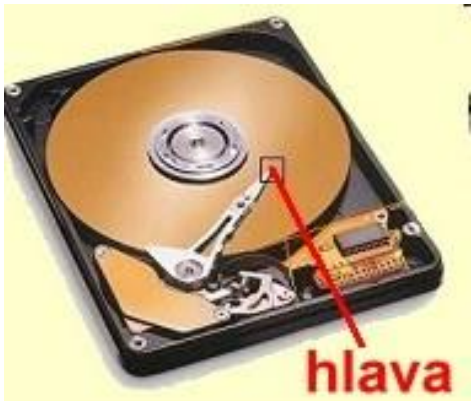


Když při poruše protéká obvodem proud sice jen o málo větší než proud přípustný, ale prochází delší dobu, přetěžuje vodiče a může poškodit elektrické spotřebiče. A protože takový proud někdy nestačí k uvedení elektromagnetu v činnost, má jistič ještě další ochranu. Prochází-li obvodem delší dobu větší proud, než je proud přípustný, bimetal se postupně zahřívá, prohne se vlevo a nadzvedne západku. Tak opět dolní pružina může rozpojí kontakty a přeruší obvod.

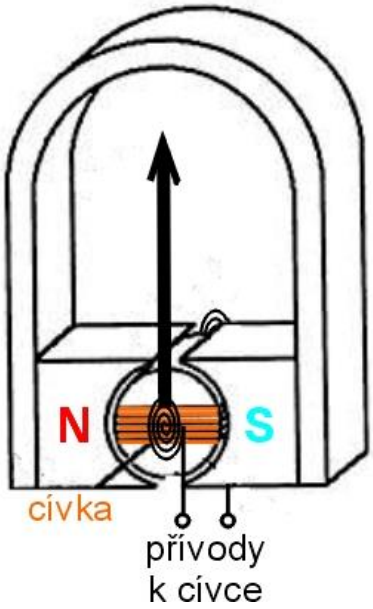
Touto tepelnou ochranou se jistič podstatně liší od pojistky, jež přeruší obvod pouze v případě zkratu, ale ne při i déletrvajícím přetěžovacím proudu, který může poškodit elektrické vedení i elektrické spotřebiče.

Pevný disk

Informace zpracovávané počítačem se ukládají na feromagnetický disk ve formě magnetického záznamu. K záznamu a čtení slouží miniaturní magnetofonová hlava. Podobně se informace uchovávají na disketě, magnetofonovém pásku nebo na videokazetě.



Měřicí přístroj (Deprézský)

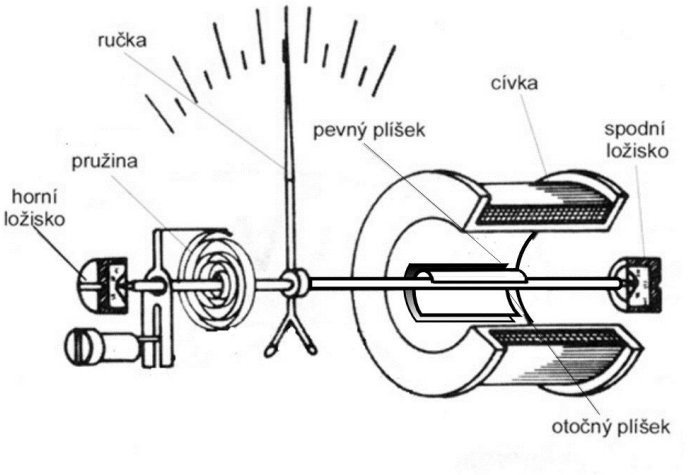


V analogových elektrických měřičích proudu a napětí se využívá působení magnetického pole na cívku s proudem.

V dutině mezi póly magnetu je umístěna otočná cívka, jež je pevně spojena s ukazatelem. S osou cívky jsou pevně spojeny dvě pružné spirálky, které jednak přidržují cívku v nulové poloze, jednak slouží k přivádění proudu do cívky, jednak působí proti stáčení cívky.

Neprochází-li závity cívky proud, je rovina závitů cívky rovnoběžná se směrem indukčních čar magnetického pole magnetu a ukazatel ukazuje doprostřed, kde je nula stupnice. Zavedeme-li do cívky proud, má cívka snahu natočit se tak, aby její severní pól směřoval k jižnímu pólu magnetu. Pružinky pružin se však snaží tomuto pohybu zabránit. Jakmile se účinky sil pružnosti vyrovnají účinkům sil magnetických, pohyb cívky se zastaví a ukazatel ukáže na stupnici určitou výchylku (tím větší, čím silnější proud cívkou prochází).

Měřicí přístroj elektromagnetický



Měřený proud prochází cívkou, v jejíž dutině jsou dva plíšky z magneticky měkké oceli. Jeden plíšek je pevný na vnitřku cívky, druhý otočný, připevněný na ose s ručkou ukazatele. Proudem v cívce se oba pásky souhlasně zmagnetují, odpuzují se a otočný pásek se odchýlí tím víc, čím větší je procházející proud.

ÚLOHA:

Najděte další zařízení, která využívají elektromagnet.

ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE

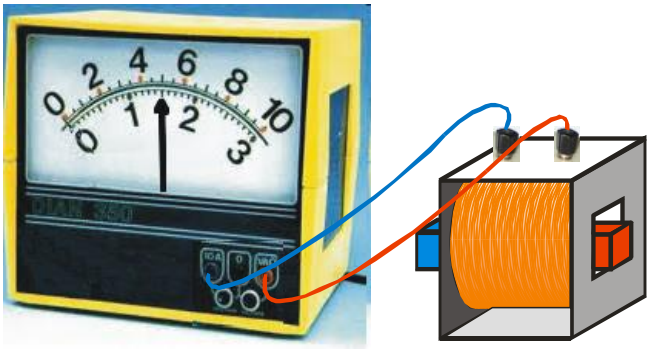
V předcházejících hodinách jsme řadou pokusů potvrdili, že elektrický proud (tj. nabité částice v pohybu) vytváří ve svém okolí magnetické pole. Schematicky zapsáno:

elektrický proud ⇒ magnetické pole

To s sebou přináší otázku, jestli obráceně magnetické pole působící na obvod tvořený vodiči bez zdroje napětí (tj. bez baterie) vyvolává elektrický proud v obvodu. Schematicky zapsáno:

magnetické pole ⇒ elektrický proud

O odpověď, tak jako obvykle, požádáme pokus.



Obvod tvoří jen cívka (bez zdroje napětí) s miliampérmetrem, který je nastaven s nulou uprostřed. Magnetické pole prostupující obvod vytváří magnet zasunutý v cívce. Ručka miliampérmetru ukazující na nulu oznamuje, že druhé tvrzení neplatí.

~~magnetické pole ⇒ elektrický proud~~

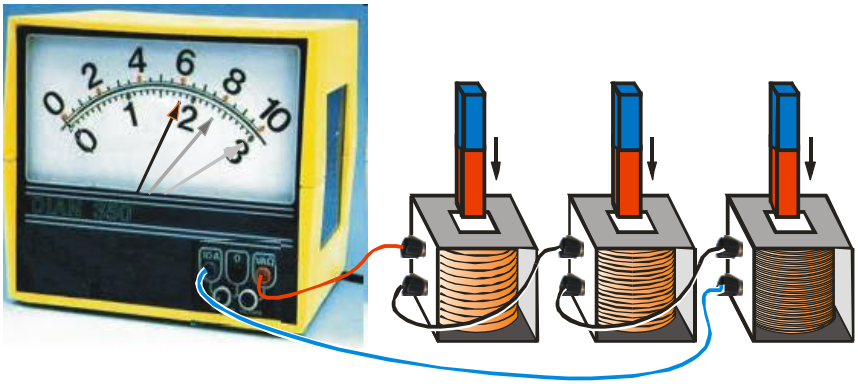
Překvapení nás ale očekávalo v okamžiku, kdy jsme sestavu chtěli rozebrat a magnet jsme z dutiny cívky vytahovali. Ručka miliampérmetru se vychýlila a ukázala tím, že při tom proud obvodu vznikal. Také při následujícím zasunutí magnetu do cívky pohyb ručky (tentokrát na opačnou stranu) opět dosvědčil vznik elektrického proudu v obvodu.

První důležité zjištění: Proud v obvodu vzniká, když se **mění** magnetické pole prostupující obvod.

K dalšímu poznatku jsme došli, když jsme magnet vzdalovali anebo zasunovali různou rychlostí.

Proud v obvodu závisel na rychlosti, s jakou se pole v obvodu měnilo, tj. na **rychlosti změny** magnetického pole. Při větší rychlosti změny byl proud větší.

Do třetice jsme měnící se magnetické pole lapali do různého počtu závitů (jakýchsi las škrtících magnetické indukční čáry). S rostoucím počtem závitů se, při jinak stejných podmínkách, zvětšoval vznikající proud.



Fyzikové mluví o *„indukovaném proudu“* a o *„toku indukčních čar plochou obvodu“*.

Shrneme-li všechny poznatky do jedné formulace, dostaneme **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**:

Indukovaný proud v uzavřeném obvodu je přímo úměrný rychlosti, s jakou se mění tok indukčních čar plochou obvodu.

Tuto přesnou formulaci se nemusíte učit nazpaměť, ale měli byste znát všechny tři podmínky, jež velikost indukovaného proudu spoluurčují:

a) **Změny** magnetického pole v ploše obvodu

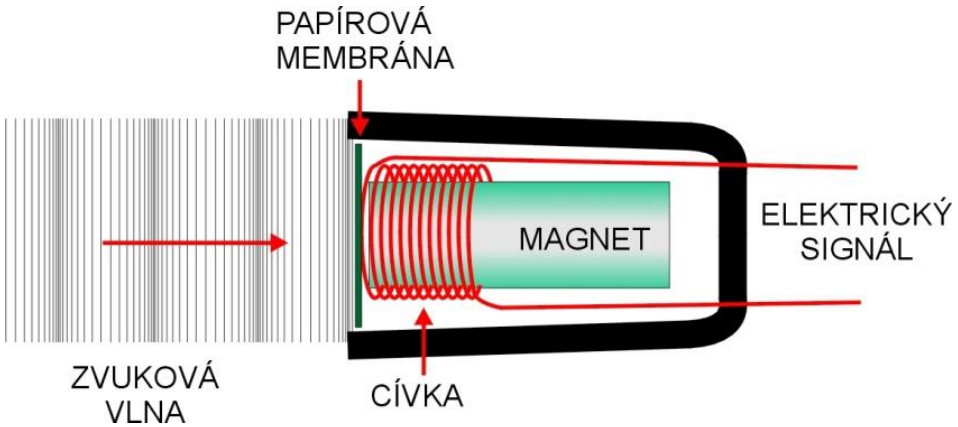
b) **Rychlos**t, s jakou se toto pole zasahující obvod mění

c) Množství **lapených indukčních čar** do všech „las“, kterými obvod magnetické indukční čáry chytá.

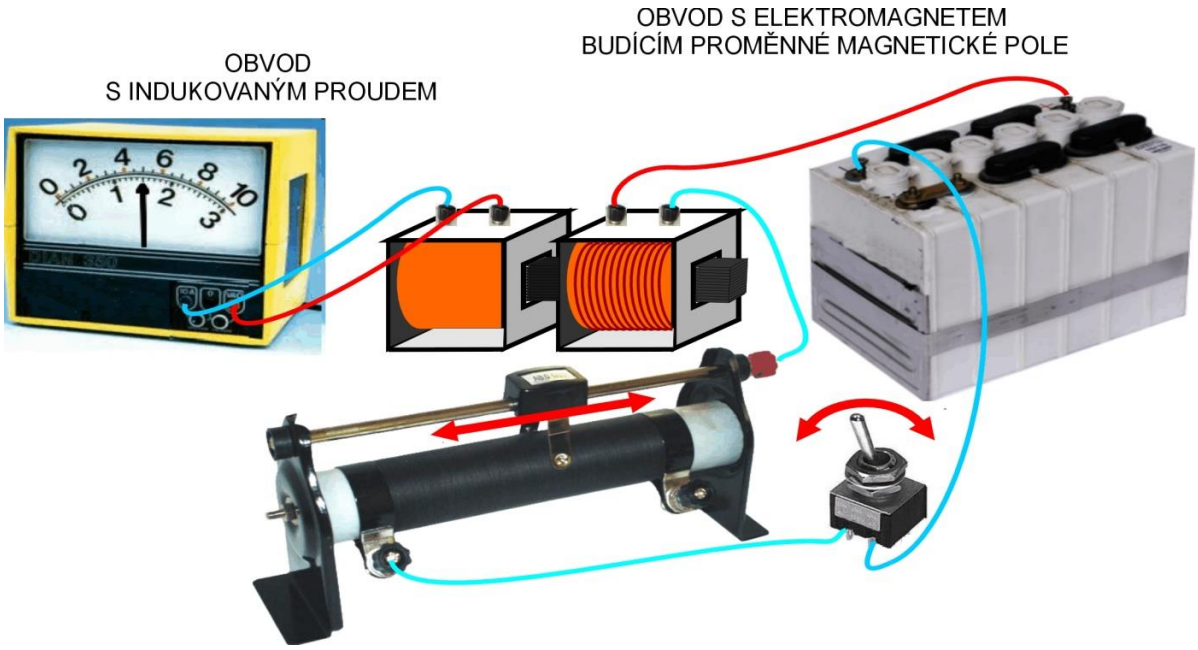
vyzkoušejte applet: http://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_en.html

Je samozřejmé, že předcházející pokusy budou mít průběh úplně stejný, ať změny toku indukčních čar plochou obvodu vyvoláváme pohybem magnetu nebo pohybem cívky.

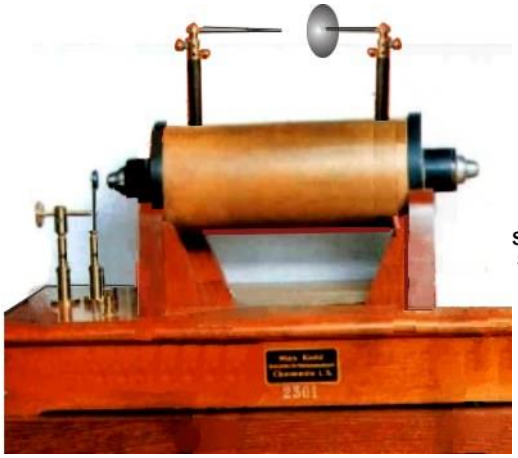
V **mikrofonu** (dynamickém) se elektromagnetické indukce využívá k přeměně zvukového signálu na signál elektrický. Zvuková vlna dopadající na membránu ji rozkmitá a s ní i připevněnou cívku. V cívce, jež je volně pohyblivá na magnetu, se indukuje elektrický signál, který má stejný průběh jako dopadající zvuková tlaková vlna. Po zesílení může být v reproduktoru elektrický signál opět přeměněn na zvuk.

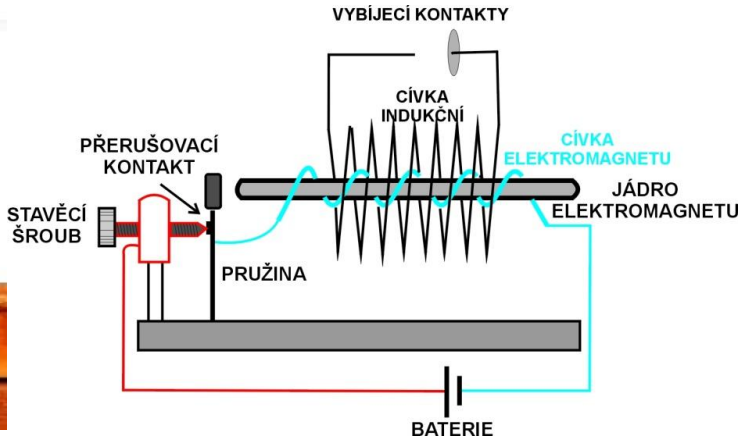


Sami jste ale objevili další možnost, jak vyvolat indukovaný proud, aniž bychom čímkoli pohybovali. Navrhli jste použít místo trvalého magnetu elektromagnet. Změny toku indukčních čar pak můžeme vyvolávat zapínáním a vypínáním proudu do elektromagnetu, nebo měněním proudu reostatem.

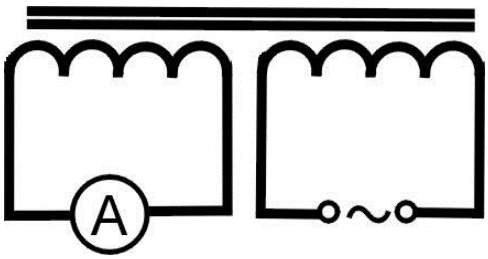


Popsaný způsob indukce se používá v tzv. Ruhmkorffově induktoru k získávání vysokého pulzního napětí. Na obrázcích je provedení induktoru a jeho schéma. Činnost je zřejmá ze schématu.





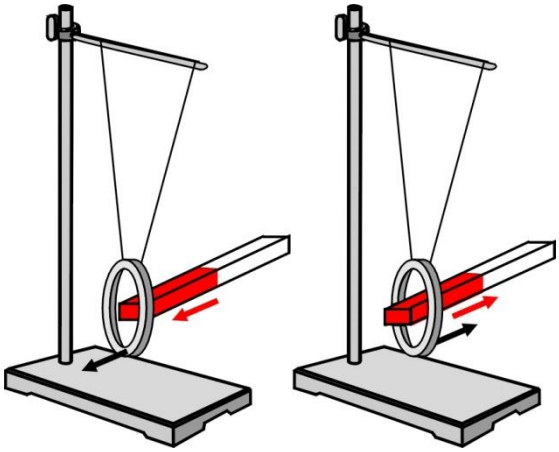
Proud v elektromagnetu je přerušován stejně jak u zvonku, přitahováním kladívka k jádru. Následující sepnutí kontaktu po přerušení opět způsobí pružina. Vysokým počtem závitů indukční cívky se dociluje vznik vysokého indukovaného napětí (10^4 V).



Nalezli jste ještě další možnost, jak vytvářet pole, proměnný magnetický indukční tok - krmit elektromagnet

střídavým proudem. Pokus, jejž jsme provedli, popisuje schematický obrázek. Díky použití střídavého proudu o nízké frekvenci jsme mohli indukovaný proud registrovat ampérmetrem na stejnosměrný proud.

LENZŮV ZÁKON

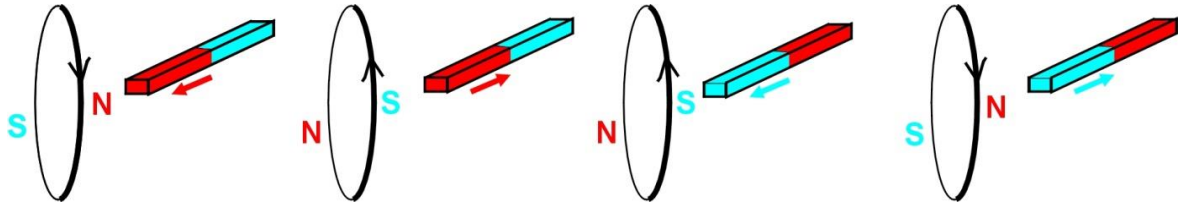


Při svých pokusech jsme viděli, že se směr indukovaného proudu mění při zasouvání magnetu do cívky severním nebo jižním pólem, při zasouvání a vysouvání magnetu, při zapínání proudu do elektromagnetu a při jeho vypínání. Budeme pokusem hledat zákon, který popisuje, jaký má indukovaný proud směr.

Při zasouvání magnetu do závitu byl závit odpuzován.

Při vytahování magnetu ze závitu byl závit přitahován.

Nezáviselo přitom na tom, zda jsme magnet zasouvali severním nebo jižním pólem.

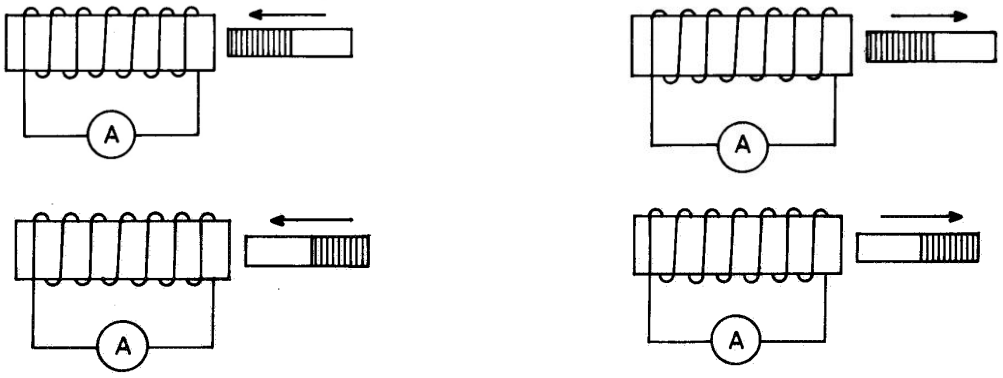


Výsledek pokusů ukazuje, že při **růstu** toku indukčních čar závitem je magnetické pole vytvářené indukovaným proudem namířeno **proti** poli magnetu. Při **zmenšování** toku indukčních čar závitem míří magnetické pole závitu **souhlasně** s polem magnetu. Oba případy vyjadřuje Lenzův zákon:

> Indukovaný proud má vždy takový směr, že jeho magnetické pole **brání změnám** toku pole primárního zasahujícím obvod.

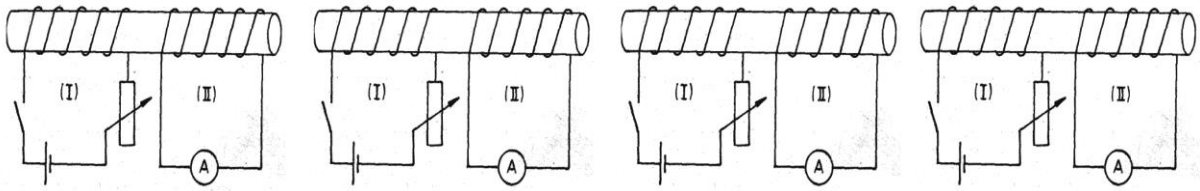
ÚLOHY:

1. Ve všech případech vyznačte póly cívky a směr proudu v posledním závitu cívky vpravo vpředu.

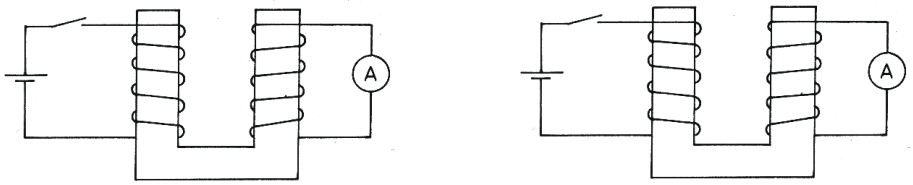


2. Nakreslete póly sekundární cívky a směr indukovaného proudu v sekundárním obvodu, jestliže

primární obvod uzavřeme primární obvod přerušíme primární proud zesílíme primární proud zeslabíme



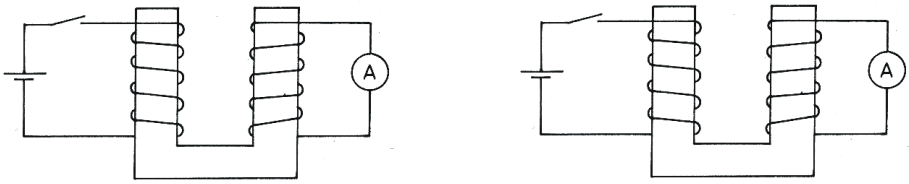
3. Primární a sekundární cívku navlékneme na ramena jádra z měkké oceli ve tvaru písmene U.



Vyznačte magnetické póly obou cívek a směry proudů v horním závitu cívek primárního a sekundárního obvodu, když

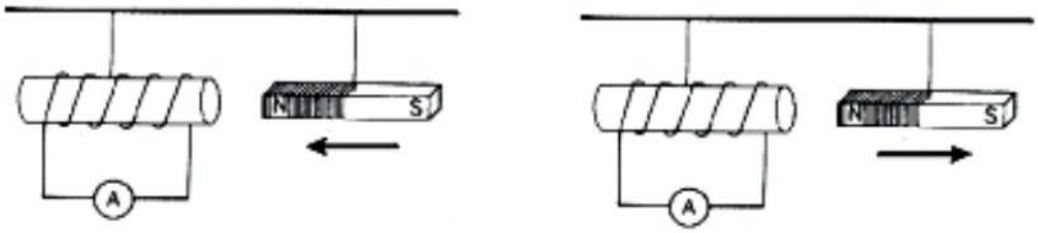
a) primární obvod uzavřeme b) primární obvod přerušíme

c) primární elektrický proud zvětšujeme d) primární elektrický proud zmenšujeme.



4. Na dvou nitích vedle sebe jsou zavěšeny lehká cívka a magnet. Magnet vychýlíme a necháme kývat ve směru podélné osy tak, že se jeho severní pól střídavé přibližuje k dutině cívky a vzdaluje se od ní. Co ukazuje miliampérmetr? Dokreslete do obrázků póly cívky a směr indukovaného proudu ampérmetrem.

a) když se severní pól magnetu k cívce přibližuje b) když se vzdaluje



5. Před cívkou s jádrem, jež je součástí elektrického obvodu, je zavěšen hliníkový kroužek. Co dělá kroužek, uzavřeme-li elektrický obvod, a co dělá při přerušení elektrického obvodu? Dokreslete k oběma částem pokusu: magnetické póly cívky a kroužku (tj. cívky o jednom závitu) a směr proudu v jednom ze závitu cívky a směr indukovaného proudu v přední části kroužku

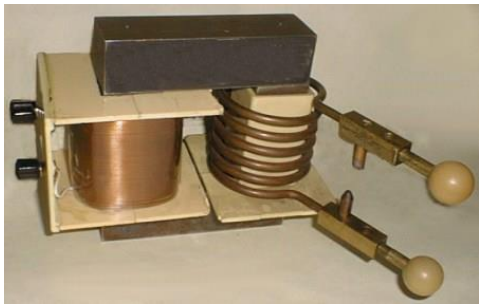
po uzavření obvodu po přerušení obvodu

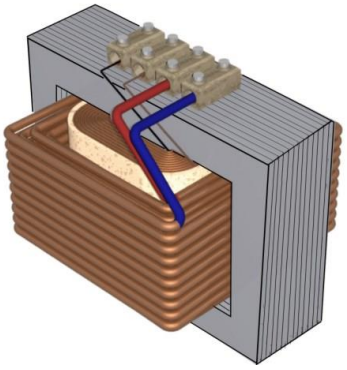
TRANSFORMÁTORY

Elektromagnetické indukce se využívá v transformátorech.

V primární cívce dochází k přeměně elektrické energie na magnetickou. Procházejícím proudem se vytváří *magnetický indukční tok.* Tento tok je veden feromagnetickým jádrem do sekundární cívky. Účelem jádra je zajistit, aby co nejvíce indukčních čar procházelo sekundární cívkou.

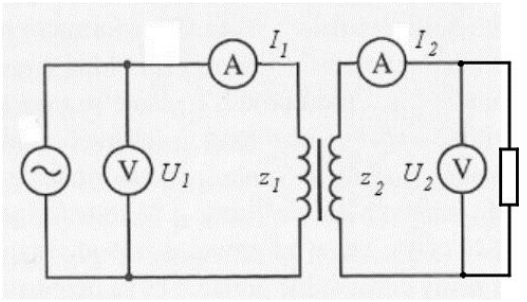
Primární a sekundární cívka transformátoru jsou navinuty na jádru vedle sebe, nebo na sobě.





Primární cívka je připojena ke zdroji střídavého napětí, v sekundární cívce podle Faradayova indukčního zákona vzniká indukovaný proud. Proto transformátor pracuje jen se zdrojem střídavého nebo pulsující napětí, protože při neměnném proudu by se neměnil magnetický tok a na sekundárním cívce by nedošlo k elektromagnetické indukci.

Schéma zapojení transformátoru je na sousedním obrázku.



Pokusy nám ukázaly, že pro napětí U_1 a U_2 a proudy I_1 a I_2 na primární a sekundární cívce přibližně platí:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad resp. \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

U_1 napětí na primární cívce U_2 napětí na sekundární cívce

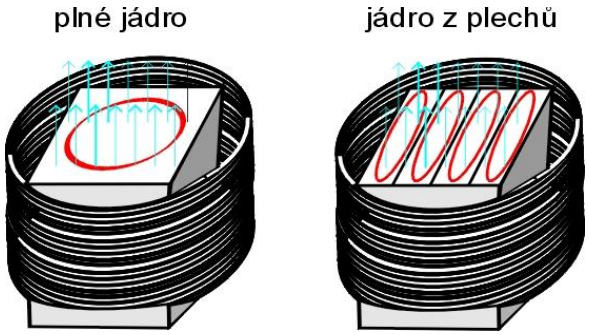
I_1 proud primární cívkou I_2 proud sekundární cívkou

z_1 počet závitů primární cívky z_2 počet závitů sekundární cívky

Pokus na obrázku vlevo, který jsme viděli při výuce, ukazoval transformaci na vysoké napětí. Pokus na obrázku vpravo ukazuje účinky silného proudu při transformaci na napětí nízké.

Ztráty v transformátoru

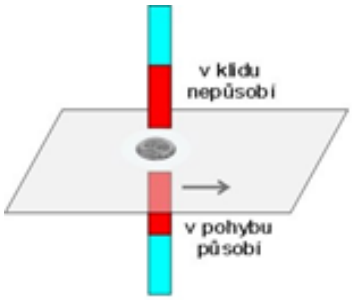
„Ztráty“ především probíhají v jádře transformátoru. Určitá energie je potřebná k přemagnetovávání feromagnetického jádra při střídavém magnetování. Elektrické proudy se indukují i ve vodivém jádře elektromagnetu (vířivé proudy). Tyto proudy jsou kolmé na směr magnetického indukčního toku a zahřívají jádro. Z důvodu snížení těchto ztrát se magnetický



obvod vyrábí z navzájem izolovaných plechů.

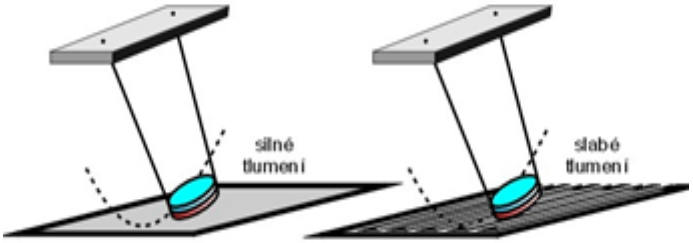
Přestože vinutí cívek je většinou z měděných vodičů (malý měrný odpor), i v nich dochází k tepelným ztrátám jejich zahříváním. Účinnost velkých energetických transformátorů přesto může dosáhnout **až 98%!**

Vznik vířivých proudů jsme ukázali několika pokusy, jež jsou zachyceny na obrázcích.

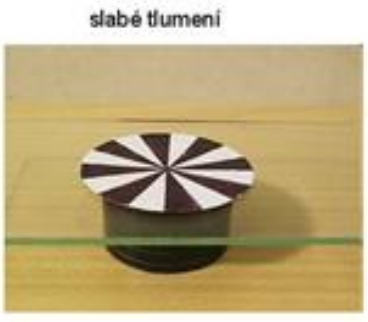


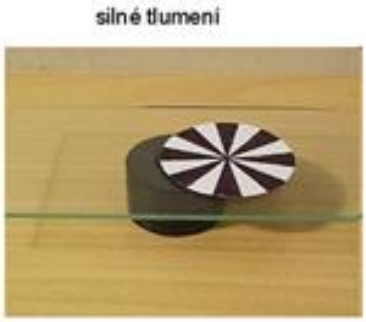
Na tenkou skleněnou desku jsme položili hliníkovou minci. Nehybný magnet na ni nepůsobil. Když jsme magnetem pohybovali, mince se pohybovala s magnetem.

V minci vytváříme pohybem magnetu vířivé proudy, které svým magnetickým polem brání úbytku magnetického toku plochou mince.



Houpající se magnet budil v hliníkové podložce vířivé proudy, jež svým polem brzdily magnet. Když měla destička zářezy, opačně orientované sousední proudy magnetická pole vířivých proudů částečně rušily.





Hliníkové víčko rotující nad magnetem s osou v ose magnetu bylo brzděno jen třením (tok indukčních čar plochou víčka se neměnil – vířivé proudy se neindukovaly. Při nesymetrické rotaci se tok měnil, vířivé proudy svým magnetickým polem rotaci silně brzdily.

Silný magnet padající měděnou trubičkou v ní indukoval vířivé proudy. Ty svým magnetickým polem značně zpomalily pád magnetu.

Užití transformátorů

Zvláštním typem transformátoru je **indukční tavicí pec**. Je to v podstatě velký transformátor, jehož sekundární cívku tvoří tavený kov, uložený v ohnivzdorném žlabu. V tomto jediném závitu se indukuje jen malé napětí, ale o to větší proud závitem prochází. Při dostatečně vysokém střídavém primárním napětí se v sekundárním závitu indukuje napětí jen několik desítek voltů, ale proud dosahuje i několika stovek ampérů. Tak velkým procházejícím proudem se kov silně zahřívá a taví.

Na stejném principu jako induktor (viz předcházející kapitola) pracuje nezbytná součást každého zážehového spalovacího motoru - **zapalovací cívka**. Při přerušení primárního proudu z baterie se na ní indukuje vysoké napětí, které se rozdělovačem přivádí k zapalovacím svíčkám jednotlivých válců motoru.

Také **transformátorová páječka** je v podstatě transformátor, jehož sekundární cívka má jen 2 až 3 závity. Silný sekundární proud, jenž při nízkém napětí cívkou prochází, zahřívá připojenou drátěnou smyčku. Tou roztaveným cínem spojujeme elektrické součástky.

Na obrázku páječky s odstraněným krytem je vidět primární i sekundární cívka transformátoru. (Tu tvoří jen dva závity.)

ÚLOHY:

1. Doplňte chybějící údaje v tabulce.

z_1 a z_2 jsou počty závitů na primární a sekundární cívce,

U_1 je primární a U_2 sekundární napětí.

z_1	z_2	U_1	U_2
10	40		80
400		200	50
600	300	220	
	400	22	220

2. Při transformaci střídavého napětí bylo změřeno:

u školního rozkladného transformátoru U_1 = 220 V, I_1 = 0,4 A, U_2 = 98 V, I_2 = 0,7 A,

u technického transformátoru U_1 = 19 V, I_1 = 21 A, U_2 = 216 V, I_2 = 1,8 A.

Vypočítejte a porovnejte účinnost η obou transformátorů.

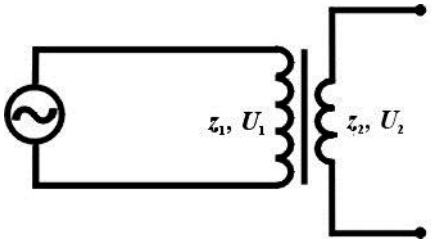
3. Ze sekundární cívky transformátoru odebíráme 5 kW. Napětí na sekundární cívce je 1 kV.

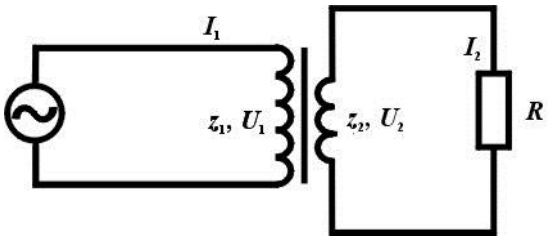
Vypočítejte proud, který prochází sekundární cívkou.

4. Primární vinutí transformátoru má 500 závitů a sekundární vinutí 10 závitů.

a) Jaké je sekundární napětí, je-li sekundární obvod rozpojený a primární napětí je 120 V?

b) Jaký poteče proud v primárním a sekundárním vinutí, je-li sekundární vinutí připojeno k rezistoru o odporu 15 Ω? Předpokládejte 100% účinnost transformátoru.





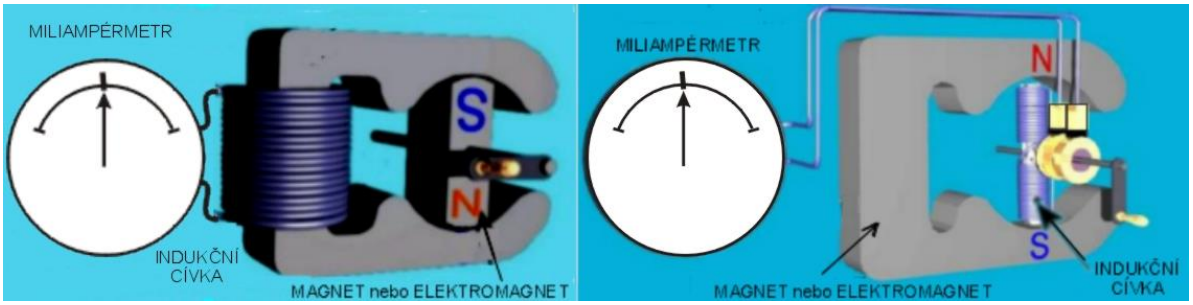
5. Transformátor o účinnosti 95 % zvyšuje napětí 230 V na 1800 V. Sekundární cívkou prochází proud 30 mA. Jaký proud prochází primární cívkou?

6. Transformátor pro žárovky na napětí 24 V má na štítku uvedeny údaje 100W; 230 V/24 V. Určete proud v primární a sekundární cívce. Předpokládejte účinnost 100% .

7. Příkon transformátoru je P_1 = 100 W. Počet závitů na primární cívce z_1 = 600, na sekundární cívce z_2 = 1880. Napětí na sekundární cívce je U_2 = 210 V. Předpokládejte účinnost η = 100 % ($P_1 = P_2$). Vypočítejte napětí U_1 na primární cívce a proudy I_1 a I_2 v obou cívkách.

