



ZÁKLADY FYZIKY

Modul 4 – Optika a atomové jádro

Jan Kopečný

Vytvořeno v rámci projektu Operačního programu Rozvoje lidských zdrojů
CZ.04.1.03/3.2.15.1/0016
Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického
základu studia.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

ESF – ROVNÉ PŘÍLEŽITOSTI PRO VŠECHNY

Obsah:

Informace o projektu	1
Úvod	2
Pokyny ke studiu	3
Přehled učiva	6
Literatura	9
Modul 4 Optika a atomové jádro	10
4. Optika	10
4.1 Úvodní pojmy	11
4.2 Geometrická optika	20
4.3 Vlnová optika	50
4.4 Kvantová optika	65
5. Stavba atomu	72
5.1 Model atomu	72
5.2 Atomové jádro	76
5.3 Radioaktivita	82
5.4 Jaderné reakce	87
5.5 Měření jaderného záření	72
Klíč	97

Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu studia

je název projektu, který uspěl v rámci první výzvy Operačního programu Rozvoj lidských zdrojů. Projekt je spolufinancován státním rozpočtem ČR a Evropským sociálním fondem. Partnery projektu jsou Regionální středisko výchovy a vzdělávání, s.r.o. v Mostě, Univerzita obrany v Brně a Technická univerzita v Liberci. Projekt byl zahájen 5.1.2006 a bude ukončen 4.1.2008.

Cílem projektu je zpracování studijních materiálů z matematiky, deskriptivní geometrie, fyziky a chemie tak, aby umožnily především samostatné studium a tím minimalizovaly počet kontaktních hodin s učitelem. Je zřejmé, že vytvořené texty jsou určeny studentům všech forem studia. Studenti kombinované a distanční formy studia je využijí k samostudiu, studenti v prezenční formě si mohou doplnit získané vědomosti. Všem studentům texty pomohou při procvičení a ověření získaných vědomostí. Nezanedbatelným cílem projektu je umožnit zvýšení kvalifikace širokému spektru osob, které nemohly ve studiu na vysoké škole z různých důvodů (sociálních, rodinných, politických) pokračovat bezprostředně po maturitě.

V rámci projektu jsou vytvořeny jednak standardní učební texty v tištěné podobě, koncipované pro samostatné studium, jednak e-learningové studijní materiály, přístupné prostřednictvím internetu. Součástí výstupů je rovněž banka testových úloh pro jednotlivé předměty, na níž si studenti ověří, do jaké míry zvládli prostudované učivo.

Bližší informace o projektu můžete najít na adrese <http://www.studopory.vsb.cz/>. Přejeme vám mnoho úspěchů při studiu a budeme mít radost, pokud vám předložený text pomůže při studiu a bude se vám líbit. Protože nikdo není neomylný, mohou se i v tomto textu objevit nejasnosti a chyby. Předem se za ně omlouváme a budeme vám vděční, pokud nás na ně upozorníte.

Úvod

Vážení studující,

dostáváte do rukou čtvrtý ze studijních materiálů kurzu Základy fyziky: Modul 4 – Optika a atomové jádro. Kurz má posloužit k opakování a samostatnému studiu všem studentům, kteří cítí nedostatky ve svých středoškolských znalostech fyziky. Jednak těm, kteří se teprve připravují ke studiu vysoké školy, jednak i těm, kteří ji již studují a zjišťují, že bez dobrého základu ze střední školy vysokoškolský kurz fyziky jen těžko zvládnou.

Stejně jako zbývající tři moduly máte i tento k dispozici ve formě multimediálního CD nebo programu přístupného přes Internet. Obsahově se tyto materiály neliší, pouze LMS (Learning Management System), ke kterému se připojíte přes Internet, vám nabídne větší uživatelský komfort při kontaktu s tutorem a v organizačních záležitostech. Pro studium v době, kdy nemáte k dispozici počítač, byla jako doplňkový materiál vytvořena i textová verze tohoto materiálu.

Celý kurz je napsán tak, abyste učivo zvládli pokud možno samostatně. Aby měla vaše práce smysl, musíte nad studovanou látkou přemýšlet a neučit se ji mechanicky nazpaměť. Důležité je, abyste látku doopravdy pochopili. To si ověříte i prostřednictvím kontrolních otázek a úloh k samostatnému řešení. Pro případ, že byste nebyli schopni sami bez pomoci překonat nějaký problém, máte v organizovaných kurzech k dispozici svého tutora.

Než se pustíte do vlastního studia vybraných kapitol tohoto modulu, přečtěte si prosím pozorně následující část příručky nazvanou Pokyny ke studiu. Obsahuje obecné informace i některé konkrétní detaily, jak s tímto materiálem pracovat (protože jednotlivé moduly zpracovávali různí autoři, může se jejich systém zpracování mírně lišit).

Po Pokynech ke studiu následuje kapitola Přehled učiva, kde se podrobněji dozvíte, jakým tématům se jednotlivé kapitoly modulu věnují. Pro snadnější orientaci jsou nově definované klíčové pojmy zvýrazněny tučně a nejdůležitější zákony a rovnice tučně kurzívou. Studujete-li samostatně, tento přehled vám pomůže si vybrat kapitoly, které vás zajímají.

Pokyny ke studiu

Každá kapitola tohoto modulu představuje poměrně krátkou část učiva, učební jednotku, kterou byste měli pokud možno studovat vcelku. Nemusíte však vždy nutně studovat všechny moduly a kapitoly. Zda je zvládnutí tématu některé kapitoly nezbytné pro pochopení kapitol dalších, zjistíte jednak v následujícím přehledu učiva, jednak po přečtení požadovaných předběžných znalostí na začátku každé učební jednotky. A samozřejmě v organizovaných kurzech bude stanoveno, které části jsou pro vás povinné. Učební jednotky mají následující strukturu.



Nejdříve se seznámte se **Studijními cíli**. Studijní cíle určují, co byste se měli naučit absolvováním příslušné partie. Jsou to znalosti, které využijete při dalším studiu na vysoké škole a budete je potřebovat při studiu odborných předmětů. Pokud máte pocit, že uvedené věci již znáte, můžete danou kapitolu absolvovat poměrně rychle. Přesto doporučuji ji celou nepřeskočit, ale ověřit si, že danou problematiku skutečně ovládáte, prostřednictvím kontrolních otázek a úloh k řešení.



Ikona **Studijní čas** vám orientačně napoví, kolik asi času budete potřebovat k prostudování této kapitoly. Do tohoto času není zahrnuta doba potřebná k doplnění požadovaných předběžných znalostí, protože ta se může u jednotlivých studentů velmi lišit. Studijní čas jednotlivých celků je různý, od 30 do 120 minut. Postupně sami zjistíte, zda jste většinou schopni zvládnout učební jednotku rychleji, než je uvedeno, nebo potřebujete spíše více času. Záleží i na tom, jak často budete chybovat (a tedy se i opravovat) při odpovídání na kontrolní otázky a řešení úloh. V každém případě nezáleží na čase, ale na tom, abyste skutečně dosáhli stanovených studijních cílů.

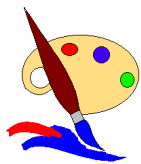


Pod ikonou **Předběžné znalosti** máte uvedeno, které pojmy je nutné znát před začátkem studia této kapitoly. Promyslete si nejprve sami, co znamenají, správnost si pak v elektronických verzích můžete ověřit prokliknutím na příslušný odkaz. Tyto odkazy ovšem slouží pouze k připomenutí již dříve nastudovaných pojmů, v žádném případě nenahrazují ucelený výklad! Pokud jste se s některým z uvedených pojmů dosud vůbec neseťkali, seznámte se s ním podrobně v příslušné kapitole.

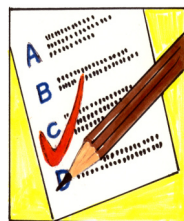


Poté, co si ověříte, že máte požadované předběžné znalosti a dostatek času ke zvládnutí dané kapitoly, pusťte se do studia **Studijního textu**. Zde naleznete výklad dané části učiva, doprovázený názornými obrázky, grafy, tabulkami a animacemi, případně i řešenými příklady. Procházejte jej nejlépe v pořadí, v jakém je sestaven. Mějte po ruce papír a tužku, dělejte si poznámky, provádějte odvození souběžně s výkladem. Soustřeďte se a v případě potřeby se vraťte, ale nesnažte se učit text ani jeho zvýrazněné pasáže nazpaměť. Definice a zákony byste měli být schopni formulovat vlastními slovy. Mějte na mysli studijní cíle, jichž chcete dosáhnout. Po zodpovězení následujících kontrolních otázek a vyřešení

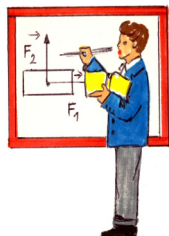
zadaných úloh zjistíte, nakolik jste tématu porozuměli a získáte doporučení, jak pokračovat v dalším studiu.



S touto ikonkou se setkáte pouze ve verzi určené k tisku – označuje jednoduché **Doplňky** zahrnující ilustrativní příklady, odvození nebo aplikace, které jsou v elektronické verzi realizovány formou animací. Tyto doplňky jsou od ostatního textu odděleny z obou stran vodorovnými čarami.



Studijní text je následován **Kontrolními otázkami**. Některé kontrolní otázky vám dávají možnost vybrat odpověď z nabízených variant, pak může být správná jedna nebo i více možností. Za zcela správnou odpověď je pak považována ta, která zahrnuje všechny správné a žádnou nesprávnou možnost. U dalších otázek máte odpověď sami doplnit, ať už slovně nebo jako výsledek s jednotkou či pouhou jednotku. Vždy si nejprve otázku sami zodpovězte, pak teprve se podívejte na správné řešení (vždy si promyslete, v čem jste případně udělali chybu, neporadíte-li si sami, kontaktujte svého tutora!) a postupte dále.

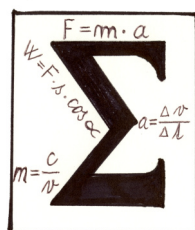


Po kontrolních otázkách je většinou uveden **Řešený příklad**. I řešený příklad se pokuste nejprve vypočítat sami. Pokud to zvládnete, neměli byste mít problémy ani s dalšími úlohami. Pokud ne, nevadí, snažte se porozumět metodě řešení na tomto modelovém příkladu tak, abyste již samostatně zvládli následující úlohy.



Úlohy k řešení byste už měli zvládnout vyřešit zcela sami. K řešení můžete podle potřeby používat kalkulátory a tabulky. Pište si poznámky, nejlépe do vyhrazeného sešitu. Nejprve vždy nalezněte obecné řešení (vzorec tvořený zadanými veličinami, případně i potřebnými fyzikálními konstantami), až nakonec dosadíte numerické hodnoty a vypočtete numerický výsledek. Ten pak (není-li v zadání uvedeno jinak) vhodně zaokrouhlete a doplňte jednotku. Pak teprve si zkontrolujte řešení (není-li vaše odpověď zcela správná, vždy si promyslete, v čem jste udělali chybu, neporadíte-li si sami, kontaktujte svého tutora!).

U kontrolních otázek a úloh k řešení nebuďte netrpěliví a nepokoušejte se bez vlastní snahy o řešení se ke správným výsledkům prostě „proklikat“, nebo si je rovnou číst v klíči, který je u tištěné verze na konci modulu. Tak se nic nenaučíte.



Po prostudování celé textové části je studijní jednotka uzavřena shrnutím. Mělo by obsahovat to, co je z celé kapitoly nejdůležitější. Napište si nejdříve **Vlastní shrnutí**, to pište stručně, ale srozumitelně na papír nebo do vyhrazeného sešitu.

Vaše shrnutí pak porovnejte se **Vzorovým shrnutím** a sami zhodnoťte, nakolik jste byli úspěšní. Ani v časové tísní nepodléhejte pokušení přeskočit všechny předchozí části a naučit se z paměti pouze shrnutí. Takto fyzice (a nejen jí) nikdy neporozumíte a nebudete ji umět použít k řešení problémů, s nimiž se při studiu i v praxi setkáte.

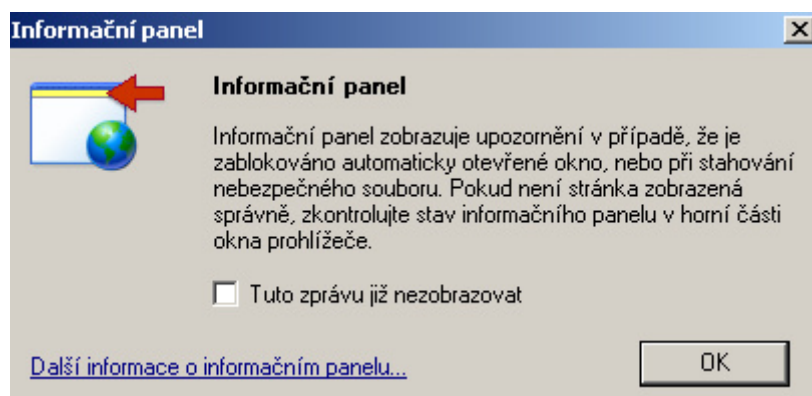
Jako doplněk jsou vám k dispozici fyzikální tabulky, tyto využívejte průběžně podle potřeby.

Nakonec zhodnoťte vaši celkovou úspěšnost při řešení úloh a kontrolních otázek a zvažte, zda postoupit ve studiu dále, nebo si raději problematické pasáže ještě jednou zopakovat.

Na závěr ještě pár technických poznámek k ovládání elektronické verze výukového programu:

1. On-line verzi výukového programu naleznete na <http://rccv.vsb.cz/> . Pak v levé nabídce klikněte na LMS-iTutor4 a Studentský přístup, kde se již přihlásíte pod přiděleným jménem a heslem.
2. Po vložení CD do mechaniky se program obvykle automaticky spustí. Pokud se program „nerozběhne“ najděte si soubor „start.html“ a po jeho dvojím odkliknutí se program spustí.

V obou případech k fungování programu potřebujete Internet Explorer a pokud nemáte nainstalovány potřebnou komponentu přehrávače Flash, můžete si ji nainstalovat přímo pomocí nabídky na obrazovce. Po spuštění CD nebo přihlášení na stránku RCCV se Vám také může zobrazit následující hlášení:



V tomto případě prosím proveďte odblokování automaticky otevřených oken.

Další ovládání výukového programu je intuitivní.

Přehled učiva

V této části příručky najdete přehled celé probírané látky. Nejde jen o obsah, ale u každé kapitoly je její krátký popis. Tak se rychle můžete zorientovat v celém modulu a případně si vybrat jen ty části, které vás zajímají, které potřebujete prostudovat.

Modul 4 Optika a atomové jádro

V první části modulu 4 jsou čtyři kapitoly Úvodní pojmy, Geometrická optika, Vlnová optika a Kvantová optika.

4. Optika

4.1 Úvodní pojmy

V této kapitole se seznámíte s pojmy světlo, jak se světlo šíří a s veličinou index lomu.

4.1.1 Světlo

Dozvíte se o světle jako o elektromagnetickém vlnění. Ukážete si jeho důležité charakteristiky jako je frekvence a vlnová délka. Rozdělíte si světlo na monochromatické a bílé.

4.1.2 Šíření světla

Naučíte se rozlišovat různá optická prostředí, seznámíte se s pojmem vlnoplocha, paprsek je zde vysloven Huygensův princip.

4.1.3 Index lomu

Zde je definován index lomu jako veličina charakterizující optické prostředí. Dovíte se, že index lomu je závislý na vlnové délce světla.

4.2. Geometrická optika

Proberete si hlavní cíl geometrické optiky – zobrazení předmětu.

4.2.1 Odraz a lom světla

Jak už název kapitoly říká probírají se dva nejdůležitější zákony zobrazování – zákon lomu a odrazu. Z těchto zákonů jsou pak odvozeny všechny zobrazovací rovnice se kterými se setkáte v dalších kapitolách.

4.2.2 Optické zobrazení

V této kapitole se naučíte zobrazovat zrcadlem (kap. 4.2.2.1), čočkou (kap. 4.2.2.2), okem (kap. 4.2.2.3), lupou (kap. 4.2.2.4), mikroskopem (kap. 4.2.2.5) a dalekohledem (kap. 4.2.2.6). Budete probírat jak geometrickou konstrukci obrazu, tak jeho výpočet.

4.2.3. Fotometrie

Fotometrie se zabývá objektivním hodnocením vlastností světelných zdrojů. Vyzařování zdrojů si popíšete pomocí veličin jako je světelná energie, světelný tok a svítivost. Osvětlená místa pak jsou popsána veličinami osvětlení a osvit.

4.3 Vlnová optika

Vlnová optika uvažuje světlo jako elektromagnetické vlnění. Protože jde o vlnění, budou se světelné vlny skládat (interference), ohýbat (difrakce) a budou polarizované.

4.3.1 Interference světla

Zde si objasníte pojem fáze vlny a jak fáze ovlivňuje skládání dvou vlnění. Naučíte se odvozovat podmínky pro vznik interferenčních maxim a minim, ukážete si praktické aplikace interference.

4.3.2 Ohyb světla

Vysvětlíte si tento jev, zase si odvodíte podmínky maxim a minim ohybového obrazce. Kapitola končí pojednáním o optické mřížce a jakými parametry ji charakterizujeme.

4.3.3 Polarizace světla

Dovíte se co znamená pojem polarizace světla, které zdroje vysílají polarizované světlo. Ukážete si jak polarizované světlo získat z nepolarizovaného.

4.4 Kvantová optika

Světlo je sice elektromagnetické vlnění, ale některé světelné jevy je možné vysvětlit pouze za předpokladu, že světelná energie se šíří v kvantech energie – fotonech.

4.4.1 Kvantová povaha elektromagnetického záření

Nebojte se, tato kapitola nepojednává o kvantové fyzice jako takové. Zde se jen dovíte co to je foton a jak určíte jeho energii v závislosti na jeho frekvenci.

4.4.2 Fotoelektrický jev

Na tomto příkladu kvantové povahy světla si ukážete co se odehrává při fotoelektrickém jevu. Seznámíte se s pojmem výstupní práce, dovíte se jak funguje fotonka.

4.4.3 Comptonův jev

Zde se dovíte co se stane, když se srazí „hmotný“ elektron s „nehmotným“ fotonem.

5. Stavba atomu

V druhé části modulu se seznámíte s modelem atomu, detailněji si proberete atomové jádro a jeho obal. Následovat bude stručné pojednání o radioaktivitě, jaderných reakcích a měření radioaktivního záření.

5.1. Model atomu

Seznámíte se z Bohrovým modelem atomu a jeho principem kvantování energií oběžných elektronů. Ukážete si, že jeho teorie vede ke vzniku čárového spektra.

5.2. Atomové jádro

Dovíte se o základních stavebních prvcích jádra – protonu a neutronu. Naučíte se charakterizovat prvek pomocí nukleonového protonového a neutronového čísla, vyhledat si tato čísla v Mendělejevově tabulce. Seznámíte se s pojmy nuklid a izotop, dovíte se proč jádro „drží pohromadě“.

5.3 Radioaktivita

Zde je popsán děj zvaný radioaktivita, jsou charakterizována jaderná záření α , β , a γ . Je pojednáno o rovnicích jaderných přeměn, vysloven zákon radioaktivní přeměny. Seznámíte se se souvislostí poločasu přeměny s přeměnovou konstantou, jak se definuje aktivita a jaká je její jednotka.

5.4 Jaderné reakce

Naučíte se popsat jadernou reakci slovy i symbolickou rovnicí. Seznámíte se s hlavními zákony platnými při jaderných reakcích, jak rozlišit jadernou syntézu a jaderný rozpad. Je zde uvedeno schéma rozpadu uranu a popsány jednotlivé části jaderného reaktoru a jejich funkce.

5.5 Měření jaderného záření

Dovíte se čím charakterizujeme zdroje radioaktivního záření. Naučíte se definovat pohlcenou dávku, dávkový ekvivalent. Seznámíte se se způsobem výpočtu dávkového ekvivalentu pomocí dávky a RBE.

Literatura

Svoboda, Emanuel a kol. *Přehled středoškolské fyziky*. Praha: Prométheus, 1996.

Kubínek, Roman, Kolářová, Hana. *Fyzika v příkladech a testových otázkách*. Olomouc: Rubico, 1998

Bartuška, Karel. *Sbírka řešených úloh z fyziky IV*. Praha: Prométheus, 2000

4. OPTIKA

Optika spolu s mechanikou jsou nejstarší obory fyziky. Optika zkoumá světlo, zákonitosti jeho šíření a různé světelné jevy vznikající při vzájemném působení světla a látky.

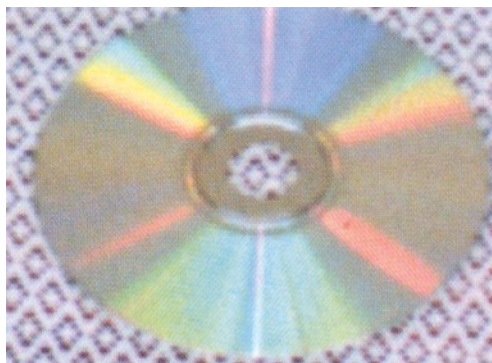
Optika se zpravidla dělí na tři části:

- **Paprskovou (geometrickou) optiku**, jejímž hlavním cílem je zkoumat zobrazení jednoduchými i složitými optickými soustavami. Viz. obr. 1



obr. 1

- **Vlnovou optiku**, která se zabývá světelnými jevy potvrzujícími vlnovou povahu světla. Mezi tyto jevy řadíme disperzi (rozklad), polarizaci, interferenci (skládání) a difrakci (ohyb) světla. Viz. obr. 2



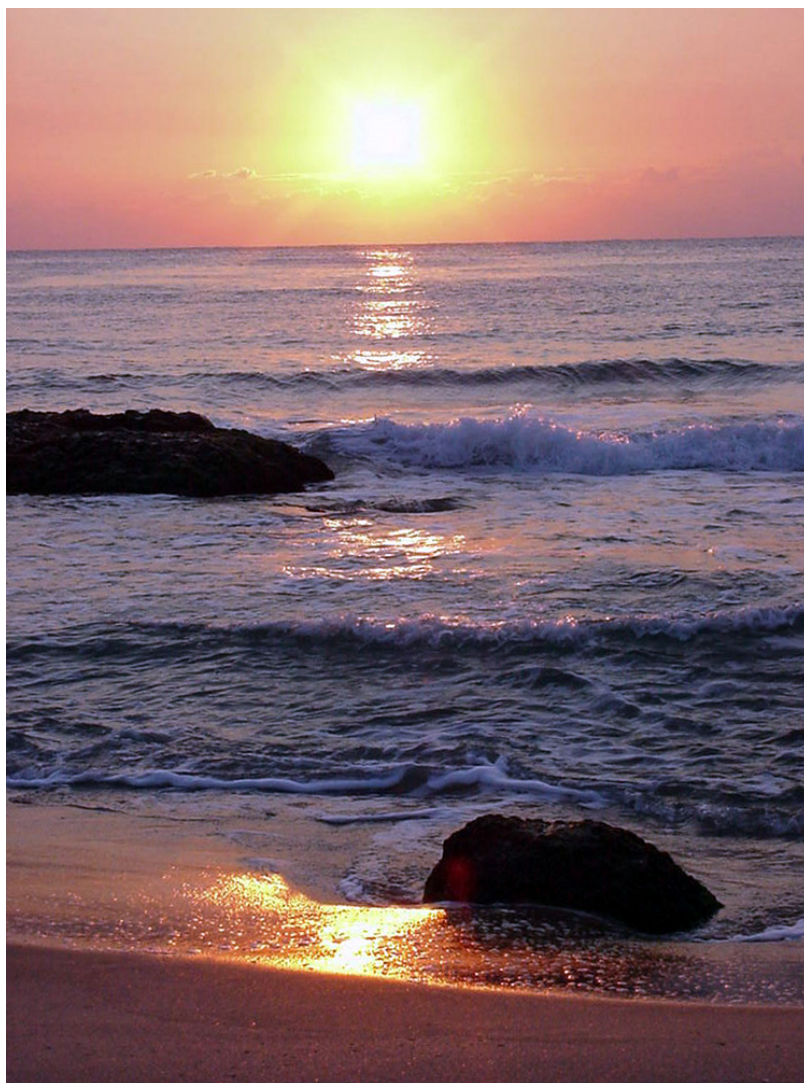
obr. 2

- **Kvantovou optiku**, která vysvětluje jevy potvrzující kvantovou povahu světla. Příkladem těchto jevů je fotoelektrický jev a Comptonův jev.

Dříve než začnete studovat jednotlivé části Optiky, projděte si úvodní partie v kapitole 4.1 Úvodní pojmy pojednávající o světle, šíření světla a indexu lomu.

4.1 Úvodní pojmy

V této kapitole se seznámíte s pojmem světlo, s tím jak se světlo šíří a s důležitou vlastností látky – indexem lomu. Viz. obr. 3



obr. 3

4.1.1 Světlo



1. Uvědomit si obrovský rozsah frekvencí elektromagnetického záření.
2. Vědět, že lidské oko je schopno vnímat jen malou část frekvenčního spektra elektromagnetického záření – světlo a znát rozsah viditelných frekvencí respektive rozsah viditelných vlnových délek světla.
3. Znat přibližnou velikost rychlosti světla ve vakuu.
4. Znat z paměti vztah mezi rychlostí, frekvencí a vlnovou délkou světla.
5. Uvědomit si, že barva světla závisí na jeho frekvenci a ne na vlnové délce, která se mění při průchodu látkou.

6. Vědět, že bílé světlo je složeno z jednotlivých spektrálních barevbarev odpovídajících mnoha frekvencím.



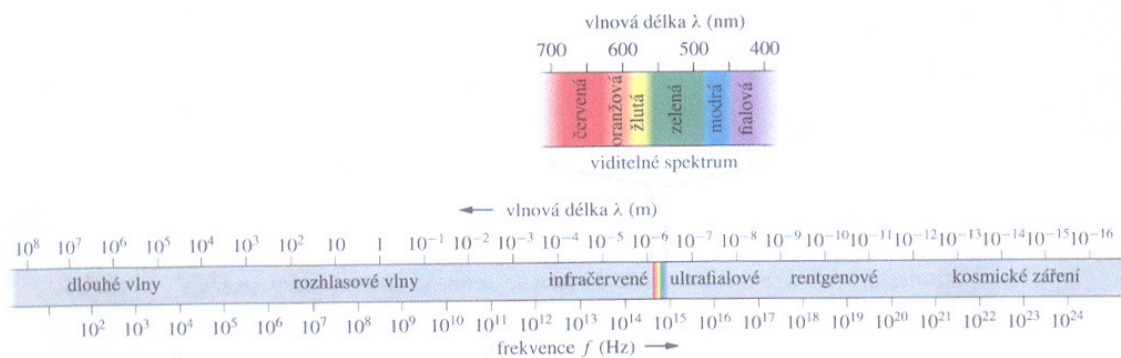
Odhadovaný čas nutný ke studiu je 20 minut.



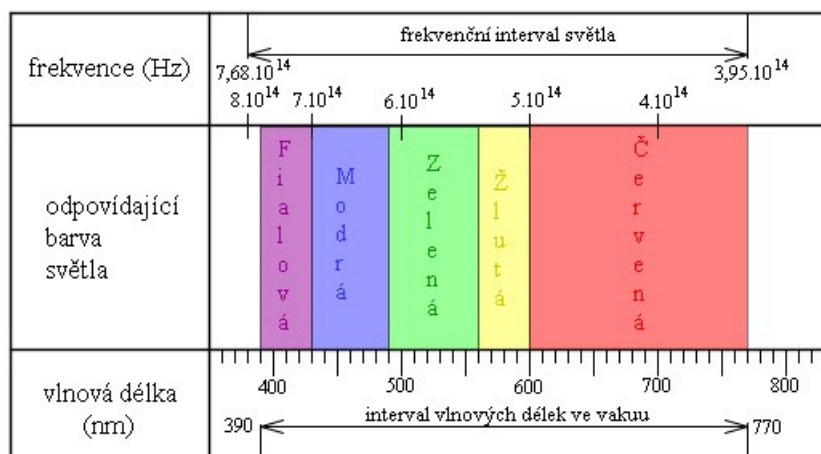
Mechanické vlnění, elektromagnetické vlny



Světlo je elektromagnetické vlnění. Elektromagnetické vlnění, často hovoříme o elektromagnetickém záření, zabírá velký rozsah frekvencí, viz. obr. 4a. Jen velmi malou část elektromagnetického záření, na kterou je citlivé lidské oko, označujeme jako světelné vlnění, zkráceně **světlo**, viz. obr 4.



obr. 4a



obr. 4

Důležitou charakteristikou světla je jeho rychlost. Rychlost šíření světla ve vakuu je známou fyzikální konstantou a je přibližně rovna:

$$c = 300\,000 \text{ km.s}^{-1} = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Přesná měření rychlosti elektromagnetického záření ve vakuu dávají hodnotu:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$$

V látkovém prostředí se světlo šíří vždy menší rychlostí v než je jeho rychlost ve vakuu c . Například pro vzduch je rychlost světla prakticky stejná jako pro vakuum, ale ve vodě se šíří světlo rychlostí kolem $225\,000 \text{ km.s}^{-1}$. Ve skle závisí rychlost na druhu skla a nabývá hodnot od $200\,000 \text{ km.s}^{-1}$ až pod $150\,000 \text{ km.s}^{-1}$.

Stejně jako jiné druhy vlnění charakterizuje i světlo jeho vlnová délka λ .

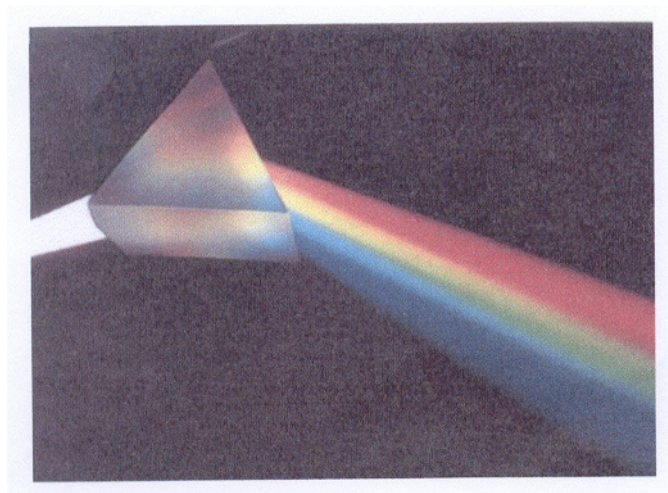
Vlnová délka je vzdálenost, do které se vlnění rozšíří za dobu jedné periody.

Vlnová délka, frekvence f a rychlost světla v jsou spolu svázány vztahem:

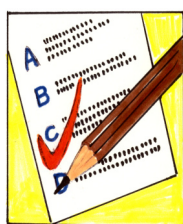
$$v = \lambda \cdot f$$

Poněvadž se rychlost světla v látkách mění, mění se i jeho vlnová délka. Ale pozor, **frekvence světla se při průchodu libovolným látkovým prostředím nezmění**. Přečází-li tedy světlo z jedné látky do druhé, změní se jeho vlnová délka, ale ne frekvence. Nezmění se tedy ani barva světla, která je určena frekvencí.

V běžném životě jen výjimečně pozorujeme světlo jedné frekvence tzv. **monochromatické světlo**. Zpravidla se setkáváme se světlem složeným z vlnění různých frekvencí. Hovoříme-li o **bílém světle**, pak máme na mysli světlo složené z vlnění celého viditelného spektra (od červené po fialovou oblast. Na obrázku, viz. obr. 5a můžeme pozorovat bílé (složené) světlo rozložené například hranolem (disperze) na jednotlivé barvy odpovídající frekvencím pozorovatelným lidským okem.



obr. 5a



KO4.1.1-1. V astronomii se používá pro měření vzdáleností tzv. světelný rok y [m]. Je to dráha, kterou urazí světlo za jeden rok. *Jak je dlouhá?*

KO4.1.1-2. Fialové světlo má ve vzduchu vlnovou délku 400 nm, červené 700 nm. *Určete jejich frekvence.*

4.1.2 Šíření světla



1. Charakterizovat bílé světlo.
2. Umět popsat různá optická prostředí.
3. Vysvětlit pojmy absorpce, rozptyl a odraz světla.
4. Definovat pojem vlnoplocha, charakterizovat kulovou a rovinnou vlnoplochu.
5. Definovat světelný paprsek.
6. Vysvětlit Huygensův princip.



obr. 3a



Odhadovaný čas nutný ke studiu je 20 minut.



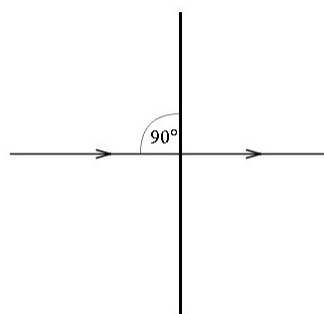
Mechanické vlnění, Huygensův princip



V kapitole 4.1.1 Světlo bylo zdůrazněno, že světlo je elektromagnetické vlnění. Bude se tedy světlo šířit látkou - prostředím jako každé jiné vlnění.

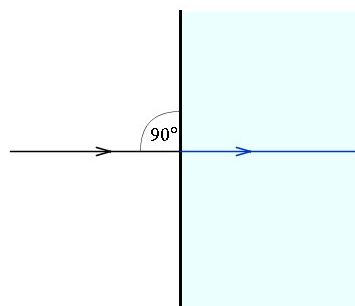
Světlo se šíří různými prostředím, které procházející světlo ovlivňují. Tato prostředí se nazývají **optická prostředí** a vykazují různé vlastnosti. Popíšeme si je na vlastnostech nejběžnějšího optického prostředí – skla:

- Čirým sklem světlo prochází beze změny. Viz. obr. 6



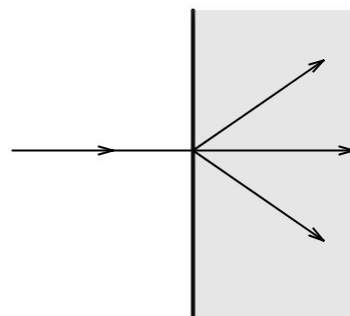
obr. 6

- Barevným sklem na které dopadá bílé světlo , projde světlo jen určitých vlnových délek. Zbývající vlnové délky prostředí pohltí – dochází k **absorpci světla**. Viz. obr. 7



obr. 7

- Matné sklo nahodile mění směr šíření světla. Jev označujeme jako **rozptyl světla**. Viz. obr. 8



obr. 8

- Zrcadlo odráží světlo, hovoříme o **odrazu světla**. Viz. obr. 9



obr. 9

Některá optická prostředí mají v celém svém objemu stejné optické vlastnosti. Tato prostředí se nazývají **prostředí opticky homogenní** (stejnorodá).

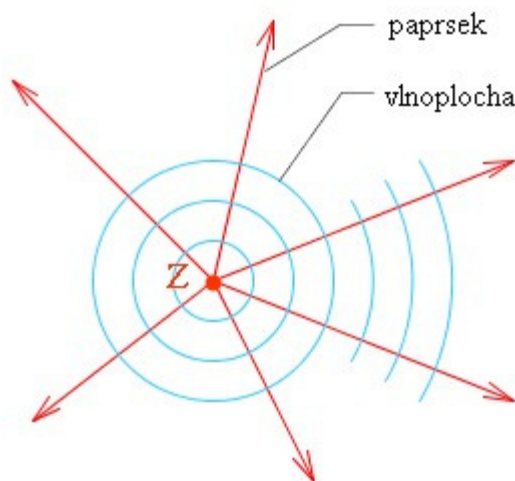
Jako **prostředí izotropní** označujeme taková optická prostředí, ve kterých se světlo šíří ve všech směrech stejnou rychlostí. V některých prostředích (například v jistých krystalech) se světlo šíří v různých směrech různou rychlostí – mluvíme o **anizotropním prostředí**.

Světlo jako vlnění se šíří ze zdroje všemi směry ve vlnoplochách.

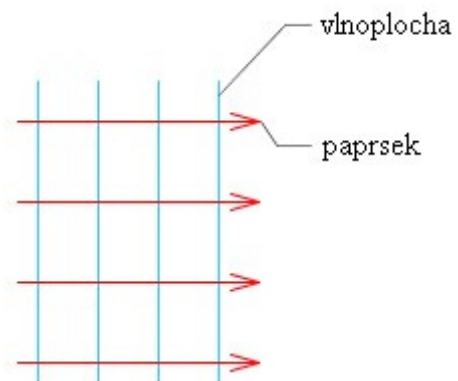
Vlnoplocha je množina všech bodů prostředí, do kterých se vlnění rozšíří za stejný čas.

V případě homogenního prostředí jsou vlnoplochy kulové plochy se středem ve zdroji. Podle **Huygensova principu** je každý bod této vlnoplochy zdrojem dalšího elementárního vlnění (viz animace). Příímka kolmá na vlnoplochu udává směr, kterým se vlnění šíří a nazývá se **světelný paprsek**.

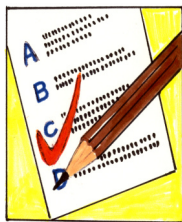
Nejčastějším tvarem vlnoplochy je kulová plocha. Kulové vlnoplochy se šíří z **bodového zdroje**, světelného zdroje Z malých rozměrů ve srovnání se vzdáleností, ve které jej pozorujeme. Kulová vlnoplocha se prakticky změní ve vlnoplochu rovinnou, jestliže světelný zdroj je ve velké vzdálenosti. Na obrázcích obr. 10 a 11 je vidět schematické znázornění rovinných řezů vlnoplochy kulovými a rovinnými.



obr. 10



obr. 11



KO4.1.2-3. Svazky slunečních paprsků dopadající na Zemi považujeme za rovnoběžné. *Proč?*

KO4.1.2-4. *K jakým jevům dochází při odrazu bílého světla na drsné sádrokartonové desce?*

4.1.3 Index lomu



1. Umět definovat index lomu.
2. Vědět, že index lomu optického prostředí závisí na vlnové délce procházejícího světla.



Odhadovaný čas nutný ke studiu je 10 minut.



V kapitole 4.1.1 Světlo bylo řečeno, že světlo se šíří v různých optických prostředích různou rychlostí. Nejrychleji se šíří světlo ve vakuu rychlostí c . V každém jiném optickém prostředí je rychlost šíření v menší.

Rychlost šíření světla v optickém prostředí je lépe vyjadřovat pomocí **indexu lomu n** . Je to bezrozměrná veličina definovaná jako poměr rychlosti světla ve vakuu c ku rychlosti světla v daném prostředí v :

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

Z definice vyplývá, že index lomu vakua je 1. Tuto hodnotu má přibližně i index lomu vzduchu. Index lomu všech ostatních optických prostředí je vždy větší než 1.

Indexy lomu některých látek najdete v následující tabulce

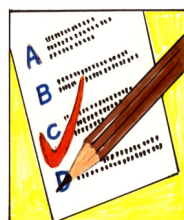
Tabulka indexů lomu některých látek

Látka	n	Látka	n
Index lomu pro $\lambda = 589,3 \text{ nm}$			
vzduch	1,000 3	plexisklo	1,55
voda (led)	1,31	jantar	1,56
voda (20 °C)	1,33	smaragd	1,58
aceton	1,36	optické korundové sklo	1,45 až 1,68
fluorid	1,43	optické flintové sklo	1,54 až 1,80
glycerin	1,47	vápenec	1,66
benzen	1,50	rubín	1,77
chlorid sodný	1,54	diamant	2,42

Pokud jste se podívali na tuto tabulku indexů lomů různých látek, jistě jste si všimli, že tyto indexy lomů platí pro vlnovou délku 589,3 nm.

Index lomu je totiž závislý na vlnové délce světla.

Proto například v tabulkách optických skel najdete indexy lomu pro různé vlnové délky. Více se o tomto jevu dovíte v pojednání o disperzi.



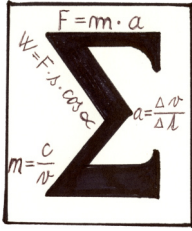
KO4.1.3-5. Index lomu určitého prostředí

- Je poměr rychlosti světla ve vakuu ku rychlosti světla v tomto prostředí.
- Je poměr rychlosti světla v tomto prostředí ku rychlosti světla ve vakuu.
- Udává, kolikrát pomaleji se šíří světlo v tomto prostředí než ve vakuu.

KO4.1.3-6. Jakou rychlostí se šíří světlo v prostředí, jehož index lomu je 1,5?

- $2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $0,5 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $1,5 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

KO4.1.3-7. Upravte definiční vztah pro index lomu tak, aby z něho byla zřejmá závislost na vlnové délce. Použijte dolních indexů.



- **Světlo je oblast elektromagnetického vlnění pozorovatelného lidským okem.** Zahrnuje vlnové délky v intervalu 390 až 790 nm.
- Ve vakuu se světlo šíří rychlostí $c = 300\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost světla v látce je vždy menší než c a závisí na druhu látky.
- Rychlost světla v souvisí s jeho frekvencí f a vlnovou délkou λ vztahem: $v = \lambda \cdot f$
- Šíří-li se světlo prostředími, může dojít k **absorpci** světla, jeho **rozptylu** a k **odrazu** světla.
- Optické prostředí homogenní má v celém svém objemu stejné optické vlastnosti.
- Světlo se šíří ze zdroje všemi směry **ve vlnoplochách**. Nejčastější jsou vlnoplochy kulové a rovinné.
- Přímka kolmá na vlnoplochu se nazývá **paprsek**. Paprsek určuje směr šíření světla.
- Poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v optickém prostředí se nazývá **index lomu**. Index lomu je definován vztahem $n = \frac{c}{v}$.
- Index lomu daného prostředí je závislý na vlnové délce světla.
- Index lomu vakua je 1. Všechna jiná prostředí mají index lomu větší než 1.

4.2 Geometrická optika

Paprsková, také **geometrická optika** je založena na přímočarém šíření světla v homogenním prostředí a principu nezávislosti chodu světelných paprsků. Geometrická optika zanedbává vlnovou povahu světla.

Hlavním cílem geometrické optiky je zobrazit předmět do formy obrazu.

Dříve než začnete studovat zobrazení ať už jednoduchými čočkami, nebo složitějšími optickými soustavami, důkladně se seznamte se **zákony odrazu a lomu**.

4.2.1 Odraz a lom světla



1. Znáť zákony lomu a odrazu, umět nakreslit odražený a lomený paprsek.
2. Rozlišovat případy lomu ke kolmici a od kolmice, vědět na čem závisí.
3. Vědět, kdy dochází k úplnému odrazu, umět vypočítat mezní úhel.
4. Vyjmenovat několik případů využití mezního úhlu.
5. Vysvětlit rozklad světla na optickém hranolu.



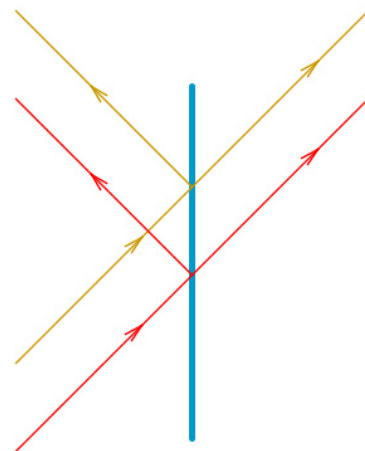
Odhadovaný studijní čas je 30 minut.



Index lomu



Dopadne-li světlo ze vzduchu na okenní tabuli, pak vidíme, že část světla se odrazí, část projde. Viz. obr. 12 .



Obr.12

Dopadá-li světelný paprsek na rozhraní dvou optických prostředí o různých indexech lomu, pak část světla se odrazí a část projde. Viz. obr. 13. Na rozhraní dochází k **odrazu** a **lomu**.

Světelný paprsek dopadá na rozhraní pod **úhlem dopadu** α . Úhly vždy **měříme od kolmice** dopadu k . Kolmice dopadu a dopadající paprsek leží v rovině, kterou nazýváme **rovinou dopadu**. A teď mohou nastat situace:

- Odražené světlo směřuje od rozhraní zpět pod **úhlem odrazu** α' . Pro úhel dopadu a úhel odrazu platí **zákon odrazu**:

Úhel odrazu je roven úhlu dopadu, tj. $\alpha = \alpha'$.

Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Jak je znázorněno na obr.13.

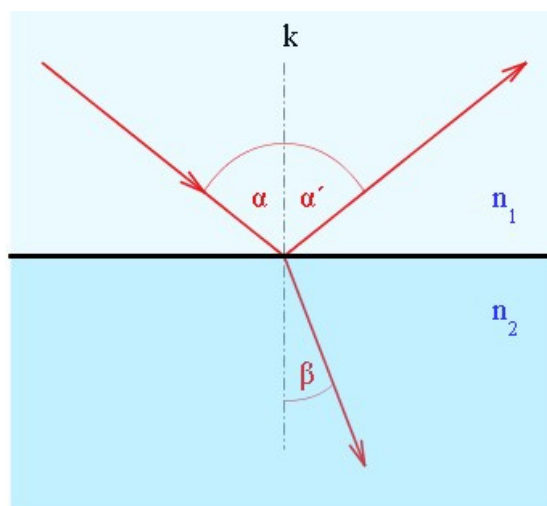
- Lomený paprsek přechází do druhého prostředí pod **úhlem lomu** β . Pro úhel dopadu a úhel lomu platí **zákon lomu světla** (Snellův zákon):

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta,$$

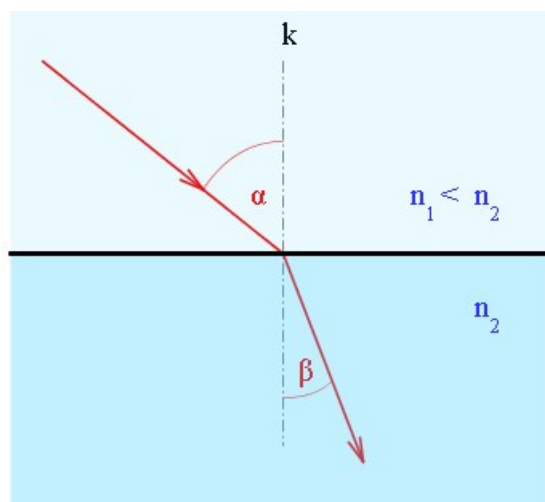
kde n_1, n_2 jsou indexy lomu prvního a druhého prostředí.

Při lomu světla mohou nastat dvě odlišné situace:

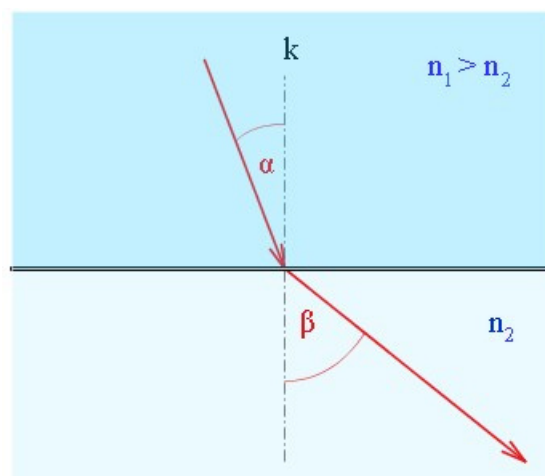
- Světlo se šíří z prostředí o menším indexu lomu n_1 do prostředí o větším indexu lomu $n_2 > n_1$. Říkáme, že se světlo šíří z prostředí **opticky řidšího** (např. vzduch) do **opticky hustšího** (např. sklo). Pak podle Snellova zákona je úhel lomu β menší než úhel dopadu α . Nastal **lom ke kolmici**, viz. obr. 14.
- Světlo se šíří z prostředí o větším indexu lomu n_1 do prostředí o menším indexu lomu $n_2 < n_1$. Pak se světlo šíří z prostředí opticky hustšího (např. sklo) do opticky řidšího (např. vzduch). Podle Snellova zákona je úhel lomu β větší než úhel dopadu α . Nastal **lom od kolmice**. Viz. obr. 15



obr. 13



obr. 14

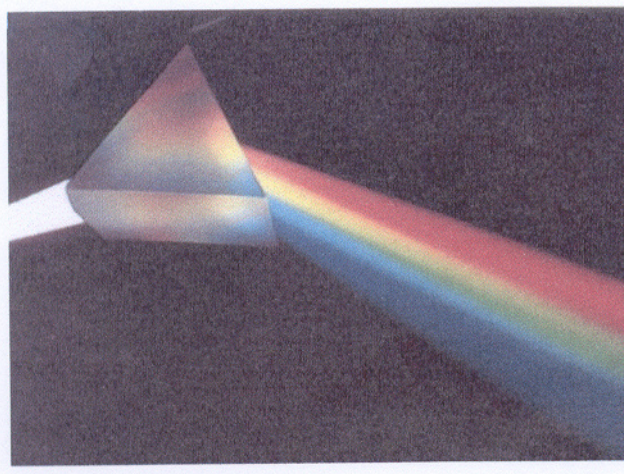


obr. 15

Vraťme se ještě k obr.15 a sledujme chování lomeného paprsku. Jestliže postupně zvětšujeme úhel dopadu α , nastane nakonec situace, kdy lomený paprsek β se šíří těsně podél povrchu. Úhel lomu β je 90° , příslušný úhel dopadu nazýváme **mezním úhlem α_m** (Brewsterovým úhlem). Všechny paprsky dopadající na prostředí opticky hustší pod úhlem větším než je mezní úhel se odrážejí. Dochází k **úplnému odrazu**.

Na principu mezního úhlu je založena vláknová optika.

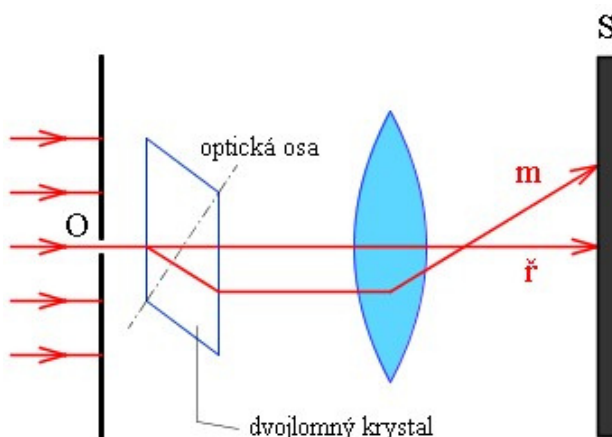
S lomem světla souvisí i jev zvaný **disperze** (rozklad) **světla**. Bílé světlo se při lomu totiž rozkládá na barevné složky s různými vlnovými délkami. To je dáno tím, že **index lomu prostředí je různý pro různé vlnové délky**. A pokud je různý index lomu je různý i úhel lomu. Na obrázku je znázorněn lom na dvou rozhraních tvořících optický hranol. Vidíme, světlo modré se láme více než světlo červené, viz. obr. 5a.



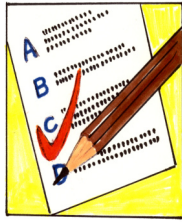
obr. 5a

U některých přírodních krystalů, ale i uměle vyrobených látek dochází k jevu, který se nazývá **dvojlom**. Při dvojlomu se lomený paprsek rozdělí na dva, označované jako paprsek řádný a paprsek mimořádný. Pro oba paprsky má krystal různý index lomu a oba jsou lineárně polarizovány v navzájem kolmých směrech, viz. obr. 17.

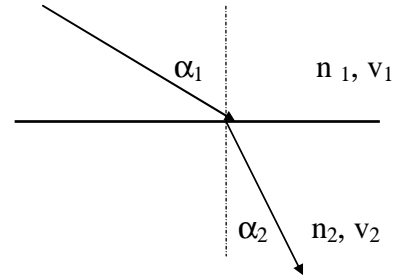
obr. 17



ř = řádný paprsek
 m = mimořádný paprsek
 S = promítací stěna (stínítko)
 O = kruhový otvor ve cloně



KO4.2.1-1. Prohlédněte si obrázek. v_1 , v_2 jsou rychlosti světla v jednotlivých prostředích o indexech lomu n_1 , n_2 . Který z uvedených vztahů představuje Snellův zákon lomu?



a) $n_1/n_2 = \sin \alpha_2 / \sin \alpha_1$

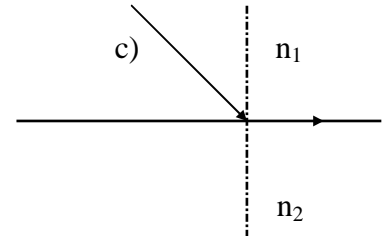
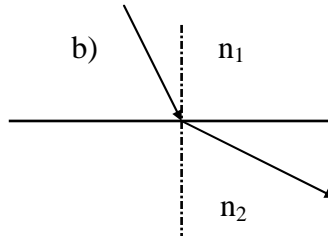
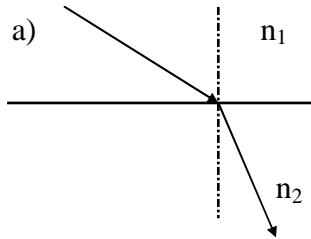
b) $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$

c) $n_1 / n_2 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2$

d) $v_1 / v_2 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2$

e) $v_1 / v_2 = \sin \alpha_2 / \sin \alpha_1$

KO4.2.1-2. Na kterém obrázku odpovídá chod paprsků podmínce $n_1 > n_2$?



KO4.2.1-3. Světlo dopadá z prostředí o indexu lomu n na rozhraní s prostředím o indexu lomu n' . Má-li dojít k úplnému odrazu, potom

a) $n > n'$

b) $n < n'$

c) na velikosti indexů lomu nezáleží

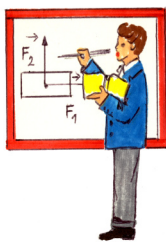
KO4.2.1-4. Dopadá-li světlo na optické rozhraní pod mezním úhlem, je úhel lomu roven

a) meznímu úhlu

b) 90°

c) 0°

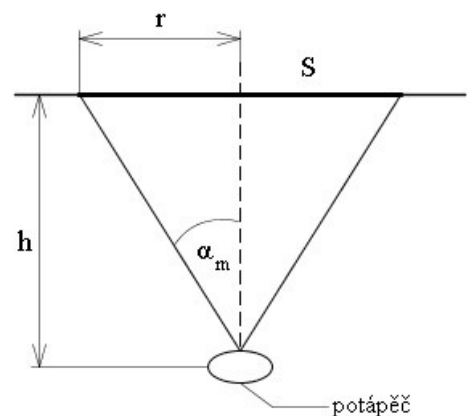
d) jinak.



Jak velká plocha vodní hladiny je průhledná pro potápěče z hloubky $h = 3$ m? Index lomu vody je 1,33.

Pozorování potápěče bude omezeno mezním úhlem. Potápěč bude schopen vidět z hloubky jen přes plochu vymezenou kuželem s vrcholovým úhlem $2\alpha_m$. Viz. obr. 70.

obr. 70



Pro výpočet mezního úhlu α_m vyjdeme ze zákona lomu: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$. V našem případě tento zákon bude vypadat následovně:

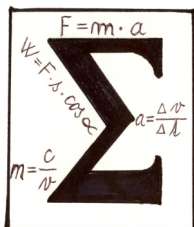
$$1 \cdot \sin \alpha_m = 1,33 \cdot 1. \rightarrow \alpha_m = 49^\circ.$$

Poloměr základny kužele r bude dán vztahem: $\operatorname{tg} \alpha_m = r/h \rightarrow r = 3,45\text{m}$.

Plochou průhlednou pro potápěče bude plocha kruhu o poloměru 3,45m.



U4.2.1-5. Pod jakým úhlem se láme na rozhraní dvou prostředí světelný paprsek, který dopadá na rozhraní kolmo?

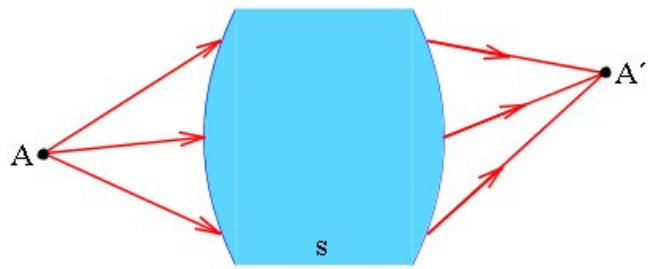


- Na rozhraní dvou optických prostředí s různými indexy lomu nastává odraz a lom světla.
- Úhel odrazu α' se rovná úhlu dopadu α – **zákon odrazu: $\alpha = \alpha'$** . Odražený paprsek leží v rovině dopadu.
- Pro lom světla na rozhraní dvou prostředí o indexech lomu n_1, n_2 platí **zákon lomu: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$** .
- Při lomu z prostředí opticky řidšího n_1 do prostředí opticky hustšího $n_2 > n_1$ se láme paprsek ke kolmici ($\beta < \alpha$).
- Při lomu z prostředí opticky hustšího n_1 do prostředí opticky řidšího $n_2 < n_1$ se láme paprsek od kolmice ($\beta > \alpha$).
- Při lomu z prostředí opticky hustšího n_1 do prostředí opticky řidšího $n_2 < n_1$ může dojít k **úplnému odrazu**. Úplný odraz nastává tehdy, je-li úhel dopadu α větší než **mezní úhel** α_m ($\alpha > \alpha_m$). Meznímu úhlu odpovídá úhel lomu $\beta = 90^\circ$ a je dán vztahem $\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$.
- Index lomu je různý pro různé vlnové délky. Dopadá-li bílé světlo (složené z vlnění různých vlnových délek) na rozhraní, pak se po lomu rozkládá na jednotlivé barevné složky – dochází k **disperzi světla**.

4.2.2 Optické zobrazení

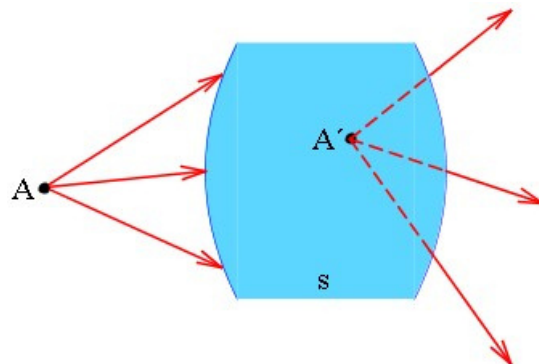
Optickými soustavami (zrcadlo, čočka, brýle, fotoaparát atp.) tvoříme obrazy předmětů. V podstatě neděláme nic jiného, než těmito soustavami měníme směr chodu paprsků.

V případě, že paprsky po výstupu z optické soustavy S tvoří sbíhavý svazek, vznikne v jejich průsečíku **obraz skutečný** (reálný). Tímto bodem skutečně procházejí paprsky, skutečně jím prochází světelná energie. Takovýto obraz můžeme pozorovat na promítací stěně, na papíře, neboli na tzv. stínítku. Například oko vidí obraz A' **předmětu** A , viz. obr. 18



obr. 18

Naopak když paprsky po výstupu z optické soustavy S tvoří rozbíhavý svazek, vznikne v jejich zdánlivém průsečíku **obraz neskutečný** (virtuální). Takovýto obraz nezachytíme na promítací stěnu, na papír atd. Samozřejmě pokud tento zdánlivý obraz dále zobrazíme jinou optickou soustavou (např. čočkou oka), lze jej pozorovat. Tedy například oko vidí obraz A' **předmětu** A , viz. obr. 19.



obr. 19

4.2.2.1 Zobrazení zrcadlem

Zobrazení zrcadly je založeno na odrazu paprsků na rozhraní dvou materiálů. Dělicí plocha bývá buď přirozeně lesklá (povrch skla), vyleštěná (drahokamy ve špercích, vyleštěné kovové povrchy), nebo opatřená odraznou vrstvou (pokovená).



1. Umět vysvětlit základní pojmy používané při zobrazení zrcadly, tj. poloměr r a střed křivosti S , ohnisko F a ohnisková vzdálenost f , předmětová a a obrazová vzdálenost a' , velikost předmětu y a obrazu y' a optická osa o .
2. Rozlišit duté a vypuklé zrcadlo, charakterizovat jejich odlišné vlastnosti.
3. Umět zkonstruovat obraz vytvořený rovinným, vypuklým a dutým zrcadlem pomocí tří význačných paprsků.
4. Znat a umět použít zobrazovací rovnici zrcadla a vztah pro příčné zvětšení obrazu.
5. Diskutovat vlastnosti obrazu v závislosti na jeho poloze vůči zrcadlu.



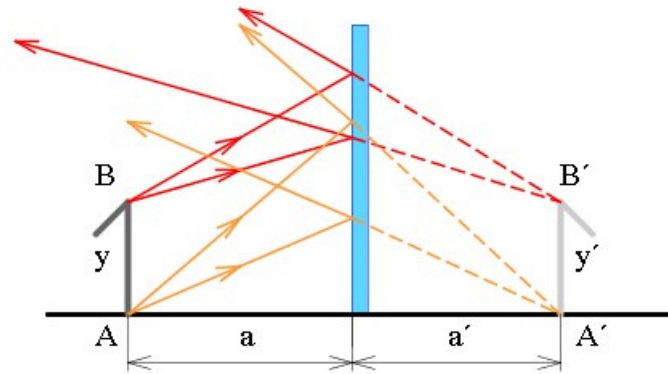
Odhadovaný studijní čas je 60 minut.