GENERÁTORY ELEKTRICKÉHO PROUDU

Generátory jsou zdroje elektrického proudu, které přeměňují mechanickou energii na elektrickou. Generátory pracují na základě elektromagnetické indukce. Proud vzniká indukcí v závitech cívky, jež jsou upevněny na železném jádře ve tvaru plného nebo dutého válce. Jádro vyplňuje prostor mezi póly silného magnetu nebo elektromagnetu. Buď se otáčí elektromagnet nebo cívka.



viz applety na adrese

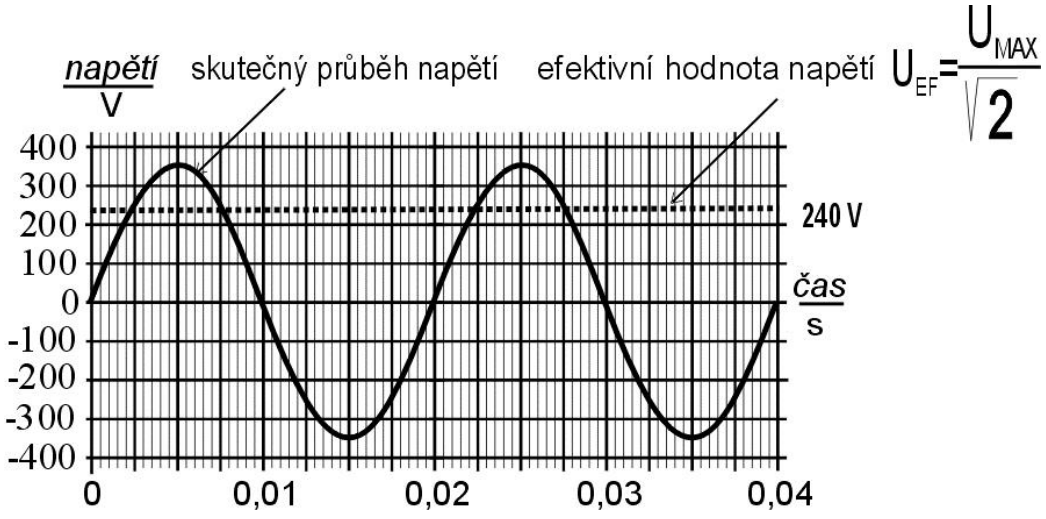
http://phet.colorado.edu/en/simulation/generator (pusťte vodu myší jezdcem na kohoutku)

http://www.koehler.me.uk/animation/e_and_m_main.htm

ALTERNÁTORY

Alternátory jsou generátory střídavého napětí. Skládají se z nepohyblivé části – statoru a pohyblivé části – rotoru. Ve většině alternátorů je zdrojem magnetického pole rotor tvořený magnetem, častěji elektromagnetem, který se otáčí ve statoru. Cívky elektromagnetu, zvané budící cívky, jsou napájeny stejnosměrným budicím proudem. Jestliže rotor mechanickou silou roztočíme, bude se otáčet i magnetické pole rotoru a změny toku indukčních čar budou indukovat střídavý elektrický proud v cívce zvané indukční cívka.

Průběh střídavého napětí ve spotřebitelské síti ukazuje graf.



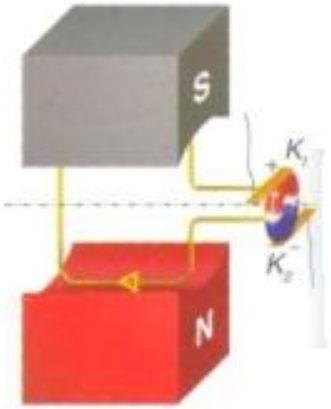
Hodnota napětí 240 V udávaná na spotřebičích je tzv. efektivní hodnota střídavého napětí. Při této hodnotě **stejnosměrného stálého napětí** by měl tepelný spotřebič stejný výkon, jaký má při střídavém napětí vyobrazeného průběhu. Pro efektivní hodnoty proudu i napětí platí:

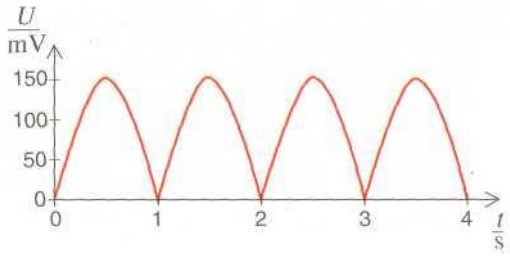
$$U_{EF} = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} \qquad I_{EF} = \frac{I_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

DYNAMA

Generátory stejnosměrného proudu se nazývají dynama. Dynama pracují principielně stejně jako alternátory. Rozdílem je, že konce rotující cívky jsou připojeny ke dvěma navzájem izolovaným polokroužkům. Toto zařízení se nazývá komutátor. Na jednom polokroužku je vždy kladné napětí, na druhém vždy záporné napětí. Obvodem prochází tepavý stejnosměrný proud.

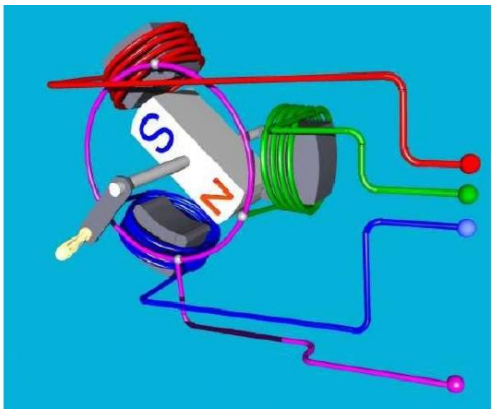
Schematický obrázek dynama a průběh jím generovaného napětí ukazují obrázky.

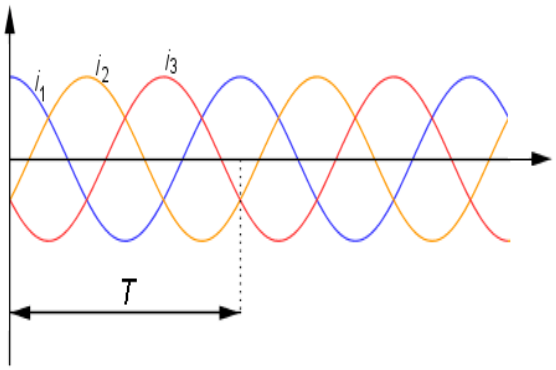




Dnes jsou dynama většinou nahrazována alternátory s polovodičovými usměrňovači.

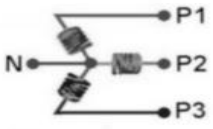
V alternátoru můžeme použít místo jedné cívky tři indukční cívky. Dostaneme současně tři samostatné střídavé proudy neboli fáze. Každou cívkou neprotéká ve stejném okamžiku stejný proud, protože jednotlivé cívky jsou oproti sobě o 120 stupňů pootočeny.



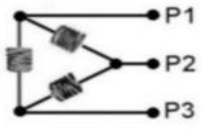


Průběhy tří indukovaných proudů jsou v naší síti časově posunuty o $\frac{1}{150}$ s , tj. o třetinu periody.

Na obrázku jsou cívky spojeny jedním koncem do společného uzlu, z něhož vychází společný (na obrázku fialový) nulový vodič. Z druhých konců cívek vycházejí (červený, zelený a modrý) fázové vodiče. Takové spojení cívek nazýváme spojení do hvězdy.



SPOJENÍ CÍVEK DO HVĚZDY



SPOJENÍ CÍVEK DO TRJÚHELNÍKA

Spojením začátku jedné cívky s koncem druhé získáme tzv. spojení do trojúhelníka. Potřebujeme pak pouze tři vodiče, které vyvádíme z uzlů. Název spojení do hvězdy a do trojúhelníka je odvozen z tvaru obrazce, jež vznikne ve schématu spojení.

Ve spotřebitelské sítí je napětí mezi vodiči P_1 a N, P_2 a N a P_3 a N $U_{ef} = 230$ V (tzv. fázové napětí).

Toto napětí je např. vyvedené v bytech v zásuvkách, na světla a elektrické sporáky.

Napětí mezi dvojicí fázových vodičů P_1 a P_2 , P_2 a P_3 a P_1 a P_3 N je $U_{ef} = 400$ V (tzv. sdružené napětí).

Toto napětí je používáno u spotřebičů s většími výkony (elektromotory, pece, akumulační kamna …).

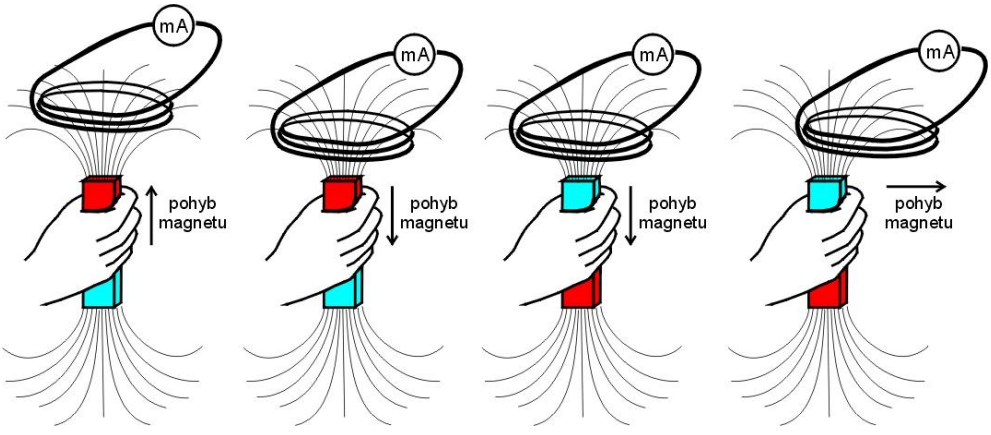
Bytová jednofázová zásuvka a třífázová zásuvka jsou na obrázcích.

U bytové zásuvky je „živý“ fázový vodič připojen na zdířku vlevo od kolíku, nulový vodič na zdířku vpravo od kolíku, kolík zásuvky je uzemněn.

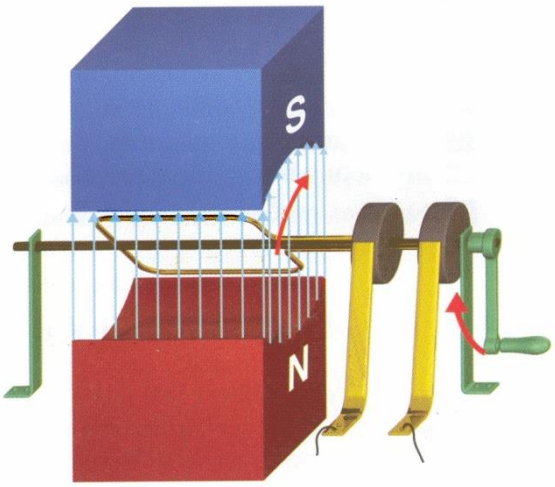
U třífázové zásuvky jsou horní tři zdířky připojeny k fázovým vodičům, nulový vodič (uzemněný) je spojen s dolní zdířkou.

ÚLOHY:

1. Ve všech případech určete směr indukčních čar primárního pole tvořeného magnetem, rozhodněte o změně toku indukčních čar závity. Rozhodněte o směru indukčních čar sekundárního pole vytvářeného indukovaným proudem a určete směr indukovaného proudu v závitech.



2. Rozhodněte o směru indukovaného proudu v závitu ve vyobrazeném okamžiku.



3. V homogenním magnetickém poli se svislými indukčním čarami je umístěna vodorovná vodivá smyčka.

a) Jakým způsobem můžeme smyčkou pohybovat, aby v ní nevznikal indukovaný proud?

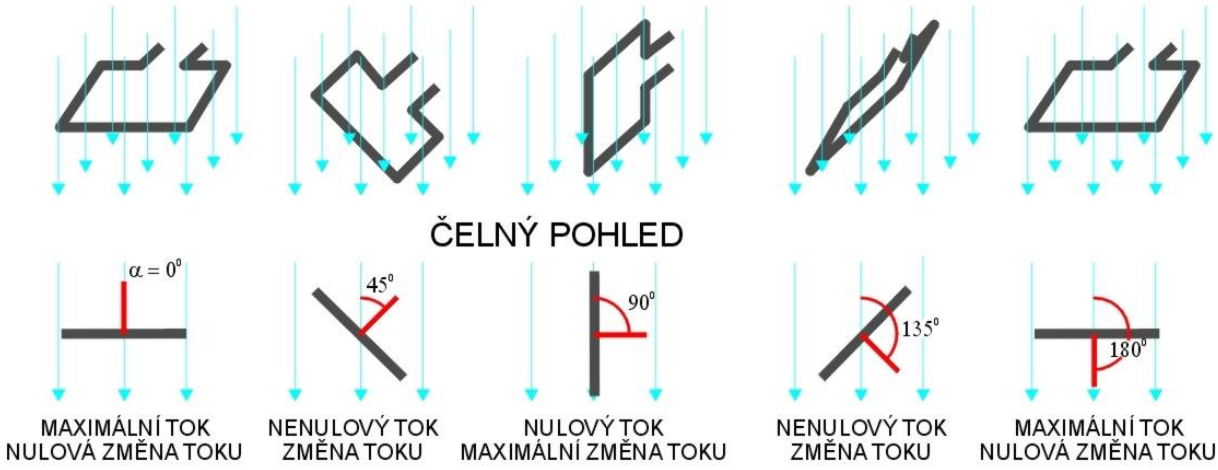
b) Jakým způsobem musíme smyčkou pohybovat, aby v ní vznikal indukovaný proud?

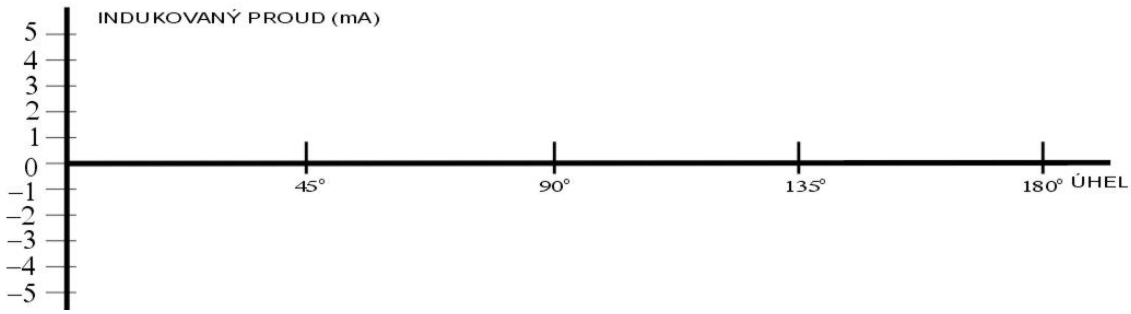
4. Ve spotřebitelské síti je efektivní hodnota elektrického střídavého napětí U_{EF} = 240 V.

Jaké maximální hodnoty napětí U_{MAX} při svých změnách dosahuje?

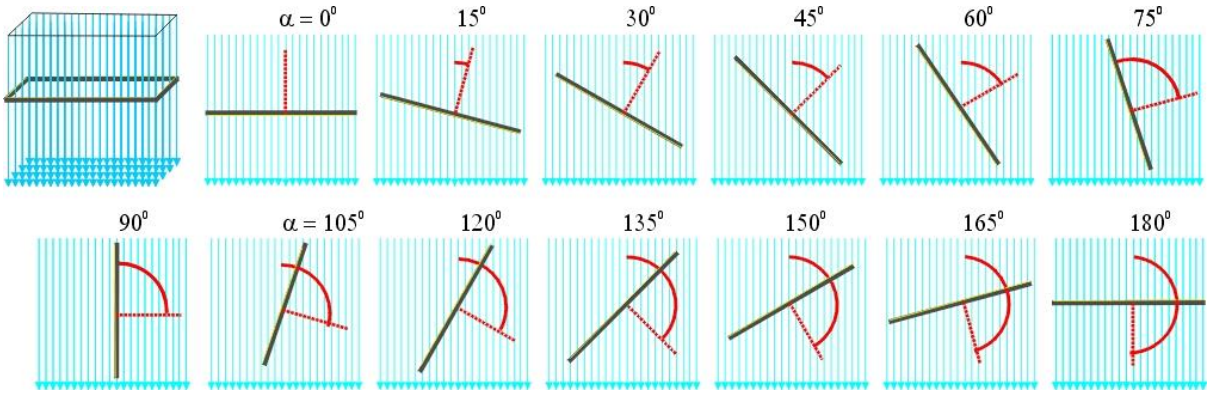
5. Zakreslete graf průběhu indukovaného proudu při půlotáčce závitu. (I_{MAX} = 4 mA).

Pět bodů grafu můžete odhadnout pomocí následujících obrázků.



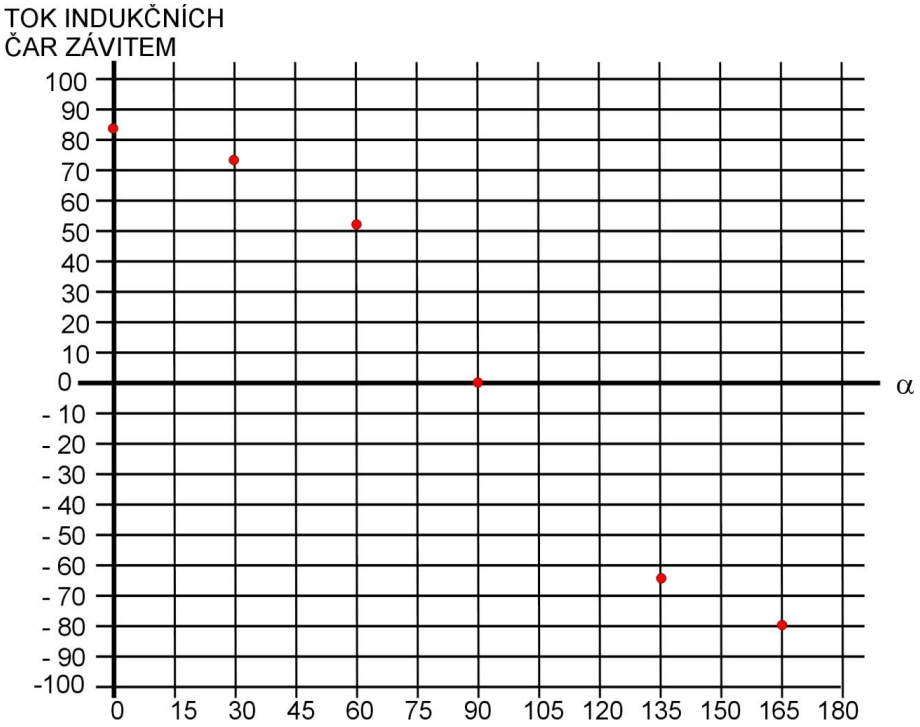


6. Závitem tvaru obdélníka (viz obrázek) prochází v základní poloze 21x 4 = 84 indukčních čar. Jak se závit postupně otáčí je čelně nakresleno na obrázcích. Doplňte do tabulky tok indukčních čar zachycených do „lasa“ závitu. Pro indukční čáry vstupující do zad závitu ($\alpha = 105^{\circ}$ a dále) berte tok záporně.



α (°)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
tok	84		72		52		0			-64		-80	

Nakreslete graf závislosti toku na úhlu α natočení závitu.

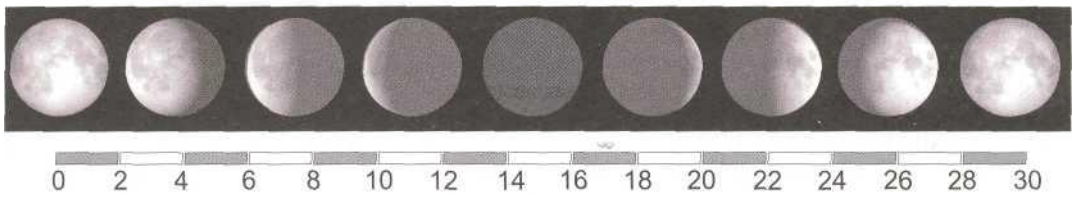


3. AKUSTIKA

PERIODICKÉ DĚJE

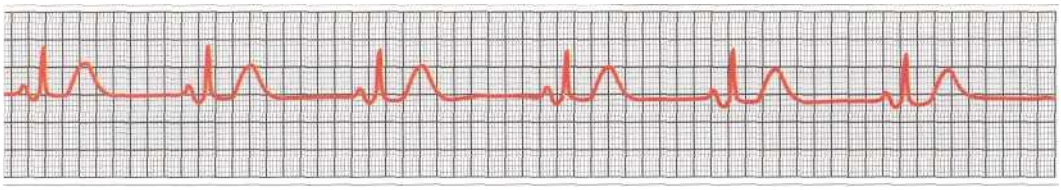
V přírodě je řada dějů, které se více či méně pravidelně opakují. Typické periodické pohyby jsou kruhový pohyb a kmitání.

Tím, jak se Země pravidelně otáčí kolem své osy, střídá se den s nocí.



Jistě jste si všimli, jak se znova a znova mění tvář Měsíce každých 28 dnů.

Pravidelně buší naše srdce a pracují naše plíce. Záznam srdečního tepu ukazuje dolní obrázek.

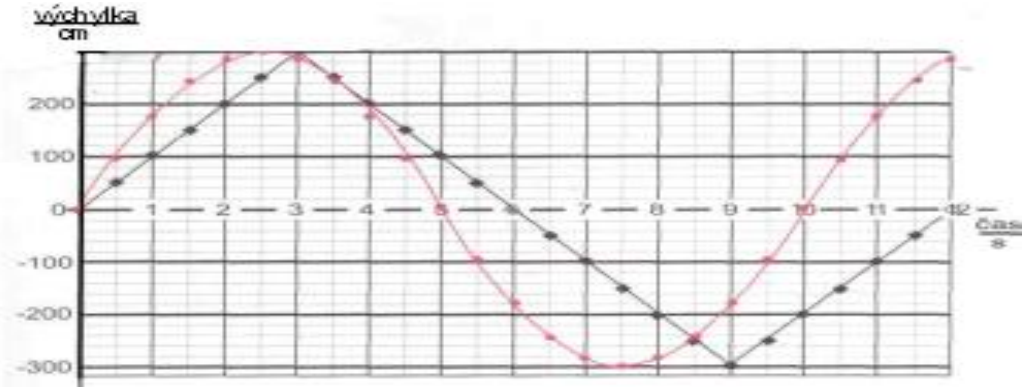


Při chůzi se naše ruce i nohy rytmicky houpají sem a tam. Podobný opakovací pohyb dělá houpačka na pouti i kyvadlo starých babiččiných hodin.

Jeden kmit je při tom pohyb sem a tam. Doba jednoho kmitu se nazývá **perioda** a značí se velkým *T*.

Kmitajícím předmětům se často říká **oscilátory.** Kmitání různých oscilátorů nemusí být stejné .

Odlišným kmitavým pohybem bude učitelovo nervózní rázování po třídě sem a tam poté, co si prohlédl načmárané poznámky ve vašem sešitě, a jiný bude pohyb kyvadla, jež tvořila kulička zavěšená na nitce dlouhé 25 m. Protože už víme, že fyzikové dávají při sdělování informací přednost grafům před dlouhým řečněním, pokusme se popsat tyto dva kmitavé pohyby pomocí grafu.



Jistě odhadnete, který graf přísluší rovnoměrnému přecházení po třídě sem a tam (trojúhelníková pila) a který kývání kyvadla (sinusoida).

Také periody *T* obou kmitání z grafu snadno přečteme. $T_{RÁZOVÁNÍ}$ = 12 s $T_{HOUPÁNÍ}$ = 10 s.

Promyslete, jak by se grafy měnily, kdyby:

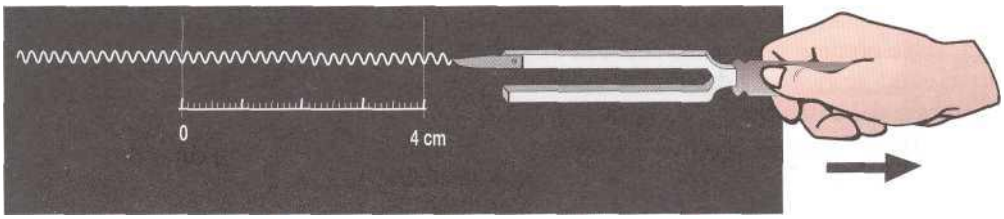
a) kyvadlo bylo více rozhoupáno,

b) kyvadlo bylo kratší,

c) učitel chodil rychleji,

d) měření času začalo, když byl učitel i kyvadlo na kraji.

Podobný graf kmitavého pohybu můžeme získat i bez rýsování. Stačí například rovnoměrně přejet rozezvučenou ladičkou s hrotem po začazeném skle a graf je hotov.



Počtu kmitů za sekundu se odborně říká kmitočet (frekvence), označení *f.* Udává se v počtu kmitů za jednu sekundu. Jednotku nazýváme hertz (Hz). 1 Hz = 1 kmit za sekundu.

Mezi periodou kmitu *T* a frekvencí *f* je jednoduchý vztah:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{a tedy také} \quad f = \frac{1}{T}$$

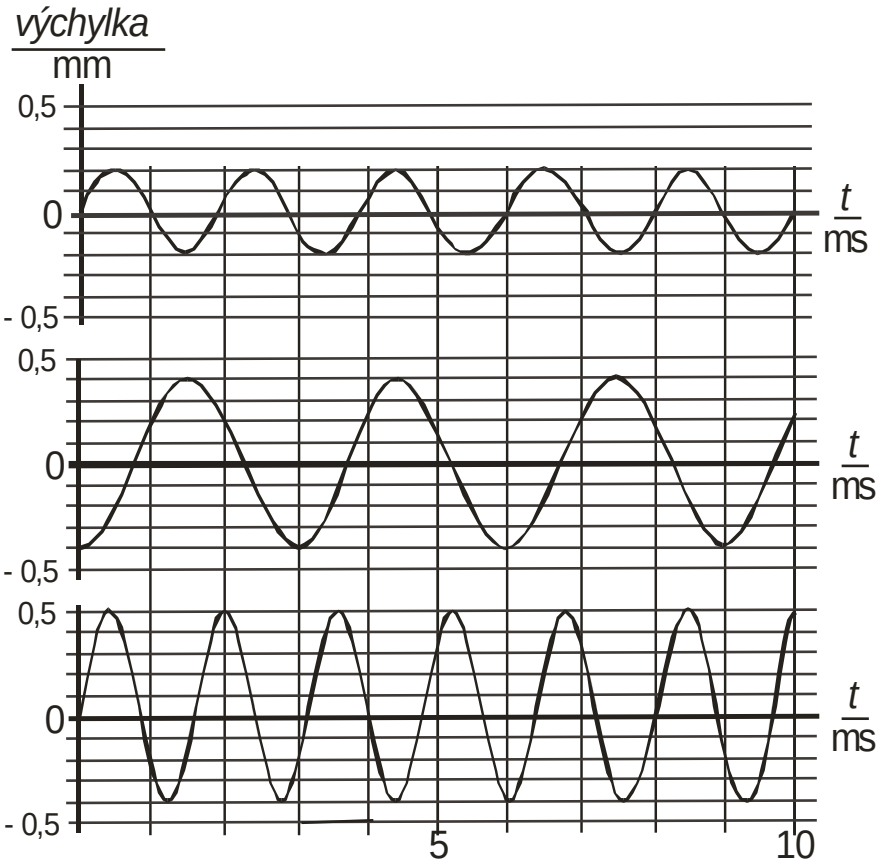
Ladička na obrázku měla na sobě údaj o frekvenci (*f* = 125 Hz), její ramena tedy kmitnou sem – tam za jednu stodvacetipětinu sekundy (*T* = 1/125 s = 0,008 s = 8 ms). Dokážete teď z obrázku zjistit rychlost, jakou ruka táhla ladičku? Vyšlo vám 0,25 m/s?

V následující tabulce jsou frekvence kmitání křídel několika živočichů při letu.

komár	včela	kolibřík	moucha	čmelák	vrabec	motýl	husa
600 Hz	250 Hz	200 Hz	180 Hz	150 Hz	15 Hz	5 Hz	2 Hz

ÚLOHY

1. U dolních grafů kmitavých pohybů určete maximální výchylku (amplitudu) *A*, dobu kmitu (periodu) *T* a frekvenci (kmitočet) *f*.



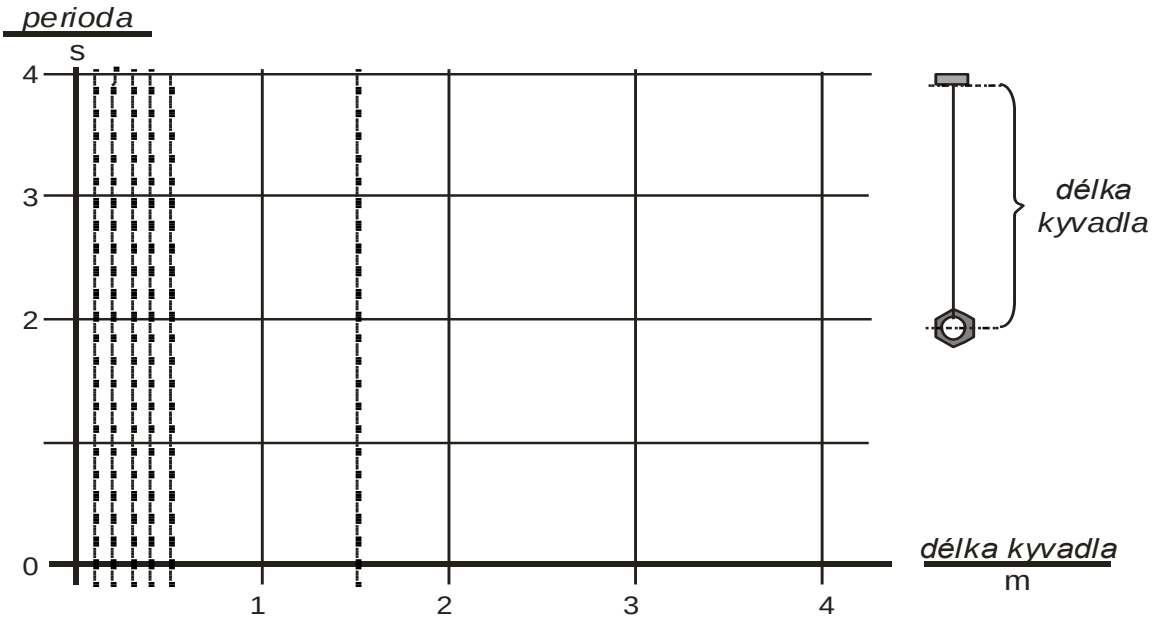
2. K tabulce frekvencí kmitů křídel živočichů vypočtěte doby kmitu (periody) *T*.

komár	včela	kolibřík	moucha	čmelák	vrabec	motýl	husa
600 Hz	250 Hz	200 Hz	180 Hz	150 Hz	15 Hz	5 Hz	2 Hz
							0,5 s

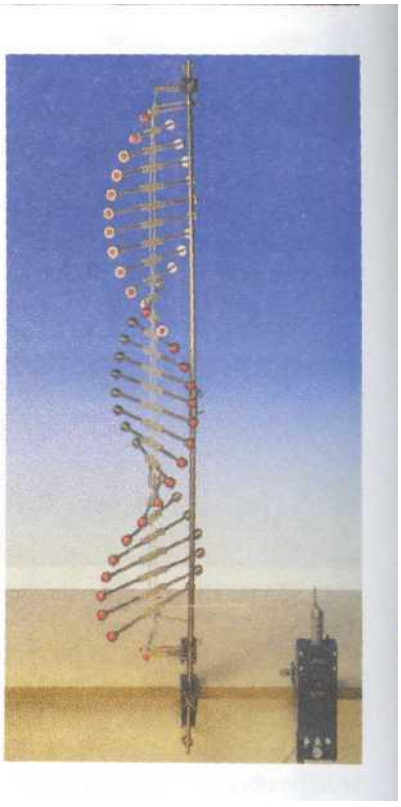
3. Změřte periody kmitů malé matičky (nebo malého olůvka), které postupně zavěsíte na nit rostoucí délky, jak požaduje tabulka. Kyvadlo rozkývejte jen nepatrně, měřte 10 kmitů.

délka kyvadla	10 cm	20 cm	30 cm	50 cm	100 cm	200 cm	400 cm
perioda							

Vyneste body do grafu



MECHANICKÁ VLNA

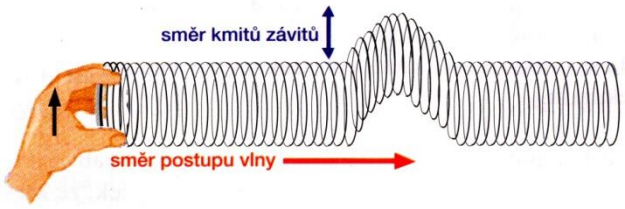


Na sousedním obrázku je několik malých „činek", které jsou spoutané dvojicí šňůrek. Rozkmitáme-li první z nich, přenáší se natočením šňůrek energie na souseda. Tato vazba je tak těsná, že se přenese energie na souseda už jedním kmitem. První činka se zastaví a druhá rozkýve. Od ní pak cestují kmity zase dál a dál. Řadou činek postupuje vlna.

Na spodním obrázku vidíte jinou vlnu, postupující řadou závitů pružiny „slinky". I zde kmitají závity napříč směru, v němž vlna postupuje.

O takové vlně říkáme, že je **příčná**.

Na spodním obrázku je opět příčná vlna postupující pružinou „slinky".



Příčná vlna postupující pružinou

Ve jiném případě mohou být kmity závitů pružiny stejného směru, jakým vlna postupuje. Takovou vlnu nazýváme **podélnou.**

Podélná vlna postupující pružinou

Vlny šířící se na vodní hladině jsou příčné. Rybářský splávek se na hladině pohupuje nahoru a dolů, napříč ke směru, ve kterém ubíhá vlna.

Při zemětřesení postupují zemskou kůrou vlny podélné i vlny příčné.

Vlněním v pravém slova smyslu není „vlnění" obilí způsobené větrem, nebo vlny na povel, jež dělají diváci na stadionech. „oscilátory" (stébla obilí, diváci) si energií nepředávají.

Vlnová délka

Vlny nejčastěji charakterizujeme vlnovou délkou.

Vlnová délka je vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jednoho kmitu (periodu) *T*.

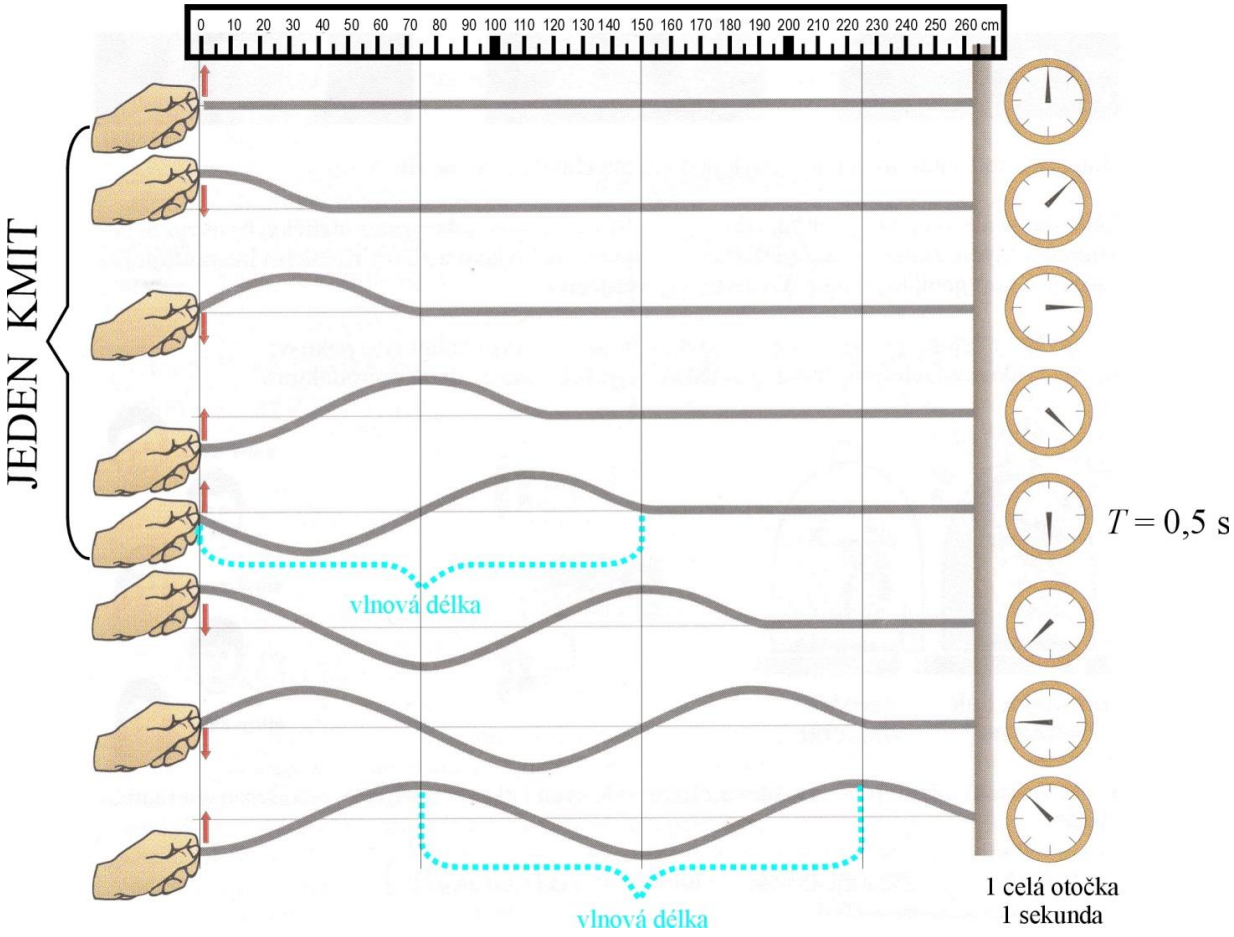
Protože vlna běží rovnoměrně, umíme vlnovou délku snadno vypočítat, stejně jako třeba dráhu auta.

Označíme-li rychlost šíření vlny *v*, platí pro vlnovou délku λ vztah:

$$\lambda = v \cdot T \quad \text{nebo pomocí frekvence} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

kde λ …vlnová délka (m) v … rychlost šíření vlny (m/s) T …perioda (s) f … frekvence (Hz)

Pro vlnu postupující hadicí na dolním obrázku je T = 0,5 s, f = 2 Hz, λ = 1,5 m, v = 3 m/s.



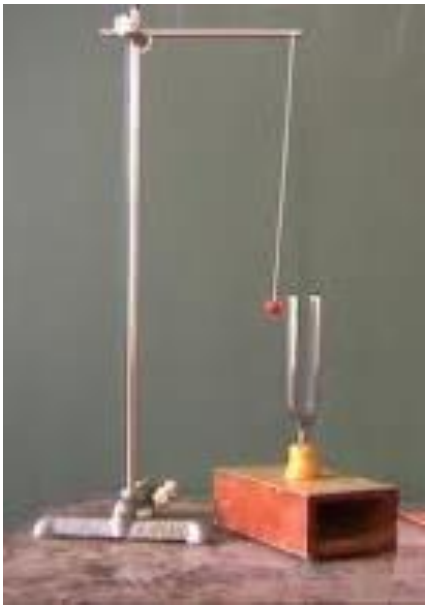
Na dalším obrázku je vlna na vodní hladině vyvolaná ťukáním kovového prstíku doprostřed misky. Zatímco prstík udělá jeden kmit (pohyb shora dolů a nazpět vzhůru), doběhne od něj vlna do určité vzdálenosti. To je délka vlny. Vlnová délka vlny běžící po hladině je vyznačena na obrázku.

Vlnová délka vlny na vodní hladině

ZVUKOVÉ VLNY

Pozorování vln na vodní hladině na hadici nebo laně či pružině bylo jednoduché už proto, že jsme vlnu mohli vidět. Se zvukovou vlnou je to složitější, protože tu si očima prohlédnout nemůžeme. Především si ale musíme položit otázku, co nás opravňuje k tvrzení, že šíření zvuku například od ladičky nebo od reproduktoru k našemu uchu je vlnění vzduchu.

Začněme ale od zdroje. Že se ladička, reproduktor nebo jakýkoli jiný zdroj zvuku chvějí, jsme se přesvědčili pokusem, který je na obrázku.