Zákon odrazu.



Nejjednodušší zobrazovací soustavou je **rovinné zrcadlo**. Chod paprsků vidíme na obrázku, viz. obr. 20. Paprsky například z horního (B) a dolního bodu (A) předmětu se odrážejí na zrcadle podle zákona odrazu. Pak vstupují do našeho oka a nám se zdá, jako by vycházely z obrazu za zrcadlem (B' , A'). To je typický příklad zdánlivého obrazu. Je stejně velký jako předmět, vzpřímený, ale stranově převrácený.



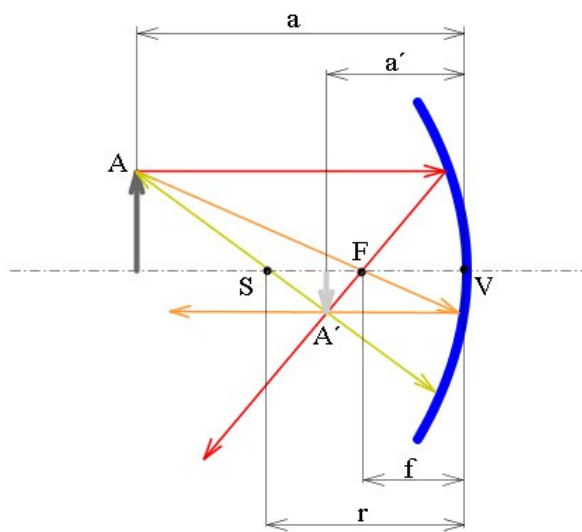
obr. 20

U **kulového zrcadla** je odrážející plocha část plochy kulové. Střed této kulové plochy se označuje jako **střed křivosti S** zrcadla a jeho spojnice s vrcholem je **optická osa** zrcadla o . Dopadají-li světelné paprsky dovnitř kulové plochy, hovoříme o **dutém** zrcadle, v opačném případě se jedná o zrcadlo **vypuklé**.

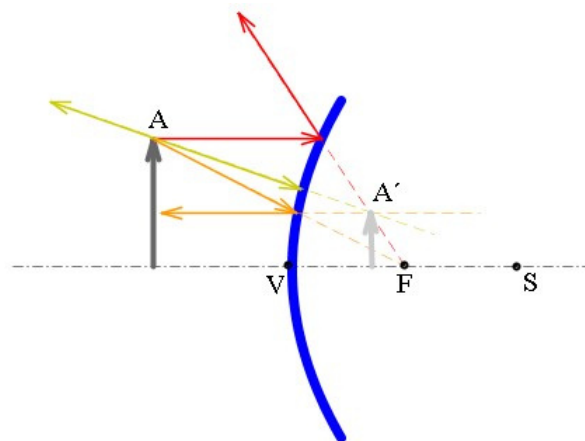
Zobrazení kulovým zrcadlem již není tak jednoduché jako u zrcadla rovinného. Nejjednodušší je si zobrazit předmět pomocí tří **význačných paprsků**. Jedná se o:

1. Paprsek směřující rovnoběžně s optickou osou, který se odráží do **ohniska F**. červený
2. Paprsek procházející ohniskem se odráží rovnoběžně s optickou osou. oranžový
3. Paprsek procházející středem kulové plochy S se po odrazu vrací do středu křivosti. žlutý

Použijeme-li těchto tří paprsků, můžeme zobrazit třeba vrchol předmětu A a dostaneme vrchol obrazu A' . Příklad použití těchto paprsků u zobrazení dutým a vypuklým zrcadlem je na obrázcích. Viz. obr. 22 a 21.



obr. 22



obr. 21

Je nutné definovat ještě jednu význačnou veličinu charakterizující zrcadlo – ohniskovou vzdálenost. **Ohnisková vzdálenost f** zrcadla je vzdálenost ohniska F od vrcholu zrcadla V.

Ohnisková vzdálenost zrcadla je rovna polovině poloměru křivosti zrcadla $f = \frac{r}{2}$.

Polohu obrazu z polohy předmětu můžeme vypočítat ze **zobrazovací rovnice kulového zrcadla**:

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

Při výpočtu polohy předmětu vám může vyjít poloha obrazu a' kladná – obraz bude skutečný. Vyjde-li a' záporné, pak obraz bude neskutečný.

O znaménkách veličin a , a' , f rozhoduje **znaménková konvence**:

Veličiny a , a' , f mají v prostoru před zrcadlem kladnou hodnotu, za zrcadlem zápornou hodnotu.

Důležité je také vědět zda obraz bude zvětšený, nebo zmenšený, přímý, nebo převrácený. To nám určí bezrozměrná veličina **příčné zvětšení Z** definovaná jako poměr velikosti obrazu y' a předmětu y .

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

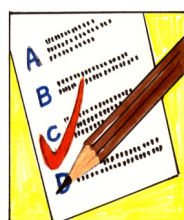
Bude-li zvětšení kladné, je obraz vzpřímený. Je-li zvětšení záporné, je obraz převrácený. V případě, že zvětšení bude menší než jedna, bude obraz zmenšený.

Jaký bude obraz záleží na tom, zda budete zobrazovat dutým, nebo vypuklým zrcadlem a kam umístíte předmět.



U4.2.2.1-6. Pro procvičení zobrazení zrcadlem si vyplňte následující tabulku, Nakreslete si chod paprsků v jednotlivých případech a vyplňte volné dva sloupce. Jako vzoru použijte řádek týkající se vypuklého zrcadla.

Duté zrcadlo		
Poloha předmětu a	Poloha obrazu a'	Obraz bude:
$a \gg 2f$		
$a = 2f$		
$2f \gg a \gg f$		
$a \ll f$		
Vypuklé zrcadlo		
$\infty \gg a \gg 0$	$f \ll a' \ll 0$	Neskutečný, vzpřímený, zmenšený

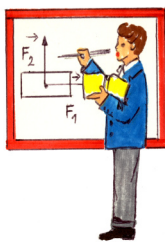


KO4.2.2.1-7. Kde se zobrazí předmět, umístěný ve středu křivosti dutého zrcadla?

- a) do středu křivosti b) do ohniska
c) do nekonečna d) nelze určit.

KO4.2.2.1-8. Kde se zobrazí předmět, umístěný do ohniska dutého zrcadla?

- a) do středu křivosti b) do ohniska
c) do nekonečna d) nelze určit.



V jaké vzdálenosti od tváře je třeba držet duté zrcadlo s ohniskovou vzdáleností 50 cm, aby obraz tváře byl pětinašobně zvětšený?

Označíme si ohniskovou vzdálenost $f = 0,5$ m, zvětšení $Z = 5$ a hledaná vzdálenost je a .

Vyjdeme ze vztahu pro příčné zvětšení a ze zobrazovací rovnice zrcadla. Vyloučíme polohu obrazu a' tak, že ji vyjádříme ze zobrazovací rovnice zrcadla:

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a} \Rightarrow \frac{1}{a'} = \frac{a-f}{fa} \Rightarrow a' = \frac{fa}{a-f}$$

a dosadíme do rovnice pro zvětšení:

$$Z = -\frac{f}{a-f},$$

Z této rovnice vyjádříme hledanou vzdálenost a , pak dosadíme konkrétní hodnoty:

$$a = \frac{f(Z-1)}{Z} = \frac{0,5(5-1)}{5} = \underline{0,4 \text{ m.}}$$

Duté kulové zrcadlo je třeba umístit 0,4 m od tváře.



U4.2.2.1-9. Poloměr dutého zrcadla je 20 cm. Ve vzdálenosti 30 cm od zrcadla je umístěn předmět velikosti 1 cm. Najděte, kde vznikne obraz a jaký bude? Výpočet si ověřte grafickým řešením.

U4.2.2.1-10. Vypuklé zrcadlo má poloměr 60 cm. 10 cm před zrcadlem je předmět velikosti 2 cm. Určete, kde vznikne předmět a jaký bude?

U4.2.2.1-11. Duté zrcadlo má poloměr křivosti 40 cm. Do jaké vzdálenosti musíme postavit předmět, abychom dostali reálný, převrácený obraz poloviční velikosti? Kde obraz vznikne?

4.2.2.2 Zobrazení čočkou

Zobrazení čočkou, na rozdíl od zobrazení zrcadlem, je založeno na Snellově zákonu lomu. Při vyšetřování průchodu světla čočkou musíme však použít tento zákon dvakrát. Světelný paprsek prochází nejdříve prvním rozhraním, na kterém se láme do materiálu čočky. Při výstupu z čočky se pak láme na druhém rozhraní.



1. Umět vysvětlit základní pojmy používané při zobrazení čočkou, tj. poloměry r_1 , r_2 a střed křivosti S , předměťové a obrazové ohnisko F , F' a ohnisková vzdálenost f , předmětová a a obrazová vzdálenost a' , velikost předmětu y a obrazu y' a optická osa o .
2. Rozlišit spojnou a rozptylnou čočku, umět je charakterizovat.
3. Zkonstruovat obraz vytvořený spojnou a rozptylnou čočkou pomocí tří význačných paprsků.
4. Znat a umět použít zobrazovací rovnici tenké čočky a vztah pro zvětšení obrazu.
5. Diskutovat vlastnosti obrazu v závislosti na jeho poloze vůči čočce.



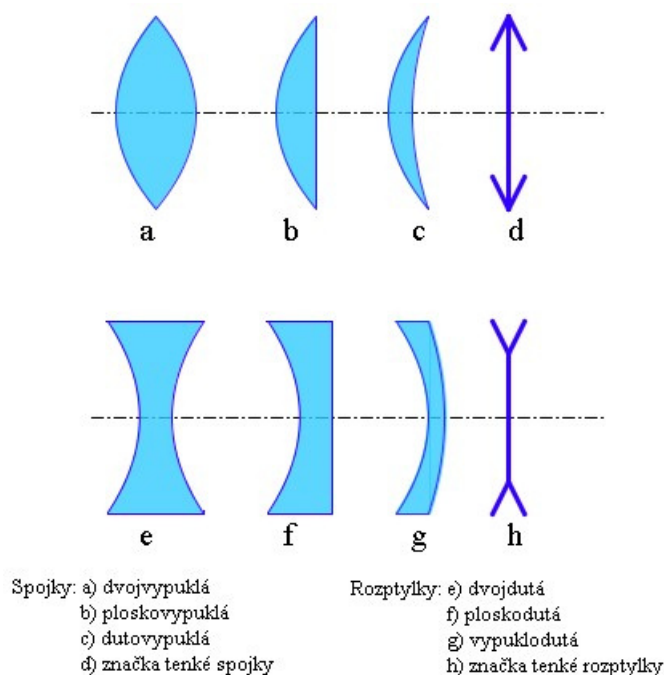
Odhadovaný studijní čas je 60 minut.



Index lomu, zákon lomu.



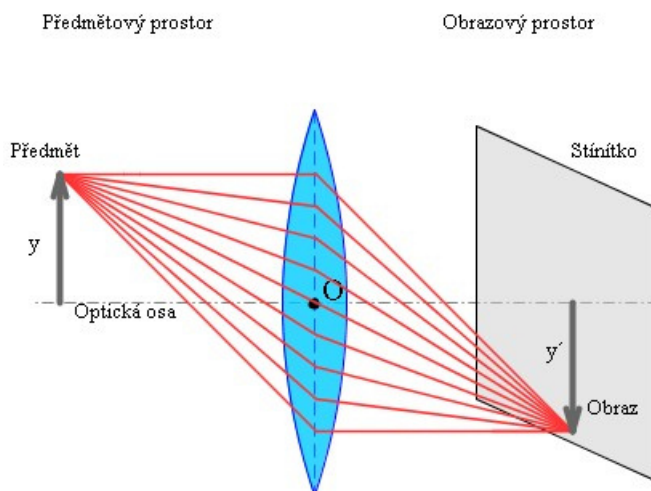
Čočkou rozumíme optické prostředí o určitém indexu lomu n ohraničené dvěma lámavými plochami poloměrů r_1 a r_2 . Tyto lámavé plochy jsou buď kulového, nebo rovinného tvaru ($r \rightarrow \infty$). Podle uspořádání ploch rozlišujeme **spojné čočky**, krátce **spojky** a **rozptylné čočky**, zkráceně **rozptylky**. Viz. obr. 24



obr. 24

Pro zjednodušení výpočtů se zavádí pojem **tenká čočka**. Je to čočka, u které zanedbáváme její tloušťku. Toto zjednodušení dostačuje při zkoumání zobrazení ve většině případů.

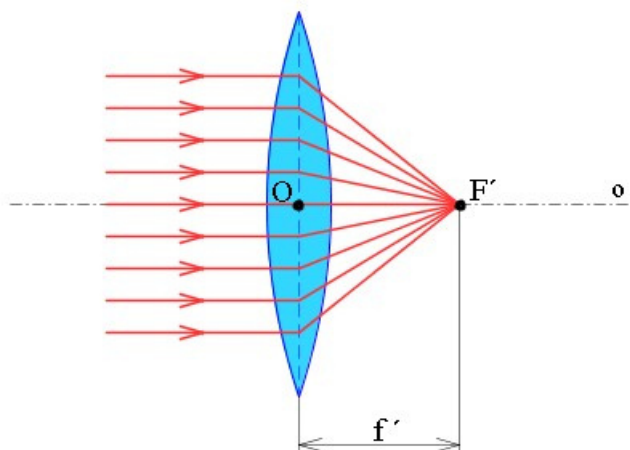
Podobně jako u zrcadla je důležitá **optická osa** o , která prochází optickým středem čočky O . Prostor před čočkou, ze kterého dopadá světlo na čočku, a ve kterém umísťujeme předmět velikosti y označujeme jako **předmětový prostor**. Prostor, do kterého světlo po průchodu čočkou vstupuje, se nazývá **obrazový prostor**, viz. obr. 25.



obr. 25

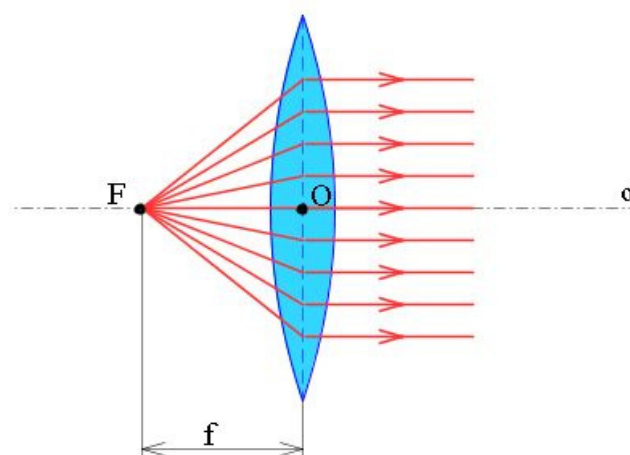
Také u čoček používáme pojem **ohnisko** F . Zde však musíme rozlišovat dvě ohniska.

- **Obrazové ohnisko F'** je bod na optické ose, do kterého se po průchodu čočkou lámou paprsky dopadající na čočku rovnoběžně s optickou osou. Vzdálenost obrazového ohniska od optického středu čočky je **obrazová ohnisková vzdálenost f'** , viz. obr. 26.



obr. 26

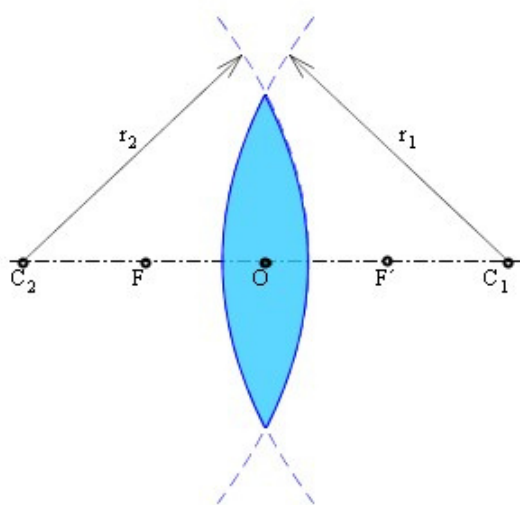
- **Předmětové ohnisko F** opět leží na optické ose. Paprsky, které jím procházejí se po lomu čočkou šíří rovnoběžně s optickou osou. Vzdálenost předmětového ohniska od optického středu čočky je pak **předmětová ohnisková vzdálenost f** , viz. obr. 27.



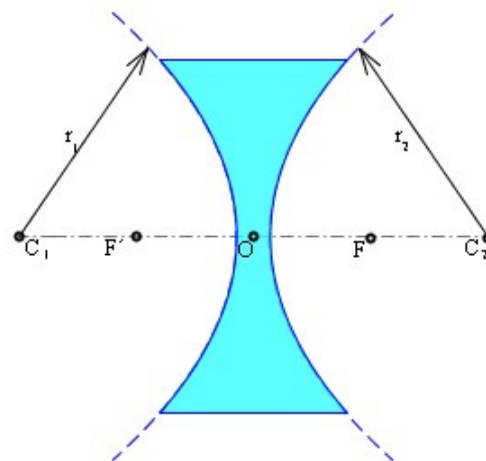
obr. 27

Předmětová a obrazová ohnisková vzdálenost u tenké čočky umístěné ve vzduchu jsou stejně veliké $f = f'$. Ohniskovou vzdálenost tenké čočky pak označujeme jednoduše f . Lze ji vypočítat při znalosti poloměrů obou lámavých ploch a indexu lomu čočky. Označíme si poloměry křivosti podle obrázku. n_1 je index lomu prostředí ve kterém je čočka a n_2 index lomu skla čočky. Převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti je dána vztahem:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \text{ viz. obr. 28 a obr. 29}$$



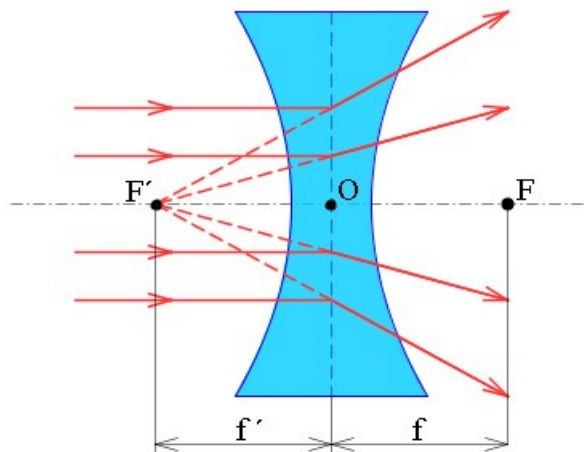
obr. 28



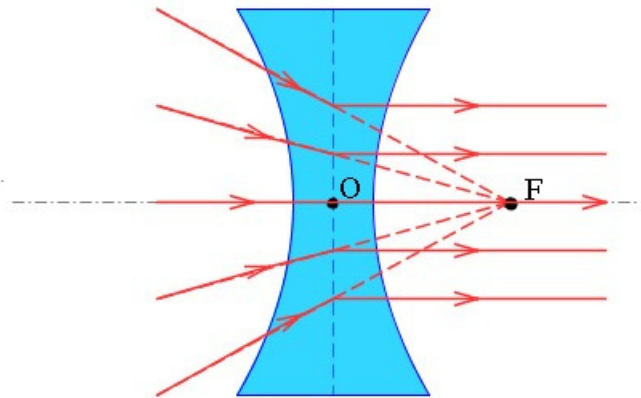
obr. 29

Zavedeme znaménkovou konvenci: Optické plochy vypuklé (vzhledem k okolnímu prostředí) mají poloměr křivosti kladný – spojka. Optické plochy duté (vzhledem k okolnímu prostředí) mají poloměr křivosti záporný – rozptylka. Pak pro výpočet dostaneme pro ohniskovou vzdálenost spojky kladné číslo $f > 0$, pro ohniskovou vzdálenost rozptylky záporné číslo $f < 0$.

Pomocí ohniskové vzdálenosti můžeme také rozlišovat spojky a rozptylky. Spojky mají $f > 0$ a obrazové ohnisko F' leží v obrazovém prostoru. A u rozptylek je $f < 0$ a obrazové ohnisko F' je v předmětovém prostoru, viz. obr. 30a a 30b.



obr. 30a

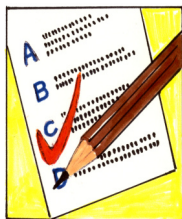


obr. 30b

V praxi se často používá pojem **optická mohutnost čočky** φ . Ta je definována jako převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti:

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

Jestliže je jednotkou ohniskové vzdálenosti 1m, pak optická mohutnost má jednotku m^{-1} . Často se tato jednotka označuje jako **dioptrie** – symbol D (oční optika). Pro spojky je $\varphi > 0$, pro rozptylky $\varphi < 0$.



KO4.2.2.2-12. Jak si přibližně můžete změřit ohniskovou vzdálenost spojky?

KO4.2.2.2-13. Jak jednoduše rozlišíme spojku od rozptylky?

KO4.2.2.2-14. Jaká je ohnisková vzdálenost brýlových skel s označením – 4 D ?



Hlavní použití čočky je zobrazování. Velikost a polohu obrazu y' předmětu y můžeme zase najít buď pomocí význačných paprsků a nebo vypočítat užitím zobrazovací rovnice.

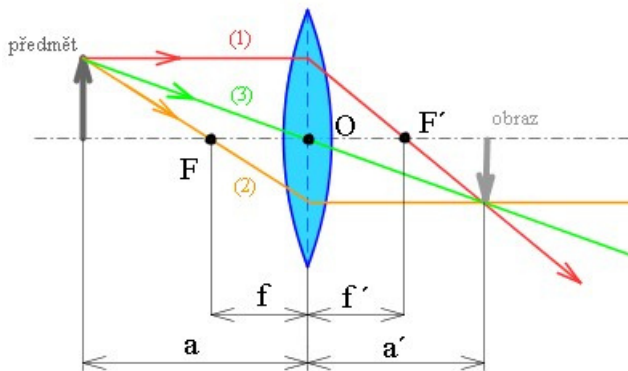
Obdobně jako u zobrazení zrcadlem si definujeme tři **význačné paprsky**:

1. Paprsek rovnoběžný s optickou osou (červený) se láme do obrazového ohniska F' .

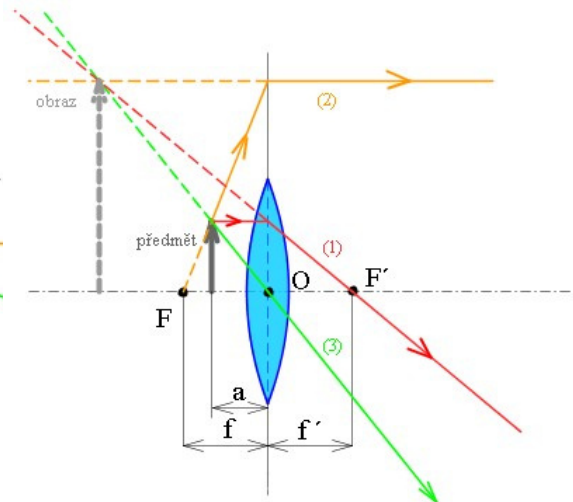
2. Paprsek procházející předmětovým ohniskem F (žlutý) je po lomu rovnoběžný s optickou osou.

3. Paprsek procházející optickým středem čočky O (zelený) se neláme.

Pomocí význačných paprsků můžeme provést **geometrickou konstrukci** obrazu. Na obrázcích vidíte zobrazení tenkou spojnou čočkou při dvou různých polohách předmětu. Viz. obr. 33 a obr. 34.



obr. 33



obr. 34



U4.2.2.2-15. Na procvičení zobrazení čočkami si vyplňte následující tabulku podle vzoru uvedeného u rozptylky. Nakreslete si všechny situace a použijte geometrickou konstrukci obrazu.

spojka		
Poloha předmětu a	Poloha obrazu a'	Obraz bude:
$a > 2f$		
$a = 2f$		
$2f > a > f$		
$a < f$		
rozptylka		
$\infty > a > 0$	$f < a' < 0$	Neskutečný, vzpřímený, zmenšený



Pro výpočet polohy obrazu a' ze známé polohy předmětu a a ohniskové vzdálenosti f používáme **zobrazovací rovnici tenké čočky**:

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

Ve vztahu je použita následující **znaménková konvence**:

- Vzdálenost předmětu a je kladná před čočkou (v předmětovém prostoru) a záporná za čočkou (v obrazovém prostoru).
- Vzdálenost obrazu a' je kladná za čočkou (v obrazovém prostoru). Obraz předmětu je v tomto případě skutečný.
- Vzdálenost obrazu a' je záporná před čočkou (v předmětovém prostoru). Obraz předmětu je v tomto případě neskutečný.

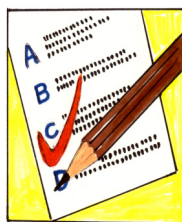
Pro určení zvětšení platí stejný vztah jako pro zobrazení zrcadlem:

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

Vztah pro zvětšení čočky lze napsat též pomocí ohniskové vzdálenosti. Dosadíme-li do rovnice pro zvětšení za a' , případně za a ze zobrazovací rovnice, dostaneme

$$\text{vztah: } Z = -\frac{a'-f}{f} = -\frac{f}{a-f}$$

Opět jako u zrcadla platí, že je-li $Z > 0$, pak je obraz vzpřímený a pro $Z < 0$ hovoříme o převráceném obrazu.



KO4.2.2.2-16. Víte, že předmět je umístěn 0,6 m před čočkou a zobrazí se do vzdálenosti 0,2 m za čočkou. *Do zobrazovací rovnice budete dosazovat takto:*

a) $a = 0,6 \text{ m}, \quad a' = 0,2 \text{ m}$

b) $a = -0,6 \text{ m}, \quad a' = -0,2 \text{ m}$

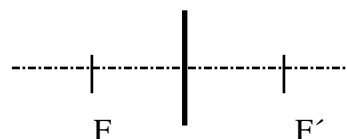
c) $a = 0,6 \text{ m}, \quad a' = -0,2 \text{ m}$

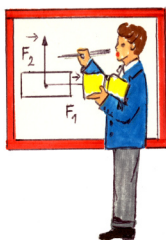
d) $a = -0,6 \text{ m}, \quad a' = 0,2 \text{ m}$

KO4.2.2.2-17. Obrázek představuje polohu ohnisek *u čočky*

- a) spojné b) rozptylné c) nelze určit.

KO4.2.2.2-18. *Jak musíte umístit dvě stejné spojné čočky, aby dopadající rovnoběžné paprsky z této optické sestavy vystupovaly opět jako rovnoběžné?*





Tenká čočka zobrazí předmět vzdálený 0,75 m od čočky do vzdálenosti 0,35 za ní. *Vypočtete ohniskovou vzdálenost čočky.*

Jedná se o klasický případ použití čočkové rovnice – zobrazovací rovnice tenké čočky $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$.

V souladu se znaménkovou konvencí jsou vzdálenosti předmětu a a vzdálenost obrazu a' kladné. Z textu vyplývá, že se jedná o spojnou čočku. Dosadíme tedy do zobrazovací rovnice:

$$\frac{1}{0,75} + \frac{1}{0,35} = \frac{1}{f} \quad \text{a z ní vypočítáme ohniskovou vzdálenost. } f = 0,24\text{m.}$$



U4.2.2.2-19. Tenká čočka má poloměry křivosti $r_1 = 0,1\text{m}$, $r_2 = 0,1\text{m}$. *Určete její ohniskovou vzdálenost, je-li zhotovena ze skla o indexu lomu $n = 1,518$.*

U4.2.2.2-20. Z letadla je třeba dělat snímky z výšky 3000 m v měřítku 1 : 5000. *Jakou je třeba volit ohniskovou vzdálenost kamery?*

U4.2.2.2-21. Předmět je umístěn 8 cm před rozptylkou ohniskové vzdálenosti 24 cm. *Určete polohu obrazu a zvětšení.*

4.2.2.3 Oko



1. Znat funkci oční čočky a sítnice.
2. Rozlišit normální, krátkozraké a dalekozraké oko.
3. Definovat konvenční zřakovou vzdálenost, blízký a daleký bod oka.
3. Vědět jak korigovat brýlemi neschopnost oka akomodovat.



Odhadovaný studijní čas je 20 minut.

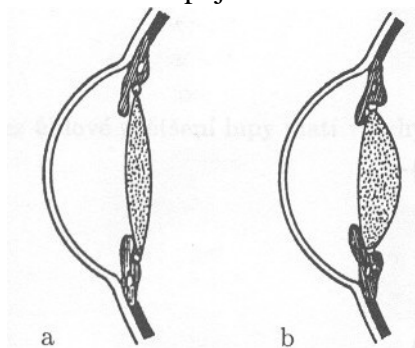


Index lomu, zákon lomu, zobrazení čočkou.



Lidské oko je vlastně optická soustava tvořená spojnou čočkou - **oční čočkou**, která vytváří obraz předmětů na **sítnici**. Obraz je zmenšený, převrácený a skutečný. Čočka je ovládána očními svaly,

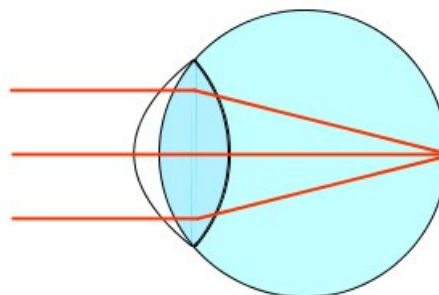
které mění její poloměry křivosti a tím její ohniskovou vzdálenost (optickou mohutnost). Říkáme, že oko **akomoduje**. Na obrázku, viz. obr. 35) je oko akomodováno do dálky, na obrázku b) pak na blízko. Tím se docílí toho, že na sítnici, která je v neměnné vzdálenosti od oka, vzniká vždy ostrý obraz předmětu.



obr. 35

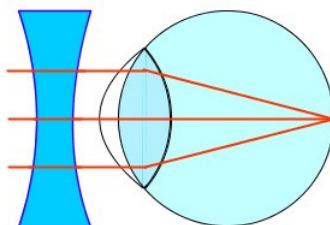
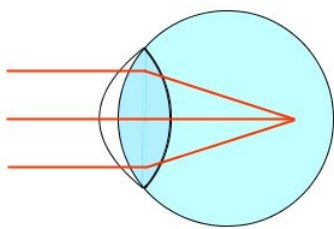
Sítnice je velice citlivý orgán, její citlivost je asi 10 000 krát větší než citlivost běžné fotografické emulze či čipu digitální kamery. V sítnici jsou dva druhy registrátorů - buněk. Na světlo jsou citlivé **tyčinky**, pomocí **čípků** pak rozeznáváme barvy. Informace získané z těchto buněk zpracovává náš „computer“ – mozek do formy obrazu.

Oční svaly normálního oka jsou nejméně namáhány, když pozorovaný předmět je ve vzdálenosti přibližně čtvrt metru. Vzdálenost 25 cm se proto označuje jako **konvenční zraková vzdálenost d** . **Normální oko** může akomodovat – zaostřovat na předměty ve vzdálenosti od nekonečna (**daleký bod** - nejvzdálenější bod od oka, který vidíme ještě ostře) až asi 15 cm od oka (**blízký bod** - nejbližší bod od oka, který vidíme ještě ostře). V tomto rozsahu se ostrý obraz vytváří na sítnici, viz. obr. 36.



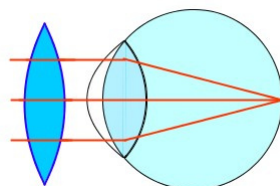
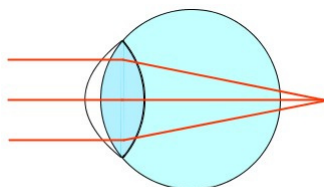
obr. 36

S přibývajícím věkem, nebo při vadách oka se snižuje schopnost oka akomodovat. U **krátkozrakého oka** vytváří se obraz **před** sítnicí. Tato vada se koriguje brýlemi – rozptylkami jak je vidět z obrázku, viz. obr. 37.



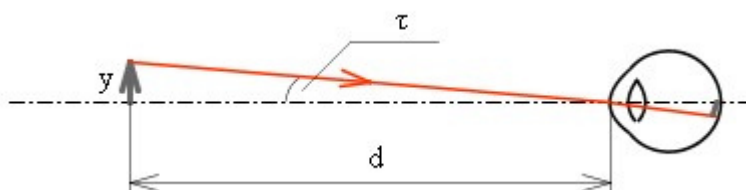
obr. 37

U **dalekozrakého oka** se naopak vytváří obraz **za** sítnicí a tuto vadu opravujeme použitím brýlí se spojnou čočkou. Viz. obr. 38.

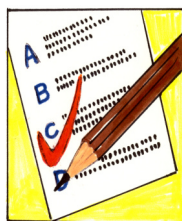


obr. 38

Důležitou vlastností oka je jeho **rozlišovací schopnost**. Oko je schopno rozlišit dva body, jestliže je vidí pod **zorným úhlem** τ větším než jedna úhlová minuta. Viz. obr. 39.



obr. 39



KO4.2.2.3-22. Při kempování si chceme zapálit oheň, ale bez sirek - pomocí brýlí a slunečních paprsků. Půjčíme si je *od krátkozrakého, nebo dalekozrakého člověka?*

KO4.2.2.3-23. V noci nám svítící reflektory vzdáleného auta splývají do jednoho bodu. *Při jaké vzdálenosti automobilu budeme schopni oba reflektory rozlišit?* Osy reflektorů jsou ve vzdálenosti 1m.

4.2.2.4 Lupa



1. Nakreslit chod paprsků při zobrazení lupou.
2. Definovat úhlové zvětšení.
3. Znat přibližný vztah pro zvětšení lupy.



Odhadovaný studijní čas je 20 minut.

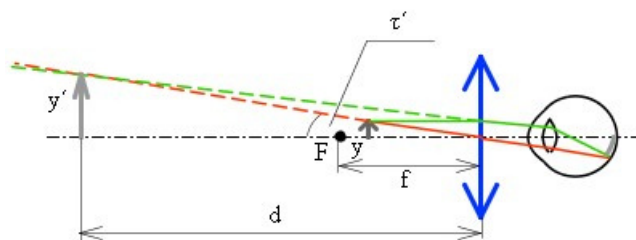
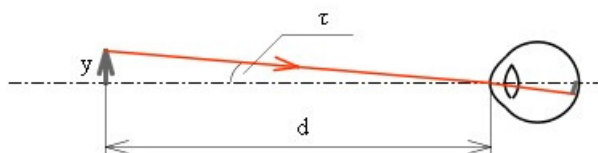


Zobrazení čočkou.



Lupa je každá spojná čočka (soustava čoček), s **ohniskovou vzdáleností menší než je konvenční zraková vzdálenost** ($d = 25$ cm). Využíváme ji k pozorování malých, blízkých předmětů.

Lupu dáváme těsně před oko a pozorovaný předmět do ohniska lupy, nebo o trochu blíže k oku. Oko nyní vidí obraz předmětu pod větším zorným úhlem τ' , než je zorný úhel τ předmětu pozorovaného bez lupy, viz.obr. 40.



obr. 40

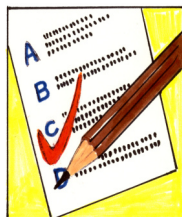
Definujme si **úhlové zvětšení** γ jako poměr zorných úhlů:

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau}$$

Z obrázku si lehce odvodíme, že pro úhlové zvětšení lupy platí vztah

$$\gamma \approx \frac{d}{f} \text{ případně } \gamma \approx \frac{a}{f}$$

kde d je konvenční zraková vzdálenost.



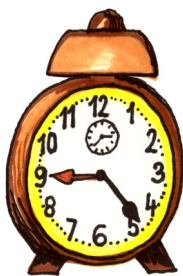
KO4.2.2.4-24. Proč se používá jako lupa spojná čočka s ohniskovou vzdáleností menší než je konvenční zraková vzdálenost?

KO4.2.2.4-25. Jaké je zvětšení lupy s ohniskovou vzdáleností 25 mm, umístíme-li předmět a) do ohniska, b) mezi ohnisko a lupu ve vzdálenosti 20 mm od lupy?

4.2.2.5. Mikroskop



1. Znat základní optické prvky mikroskopu – objektiv a okulár.
2. Nakreslit chod paprsků mikroskopem.
3. Vysvětlit pojem optický interval.
4. Vypočítat zvětšení mikroskopu.



Odhadovaný studijní čas je 20 minut.

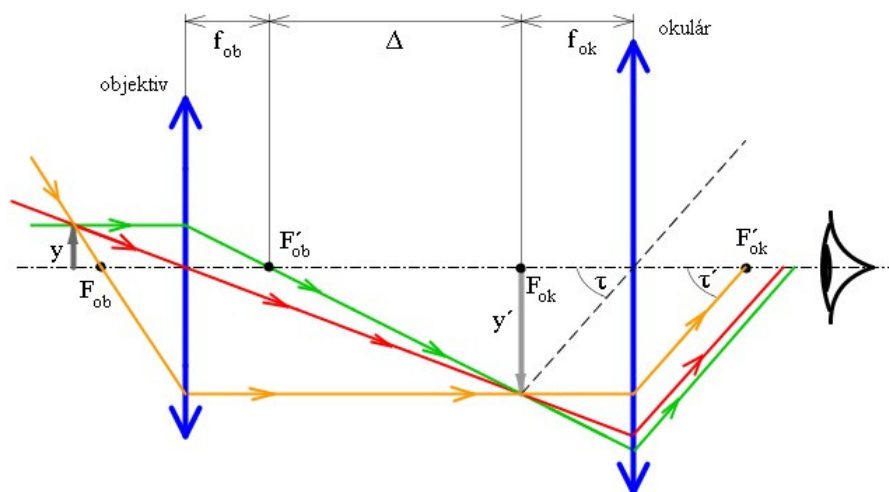


Zobrazení čočkou, zobrazení lupou.



Mikroskop je optický přístroj sloužící (podobně jako lupa) ke zvětšení zorného úhlu při pozorování malých, blízkých objektů. Mikroskop se skládá z **objektivu** (u pozorovaného objektu – předmětu) a z **okuláru**, ke

kterému přikládáme oko. Objektiv je spojná čočka (soustava čoček) s malou ohniskovou vzdáleností f_{ob} . Okulár je též spojná čočka (soustava čoček), ale s delší ohniskovou vzdáleností f_{ok} . Předmět se umísťuje v nepatrně větší vzdálenosti před objektivem, než je jeho ohnisková vzdálenost. Obraz předmětu se vytváří uvnitř tubusu a je zvětšený a skutečný. Tento obraz pak pozorujeme okulárem jako lupou. Výsledný obraz pozorovaný okem je zvětšený, neskutečný a převrácený, viz. obr. 41.



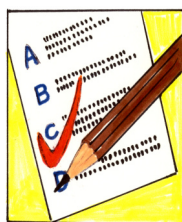
obr. 41

Zvětšení mikroskopu si můžete odvodit z obrázku. Je dáno součinem zvětšení objektivu Δ/f_{ob} a zvětšení okuláru (lupy) d/f_{ok} . Platí tedy vztah pro **úhlové zvětšení mikroskopu**:

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{f_{ob}} \cdot \frac{d}{f_{ok}},$$

kde Δ je **optický interval mikroskopu** - vzdálenost vnitřních ohnisek a d již známá konvenční zraková vzdálenost.

Optické mikroskopy umožňují zvětšení pozorovaného předmětu až 4 000 krát. Dosažení většího zvětšení zamezují ohybové jevy.



KO4.2.2.5-26. Proč je obraz vytvořený mikroskopem převrácený?

KO4.2.2.5-27. Může být objektivem mikroskopu rozptylka?



U4.2.2.5-28. Jaké zvětšení dává mikroskop, jehož objektiv má ohniskovou vzdálenost 10 mm a okulár 40 mm? Vzdálenost objektiv – okulár je 222 mm.

4.2.2.6. Dalekohled



1. Nakreslit chod paprsků dalekohledem.
2. Vysvětlit rozdíl mezi Keplerovým, Galileiho a Newtonovým dalekohledem.
3. Vypočítat zvětšení dalekohledu.



Odhadovaný studijní čas je 20 minut.

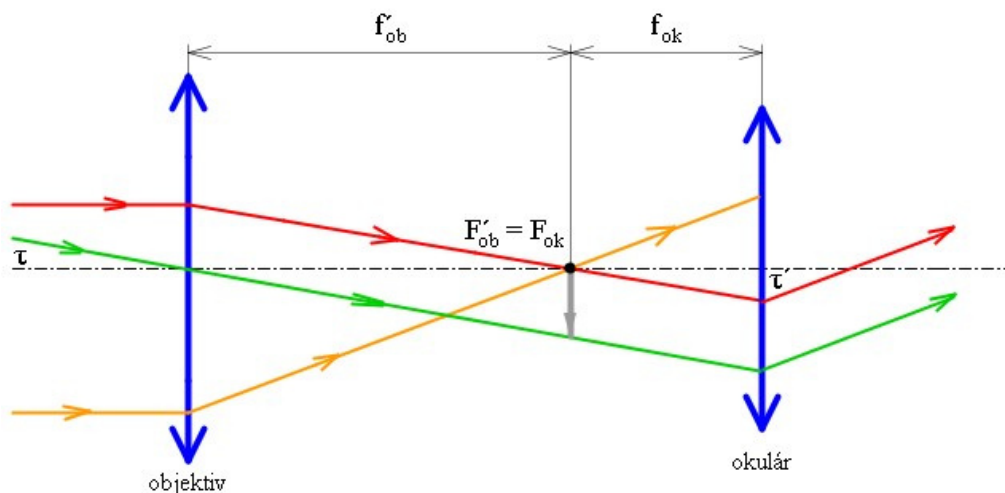


Zobrazení čočkou .



Dalekohled na rozdíl od mikroskopu slouží k pozorování vzdálených předmětů. Dalekohledem zvětšujeme zorný úhel pod kterým tyto předměty pozorujeme. Dalekohled se skládá z **objektivu** a z **okuláru**. Okulárem a objektivem jsou zpravidla čočky, někdy se však používá k zobrazení i zrcadel, respektive kombinací čoček a zrcadel.

Keplerův (hvězdářský) dalekohled se skládá ze dvou spojných čoček První spojka (objektiv) vytváří obraz vzdáleného předmětu ve své obrazové ohniskové rovině. Ta je současně předmětovou ohniskovou rovinou druhé spojky – okuláru, viz. orb. 42. Ohnisková vzdálenost objektivu f_{ob} je podstatně větší než ohnisková vzdálenost okuláru f_{ok} .



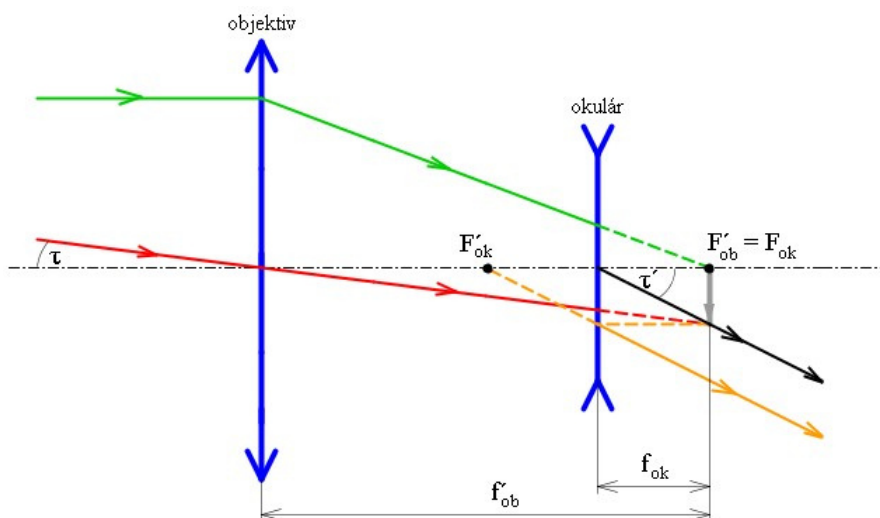
obr. 42

Úhlové zvětšení dalekohledu zaostřeného na nekonečno je dáno výrazem:

$$\gamma_d = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

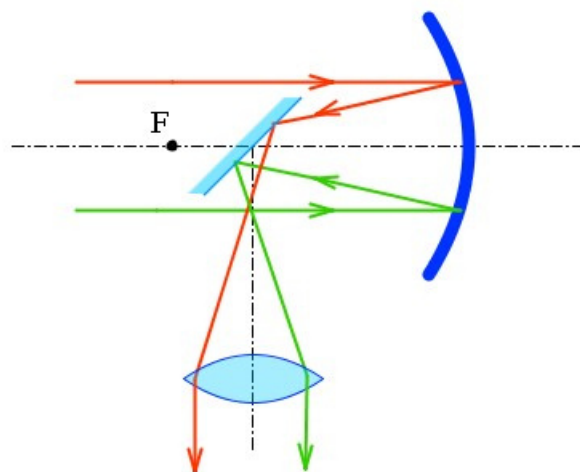
Pozorovaný obraz (jak je vidět z obrázku) je zvětšený, stranově i výškově převrácený.

Galileiho (holandský) dalekohled se liší od Keplerova tím, že okulárem je rozptylná čočka. Opět vnitřní ohniska splývají jak je vidět na obrázku, viz. obr. 43. Obraz je vzpřímený, zvětšený, ale neskutečný. Pro úhlové zvětšení platí stejný vztah jako pro zvětšení Keplerova dalekohledu.

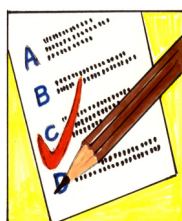


obr. 43

Zrcadlový (Newtonův) dalekohled má jako objektiv parabolické zrcadlo. Obraz vytvořený tímto zrcadlem je pozorovaný okulárem – spojkou, viz. obr. 44.



obr. 44

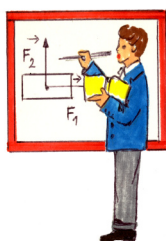


KO4.2.2.6-29. Jako nejjednoduššího dalekohledu lze použít jednoduchou čočku. *Tou může být:*

- a) libovolná spojka,
- b) spojka, jejíž ohnisková vzdálenost je menší než konvenční zraková vzdálenost,
- c) spojka, jejíž ohnisková vzdálenost je větší než konvenční zraková vzdálenost,
- d) rozptylka, jejíž ohnisková vzdálenost je větší než konvenční zraková vzdálenost .

KO4.2.2.6-30. Dalekohled se skládá ze dvou soustav – objektivu a okuláru, přitom:

- a) obě soustavy mohou být spojné,
- b) obě soustavy mohou být rozptylné,
- c) objektiv je spojná soustava, okulár je rozptylná soustava.



Máte k dispozici tři čočky. Dvě spojky s ohniskovými vzdálenostmi $f_1 = 50\text{cm}$, $f_2 = 5\text{cm}$ a rozptylku $f_3 = -5\text{cm}$. *Jaké optické přístroje můžeme z těchto čoček sestavit? Jaké bude jejich zvětšení?*

- o Nejdříve můžeme použít spojku s kratší ohniskovou vzdáleností jako lupu. Její zvětšení bude $\gamma \approx \frac{d}{f}$. Po dosazení $\gamma \approx \frac{25}{5} = 5$. Lupa bude zvětšovat

pětkrát.

o Teď se pokusíme sestavit mikroskop. Objektivem musí být spojka o menší ohniskové vzdálenosti f_2 . Okulárem bude zase spojka s ohniskovou vzdáleností f_1 . Zvětšení ještě nemůžeme stanovit, neznáme optický interval Δ . V komerčních přístrojích se zpravidla používá optický interval kolem 10cm. V tomto případě bude zvětšení dáno vztahem

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{f_2} \cdot \frac{d}{f_1}, \text{ a po dosazení } \gamma_m = \frac{10}{5} \cdot \frac{25}{50} = 1. \text{ Takový mikroskop by zobrazil se zvětšením 1,}$$

obraz by byl stejně veliký jako předmět. Můžeme sice zvětšit optický interval, ale délka

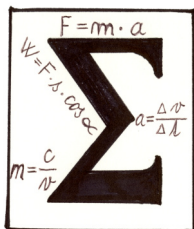
mikroskopu by byla neúměrně veliká. Už v počítaném případě by mikroskop byl dlouhý 65 cm. Tato dvojice čoček není vhodná pro sestavení mikroskopu.

o Keplerův dalekohled složíme ze dvou spojek. Jako objektiv použijeme spojku s ohniskovou vzdáleností f_1 , jako okulár použijeme druhou spojku (f_2). Zvětšení tohoto dalekohledu bude

$\gamma_d = \frac{f_1}{f_2}$, po dosazení $\gamma_d = \frac{50}{5} = 10$. Dalekohled bude zvětšovat desetkrát, jeho délka bude 55cm.

o Galileiho dalekohled bude mít stejný objektiv (f_1), okulárem však bude rozptylka (f_3).

$\gamma_d = \frac{f_1}{f_3}$, po dosazení $\gamma_d = \frac{50}{5} = 10$. Dalekohled bude také zvětšovat desetkrát, jen jeho délka bude menší - 45cm.



- **Rovinné zrcadlo** vytváří obraz zdánlivý, stejně veliký jako je předmět, stranově převrácený.

- **Kulová zrcadla** jsou **dutá a vypuklá**. **Ohnisková vzdálenost f** kulového zrcadla je polovinou poloměru křivosti r zrcadla, $f = \frac{r}{2}$.

- Pro zobrazení zrcadlem používáme **zobrazovací rovnice kulového zrcadla**: $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$.

- K zobrazení zrcadlem můžeme použít **geometrické konstrukce obrazu**. Obraz je možné vytvořit pomocí **tří význačných paprsků**:

- paprsek procházející středem křivosti zrcadla se odráží ve stejném směru,
- paprsek rovnoběžný s optickou osou se odráží do ohniska,
- paprsek procházející ohniskem se odráží rovnoběžně s optickou osou.

- **Zvětšení** zrcadla je dáno poměrem velikosti obrazu a předmětu, tj. $Z = \frac{y'}{y}$.

- **Čočky** rozeznáváme **spojné a rozptylné**.

- Obrazové ohnisko spojné čočky leží v obrazovém prostoru, Obrazové ohnisko rozptylné čočky leží v předmětovém prostoru.

- **Optická mohutnost čočky** je převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti, tj. $\varphi = \frac{1}{f}$, vyjadřujeme ji v dioptriích.

- Pro zobrazení **tenkou čočkou** používáme **zobrazovací rovnice tenké čočky**: $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$.
- K zobrazení čočkou můžeme použít **geometrické konstrukce obrazu**. Obraz je možné vytvořit pomocí **tří význačných paprsků**:
 - paprsek procházející optickým středem čočky se neláme,
 - paprsek rovnoběžný s optickou osou se láme do obrazového ohniska,
 - paprsek procházející předmětovým ohniskem je po lomu rovnoběžný s optickou osou.
- **Zvětšení** čočky je dáno poměrem velikosti obrazu a předmětu, tj. $Z = \frac{y'}{y}$.
- **Lidské oko** je optická soustava se spojnou čočkou, jejíž ohniskovou vzdálenost můžeme měnit pomocí očních svalů. Tím přizpůsobujeme (akomodujeme) oko vzdálenosti předmětu jehož ostrý obraz se vytváří na sítnici oka.
- **Konvenční zraková vzdálenost** $d = 25$ cm je nevhodnější vzdálenost pro pozorování blízkých předmětů.
- **Dalekozraké oko** korigujeme spojnou čočkou, **krátkozraké oko** pak čočkou rozptylnou.
- **Optické přístroje** zvětšují **zorný úhel**, pod kterým vidíme malé, blízké předměty (lupa a mikroskop), případně vzdálené předměty (dalekohled).
- **Lupa** je spojná čočka s ohniskovou vzdáleností menší než je konvenční zraková vzdálenost. Její zvětšení je dáno vztahem $\gamma \approx \frac{d}{f}$.
- **Mikroskop** je složen ze dvou spojných soustav (objektiv f_1 a okulár f_2), jejichž vnitřní ohniska jsou vzdáleny o optický interval Δ . Jeho zvětšení lze vyjádřit výrazem
$$\gamma_m = \frac{\Delta}{f_{ob}} \cdot \frac{d}{f_{ok}}$$
.
- **Dalekohled** je složen ze dvou optických soustav (objektiv f_{ob} a okulár f_2), jejichž vnitřní ohniska splývají ($\Delta = 0$). Jeho zvětšení lze vyjádřit výrazem
$$\gamma_d = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$
.
- **Keplerův dalekohled** má objektiv i okulár tvořeny spojnými soustavami.
- **Galileiho dalekohled** má spojnou soustavu jako objektiv, okulár je rozptylná soustava.

4.2.3 Fotometrie

Světlo vyzařují nejrůznější zdroje. Přirozenými zdroji jsou Slunce, Měsíc, umělými pak žárovka, výbojka, laser a podobně. Předměty osvětlené těmito zdroji vidíme tehdy, jestliže světlo od nich odražené je dostatečně „intenzivní“. To je však subjektivní hodnocení.

Objektivním hodnocením těchto vlastností světelných zdrojů se zabývá právě **fotometrie**. Fotometrie zavádí několik objektivních fyzikálních veličin (fotometrických veličin) popisujících vlastnosti zdrojů a osvětlení pozorovaných předmětů.



1. Znáť základné pojmy fotometrie jako je světelný tok, svítivost, osvětlení, osvit, zářivá energie a světelná energie.
2. Umět definovat tyto veličiny a znát jejich jednotky.
3. Umět objasnit rozdíl mezi zářivou a světelnou energií.



Odhadovaný studijní čas je 30 minut.



Fotometrie se zabývá kvantitativním hodnocením energie přenášené elektromagnetickým zářením. Jestliže hovoříme o energii záření všech vlnových délek pak máme na mysli **zářivou energii** E_e . Ve fotometrii se však zabýváme jen její částí, částí zahrnující vlnové délky které registruje lidské oko, hovoříme o **světelné energii** E_s .

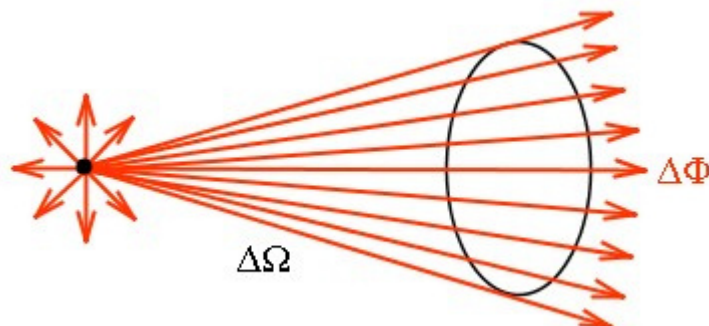
Důležitou veličinou je **světelný tok** ϕ , což je světelná energie vyzářená zdrojem (prošla plochou) za jednotku času. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

$$\Phi = \frac{\Delta E_s}{\Delta t}.$$

Dále je nutné definovat **svítivost** I jako podíl světelného toku a velikosti prostorového úhlu, do kterého je tento tok vysílaný:, viz. obr. 45.

$$I = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \Omega}$$

Jednotkou svítivosti je jedna ze základních jednotek soustavy SI - kandela (cd).



obr. 45

Svítivostí charakterizujeme vyzářování tzv. **bodového zdroje**, zdroje jehož rozměry jsou zanedbatelné ve srovnání se vzdálenostmi, ve kterých studujeme účinky tohoto zdroje.

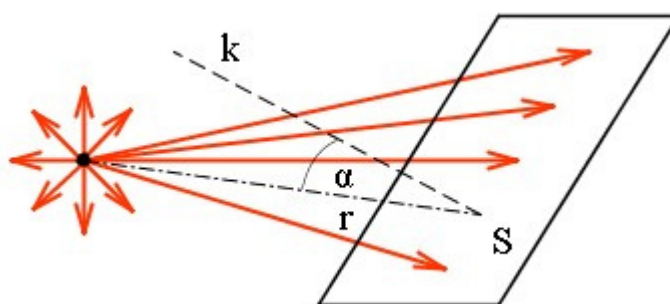
Poslední veličinou, kterou si budeme definovat, je **osvětlení** E . Touto veličinou charakterizujeme množství světla dopadajícího na určitou plochu. Osvětlení je definováno jako podíl světelného toku a obsahu plochy osvětlené tímto tokem:

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

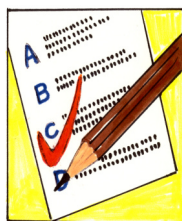
Jednotkou osvětlení je lux (lx), jde o osvětlení plochy na jejíž každý 1m^2 dopadá rovnoměrně rozdělený světelný tok 1 lm.

Existuje samozřejmě souvislost mezi osvětlením plochy v bodě P a svítivostí osvětlujícího zdroje. Osvětlení plochy závisí na svítivosti zdroje, na vzdálenosti zdroje od plochy a na úhlu dopadu na tuto plochu. Viz. obr. 47.

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



obr. 47



KO4.2.3-31. Světelný tok je

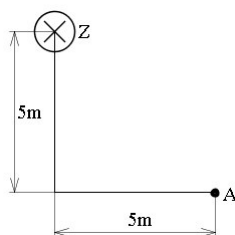
- a) množství energie procházející jednotkovou plochou
- b) světelná energie procházející danou plochou za jednotku času
- c) světelná energie procházející jednotkovou plochou za jednotku času
- d) množství energie vyzářené do jednotkového prostorového úhlu.

KO4.2.3-32. Izotropní bodový zdroj svítivosti 4 cd vysílá do prostorového úhlu 3 sr světelný tok

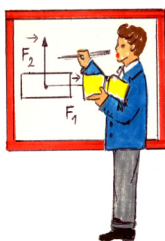
- a) 4/3 lm
- b) 12 lx
- c) 3/4 lm
- d) 12 lm.

KO4.2.3-33. Žárovka Z svítivosti 50 cd způsobí v bodě A (viz obr. 46) osvětlení

- a) 1 lx
- b) 5 lx
- c) 0,707 lx
- d) 2/1,414 lx .



obr. 46



Ve vzdálenosti 2 m od promítacího plátna je umístěn světelný zdroj svítivosti 60 cd a z druhé strany zdroje ve vzdálenosti 2 m od něho je umístěno rovinné zrcadlo rovnoběžné s promítacím plátnem. *Určete jeho osvětlení. Jaký světelný tok dopadá na plátno plochy 0,5 m²?*

Je třeba si uvědomit, že plátno bude osvětleno nejen přímo zdrojem (E_1), ale také světlem odraženým od zrcadla (E_2).

Oba příspěvky k celkovému osvětlení vypočítáme pomocí vztahu pro osvětlení plochy bodovým zdrojem. Protože plátno i zrcadlo jsou umístěny kolmo na směr paprsku, bude dopadový úhel roven 0 a použitý vztah bude zjednodušený: $E = \frac{I}{r^2}$. Dosadíme pro přímé

osvětlení do vztahu: $E_1 = \frac{60}{2^2} = 15 \text{ lx}$. Pro osvětlení plátna zdrojem po odrazu od zrcadla

musíme do vztahu dosadit vzdálenost $2 + 2 + 2 = 6$. $E_2 = \frac{60}{6^2} = 1,67 \text{ lx}$.

Celkové osvětlení plátna bude dáno součtem obou příspěvků, tj. 16,67 lx.

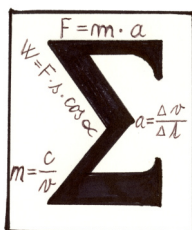
Dopadající světelný tok vypočítáme ze definičního vztahu pro osvětlení. Z něj vyjádříme světelný tok jako $\Phi = E S$. Po dosazení bude světelný tok $\Phi = 8,3 \text{ lm}$.



U4.2.3-34. *Jaký je celkový světelný tok bodového zdroje svítivosti 15 cd?*

U4.2.3-35. *Jaká je svítivost žárovky 100 W, je-li celkový světelný tok 1260 lm?*

U4.2.3-36. *Jaké je osvětlení vnitřní stěny duté koule o poloměru 4 m, je-li v jejím středu žárovka o svítivosti 160 cd?*



- **Zářivá energie** je energie záření všech vlnových délek. **Světelná energie** je část zářivé energie vnímatelná lidským okem.

- **Lidské oko je citlivé** na vlnové délky v rozsahu 390 nm až 770 nm.

- **Světelný tok Φ** je světelná energie E_S , která projde plochou za jednotku času $\Phi = \frac{\Delta E_S}{\Delta t}$.

Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

- **Svítivost** I je podíl světelného toku Φ a velikosti prostorového úhlu Ω , do kterého je tento tok vysílán $I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}$. Jednotkou svítivosti je kandela (cd), která je **základní jednotkou** soustavy SI.
- **Osvětlení** E je definováno jako podíl světelného toku Φ a obsahu plochy S osvětlené tímto tokem $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$. Jednotkou osvětlení je lux (lx).
- Osvětlení plochy E bodovým zdrojem svítivosti I vzdáleném r od osvětlované plochy je dáno vztahem $E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$.

4.3 Vlnová optika

Světlo je elektromagnetické vlnění. Jedná se o vlnění stejného druhu jako jsou například televizní a rozhlasové vlny. Světelné vlnění se však od nich podstatně liší svým rozsahem vlnových délek, světelné vlnění má podstatně menší vlnové délky než mají radiové vlny. A je zde ještě jeden na první pohled viditelný rozdíl. Elektromagnetické vlnění televizních a rozhlasových vln vzniká v anténách velkých desítky metrů, kdežto „vysílači“ světelného vlnění jsou atomy či molekuly.