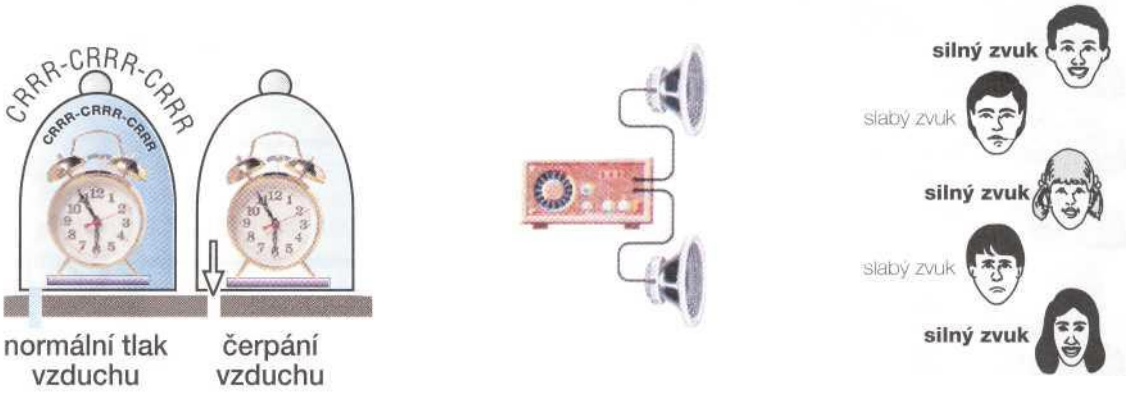


Jiný pěkný pokus s chvěním kovové misky si můžete pustit z internetu:

http://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/CHVENIMISKY/miskasmicem1.avi

Musíme si ale přiznat, že na to, zda se zvuk šíří od zdroje jako hejno maličkých, okem nepostřehnutelných, zvukových projektilů - „zvukonů" nebo jako třaslavý rozruch-vlna postupující látkou, zatím nemáme žádné důvěryhodné svědectví.

Přemýšlejte o tom, pro kterou z těchto dvou možností vypovídají pokusy, jež jsme provedli při výuce. Můžou vám je připomenout obrázky na následující stránce.



Nešíření zvuku vzduchoprázdnem a skládání stejných tónů ze dvou reproduktorů

„Zvukony" bychom si asi představili jako malinkaté kuličky. Od nich bychom očekávali, že se budou vakuem šířit snadněji a větší rychlostí než v látkách, kde jim překážejí molekuly. Pro to, že zvuk jsou vlny v látce, svědčí naopak fakt, že vakuem se zvuk nešíří.

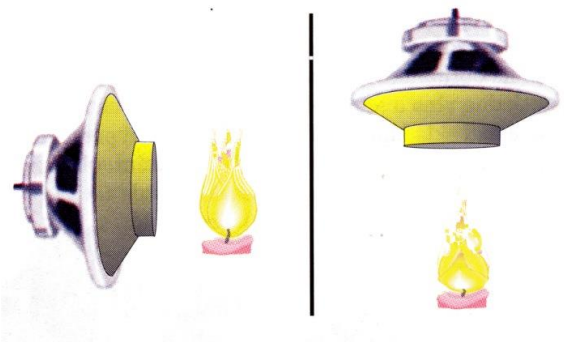
Druhý pokus s dvojicí reproduktorů taky nehraje se „zvukony“. V místech, kde by se sešly „zvukony" ze dvou zdrojů, by byl zvuk vždy silnější. Dvě zvukové vlny se ale mohou zesílit i zeslabit. V místech, kam obě vlny dojdou tak, že obě ve stejný okamžik místní tlak zvyšují a hned nato zase snižují, se jejich zvukový projev zesílí (vlny jsou ve fázi – dochází ke konstruktivní interferenci). V sousedním místě může dojít k situaci, že zatímco jedna zvuková vlna tlak zvyšuje, druhá ho naopak snižuje (vlny jsou v opačné fázi). V takovém místě dojde k zeslabení zvuku – destruktivní interferenci. To potvrdil náš pokus.

Prohlédněte si ještě tabulku rychlostí zvuku v různých látkách. Posuďte, pro jakou alternativu svědčí.

látka	rychlost zvuku m/s	látka	rychlost zvuku m/s
oxid uhličitý	260	pryž	50
vzduch	330	led	3 200
benzín	1 200	dřevo	3 400
voda	1 500	ocel	5 000

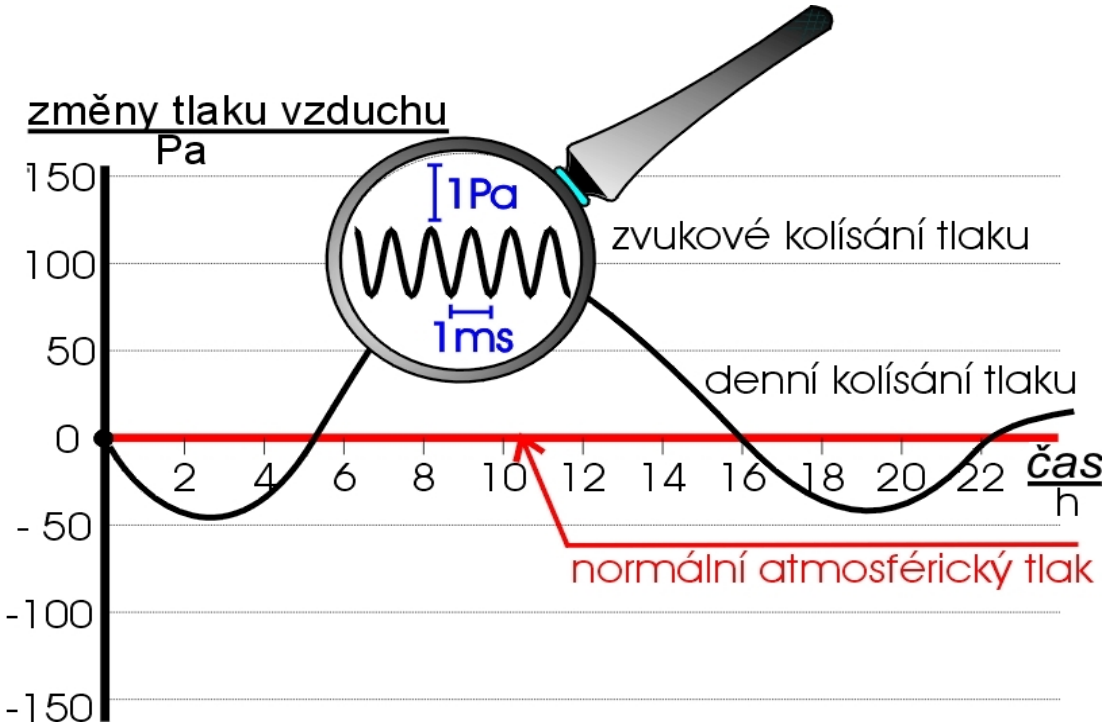
Určitě souhlasíte, že vše svědčí pro to, že je zvuk vlna. Čím pevnější jsou vazby mezi částicemi látky, tím rychleji se zvuková vlna šíří.

O tom, zda je zvuková vlna ve vzduchu příčná nebo podélná, nám podá informaci plamínek svíčky, kterou postavíme před zvučící reproduktor. Zvuková vlna ho rozkmitá ve směru svého šíření. Zvuková vlna ve vzduchu je podélná.



POZOR!! Při šíření zvuku nekmitají jednotlivé molekuly, ty nejsou silově vázány a pohybují se od srážky ke srážce rovnoměrně přímočaře (tepelné hemžení). Pod pojmem kmitající částice vzduchu zde musíme rozumět větší „ranečky molekul", jež považujeme při dokonalém tichu (a bez průvanu) za nehybné.

Lépe je proto popisovat šíření zvuku šířícími se změnami tlaku vzduchu. Barometr, který možná máte doma na předpověď počasí, by ovšem na zaznamenání tak malých a velmi rychlých změn tlaku nestačil. V průběhu dne se tlak vzduchu mění až o několik set pascalů, to barometr jakžtakž ukáže. Ve srovnání s tím jsou ale změny tlaku, jež vnímáme uchem, mnohem menší. V těsné blízkosti beatové kapely, kdy už nám téměř praskají bubínky, kolísá tlak jen o několik pascalů. Při běžném rozhovoru jsou změny tlaku ještě tisíckrát menší a při šeptání, které ještě jsme schopni zaslechnout, tlak kolísá jen o desetitisíciny pascalů.



Navíc jsou změny tlaku vzduchu, jež naše ucho dokáže zachytit, velmi rychlé. Začínáme je vnímat, když tlak zakolísá 20 krát za sekundu, a zaslechneme je ještě, když tlak kmitne 20 000 krát za sekundu.

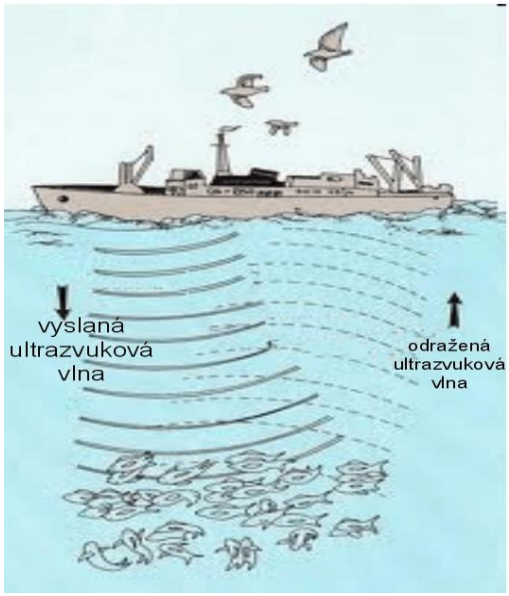
Mezi živočichy jsou ovšem tací, kteří mají sluch citlivější. Nejen tím, že dokáží zachytit mnohem slabší zvuky než člověk, ale slyší „zvuky", při nichž tlak kmitá daleko nad hranicí 20 kHz, za níž je už člověk hluchý.

Hranice vnímání zvuku:	
člověk	20-20 000 Hz
krysa	800-60 000 Hz
pes	30-50 000 Hz
netopýr	až 150 000 Hz
delfín	až 200 000 Hz

ULTRAZVUK

Zvuky, jejichž kmitočet je nad hranicí slyšitelnosti ($f > 20\ 000$ Hz), se nazývají ultrazvuky. Ultrazvuková pípnutí slouží netopýrům a delfínům k vyhledávání kořisti. Prozradí ji ozvěna, jíž zachytí citlivé sluchové ústrojí - jakýsi zvukový radar. To, že ultrazvuk člověk neslyší, zdaleka neznamená, že ho nedokáže využít. Ultrazvukovými vlnami, které se díky své krátké vlnové délce málo ohýbají, se dají „nahmatávat" hejna ryb i sondovat hlubiny moří.

Princip je patrný z dolního obrázku vlevo. Vpravo je jiné využití, díky němuž se dnes budoucí maminky mohou podívat do tváře svého děťátka dříve, než se narodí (použitá frekvence 100 MHz).



Ultrazvuk slouží i k hledání defektů uvnitř kovových odlitků.

INFRAZVUK

Do infrazvuků (neslyšitelné zvuky o frekvencích $f < 20$ Hz) řadíme především otřesy a záchvěvy půdy, kmity budov vyvolané těžkými dopravními prostředky, zemětřesení a chvění vyvolané větrnými elektrárnami. Vzhledem k tomu, že frekvence vlastních kmitů budov a jejich částí leží často v oblasti frekvence infrazvukových vln, mohou tyto vlny někdy vyvolat jejich nebezpečné rozkmitání a jejich poškození, K registraci infrazvukových vln se dají využít seismografy (přístroje na měření seismických vln vznikajících při zemětřeseních).

Sloni používají infrazvuk k vzájemnému dorozumívání. Mohou se tak slyšet až na vzdálenosti několika kilometrů. Medúzy vnímají infrazvuk pocházející z vln na hladině. Při blížící se bouřce mohou reagovat a vzdálit se od pobřeží.

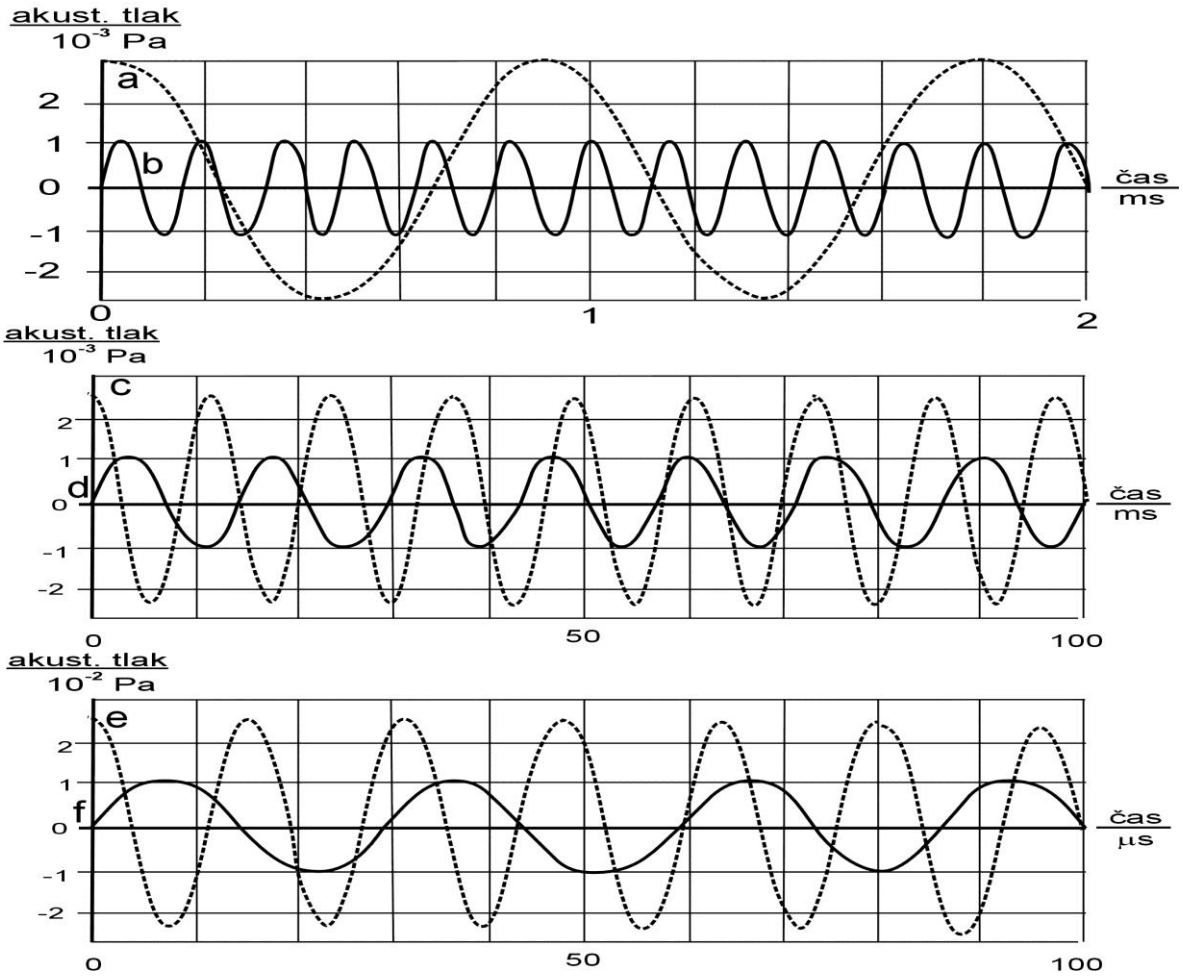
Infrazvuk může nepříznivě působit na člověka. Frekvence 7 Hz odpovídá frekvenci mozkových rytmů, které odpovídají stavu duševního klidu a pohody. Je-li člověk vystaven frekvencím blízkým, pak se nemůže uvést do klidu a soustředit se. Dokonce se uvažovalo o použití infrazvuku jako biologické zbraně. Nevýhodou však je, že působí i na obsluhu zdroje zvuku. Navíc jeho intenzita silně klesá se vzdáleností od zdroje.

ÚLOHY

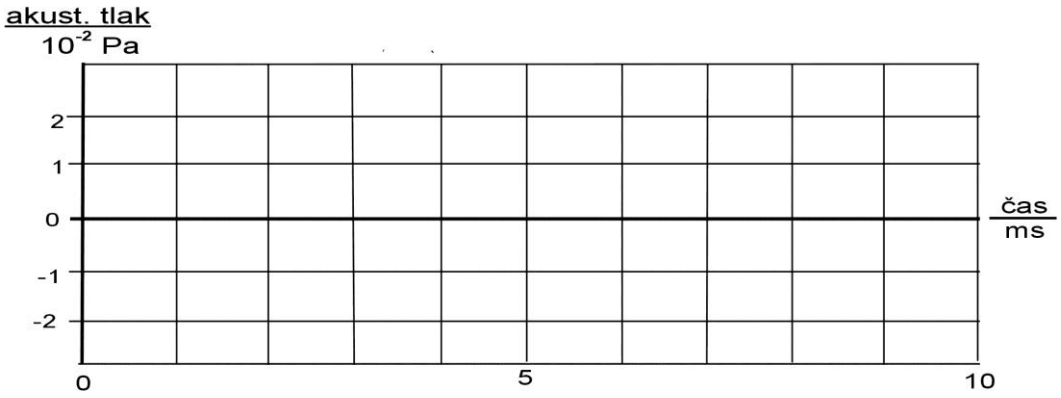
1) Na obrázcích jsou průběhy akustického tlaku různých tónů ve vzduchu.

Doplňte údaje ke každému z grafu údaje:

- maximální hodnotu akustického tlaku (amplitudu akustického tlaku) p0
- dobu kmitu akustického tlaku (periodu) T
- frekvenci akustického tlaku (kmitočet) f
- vlnovou délku zvukové vlny ve vzduchu λ (c = 340 m/s)



2. Nakreslete graf sinusového tónu, jenž má vlnovou délku ve vzduchu λ = 3,4 m a amplitudu akustického tlaku p_0 = 20 mPa.



3. Seřaďte zvuky z úlohy 1) podle intenzity a podle výšky.

4. Rozhodněte, který ze zvuků je slyšitelný, který je ultrazvukem a který infrazvukem:

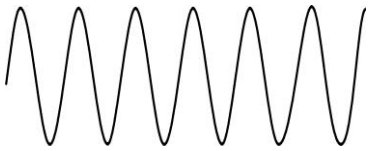
$T = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ s, $T = 5 \cdot 10^{-3}$ s, $T = 1{,}1 \cdot 10^{-1}$ s, $T = 3{,}2 \cdot 10^{-4}$ s, λ_{vzduch} = 2 cm, λ_{vzduch}= 34 m, λ_{vzduch} = 1 m

5. Seřaďte tyto látky podle rychlosti, jíž se jimi šíří zvuk: vodík, měď, vzduch, benzín.

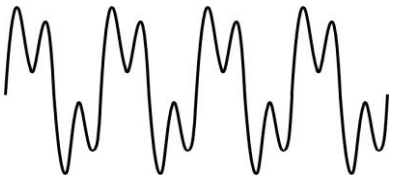
6. V jaké vzdálenosti od nás se zablesklo, jestliže zvuk hromu se ozval 9 sekund po zablesknutí?

PRŮBĚH ZVUKOVÝCH VLN

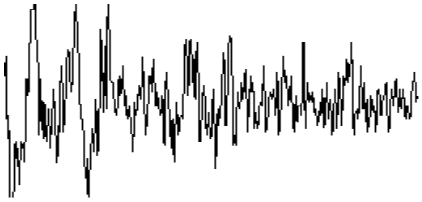
Akustický tlak zvukových vln nemá vždy jednoduchý sinusový průběh, jenž je na prvním dolním obrázku. Tak se mění akustický tlak jen u nejjednodušších, tzv. harmonických tónů, které vydávají např. ladičky.



Hudební nástroje nebo náš hlas při zpěvu vydávají zvuk, jenž je sice periodický, ale nesinusový. Příklad průběhu tónu flétny je na vedlejším obrázku.



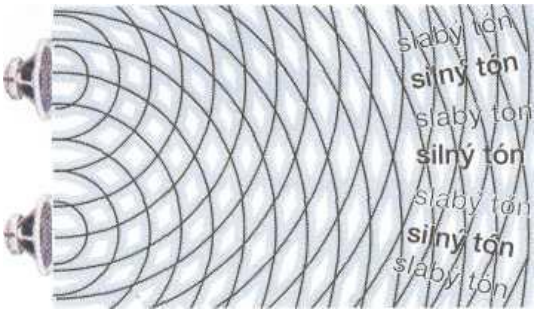
Hluky, šramoty, praskání, vrzání, bouchnutí a další nehudební zvuky vyvolávají nepravidelné, neperiodické změny akustického tlaku.



Všechny zvuky lze složit z jednoduchých sinusových zvuků. Zařízení, která to dokážou, se nazývají syntetizátory.

SKLÁDÁNÍ ZVUKOVÝCH VLN

Při hodině fyziky jste viděli zajímavý pokus. Z dvojice reproduktorů vysílajících stejný sinusový tón jsme v různých místech mikrofonem zachycovali zvuk. V některých místech před reproduktory byl zvuk velmi slabý. Když se nad pokusem trochu zamyslíte, přestane pro vás být takový výsledek překvapivý. Vždyť co je na tom divného, když v určitém okamžiku jedna vlna v některém místě akustický tlak zvyšuje, zatímco druhá, jež přicestovala ze sousedního vzdálenějšího reproduktoru, v tomtéž okamžiku tlak snižuje. Říkáme, že dochází k **destruktivní interferenci**.

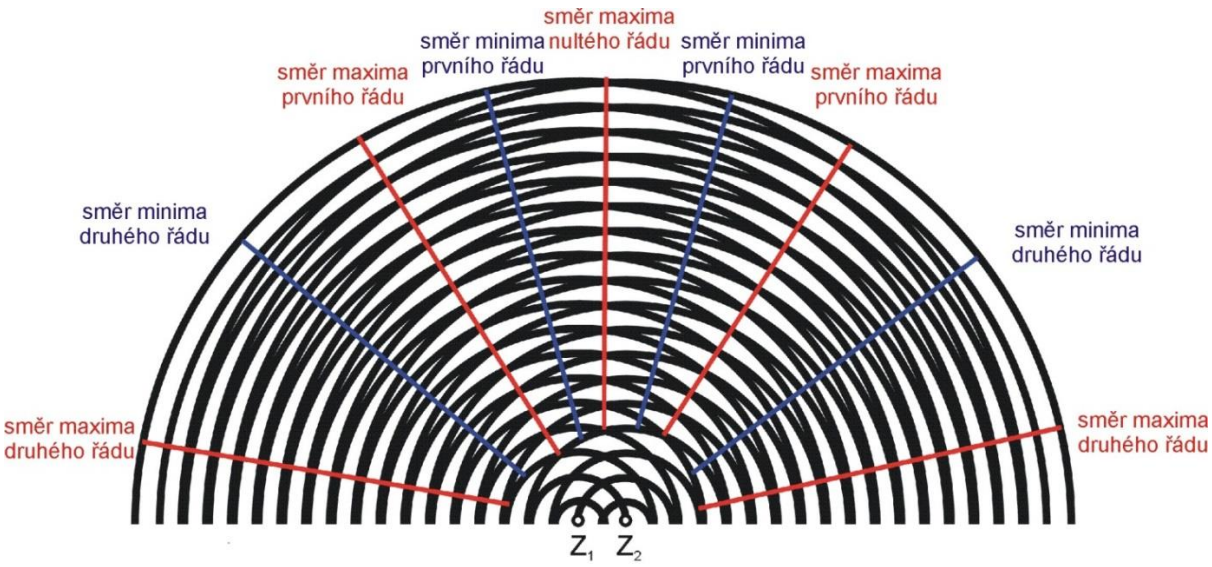


Destruktivní interference je děj typický pro všechny druhy vlnění.

Ve všech místech k destruktivní interferenci ovšem nedochází. V řadě míst se obráceně vlny sejdou tak, že obě tlak současně zvyšují a za okamžik opět snižují. V takových místech je zvuk nejsilnější, interference je **konstruktivní**. V místech mezi těmito extrémy dojde k něčemu, co je mezi těmito dvěma krajními možnostmi.

Na internetu na adrese http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference najdete applety, se kterými si můžete pohrát se skládáním 2 zvuků, 2 vln na vodní hladině a 2 vln světelných.

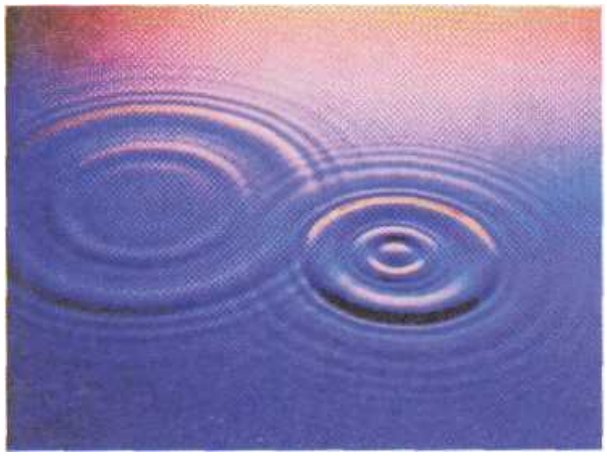
Na dolním obrázku je jednoduchý model, jímž je znázorněno skládání vln (tzv. interference vln) ze dvou zdrojů vlnění.



Místa, kde se obě vlny setkávají „stejným krokem“, jsou zřejmě tam, kam mají obě stejně daleko od obou zdrojů (maxima nultého řádu). Stejně se ale složí, je-li vlna od vzdálenějšího zdroje opožděna o jednu celou periodu T (maximum prvního řádu), o dvě periody $2T$ (maximum druhého řádu) atd.

Takového zpoždění je dosaženo, jestliže rozdíl drah obou vln od zdrojů je λ (pro maximum prvního řádu), 2λ (pro maximum druhého řádu) atd.

Místa zeslabení jsou pak tam, kde je dráhový rozdíl $\lambda/2$, $3\cdot\lambda/2$, $5\cdot\lambda/2$ atd.

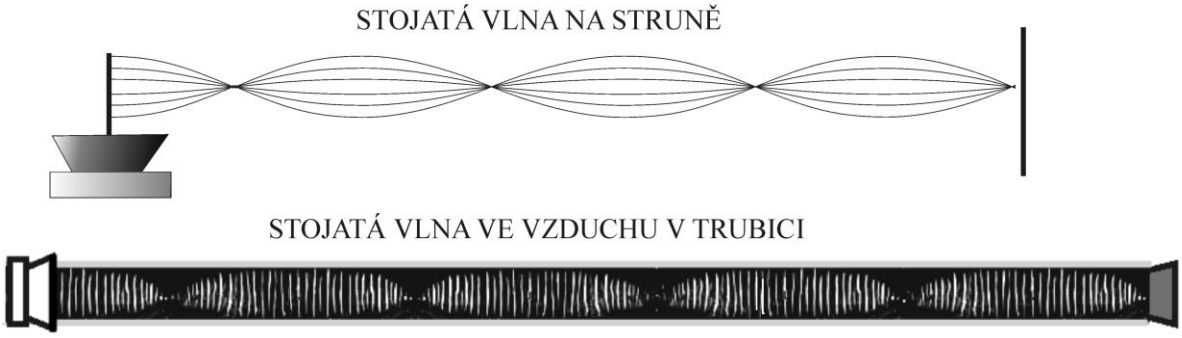


Zajímavou vlastností vln je i to, že se vzájemně „nepomačkají", když přes sebe přejdou. Na vlnách na vodní hladině to můžeme zřetelně vidět. U zvukových vln to dokazuje skutečnost, že dobře slyšíme jednotlivé hlasy i tehdy, když na nás mluví současně dva nebo tři lidé.

STOJATÉ VLNY

Zajímavý případ nastane, postupují-li dvě stejné vlny (stejné frekvence a stejné amplitudy akustického tlaku) proti sobě. Dva příklady pro vlny na gumičce a zvukové vlny v trubici ukazují dolní obrázky.

Na prvním z nich se skládá vlna postupující po struně od zdroje zleva doprava s vlnou odraženou od upevněného pravého konce, která postupuje zprava doleva. Výsledkem je vlna, jež „stojí na místě“. Struna v určitých místech maximálně kmitá (**kmitny**), v jiných místech je struna téměř v klidu (**uzly**).



Podobně dochází ke skládání zvukových vln v trubici. V určitých místech dochází k maximálním změnám akustického tlaku, což se projevuje vířením korkového prachu, v sousedství jsou ostré oblasti ticha.

Vzdálenost sousedních uzlů stojaté vlny je polovina vlnové délky $\lambda/2$.

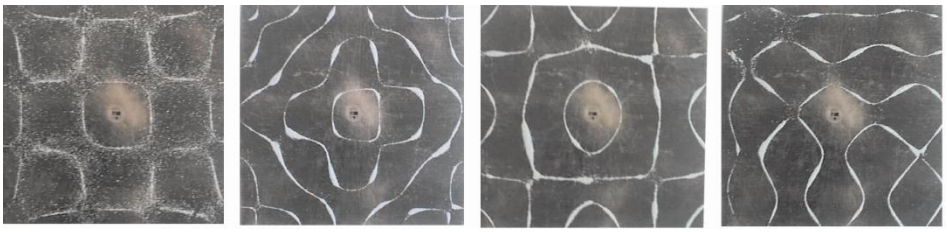
Tento druh vln (**stojaté vlny**) vzniká prakticky ve všech hudebních nástrojích dechových, bicích i strunných. Od nich se pak k našemu uchu šíří vzduchem **postupná vlna**.

Když jsme dělali pokusy se stojatými vlnami, jistě jste si všimli, že efekt byl zřetelný jen při naladění zdroje na určité frekvence. Říkáme, že dochází k rezonanci.

U mnoha hudebních nástrojů se frekvence tónů, které mají zaznít, nastavují změnou délky znějícího vzduchového sloupce. Chápete už funkci otvorů na zobcové flétně nebo okaríně? Všimněte si, jak jsou „doladěny“ píšťaly varhan na obrázku hudebních nástrojů.

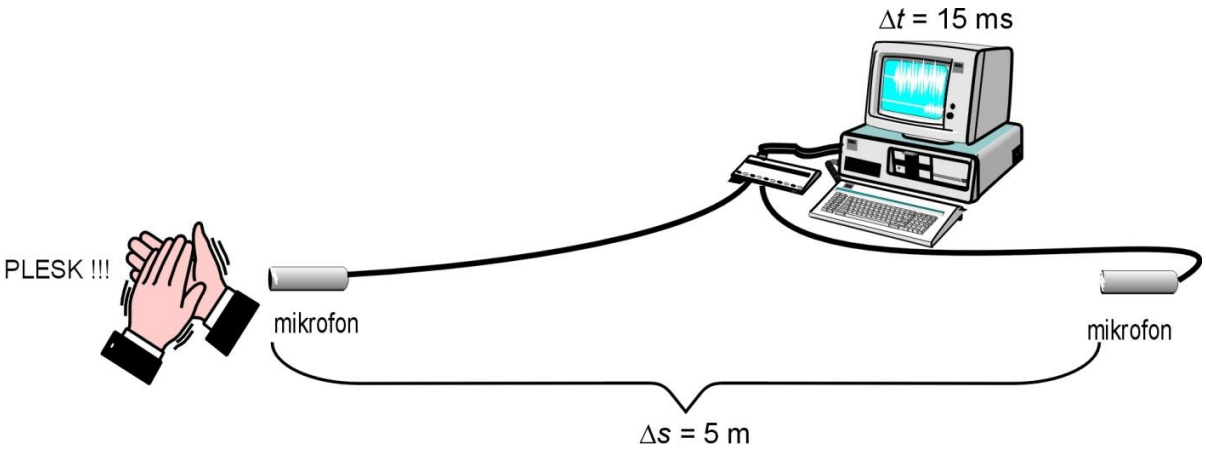
Krásné zviditelnění stojatého vlnění v trubici (tzv. Rubensova trubice) s hořlavým plynem ukazuje video na adrese:
http://www.youtube.com/watch?v=HpovwbPGEoo&feature=player_embedded#at=19.

Na deskách a blánách (činely, bubny) má **stojatá příčná** vlna složitější tvar, vzhledem k více odrazům. Na dolních obrázcích je rozmístění uzlů vykresleno jemným pískem, jenž se z kmiten přemísťuje do uzlů. Různé obrazce (Chladniho obrazce) jsou dány různou frekvencí, s níž jsme pružnou desku rozezvučeli.



MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU

Ve výuce jsme si ukázali dva z mnoha způsobů měření rychlosti zvuku. Nejjednodušší přímá metoda spočívala v tom, že jsme měřili počítačem ve funkci stopek dobu, za jakou zvuk urazil vzdálenost 5 metrů mezi dvěma mikrofony.



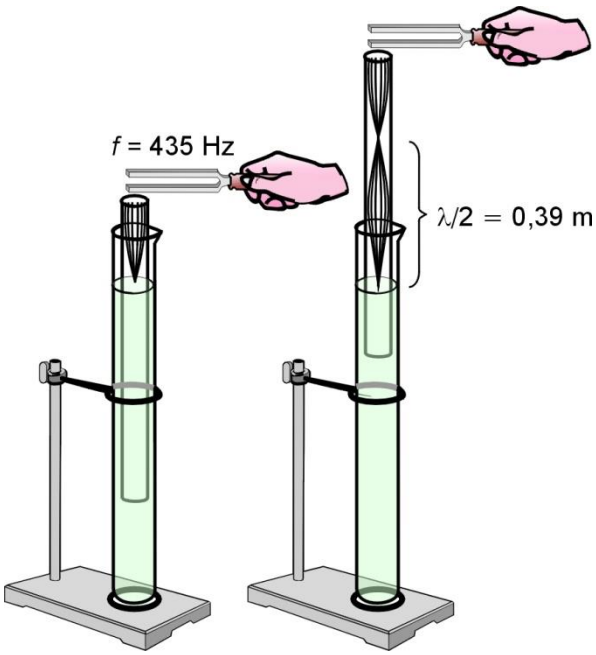
Rychlost zvuku jsme pak snadno vypočítali.

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{5\,\mathrm{m}}{15\cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}}\approx 330\,\mathrm{m/s}$$

Nepřímou metodou jsme rychlost určili pomocí rezonance.

V trubici „zazátkované“ na dolním konci vodou jsme nahoře rozezněli ladičkou o frekvenci f = 435 Hz vzduchový sloupec. Ponořováním trubice jsme našli a zaznačili 2 polohy, kdy docházelo k rezonanci – hladiny vody byly v místě uzlů.

Na obrázku jsou stojaté vlny v trubici nakresleny pro názornost jako příčné, ve skutečnosti jde samozřejmě ve vzduchu o stojaté podélné vlny.



Podle vztahu pro vlnovou délku rychlost vypočítáme.

$$\lambda=v\cdot T=\frac{v}{f}\quad\Rightarrow v=\lambda\cdot f=0{,}78\,\mathrm{m}\cdot 435\mathrm{Hz}\approx 340\,\mathrm{m/s}$$

ÚLOHY

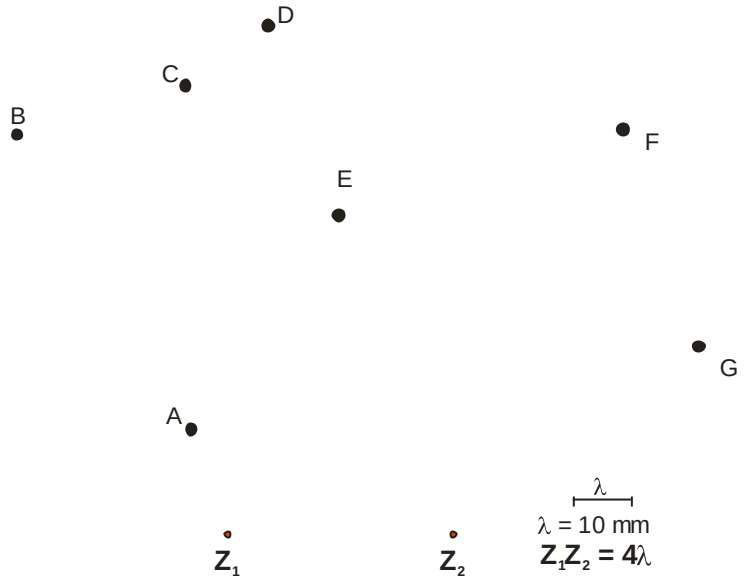
1. Narýsujte model šíření zvukových vln o frekvenci 3 300 Hz ze dvou zdrojů vzdálených 0,4 m.

(v = 330 m/s). Měřítko volte 1 : 10. Určete a barevně zakreslete oblasti maxim a minim.

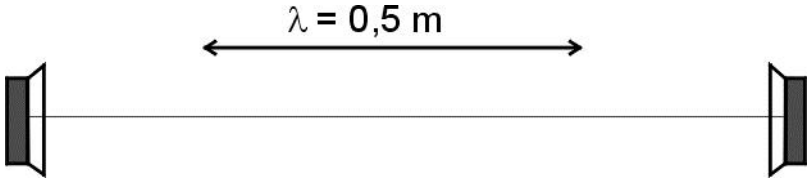
Pro několik míst, v nichž dochází ke konstruktivní interferenci, změřte rozdíl vzdáleností od obou zdrojů.

Pro několik míst, v nichž dochází k destruktivní interferenci, změřte rozdíl vzdáleností od obou zdrojů.

2. Podle rozdílu vzdáleností od zdrojů vlnění Z_1 a Z_2 rozhodněte, ve kterých bodech A, B, C, D, E, F, G dochází k interferenci destruktivní (**D**), kde k interferenci konstruktivní (**K**) a kde není interference ani jedním z těchto extrémů (**N**).



3. Mezi dvojicí stejně znějících reproduktorů vzniká stojaté vlnění o vlnové délce λ = 0,5 m. Určete polohy kmiten (K) a uzlů (U) na spojnici reproduktorů.



4. Vysvětlete, proč je rychlost zvuku v ledu větší než v kapalné vodě.

„SÍLA“ ZVUKU

Bouřlivý rozvoj techniky v posledním století nám ukazuje zvuk i z méně sympatické stránky. Motory automobilů, lokomotiv i letadel poskytují sice člověku svou sílu, ale jako přívažek ho obtěžují hlukem a chvěním. Komu tato lavina zvuků nestačí, nasadí si na uši sluchátka a přidá k tomu ještě další porci. Chudáci naše uši a náš mozek.

Příliš silný zvuk není méně nebezpečný, než například nečistoty, jež se dostávají do vzduchu a vody. Na hluk a nepřiměřeně hlasitý zvuk si dokážeme pomalu zvyknout, takže ani nepostřehneme, jak otupil náš sluch i mozek. Bolesti hlavy, nervozitu i nedoslýchavost pak lidé svádějí na všechno možné, jen ne na svou nedostatečnou obranu před hlukem a rámusem.

Není pravda, že hluk je nutným znakem velkoměsta, že rámus při práci je projevem chlapského přístupu. Hlučnější auto nebo motocykl není ani rychlejší, ani výkonnější. Kouzlo řevu motorů a podceňování lidí, kteří nejsou stále slyšet, asi znáte všichni z vlastní zkušenosti. Ve skutečnosti nejmodernější stroje, rychlé a výkonné, jsou velmi tiché, a proto i dražší.

I o zábavě si mnoho lidí myslí, že čím hlučnější, tím lepší, a má-li být opravdu „super", musí o ní vědět daleké okolí, ať jde o město nebo o přírodu.

Mnozí lidé si neuvědomují, že škodlivý není jen zvuk nějakým způsobem nepříjemný. Na naše uši útočí záludně i příliš hlasitá hudba. Před silným zvukem se bohužel „nepřihmouří" ušní boltce, tak jako se zavřou oční víčka před nebezpečným světlem. Přesto je lidské ucho úžasné zařízení. Dokáže postřehnout zašeptání nebo šelest listí, při němž zvuková vlna rozkolísá tlak o milióntiny pascalů, a snese burácení tryskového motoru, kdy kmity tlaku dosahují několik pascalů, tedy miliónkrát větší hodnoty.

Pro měření toho, jak je zvuk silný, se častěji než akustický tlak v pascalech používá jednotka decibel (dB). Je to jednotka jiná, než na jaké jsme zvyklí odjinud. Když slabě bzučí jediná moucha, vydává zvuk „silný" asi 10 dB. Deset takových bzučalek by už vydávalo zvuk silný 20 dB. Stočlenný muší orchestr zní 30 dB a na 40 dB už bychom potřebovali 1000 much. Na každých dalších 10 decibelů bychom museli orchestr zdesaterónásobit.

Jaké zvuky můžeme přičlenit k jednotlivým příčkám decibelové stupnice, ukazuje následující tabulka.

zdroj zvuku	**zvukový tlak (Pa)**		**hladina tlaku (dB)**	**Účinky**
tryskový motor ze vzdálenosti 10 m	200	2.10^{2}	140	nesnesitelná bolest
rockový koncert, zakřičení do ucha	20	2.10^{1}	120	bezprostředně nebezpečné
výfuk bez tlumiče, řev	2	2	100	nebezpečné při trvání delším než 2 hodiny
rušná ulice, hlasitá hudba	0,2	2.10^{-1}	80	nebezpečné při trvání delším než 8 hodin
hlučný obchod, hlasitý rozhovor	0,02	2.10^{-2}	60	přiměřená úroveň
obývací pokoj, tichý rozhovor	0,002	2.10^{-3}	40	ztichlé prostředí
vysílací studio, kočka, když přede	0,000 2	2.10^{-4}	20	tichounko
	0,000 02	2.10^{-5}	0	nepříjemné ticho

Pro doplnění bychom měli uvést, že přestože je ticho významným činitelem zdraví, hlavně duševního, nesmíme ho zaměňovat s naprostým tichem. Úplné odstranění zvuku je nepřirozené a škodlivé. Za normálních okolností slyšíme šelestění listí a šumění deště, šeptání větru i ruchy od pohybujících se lidí. To patří k přírodě a představuje ideální zdravé prostředí. Jestliže všechny zvuky odpadnou, jak líčí cestovatelé v pouštích i polárních krajinách nebo astronauti v družici na oběžné dráze, cítí člověk úzkost a strach. Naštěstí nám nebezpečí nedostatku zvuku nehrozí. Hluk je opravdu vážnějším nepřítelem.

Poruchy sluchu způsobené zejména velmi silným nebo dlouho trvajícím hlukem jsou různé. Při hluku dosahujícím na pracovišti 100 decibelů už u většiny lidí dojde za čas k nedoslýchavosti a mnozí úplně ohluchnou. Svou roli přitom hraje i výška zvuku. Čím vyšší frekvence, tím rychleji k poruše dochází.

Silný a dlouhotrvající hluk mívá za následek poškození mozku, které se projevuje poruchami spánku, bolestmi hlavy a úzkostmi. Někdy se promítne do poruch oběhového ústrojí (zrychlený tep, bolesti u srdce, dusnost) nebo trávicího ústrojí. Nejčastější je zvýšené vylučování žalu dečních šťáv, tzv. pálení žáhy, jež může vést k žaludečním vředům. Celkové oslabení organismu hlukem snižuje i odolnost proti nákazám.

V pásmu od 30 dB do 65 dB, které zahrnuje běžné životní prostředí, je významným faktorem to, jaký vztah ke slyšenému zvuku zaujímáme. Jednoduše řečeno, jestli se nám líbí nebo ne. Většina z vás by asi považovala řeč znějící stejně silně jako muzika z vašeho walkmanu za nesnesitelné řvaní.

Ochrana před hlukem má několik tváří. Nejlepší obranou je zabraňovat vzniku hluku. Konstruktéři moderních strojů, automobilů, letadel apod. věnují tomuto cíli velkou pozornost, přestože je to drahá záležitost.

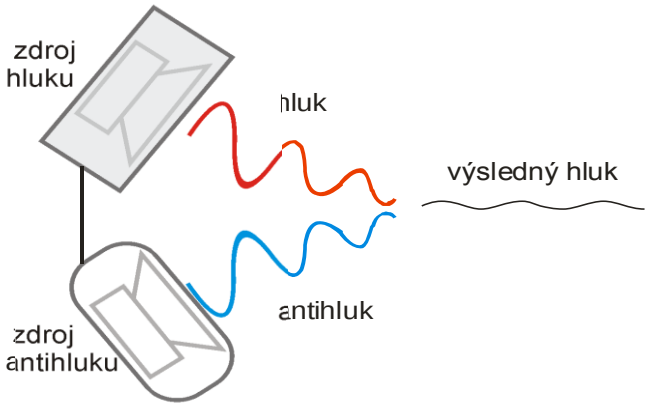
Stále ovšem existují práce, jež hluk provází. Ve velkých průmyslových provozech, kovárnách, zkušebnách a opravnách motorů či v kabinách letadel se nikdy hluku úplně nezbavíme. Na takových pracovištích se doporučuje a předepisuje používání osobních ochranných pomůcek proti hluku. Mohou to být speciální špuntíky do uší nebo protihluková sluchátka. Nejlepší však je se hluku vyhýbat.

Rezonanční chránič sluchu

Sluchátkový chránič sluchu

ÚLOHY

1. Na obrázku je schématicky znázorněno tzv. „aktivní potlačování hluku“. Popište, co je podle vašeho názoru „pasivní potlačování hluku“ a v čem spočívá princip „aktivního potlačování hluku“.



4. OPTIKA

SVĚTLO JAKO VLNA

Spor o podstatě světla se přenesl z oblasti filozofických úvah do reality koncem 17. století.

Vlnovou teorii světla uveřejnil v knize Pojednání o světle (1690) holandský fyziky Christiaan Huygens. Své přesvědčení, že světlo tvoří vlny, založil na jednoduché otázce: Pokud by světlo tvořily třeba malinké letící částice, jak vysvětlit některé optické jevy, které přírodovědci už řadu let popisovali?

Christiaan Huygens byl sice slavným vědcem, ale jeho činnost byla přece jen ve stínu jeho současníka Isaaca Newtona (1642-1727). Ten ve svém spisu Optika (úplný název: Optics or a Treatise of Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light,1704) předložil vlastní teorii světla. Tvrdil, že podstatou světla je proud částic. Newtonův věhlas byl již v té době tak ohromný, že většina vědců považovala jeho částicovou (korpuskulární) teorii světla za správnou, ba co víc, záhy se stala nezpochybnitelnou, až do objevu interference světla.

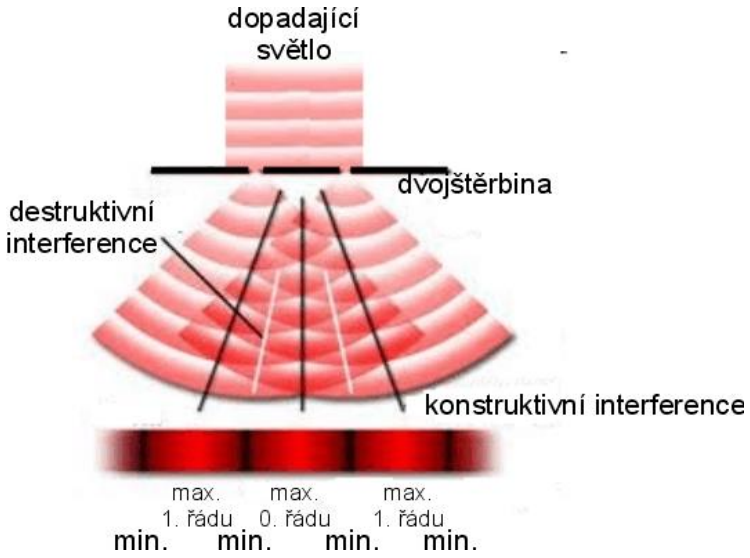
K rozhodujícím pokusům, jež nám pomohly vybrat správný z obou názorů na charakter světla, jsme se dostali již při pokusech se zvukem. Při skládání dvou stejných zvuků z dvojice reproduktorů jsme viděli (vlastně slyšeli), že v některých místech došlo k zeslabení zvuku, tzv. destruktivní interferenci. Tehdy jsme se dozvěděli, že:

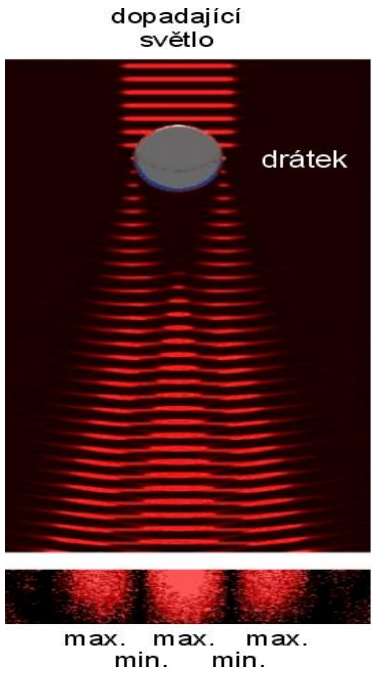
Destruktivní interference je děj typický pro všechny druhy vlnění.

Jestli je tedy světlo proudem částic, mělo by se světlo ze dvou zdrojů vždy zesílit.

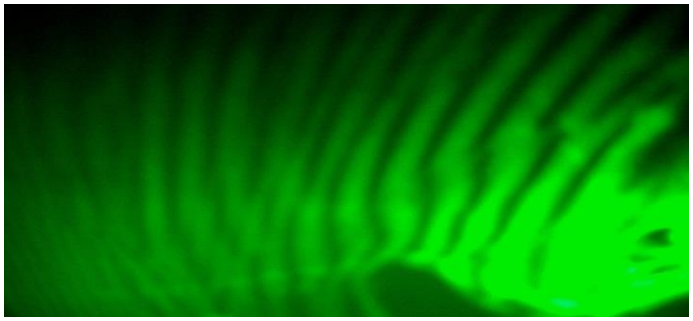
Pokud je světlo vlněním, mohlo by někde docházet k destruktivní interferenci.

Problém při pokusu se světlem spočívá v tom, že nedokážeme vytvořit dva světelné zdroje vysílající zcela shodné světelné vlny. Řešení, které jste sami našli, spočívalo v tom, že jsme světlo z jednoho zdroje rozdělili. Na dolních obrázcích jsou schematicky zachyceny dva pokusy, jimiž se nám to podařilo.



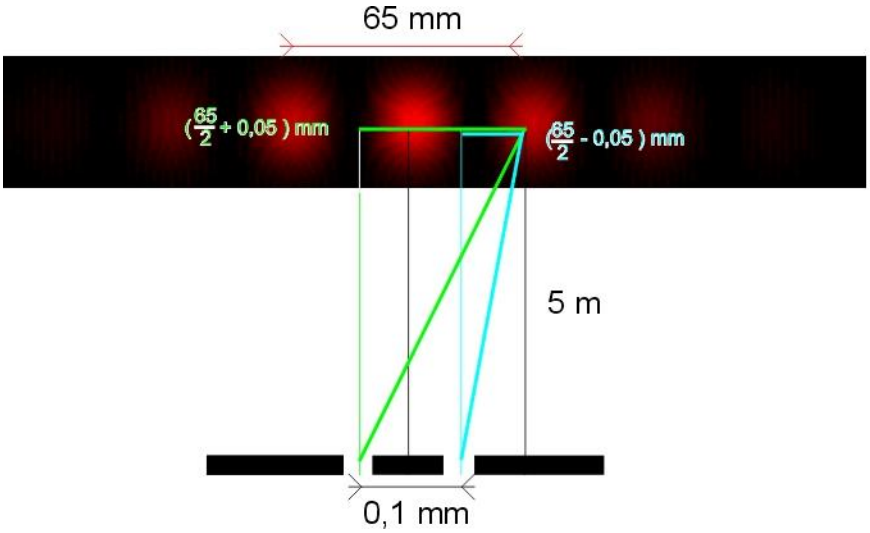


Třetím pokusem, který jsme provedli, bylo odrážení světla zeleného laseru na přední a zadní stěně tenoulinké slídové destičky. I zde vidíme, že odražené světelné vlny se v některých místech zesílily, v jiných místech zeslabily.



VLNOVÁ DÉLKA SVĚTLA

Pokus s průchodem světla dvojštěrbinou nám umožnil alespoň hrubě určit vlnovou délku $\lambda = c \cdot T$ světla laseru, jenž jsme použili. Na obrázku je schematický obrázek naší sestavy (pro názornost je velmi zkreslen).



Již víme, že v místě, kde je maximum 1. řádu, je rozdíl vzdáleností od obou zdrojů (zde štěrbin) právě jedna vlnová délka. Stačí tedy odečíst od přepony zeleného pravoúhlého trojúhelníka přeponu modrého pravoúhlého trojúhelníka a máme hrubý odhad vlnové délky světla laseru.

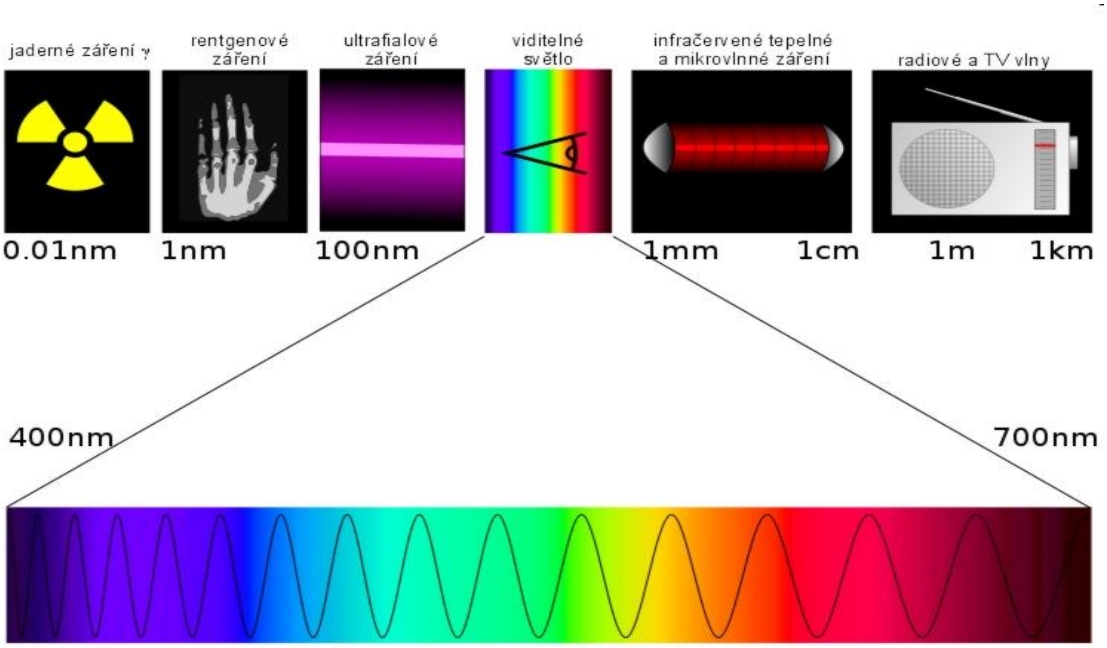
$$\lambda = \sqrt{0{,}03255^2 + 5^5}\ \mathrm{m} - \sqrt{0{,}03245^2 + 5^2}\ \mathrm{m} = 650 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{m}$$

Vidíme, že vlnová délka červeného světla laseru je velmi malá ve srovnání s vlnovými délkami zvuku. Přitom jde o světlo červené barvy, které (jak uvidíme) světlo ostatních barev svou vlnovou délkou převyšuje.

Světelné vlny jsou **elektromagnetické**. To znamená, že se od zdrojů šíří změna elektrického a magnetického pole, aniž by přitom byla nezbytná látka, jejíž částečky by nějak kmitaly. Stojí snad za

připomenutí, že v počátečních úvahách o světelných vlnách byl takový nositel vln ve vakuu předpokládán (tzv. světelný éter).

Elektromagnetické vlny, jež vnímáme zrakem – viditelné světlo, představuje v celém oboru elektromagnetických vln jen nepatrný žďabínek, který je na dolním obrázku značně roztažený.



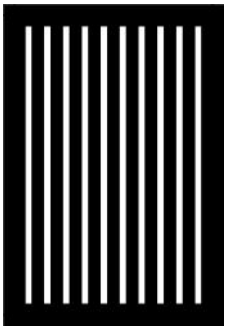
Přehledné spektrum všech elektromagnetických vln hrubě ukazuje horní část obrázku.

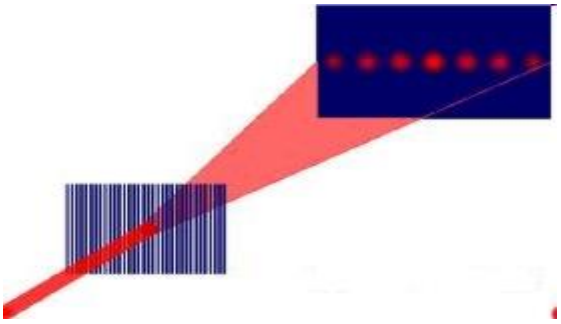
Světlo se šíří ve vakuu rychlostí (označení c) $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Jde o maximální rychlost, jíž nemůže žádný objekt dosáhnout. V látkách je rychlost světla vždy menší než ve vakuu. Příklady rychlostí světla v několika látkách uvádí tabulka.

látka	vzduch	led	voda	glycerol	sůl	sklo	diamant
rychlost světla (m/s)	$2{,}99 \cdot 10^{-8}$	$2{,}30 \cdot 10^{-8}$	$2{,}25 \cdot 10^{-8}$	$2{,}05 \cdot 10^{-8}$	$1{,}95 \cdot 10^{-8}$	$1{,}6$ až $1{,}9 \cdot 10^{-8}$	$1{,}24 \cdot 10^{-8}$

ROZKLAD SVĚTLA MŘÍŽKOU

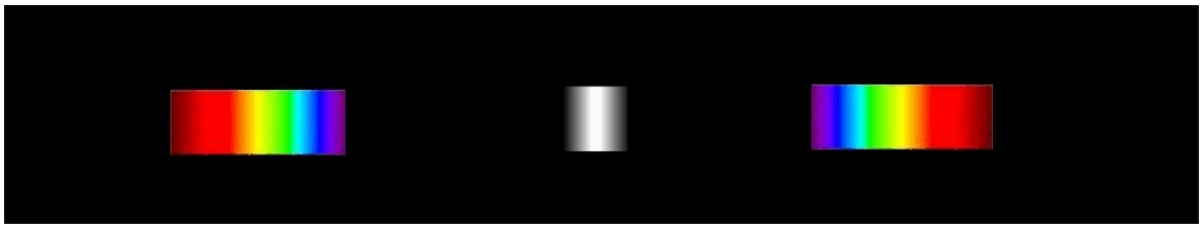
Optická mřížka je soustava velkého počtu stejně širokých rovnoběžných štěrbin v malé vzdálenosti od sebe. Na obrázku je pro názornost vzdálenost štěrbin tisícinásobně zvětšena. Kvalitní mřížky mají stovky štěrbin na jednom milimetru.





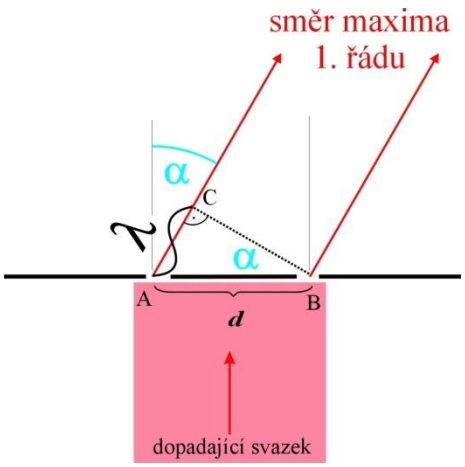
Když mřížku osvětlíme rovnoběžnými svazkem světla laseru, dojde k interferenci světelných vln procházejících štěrbinami podobně jako na dvojštěrbině. Na stínítku zachycená maxima jsou velmi ostrá a jsou od sebe vzdálena tím více, čím jsou štěrbiny mřížky blíž u sebe.

Při dopadu bílého světla na optickou mřížku je nulté maximum bílé, protože je pro všechny složky světla společné. V dalších interferenčních maximech vzniká rozklad světla. Vznikající maxima vyšších řádů jsou symetricky rozložena od nultého maxima. Na obrázku je zachyceno maximum nultého řádu a maxima 1. řádu světla žárovky rozloženého mřížkou, která měla 500 štěrbin na 1 mm a tedy vzdálenost sousedních štěrbin $d = 2 \cdot 10^{-6}$ m.



Pokusme se najít podmínku pro směr α, v němž jsou od původního směru odchýlena maxima jednotlivých barev. Budou to směry, ve kterých je dráhový rozdíl jedna (nebo několik) vlnových délek.

Z obrázku je vidět , že pro úhel α v trojúhelníku ABC platí:



$$\sin\alpha = \frac{\lambda}{d} \quad \Rightarrow \quad d \cdot \sin\alpha = \lambda$$

d je vzdálenost štěrbin mřížky (tzv. mřížková konstanta)

λ vlnová délka světla

α odchýlení max. 1. řádu od směru dopadajícího světla

Z uvedeného vztahu je vidět, ve shodě s pokusem, že nejméně odchýlené světlo je fialové – má nejmenší vlnovou délku. Červené světlo je odchýleno nejvíce, jeho vlnová délka je největší.

Pro směry maxim 2., 3. a vyšších řádů je výsledný vzorec obdobný: $d \cdot \sin\alpha = n \cdot \lambda$, kde n je celé číslo.

Pokus, jejž jsme provedli, nám umožnil hrubě ověřit interval vlnových délek od fialového po červené světlo žárovičky.

Na tabuli vytvořila mřížka (vzdálená 7,5 m od tabule), která měla 500 štěrbin na 1 mm ($d = 2 \cdot 10^{-6}$ m), spektrum (1. řádu) tak, že červený okraj byl vzdálen od nultého maxima 145 cm, fialový okraj spektra byl vzdálen 285 cm.

Pomocí funkce tg α = *odchylka* **:** *vzdálenost od mřížky* nám vychází pro odchýlení:

tg $\alpha_{FIALOVE} = 0{,}197 \Rightarrow \alpha_{FIALOVE} = 11^{O}$, odtud sin $\alpha_{FIALOVE} = 0{,}19$ a pro $\lambda_{FIALOVE} \approx 400$ nm.

tg $\alpha_{CERVENE} = 0{,}380 \Rightarrow \alpha_{CERVENE} = 21^{O}$, odtud sin $\alpha_{CERVENE} = 0{,}36$ a pro $\lambda\ \alpha_{CERVENE} \approx 700$ nm.

Výsledky jsou v dobré shodě s údaji z tabulek.

Se skládáním světelných vln si můžete pohrát v appletu coloradské university na adrese:

http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference

ÚLOHY

1. K orientačním hodnotám vlnových délek různých elektromagnetických vln vypočtěte frekvence a periody kmitů. Zaokrouhlujte na 1 platnou cifru.

vlnová délka	0,01 nm	1 nm	100 nm	400 nm	700 nm	1 mm	1 cm	1 m	1 km
perioda (s)						$3 \cdot 10^{-12}$			
frekvence (Hz)					$4 \cdot 10^{-14}$				

2. Uveďte typ elektromagnetické vlny, jež

a) může způsobit fluorescenci

b) se ohýbá kolem kopců

c) se používá v radaru

d) prochází kovy

e) je vydávána horkými látkami

f) je vnímána okem

3. Jaká je vlnová délka elektromagnetických vln, která se používá pro přenos rozhlasového signálu stanice o frekvenci 100 MHz?

4. Budíky a náramkové hodinky řízené rádiem se řídí dlouhovlnným signálem, vysílaným z Meinflingenu u Frankfurtu nad Mohanem. O kolik se liší údaj na takových hodinkách v Praze od správného času?

   (Meinflingen – Praha 360 km)

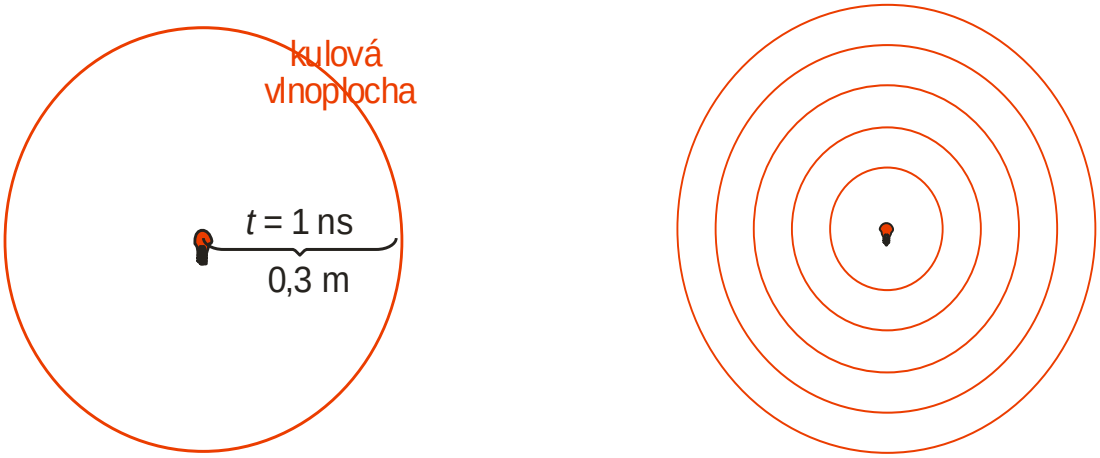
5. Vložíme-li do mikrovlnné trouby, z níž jsme vyndali otáčecí talíř, několik plátků trustového chleba a na několik minut troubu zapneme, objeví se na chlebu spálená místa v oblastech intenzivního ohřevu. Jsou to místa, kde byly kmitny stojatého elektromagnetického vlnění, které v mikrovlnce vzniká. Změřením vzdáleností spálenin můžeme odhadnout vlnovou délku λ a frekvenci *f*, na níž mikrovlnka pracuje.

6. Vypočítejte úhlovou šířku $\Delta\alpha = \alpha_{CERVENE} - \alpha_{FIALOVE}$ spektra v maximu 2. řádu, vytvořeného mřížkou, která měla 250 štěrbin na 1 mm. Použijte známé hodnoty vlnových délek okrajů viditelného spektra.

7. Ukažte, že se v předcházejícím případě 6) překrývá červený okraj spektra 2. řádu s fialovým okrajem spektra 3. řádu.

SVĚTELNÉ PAPRSKY

Dosud jsme světlo v obrázcích zakreslovali pomocí **vlnoploch**. Byly to plochy, do kterých světlo od zdroje dorazilo ve stejný časový okamžik.

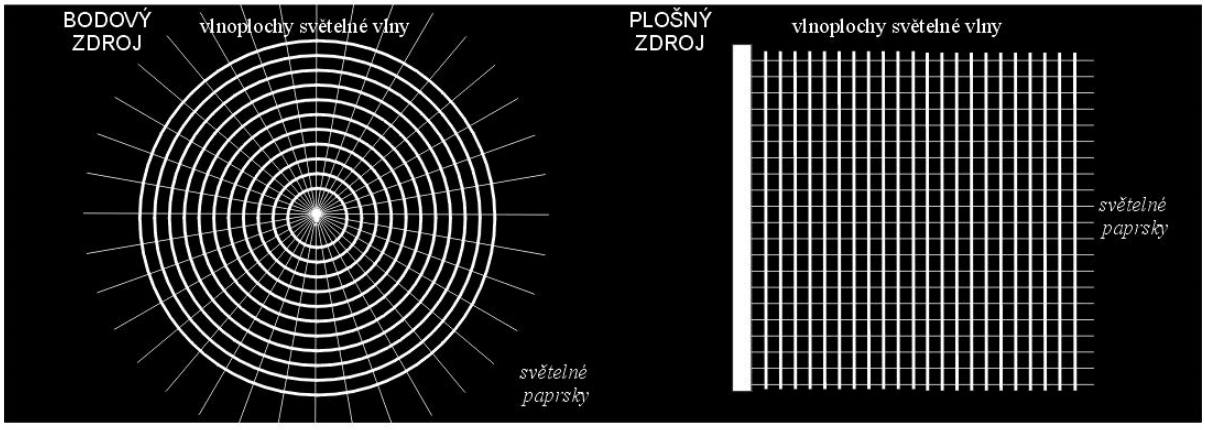


Pokud zakreslujeme celé skupiny vlnoploch, budou to vlnoplochy vzdálené o vlnovou délku λ. Jde tedy o jednotlivé vlny vysílané zdrojem světla s časovým odstupem jedné periody *T*.

Nejjednodušší příklady vlnoploch – kulové a rovinné vlnoplochy – znázorňuje obrázek na další straně.

Vlevo jsou kulové vlnoplochy světla vysílaného „bodovým zdrojem“ (malý zdroj ve srovnání se vzdálenostmi, v nichž světlo zachycujeme).

Vpravo jsou rovinné vlnoplochy světla vysílaného plošným zdrojem.



Poznámka: Při velké vzdálenosti od zdroje (např. na Zemi od Slunce) jsou vlnoplochy prakticky rovinné.

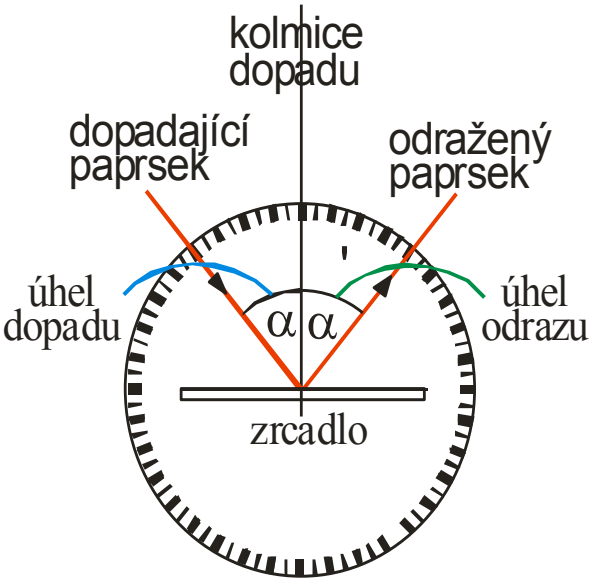
Světelnými paprsky nazýváme přímky (polopřímky) kolmé na vlnoplochy.

ODRAZ SVĚTLA

Na optické desce jsme proměřili, jak probíhá odraz světla.

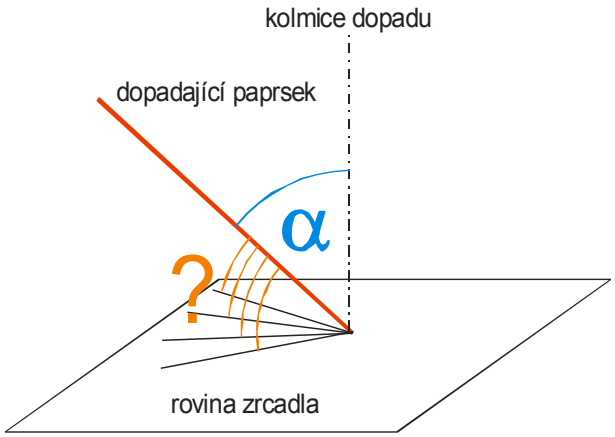
Názvy, které budeme v paprskové optice používat,

jsou zřejmé z obrázku.



Proč měříme úhel dopadu paprsku od kolmice dopadu a ne od roviny zrcadla, vysvětluje obrázek vpravo.

Rameno takového úhlu ?, jež by leželo v rovině zrcadla, je obtížněji určitelné než úhel α sevřený dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu.



Výsledky našeho měření:

úhel dopadu α	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
úhel odrazu α'	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°

Zákon odrazu:

Úhel odrazu se rovná úhlu dopadu.

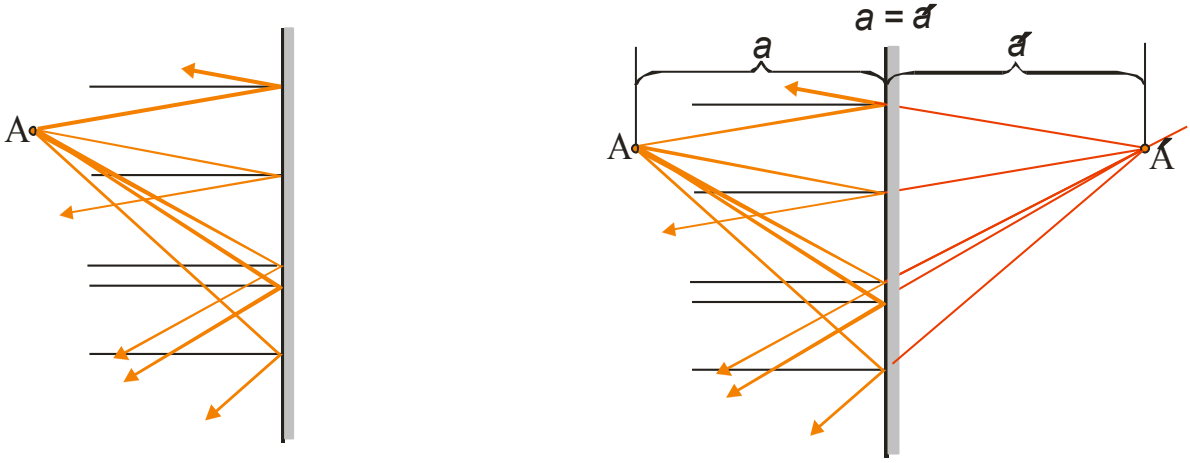
Odražený paprsek, kolmice dopadu a odražený paprsek leží v jedné rovině.

ROVINNÁ ZRCADLA

Když se díváme do zrcadla, vidíme v něm svou tvář jakoby za zrcadlem. Jak takový vjem vlastně vzniká?

Začneme svou úvahu nejdříve jednoduchým myšleným pokusem, při kterém před zrcadlo umístíme do bodu A nepatrnou idealizovanou svatojánskou mušku. Světelné paprsky od ní vycházející míří do všech stran.

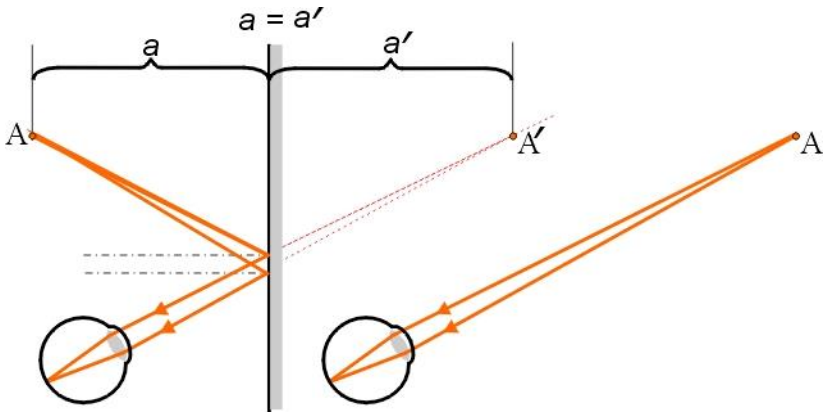
Na obrázku jsme si ze všech paprsků vybrali jen pět paprsků mířících k zrcadlu a podle zákona odrazu k nim nakreslili odražené paprsky.



Jestliže odražené paprsky prodloužíme za zrcadlo, vidíme, že v prodložení jako by vycházeli z jednoho bodu A´, jenž leží za zrcadlem ve stejné vzdálenosti jako bod A před zrcadlem.

Při pohledu do zrcadla vstupují do oka paprsky úplně stejně, jako bychom se dívali na skutečnou svatojánskou mušku. Říkáme, že za zrcadlem v bodě A´ vznikl zdánlivý obraz mušky.

Je přitom jasné, že za zrcadlem nic reálného vzniknout nemůže, žádné paprsky za zrcadlo neproniknou. Obraz vytvořený světlem na sítnici našeho oka je ale při pohledu na zrcadlo a při pohledu na skutečnou mušku stejný.



Můžeme shrnout:

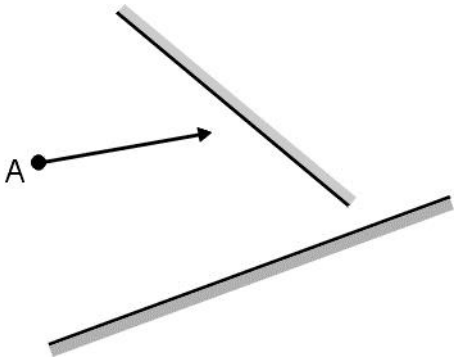
- Při zobrazování předmětu rovinným zrcadlem vzniká jeho **zdánlivý (neskutečný) obraz.**
- Obraz a předmět jsou souměrně sdružené podle roviny zrcadla.
- Obraz je vzpřímený.
- Obraz stejně veliký jako předmět.
- Předmět a obraz jsou stranově převrácené.

Běžná zrcadla, která používáme v každodenním životě, se nejčastěji vyrábí nanesením tenké vrstvy kovu (např.: cínový amalgám, stříbro, hliník) na zadní stranu skleněné desky.

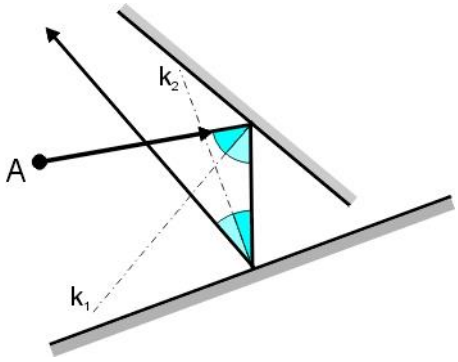
U zrcadel, jež se používají ve fotoaparátech, dalekohledech nebo v jiných složitějších optických přístrojích, se kov nanáší na vnější povrch skla, aby se předešlo odrážení světla od přední strany skla (vznikl by tak zdvojený obraz).