Vlnové vlastnosti světla se projevují zejména při interferenci světla, difrakci světla, polarizaci a disperzi světla.

Elektromagnetické záření má vedle toho, že má vlnovou povahu má současně i povahu částicovou (korpuskulární), kdy záření se chová jako proud částic – fotonů. Blíže se dovíte o světle a jeho kvantovém charakteru v kapitole 4.4.

4.3.1 Interference světla



1. Vysvětlit pojem fáze a stanovit jak rozdíl fází ovlivňuje skládání dvou vlnění.
2. Vysvětlit pojmy koherentní vlnění, optická dráha.
3. Naučit se podmínky pro vznik interferenčních maxim a minim při skládání dvou vlnění.
4. Vysvětlit roli odrazu na opticky hustším prostředí při interferenci vlnění.
5. Pochopit význam rozdílu optických drah při skládání dvou vlnění.
6. Řešit úlohy obdobné Youngovu pokusu.
7. Rozlišit vznik maxim a minim v odraženém a procházejícím světle při interferenci na tenké vrstvě.



Odhadovaný studijní čas je 60 minut.



Světlo, šíření světla, Huygensův princip.



Interferenci světla (tj. skládání světla) můžeme běžně pozorovat ve svém okolí. Interferencí se tvoří duhové barvy na olejové skvrně na vodě, můžeme ji pozorovat na okenní námraze apod., viz. obr. 67.

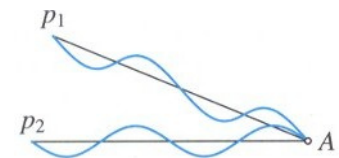


obr. 67

Při skládání vlnění může dojít ke dvěma extrémům případům:

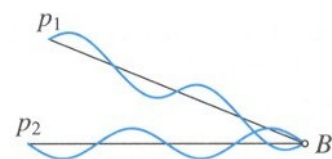
- ▶ K zesílení skládajících se vlnění.
- ▶ Zeslabení skládajících se vlnění.

- Na obrázku jsou znázorněna dvě světelná vlnění vysílaná ze zdrojů Z_1 a Z_2 . Tato vlnění přicházejí do místa setkání P se **stejnou fází**. V tomto případě se výsledné vlnění **zesiluje** a vzniká **interferenční maximum**, viz. obr. 48.



obr. 48

- Na druhém obrázku přicházejí do bodu P světelná vlnění s **opačnou fází**. Nyní je výsledné vlnění **zeslabeno** a vzniká **interferenční minimum**, viz. obr. 49.



obr. 49

Interferenci však můžeme pozorovat jen za jistých podmínek. Uvědomme si, že světelné zdroje (žárovka, Slunce) jsou složeny z obrovského počtu malých zářičů – atomů. Tyto zářiče vysílají veliký počet světelných vln s různou vzájemnou fází. Tato vlnění spolu sice interferují, ale v časových okamžicích tak nepatrných (řádově 10^{-16} s), že nejsme schopni tuto interferenci pozorovat.

Pro pozorovatelnou interferenci musí být fázový rozdíl interferujících vln po delší dobu konstantní, **skládající se vlnění musí být koherentní**. **Koherentní vlnění** jsou ta světelná vlnění která mají **stejnou frekvenci** a jejichž **fázový rozdíl se nemění**.

Typickým zdrojem koherentního vlnění je laser.

Vraťme se ještě k obrázkům, na kterých jsou znázorněna dvě skládající se světelná vlnění. S jakou fází se obě vlnění setkají v bodě P bude záviset na poloze tohoto bodu. Vlastně to závisí **na rozdílu drah** Δs , které musí obě vlnění urazit: $\Delta s = AZ_1 - AZ_2$. Obě vlnění na obrázcích procházejí stejným prostředím o indexu lomu n , mají tedy stejnou rychlost.

Ale to nemusí vždy platit. Skládající se vlnění mohou přicházet do bodu P z různých prostředí. V tomto případě se budou šířit různými rychlostmi vyjádřenými indexy lomu příslušných prostředí.

Proto musíme uvažovat ne rozdíl drah, ale rozdíl tzv. optických drah. **Optickou dráhu** l definujeme jako geometrickou dráhu s vynásobenou daným indexem lomu n

$$l = n \cdot s$$

Podstatné je, že světlo projde stejnými optickými drahami v různých prostředích za stejnou dobu.

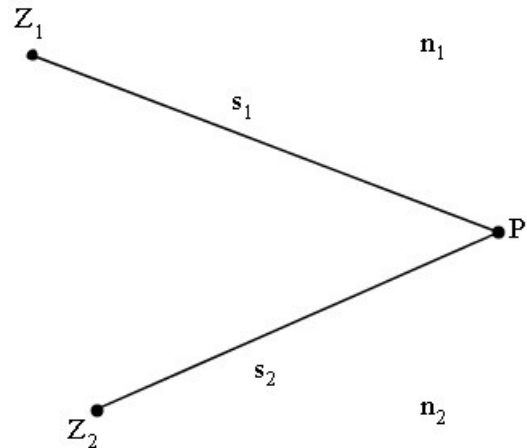
Shrneme-li to, co jsme se nyní dověděli, můžeme vyslovit **interferenční podmínky**:

Při interferenci světelných vlnění o vlnové délce λ :

- vzniká **interferenční maximum** v místě, kde je splněna podmínka

$$\Delta l = n_2 s_2 - n_1 s_1 = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

obr. 50



Rozdíl optických drah skládajících se vlnění je roven **sudému** násobku $\lambda/2$.

- vzniká **interferenční minimum** v místě, kde je splněna podmínka

$$\Delta l = n_2 s_2 - n_1 s_1 = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{kde } k = 1, 2, \dots$$

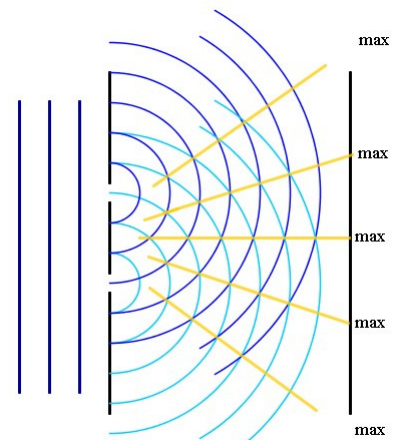
Rozdíl optických drah skládajících se vlnění je roven **lichému** násobku $\lambda/2$.

A poslední jev, který může ovlivnit skládání vlnění je odraz na rozhraní. Lze dokázat, že:

- světelné vlnění při odrazu na opticky hustším prostředí změní fázi na opačnou. Změně fáze na opačnou odpovídá rozdíl optických drah $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$.
- světelné vlnění při odrazu na opticky řidším prostředí fázi nemění.

Typickou ukázkou skládání dvou světelných vlnění je **Youngův pokus**. Podívejme se na obrázek obr. 51.

Stínítko se dvěma úzkými štěrbinami S₁ a S₂ (kolmé na nákretnu) je osvětleno monochromatickým světlem ze vzdáleného zdroje, takže dopadající vlnoplochy jsou rovinné. Podle Huygensova principu je každý bod štěrbin zdrojem

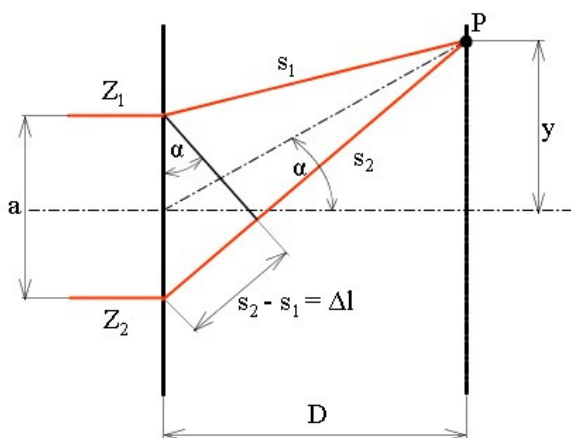


obr. 51

kulových vln šířících se do celého poloprostoru za stínítkem.

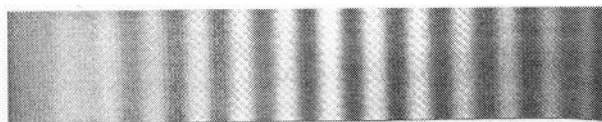
Protože světelná vlnění vycházející z těchto „sekundárních“ zdrojů mají stejnou frekvenci a mají konstantní fázový rozdíl (vznikly z jedné dopadající rovinné vlnoplochy), jsou koherentní. Tato dvě koherentní vlnění budou spolu interferovat. Protože nikde nedochází k odrazu (mohlo by dojít ke změně fáze) a obě vlnění se šíří stejným prostředím, bude záviset jen na poloze bodu pozorování na posledním stínítku, zda budeme pozorovat maximum nebo minimum interferenčního obrazce.

Teď nastává rozhodující krok – **musíme určit dráhový rozdíl**. Ten stanovíme z obrázku, viz. obr. 52. $\Delta l = l_2 - l_1 = a \cdot \sin \alpha$, kde a je vzdálenost středů obou štěrbin.



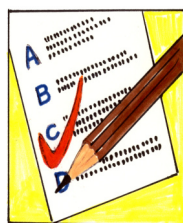
obr. 52

Interferenční maxima (světlé proužky) tedy budeme pozorovat ve směrech daných rovnicí: $a \sin \alpha = 2k \frac{\lambda}{2}$. **Nulté maximum** bude ležet v ose obou štěrbin ($k = 0$) pod úhlem $\alpha = 0$. Na obě strany od tohoto maxima budou ležet **prvá maxima** ($k = 1$) pod úhly danými vztahem $\sin \alpha = \frac{\lambda}{a}$. No obrázku je fotografický záznam střídání tmavých a světlých proužků v Youngově pokusu, viz. obr. 54.



obr. 54

Mezi prvními maximy a nultým maximem budou první minima (tmavé proužky). Pro interferenční minima platí pak vztah $a \sin \alpha = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$. Pozorovací úhel dvou prvních minim se vypočítá z rovnice $\sin \alpha = \frac{\lambda}{2a}$.



KO4.3.1-1. Paprsek urazí v prostředí o indexu lomu 1,5 dráhu 3 m. Jeho optická dráha je :

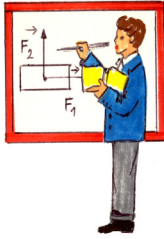
- a) 3 m b) 4,5 m c) 2 m d) jinak.

KO4.3.1-2. Světlo se odráží na rozhraní vzduch - sklo. Dojde při odrazu na skle ke změně fáze?

- a) ano b) ne .

KO4.3.1-3. Pro který z uvedených dráhových rozdílů dvou koherentních vlnění vzniká interferenční maximum?

- a) $\lambda/2$ b) λ c) $\lambda/4$ d) 2λ .



Červené monochromatické světlo osvětluje dvojici štěrbin vzdálených od sebe o 0,2 mm. Na stínítku vzdáleném 1m se vytvoří první interferenční maximum ve vzdálenosti 3,3 mm od nultého maxima. *Určete vlnovou délku světla.*

Jedná se vlastně o Youngův pokus. Pozorujeme maximum, tedy musí být splněna podmínka pro vznik interferenčního maxima $\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}$. Jedná se o

prvé maximum odpovídající $k = 1$. Nikde nedochází k odrazu, fáze se nemění. Musíme teď stanovit rozdíl optických drah, který je roven rozdílu geometrických drah, protože index lomu je roven 1 (světlo se šíří vzduchem).

Označíme-li si vzdálenost štěrbin a , vzdálenost stínítka D a vzdálenost prvního a nultého maxima y , pak podle obrázku, viz. obr. 52, můžeme vyjádřit rozdíl drah výrazem $\Delta l = x_2 - x_1 = \frac{y \cdot a}{D}$. Tento výraz dosadíme do vztahu pro interferenční maximum a z něj vyjádříme hledanou vlnovou délku

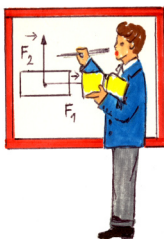
$$\lambda = \frac{y a}{D} = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{1} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Vlnová délka dopadajícího světla je 660 nm.



U4.3.1-4. Dva koherentní paprsky žlutého světla ze sodíkové výbojky ($\lambda = 590 \text{ nm}$) se setkají s dráhovým rozdílem $\Delta l = 0,295 \text{ mm}$. *Určete jestli budeme pozorovat interferenční maximum, nebo minimum.*

U4.3.1-5. Na promítací stěně vzdálené 5 m od clony se dvěma rovnoběžnými štěrbinami vznikly interferenční proužky o rozteči 3 mm. *Jaká je vlnová délka světla použitého pro osvětlení clony, jsou-li štěrbiny od sebe vzdáleny 1 mm?*



Jak zbarvená se bude jevit tenká vrstva na fotografickém objektivu při pohledu v odraženém a procházejícím světle? Tloušťka vrstvy je $0,3 \mu\text{m}$, index lomu skla objektivu 1,8; index lomu tenké vrstvy je 1,5.

Vrstva bude mít barvu vlnové délky, pro kterou je splněna podmínka maxima.

a) Vyjdeme z obrázku obr. 53, kde $n_2 = 1,8$, tedy $n_2 > n = 1,5$. Paprsek I mění tedy na rozhraní I fázi na opačnou, paprsek II také mění fázi, tentokrát na rozhraní 2 na opačnou. Protože se obrátila fáze obou paprsků, výsledný vliv odrazů je nulový.

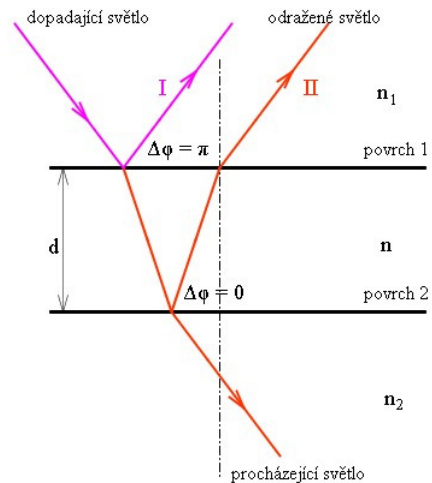
Podmínka maxima bude dána vztahem $2 n d = 2k \frac{\lambda_{\text{max}}}{2}$

a z toho vyjádřena vlnová délka

$$\lambda_{\max} = \frac{2nd}{k} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 3 \cdot 10^{-7}}{k}$$

Volíme teď postupně řád maxima k . Pro $k = 0$ je $\lambda = 9 \cdot 10^{-7}$ m. Toto znamená, že došlo k zesílení vlnění o vlnové délce příslušující neviditelné oblasti spektra. Pro $k = 2$ pak $\lambda = 4,5 \cdot 10^{-7}$ m (viditelná oblast), pro $k = 3$, je $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ m (opět neviditelná), atd. V odraženém světle je tedy zesílena modrá oblast 450 nm, vrstva se bude jevit namodralá.

- b) V procházejícím světle budou spolu interferovat jiné svazky. Dopadající svazek projde prvním rozhraním 1 a dopadne na rozhraní 2. Část svazku projde do prostředí o indexu lomu n_2 . Druhá část se odráží na rozhraní 2 se změnou fáze a vrací se k rozhraní 1.



obr. 53

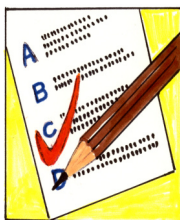
Zde se opět odráží, tentokrát beze změny fáze a projde rozhraním 2 do prostředí n_2 . Oba svazky mají rozdíl optických drah $2nd$, ale druhá část svazku navíc změnila fázi na opačnou ($\Delta\phi = \pi$), což odpovídá posuvu o $\frac{\lambda}{2}$. Podmínka pro maximum bude tedy

$$2nd = 2k \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2}$$

a z ní vyjádřená vlnová délka

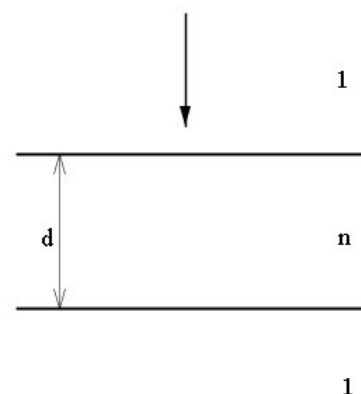
$$\lambda_{\max} = \frac{4nd}{2k+1} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 3 \cdot 10^{-7}}{2k+1}$$

Opět volíme postupně řád maxima k . Pro $k = 0$ je $\lambda = 18 \cdot 10^{-7}$ m, pro $k = 1$ je $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ m, pro $k = 2$ je $\lambda = 3,6 \cdot 10^{-7}$ m, atd. Ve viditelné části spektra leží pouze vlnová délka 600 nm. V procházejícím světle se interferenční vrstva bude jevit načervenalá.



KO4.3.1-6. Světlo vlnové délky λ dopadá kolmo na planparalelní vrstvu tloušťky d a indexu lomu n , viz. obr. 68. Maximum v odraženém světle nastane v případě, že :

- $2d = (2k - 1) \lambda/2$
- $2nd = (2k - 1) \lambda/2$
- $2nd = 2k\lambda/2$
- $2d = 2k\lambda/2$



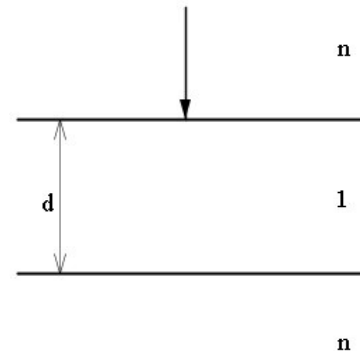
obr. 68

KO4.3.1-7. Světlo vlnové délky λ dopadá kolmo na planparalelní vrstvu tloušťky d a indexu lomu n . *Maximum v prošlém světle nastane v případě, že :*

- a) $2d = (2k - 1) \lambda/2$ b) $2nd = (2k - 1) \lambda/2$
 c) $2nd = 2k\lambda/2$ d) $2d = 2k\lambda/2$.

KO4.3.1-8. Světlo vlnové délky λ dopadá kolmo na planparalelní vzduchovou vrstvu tloušťky d , viz. obr. 69. *Maximum v odraženém světle nastane v případě, že :*

- a) $2d = (2k - 1) \lambda/2$ b) $2nd = (2k - 1) \lambda/2$
 c) $2nd = 2k\lambda/2$ d) $2d = 2k\lambda/2$



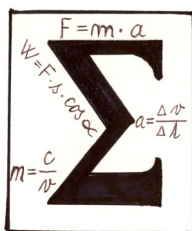
obr. 69

KO4.3.1-9. Světlo vlnové délky λ dopadá kolmo na planparalelní vzduchovou vrstvu tloušťky d . *Maximum v prošlém světle nastane v případě, že :*

- a) $2d = (2k - 1) \lambda/2$ b) $2nd = (2k - 1) \lambda/2$
 c) $2nd = 2k\lambda/2$ d) $2d = 2k\lambda/2$.



U4.3.1-10. Mydlinová blána (tenká vrstva, na níž dochází k interferenci) o indexu lomu 1,33 se při kolmém dopadu světla jevila v odraženém světle modrá ($\lambda = 450 \text{ nm}$). *Určete její tloušťku.*



- K pozorovatelné interferenci světelných vlnění dochází tehdy, jsou-li **vlnění koherentní**.
- Koherentní vlnění jsou vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl se s časem nemění.
- Optická dráha v daném prostředí je dána součinem geometrické dráhy s a indexu lomu n tohoto prostředí. $l = n \cdot s$
- Setkají-li se dvě koherentní vlnění **se stejnou fází** pak výsledné vlnění se zesiluje – vzniká **interferenční maximum**.
- Setkají-li se dvě koherentní vlnění **s opačnou fází** pak výsledné vlnění se zeslabuje – vzniká **interferenční minimum**.

- Při odrazu na opticky hustším prostředí mění se fáze vlnění na opačnou. To odpovídá dráhovému rozdílu $\Delta l = \lambda/2$.
- **Interferenční maximum** vzniká v místě, kde je splněna podmínka, že **rozdíl optických drah je roven sudému násobku půlvln**. $\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}, k = 0,1,2,..$
- **Interferenční minimum** vzniká v místě, kde je splněna podmínka, že **rozdíl optických drah je roven lichému násobku půlvln**. $\Delta l = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, k = 1,2,..$

4.3.2 Ohyb světla

Pozorujeme-li Měsíc v úplňku, hlavně v období smogu, pak vidíme kolem něj světlé kruhy. Tento jev vzniká ohybem měsíčního světla na malých částicích (prach apod.) rozptýlených v atmosféře. Ohybový obrazec můžeme vidět také při pozorování lampy veřejného osvětlení přes hustě tkanou záclonu. V tomto případě je jev dokonce barevný – dochází k disperzi světla.



1. Vysvětlit pojem ohyb světla.
2. Uvědomit si, že ohybové obrazce jsou vlastně interferenční obrazce vznikající v důsledku ohybu.
3. Znat vztahy pro polohu minim a maxim v případě ohybu na štěrbině.
4. Vědět, co je optická mřížka a jakými parametry ji charakterizujeme.



Odhadovaný studijní čas je 30 minut.

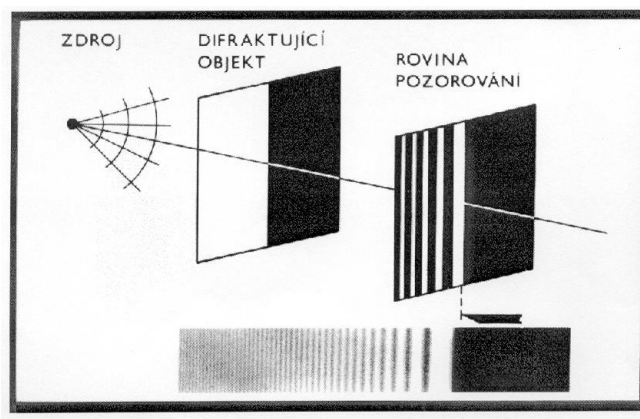


Světlo, šíření světla, Huygensův princip



Ohyb světla - difrakce světla – je další z optických jevů daný vlnovými vlastnostmi světla. K difrakci dochází na okrajích neprůhledných předmětů jako jsou okraje kruhové clony nebo terčíku, kraj stínítka, malé částice a podobně.

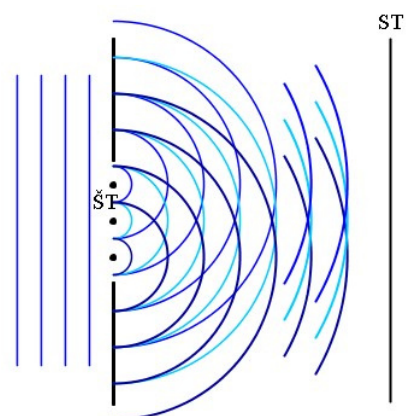
Pozorujme světlo na stínítku za ostrou hranou neprůhledného terče. Podle pravidla přímočarého šíření geometrické optiky bychom měli na stínítku pozorovat jasný ostrý obraz rozhraní a tmavý stín. Ve skutečnosti na stínítku pozorujeme hranu terče obklopenou ohybovými obrazci tvořenými střídajícími se světlými a tmavými proužky – ohybovými maximy a minimy, viz. obr. 54a.



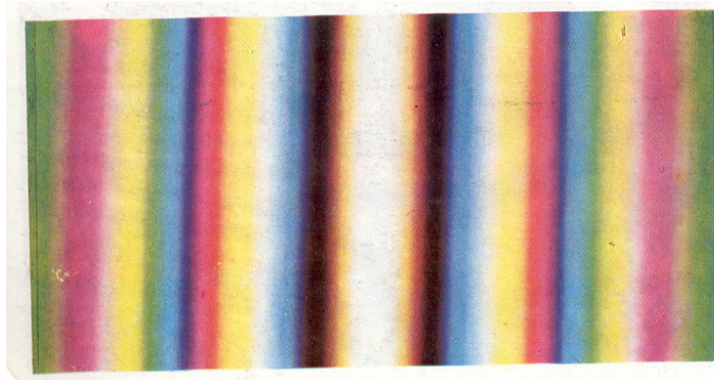
obr. 54a

Vysvětleme si vznik ohybových obrazců na příkladu **difrakce světla** právě na **štěrbině**. Na obrázku je řez velmi úzkou štěrbinou (ve skutečnosti setiny milimetru). Na štěrbinu ŠT dopadá rovinná vlnoplocha monochromatického světla, viz. obr. 55.

Podle Huygensova principu je každý bod této vlnoplochy v rovině štěrbiny zdrojem nových vlnoploch. Tyto kulové vlnoplochy se šíří do celého poloprostoru za štěrbinou, kde spolu interferují. Na stínítku ST pak vznikají interferenční maxima a minima ohybového obrazce v závislosti na rozdílu optických drah skládajících se paprsků, viz. obr. 56.



obr. 55



obr. 56

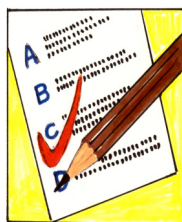
Poloha **interferenčních minim** ohybového obrazce (tmavých proužků) je dána vztahem

$$a \sin \alpha = k \lambda, \quad \text{kde } k = 1, 2, 3, \dots \text{ nazýváme řád interferenčního minima.}$$

Mezi těmito minimy pozorujeme **interferenční maxima ohybového obrazce** (světlé proužky), jejichž polohy jsou vyjádřeny výrazem:

$$a \sin \alpha = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{kde } k = 1, 2, 3, \dots \text{ je nyní řád interferenčního maxima.}$$

Zbývá ještě určit polohu **nultého interferenčního maxima** ohybového obrazce. Toto maximum pozorujeme v ose štěrbin, tj. ve středu ohybového obrazce (úhel $\alpha = 0$). Proto se někdy nulté maximum někdy označuje jako centrální nebo také hlavní maximum. Ostatní maxima se také nazývají vedlejší ohybová maxima. Jedním z důvodů je to, že hlavní ohybové maximum má podstatně větší intenzitu než všechna ostatní maxima.



KO4.3.2-11. *Jak bude vypadat ohybový obrazec za úzkou štěrbinou, osvětlíme-li ji bílým světlem?*

KO4.3.2-12. *Na štěrbinu šířky d dopadá kolmo světlo vlnové délky λ . Pro paprsky odchýlené od původního směru o úhel α tak, že platí rovnice*

$$\sin \alpha = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{d} \text{ nastává: zesílení}$$

- a) zeslabení
- b) nelze rozhodnout

KO4.3.2-13. *Úzkou štěrbinu osvětlíme modrým světlem (vlnová délka kolem 450 nm). Na stínítku za štěrbinou pozorujeme ohybový obrazec. Teď osvětlíme štěrbinu světlem červeným (vlnová délka kolem 700 nm). Co se stane s ohybovým obrazcem?*

- a) Nezmění se
- b) Rozšíří se na obě strany od centrálního maxima
- c) Obě strany od centrálního maxima se zúží

KO4.3.2-14. *Jak asi bude vypadat interferenční obrazec po ohybu na malém kruhovém otvoru?*



U4.3.2-15. *Vztah pro polohu ohybových interferenčních minim je totožný se vztahem pro polohu interferenčních maxim v Youngově pokusu. Vysvětlete proč.*



V předešlém výkladu jsme si ukázali, že při difrakci bílého světla dochází k rozkladu světla – disperzi. V praxi se vedle hranolů používá k získání monochromatického světla pomocí disperze hlavně **difrakční mřížka**.

Difrakční mřížka je tvořena větším počtem rovnoběžných štěrbin, kterým se často říká vrypky. Důvod je historický, protože původně se vyráběly mřížky rytím tenkých hustých, rovnoběžných vrypů do skleněné destičky. Běžné

optické mřížky mají do 100 vrypů na 1mm, kvalitní spektrální mřížky několik tisíc na jeden milimetr. Počet vrypů na jeden milimetr se označuje jako N [mm^{-1}]. Častěji je však používá pojem **mřížková konstanta** a – převrácená hodnota N , $a = \frac{1}{N}$ [mm].

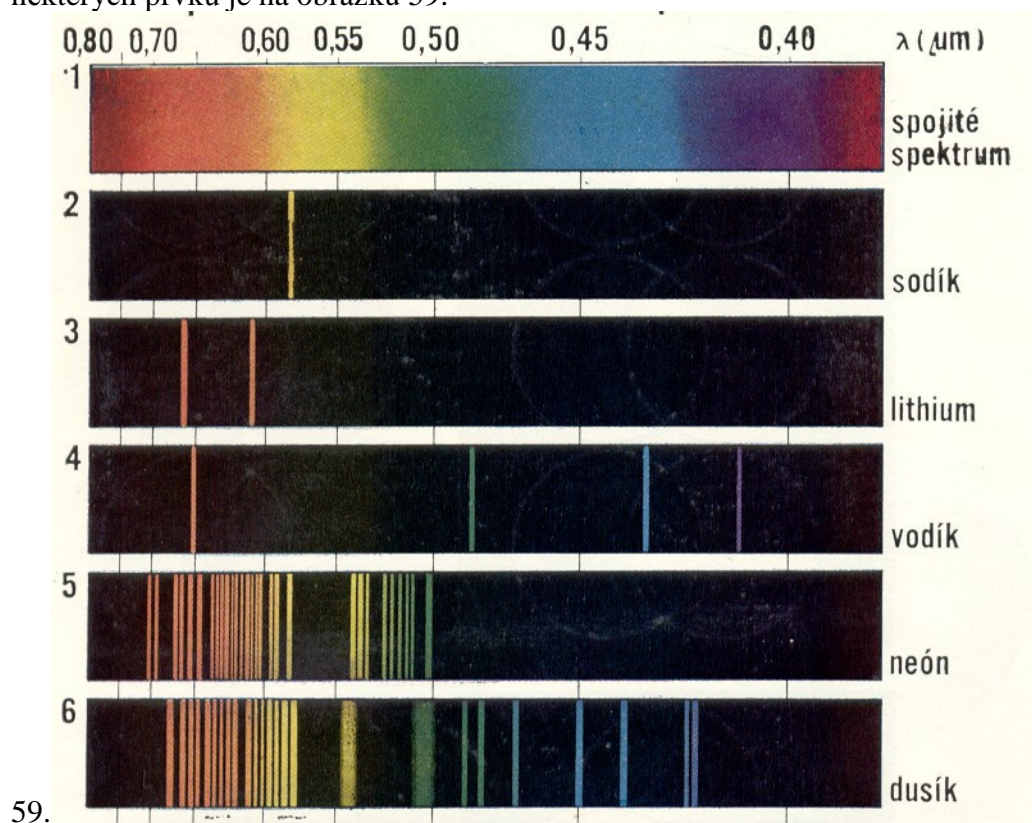
Na jednotlivých štěrbinách mřížky dochází k ohybu. Vlny, které se šíří za mřížkou se skládají podobně jako u Youngova pokusu - interference na dvou úzkých rovnoběžných štěrbinách. Vzniklá interferenční maxima jsou však velice úzká a vzdálená od sebe tím více, čím menší je mřížková konstanta.