Příklad:

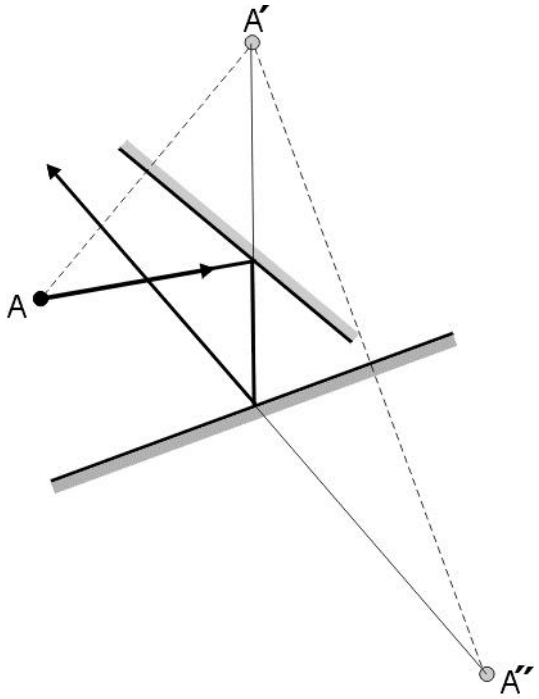
Na dvojici zrcadel (viz obrázek) dopadá z bodu A světelný paprsek. Narýsujte chod paprsku po odrazech na zrcadlech.



Řešení pomocí zákona odrazu

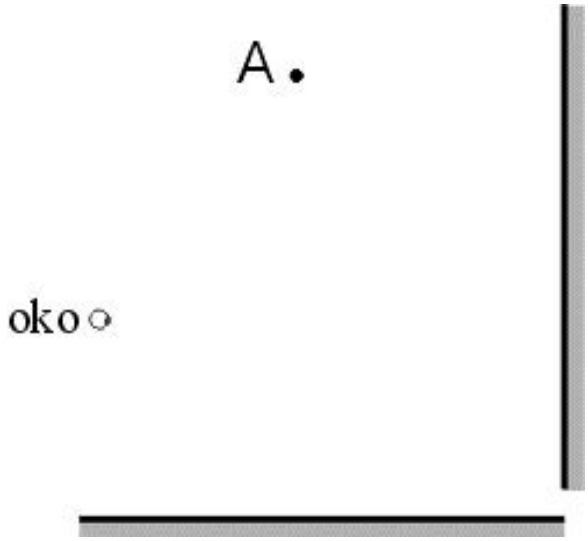


Řešení pomocí zobrazování bodu A

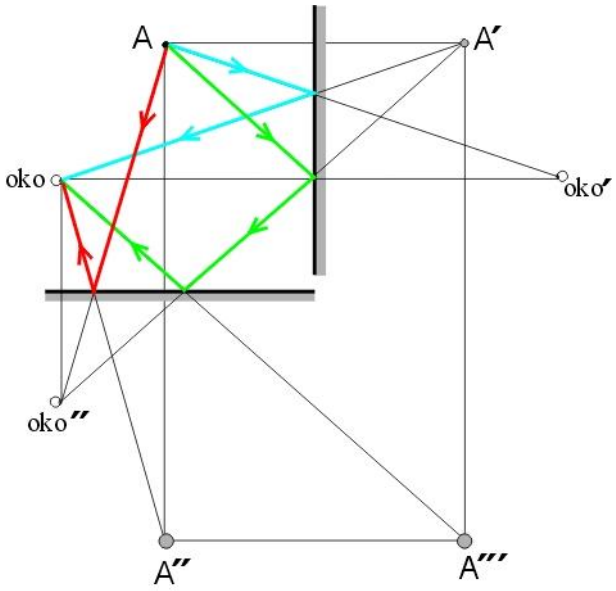


Příklad:

Dvojice zrcadel svírá pravý úhel. Před zrcadly je v bodě A svítící částečka. Najděte 3 její zdánlivé obrazy v zrcadlech a narýsujte 3 chody odrážených paprsků od částečky A k oku.

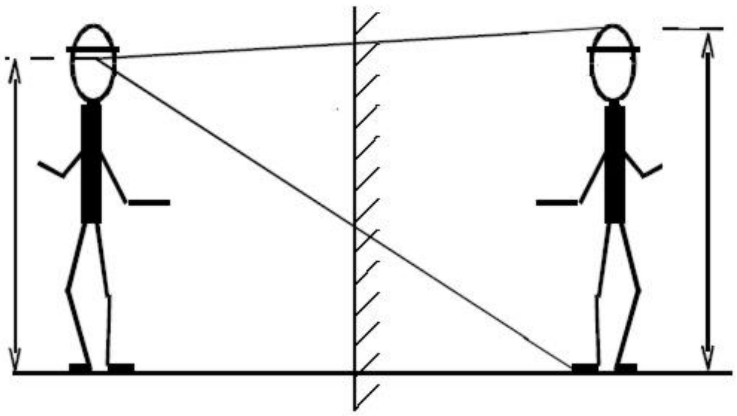


Řešení:



ÚLOHY

1. Jak vysoké musí být svislé rovinné zrcadlo, abyste v něm viděli svou celou postavu ? Ke svému výroku dojděte narýsováním obrázku podle předlohy ve vhodném měřítku. Předpokládejte, že stojíte 80 cm před stěnou, na níž bude zrcadlo. Svou výšku a výšku očí nad zemí si změřte. Obrázek nakreslete v měřítku 1:10. (1 m ve skutečnoti → 10 cm na obrázku)



2. Vypočtete, jak vysoká je věž, která je od pozorovatele vzdálena 46 m, je-li oko pozorovatele ve výšce 1,6 m nad povrchem země a zrcátko leží vodorovně na zemi ve vzdálenosti 1 m od pozorovatele.

3. Dvě rovinná zrcadla svírají úhel β. Určete úhel γ , jenž po odrazu na obou zrcadlech svírá paprsek vystupující ze soustavy s paprskem dopadajícím na první zrcadlo pod úhlem α.

Pro jaký úhel β budou oba paprsky rovnoběžné?

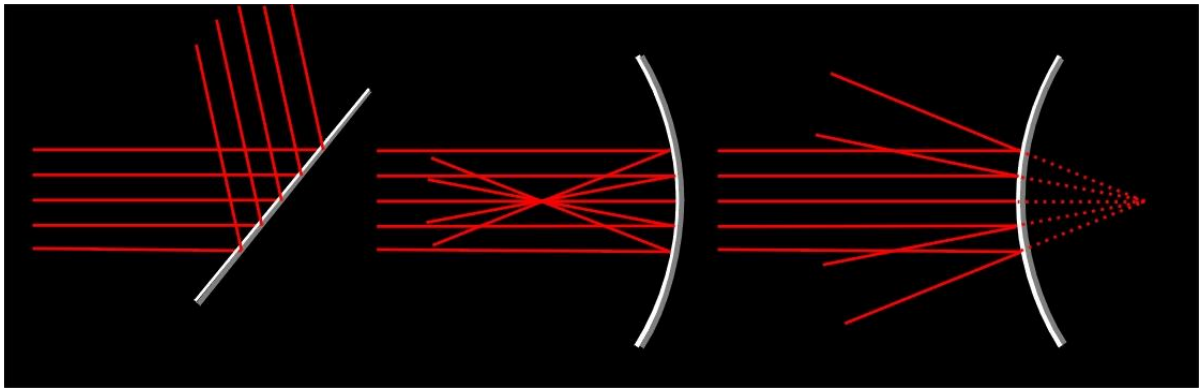
Pro jaký úhel β budou oba paprsky kolmé?

KULOVÁ ZRCADLA

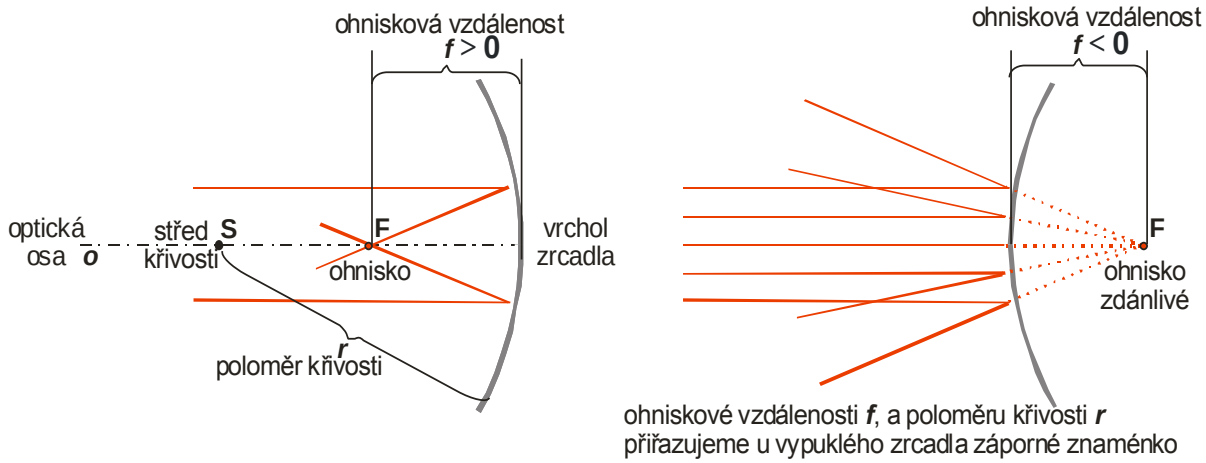
Kulovým zrcadlem je například nerezová naběračka, která asi nechybí v žádné kuchyni.

Ze strany, již vidíme na obrázku, je **zrcadlem dutým**, při pohledu z odvrácené strany je **zrcadlem vypuklým**.

Jak se liší odraz rovnoběžného svazku paprsků od rovinného zrcadla, od dutého zrcadla a od vypuklého zrcadla, jsme viděli při pokusech, které schematicky znázorňují obrázky.



K popisu odrazu světla a k zobrazování předmětů zrcadly zavádíme názvy a značení, jež jsou zřejmá z dolních obrázků.



ZOBRAZOVÁNÍ ZRCADLEM

Zobrazování zrcadlem jsme prováděli při laboratorní práci. Zobrazovali jsme plamínek hořící svíčky a měřili jsme při tom jednak ohniskovou vzdálenost *f* použitého dutého zrcadla, vzdálenost *a* plamínku od zrcadla a vzdálenost *a´* ostrého obrazu plamínku, který jsme zachytili na stínítku.

Výsledky jedné z laboratorních prací jsou na další stránce.

LABORATORNÍ PRÁCE Jméno:

Zobrazení dutým zrcadlem Třída:

Úkol:

1. Zjistěte pokusně ohniskovou vzdálenost f dutého zrcadla zaostřením na hodně vzdálený zdroj.
2. Ověřte platnost zobrazovací rovnice

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

a je vzdálenost plamene svíčky od vrcholu zrcadla

a' je vzdálenost obrazu plamene svíčky od vrcholu zrcadla

f je ohnisková vzdálenost zrcadla

Výsledky měření:

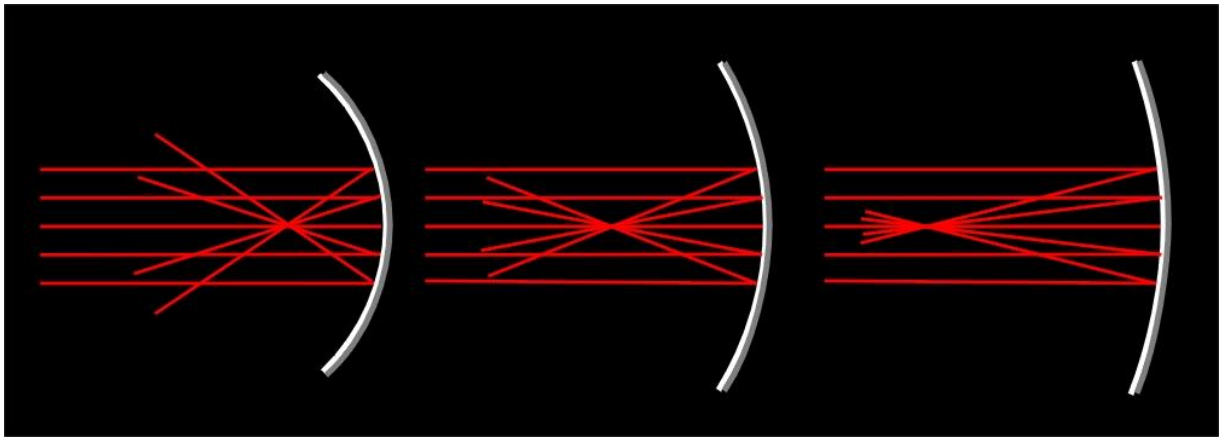
1) měření $f = 17$ cm

2) měření *a* (cm) *a´*(cm)

a (cm)	30	40	50	60	70
a´(cm)	40	30	28	24	22
1/a +1/a´ (cm^{-1})	0,058	0,058	0,056	0,058	0,059
průměr 1/a +1/a´ (cm^{-1})	0,058 z toho vychází f= 17,2 cm				

Převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti $1/f$ = 1/17cm = 0,059 cm^{-1}. To je v dobré shodě s průměrným výsledkem měření *1/a +1/a´* = 0,058 cm^{-1}, jak popisuje zobrazovací rovnice.

Ohnisková vzdálenost souvisí s křivostí zrcadla. I to nám ukázal pokus. Čím víc je zrcadlo zakřiveno, tím blíž je jeho ohnisko u zrcadla.

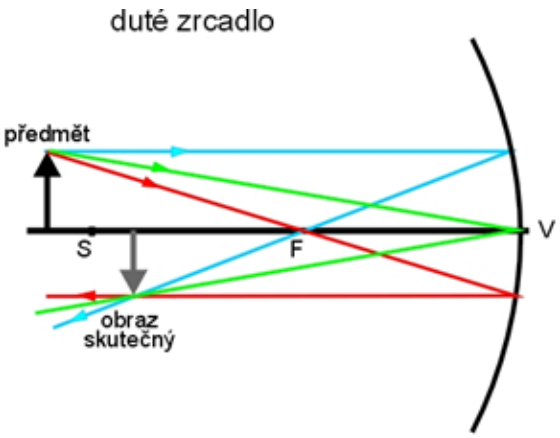


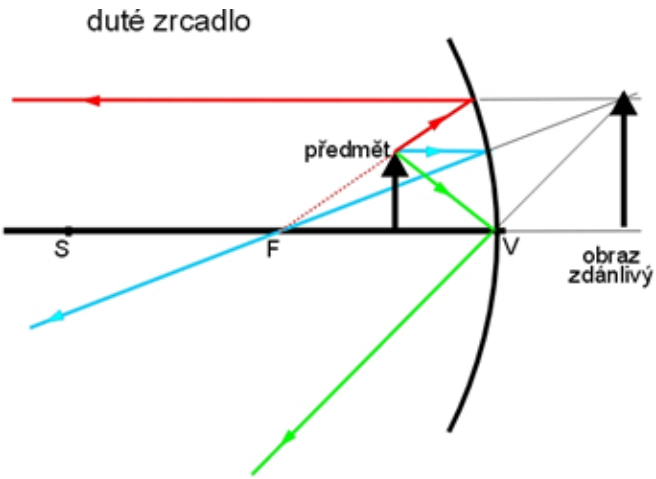
Velikost ohniskové vzdálenosti je svázána s poloměrem křivosti zrcadla jednoduchým vztahem:

$$f = \frac{r}{2}$$

ZOBRAZOVÁNÍ POMOCÍ VÝZNAČNÝCH PAPRSKŮ

Polohy obrazů vytvořených kulovými zrcadly je možné kromě výpočtu ze zobrazovací rovnice hledat pomocí tzv. význačných paprsků. Význačné paprsky jsou znázorněny na obrázku.

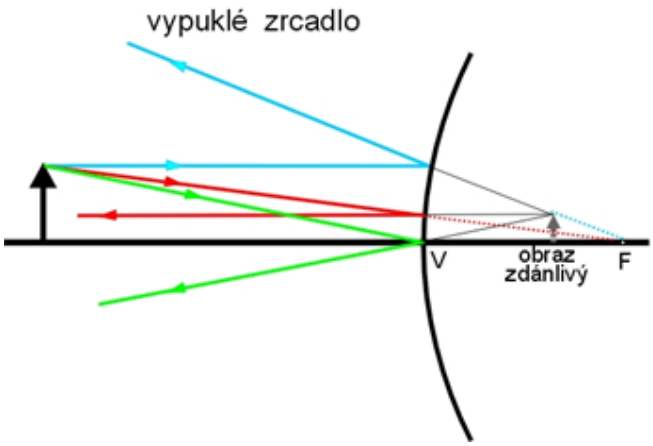


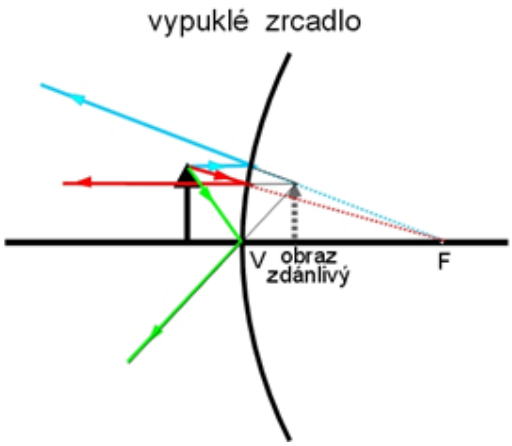


Paprsek rovnoběžný s optickou osou míří po odrazu od dutého zrcadla do ohniska.

Paprsek procházející ohniskem dutého zrcadla, nebo mající směr jako by z ohniska vycházel, má po odrazu od zrcadla směr rovnoběžný s optickou osou.

Paprsek mířící do vrcholu zrcadla se odráží pod stejným úhlem, s jakým dopadá.





Paprsek rovnoběžný s optickou osou míří po odrazu od vypuklého zrcadla do směru, jako by vycházel z ohniska.

Paprsek mířící do ohniska vypuklého má po odrazu má po odrazu směr rovnoběžný s optickou osou.

Paprsek mířící do vrcholu zrcadla se odráží pod stejným úhlem, s jakým dopadá.

Můžete si pohrát s appletem na adrese:

http://www.phys.hawaii.edu/~teb/java/ntnujava/Lens/lens_e.html

Příklad:

Před dutým zrcadlem o poloměru křivosti r = 8 cm je hořící svíčka 2 cm vysoká.

a) Jak daleko (a') od zrcadla zachytíme na stínítku její obraz, je-li umístěná a = 20 cm před zrcadlem?

b) Kde bude obraz svíčky, jestliže bude svíčka ve vzdálenosti a = 2 cm před zrcadlem?

Řešení užitím zobrazovací rovnice:

a = 20 cm

f = 4 cm

a'…?

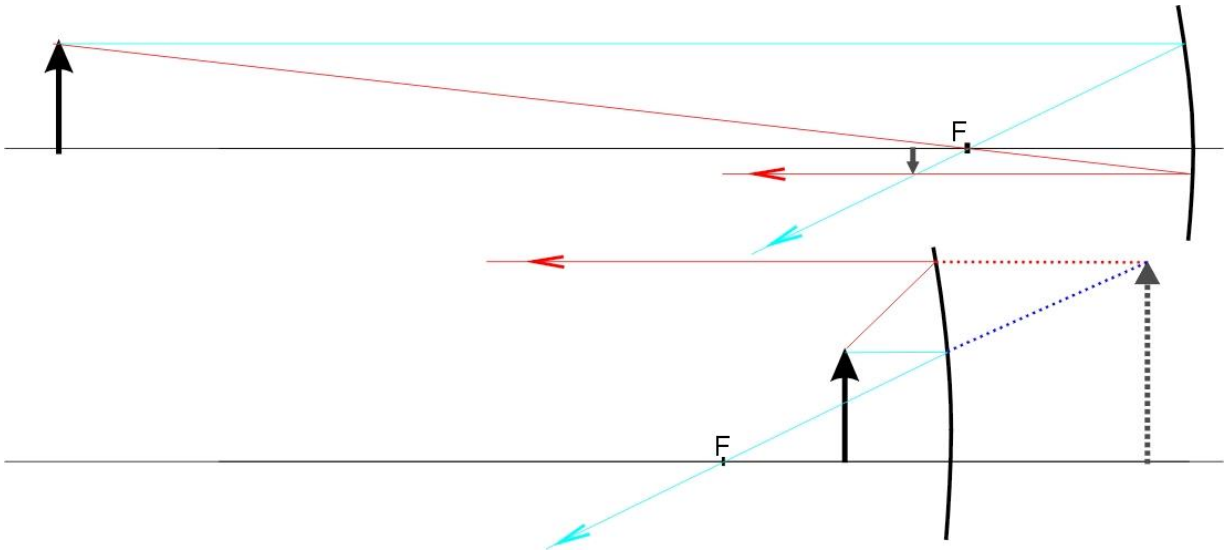
a) $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}\Rightarrow\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{a}=\frac{1}{4\,\mathrm{cm}}-\frac{1}{20\,\mathrm{cm}}=\frac{4}{20\,\mathrm{cm}}\Rightarrow a'=5\,\mathrm{cm}$

Obraz je skutečný, 5 cm před zrcadlem.

b) $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}\Rightarrow\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{a}=\frac{1}{4\,\mathrm{cm}}-\frac{1}{2\,\mathrm{cm}}=\frac{-1}{4\,\mathrm{cm}}\Rightarrow a'=-4\,\mathrm{cm}$

Obraz je zdánlivý, 4 cm za zrcadlem.

Řešení užitím význačných paprsků:



Poznámka: Grafické a početní řešení nesouhlasí na 100%, není splněna podmínka, aby paprsky byly blízké optické osy (paraxiální).

Při zobrazování zavádíme ještě jednu fyzikální veličinu, tzv. **zvětšení optického zobrazení Z .**

Zvětšení udává, jaký je poměr výšky obrazu y' a výšky y zobrazovaného předmětu.

Zvětšení zobrazení = $\frac{orientovaná\ výška\ obrazu}{orientovaná\ výška\ předmětu}$ vzorcem: $Z=\frac{y'}{y}=\frac{-a'}{a}$

Výšku y'obrazu bereme kladně u obrazu vzpřímeného, záporně u obrazu převráceného.

Příklad:

Dutým kulovým zrcadlem (f = 1 m) byl zobrazen předmět výšky y = 3 cm umístěný a = 0,25 m před zrcadlem.

a) Určete polohu a´ jeho obrazu a jeho kvalitu. b) Určete zvětšení ***Z*** c) Určete velikost obrazu y'.

Řešení:

f = 1 m

a = 0,25 m

y = 0,03 m

a' …?

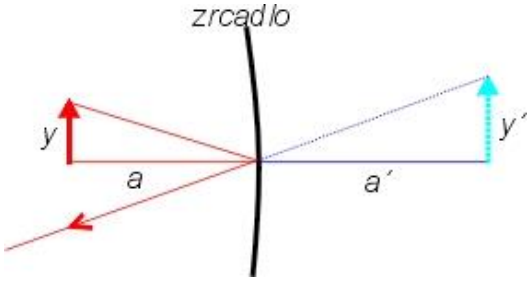
a) $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{a'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{a}=\frac{1}{1\,\mathrm{m}}-\frac{1}{0{,}25\,\mathrm{m}}=\frac{-3}{1\,\mathrm{m}} \Rightarrow a'=-1/3\ \mathrm{m}$

Obraz je za zrcadlem a tedy zdánlivý.

b) Trojúhelníky Δ a Δ jsou podobné.

$$Z=\frac{y'}{y}=\frac{-a'}{a}=\frac{-(-1/3)\,\mathrm{m}}{1/4\,\mathrm{m}}=4/3$$

c) $y'=Z\cdot y=4/3\,y=0{,}04\ \mathrm{m}$



UŽITÍ ZRCADEL

Dutá zrcadla jsou využívána dalekohledech, v teplometech, světlometech (parabolická zrcadla), jako kosmetická „zvětšovací“ zrcadla, v lékařství i v dalších oborech.

Vypuklá zrcadla slouží např. na křižovatkách, jsou používána v zubařství a jako zpětná zrcátka v automobilech.

ÚLOHY

1. V jaké vzdálenosti a od dutého zrcadla (f = 15 cm) je předmět, jestliže je jeho obraz převrácený, vzdálený 60 cm od zrcadla. Jaké je zvětšení tohoto zobrazení? Jaké jsou vlastnosti obrazu?

2. Doplňte chybějící údaje v tabulce. Využijte applet:
   http://www.phys.hawaii.edu/~teb/java/ntnujava/Lens/lens_e.html

Duté zrcadlo

vzdálenost předmětu	vzdálenost obrazu	vlastnosti obrazu (zmenšený či zvětšený, vzpřímený či převrácený, skutečný či zdánlivý)	absolutní hodnota zvětšení IZI>1,IZI<1, IZI=1	znaménko zvětšení + nebo -
$a > r$	$f < a' < r$		$\|z\|$	
$a = r$	$a' = r$		$\|z\|$	
$f < a < r$	$a' > r$		$\|z\|$	
$a = f$	$a' \rightarrow \infty$	----------	----------	----------
$a < f$	$0 > a' > -\infty$		$\|z\|$	

Vypuklé zrcadlo

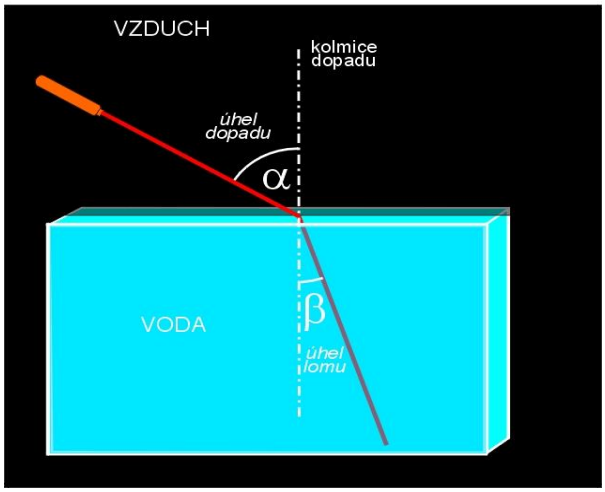
vzdálenost předmětu	vzdálenost obrazu	vlastnosti obrazu	absolutní hodnota zvětšení	znaménko zvětšení
$a > 0$	$0 > a' > -\infty$		$\|z\| < 1$	

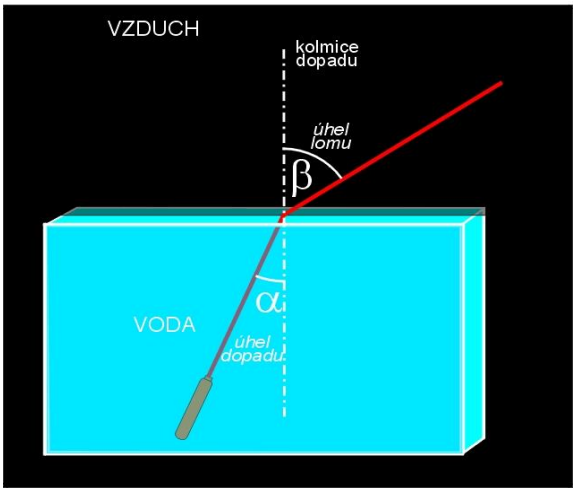
3. Do jaké vzdálenosti od dutého zrcadla (f = 20 cm) musíme umístit předmět, aby vzniknul jeho

a) skutečný obraz dvojnásobné velikosti b) zdánlivý obraz dvojnásobné velikosti

LOM SVĚTLA

Jednoduchým pokusem jsme se přesvědčili, že světlo laseru, postupující ze vzduchu do vody, se na rozhraní obou prostředí láme tak, že úhel lomu β je menší než úhel dopadu (**lom ke kolmici**).

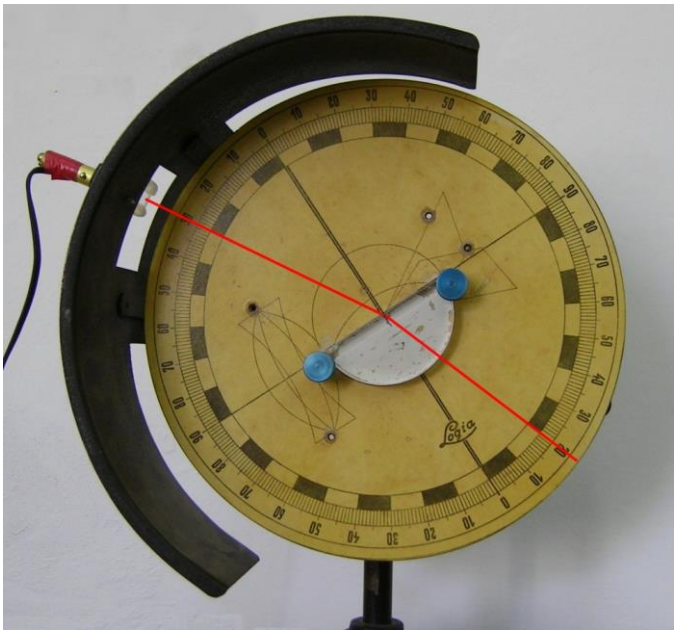




Pokud ale světelný svazek vystupoval z vody do vzduchu, byl úhel lomu β větší než úhel dopadu, docházelo k **lomu od kolmice**. Lomený paprsek zůstává v obou případech v rovině určené dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu (rovina dopadu). Dopadající i lomený paprsek tedy leží spolu s kolmicí dopadu ve stejné rovině.

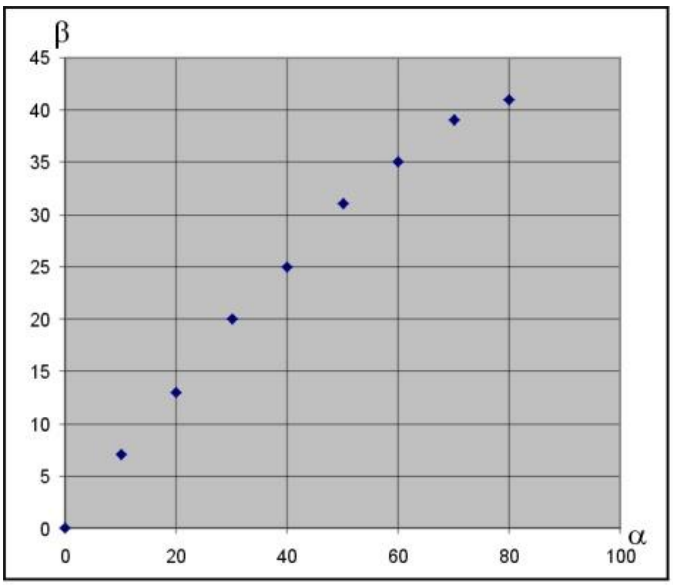
K lomu světelného paprsku ke kolmici dochází proto, že světlo přechází do prostředí, ve kterém se šíří jinou rychlostí. Například při přechodu ze vzduchu do skla se rychlost světla zmenšuje, při přechodu světla z vody do vzduchu rychlost vzroste.

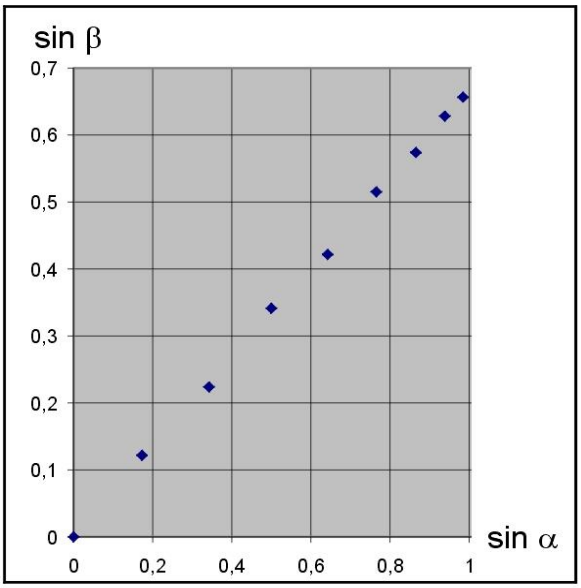
Na optické desce jsme proměřili závislost mezi úhlem dopadu a úhlem lomu pro přechod světla ze vzduchu do skla.



Získané výsledky jsou uvedeny v tabulce a v grafu. Graf je jednoduší pro siny úhlů.

úhel dopadu	0	10	20	30	40	50	60	70	80
úhel lomu	0	7	13	20	25	31	35	39	41





Závislost se nazývá Snellův zákon lomu:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$$

α je úhel dopadu

β je úhel lomu

n je konstanta nazývaná index lomu

n_{SKLO} je index lomu skla (v našem případě udává, kolikrát je rychlost světla ve vzduchu větší než ve skle)

$$n_{SKLO} = \frac{c_{VZDUCH}}{c_{SKLO}}$$

Často používaný **absolutní index lomu** udává poměr $n_{0\,SKLO} = \frac{c_{VAKUUM}}{c_{SKLO}}$.

Pokud obecně světlo nepřechází do nějaké látky ze vzduchu (ale například z vody do diamantu), lze zákon lomu zobecnit:

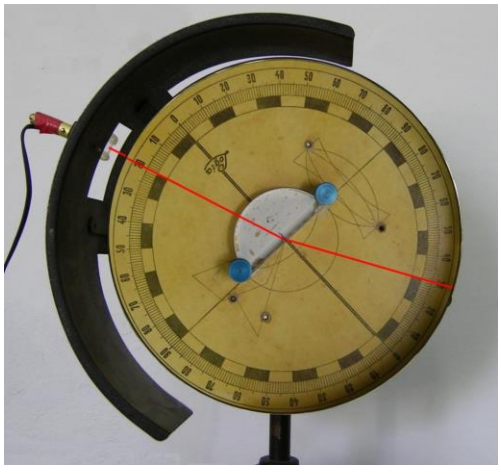
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_{VODA}}{c_{DIAMANT}} = \frac{\frac{c_{VZDUCH}}{n_{VODA}}}{\frac{c_{VZDUCH}}{n_{DIAMANT}}} = \frac{n_{DIAMANT}}{n_{VODA}}$$

Několik přibližných údajů o rychlosti světla a indexu lomu uvádí tabulka:

Prostředí	Rychlost světla	Kolikrát je rychlost světla v prostředí menší než ve vzduchu
voda	225 000 000 m/s	1,33
sklo	170 000 000-200 000 000 m/s	1,5 - 1,8
diamant	125 000 000 m/s	2,4

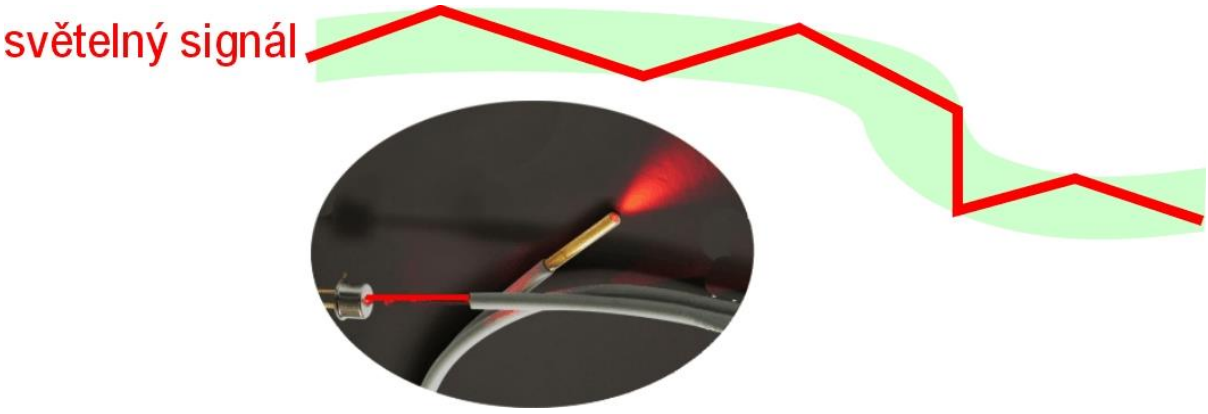
ÚPLNÝ (TOTÁLNÍ) ODRAZ

Jestliže světlo přechází z prostředí, v němž je jeho rychlost menší, do prostředí, ve kterém je jeho rychlost větší (např. z vody do vzduchu, ze skla do vzduchu nebo ze skla do vody), dochází k lomu od kolmice. Úhel lomu β je větší než úhel dopadu α.



Úhel dopadu je ale pro takový lom limitován. Překročí-li úhel dopadu jistý úhel (tzv. mezní úhel), světlo do druhého prostředí nepronikne, ale odrazí se s 100% intenzitou (při školním pokusu to bylo cca 42°).

Úplný odraz má bohaté technické využití. Světlo se díky úplným odrazům dá vést tenkým, ohebným skleněným nebo plastovým vláknem.

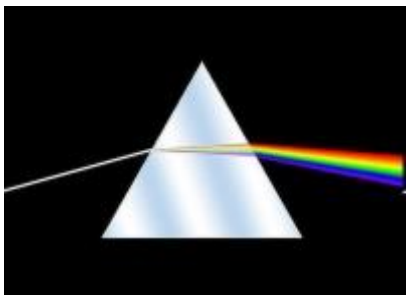


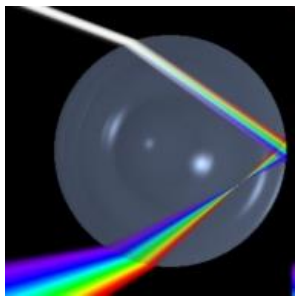
Počítače se dnes umí světlem po světlovodných vláknech domlouvat rychleji, než elektrickým proudem po drátech. Svazek vláken umí jednoduše přenést i obraz - například ze žaludku svazkem vláken procházejícím ústy a jícnem.

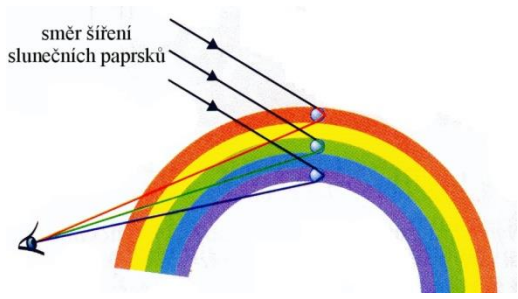
ROZKLAD SVĚTLA HRANOLEM

Světla různých barev se šíří ve skle různou rychlostí, tedy s poněkud odlišným indexem lomu. Lomem se proto změní směr jednotlivý složek bílého světla původního svazku, a bílé světlo se rozloží na jednotlivé barvy.

Dopadne-li svazek bílého světla na lámavou stěnu skleněného hranolu, dojde k lomu barevných světel ze vzduchu do skla a při výstupu světla z hranolu opět k lomu světla ze skla do vzduchu.







Jedním z nejkrásnějších optických jevů v atmosféře je **duha.** Na obloze ji vidíme za deště, svítí-li nám při něm slunce do zad. Sluneční paprsky se lomem ze vzduchu do vody v kapkách rozkládají na jednoduché barvy spektra.

ÚLOHY

1. a) Jaký je úhel lomu β při vstupu paprsku laseru ze vzduchu do skla (n = 1,6)? Úhel dopadu $\alpha = 60^{o}$.