Při kolmém dopadu světla na mřížku platí pro polohy interferenčních maxim stejná podmínka jako u Youngova pokusu.

$$a \sin \alpha = 2 k \frac{\lambda}{2}, \text{ kde } k = 0, 1, 2, \dots$$

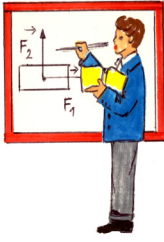
Dopadá-li na mřížku bílé světlo, pozorujeme na stínítku opět bílé, nerozložené maximum nulté maximum ($k = 0$). Ale v dalších interferenčních maximech (vyšší k) již pozorujeme rozklad světla.

Ohybové mřížky jsou základním konstrukčním prvkem **mřížkového spektroskopu**. Je to optický přístroj používaný ke zkoumání spekter charakterizujících svítící prvek či látku. Obvykle se využívá prvních maxim, zbývající se ve spektroskopu odcloní. Ukázka spekter některých prvků je na obrázku 59.



obr. 59

Difrakční mřížka má 10 000 vrypů na délce 20 mm. Kolmo na ní dopadá zelené světlo vlnové délky 500 nm. Jaký úhel svírají prvá maxima s nultým centrálním maximem?



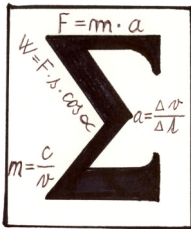
Pro interferenční maxima vznikající ohybem na mřížce platí stejný vztah jako pro maxima Youngova pokusu: $a \sin \alpha = 2k \frac{\lambda}{2}$. Hledáme úhel α pro první maximum ($k = 1$) a vlnovou délku $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Ještě si musíme vypočítat hodnotu vzdálenosti štěrbin a . Ta je u mřížky rovna vzdálenosti dvou sousedních štěrbin, kterou jsme si nazvali mřížkovou konstantou stejně označenou.

Jestliže označíme počet vrypů symbolem n , délku mřížky d , pak počet vrypů na 1mm je

$$N = \frac{n}{d} = \frac{10^4}{20} = 500 \text{ mm}^{-1}. \text{ Mřížková konstanta } a \text{ je převrácenou hodnotou } N, \text{ tedy}$$

$$a = \frac{1}{N} = \frac{1}{500} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}. \text{ Vyjádříme si ze vztahu pro polohu interferenčního}$$

$$\text{maxima úhel: } \sin \alpha = \frac{2k\lambda}{2a} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 0,25. \text{ Příslušný úhel je pak } \underline{\alpha = 14,5^\circ}.$$



- K ohybu (difrakci) světla dochází na okrajích neprůhledných předmětů.
- Světelné vlny vzniklé difrakcí spolu za překážkou interferují a vytvářejí systémy interferenčních maxim a minim známé jako ohybové obrazce.
- Ohybový obrazec za úzkou štěrbinou má podobu střídajících se tmavých a světlých proužků s výrazným středním proužkem – centrálním maximem.
- Směr pozorovaných ohybových interferenčních minim vzniklých za štěrbinou (úhel α) je dán vztahem: $a \sin \alpha = k \lambda$, kde $k = 1, 2, 3, \dots$, a je šířka štěrbin, λ je vlnová délka difraktujícího světla.
- Centrální, intenzitně nejvýraznější nulté maximum ($k = 0$) leží ve směru kolmém na rovinu štěrbin ($\alpha = 0$).
- Směr pozorovaných ohybových interferenčních vedlejších maxim vzniklých za štěrbinou (úhel α) je dán vztahem: $a \sin \alpha = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$, kde $k = 1, 2, 3, \dots$
- Difrakční mřížka je soustava úzkých rovnoběžných štěrbin, jejichž vzdálenost je dána mřížkovou konstantou a . Mřížkovou konstantu můžeme určit jako převrácenou hodnotu počtu vrypů (štěrbin) na jeden milimetr N .
- Směr pozorovaných ohybových interferenčních maxim vzniklých za mřížkou (úhel α) je dán stejným vztahem jako u Youngova pokusu vztahem: $a \sin \alpha = 2k \frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

4.3.3 Polarizace světla



1. Umět definovat polarizaci světla pomocí vektoru E .
2. Odlišit polarizované a nepolarizované světlo.
3. Popsat princip polarizace odrazem, dvojlomem a polaroidem.
4. Umět vypočítat polarizační úhel.



Odhadovaný studijní čas je 30 minut.

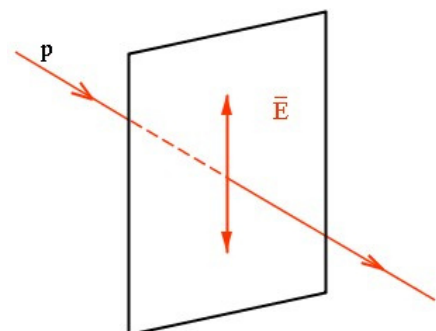
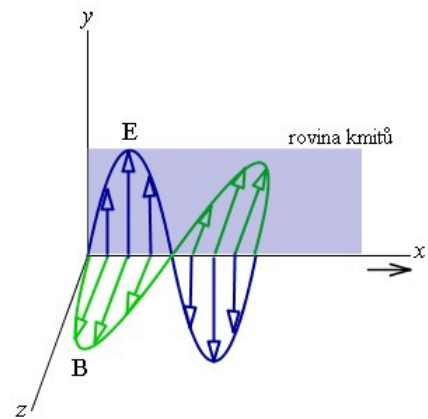


Světlo, elektromagnetické vlnění



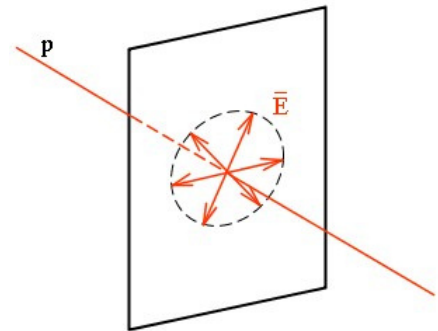
Dalším z jevů daných vlnovou povahou světla je **polarizace světla**. Světlo jako elektromagnetické vlnění má dvě složky – elektrickou charakterizovanou vektorem elektrické intenzity E a magnetickou reprezentovanou vektorem magnetické indukce B . Obě složky kmitají se stejnou frekvencí ve směrech vzájemně na sebe kolmých. Protože je toto elektromagnetické vlnění vlněním příčným, kmitají obě složky ve směrech kolmých na směr šíření vlnění, viz. obr. 62. Pro zkoumání vlastností světelného vlnění dostačuje si proto všimnout pouze jedné ze složek. Zpravidla vyšetřujeme chování elektrické složky charakterizované intenzitou elektrického pole E . obr. 62

Podobné elektromagnetické vlnění vyzařuje anténa televizního vysílače. Jak známo, tento zdroj vysílá televizní vlny s vektorem elektrické intenzity E stále kmitajícím v rovině určené anténou a směrem šíření vlny. Takovéto elektromagnetické vlnění, jehož vektor E má stálý směr, se nazývá **lineárně polarizované vlnění**, viz. obr. 59a.



obr. 59a

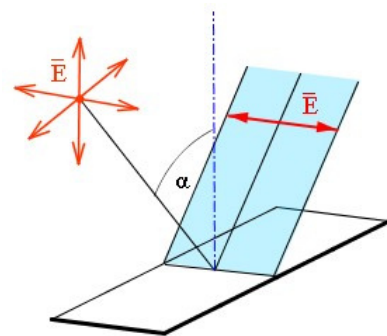
Jiná situace nastává u světelných zdrojů (laser je výjimkou). Uvážíme-li, že přirozený zdroj (žárovka) vysílá světlo z miliard elementárních zdrojů náhodně orientovaných, pak směr vektoru E je zcela nahodilý. **Světlo z přirozeného zdroje je nepolarizované**, viz. obr. 60.



obr. 60

Existuje řada způsobů jak přirozené světlo polarizovat:

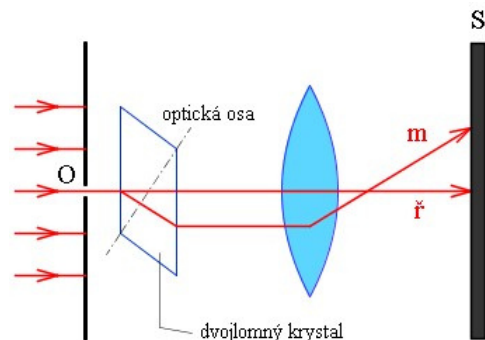
- **Polarizace odrazem.** Dopadá-li nepolarizované světlo na skleněnou desku pod určitým úhlem α , pak vektor E odraženého světla kmitá převážně kolmo k rovině dopadu, viz. obr. 61. V tomto případě hovoříme o **částečné polarizaci**. Pro tzv. Brewsterův (polarizační) úhel α_p dochází k **úplné polarizaci**. Dopadá-li světlo pod V tomto případě paprsek odražený a lomený svírají spolu úhel 90° .



obr. 61

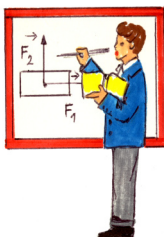
- **Polarizace dvojlomem.** Při dvojlomu dochází k rozdělení paprsku na paprsek řádný \check{r} a mimořádný m . Tyto paprsky jsou lineárně polarizovány ve směrech navzájem kolmých, viz. obr. 17.

- **Polarizační filtry.** V současnosti se pro získání lineárně polarizovaného světla používají polarizační filtry označované jako **polaroidy**. Základem těchto filtrů jsou materiály s velmi úzkými molekulami uspořádanými do rovnoběžných řad. Když světlo prochází takovýmto polaroidem, projde jen část světla kmitajícího v určitém směru, světlo kmitající ve směru na něj kolmém je absorbováno.



\check{r} = řádný paprsek
 m = mimořádný paprsek
 S = promítací stěna (stínítko)
 O = kruhový otvor ve cloně

obr. 17

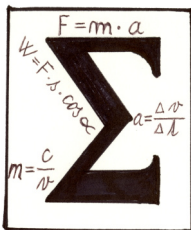


Určete pod jakým úhlem musí dopadnout světlo na vodní hladinu o indexu lomu 1,33, aby odražený paprsek byl úplně polarizovaný?

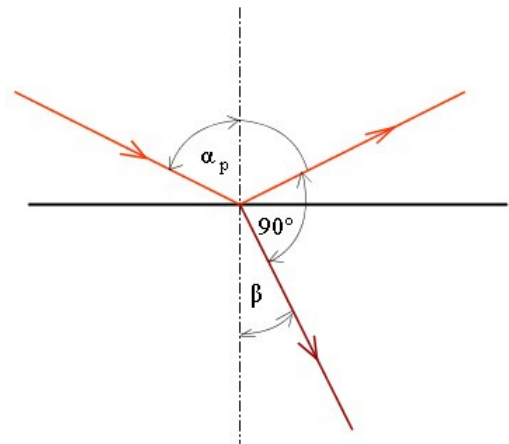
Z obrázku, viz. obr. 63, je vidět, že mezi polarizačním úhlem α_p a úhlem lomu β musí platit vztah $\sin \beta = \cos \alpha_p$. Samozřejmě musí také platit

Snellův zákon lomu $1 \sin \alpha_p = n \sin \beta$. Dosadíme-li z prvního vztahu do druhého za $\sin \beta$ obdržíme rovnici $1 \sin \alpha_p = n \cos \beta$.

Z ní pak určíme tangentu hledaného polarizačního úhlu $\operatorname{tg} \alpha_p = n$. Po dosazení vypočteme polarizační úhel $\alpha_p = 53^\circ$.



obr. 63



- Světlo z přirozeného zdroje je **nepolarizované**.
- Odrazem, dvojlomem a polaroidem lze nepolarizované světlo přeměnit na **lineárně polarizované světlo**.
- Vektor \mathbf{E} v elektromagnetické vlně lineárně polarizovaného světla udržuje stálý směr.

4.4 Kvantová optika

Světlo je sice elektromagnetické vlnění, avšak některé světelné jevy je možné vysvětlit pouze za předpokladu, že se světelná energie nešíří spojitě, ale v kvantech energie. Příkladem takového jevu je fotoelektrický jev nebo jev Comptonův.

Elektromagnetické záření má **současně vlnovou povahu**, která se projevuje interferencí, difrakcí a polarizací a **kvantovou povahu** (částicovou), kdy se záření chová jako proud fotonů (např. u fotoelektrického jevu). Hovoříme o **dualizmu** elektromagnetického záření.

4.4.1 Kvantová povaha elektromagnetického záření



1. Umět vysvětlit pojem foton.
2. Znat vztah pro energii fotonu v závislosti na jeho frekvenci.



Odhadovaný studijní čas je 10 minut.



Podle představ kvantové optiky se elektromagnetické záření a tedy i světlo nešíří spojitě (vlnová optika), ale šíří se jako proud částic - **fotonů**.

Foton nese **elementární kvantum energie E** , které je dáno frekvencí příslušného vlnění f a Planckovou konstantou h .

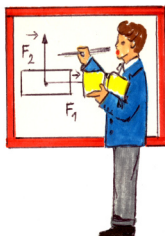
$$E = h f = h \frac{c}{\lambda}, \quad h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Ve vztahu pro energii fotonu značí c rychlost světla ve vakuu a λ je jeho vlnová délka.

Fotony světla různých vlnových délek mají různou energii. Čím kratší je vlnová délka světla, tím větší je energie fotonu.

Energie přenášená zářením určité frekvence je vždy dána celistvým násobkem energie příslušného fotonu.

$$E_e = N(hf), \quad \text{kde } N \text{ je celé číslo.}$$



40 W žárovka vysílá také zelené světlo vlnové délky 550 nm. *Vypočítejte:*

- energii fotonu,
- počet fotonů vyslaných žárovkou za 1 s.

Předpokládejte, že na energii vyzářených „zelených“ fotonů připadá 1 % příkonu.

Ad a) Energie fotonu je dána vztahem $E = hf = h \frac{c}{\lambda}$, do kterého dosadíme:

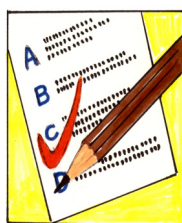
$$E = 6,62 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{5,5 \cdot 10^{-7}} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Častěji se tak malá energie vyjadřuje v jednotkách elektronvolt¹¹⁷, $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Pak

$$\text{energie fotonu bude } E = \frac{3,6 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,25 \text{ eV}$$

Ad b) Žárovka s výkonem 40 W vyšle za 1 sekundu energii 40 J. Z této energie se však přemění pouze 1%, tedy 0,4 J na světlo vlnové délky 550 nm. Počet vyslaných fotonů N dostaneme tak, že vyzářenou energii podělíme energií jednoho fotonu.

$$N = \frac{0,4}{3,6 \cdot 10^{-19}} = 1,11 \cdot 10^{18} \text{ s}^{-1}$$



KO4.4.1-1. Seřadte následující záření podle jejich energie fotonu od nejnižší po největší. Pomoci může tabulka frekvencí elektromagnetického záření.

- viditelné světlo
- rentgenovo záření v lékařském diagnostickém přístroji
- kosmické záření
- rozhlasové vlny

KO4.4.1-2. Viditelné části spektra má největší energii foton příslušející světlu barvy:

- červené
- zelené
- fialové
- žluté

4.4.2 Fotoelektrický jev

S technickým využitím fotoelektrického jevu se běžně setkáváme. Na jeho fyzikálním principu jsou založeny dálkové ovladače spotřební elektroniky, sluneční baterie zásobující elektrickým proudem kosmické sondy, snímací elektronky televizních kamer a celá řada jiných průmyslových aplikací.



1. Vysvětlit, co se odehrává při fotoelektrickém jevu.
2. Znat Einsteinovu rovnici fotoefektu.
3. Vysvětlit pojem výstupní práce.
4. Definovat mezní frekvenci a umět ji vypočítat pro daný kov.
5. Popsat činnost fotonky.



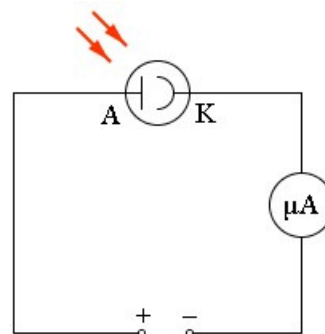
Odhadovaný studijní čas je 30 minut.



Kvantová povaha záření



Necháme dopadat světlo na povrch některých kovů, nebo na krystaly polovodiče. Z osvětlené látky budou vystupovat elektrony. Tomuto jevu se říká **fotoelektrický jev**, zkráceně **fotoefekt**. Sestavme si pokus podle obrázku, viz. obr. 64.



Na tomto obrázku je elektrický obvod s **fotonkou**. Fotonka je vzduchoprázdňá skleněná baňka se dvěma elektrodami. Fotokatoda K je z vhodného kovu (nejčastěji cesium) a je připojena k zápornému pólu stejnosměrného zdroje. Anoda (většinou drátěná smyčka) je pak připojena ke kladnému pólu zdroje. Dopadá-li na fotokatodu světlo, vystupují z jejího povrchu elektrony. V případě polarity zdroje podle obrázku jsou elektrony přitahovány elektrickým polem k anodě. Zapojený mikroampérmetr ukazuje, že

obvodem prochází proud – **fotoproud**. Fotoproud okamžitě ustane, přestane-li na katodu dopadat světlo.

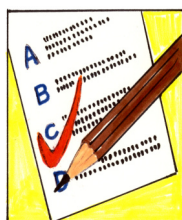
Zdálo by se, že čím intenzivnější bude dopadající světlo, tím více se uvolní elektronů z katody a tím bude větší fotoproud. Pokusy však ukázaly, že fotoefekt na intenzitě dopadajícího světla nezávisí. Jiné pokusy vedly k závěrům, že aby došlo k fotoelektrickému jevu, musí být frekvence světla vyšší než určitá **mezní frekvence** f_m .

Tyto pokusy se nedaly vysvětlit pomocí vlnové teorie světla. Vysvětlení podal až Albert Einstein na základě kvantové teorie. Světlo ve formě fotonů dopadá na kov. Foton předá svou energii elektronu krystalové mřížky kovu. Aby se elektron uvolnil z pole přitažlivých sil mřížky musí být dodaná energie větší nebo aspoň rovna tzv. **výstupní práci** W_v . Einstein popsal celý proces rovnicí, která je vlastně zákonem zachování energie:

$$hf = W_v + E_k$$

Energie fotonu hf se spotřebuje na výstupní práci W_v a zbytek se projeví jako kinetická energie E_k elektronu, který opustil povrch kovu.

Rovnice tak vysvětluje, proč pro jisté frekvence světla nenastává fotoelektrický jev. Jestliže foton má energii menší než je výstupní práce, pak k jevu nedochází. Foton mezní frekvence f_m má energii hf_m rovnu právě výstupní práci W_v . Elektron v tomto mezním případě sice ještě vystoupí z povrchu kovu, ale s nulovou kinetickou energií, tedy s nulovou rychlostí.

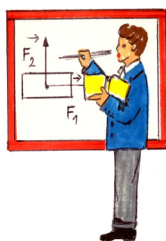


KO4.4.2-3. Uvažujte fotoelektrický jev. Na daný kov působíme elektromagnetickým zářením frekvence f . *Energie uvolněných elektronů závisí na*

- a) frekvenci dopadajícího záření
- b) intenzitě dopadajícího záření
- c) velikosti osvětlené plochy

KO4.4.2-4. Výstupní práce hliníku je $6 \cdot 10^{-19}$ J. Určete, *s jakou rychlostí opouští elektron povrch hliníkové katody, která je ozářena zářením frekvence $5 \cdot 10^{14}$ Hz.*

- a) $7,7 \cdot 10^5$ m.s⁻¹
- b) $1,4 \cdot 10^6$ m.s⁻¹
- c) $2,8 \cdot 10^6$ m.s⁻¹
- d) k fotoefektu nedojde



Na povrch niklu dopadá monochromatické záření o vlnové délce 100 nm. Mezní vlnová délka při fotoelektrickém jevu u niklu je 248 nm. *Vypočítejte*

- a) energii dopadajících fotonů,
- b) výstupní práci niklu,
- c) rychlost uvolněných elektronů.

Ad a) Energie dopadajícího fotonu bude

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{100 \cdot 10^{-9}} = 2 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 12,4 \text{ eV.}$$

Ad b) Mezní vlnová délka λ_m je vlnová délka odpovídající mezní frekvenci f_m . Výstupní práci určíme ze vztahu $W_v = h f_m = h \frac{c}{\lambda_m} = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{248 \cdot 10^{-9}} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 5 \text{ eV}$.

Ad c) Podle Einsteinovy rovnice fotoefektu bude kinetická energie vypuzeného elektronu rovna rozdílu energie dodané fotonem a výstupní práce. $E_k = h f - W_v = (20 - 8) \cdot 10^{-19} = 12 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Kinetická energie je dána vztahem $E_k = \frac{1}{2} m v^2$, kde v je hledaná rychlost elektronu a m jeho

hmotnost. Vyjádříme si z této rovnice v a dosadíme: $v = \sqrt{\frac{2 E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$

4.4.3 Comptonův jev



1. Uvědomit si, že foton jako částice má nejen energii, ale i hybnost.
2. Vědět, že při srážce fotonu a hmotné částice má rozptýlený foton větší vlnovou délku než dopadající.



Odhadovaný studijní čas je 10 minut.

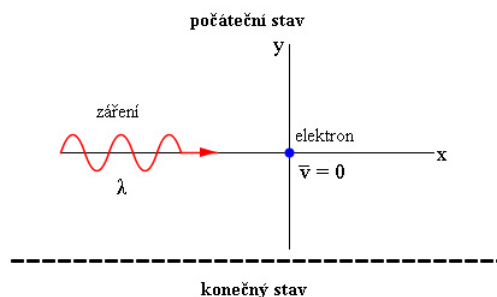


Kvantová povaha záření.



Už v roce 1916 rozšířil Albert Einstein svou hypotézu o fotonu jako kvantu energie o předpoklad, že foton má také definovanou hybnost. Má-li foton hybnost, pak při srážce s jinou částicí může část své hybnosti předat této částici. V mechanice platí zákon zachování hybnosti, ukazuje se, že platí i v této situaci.

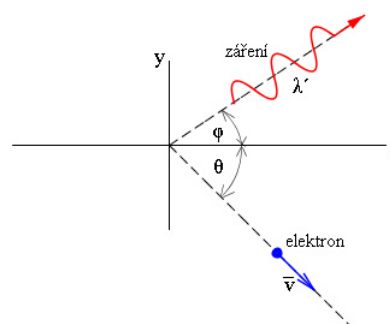
Roku 1923 uskutečnil Arthur Compton řadu pokusů. Zjednodušeně si představme, že nechal dopadat záření fotonů vlnové délky λ a energie hf na elektron, který je v klidu, viz. obr. 65. Musí platit zákon zachování energie – energie fotonu a elektronu před srážkou se musí rovnat energii fotonu a elektronu (kinetická) po srážce.



obr. 65

$$hf = hf' + \frac{1}{2}m_e v^2,$$

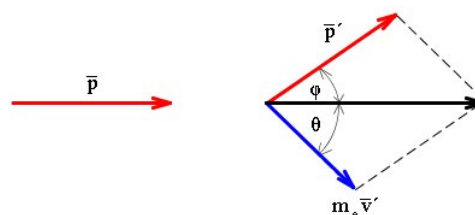
kde m_e je hmotnost elektronu a v jeho rychlost po srážce. Vidíme, že **foton po srážce má menší energii, tedy menší frekvenci – větší vlnovou délku λ'** .



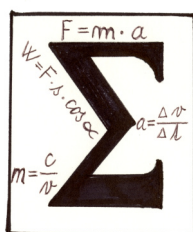
Kde je však zákon zachování hybnosti? Compton při svých pokusech ještě pozoroval, že **změna vlnové délky fotonu po srážce závisí na úhlu φ pod kterým rozptýlený foton pozorujeme**. Vysvětlení tohoto jevu právě poskytuje zákon zachování vektoru hybnosti.

Před srážkou má foton hybnost \vec{p} , hybnost elektronu je nulová, viz. obr. 66. Odchýlený foton po srážce pak má hybnost \vec{p}' , elektron $m_e \vec{v}$. Zákon zachování hybnosti ve vektorovém tvaru teď zní:

$$\vec{p} = m_e \vec{v} + \vec{p}'$$



obr. 66



- Elektromagnetické záření má **současně vlnovou povahu** (interference, difrakce, polarizace) a **kvantovou povahu** – částicovou (fotoelektrický jev).
- Světlo se šíří jako proud částic – **fotonů**.
- Foton přenáší elementární kvantum energie $E = hf = h \frac{c}{\lambda}$, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- Předá-li foton po dopadu na kov svou energii elektronu kovu, může elektron překonat přitažlivé síly mřížky a vystoupit z ní. Předaná energie musí být větší než **výstupní práce** elektronu W_v . Hovoříme o **fotoelektrickém jevu**.

- Fotoelektrický jev popisuje **Einsteinova rovnice fotoefektu**: $hf = W_v + E_k$.
- Comptonův jev popisuje srážku fotonu s elektronem. Odražený foton má menší frekvenci ve srovnání s dopadajícím.

5. Stavba atomu

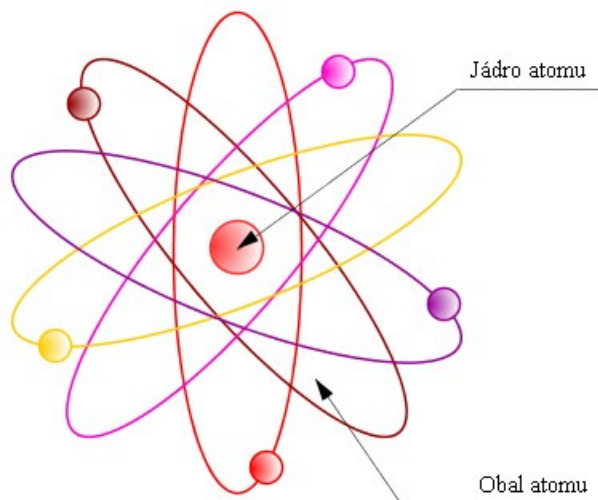
Ještě před 100 let i ve vědeckém světě se pochybovalo o existenci atomů a zejména o jejich dělitelnosti. Nicméně všechny stěžejní vědecké a technické objevy dvacátého století jsou spojeny s rozšiřujícími se znalostmi o struktuře atomu a jeho částí.

Dříve než se začneme zabývat vlastní stavbou atomu shrňme jejich nejdůležitější vlastnosti:

- **Atomy jsou stabilní.** Atomy, které jsou základními stavebními kameny hmotného světa, existují beze změny v celé historii našeho světa.
- **Atomy se sdružují.** Atomy mají schopnost se seskupovat do stabilních molekul (plyny a kapaliny) a vytvářet stabilní struktury (pevné látky).
- **Atomy vyzařují a pohlcují záření.** Záření všech frekvencí jsou vysílána atomy, ať už jednotlivými, nebo sdruženými.

Při zkoumání stavby atomu se nejdříve seznámíme s modely atomu, zajímat nás bude zejména Bohrov model a pak budeme probírat atomové jádro.

5.1. Model atomu



1. Znat základní představy Rutherfordova modelu atomu.
2. Umět charakterizovat čárové a spojité spektrum.
3. Popsat Bohrov model atomu.
4. Umět vyslovit tři základní Bohrovy teze .
5. Znat vztah pro energii stacionárních stavů v závislosti na energii první energetické hladiny.
6. Vysvětlit pojem ionizace atomu.
7. Umět definovat spektrální sérii.



Odhadovaný studijní čas je 20 minut.



Odstředivá síla, síla mezi náboji,



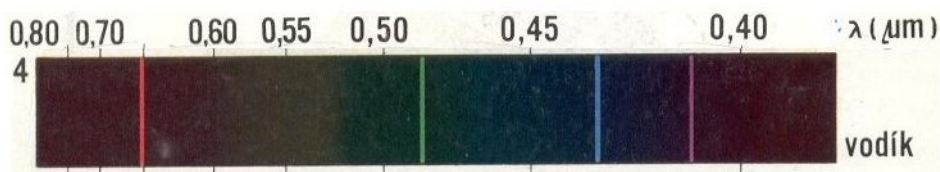
Název atom pochází z antických dob, kdy myšlenka o základním, nedělitelném stavebním prvku hmoty již vznikla. Řecky atomos znamená nedělitelný. Jak se rozvíjely fyzikální představy o světě, tak byly postupně formovány různé teorie a modely struktury atomu.

V roce 1911 vytvořil **Rutherford** na základě vlastních experimentů model atomu. Svá pozorování shrnul do následujících tezí:

- Každý atom se skládá z jádra a elektronového obalu.
- Jádro atomu je mnohem menší než celý atom (později upřesněno na řádově 10^{-15} m, zatímco průměr atomu je řádově 10^{-10} m).
- Jádro atomu má kladný elektrický náboj.
- Elektronový obal má záporný elektrický náboj.
- Atom jako celek je elektricky neutrální.
- V jádře atomu je prakticky soustředěna celá hmotnost atomu.

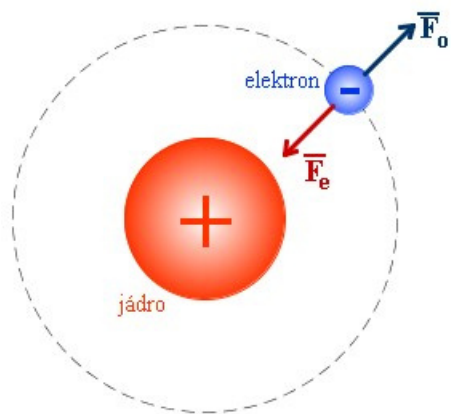
Rutherfordův model atomu vcelku spolehlivě vysvětloval řadu jevů, ale ztroskotal při snaze vysvětlit spektra záření vysílaného prvky.

Již koncem 19. století bylo známo spektrum vodíku. Toto spektrum (jako ostatně každého prvku v plynné formě) je tvořeno souborem ostře ohraničených čar. Hovoříme o **čárovém spektru**. Čárové spektrum je soubor oddělených spektrálních čar vzniklý třeba rozkladem světla hranolem. Každá čára odpovídá monochromatickému světlu jedné frekvence, které je charakteristické pro daný plyn, viz. obr. 1.