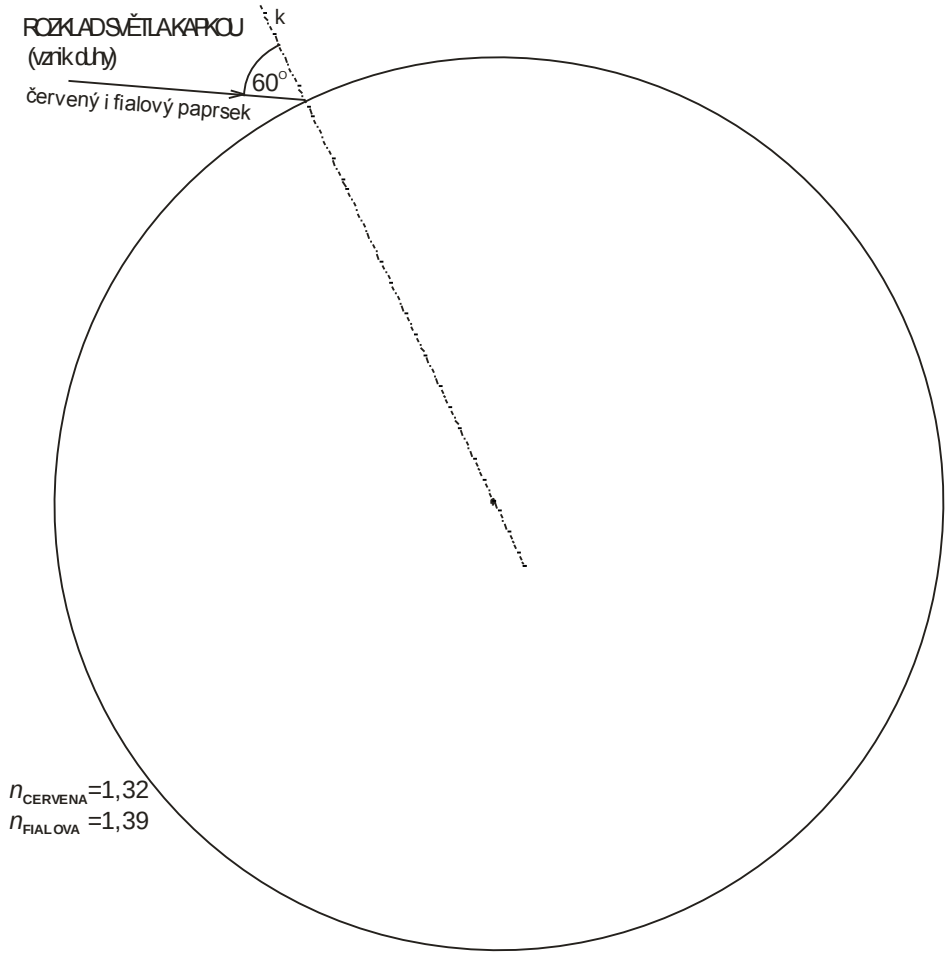
   b) Jaký je úhel lomu β při vstupu paprsku laseru ze vzduchu do vody (n = 1,33)? $\alpha = 60^{o}$.

2. Při jakém minimálním úhlu dopadu $\alpha_{mezní}$ dojde při přechodu světla ze skla (n = 1,5) do vzduchu k úplnému odrazu světla?

3. Na skleněný optický hranol dopadá bílé světlo pod úhlem dopadu $\alpha = 60^{o}$. Vypočtěte, jak se při tom láme červená složka světla ($n_{č} = 1,7$) a fialová složka světla ($n_{F} = 1,8$). Narýsujte chody obou paprsků.

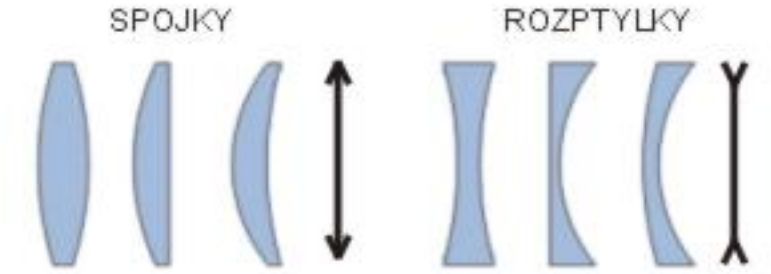
	α_1	β_1	$\alpha_2 = 60^{o} - \beta_1$	β_2
červený paprsek	60^{o}			
fialový paprsek	60^{o}			

4. Vypočtěte úhly lomu β_f , $\beta_č$ pro červenou a fialovou složku slunečního paprsku. Narýsujte chod těchto paprsků kapkou při vzniku duhy.



ČOČKY

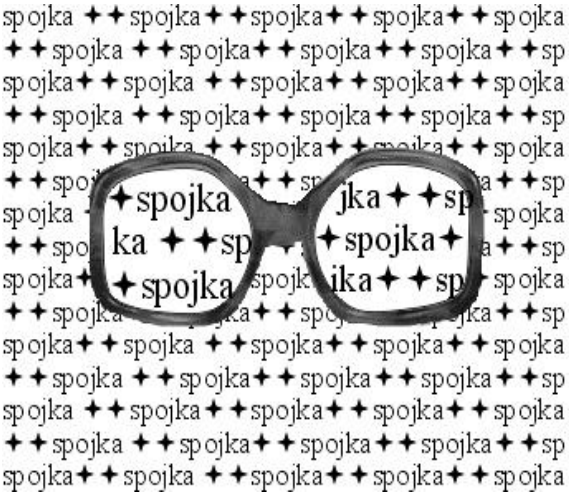
Se skleněnými nebo plastovými čočkami se setkal už každý z nás. Tvar mohou mít podobný jako známá (mně moc nechutnající) luštěnina, ale i dost odlišný. Na dolním obrázku jsou trojice několika nejčastěji používaných průřezů čoček a vedle jejich schematické znázorňování.

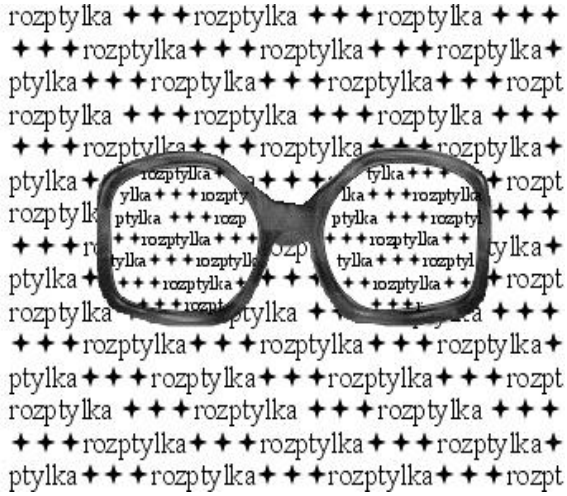


První trojici čoček, u středu tlustších než u okrajů, tvoří čočky spojné, krátce **spojky**.

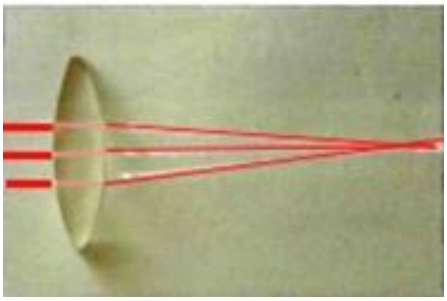
Druhou trojici, uprostřed hubenější než u krajů, tvoří čočky rozptylné- **rozptylky**.

Bez proměřování můžeme snadno spojku a rozptylku poznat tak, že se jí zblízka podíváme třeba na text v učebnici. Spojná čočka funguje jako „zvětšovací“, rozptylkou uvidíme text zmenšený.

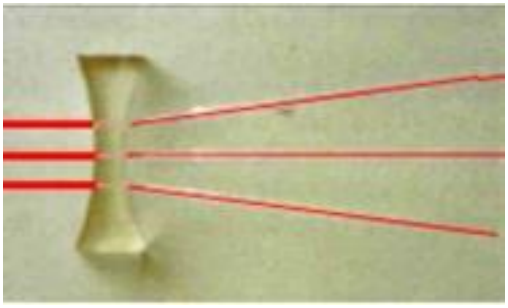




Jestliže spojku a rozptylku osvětlíme svazkem rovnoběžných paprsků, ukáže nám to původ jejich názvů.



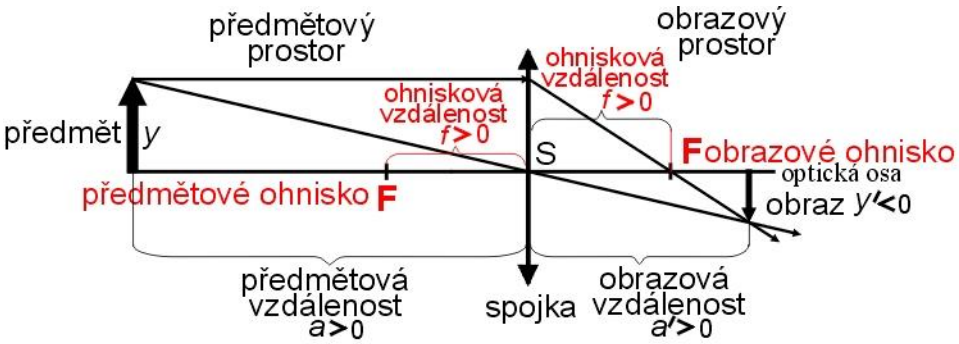
Rovnoběžný svazek se po průchodu spojkou čočkou spojí ve sbíhavý. Bod, kde se paprsky sbíhají, je ohnisko spojky.

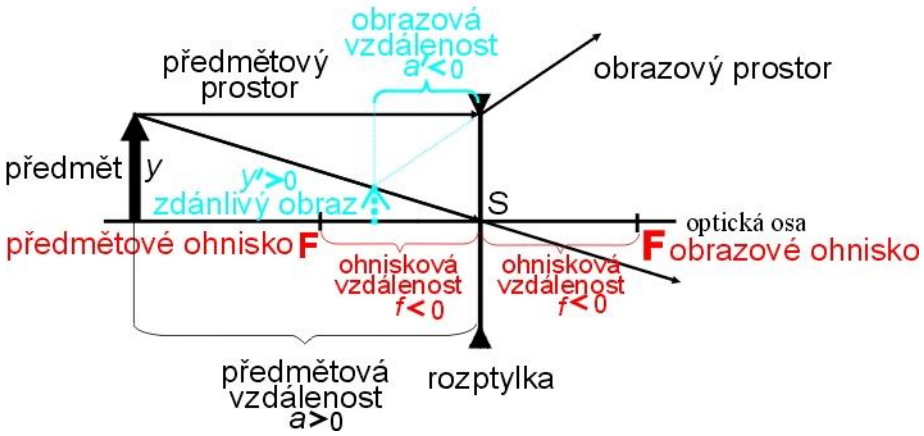


Rozptylka přemění svazek rovnoběžný v rozbíhavý.

Bod, z něhož jako by paprsky v prodloužení vybíhaly, je zdánlivé ohnisko rozptylky.

Při popisu zobrazování čočkami používáme označení, která jsou na dolních obrázcích. Některé z pojmů už známe ze zobrazování kulovými zrcadly.

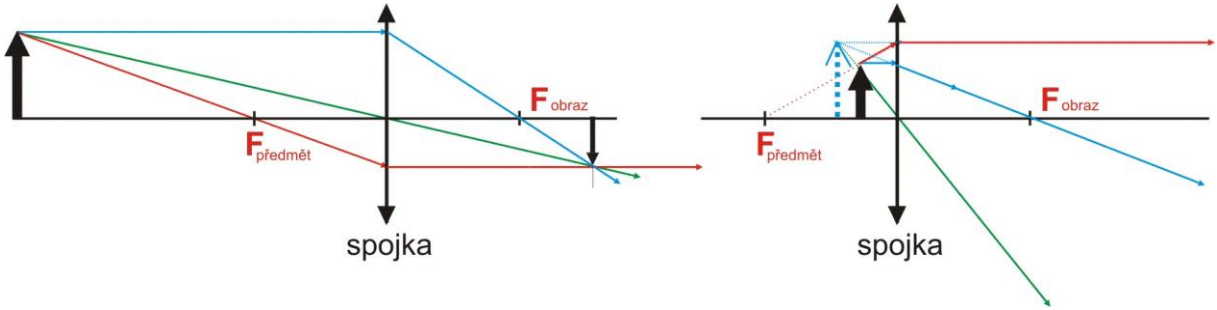




Průsečíku S optické osy a čočky, již uvažujeme za nesmírně tenkou, říkáme optický střed čočky.

ZOBRAZOVÁNÍ POMOCÍ VÝZNAČNÝCH PAPRSKŮ

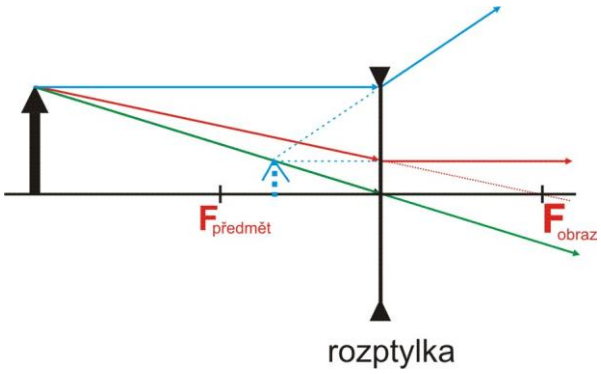
Polohy obrazů vytvořených čočkami je možné hledat (podobně jako u kulových zrcadel) pomocí tzv. význačných paprsků. Význačné paprsky jsou znázorněny na dolním obrázku.



Paprsek rovnoběžný s optickou osou spojky míří po průchodu čočkou do obrazového ohniska.

Paprsek procházející předmětovým ohniskem spojky, nebo mající směr jako by z předmětového ohniska vycházel, má po průchodu čočkou směr rovnoběžný s optickou osou.

Paprsek procházející optickým středem tenké spojky nemění svůj směr.



U rozptylky má paprsek rovnoběžný s optickou osou po průchodu čočkou směr, jako by z vycházel z předmětového ohniska.

Paprsek mířící do obrazového ohniska rozptylky má po průchodu čočkou směr rovnoběžný s optickou osou.

Paprsek procházející optickým středem tenké rozptylky nemění svůj směr.

LABORATORNÍ PRÁCE Jméno:

Zobrazení tenkou spojnou čočkou Třída:

Úkol:

1. Zjistěte pokusně ohniskovou vzdálenost f spojné čočky zaostřením na hodně vzdálený zdroj.
2. Ověřte platnost zobrazovací rovnice

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

a je vzdálenost plamene svíčky od tenké čočky
a' je vzdálenost obrazu plamene čočky
f je ohnisková vzdálenost čočky

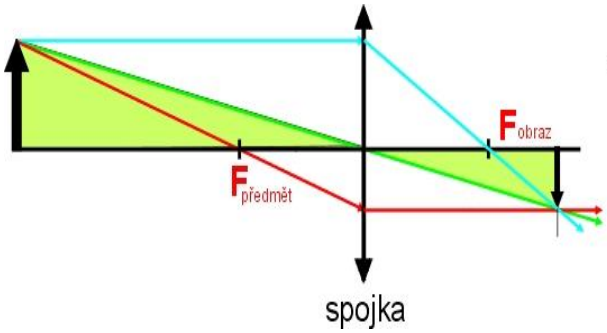
Výsledky měření:

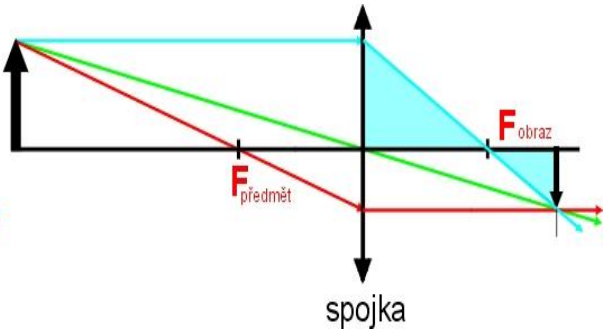
1) měření f =

2) měření a (cm) a'(cm)

a (cm)	25	30	40	50	60
a'(cm)					
$1/a + 1/a'$ (cm^{-1})					
průměr $1/a + 1/a'$ (cm^{-1})					

Zobrazovací rovnici je možné odvodit:





Z podobnosti zelených trojúhelníků platí:

$$\frac{|y|}{a}=\frac{|y'|}{a'}\Rightarrow\frac{|y'|}{|y|}=\frac{a'}{a}$$

Z podobnosti modrých trojúhelníků platí:

$$\frac{|y|}{f}=\frac{|y'|}{(a'-f)}\Rightarrow\frac{|y'|}{|y|}=\frac{(a'-f)}{f}$$

Porovnáním pravých stran vychází:

$$\frac{a'}{a}=\frac{(a'-f)}{f}\Rightarrow \text{po odstranění zlomků } a'\cdot f=a\cdot a'-a\cdot f\Rightarrow \text{vydělením rovnice činitelem } a'\cdot a\cdot f$$

vychází: $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}$ Pro zvětšení $Z=\frac{y'}{y}$ z podobnosti zelených trojúhelníků $Z=\frac{y'}{y}=-\frac{a'}{a}$

Znalost odvození se nevyžaduje.

Příklad:

Před spojnou čočkou (f = 10 cm) je hořící svíčka 6 cm vysoká.

a) Jak daleko (a') od čočky zachytíme na stínítku její obraz, je-li svíčka umístěna a = 30 cm před čočkou? Určete i zvětšení Z zobrazení.

b) Kde bude obraz svíčky, jestliže bude svíčka ve vzdálenosti a = 5 cm před čočkou? Určete zvětšení Z zobrazení i v tomto případě.

Řešení užitím zobrazovací rovnice:

a) a = 30 cm; f = 10 cm; a'…? Z … ?

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}\Rightarrow\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{a}=\frac{1}{10\,\text{cm}}-\frac{1}{30\,\text{cm}}=\frac{2}{30\,\text{cm}}\Rightarrow a'=15\,\text{cm}$$

Obraz je skutečný, , převrácený, zmenšený, 15 cm za čočkou.

Z = -15/30 = -0,5 Obraz je skutečný

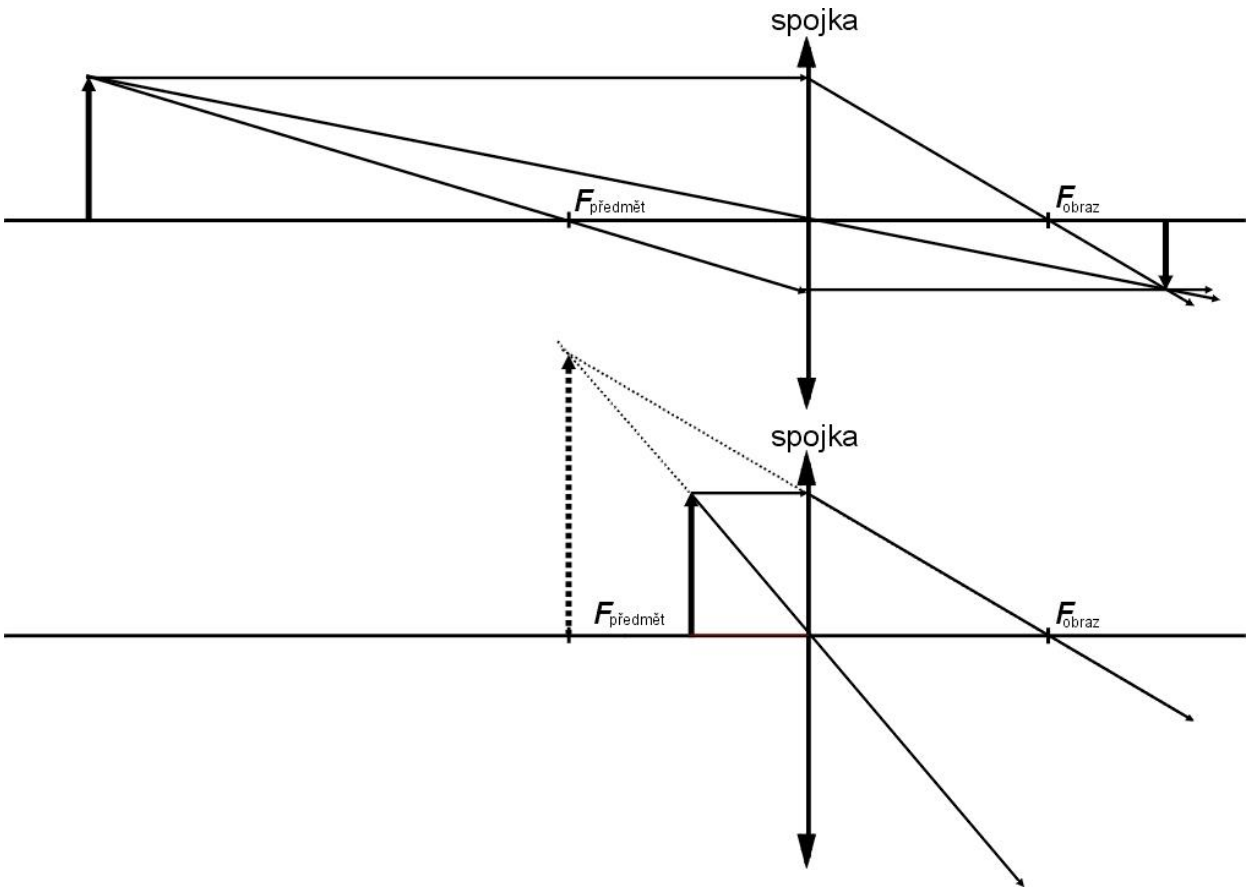
b) a = 5 cm ; f = 10 cm; a'…? Z … ?

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}\Rightarrow\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{a}=\frac{1}{10\,\text{cm}}-\frac{1}{5\,\text{cm}}=\frac{-1}{10\,\text{cm}}\Rightarrow a'=-10\,\text{cm}$$

Obraz je zdánlivý, vzpřímený, zvětšený, 10 cm před čočkou.

Z = -(-10/5) = 2

Řešení užitím význačných paprsků se zobrazením v měřítku 3:1 je na další straně.



ÚLOHY

1. V jaké vzdálenosti *a* od spojné čočky (*f* = 30 cm) je předmět, jestliže je jeho obraz převrácený, vzdálený 120 cm za čočkou? Jaké je zvětšení tohoto zobrazení? Jaké jsou vlastnosti obrazu?

2. Doplňte chybějící údaje v tabulce. Můžete použít applet na adrese:
http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/thin_lens/Lens/lens_cz.html

a) SPOJNÁ ČOČKA

vzdálenost předmětu	vzdálenost obrazu	vlastnosti obrazu (zmenšený či zvětšený, vzpřímený či převrácený, skutečný či zdánlivý)	absolutní hodnota zvětšení $\|Z\|>1, \|Z\|<1, \|Z\|=1$	znaménko zvětšení + nebo -
$a > 2f$	$f < a' < 2f$		$\|z\|$	
$a = 2f$	$a' = 2f$		$\|z\|$	
$f < a < 2f$	$a' > f$		$\|z\|$	
$a = f$	$a' \rightarrow \infty$	----------	----------	----------
$a < f$	$0 > a' > -\infty$		$\|z\|$	

Doplňte chybějící údaje v tabulce.

b) ROZPTYLNÁ ČOČKA

vzdálenost předmětu	vzdálenost obrazu	vlastnosti obrazu	absolutní hodnota zvětšení	znaménko zvětšení
$a > 0$	$0 > a' > -\infty$		$\lvert z \rvert < 1$	

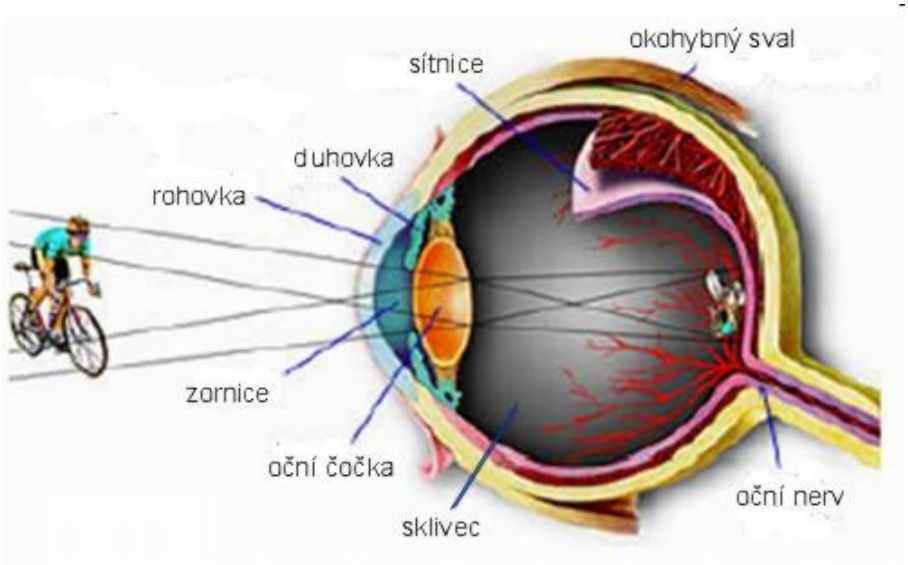
3. Do jaké vzdálenosti *a* od spojné čočky (*f* = 30 cm) musíme umístit předmět, aby vzniknul jeho
   a) skutečný obraz dvojnásobné velikosti
   b) zdánlivý obraz dvojnásobné velikosti

4. Při jaké vzdálenosti *a* předmětu od rozptylky (*f* = -30 cm) vzniká jeho zdánlivý obraz třetinové velikosti?

OPTICKÉ PŘÍSTROJE

OKO

Velmi dokonalým „optickým přístrojem“ vytvořeným přírodou je naše oko. Se stavbou oka jste se seznámili již v biologii. Všimneme si zde proto jen fungování jako „optického přístroje“.



Zobrazovací soustavu netvoří samotná čočka, ale do zobrazovací soustavy musíme zahrnout i rohovku a sklivec. Budeme zjednodušeně předpokládat, že vzdálenost roviny zobrazovací soustavy od sítnice je 20 mm. To je tedy pro nás obrazová vzdálenost *a´* při ostrém vidění na jakýkoli předmět.

Ze zobrazovací rovnice $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}$ je zřejmé, že pro různé vzdálenosti *a* předmětu, který pozorujeme, se musí ohnisková vzdálenost f zobrazovací soustavy měnit. To se děje změnami tvaru oční čočky ciliárními svaly. V jakém intervalu se přibližně ohnisková vzdálenost *f* mění?

Při pohledu na velmi vzdálený objekt $a \to \infty$ je $\frac{1}{a} \to 0$, a tedy $\frac{1}{a'}=\frac{1}{f} \Rightarrow f \approx 20$ mm.

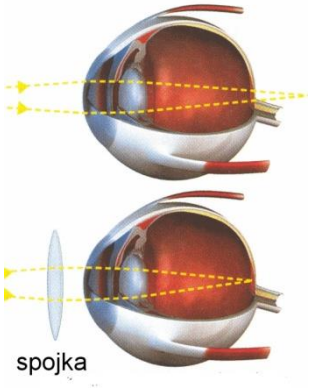
Při pohledu na co nejbližší předmět $a \to 250$ mm (tzv. konvenční zraková vzdálenost) dosazením do zobrazovací rovnice dostáváme: $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{250}+\frac{1}{20}=\frac{1}{f} \Rightarrow \frac{2+25}{500}=\frac{1}{f} \Rightarrow f \approx 19\text{mm}$.

V popisu optických vlastností oka se častěji než ohnisková vzdálenost f používá veličina zvaná **optická mohutnost** φ, definovaná vztahem $\varphi=\frac{1}{f}$. Ohnisková vzdálenost f se zde udává v metrech a jednotka optické mohutnosti φ (1/m) je dioptrie (D).

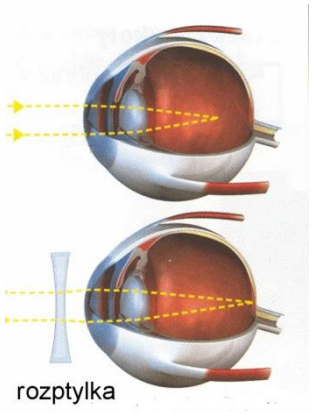
Podle našeho hrubého odhadu nám vychází, že různým vyklenutím oční čočky mění naše oko svou optickou mohutnost od 50 D do 53 D, tj. v rozmezí 3 dioptrií. V odborné literatuře uváděné hodnoty jsou trochu vyšší.

Schopnost lidského oka měnit tvar oční čočky s věkem klesá. Nejčastěji dochází s věkem k menšímu vyklenutí čočky, tj. prodloužení ohniskové vzdálenosti, a tedy zmenšení optické mohutnosti.

Svazek paprsků z pozorovaného předmětu pak vytváří obraz až za sítnicí (oko je dalekozraké). Korekce se dosahuje spojnou čočkou.



Pokud naopak oko zobrazuje předmět před sítnicí (oko je krátkozraké), koriguje se tato oční vada rozptylkou. Ta sníží optickou mohutnost optické soustavy oka a prodlouží ohniskovou vzdálenost.



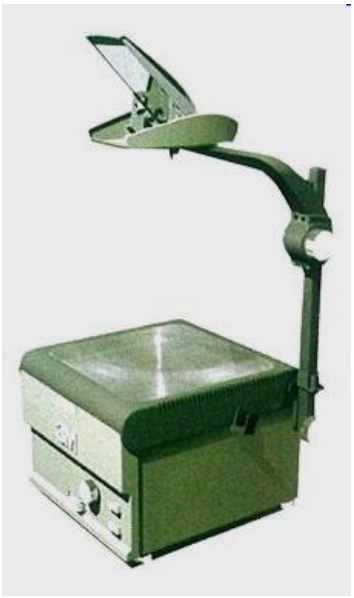
V místě, kde sítnicí prochází optická osa soustavy, je vystýlka světločivných buněk největší. Naopak na sítnici, v místě vstupu očního nervu, tyčinky a čípky registrující dopadající světlo nejsou. V tomto místě je malá slepá skvrna. Tuto slepou skvrnu o průměru několika milimetrů jsme našli jednoduchým pokusem se čtverečkem papíru, na němž byla tečka s křížkem.

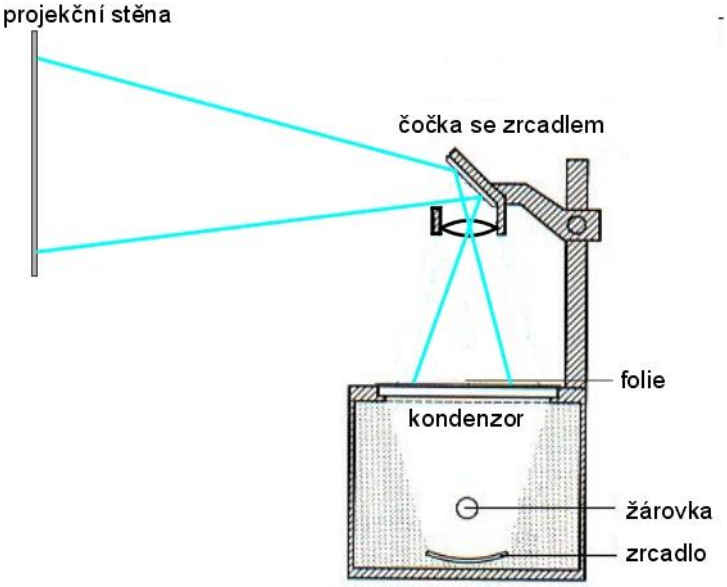
Zde je návod:

Zavřeme levé oko a pravým se upřeně díváme na černý bod. Nyní zvedáme papírek a pomalu jej přibližujeme k oku. Přitom neustále sledujme černý bod. Zjistíme, že v určité vzdálenosti papírku od oka přestaneme křížek vidět. Jeho obraz vzniká na slepé skvrně oka. Pokud se chceme přesvědčit o slepé skvrně na sítnici levého oka, papírek otočíme o 180° a pokus opakujeme.

ZPĚTNÝ PROJEKTOR

Ve výuce často používaným zařízením je zpětný projektor. Kresby na průhledné folii jsou „předměty“, jejichž skutečný obraz vytváří čočka projektoru. Aby skutečný obraz vznikal na stěně a nebyl převrácený stranově ani výškově, je čočka (nebo soustava čoček) doplněna zrcadlem.



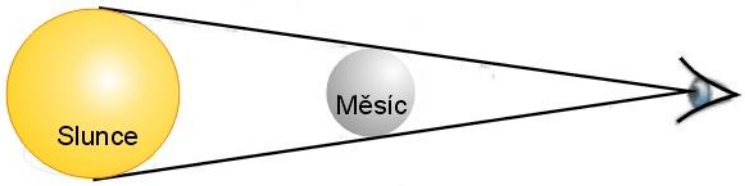


Při vyučování jsme změřili předmětovou a obrazovou vzdálenost (a = 31,5 cm, a' = 650 cm) při projekci a s pomocí zobrazovací rovnice zhruba určili ohniskovou vzdálenost f a optickou mohutnost φ čočky.

$$\frac{1}{31{,}5\,\mathrm{cm}}+\frac{1}{650\,\mathrm{cm}}=\frac{1}{f}\ \Rightarrow 0{,}0317\,\mathrm{cm}^{-1}=\frac{1}{f}\ \Rightarrow f\approx 30\,\mathrm{cm}\ \ \varphi\approx 3{,}3\,\mathrm{D}$$

LUPA

Při pohledu na dva různě velké a různě vzdálené předměty se někdy zdá, jako by měly stejnou velikost. Díváme-li se například na měsíc v úplňku a srovnáme ho se slunečním kotoučem, zdají se obě tělesa stejně velká. Rozdíly v jejich velikosti jsou ale obrovské. Jak ukazuje obrázek dole, vnímání velikosti různých předmětů závisí na zorném úhlu ε (řecké písmeno epsilon). Je to úhel mezi paprsky od krajních bodů sledovaného objektu k našemu oku.



Se změnou vzdálenosti předmětu od oka se mění zorný úhel. Zdravé oko je schopno rozlišit od sebe dva body, pokud je vnímá pod zorným úhlem větším než úhlová minuta.

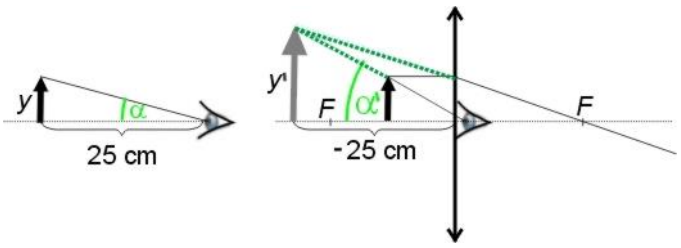
K pozorování malých předmětů se používá spojná čočka s malou ohniskovou vzdáleností.

Zvětšený a vzpřímený (zdánlivý) obraz předmětu vytváří spojka, umístíme-li předmět mezi ohnisko a čočku. Paprsky procházející lupou do oka vytvářejí na sítnici zvětšený obraz předmětu.

Pokud předpokládáme, že je **oko těsně u lupy** a zdánlivý obraz vzniká v konvenční zrakové vzdálenosti d ($a' = -d = -25$ cm), vychází pro zvětšení lupy

$$Z = 1 + \frac{d}{f}$$

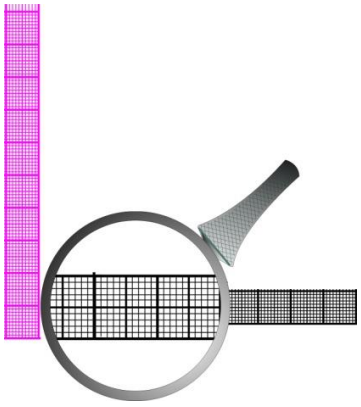
$$Z = -a' \cdot \frac{1}{a} = d \cdot \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{d}\right) = 1 + \frac{d}{f}$$



Při laboratorní práci jsme měřili zvětšení lupy, která měla ohniskovou vzdálenost $f = 18$ cm.

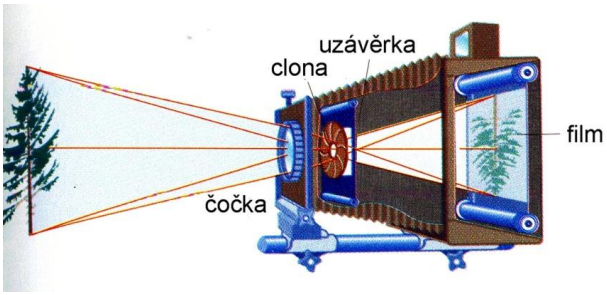
Zdánlivý obraz centimetrového pásku ($y = 10$ mm) vytvořený lupou měl velikost $y' = 19$ mm

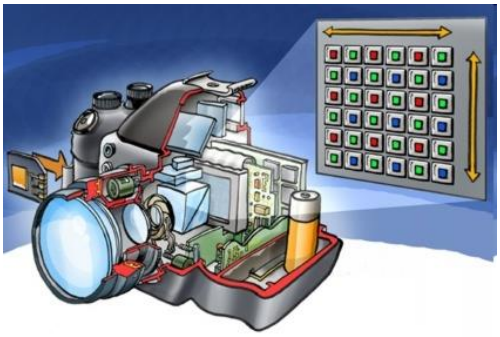
$\Rightarrow Z = 1{,}9$.



DIGITÁLNÍ FOTOAPARÁT

Princip digitálního fotoaparátu vychází z konstrukce klasického fotoaparátu.

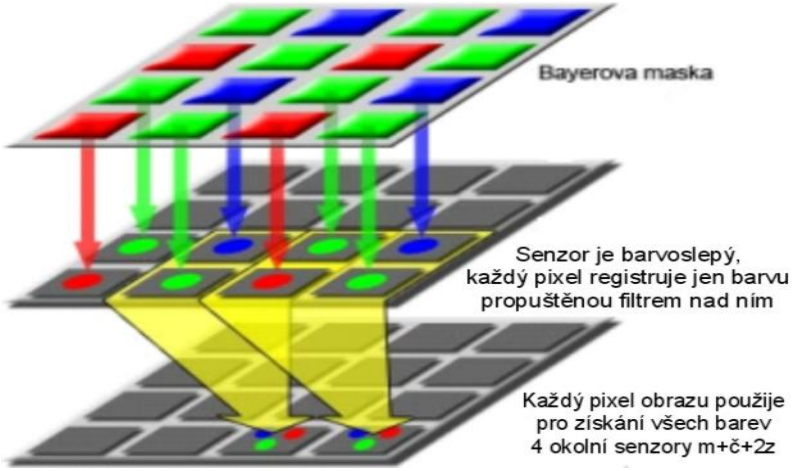




Místo na film je promítán obraz, vytvořený soustavou optických čoček objektivu, na plochu senzoru. Světelná energie, jež přichází ze snímaného předmětu , je v jednotlivých pixelech (obrazových bodech) převáděna na elektrický signál a uložena v podobě náboje.

Protože senzory registrující světlo jsou barvoslepé, jsou před nimi 3 barevné filtry (červený, modrý a zelený), které dopadající světlo rozloží na tyto základní složky. Z nich je pak skládána výsledná barva.

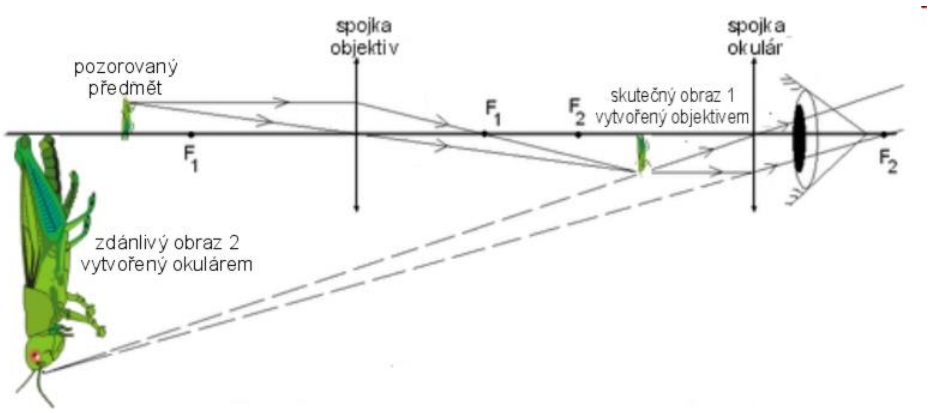
6 MPix fotoaparát má sice 6 milionů pixelů na senzoru, ale pouze černobílých, tedy neschopných vidět barvu. Aby senzor viděl i barvu, je před jednotlivými pixely barevná maska (tzv. Bayerova maska). V ní jsou barvy uspořádány do šachovnice. Z toho vyplývá, že 6 MPix fotoaparát má "pouze" 1.5 milionu červených pixelů, 1.5 milionu modrých a 3 miliony zelených (zelená maska je ve čtverci dvakrát, tím se simuluje zvýšená citlivost oka na zelenou barvu).



Po uzavření uzávěrky jsou vygenerované náboje z čipů postupně odváděny a měřeny speciálním zesilovačem pro každý jednotlivý pixel. Takto získaný signál je a dále převeden na signál binární. Vzniklý datový proud je pomocí mikroprocesoru různě upravován a převeden do některého grafického formátu používaného pro záznam obrazových dat, např. JPEG nebo TIFF. Výsledný soubor dat je nakonec uložen například na paměťovou kartu.

MIKROSKOP

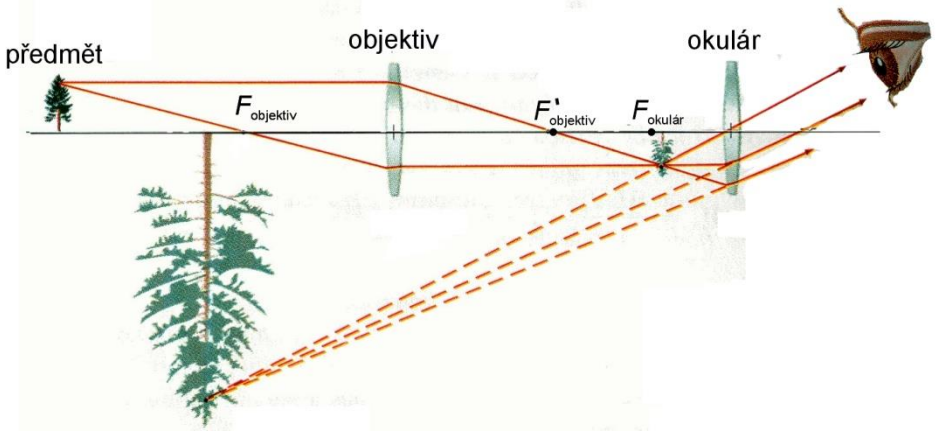
Tam, kde nestačí zvětšení lupy, se používá mikroskop, jenž zvětšuje až 2500krát. Základními součástmi mikroskopu jsou objektiv a okulár. Objektiv je blíže předmětu a do okuláru se při pozorování díváme. Každá z těchto částí je obvykle tvořena soustavou několika čoček. Obě soustavy se chovají jako spojky s malou ohniskovou vzdáleností ($f_{OBJEKTIV}$ ≈ mm, f_{OKULAR} ≈ cm). Vzdálenost vnitřních ohnisek Δ (tzv. optický interval) je 15 cm až 20 cm. Objektiv vytváří uvnitř mikroskopu skutečný, převrácený a zvětšený obraz 1. Okulár ve funkci lupy vytváří zdánlivý obraz 2, který pozorujeme.



KEPLERŮV DALEKOHLED

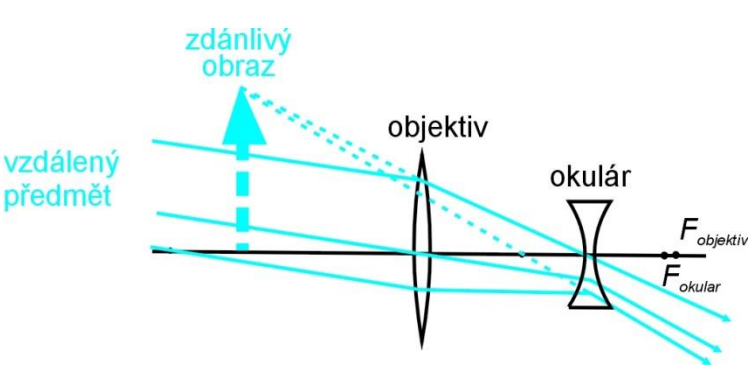
K pozorování vzdálených těles slouží **dalekohled.** Přestože má také objektiv a okulár jako mikroskop, je mezi oběma přístroji rozdíl. U mikroskopu vkládáme předmět do blízkosti ohniska objektivu, zatímco u dalekohledu je pozorovaný předmět od objektivu vždy velmi vzdálený. Pro ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru platí $f_{OBJEKTIV} > f_{OKULAR}$. V mikroskopu jsou vnitřní ohniska objektivu a okuláru vzdálená, u dalekohledu pro pozorování velmi vzdálených předmětů jsou ohniska objektivu a okuláru v jednom společném bodě.

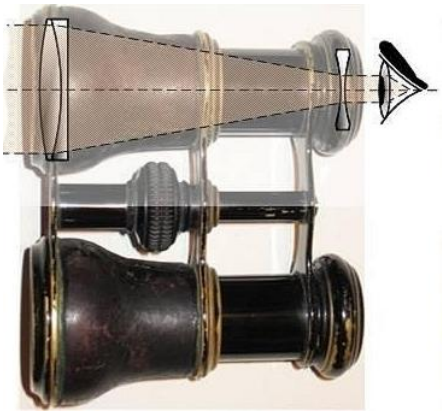
U dalekohledu, stejně jako v mikroskopu, vytváří objektiv skutečný a převrácený obraz předmětu, jenž je opět zvětšen okulárem. V triedrech je soustava doplněna dvojicí převratných hranolů, které jednak dalekohled zkracují, jednak obraz stranově i výškově převracejí. Výsledný obraz pak není vzhůru nohama.



GALILEIHO DALEKOHLED

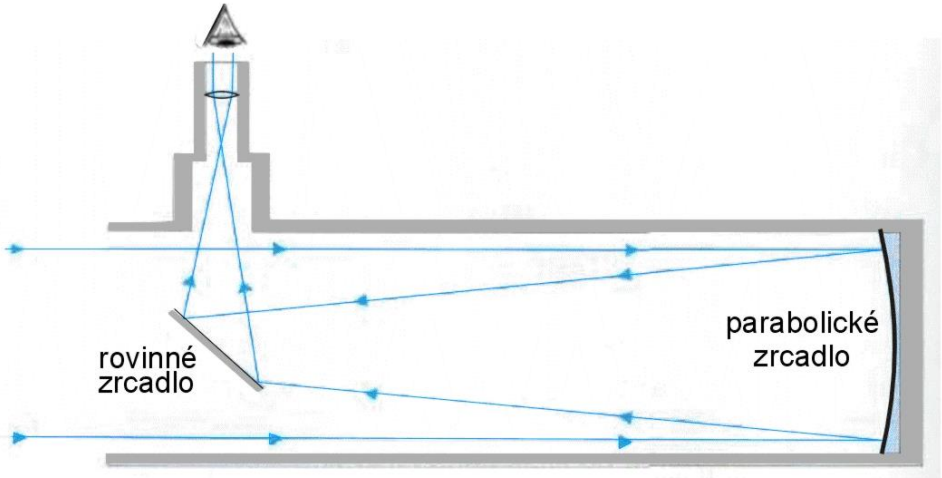
Jiný princip je použit v tzv. Galileiho (holandském) dalekohledu. Tento dalekohled má opět objektiv, spojku s velkou ohniskovou vzdáleností $f_{OBJEKTIV}$, ale okulárem je rozptylka s malou ohniskovou vzdáleností f_{OKULAR}. Obrazové ohnisko objektivu u tohoto typu dalekohledu prakticky splývá s obrazovým ohniskem okuláru. Tento typ dalekohledu se využívá např. jako **divadelní kukátko** a poskytuje čtyř až šestinásobné zvětšení.





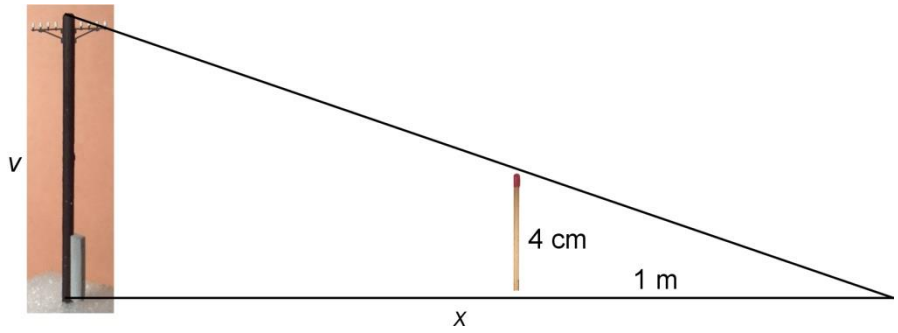
NEWTONŮV DALEKOHLED

Místo objektivu dalekohledu tvořeného čočkou v lze použít i duté zrcadlo. Jak takový zrcadlový dalekohled zobrazuje, ukazuje obrázek. Výhoda zrcadlového dalekohledu je v menší hmotnosti objektivu a v tom, že v zrcadle nedochází k pohlcování a rokladu světla jako v čočce (kovový povlak je na povrchu zrcadla).



ÚLOHY

1. V jaké vzdálenosti *x* je od nás telegrafní sloup výšky *v* = 6 m, jestliže ho vidíme pod stejným zorným úhlem jako zápalku, vzdálenou 1 m od oka?



2. Vysvětlete, proč pod vodou naše oči nevidí ostře. Kde jsou vytvářeny obrazy v oku?

3. Jaká je ohnisková vzdálenost *f* brýlové čočky o optické mohutnosti $\varphi_1 = 4\,\mathrm{D}$, $\varphi_2 = -2{,}5\,\mathrm{D}$?

4. Odhadněte ohniskovou vzdálenost a optickou mohutnost optické soustavy fotoaparátu v mobilním telefonu.

5. Nakreslete schéma Keplerova, Galileiho, Newtonova dalekohledu.

Porovnejte ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru.

6. Nakreslete schéma mikroskopu. Porovnejte ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru.

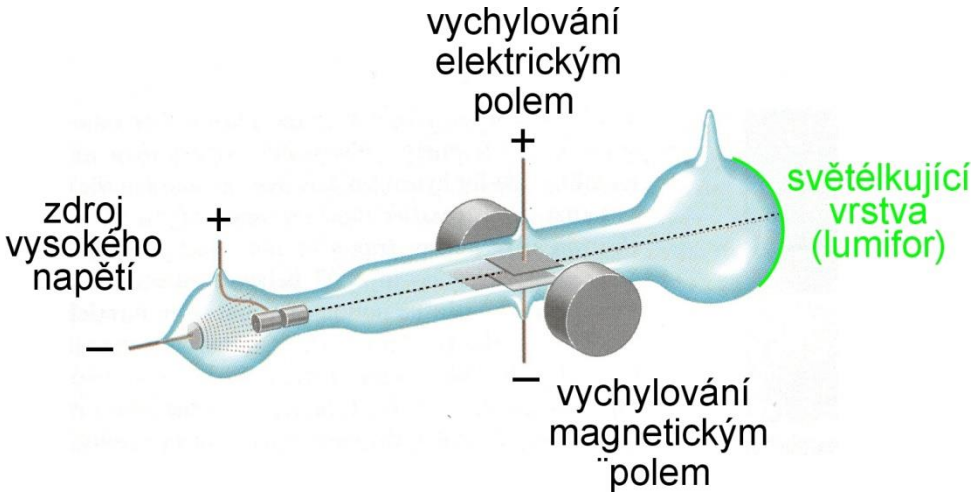
5. ATOMISTIKA

MODELY ATOMU

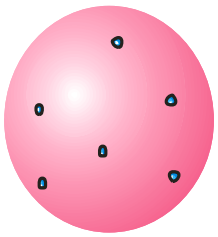
První představy o atomu pochází z antického Řecka, ve kterém v 5. století př. n. l. Démokritos představil filosofickou konstrukci, podle níž nelze hmotu dělit donekonečna, neboť na nejnižší úrovni existují dále nedělitelné částice, které označil slovem „atomos“. Podle této myšlenky je veškerá hmota složena z různě uspořádaných atomů různého druhu, jež jsou nedělitelné, přičemž je nelze vytvářet ani ničit.

Vědeckou formu atomové teorii poskytl na začátku 19. století John Dalton - podle něj se každý chemický prvek skládá ze stejných atomů zvláštního typu, které nelze měnit ani ničit, ale lze je skládat do složitějších struktur (sloučenin). Na základě této teorie byl schopen vysvětlit některé otázky tehdejší chemie, např. proč při chemických reakcích reagují vždy jednoduché poměry množství příslušných látek (zákon stálých poměrů slučovacích).

Teorii o nedělitelných atomech však v roce 1897 vyvrátil J. J. Thomson, jenž při studiu katodového záření (viz aparatura na obrázku) objevil elektron - první subatomární částici.

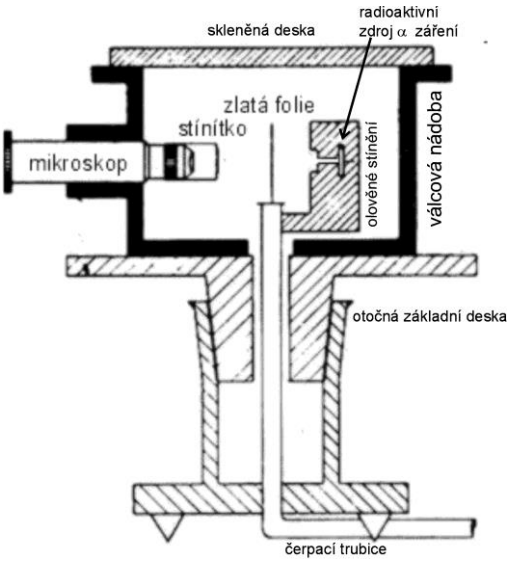


Na základě tohoto objevu vytvořil tzv. Thomsonův model atomu (pudinkový model), který předpokládal, že atom je tvořen rovnoměrně rozloženou, kladně nabitou hmotou, v níž jsou (jako rozinky v pudinku) rozptýleny záporně nabité elektrony.



Thomsonův model vyvrátily na začátku 20. století pokusy Ernesta Rutherforda. Aparaturu experimentu (viz obrázek) tvořil silný kovový válec, který v olověném stínění obsahoval radioaktivní radon - zdroj částic α, jež po průchodu supertenkou zlatou fólií dopadaly na stínítko se sulfidem zinečnatým (lumifor), připevněné k mikroskopu.

Hrnec byl připevněn ke kruhové základové desce se stupnicí, kterou se mohlo otáčet ve vzduchotěsném spoji. Mikroskop a stínítko se otáčely s hrncem, zatímco rozptylující fólie a zdroj se nepohybovaly. Hrnec byl uzavřen skleněnou deskou a byl vyčerpán. Otáčením desky mohly být alfa částice, odrážené do různých směrů, pozorovány na stínítku.



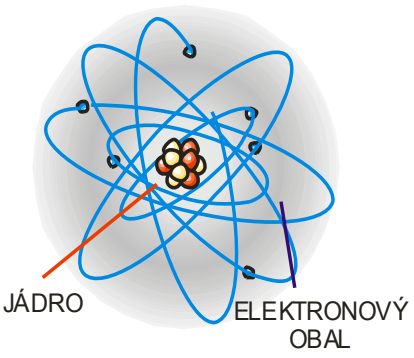
Kdyby byl kladný náboj rozprostřen v celém atomu zlata rovnoměrně, jak předpokládá Thomsonův model atomu, pak se částice α prolétávající středem atomu nebudou odchylovat od původního směru vůbec a částice prolétávající dále od středu se budou odchylovat jen mírně. Elektrony v atomech zlata, které mají ve srovnání s α částicemi výrazně menší hmotnost, totiž nemohou trajektorii těžkých α částic znatelně ovlivnit.

Experiment však ukázal něco zcela nečekaného. Odchylky byly podstatně větší, některé částice se dokonce odrážely zpět.

Rutherford o tom píše:

„Jednou ke mně přišel rozrušený Geiger a povídá: „Zdá se, že jsme pozorovali v několika případech rozptylu odražení částice alfa dozadu“. Toto je nejnepravděpodobnější událost v celém mém životě. Je to takměř tak málo pravděpodobné, jako kdybyste dělostřeleckým nábojem stříleli do tenkého cigaretového papíru a náboj by se od papíru odrazil dozadu a vletěl rovnou do vás. Když jsme to všechno analyzovali, pochopil jsem, že takový rozptyl dozadu musí být výsledkem jediné srážky a po příslušných výpočtech jsem viděl, že to není možné jinak, jen když předpokládáme, že převážná většina hmotnosti atomu je soustředěná v maličkém jádře, zajímajícím jenom zdibíček z celého objemu atomu. Právě tehdy se ve mně zrodila myšlenka o atomu s maličkým jádrem, ve kterém je soustředěný celý kladný náboj atomu".

Tak se zrodil Rutherfordův model, podle něhož se atom skládá z kladně nabitého hutného jádra, kolem kterého obíhají záporně nabité elektrony, obdobně jako planety obíhají Slunce (proto se tento model nazývá též planetární model atomu). Podle Rutherfordových výpočtů byla velikost jádra řádu 10^{-15} m, to je o 100 000 menší než velikost atomu.

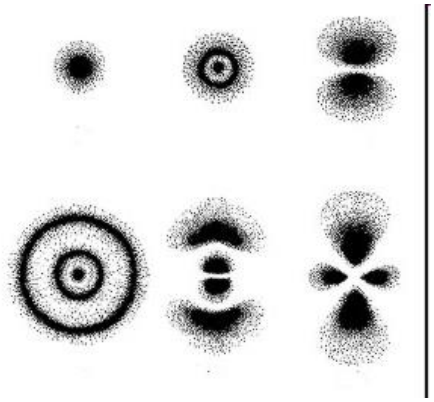


Planetární model však trpěl zásadním nedostatkem: Podle všech známých zákonů by elektricky nabitý elektron obíhající po kruhové dráze musel vysílat elektromagnetické záření, čímž by ztrácel energii a ve velmi krátkém čase by se spirálovitě zřítil do atomového jádra.

Applet znázorňující Rutherfordův experiment najdete na adrese:
http://phet.colorado.edu/en/simulation/rutherford-scattering

To v roce 1913 „vyřešil“ Niels Bohr tím, že vyslovil pro obíhající elektrony kolem atomového jádra výjimku. Podle jeho teorie mohou elektrony obíhat jen na některých dovolených drahách, na nichž nezáří. Mohou pouze při zisku nebo vyzáření energie „přeskakovat“ z jedné hladiny energie do jiné. Bohrův model dokázal vysvětlit spektrum atomu vodíku a iontů s jedním elektronem v elektronovém obalu, ale u složitějších atomů selhával.

V moderním vlnovém modelu atomu není elektron popisován jako hmotný bod, ale vlnovou funkcí určující pravděpodobnosti výskytu elektronu v různých místech prostoru. To znamená, že elegantní pravidelné dráhy elektronu byly opuštěny a nahrazeny neostře definovanými oblastmi, ve kterých se elektron s určitou pravděpodobností nalézá, tzv. orbitaly.



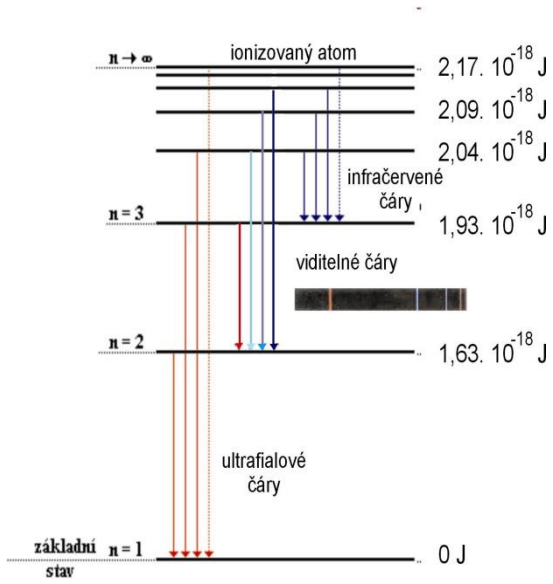
KVANTOVÁNÍ ENERGIE ATOMŮ A ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY

I ve vlnovém modelu atomu vychází pro energii atomu výsledek, že energie atomů je kvantovaná.

Často je energie atomu znázorňována „šplháním“ atomu po symbolickém žebříku. Jednotlivé příčky představují hodnoty energie, jichž může atom dosahovat. Ke šplhání nahoru k vyšší energii dochází, například když atom pohltí porci zářivé energie nebo nárazem jiné částice, např. elektronu.
K přeskoku na nižší příčku energie dojde vyzářením porce infračerveného, viditelného nebo ultrafialového i rentgenového záření tzv. fotonu.

Applet znázorňující excitaci atomů vodíku (získávání energie) pohlcováním kvant zářivé energie (fotonů) a následné vyzařování najdete na adrese:
http://phet.colorado.edu/en/simulation/hydrogen-atom

„Žebřík energií“ atomu vodíku ukazuje obrázek.



Kvantovaná je tedy i energie elektromagnetické vlny. Porce zářivé energie se nazývá **foton**.

Energie fotonu je jednoznačně určena frekvencí elektromagnetické vlny

$$E_{foton} = f \cdot 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{J.s}$$

Konstanta úměrnosti $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J.s se označuje písmenem *h,* nazývá se **Planckova konstanta**.

Applet znázorňující excitaci atomů různých plynů nárazem elektronů s různou rychlostí a následné vyzařování najdete na adrese: http://phet.colorado.edu/en/simulation/discharge-lamps

ÚLOHY

1. Jak se vychýlí paprsek katodového záření v Thomsonově trubici (viz obrázek v textu) působením elektrického pole mezi deskami? (Magnety odstraněny.)

2. Jak se vychýlí paprsek katodového záření v Thomsonově trubici (viz obrázek v textu) působením magnetického pole mezi deskami? (Elektrické pole mezi deskami nulové, indukční čáry míří v trubici od předního magnetu k zadnímu.)

3. Seřaďte podle růstu energie: foton jaderného záření γ, foton infračerveného záření, foton zeleného světla, foton červeného světla, foton ultrafialového světla, foton modrého světla, foton rtg. záření.
4. Pomocí vzorce $E_{foton} = h \cdot f$ vypočtěte frekvenci fotonu vyslaného atomem vodíku

a) při přechodu z druhé energetické hladiny (n =2) na základní hladinu,

b) při přechodu ze čtvrté energetické hladiny na druhou hladinu.

5. Rozhodněte, zda může být atom vodíku excitován na vyšší energii pohlcením fotonu ultrafialového záření o frekvenci $f = 2 \cdot 10^{15}$ Hz.

6. Jakou minimální rychlost musí mít elektron, aby mohl excitovat nárazem atom vodíku?

   ($m_{elektronu} = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

7. Jakou frekvenci musí mít elektromagnetické záření, aby dokázalo uvolnit z krystalů zinku volný elektron? Výstupní práce (práce potřebná na „vyražení“ elektronu z povrchu zinku) je $W_{Zn} = 4{,}3$ eV $= 4{,}3 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J. O jaké elektromagnetické záření se jedná?

Video s pokusy na toto téma najdete na adrese:
http://www.youtube.com/watch?v=QF6ExOPbQls&NR=1

JÁDRO ATOMU

Atomové jádro zaujímá nepatrnou centrální část atomu o rozměrech řádově 10^{-15} m. Je tvořeno *protony* a *neutrony*, které společně označujeme jako *nukleony*. Protony nesou kladný elementární náboj

($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C) , neutrony jsou elektricky neutrální. Hmotnost protonu a neutronu je přibližně stejná, jsou zhruba 1840 krát těžší než elektron.

Počet protonů udává protonové číslo Z (shodné s pořadovým číslem prvku v Mendělejevově tabulce prvků). Neutronové číslo N udává počet neutronů.

Nukleonové číslo A je dáno součtem počtu protonů a neutronů A = Z + N.

Různá jádra popisujeme následujícím způsobem:

$$\begin{matrix}\text{nukleonové číslo } A \\ \text{protonové číslo } Z\end{matrix}\ \text{značka prvku}$$

Například pro uran $^{238}_{92}\mathrm{U}$ nebo helium $^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Tímto symbolem charakterizujeme obvykle nejen jádro, ale i atomy složené ze stejných atomů a používáme pro ně název **nuklid**.

Různé nuklidy téhož prvku (stejné protonové číslo, ale různý počet neutronů) se nazývají **izotopy**.

Existují například dva izotopy uranu: Uran $^{238}_{92}\mathrm{U}$ se 146 neutrony a uran $^{235}_{92}\mathrm{U}$ se 143 neutrony.

Vodík má tři izotopy: $^{1}_{1}\mathrm{H}$, $^{2}_{1}\mathrm{H}$, $^{3}_{1}\mathrm{H}$.

($^{1}_{1}\mathrm{H}$ lehký vodík, $^{2}_{1}\mathrm{H}$ těžký vodík-deuterium, často značený $^{2}_{1}\mathrm{D}$, supertěžký vodík-tricium $^{3}_{1}\mathrm{T}$)

V přírodě existuje přibližně 300 stabilních nuklidů a okolo 1000 nestabilních, přirozených nebo uměle připravených nuklidů. Atomy nestabilních prvků nazýváme radionuklidy.

JADERNÉ SÍLY

Síly, jež poutají nukleony v jádře, se nazývají *jaderné síly*.

Mají některé důležité vlastnosti:

1) Jsou to přitažlivé síly velmi krátkého dosahu (řádově 10^{-15} m), ale na těchto vzdálenostech značně překonávají síly elektrického odpuzování!

2) Působí bez rozdílů mezi protony a neutrony.

3) Projevují vlastnost nasycení, působí jen na malý počet okolních nukleonů.

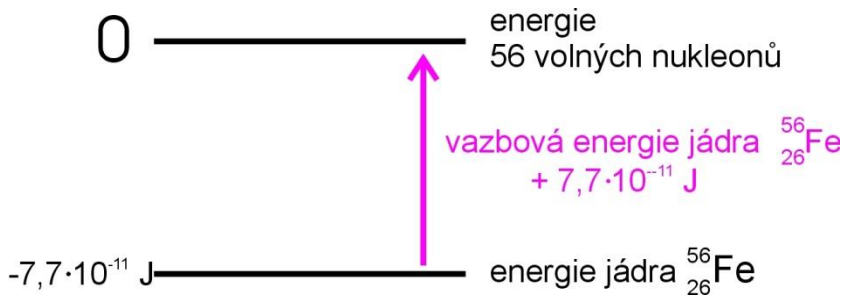
VAZBOVÁ ENERGIE JÁDRA

Kdybychom chtěli atomové jádro rozložit na zcela volné, na sebe už nepůsobící nukleony, museli bychom na to vynaložit určitou energii. Takovou energii nazýváme *vazbová energie jádra*.

Pozor !!! Není to tedy energie, kterou jádro má, ale energie, o níž je energie jádra **menší** než energie přiřazená množině volných nukleonů.

Fyzikové se shodli, že energii volných nukleonů přiřadí energii nulovou. Energie jádra tedy leží pod nulou právě o vazbovou energii, a tato energie je proto záporná.

Použijeme-li i pro jádro „žebříkový model energií“, vypadá obrázek pro jádro železa takto:



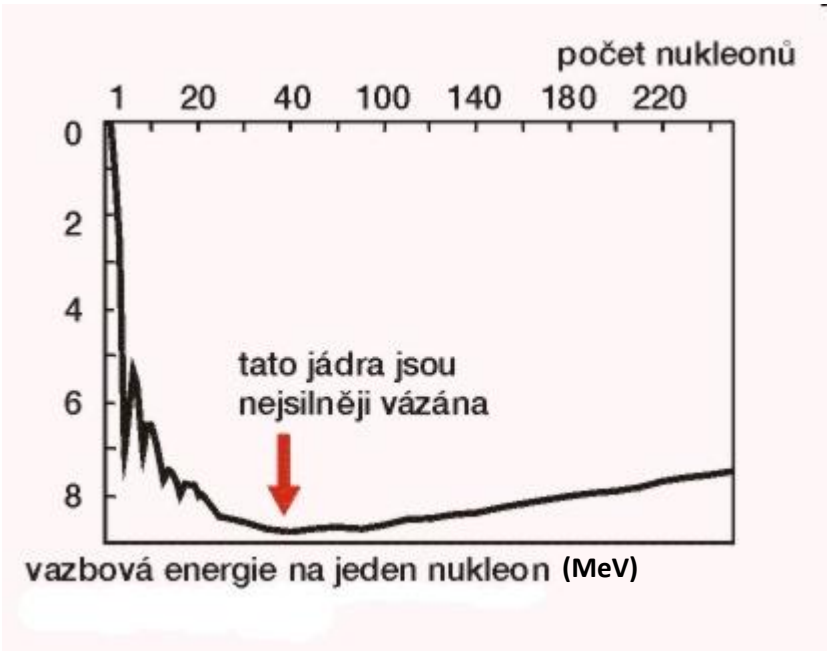
Je zřejmé, že rozbití jádra železa s 56 nukleony bude vyžadovat méně energie než rozebrání uranového jádra s 138 nukleony. To ovšem nic nevypovídá o tom, jak je jádro pevné, lépe řečeno stabilní.

O tom rozhoduje porce vazebné energie připadající na jeden nukleon.

U popisovaného jádra $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ je vazbová energie připadající na 1 nukleon o 10% větší než pro jádro $^{207}_{82}\mathrm{Pb}$.

Jádro olova se tedy dá snadněji rozbít.

Vazbová energie na jeden nukleon pro jádra prvků ukazuje graf na obrázku. Jistě byste poznali i bez šipky, že nejsilněji jsou vázána střední jádra.



Z obrázku můžete odhadnout, že energii lze získat buď tak, že necháme splynout méně vázaná jádra ze začátku grafu, nebo tak, že rozštěpíme silně vázané těžké jádro z konce grafu na dvě lehčí. Oběma způsoby přecházíte od slaběji vázaných jader k jádrům silněji vázaným. Při splývání lehkých jader nejvíce energie odnášejí neutrony. Ve srážkách pošťuchují okolní jádra a zvýší jejich tepelné hemžení – tedy teplotu, a tím i vyzařování energie.

Pří štěpení nejvíce energie odnášejí jádra vzniklá štěpením. Ty se pak srážejí s okolním materiálem a opět zvětší jeho tepelné hemžení. Energie uvolněná splýváním i štěpením se tedy nakonec projeví tím, že se zahřívá látka, ve které tyto reakce probíhají.

ÚLOHY

1. Prvek olovo má 4 stabilní izotopy : $^{204}_{82}\mathrm{Pb}$, $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$, $^{207}_{82}\mathrm{Pb}$, $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$. Určete počty protonů a neutronů v jednotlivých jádrech.
2. V jaderné fyzice je nejčastěji používaná jednotka energie MeV. Jakou energii v joulech tato jednotka reprezentuje?
3. Jakou hodnotu má vazbová energie W_{Fe} jádra $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ v MeV? W_{Fe} = 7,68 ·10^{-11} J.
4. Jádro s nukleonovým číslem 100 a s vazbovou energií na 1 nukleon ε_{j1} = 7,4MeV se rozštěpí na dvě jádra s vazbovou energií připadající na jeden nukleon ε_{j2} = 8,2 MeV. Jaká energie v joulech se při tom uvolní?
5. Určete procentové složení chlóru s relativní atomovou hmotností 35,5, který je tvořen směsí izotopů

$$^{35}_{17}\mathrm{Cl} \text{ a } ^{37}_{17}\mathrm{Cl}\,.$$

6. Dvojicí čísel jsou podobně jako nuklidy popisovány i částice. Jestliže víte, že horní nukleonové číslo charakterizuje hmotnost a dolní náboj částice, jistě dokážete přiřadit charakteristická čísla:

   p protonu, n neutronu, α částici, β částici (elektron z jádra), γ částici (jaderný foton).

   Připomínáme, že hmotnosti elektronu a jaderného fotonu ve srovnání s hmotnostmi nukleonů v zápisu zanedbáváme.
7. V přírodě se vyskytujícím bóru je percentuálně zastoupeno 20% izotopu $^{10}_{5}\mathrm{B}$ a 80% izotopu $^{11}_{5}\mathrm{B}$. Jaká je relativní atomová hmotnost přírodního bóru?
8. Který nuklid nemá v jádře ani jeden neutron?
9. Kolik elektronů, protonů a neutronů je v molekule vody?

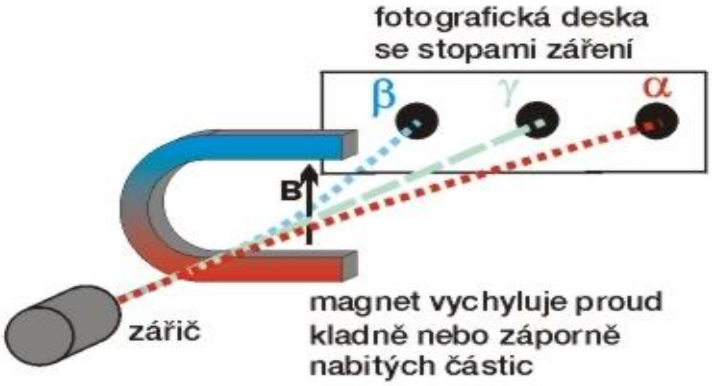
JADERNÉ PŘEMĚNY

Na konci 19. století zkoumal francouzský fyzik Henri Becquerel světélkování některých nerostů. Zkoumal také uranovou rudu -smolinec z Jáchymova. Nerosty dával ve tmě na fotografickou desku. Tu pak vyvolal a zkoumal její zčernání. V roce 1896 omylem vyvolal i desku, která byla zabalena v černém papíru. S údivem zjistil, že i ta zčernala, i když nebyla osvětlena, ale předtím na ní ležel kus smolince. Becquerel z toho usoudil, že z uranové rudy vychází neviditelné záření, jež prochází papírem a působí na fotografickou desku. Toto záření dále zkoumali Pierre Curie a Marie Curieová-Sklodowská. Zjistili, že záření, které nazvali radioaktivním, má tři složky, jež dnes označujeme řeckými písmeny alfa α, beta β a gama γ. Je možné je od sebe oddělit magnetickým polem.

Zářením α nazvali záření kladně nabité (poznalo se to podle toho, jak se záření ohýbalo v poli magnetu), které bylo možné lehce odstínit už například listem papíru.

Zářením β nazvali záporně nabité záření, které bylo pronikavější, ale přesto se dalo odstínit například plechem.

Zářením γ nazvali paprsky, které nebylo možné odchýlit magnetem a které bylo možné odstínit jen silnou vrstvou olova.



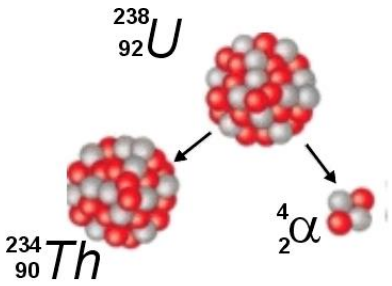
Nejvíce se odchyluje záření beta, méně a na opačnou stranu záření alfa. Vůbec se neodchyluje záření gama. Záření beta se odchyluje tak, že je zřejmé, že jde o proud záporných částic, záření alfa je proudem kladných částic.

Po objevu atomového jádra se prokázalo, že záření alfa je tvořeno velmi rychle se pohybujícími jádry helia ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, záření beta je proudem elektronů ${}^{0}_{-1}\beta$, záření gama ${}^{0}_{0}\gamma$ je elektromagnetické vlnění s nesmírně krátkou vlnovou délkou, a tedy vysokou energií fotonů.

Objevitel atomového jádra Ernest Rutherford dokázal, že všechny tři složky radioaktivního záření vycházejí z jádra. Radioaktivní záření je výsledkem procesu přeměny atomového jádra, jejž nazýváme radioaktivitou.

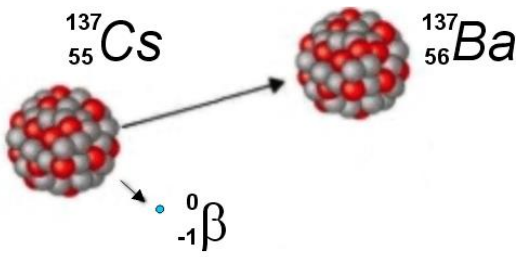
Při alfa přeměně se jádro rozpadá na nové jádro a částici alfa. Nové jádro má protonové číslo o 2 menší a nukleonové se zmenší o 4.

Příkladem je přeměna uranu, který se mění v thorium:



$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow ^{234}_{90}\mathrm{Th} + ^{4}_{2}\alpha$$

Příklad přeměny jader s vysláním částice ${}^{0}_{-1}\beta$ je přeměna cesia na baryum:

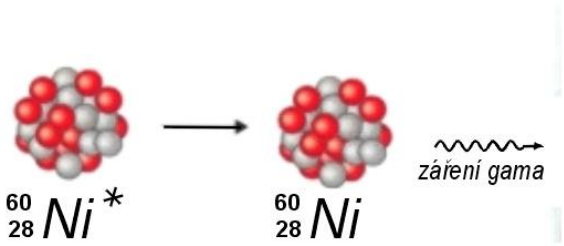


$$^{137}_{55}\mathrm{Cs} \rightarrow ^{137}_{56}\mathrm{Ba} + ^{0}_{-1}\beta$$

Při beta přeměně se protonové číslo prvku zvětšuje o 1, nukleonové číslo se nemění. V jádru dochází k přeměně neutronu v proton.