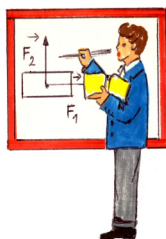


obr. 1

Proč vodík vysílá právě čárové spektrum se podařilo vysvětlit o dva roky později Nielsu Bohrovi, když vytvořil **Bohrův model atomu**. Bohr vycházel z **planetárního modelu atomu Animace1** vodíku, jehož základní schéma je na obr. 2. Elektron krouží na oběžné dráze kolem jádra. Jeho dráha je stabilní, na elektron působí odstředivá síla F_o a přitažlivá síla F_c . Síla F_c je způsobena silovým působením dvou stejně velikých nábojů opačného znaménka, protonu a elektronu (Coulombův zákon). Obě síly jsou stejně veliké, ale opačného směru. Tento stav se označuje jako **stacionární**.



obr. 2



Vypočítejte rychlost oběžného elektronu podle planetárního modelu atomu vodíku na dráze poloměru $r = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$?

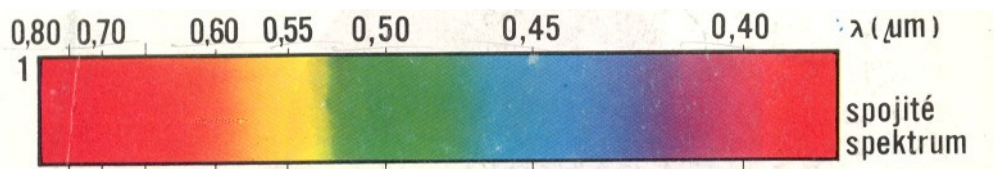
Oběžná rychlost elektronu bude dána rovností odstředivé síly a přitažlivé síly dané přitahováním se dvou nábojů opačného znaménka – protonu v jádře a elektronu v elektronovém obalu.

$$m_e \frac{v^2}{r} = k \frac{Q_e \cdot Q_p}{r^2}. \text{ Za hmotnost elektronu dosadíme hodnotu } m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg, náboje elektronu a protonu jsou stejně veliké (liší se znaménkem) } Q_e = Q_p = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Po dosazení obdržíme vztah: $9,1 \cdot 10^{-31} \frac{v^2}{5 \cdot 10^{-11}} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,602 \cdot 10^{-19})^2}{(5 \cdot 10^{-11})^2}$. Z něj pak vypočtená oběžná rychlost je $v = 2,25 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$.



Podle planetárního modelu celková energie E atomu se může spojitě měnit. Jak by to tedy podle tohoto modelu vypadalo se zářením vodíku? Elektron atomu vodíku by vyzařováním postupně ztrácel svou energii a za zlomek vteřiny by dopadl do jádra – atom by nebyl stabilní. Tomuto způsobu vyzařování by v rozporu se skutečností odpovídalo **spojité spektrum**, ve kterém by byly zastoupeny všechny frekvence, viz. obr. 3.



obr. 3

Ale podle Bohrova modelu energie E_n atomu vodíku ve stacionárním stavu není libovolná:

• Energie atomu může nabývat jen určitých hodnot, je kvantována.

•Existují jen určité energetické stavy atomu, atom se nachází jen na určitých energetických hladinách. System má určitou energii. Říkáme, že system je v určitém energetickém stavu

•Pokud je atom ve stacionárním stavu pak energii ani nepohlcuje, ani nevyzařuje.

Kvantovanou energii stacionárních stavů atomu vodíku E_n je možné vyjádřit pomocí energie E_1 - první, nejnižší energetické hladiny pro $n = 1$:

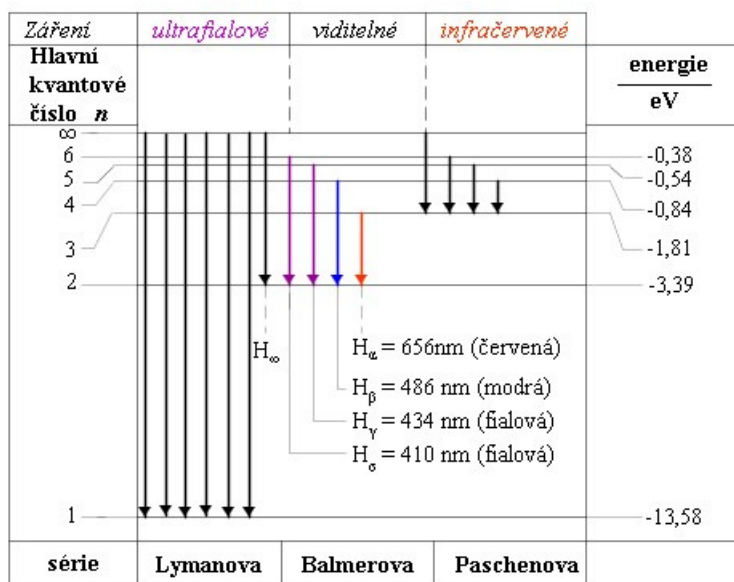
$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Číslo n se nazývá **hlavní kvantové číslo**.

Přejde-li atom ze stacionárního stavu E_n s větší hodnotou kvantového čísla n do stacionárního stavu E_m s menším kvantovým číslem m , atom přebytečnou energii vyzáří ve formě fotonu. Velikost energie vyzářeného fotonu je rovna rozdílu energií obou stacionárních stavů:

$$h \cdot f = E_n - E_m$$

Stacionární energetické stavy atomu dané energiemi elektronů v tzv. **elektronovém obalu atomu** se znázorňují graficky. Na obrázku, viz. obr. 4 jsou znázorněny energetické stavy atomu vodíku. Elektron (vodík má jen jeden) je za normálních podmínek ve stavu charakterizovaném hlavním kvantovým číslem $n = 1$ (má nejnižší možnou energii). Tomuto stavu říkáme **základní stav**. Elektron elektronového obalu vodíku má v základním stavu energii $-13,58$ eV. Tato energie je záporná – elektron je v atomu vázán.



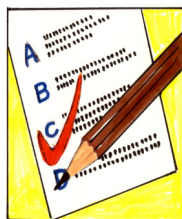
obr. 4

Abychom elektron z atomu uvolnili, překonali přitažlivé síly, které jej poutají k atomu, musíme minimálně tuto energii dodat z vnějšku. Pak elektron již není poután v atomu, – hovoříme o **volném elektronu**. Říkáme, že došlo k **ionizaci** atomu – z neutrálního atomu vznikl kladný iont – jádro a záporný elektron. energii nutnou k ionizaci atomu označujeme jako **ionizační energie**.

Pokud dodáme elektronu menší energii, pak se dostane na energetickou hladinu odpovídající některému vyššímu hlavnímu kvantovému číslu. Nyní hovoříme o tom, že atom je ve **vybuzeném** (excitovaném) stavu ($n > 1$). Tato situace je však nestabilní, elektron se samovolně vrací do stavu s nižší energií. Tímto procesem ztrácí energii rovnou rozdílu energií obou stavů, kterou vyzáří ve formě fotonu. A to je vlastně **princip vzniku čárového spektra**.

Vraťme se ještě k obrázku energetických hladin vodíku. Vidíme, že spektra jsou rozdělena do skupin označovaných jako **série**. Pro jednotlivé série je charakteristické, že excitované elektrony se „vracejí“ vždy na jednu energetickou hladinu. Série byly pojmenovány podle

svých objevitelů (jména ve spodní části obrázku, viz. obr. 4). Ve viditelné části spektra se nachází Balmerova spektrální série vždy končící na hlavním kvantovém čísle $n = 2$.

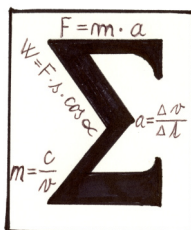


KO5.1-1. Může být náboj jádra atomu co do velikosti jiný než celkový náboj elektronového obalu tohoto atomu?

KO5.1-2. Může při změnách energie atomu vznikat i jiné záření než světelné?

KO5.1-3. Určete rozdíl energetických hladin při vyzáření fotonu vlnové délky 656 nm v Balmerově sérii.

KO5.1-4. Určete ionizační energii atomu vodíku.



- **Atom se skládá z jádra a elektronového obalu.** Jádro atomu je mnohem menší než celý atom, je v něm soustředěna téměř celá hmotnost atomu a má kladný elektrický náboj. Elektronový obal má záporný elektrický náboj. Atom jako celek je elektricky neutrální.
- **Bohrův model atomu vodíku** vychází z planetárního modelu, kde elektron krouží na oběžné dráze kolem jádra.
 - **Energie atomu** na oběžné dráze může nabývat jen určitých hodnot, **je kvantována**.
 - Existují jen určité **energetické stavy**⁴⁾ atomu, elektrony atomu se nachází jen na určitých energetických hladinách.
 - energii odpovídající hlavnímu kvantovému číslu n můžeme vyjádřit pomocí první, nejnižší energetické hladiny E_1 :

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- **Pokud je atom ve stacionárním stavu, pak energii ani nepohlcuje, ani nevyzařuje.**
- **Přejde-li atom z vyššího stacionárního stavu E_n do nižšího stavu E_m , vyzáří rozdíl energií ve formě fotonu s energií:**

$$h \cdot f = E_n - E_m$$

- **Dodáme-li elektronu energii větší, než odpovídá jeho stacionárnímu stavu (ionizační energii), elektron se uvolní z atomu – dojde k ionizaci atomu.**

5.2. Atomové jádro

Jádrem atomu se zabývá fyzikální disciplína označovaná jako fyzika atomového jádra – jaderná, nebo nukleární fyzika. Toto odvětví fyziky zkoumá složení a strukturu jader atomů, zákonitosti jaderných dějů a jejich praktické aplikace.



1. Vědět z čeho se jádro skládá, znát význam nukleonového A , neutronového N a protonového Z čísla, znát vztah mezi nimi.
2. Umět objasnit rozdíl mezi pojmy neklid a izotop.
3. Umět zapsat izotop prvku pomocí protonového a nukleonového čísla, vědět, jak je stanovíme z Mendělejevovy tabulky.
4. Vysvětlit pojmy jaderné síly a vazebná energie jádra.
5. Umět vyjádřit hmotnostní schodek a pomocí něho určit vazebnou energii jádra.
6. Znat vztah pro vazebnou energii na jeden nukleon, vysvětlit význam této veličiny pro stabilitu jader.



Odhadovaný studijní čas je 30 minut.

Klidová hmotnost, Mendělejevova periodická tabulka prvků, Einsteinův vztah mezi energií a hmotností.



Jádro atomu zaujímá centrální část atomu velikosti řádově 10^{-15} m. Všechna jádra mají stejné stavební kameny – jaderné částice označované jako **nukleony**. Nukleony jsou dvojího druhu – protony a neutrony.

Proton je částice s kladným elektrickým nábojem stejně velikým jako je elektrický náboj elektronu, t.j. $+1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Proton je „těžká“ částice, jeho klidová hmotnost je $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg. Pojem klidová hmotnost je z relativistické fyziky. Vyjadřuje hmotnost objektu, který je v klidu, nebo se pohybuje malou rychlostí.

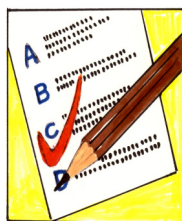
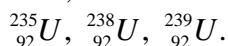
Neutron, jak už název naznačuje, je částice bez elektrického náboje. Jeho klidová hmotnost je téměř shodná s hmotností protonu, $m_n = 1,674 \cdot 10^{-27}$ kg.

Kolik protonů, neutronů a elektronů obsahuje konkrétní atom prvku můžeme vyčíst z Mendělejevovy periodické tabulky prvků. Mendělejev sestavil chemické prvky X podle vzrůstajícího pořadového čísla Z , které vyjadřuje počet protonů, hovoříme o **protonovém čísle** (v tabulce tučně vlevo dole u symbolu prvku). Číslo Z současně určuje i počet elektronů

v elektronovém obalu atomu. Dalším číslem charakterizujícím prvek je **neutronové číslo** N určující počet neutronů v jádře. Součet neutronového a protonového čísla udává počet nukleonů v jádře – **nukleonové číslo** A . $A = N + Z$. Nukleonové číslo také můžeme vyčíst z Mendělejevovy tabulky. Nukleonové číslo je rovno celistvé části relativní atomové hmotnosti v tabulce umístěné v levém horním rohu.

Chemické prvky se pak označují pomocí těchto čísel: ${}^A_Z X$. Tak třeba zápis ${}^{16}_8 O$ označuje kyslík, který má 16 nukleonů, z toho 8 protonů a stejný počet elektronů. Neutronů je pak také 8.

Tímto způsobem označujeme nejen jádro, ale i atom, nebo i látku složenou ze stejných atomů - **nuklid**. Můžeme se setkat s více nuklidy jednoho prvku. Tyto nuklidy mají stejné protonové číslo, liší se nukleonovým číslem a označují se jako **izotopy**. Nejznámější jsou izotopy uranu



KO5.2-5. Můžeme zapsat pomocí zápisu pro prvek s jeho nukleony také proton, neutron i elektron?

KO5.2-6. Izotop určitého prvku se liší počtem:

- a) protonů v jádře
- b) neutronů v jádře
- c) elektronů v obalu

KO5.2-7. Uvažujte izotop vodíku 3_1H . Kolik obsahuje jádro neutronů?

- a) 0
- b) 1
- c) 2
- d) 3

PERIODICKÁ SOUSTAVA PRVKŮ

	ns		(n-2)f						(n-1)d		np							
a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
b	I. A	II. A	III. A	IV. A	V. A	VI. A	VII. A	VIII. A	VIII. A	VIII. A	I. B	II. B	III. B	IV. B	V. B	VI. B	VII. B	VIII. B
c	I. A	II. A	III. B	IV. B	V. B	VI. B	VII. B	VIII. B	VIII. B	VIII. B	I. B	II. B	III. A	IV. A	V. A	VI. A	VII. A	VIII. A

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1.008 2.18 1 H Hydrogenium	6.94 4.1 3 Li Lithium	9.01 1.5 4 Be Beryllium	12.01 1.2 11 Na Natrium	22.99 0.9 12 Mg Magnesium	28.09 0.8 19 K Kalium	39.10 0.9 20 Ca Calcium	47.88 1.0 21 Sc Scandium	50.94 1.0 22 Ti Titanium	52.00 1.0 23 V Vanadium	54.94 1.0 24 Cr Chrom	55.85 1.0 25 Mn Mangan	55.85 1.0 26 Fe Železo	58.93 1.0 27 Co Kobalt	58.93 1.0 28 Ni Nikl	63.55 1.0 29 Cu Měď	65.38 1.0 30 Zn Zinek	69.72 1.0 31 Ga Galium	72.64 1.0 32 Ge Germanium
skupenství prvku (při 20° C)	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné	pevné
relativní atomová hmotnost	1.008	7.016	9.012	22.989	39.098	40.078	47.88	50.942	52.00	54.938	55.845	55.845	58.933	58.933	63.546	65.38	69.723	72.64
protonové číslo	1	3	4	12	20	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
čísly název prvku	Hydrogenium	Lithium	Beryllium	Natrium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chrom	Mangan	Železo	Kobalt	Nikl	Měď	Zinek	Galium	Germanium	
latinský název prvku	Hydrogenium	Lithium	Beryllium	Natrium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chrom	Mangan	Železo	Kobalt	Nikl	Měď	Zinek	Galium	Germanium	
radioaktivní prvky																		
oxidací čísla																		
značka (symbol)	H	Li	Be	Na	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	

3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
86.91 0.8 37 Rb Rubidium	85.47 0.8 38 Sr Strontium	132.91 0.7 87 Fr Francium	137.34 0.9 88 Ra Radium	138.91 1.1 55 Cs Cesium	137.34 0.9 56 Ba Baryum	173.04 1.1 57 La Lanthanum	174.97 1.1 72 Hf Hafnium	178.49 1.4 73 Ta Tantalum	180.95 1.7 74 W Wolfram	183.85 2.0 75 Re Rhenium	186.21 2.2 76 Os Osmium	188.91 2.1 77 Ir Iridium	190.23 2.1 78 Pt Platina	192.22 2.1 79 Au Zlato	195.08 2.2 80 Hg Rtuť
relativní atomová hmotnost	85.468	87.62	223	226	138.905	174.967	178.49	180.948	183.84	186.207	188.905	190.224	192.222	195.084	198.906
protonové číslo	37	38	87	88	55	56	72	73	74	75	76	77	78	79	80
čísly název prvku	Rubidium	Strontium	Francium	Radium	Cesium	Baryum	Hafnium	Tantalum	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platina	Zlato	Rtuť
latinský název prvku	Rubidium	Strontium	Francium	Radium	Cesium	Baryum	Hafnium	Tantalum	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platina	Zlato	Rtuť
radioaktivní prvky															
oxidací čísla															
značka (symbol)	Rb	Sr	Fr	Ra	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg

6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
132.91 0.7 87 Fr Francium	223.02 1.1 88 Ra Radium	227.03 0.9 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium	227.03 1.1 89 Ac Aktinium
relativní atomová hmotnost	226	227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	227
protonové číslo	88	88	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
čísly název prvku	Radium	Radium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium
latinský název prvku	Radium	Radium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium	Aktinium
radioaktivní prvky												
oxidací čísla												
značka (symbol)	Ra	Ra	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac

alkalické kovy
vzácné plyny
kovy alkalických zemin
halogeny
chalkogeny
trída železa
lehké platinové kovy
těžké platinové kovy

© IUPAC 1988

© IUPAC 1970

© CAS 1986 (Chemical Abstracts Service)

KO5.2-8. Uvažujte izotop vodíku ${}^3_1\text{H}$. Kolik obsahuje jádro elektronů?

- a) 0
- b) 1
- c) 2
- d) 3

KO5.2-9. Uvažujte izotop vodíku ${}^3_1\text{H}$. Kolik obsahuje jádro protonů?

- a) 0
- b) 1
- c) 2
- d) 3



U5.2-10. Doplňte neznámé údaje u nuklidů ${}^A_{13}\text{Al}$, ${}^{28}_Z\text{Si}$, ${}^{107}_{47}\text{X}$.



Jádro atomu obsahuje vedle neutronů i elektricky nabitě částice – protony. Tyto kladně nabitě částice jsou soustředěny ve velmi malém objemu jádra - poloměr jádra je řádově 10^{-15}m . Jako všechny objekty nabitě nábojem stejného znaménka se protony odpuzují. Odpudivé elektrické síly na tak malé vzdálenosti jsou obrovské. A přesto za normálních podmínek jádro drží pohromadě. Musí tedy v jádře působit ještě další síly – síly přitažlivé. Těmto silám se říká **síly jaderné** a jsou značně větší než síly elektrické.

Jaderné síly jsou přitažlivé, působí stejně na protony i neutrony. Jejich působnost je omezena jen na oblast jádra atomu, tedy na krátkou vzdálenost.

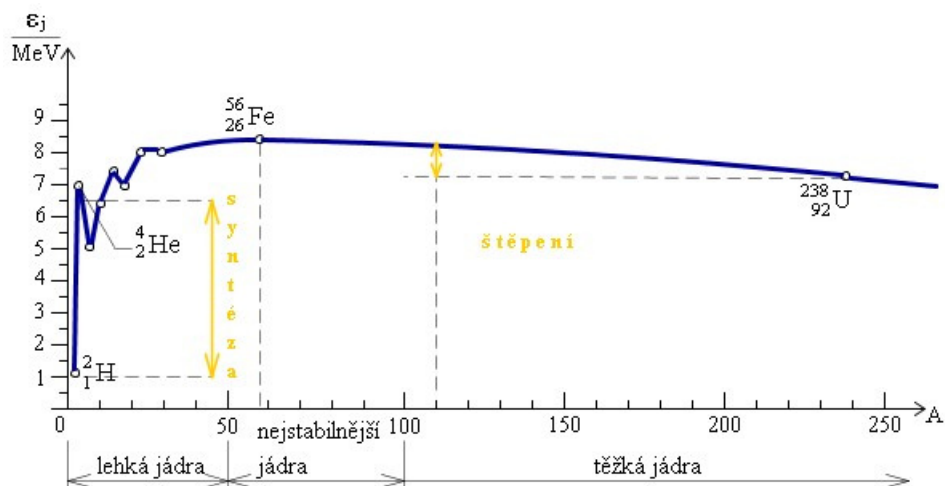
Celkovou energii poutající nukleony v jádře a na druhé straně nutnou k „rozbití“ jádra na jednotlivé nukleony nazýváme **vazebná energie jádra**. Definujeme ji jako rozdíl mezi energií jednotlivých nukleonů a jejich energií, jsou-li vázány v jádře. Nejedná se však o energii mechanickou, ale o energii danou Einsteinovým vztahem mezi energií a hmotností $E = m \cdot c^2$.

Sečteme-li celkovou energii samostatných nukleonů daného jádra $E_n = (Zm_p + Nm_n)c^2$ a srovnáme s celkovou energií jádra jako celku $E_c = m_j c^2$, zjistíme, že tyto energie se liší a to právě o vazebnou energii jádra $E_j = E_n - E_c$. Rozdíl je dán rozdílem hmotností, který označujeme jako **hmotnostní schodek** jádra B .

Vazebná energie jádra jednotlivých prvků a jejich nuklidů se liší a pro jejich srovnání se užívá **vazebná energie na jeden nukleon** ϵ_j :

$$\varepsilon_j = \frac{E_j}{A}$$

Čím je větší vazebná energie na jeden nukleon, tím je prvek stabilnější – nemá snahu se rozpadat (těžší jádra), nebo slučovat (lehká jádra). Podíváme-li se na křivku závislosti vazebné energie na nukleon na nukleonovém čísle, viz. obr. 6, vidíme, že nejstabilnější jsou prvky v blízkosti železa.

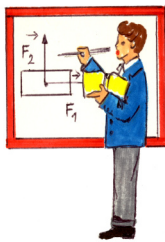


obr. 6

Klidové hmotnosti nukleonů a atomů jsou velmi malé, proto se častěji používá vedlejší **hmotnostní jednotka** $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg. Hmotnostní jednotka u je definována jako jedna dvanáctina hmotnosti nejrozšířenějšího izotopu uhlíku $^{12}_6\text{C}$, $u = 1,660\,53 \cdot 10^{-27}$ kg. Klidové hmotnosti vybraných částic, a jejich energetické ekvivalenty najdete v následující tabulce.

Hmotnosti částic a jejich energetické ekvivalenty

Částice	Symbol	Hmotnost		Energetický ekvivalent (MeV)
		(kg)	(u)	
elektron	e	$9,110 \times 10^{-31}$	0,000 549	0,511
proton	p	$1,673 \times 10^{-27}$	1,007 276	938,28
neutron	n	$1,675 \times 10^{-27}$	1,008 665	939,57
deuteron	d	$3,344 \times 10^{-27}$	2,013 553	1 875,62
α částice	α	$6,647 \times 10^{-27}$	4,003 603	3 728,42



Určete vazebnou energii jádra deuteria.

Deuterium je „těžký vodík“. V tabulce si najdeme, že normální izotop vodíku má v jádře jeden proton ${}^1_1\text{H}$, deuterium má v jádře navíc jeden neutron ${}^2_1\text{H}$. V tabulce si dále najdeme, že hmotnost jádra deuteria je $m_D = 2,013553 u$, hmotnost jádra vodíku (protonu) je $m_H = 1,007276 u$ a hmotnost neutronu je $m_n = 1,008665 u$.

Dosadíme do vztahu pro hmotnostní schodek B :

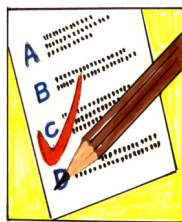
$$B = 1.1,007276 u + 1.1,008665 u - 2,013553 u = 0,002388 u = 0,003965 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Nyní dosadíme do Einsteinova vztahu ekvivalence hmotnosti a energie $E = m \cdot c^2$.

$$E_j = 0,003965 \cdot 10^{-27} \cdot (2,997925 \cdot 10^8)^2 = 3,56 \cdot 10^{-13} \text{ J}.$$

A konečně tato vazebná energie deuteria vyjádřená v jednotkách eV je

$$E_j = \frac{3,56 \cdot 10^{-13}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,23 \text{ MeV}.$$



KO5.2-11. Označíme m_p a m_n klidové hmotnosti protonu a neutronu. Vyjádřete součet hmotností všech protonů a neutronů obsažených v jádře izotopu ${}^A_Z X$.

- a) $Zm_p + Am_n$
b) $A(m_p + m_n)$

c) $Zm_p + (A - Z)m_n$

d) $Zm_n + (A - Z)m_p$.

KO5.2-12. Je-li hmotnostní schodek jádra B (kg), je vazebná energie tohoto jádra:

a) Bc^2 (J)

b) Bc^2 (MeV)

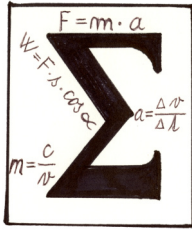
c) B/c^2 (J)

d) B/c^2 (MeV)



U5.2-13. Vypočítejte energetický ekvivalent hmotnostní jednotky u .

U5.2-14. Vypočítejte vazebnou energii izotopu uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$. Hmotnost jádra tohoto izotopu je $235,043925 u$.



- Jádru atomů se skládá z **protonů** a **neutronů** souhrnně označovaných jako **nukleony**.
- Počet protonů v jádře chemického prvku X vyjadřujeme **protonovým číslem** Z , počet neutronů **neutronovým číslem** N , počet nukleonů **nukleonovým číslem** A . Chemický prvek, ale i látku složenou z více atomů tohoto prvku – nuklid – označujeme symbolem ${}^A_Z X$.
- Nuklidy se stejným protonovým ale s různým nukleonovým číslem označujeme jako **izotopy**.
- Nuklidy jsou v jádře drženy **jadernými silami**. Celkovou energii poutající nukleony v jádře nazýváme **vazebná energie jádra**.
- Vazebnou energii jádra E_j vypočítáme pomocí **hmotnostního schodku** B :

$$E_j = (Zm_p + Nm_n - m_j) c^2 = B c^2$$
- Měřítkem stability jádra je vazebná energie připadající na jeden nukleon $\varepsilon_j = \frac{E_j}{A}$.

5.3. Radioaktivita

V souvislosti se stavem životního prostředí se často hovoří o nebezpečí neviditelných záření pro živý organismus. Nemusí se jednat pouze o havárie jaderných elektráren či dokonce výbuchy atomových bomb. Faktem je, že celá řada prvků vyskytujících se běžně v přírodě (uran, radon, cesium apod.) vyzařuje tzv. radioaktivní záření. Toto záření při překročení známých limitů může být životu nebezpečné.



1. Popsat děj zvaný radioaktivita.
2. Charakterizovat jaderná záření α , β , γ .
3. Rozlišit jejich nebezpečnost pro živý organismus.
4. Umět napsat rovnice jaderných přeměn.
5. Znat nazpaměť matematické vyjádření zákona radioaktivní přeměny.
6. Umět určit souvislost mezi poločasem přeměny a přeměnovou konstantou.
7. Definovat aktivitu a znát její jednotku.



Odhadovaný studijní čas je 30 minut.

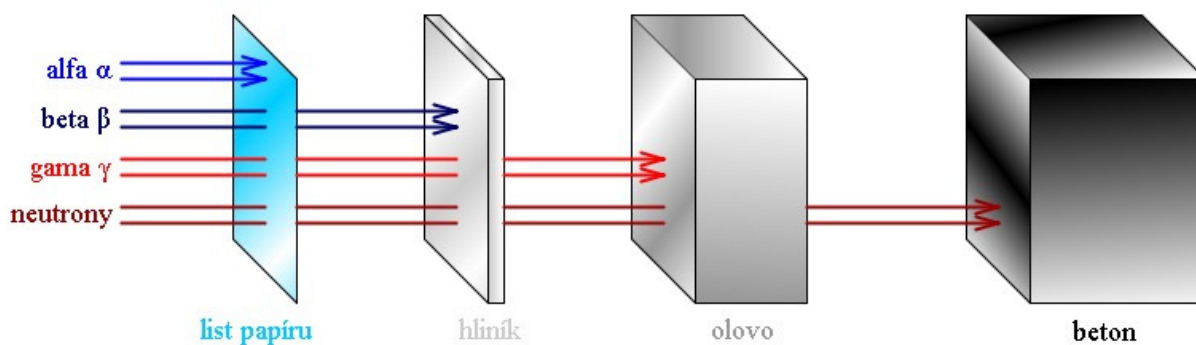


Ne všechny prvky Mendělejevovy tabulky a jejich izotopy mají stabilní jádra. Tyto nuklidy se snaží dosáhnout stability vyzařováním přebytečné energie ve formě **jaderného záření**. Celý tento jaderný děj se označuje jako **radioaktivita**. **Přírozenou radioaktivitu** projevuje kolem padesáti v přírodě nalezených radioaktivních prvků – **radionuklidů**. Umělou radioaktivitu pak vykazují radionuklidy vyrobené člověkem (již kolem 1000).

Jaderné záření je trojího druhu:

- **Záření α** je tvořeno proudem alfa částic tvořených dvěma protony a dvěma neutrony (vlastně se jedná o jádro helia). Tato kladně nabitá částice je relativně těžká, ale protože má velkou rychlost má i velkou energii (hlavně kinetickou). Alfa částice je svou velikostí a hmotností srovnatelná s atomovými jádry látky, kterou procházejí a při vzájemných srážkách rychle ztrácí svou energii.
- **Záření β** je proud elektronů (beta částic). Elektrony by neměly v jádře být, vznikají v něm přeměnou jaderného neutronu na proton a elektron. β částice mají také velkou energii, srovnatelnou s energií alfa částice. Ale protože jsou podstatně lehčí, musejí mít velkou rychlost (blíží se rychlosti světla). Pronikavost beta částic je větší než alfa částic.
- **Záření γ** je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou kratší než má rentgenovo záření ($\lambda < 10^{-11}\text{m}$). Foton tohoto záření má vysokou energii a proto gama záření je velmi pronikavé.

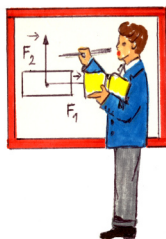
Jaderné záření při průchodu látkou s ní interaguje. Jednak se projevují chemické účinky, hlavně však dochází k ionizaci látky, případně ke změně její struktury. Zvláště zranitelné jsou zárodky živé buňky, krev a kostní dřeň. Nejjednodušší **ochranou** je jaderné záření odstínit jinou látkou. Alfa částice je látkou rychle pohlcena, zadrží ji list papíru, ve vzduchu je pohlcena po několika centimetrech. β částice již odstíníme hliníkovou destičkou tloušťky 3mm. Před nejpronikavějším γ zářením se musíme chránit silnou vrstvou materiálu, hlavně se používá olovo. Pronikavost různých druhů radioaktivního záření vidíme na obr. 7.



obr. 7

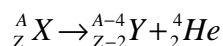
Vznik jaderného záření je spojen se změnami ve struktuře jader atomů. Tyto **jaderné přeměny** vedou k přeměně izotopu jednoho prvku v izotop jiného prvku. Vzniká-li při

přeměně α záření, hovoříme o α rozpadu, β záření vzniká při β rozpadu. γ rozpad neexistuje, γ záření pouze doprovází α a β rozpad.