Záření gama vzniká, když má nové jádro po přeměně beta nebo alfa přebytečnou energii. Takové jádro se označuje hvězdičkou. Na obrázku je přeměna jádra niklu:

$$^{60}_{28}\mathrm{Ni}^{*} \rightarrow ^{60}_{28}\mathrm{Ni} + ^{0}_{0}\gamma$$

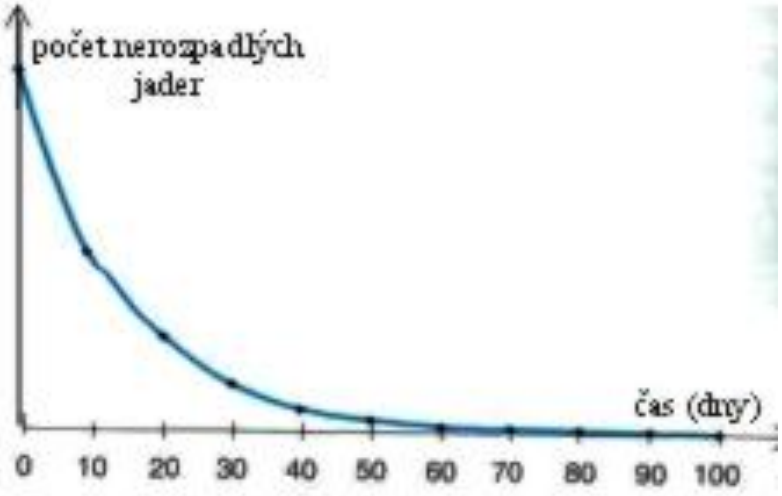


Ve všech přeměnách atomových jader zůstává zachován součet nukleonových i protonových čísel. Říkáme, že se zachovává počet nukleonů a platí zákon **zachování elektrického náboje.**

ČASOVÝ ZÁKON RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN

Radioaktivní jádra se nepřeměňují všechna najednou. Rychlost přeměny posuzujeme podle doby, za niž se přemění právě polovina jader. Této době *T* říkáme „poločas přeměny“. U různých nuklidů je poločas přeměny značně odlišný. Uran $^{238}_{92}\mathrm{U}$ má poločas přeměny 4,5 miliardy roků, polonium $^{213}_{84}\mathrm{Po}$ jen 4,2 mikrosekundy. Izotop aktinia $^{225}_{89}\mathrm{Ac}$ má poločas přeměny 10 dní.

Časový zákon radioaktivní přeměny aktinia popisuje graf.



ÚLOHY

1. Nuklid $^{235}_{92}\mathrm{U}$ je radioaktivní. Jaký nuklid vzniká jeho alfa přeměnou?

2. Poločas rozpadu izotopu radia $^{221}_{88}\mathrm{Ra}$ je 30 sekund. V čase $t = 0$ obsahoval vzorek přibližně m_0 = 32 mg atomů tohoto nuklidu. Kolik miligramů $^{221}_{88}\mathrm{Ra}$ tam ještě přibližně bude po 3 minutách?

3. Následující tabulka udává měření rozpadu izotopu jódu $^{128}_{53}I$ GM počítačem.

Čas (min)	4	36	68	100	132	164	196
počet impulsů (s^{-1})	392	161	66	27	11	5	2

Nakreslete graf závislosti počtu impulsů za sekundu na čase a z grafu určete přibližný poločas rozpadu *T* daného nuklidu.

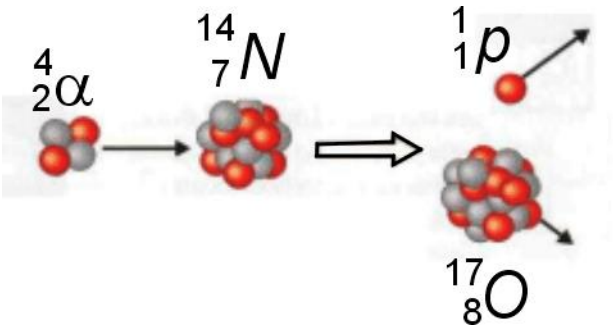
4. Jádro $^{41}_{20}\mathrm{Ca}$ izotopu vápníku někdy zachytí elektron $^{0}_{-1}e$ z elektronového obalu atomu. Jaký dceřinný nuklid tím vznikne?

5. Izotop neonu $^{18}_{10}\mathrm{Ne}$ je radioaktivní, vyzářením určité částice se mění na nuklid $^{18}_{9}\mathrm{F}$. Jaká částice je přitom jádrem $^{18}_{10}\mathrm{Ne}$ vyzářena?

JADERNÉ REAKCE

Rozpad není jediný způsob, kterým se atomová jádra mění. Může docházet i ke slučování jader a různým reakcím. První jadernou reakci uskutečnil v roce 1919 Ernest Rutherford. Ozařoval dusík částicemi alfa a po určité době zjistil přítomnost kyslíku. Byl to důsledek **jaderné reakce** částic s jádry dusíku.

Průběh reakce je modelově znázorněn na obrázku.



Jaderné reakce zapisujeme podobně jako chemické reakce. Zápis jaderné reakce vyvolané Rutherfordem vypadá takto:

$^{4}_{2}\alpha + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}p$

Na levé straně zápisu je částice, jež reakci vyvolá, a původní atomové jádro.

Na pravé straně je nové jádro a jedna nebo více nových částic.

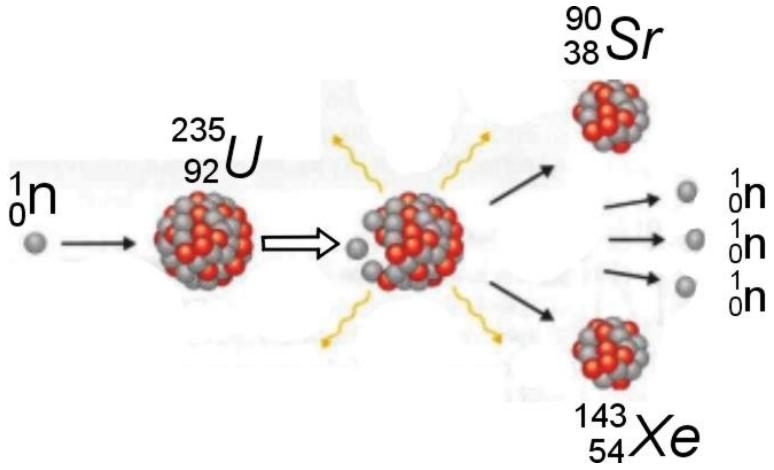
Příklady jiných jaderných reakcí:

$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n$, $^{1}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He$, $^{1}_{0}n + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}p$.

Štěpení jader

6. ledna 1939 v německém časopisu „Die Naturwissenschaften“ byly poprvé zveřejněny Hahnovy a Strassmannovy radiochemické výzkumy, které dokládaly, že uranová jádra byla ostřelováním neutrony rozdělena na atomová jádra ze středu Mendělejevovy tabulky.

Příklad takové reakce ukazuje modelový obrázek:



Rovnicí:

$${}^{1}_{0}n + {}^{235}_{90}U \rightarrow {}^{143}_{54}Xe + {}^{90}_{38}Sr + 3\,{}^{1}_{0}n$$

Při rozštěpení jednoho jádra uranu se uvolňuje energie cca 200 MeV, tj. energie odpovídající řádově energii získané spálením 100 milionů molekul vodíku.

Štěpení může probíhat několika desítkami různých způsobů. Počet uvolněných neutronů se přitom mění. Mohou se uvolnit dva, tři, nebo dokonce čtyři neutrony. Vznikající lehká jádra tedy nejsou vždy nuklidy xenon a stroncium, ale různé dvojice nuklidů, nejčastěji s poměrem hmotností přibližně 2:1.

Protože při každém štěpení se uvolňuje několik nových neutronů, bylo hned po objevu štěpení jasné, že kdyby tyto nové neutrony vyvolaly další štěpení, reakce by se dále rozvíjela samovolně. Pravděpodobnost toho, že nové neutrony vyvolají opět štěpení, je však malá. Neutrony mohou být pohlceny jinými látkami, mohou být pohlceny uranem, aniž by vyvolaly štěpení, mohou také ze soustavy uniknout.

ŘETĚZOVÁ REAKCE

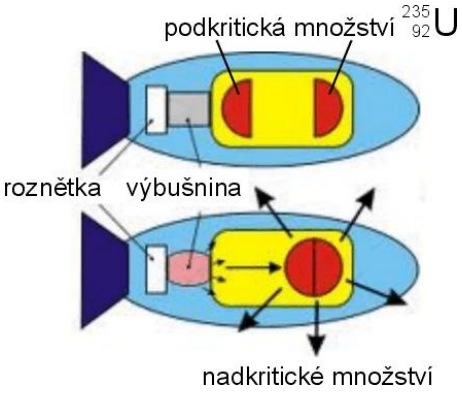
Snížení pravděpodobnosti toho, že neutron unikne ze soustavy, se dá dosáhnout velikostí soustavy a jejím tvarem. Velikosti, při níž lze dosáhnout řetězové reakce, se říká **kritická velikost.**

Přírodní uran je směsí dvou izotopů, ${}^{235}_{90}U$ a ${}^{238}_{90}U$. Štěpitelného ${}^{235}_{90}U$ je v přírodním uranu jen 0,7%, zatímco neštěpitelného izotopu ${}^{238}_{90}U$ 99,3%. V tomto poměru je příčina, proč v samotném přírodním uranu nelze řetězovou reakci uskutečnit, ať je velikost soustavy sebevětší.

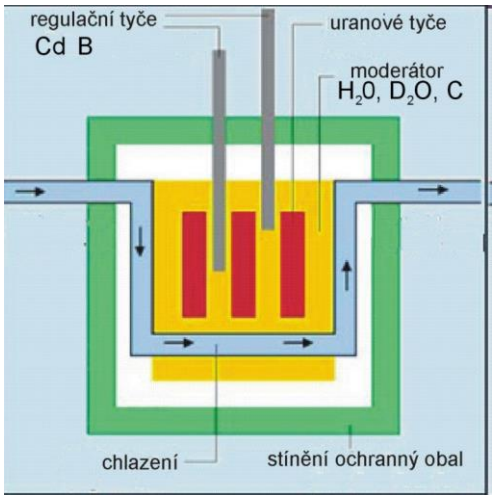
Samovolně probíhající štěpné reakce lze v nadkritické velikosti uranu dosáhnout dvěma způsoby:

- v soustavě uměle zvýšit zastoupení štěpitelného ${}^{235}_{90}U$ nad 80 % (obohatit uran),
- v soustavě zvýšit pravděpodobnost štěpného zachycování neutronů v ${}^{235}_{90}U$ tím, že neutrony zpomalíme. Při minimální rychlosti neutronů se totiž prudce zvyšuje jejich zachycování v ${}^{235}_{90}U$ oproti neštěpnému zachycování neutronů v ${}^{238}_{90}U$.

První způsob se uplatňuje u jaderných bomb. Počet štěpení tam nesmírně rychle narůstá, řetězová reakce má charakter laviny. Uvolňuje se přitom naráz obrovská energie. Výbuch jaderné nálože se docílí rychlým spojením dvou podkritických jaderných náloží, jak ukazuje obrázek vlevo.



Druhý způsob uskutečnění řetězové reakce je používán v jaderných reaktorech pro výzkum i v jaderných elektrárnách. Ke zpomalování neutronů se používá jako zpomalovač – moderátor obvykle voda nebo grafit. Schematicky je jaderný reaktor znázorněn na pravém obrázku.



V uranových tyčích je obvykle obohacen obsah $^{235}_{90}U$ podle druhu moderátoru až na desítky procent.

Applet modelující štěpení uranu:

http://phet.colorado.edu/en/simulation/nuclear-fission

TERMOJADERNÁ REAKCE

Termojaderná reakce probíhá, když splynou dvě lehčí jádra (například deuterony) v těžší jádro, např. helium.

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n, \quad ^{1}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He$$

Problém je v tom, že se jádra od sebe odpuzují - obě jsou totiž kladně nabitá. To se dá překonat jedině vysokou teplotou. Při ní se budou jádra divoce srážet a je naděje, že v těchto divokých srážkách se k sobě dostanou tak blízko, že se budou moci uplatnit přitažlivé jaderné síly. Vypadá to snadně, ale potřebné teploty jsou desítky miliónů stupňů.

Lidstvo už sice umí uskutečnit tuto reakci ve vodíkové bombě, ale neumí tak ještě vyrábět energii pro mírové využití. Problém je v tom, že neexistuje nádoba, která by takové teploty vydržela.
V magnetickém „hrnci“ se zatím daří udržet termojadernou reakci jen zlomky sekundy.

ÚLOHY

1. Jaké částice představují písmena X, Y, Z v uvedených jaderných přeměnách?

$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + \mathrm{X}$

$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{Y}$

$^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{27}_{13}\mathrm{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + \mathrm{Z}$

2. Jaké částice představují písmena X, Y, Z v uvedených jaderných přeměnách?

$^{13}_{7}N + X \rightarrow {}^{14}_{7}N \qquad {}^{12}_{6}C + Y \rightarrow {}^{14}_{7}N \qquad {}^{11}_{5}B + Z \rightarrow {}^{14}_{7}N$

3. Jaký nuklid X představuje druhý fragment štěpení $^{235}_{92}U$?

$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{93}_{36}Kr + X + 3\,{}^{1}_{0}n$

4. Kolik neutronů se uvolní při štěpení $^{235}_{92}U$, jestliže fragmenty štěpení jsou jádra $^{139}_{55}Cs$ a $^{95}_{37}Rb$?

5. Popište jednotlivé části jaderného reaktoru.

6. Popište funkci moderátoru v jaderném reaktoru.

7. Štěpitelným materiálem, vznikajícím v uranovém reaktoru neštěpným zachycováním neutronů v jádrech $^{238}_{92}U$ a dvěma následujícími emisemi částic $^{0}_{-1}\beta^{-}$, je nuklid plutonium $^{240}_{94}Pu$. Zapište rovnicemi tento proces.

8. Jak se dociluje toho, že v jaderném reaktoru voda nevře, i když tam teplota dosahuje až 300°C?

9. Vysvětlete, co je obohacený uran. Jakým způsobem je uran obohacován?

6. ASTRONOMIE

SLUNEČNÍ SOUSTAVA

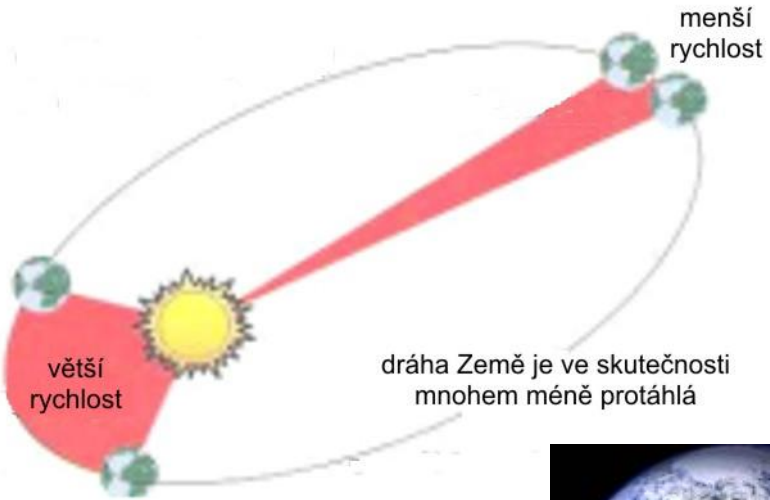
Již v dávnověku se lidé zamýšleli nad uspořádáním vesmíru. Prvním poznáním bylo zjištěná, že kromě hvězd, které se po obloze pohybují stále stejně, je i několik hvězd, které mezi ostatními mění svoji polohu. Řekové tyto hvězdy nazvali bloudící hvězdy (řecky planétes znamená bloudící). Dnes je označujeme názvem planety.

Až do 16. století se udržela představa, dnes označovaná jako geocentrická, že jsou kolem Země na pevných, průhledných a otočných kulových slupkách upevněny Měsíc, Merkur, Venuše, Slunce, Mars, Jupiter, Saturn a hvězdy. Do podrobností zpracoval geocentrický model vesmíru Klaudios Ptolemaios (90 – 160 po Kr.).

Slunce a kolem něho na kruhové dráhy Merkur, Venuši, Zemi, Mars, Jupiter a Saturn. Vytvořil tak Polský astronom Mikuláš Koperník (1473 – 1543) přišel s novou myšlenkou. Do středu vesmíru umístil heliocentrickou představu o uspořádání vesmíru.

Jeho dílo pak rozvinul vynikající matematik Johann Kepler (1571-1630), který z jeho pozorování dokázal vyloupnout pravé jádro problému. Dráhy planet nejsou kružnice, ale elipsy se Sluncem v jejich ohnisku.

Tím se také vysvětlila nerovnoměrnost pohybu planet. Blíže Slunci je rychlost planety větší, než když je vzdálena více.



Ve srovnání s hvězdami jsou všechny objekty Sluneční soustavy nepatrné. Průměr naší Země není ani celá setina průměru Slunce a to je Slunce hvězdou jen průměrné velikosti.

Malý Merkur je nejblíže Slunci. Velmi se podobá našemu Měsíci. Protože také nemá atmosféru, tálo by na osvětlených částech olovo (470 °C), zatímco v neosvětlených oblastech panují kruté mrazy. Pozorování Merkuru je obtížné, protože je stále blízko Slunce.

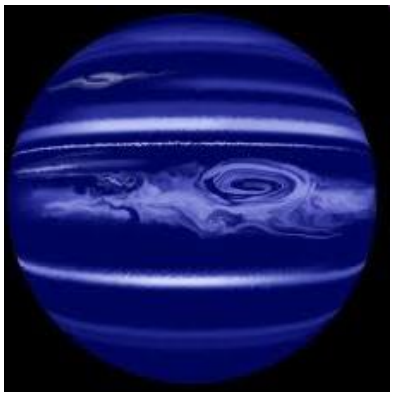
Mnohem zajímavější je Venuše. Ačkoliv má jméno po bohyni krásy, vlastní planeta představuje pravé smradlavé peklo. Má velmi hustou a bouřlivou atmosféru tvořenou oxidem uhličitým s mračny z kyseliny sírové. Sondy, kterým se podařilo přistát na jejím povrchu, zjistily teplotu asi 480 °C a téměř stokrát větší atmosférický tlak než na Zemi. Není divu, že sondy v takových podmínkách nepřežily déle než jednu hodinu. Jinak se povrch velmi podobá zemskému, s horami, sopkami a hlubokými údolími.

O Marsu si lidé mysleli, že tam žijí Marťani. V dalekohledech byly totiž vidět jejich kanály. Teprve později se ukázalo, že to jsou přirozeně vzniklá údolí a kaňony. Na Marsu už přistály vesmírné sondy a žádné Marťany ani jiné známky života nepotkaly. Přesto je Mars nadějným místem ve sluneční soustavě, kde by nějaká forma života mohla být. Nic na tom nemění fakt, zeje velmi nehostinný - samá kamenitá poušť načervenalé barvy, mrzne tam až praští. Velmi patrné jsou polární čepičky z ledu a tuhého oxidu uhličitého. Od roku 2012 je průzkumníkem Marsu Curiosity, který je na obrázku

Jupiter je divná planeta. Je to obří plynná vodíková koule. Nemá vlastně povrch a pokud obsahuje tuhý vodík, musí být hluboko v jádře. Kdyby byl ještě větší a hmotnější, mohly by v něm probíhat jaderné reakce – stál by se hvězdou. Bezbarvý vodík obsahuje příměsi různých látek, které ve slunečním světle vytvářejí barevné skvrny a pásy na jeho povrchu.

Saturn je podobný Jupiteru, jen se ozdobil krásnými tenounkými prstenci - jejich tloušťka je asi 100 m . Tyto prstence kupodivu nejsou z jemných krajek, ale úlomků ledu a kamenů o velikosti několika milimetrů až několika metrů. Pozoruhodné je, že hejna kamenů se drží pohromadě v tak pěkné podobě.

Uran má prstence podobně jako Saturn, ale protože jsou z úlomků špinavého ledu, jsou velmi tmavé a tudíž jsou špatně vidět. Jinak je to opět vodíková koule s příměsí metanu, takže má modrozelený nádech. Je už tak daleko od Slunce, že teploty okolo - 200 °C jsou tam zcela normální.



Neptun je velmi podobný Uranu, včetně prstenců. Zima je tu ještě větší.

Miniaturní kamenité Pluto je menší než náš Měsíc a byl už vyřazen z rodiny planet. Jeho dráha kolem Slunce je tak protáhlá, že na krátkou dobu je blíž Slunci než Neptun. Jeho název znamená v antických bájích vládce podsvětí. Není divu - je tam tma a hrozná zima.

Okolo větších planet většinou obletují měsíce. Některé planety jich mají více. Mars má například dva - Phobos a Deimos. Nejvíc měsíců má Saturn - přes 20. Čtyři z Jupiterových měsíců jsou vidět i malým dalekohledem. Výjimečný je největší Saturnův měsíc Titan. Meziplanetární sonda Voyager ho sledovala ze vzdálenosti pouhých 4000 km. Zjistilo se, že v atmosféře je smog z organických sloučenin, moře jsou při teplotě -180 °C z tekutého etanu a metanu a na jejich dně jsou zřejmě také organické usazeniny. Vznik těchto organických látek působením slunečního záření a magnetického pole na metan a dusík v jeho atmosféře byl vyzkoušen v laboratoři. Není to ještě život, ale i takové podmínky pro vznik života (až na tu zimu) jinde než na Zemi jsou v naší soustavě vzácné.

Mezi dráhou Marsu a Jupitera je znatelná mezera, v níž se pohybuje „smetí“, velké hejno kamenných a železných těles s velikostí asi od 10 m do 1000 km. Jsou to tělesa, kterým Jupiter svou značnou gravitací nedovolil se shluknout do větší planety, a také úlomky po jejich vzájemných srážkách. Nazýváme je planetky. Jejich celkový počet se odhaduje na 300000. Nás však nejvíce zajímají planetky, které se mohou dostat blízko k Zemi, a nebo ještě hůře, se s ní případně srazit. Těch je zatím známo několik stovek. Zprávy o Tunguzské katastrofě z počátku století v nás vzbuzují oprávněné obavy, co by po srážce následovalo.

Smetí, o kterém jsme zatím mluvili, se pohybuje spořádaně po skoro kruhových drahách. Zato většina komet přilétá odkudkoli z periferie Sluneční soustavy ohřát se ke Slunci a zase odlétají. Některé se vrátí až tisíckrát, některé už nikdy neuvidíme. Jádro komety je ze zmrzlé směsi ledu, plynů a prachu. Při

přiblížení ke Slunci se zahřejí a začnou se rozpadat. Uvolněné plyny a prachové částice září odraženým slunečním světlem a vytvářejí viditelný chvost. Na obrázku je kometa Panstarrs objevená v březnu roku 2012 na jižní obloze. Na jaře roku 2013 bude dobře vidět i u nás.

ÚLOHY

1. Doplňte v tabulce pořadí planet vzestupně podle jejich vzdálenosti od Slunce (*a*), podle jejich průměru (*d*), podle jejich hmotnosti (*m*), periody rotace kolem osy (*T*) a podle průměrné teploty na jejich povrchu (*t*). Potřebné údaje zjistěte na internetu nebo v tabulkách.

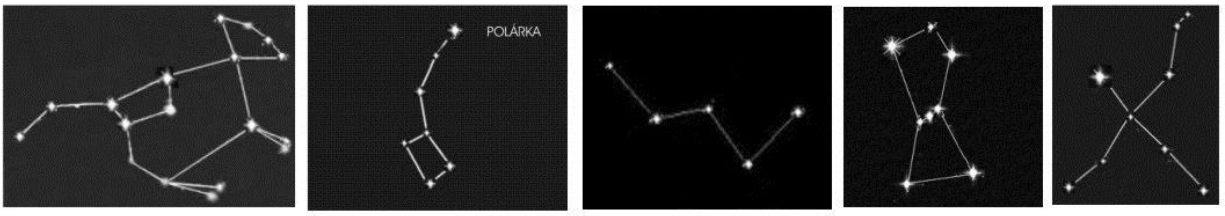
Planeta	Pořadí podle *a*	Pořadí podle *d*	Pořadí podle *m*	Pořadí podle *T*	Pořadí podle *t*
Merkur					
Venuše					
Země					
Mars					
Jupiter					
Saturn					
Uran					
Neptun					

2. Z dlouhodobých záznamů můžeme zjistit, že na severní polokouli trvá léto 93,6 dne, zatímco zima jen 89,0 dne. Co způsobuje tento rozdíl?

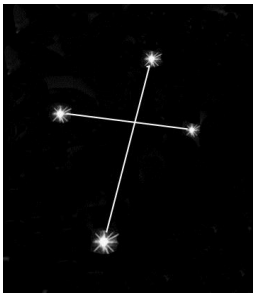
3. O jaký úhel na své dráze kolem Slunce se posune Země za 1 hodinu?

SOUHVĚZDÍ

Lidé již od pradávna sledovali noční oblohu. Pro lepší orientaci si výrazné skupiny hvězd pojmenovávali podle předmětů, zvířat, bájných postav a bytostí. Na obrázku jsou souhvězdí severní oblohy Velký medvěd, Malý medvěd s Polárkou na konci, Kasijopeja, Orion a Labuť.



Na jižní obloze je nejznámějším souhvězdím Jižní kříž.

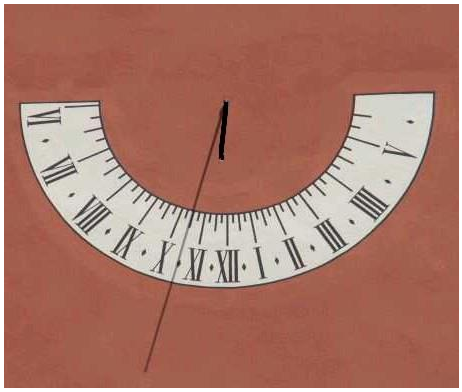


Pohyb nebeských těles po obloze je způsoben hlavně rotací Země, jde tedy o zdánlivý pohyb. Protože Země se otáčí od západu k východu, většina hvězd, slunce i měsíc se na obloze pohybují opačným směrem. Hvězdy oběhnou dokola za hvězdný den, slunce za sluneční den. Hvězdy se proto po obloze pohybují rychleji než slunce.

Všechny hvězdy jsou od Země velice daleko. Při pohledu na oblohu se člověku zdá, že jsou všechny stejně daleko, jako kdyby byly na vnitřním povrchu obrovské koule. Otáčení Země kolem osy se bude pozorovateli ze Země jeví tak, jako by se celá obloha s hvězdami otáčela.

MĚŘENÍ ČASU A VZDÁLENOSTÍ V ASTRONOMII

Jedny z nejstarších hodin používaných k měření času byly sluneční hodiny, jež ukazovaly čas pohybem slunečního stínu. Tento čas dnes nazýváme *pravý* ***slunečný čas***. Pravé sluneční dny nejsou stejně dlouhé. Země se sice otáčí rovnoměrně kolem své osy, ale kolem Slunce neobíhá stálou rychlostí a ve stejné vzdálenosti.



V astronomii se používá také ***hvězdný čas***. Hvězdný den je doba, za kterou se Země otočí kolem své osy o 360^0.

Hvězdný den je přibližně o 4 minuty kratší než slunečný den, protože se Země se za dobu jedné své otočky poněkud vůči Slunci přemístí. Aby byl pozorovatel vůči Slunci ve stejné poloze musí se Země ještě přibližně o jeden úhlový stupeň pootočit. Na to Země potřebuje 4 minuty.

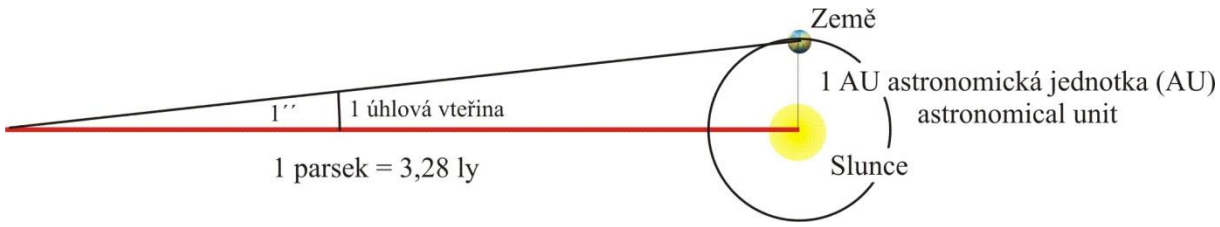
Pro udávání vzdáleností v astronomii jsou jednotky délky metr a kilometr používané v běžném životě příliš malé. Proto astronomové používají pro měření délky jednotek mnohonásobně větší.

Nejznámější je asi jednotka délky s názvem ***světelný rok*** (značka jednotky ly, z anglického light year). Je to vzdálenost, do které světlo dospěje ve vakuu za 1 rok. Kolik kilometrů přibližně světelný rok představuje jistě dokážete spočítat, jestliže budete přibližně předpokládat že rychlost světla je $3 . 10^8$ m/s a rok má 365 dnů. Jistě tedy nebudete zařazovat světelný rok mezi jednotky času.

Jinou často používanou jednotkou délky je ***astronomická jednotka*** (značka jednotky AU, z anglického astronomical unit).

1 AU Je přibližně vzdáleností Země od Slunce.

Třetí používanou jednotku je ***parsek*** (pc). 1 parsek je vzdálenost, ze které je vidět vzdálenost Země-Slunce pod úhlem 1 úhlové vteřiny.



ÚLOHY:

1. Na fotografii byl dlouhou expozicí zachycen pohyb stálic po kružnici. Co lze říci o směru, který míří ze Země ke středu hvězdných kružnic?

2. Druhou nejbližší hvězdou od Země je pouhým okem nepozorovatelná „Proxima Centauri“ vzdálená 1,3 pc. Vypočtěte přibližnou dobu za níž od ní světlo dorazí k Zemi.

3. Vyjádřete jednotky 1 ly, 1 AU, 1 pc v kilometrech.

4. Jak dlouhý by byl jeden *slunečný den*, kdyby se Země při svém oběhu kolem Slunce neotáčela kokem své osy.

Jak dlouhý by byl v takovém případě *hvězdný den*?

HVĚZDY

Člověk si odpradávna kladl otázku, **jak** hvězdy svítí.

U některých hvězd astronomové pozorovali pravidelné kolísání jejich jasu. Všimli si také, že některé hvězdy jsou načervenalé, některé nažloutlé a některé namodralé. Proč?

Kolísání jasu některých hvězd se dalo vysvětlit tím, že ve skutečnosti jde o dvojici hvězd, které kolem sebe obíhají, a tak se nám pravidelně jedna schovává za druhou.

S různou barvou světla se setkáváme denně i v běžném životě. Roztopená kamna vysílají neviditelné infračervené záření. Nad teplotou asi 800 °C začínají červenat. Jasně žlutou barvou svítí roztavená ocel o teplotě kolem 1500 °C. Wolframové vlákno žárovky má asi 3000 °C, elektrický oblouk dosahuje až 6000 °C. Světlo oblouku se nám jeví jako čistě bílé stejně jako světlo Slunce, protože i teplota povrchu Slunce je okolo 6000 °C. Barva hvězdy je tedy v podstatě daná její teplotou.

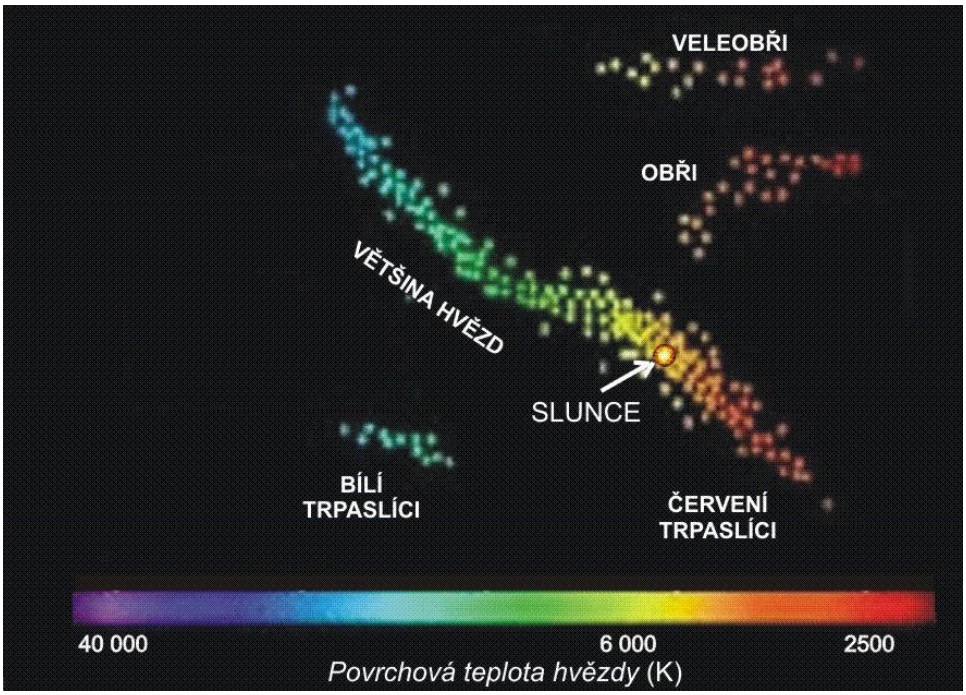
V roce 1821 Joseph von Fraunhofer zaznamenal, že ve slunečním spektru některé barvy chybí. Ve spektru slunečního světla na obrázku vidíte černé čáry.

Jejich původ rozluštil v roce 1859 Gustav Kirchhoff. Pochopil totiž, že světlo chybějících barev pohltily atomy v atmosféře Slunce. Atomy jsou totiž vybíravé a chutná jim právě to světlo, které sami umějí vysílat.

Každý prvek je nezaměnitelně podepsán svým spektrem. Černé čáry ve spektru Slunce tak odhalují prvky, které jsou v jeho atmosféře. Podobně můžeme ze spekter hvězd vyčíst mnoho údajů jak samotné hvězdě tak , i o vesmírném prostoru, který leží mezi Zemí a hvězdou. Ve světle tak lidé objevili toho pravého vesmírného listonoše.

Výsledkem mravenčí práce astronomů byl počátkem 20. století katalog téměř 400 000 hvězd, u nichž bylo pomocí spektra a měřením svítivosti určeno chemické složení, povrchová teplota, u dvojhvězd i jejich hmotnost. Ukázalo se, že hvězdy s podobným spektrem mají i podobné další vlastnosti, takže je možno pomocí spektra rozdělit hvězdy do tříd.

Podívejte se na obrázek. Jedná se o Hertsprungův-Russellův diagram závislosti svítivosti na spektrální třídě související s povrchovou teplotou hvězd. Z něho je také možno vyčíst, v jakém stadiu svého života hvězda je. Slunce je na tzv. hlavní posloupnosti, což je poměrně ranné stadium života hvězdy.



Ze spekter hvězd je možné také změřit, jakou rychlostí se od nás vzdalují. Zvuk auta, které se od nás vzdaluje, je tím hlubší, čím větší je jeho rychlost. Podobně i světlo od nás se vzdalující hvězdy je posunuto k červenému konci spektra. Bylo tak zjištěno, že se celý vesmír rozpíná. Čím jsou vesmírné objekty vzdálenější, tím je rychlost jejich vzdalování a posun spektra větší (*rudý posun*).
Z nejvzdálenějších oblastí vesmíru k nám tak přichází zejména radiové záření.

Zjištěné rozpínání vesmíru vedlo k představě, že vesmír vznikl obrovským výbuchem (velký třesk). Hmota, která byla těsně po výbuchu nesmírně hustá a horká, se za zhruba 15 až 20 miliard let do dneška roztáhla a ochladla do podoby současného vesmíru. Podobně ochladlo i záření z mládí vesmíru. Dnes má teplotu asi 3 K.

SLUNCE

Slunce je nejbližší hvězdou a proto ho mohou astronomové podrobně studovat. Ze slunečního spektra se zjistilo, že Slunce je z převážné většiny tvořeno vodíkem, z malé části heliem. Dále byly objeveny ve velmi malé míře vápník, sodík, hořčík a železo. Slunce nejsilněji září v oblasti žlutozelené barvy (zřejmě proto je na tuto barvu naše oko nejcitlivější), a to odpovídá povrchové teplotě asi 6000 K. Ovšem udržet v mrazivém vesmíru žhavou tak ohromnou kouli vyžaduje nesmírný zdroj energie.

Právě přítomnost vodíku a helia je klíčem k otázce zdroje sluneční energie.

Životopis i předpověď budoucnosti našeho Slunce ukazuje řada obrázků na následující straně.

Vraťme se o nějakých 5 miliard let zpátky, kdy se působením gravitace začala shlukovat mračna rozptýlené mezihvězdné hmoty. Rodilo se jádro Sluneční soustavy.

Čím více se mračna shlukovala, tím rychleji se tato hmota zhušťovala a také zahřívala (jako vzduch při stlačování v hustilce). Tím vznikl v jádru budoucí hvězdy velmi vysoký tlak a teplota.

Za těchto podmínek se rozběhlo slučování jader - z vodíku začalo vznikat helium a uvolňovat přitom značné množství energie.

Běh života Slunce

Slučování vodíku ve Slunci je ale na rozdíl od reakce ve vodíkové bombě regulované. Vznikající záření vytlačuje hmotu hvězdy z nitra ven a současně ji gravitace vtahuje dovnitř. Když v přetlačování vítězí záření, tlak v nitru hvězdy vyvolaný gravitací klesá, a podmínky pro slučování jader se zhorší. Zářivý výkon hvězdy začne slábnout a navrch má zase na chvíli gravitace. Jakmile zase vzroste tlak, podpoří se slučování jader. Tak si Slunce udržuje už asi 5 miliard roků stálý výkon.

Podle současných znalostí bude Slunce poklidně svítit ještě asi 4 miliardy let. Pak však rovnováhu poruší narůstající podíl helia, které celou dobu vznikalo slučováním jader vodíku. Pro život na Zemi (pokud ho mezitím nezničíme válkami a bezohledností vůči přírodě) to bude mít katastrofální následky. Dnešní odpadní helium se postupně stane novým palivem a důsledkem bude krátkodobě zvýšený výkon Slunce asi na 1000 násobek. Následkem toho se Slunce zvětší asi 50 krát a spolkne vnitřní planety - Merkur a Venuši. Lidé ze Země se snad stačí včas odstěhovat a zdáli budou pozorovat Slunce jako rudého obra s nižší povrchovou teplotou a Zemi s vypařenými oceány a odvanutou atmosférou. Slunce přijde mohutným vyzařováním o okrajové vrstvy vodíku, které gravitace na takovou vzdálenost už neudrží. Nakonec z něj zůstane jen malé žhavé jádro - bílý trpaslík, který bude pomalu chladnout. Z někdejší hvězdné slávy už nezbude téměř nic.

Může se vám zdát, že si astronomové v předvídání dalšího osudu Slunce příliš popouštějí uzdu své fantazii. Jednotlivá stádia života Slunce se však dají ve vesmíru pozorovat na jiných hvězdách podobné hmotnosti.

Ještě tajemnější konec života čeká hvězdy s hmotností mnohokrát větší než je hmotnost Slunce. Jejich gravitace je tak silná, že celá hmota se stěsná do nepatrného objektu, na jehož povrchu přitažlivost zachytí i světelné záření. Tento objekt se projevuje pouze svým gravitačním působením a žádné záření z něj nezachytíme. Astronomové mu říkají příznačně *černá díra*.

ÚLOHY:

Při pozorování kosmických objektů vlastně vždy hledíme do více či méně vzdálené minulosti.

Dokážete zdůvodnit toto tvrzení?