Napište obecné rovnice přeměny prvku X v prvek Y rozpadem α a β .

U α rozpadu se uvolňuje z jádra α částice – jádro helia. Vzniklý prvek musí mít o dva protony a o 4 nukleony méně. Rovnice popisující α rozpad bude mít tedy tvar:



U β rozpadu se v jádře přemění neutron v proton a vyzáří se elektron. Počet nukleonů zůstane tedy stejný, ale počet protonů se o jeden zvýší. Rovnice rozpadu bude vypadat:

${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$, symbol $\bar{\nu}$ se používá pro označení elementární částice antineutrino, která také při tomto rozpadu vzniká.



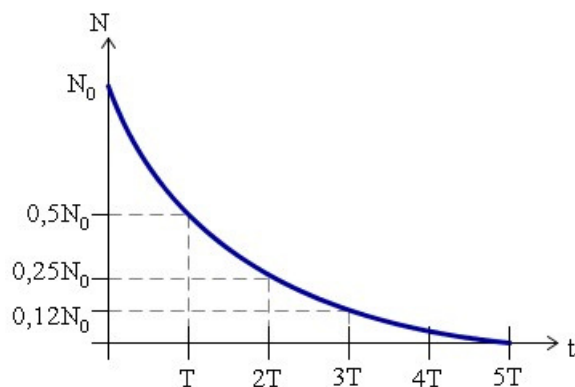
U5.3-15. Určete *který prvek vzniká α rozpadem nuklidu uranu ${}^{238}_{92} \text{U}$?*



Jak budou probíhat radioaktivní přeměny, bude se snižovat počet původních, nepřeměněných jader radionuklidu N . Tento počet bude záviset na původním počtu N_0 jader a bude klesat s běžícím časem t podle exponenciální křivky vyjádřené **zákonem radioaktivní přeměny**:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Veličina λ je **přeměnová konstanta** pro daný druh jader. Graficky je časová závislost radioaktivních přeměn znázorněna na obrázku, viz. obr. 8.



obr. 8

V grafu je čas vynesena pomocí T . Tímto symbolem označujeme **poločas přeměny**. Je to doba, za kterou se rozpadne polovina původního počtu jader.



U5.3-16. Určete souvislost mezi poločasem přeměny a přeměnovou konstantou.



Poločas přeměny radionuklidu je velice důležitá konstanta. Ukazuje nám jak rychle se neklid rozpadá, jak dlouho vyzařuje nebezpečné radioaktivní záření. Pro představu se podívejte na tabulku poločasů rozpadů vybraných radionuklidů. Nejnebezpečnější jsou nuklidy s dlouhým poločasem.

Tabulka poločasů rozpadů vybraných radionuklidů

Izotopy uranu		$A = 140$ až 190		Průmyslové zářiče	
A	T	izotopy	T	izotopy	T
227	1,1 min				
228	9,1 min	^{146}Sm	$1,03 \cdot 10^8$ roků	^{238}Pu	87,74 roků
229	min	^{142}Ce	$> 5 \cdot 10^{16}$ roků	^{239}Pu	$2,44 \cdot 10^4$ roků
230	0,8 dne	^{144}Nd	$2,1 \cdot 10^{15}$ roků	^{239}Np	2,35 dne
232	roků	^{150}Gd	$1,8 \cdot 10^6$ roků	^{232}Th	$1,1 \cdot 10^{10}$ roků
233	$1,6 \cdot 10^5$ roků	^{152}Gd	$1,1 \cdot 10^{14}$ roků	^{226}Ra	$1,6 \cdot 10^3$ roků
234	$2,45 \cdot 10^5$ roků	^{156}Yb	24 s	^{210}Po	138,38 dne
235	$7,04 \cdot 10^8$ roků	^{174}Hf	$2,0 \cdot 10^{15}$ roků		
236	$2,34 \cdot 10^7$ roků	^{185}Au	4,3 min		
238	$4,47 \cdot 10^9$ roků				

Z hlediska bezpečnosti je důležitá **aktivita** A zdroje jaderného záření. Aktivitu určujeme počtem jader radionuklidu ΔN , které se za jednotku času Δt přemění a vyšlou částici daného záření.

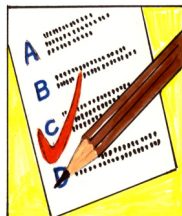
$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

Jednotkou aktivity je becquerel (Bq), který odpovídá jedné přeměně za 1s.

Pro aktivitu platí také exponenciální zákon závislosti na čase.

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

kde počáteční aktivita A_0 je dána výrazem $A_0 = \lambda \cdot N_0$.



KO5.3-17. α záření je proud:

- | | |
|-------------|--------------------|
| a) neutronů | b) elektronů |
| c) fotonů | d) heliových jader |

KO5.3-18. β záření je proud:

- | | |
|-------------|--------------------|
| a) neutronů | b) elektronů |
| c) fotonů | d) heliových jader |

KO5.3-19. γ záření je proud:

- | | |
|-------------|---------------------|
| a) neutronů | b) elektronů |
| c) fotonů | d) heliových jader. |

KO5.3-20. Přeměnovou konstantu vyjadřujeme v :

- | | |
|-------------|-----------------------------|
| a) s^{-1} | b) Ci |
| c) Bq | d) je to bezrozměrné číslo. |

KO5.3-21. Mezi přeměnovou konstantou λ a poločasem rozpadu T radioaktivní látky platí vztah $T =$

- | | |
|----------------------|------------------------|
| a) $\ln 2 / \lambda$ | b) $0,693 \lambda$ |
| c) $\lambda / 0,693$ | d) $\lambda / \ln 2$. |

KO5.3-22. Poločas rozpadu radioaktivního izotopu fosforu je 14 dní. Kolik procent jader izotopu se rozpadne za 28 dní?

- | | |
|-------|--------|
| a) 25 | b) 50 |
| c) 75 | d) 100 |

KO5.3-23. Radioaktivní látka, jejíž přeměnová konstanta je λ , obsahuje v čase t N jader. Za čas Δt se jich rozpadne ΔN . Aktivita tohoto radionuklidu je:

- | | |
|-------------------|--|
| a) λN | b) $\Delta N / \Delta t$ |
| c) $\Delta N / N$ | d) $-\lambda \cdot N \cdot \Delta t$. |

KO5.3-24. Jednotkou aktivity je becquerel. $Bq =$

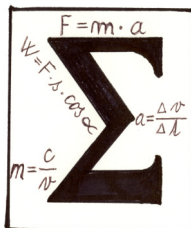
- | | |
|-------------|------|
| a) s^{-1} | b) s |
|-------------|------|

c) $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

d) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.



U5.3-25. 1 gram preparátu ^{238}U vysílá $1,24 \cdot 10^4$ α částic za sekundu. *Jaká je aktivita tohoto preparátu?*



- **Radioaktivita** je jaderný děj, při kterém jádro dosahuje stability vyzařováním přebytečné energie.
- **Záření α** je proud alfa částic tvořených dvěma protony a dvěma neutrony (jádro helia).
- **Záření β** je proud elektronů (beta částic).
- **Záření γ** je elektromagnetické vlnění s velmi malou vlnovou délkou.
- Nejjednodušší **ochranou** před radioaktivním zářením je odstínit ho absorbující látkou.
- Rozpad jader charakterizuje **zákon radioaktivní přeměny**: $N = N_0 e^{-\lambda t}$.
- Důležitými parametry látky jsou **přeměnová konstanta λ** a **poločas rozpadu T** .
- **Aktivita** zdroje záření je rychlost rozpadu jader.

5.4. Jaderné reakce

Základem jaderné energetiky, ale bohužel i jaderných zbraní jsou jaderné reakce. Tyto reakce jsou spojené s částečným uvolňováním energie ukryté v jádře atomu. V případě, že člověk ovládá toto uvolňování řízeným procesem, je možné jadernou energii přeměnit v jinou formu energie – například v energii elektrickou. V opačném případě, při nekontrolovatelném uvolnění této energie, dochází k jadernému výbuchu, viz. obr. 9.



obr. 9



1. Popsat jadernou reakci slovy i symbolickou rovnicí.
2. Znat hlavní zákony platné při jaderných reakcích.
3. Rozlišit jadernou syntézu a jaderný rozpad.
4. Umět popsat schéma rozpadu uranu.
5. Popsat jednotlivé části jaderného reaktoru, vysvětlit jejich funkci.



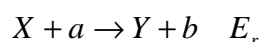
Odhadovaný studijní čas je 30 minut.



Vysvětleme si nejdříve rozdíl mezi jadernou reakcí a radioaktivitou. Začneme od druhého pojmu. V předešlé kapitole jsme si řekli, že radioaktivita je jaderný děj, při kterém se jádra snaží dosáhnout stability vyzařováním přebytečné energie ve formě jaderného záření.

Jaderné reakce jsou opět jaderné děje, přesněji řečeno **jaderné přeměny**. K těmto přeměnám dochází při vzájemných střetech jader, nebo při střetech jader s různými částicemi.

Jadernou reakci můžeme zapsat pomocí symbolické rovnice:



Jako X je označeno jádro atomu, které je „ostřelováno“ částicí a . Y je pak nově vzniklé jádro a b je jiná částice vzniklá při reakci. Symbolem E_r je označena **energie jaderné reakce**.

Energie jaderné reakce je záporná $E_r < 0$, tato energie se při reakci uvolňuje. Tato energie se projevuje zejména jako kinetická energie produktů reakce Y a b a můžeme ji využít.

Při jaderných reakcích platí zákony zachování, zejména:

- Zákon zachování celkové energie částic účastnících se reakce (včetně relativistické energie m_0c^2).
- Zákon zachování elektrického náboje.
- Zákon zachování počtu nukleonů.



U5.4-26. Zapište zákon zachování celkové energie ve tvaru rovnice. Levá strana bude vyjadřovat celkovou energii jádra X a částice a před reakcí, pravá strana pak celkovou energii jádra Y a částice b po reakci.

U5.4-27. Zapište zákon zachování počtu nukleonů ve tvaru rovnice. Levá strana bude vyjadřovat počet nukleonů jádra X a částice a před reakcí, pravá strana pak počet nukleonů jádra Y a částice b po reakci.

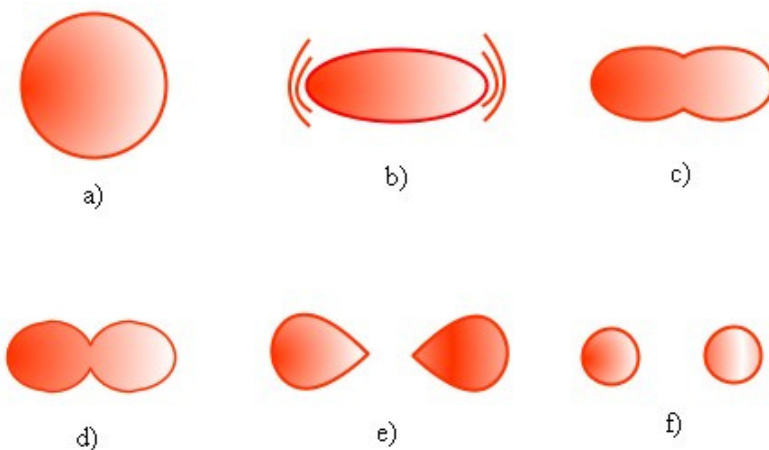


Jaderné reakce můžeme rozdělit na dva zcela odlišné typy:

- **Jaderná syntéza** při které složením dvou lehčích jader vznikne jádro těžší. Toto těžší jádro má větší vazebnou energii na jeden nukleon. Při reakci se uvolňuje energie.
- **Štěpení jader**, nebo také **jaderný rozpad** je opačný proces, kdy se těžké jádro (velká vazebná energie na jeden nukleon) rozpadá na dvě, nebo více jader a částic. A opět se uvolňuje energie.

Jaderná syntéza se jeví jako vynikající zdroj energie. Syntéza jader probíhá např. v nitru našeho Slunce, které tak vyzařuje energii s výkonem kolem $4 \cdot 10^{26}$ W. Zde probíhá termojaderná fúze, kde se „spaluje“ vodík na helium tak zvaným proton – protonovým cyklem při současném vývinu obrovské energie.

V pozemních podmínkách se již také podařilo v laboratořích realizovat proton – protonový cyklus. Nicméně energie nutná k „nastartování“ tohoto děje je prozatím podstatně větší než energie získaná tímto procesem. A přitom by se jednalo o velice ekologický proces, „palivem“ je vodík v přírodě hojně zastoupený a „popel“ pak neškodné helium.



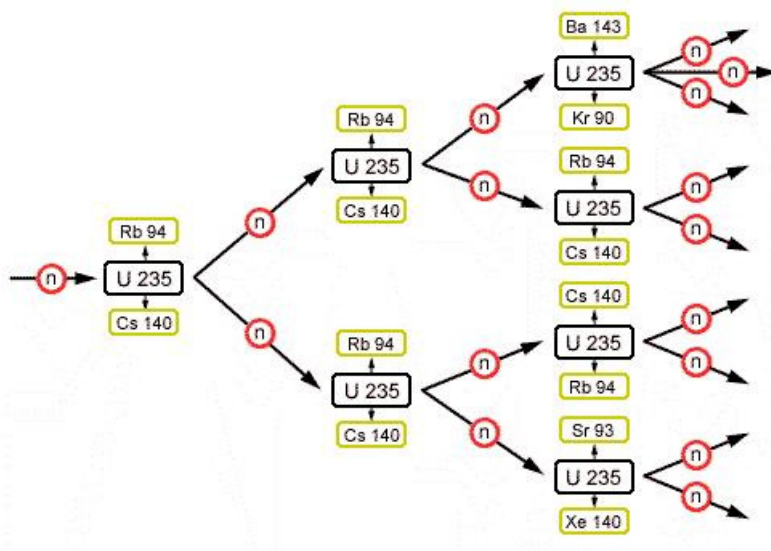
obr. 10

Pro současnou jadernou energetiku má větší význam štěpení jader. Prudký rozvoj poznatků o štěpení jader přinesla třicátá léta dvacátého století. Nejdříve Ital Fermi poukázal na neutrony jako vhodné částice k „bombardování“ těžkých prvků. Pak němečtí fyzici Meitnerová, Hahn a

Strassmann ostřelovali uranové soli neutrony a pozorovali vznik mnoha nových nukleonů. Jedním z nich bylo i baryum. Rozbitím uranu ($Z = 92$) vzniklo baryum ($Z = 56$).

Štěpení uranu je důsledkem pohlcení neutronu jádrem. Schematicky jsou jednotlivé fáze tohoto procesu naznačeny na obr. 10. Uran ^{235}U pohltí neutron (obr.a). Vznikne jiný izotop uranu ^{236}U , který má nadbytek energie a začne oscilovat (obr. b). Jaderné síly, které působí na krátkou vzdálenost se naruší a vznikne útvar s úzkým hrdlem (obr. c). Elektrostatické síly (Coulombův zákon) odpuzují od sebe obě stejně nabitě části (obr. d) až dojde ke štěpení (obr. e). Obě části se od sebe oddělí a současně vznikne 3 až 5 nových neutronů (obr. f).

Důležité je, že účinkem jednoho neutronu dojde k rozbití jednoho jádra a vzniku několika dalších neutronů. Ty mohou obdobným způsobem rozbít více jader atd. Dochází k **řetězové štěpné reakci**, viz. obr. 11. Pokud tento proces nějakým způsobem „neubrzdíme“ dojde k jadernému výbuchu (Hirošima, Černobyl).



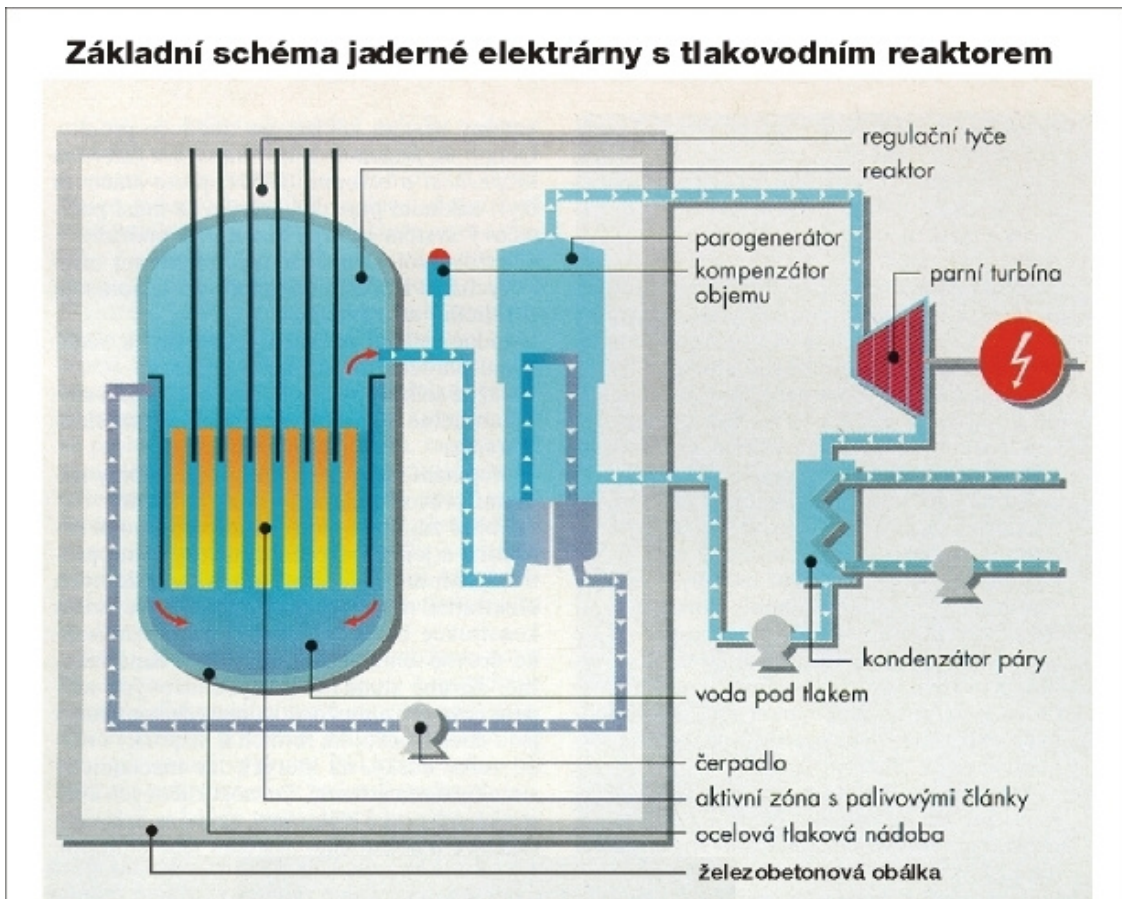
obr. 11



U5.4-28. Napište rovnici rozpadu $^{235}_{92}\text{U}$. Použijte modelu z obrázku znázorňujícího řetězovou štěpnou reakci. Při tomto procesu vznikají tři nové neutrony.



Řízená štěpná reakce se uskutečňuje v **jaderném reaktoru**, viz. obr. 12. Materiál určený ke štěpení, palivový článek, je uzavřen v bezpečnostním obalu. Obal má za úkol zadržet produkty štěpení a zabránit reakci mezi štěpným materiálem a látkou (obvykle voda), která odvádí vznikající teplo.



obr. 12

Důležitým prvkem reaktoru je **moderátor**, který zpomaluje neutrony vznikající při štěpení. Tyto neutrony, tzv. rychlé neutrony, totiž mají příliš velkou rychlost a míjejí jádra štěpné látky. Nejběžnějším moderátorem je právě voda odvádějící teplo.

Palivové články a moderátor jsou uzavřeny v nádobě, která uzavírá tzv. **aktivní zónu**. Materiál nádoby musí zadržet veškeré nebezpečné záření vznikající v aktivní zóně.

Palivové články a moderátor jsou uzavřeny v nádobě, která uzavírá tzv. **aktivní zónu**. Materiál nádoby musí zadržet veškeré nebezpečné záření vznikající v aktivní zóně. Aktivní zóna je jediná část reaktoru, kde se vyskytuje jaderné záření.

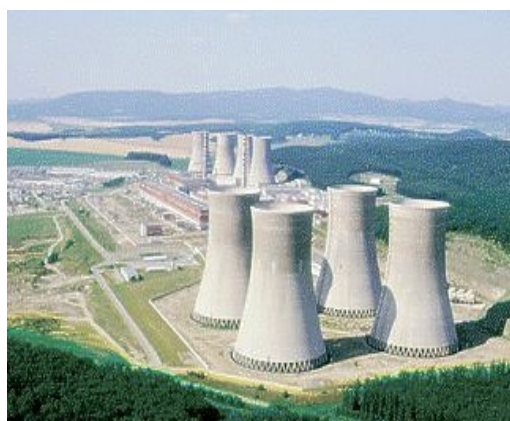
V aktivní zóně jsou rozmístěny mezi palivovými tyčemi **regulační (řídící) tyče**. Tyto tyče obsahují látky jako kadmium nebo bor, které silně pohlcují neutrony. Kdyby byly regulační tyče vysunuty, pak by v reaktoru probíhala neřízená řetězová reakce. Při plně zasunutých řídících tyčích jsou naopak pohlceny všechny neutrony vznikající štěpnou reakcí, která se tak zastaví. Řídící tyče tedy regulují výkon reaktoru a slouží i jako bezpečnostní prvek k okamžitému zastavení štěpné reakce.

Teplo vyvinuté reakcí se odvádí chladicí vodou (moderátorem), která cirkuluje v primárním okruhu. Ve výměníku se tepelná energie vody primárního okruhu předá vodě sekundárního okruhu (již mimo aktivní zónu). Jestliže voda primárního okruhu byla radioaktivní, voda sekundárního okruhu je již z pohledu radioaktivní bezpečnosti nezávadná. Tato voda se mění v páru a pohání turbíny elektrárny úplně stejně jako u klasických elektráren.

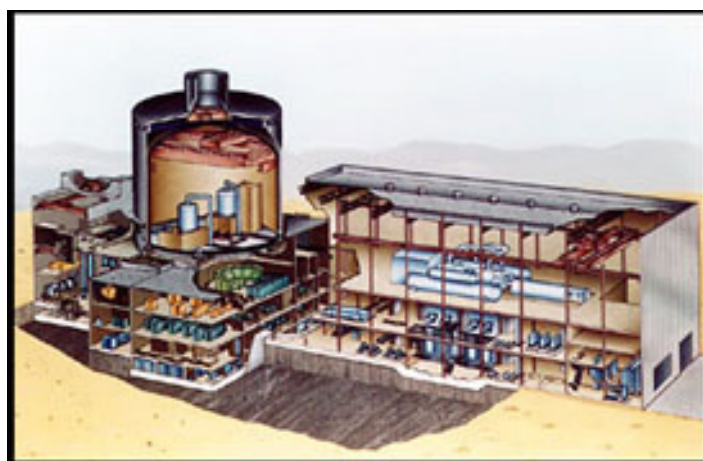


Celé zařízení je z bezpečnostních důvodů uzavřeno v železobetonové obálce (kontejneru). Na Obr.15 jsou to dvě stavby kulovitěho tvaru.

V naší republice hodně diskutovaný systém firmy Westinghouse je zobrazen na Obr.17. Celkový pohled na jadernou elektrárnu poskytuje Obr.16.

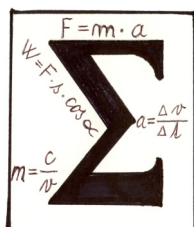


Obr. 16



Westinghouse AP600 Reactor Design

Obr.17



- K **jaderným přeměnám** dochází při střetech jader s jinými jádry nebo částicemi.
- Při jaderné reakci se uvolňuje **energie jaderné reakce**.

- Jadernou reakci můžeme popsat rovnicí $X + a \rightarrow Y + b; E_r$
- Při jaderných reakcích platí **zákony zachování** celkové energie, elektrického náboje a počtu nukleonů.
- Při **jaderné syntéze** vzniká složením lehčích jader jádro těžší za uvolnění energie. Tento druh jaderné reakce je zdrojem energie Slunce.
- Při **jaderném rozpadu** se mateřské jádro rozpadá na dvě a více dceřinných jader. Současně vznikají částice schopné štěpit další jádra a uvolňuje se energie.
- Nejčastěji využívanou jadernou reakcí je **řízená štěpná reakce** uranu v **jaderném reaktoru**.
- Hlavními prvky jaderného reaktoru jsou palivové články, regulační tyče a moderátor.

6.5. Měření jaderného záření

Z pohledu ochrany před zářením je nutné znát kolik živý, zejména lidský organizmus, „vydrží“. Tato krátká kapitola se bude zabývat veličinami charakterizujícími záření ve vztahu k živému organismu.



1. Vědět, čím charakterizujeme zdroj radioaktivního záření.
2. Umět definovat veličinu pohlcená dávka, znát její jednotku.
3. Definovat dávkový ekvivalent a jeho jednotku.
4. Vypočítat dávkový ekvivalent pomocí dávky a RBE.



Odhadovaný studijní čas je 10 minut.



Z pohledu ochrany před nepříznivými účinky jaderného záření nás zajímá množství zářivé energie, kterou pohltí nějaký předmět nebo živý organizmus.

Radioaktivní **zdroje charakterizujeme aktivitou A**, o které pojednávala kapitola 5.3.

Energii záření pohlceného živým organismem charakterizujeme veličinou **pohlcená dávka**, někdy jenom **dávka**. Je to pohlcená energie jedním kilogramem hmoty živého organismu. Jednotkou je **gray** – Gy [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Stále se ještě také používá starší jednotka **rad** ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$).

Za smrtelnou se považuje dávka γ záření nad 3 Gy, je to však individuální. Pro srovnání: každý rok absorbujeme z přírodních zdrojů a zdrojů vytvořených lidskou činností asi 2mGy.

Různé druhy záření při stejné energii však mají na živý organizmus různé účinky, tzv. biologické účinky. Proto byly vypracovány číselné koeficienty **RBE** (relative biological effectiveness = relativní biologická účinnost). Tento koeficient udává, kolikrát větší biologické účinky má dané záření ve srovnání s normálovým zářením – rentgenovým zářením s energií 200 keV. Hodnoty RBE pro některé druhy záření jsou v [tabulce RBE^{49\)}](#).

Tabulka vybraných koeficientů RBE

Typ záření	RBE
fotony	<i>1</i>
elektrony	<i>1</i>
neutrony do 10 keV	<i>5</i>
neutrony (10 až 100) keV	<i>10</i>
neutrony 100 keV až 2 MeV	<i>20</i>
neutrony 2 MeV až 20 MeV	<i>10</i>
neutrony více než 20 MeV	<i>5</i>
protony více než 2 MeV	<i>5</i>
α částice	<i>20</i>

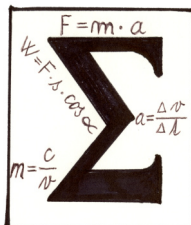
Těchto koeficientů se pak používá ke stanovení **dávkového ekvivalentu (ekvivalentní dávky)**.

Ekvivalentní dávka = pohlcená dávka x koeficient RBE.

Ekvivalentní dávku vyjadřujeme v jednotkách **sievert (Sv)** [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Také zde se ještě používá starší jednotka rem ($\text{rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$). Běžné osobní měřiče záření registrují právě ekvivalentní dávku. Doporučení Národního úřadu pro ochranu před zářením říká, že roční dávka člověka by neměla přesáhnout 5 mSv. To je dávka, kterou v průměru každý rok absorbuje každý z nás ať už z přírodních zdrojů (draslík v těle, opalování, půdní radon), nebo umělých zdrojů (televize, monitor PC, rentgenová vyšetření). Blíže se můžete seznámit s některými zdroji a dávkami záření v následující tabulce

Tabulka radiční zátěže obyvatel Československa po nehodě v Černobylu

Zdroj	Zátěž jednotlivce (mSv/rok)	%
Přírodní pozadí	2,40	76,6
z toho:		
- kosmické záření	0,39	12,6
- zemské záření gama	0,46	14,8
- radionuklidy v těle	0,23	7,4
- radon a d.p.	1,30	41,8
Lékařská expozice	-	19,3
z toho:		
- diagnostika	0,59	10,6
- terapie	-	8,8
Atmosférické zkoušky jaderných zbraní	-	3,5
Výpustě radionuklidů	-	0,25
Nehody	0,35	0,07
Pracovníci se zdroji IZ	1,10	0,07



- Radioaktivní zdroje charakterizujeme jejich **aktivitou**.
- Energie pohlcená jedním kilogramem živé látky je označována jako **pohlcená dávka**. Jednotkou dávky je 1 gray – Gy [J.kg⁻¹].
- Koeficient **RBE** udává kolikrát větší biologické účinky má dané záření ve srovnání s normálovým zářením – rentgenovým zářením.
- **Dávkový ekvivalent** je součin koeficientu RBE a pohlcené dávky. Dávkový ekvivalent se vyjadřuje v jednotkách sievert – Sv [J.kg⁻¹].

Klíč

4. OPTIKA

4.1.1 Světlo

KO4.1.1-1. Jeden světelný rok $l = 9 \cdot 10^{15} \text{ m}$. Vydeme ze vztahu $l = c \cdot t$.

KO4.1.1-2. $f_{\text{fialová}} = 7,5 \cdot 10^{14}$, $f_{\text{červená}} = 4,3 \cdot 10^{14}$: Počítáme ze vztahu $c = f \cdot \lambda$

4.1.2 Šíření světla

KO4.1.2-3. Slunce přes jeho velikost je natolik vzdálené od Země, že ho můžeme považovat za bodový zdroj. Vlnoplochy slunečního záření dopadajícího na Zemi jsou rovinné. U rovinných vlnoploch jsou paprsky (kolmice na vlnoplochu) vždy rovnoběžné.

KO4.1.2-4. Dochází k odrazu, rozptylu a absorpci. Sádrukartonová deska je povrch, který světlo difusně odráží. Dochází na ní tedy k odrazu, ale světlo se odráží všemi směry – nastává rozptyl světla. A konečně část dopadajícího světla se pohltí – absorpce.

4.1.3 Index lomu

KO4.1.3-5. a, c

KO4.1.3-6. a Počítáme ze vztahu $n = \frac{c}{v}$

KO4.1.3-7. $n_{\lambda} = \frac{c}{v_{\lambda}}$

4.2 Geometrická optika

4.2.1 Odraz a lom světla

KO4.2.1-1. a, b, d

KO4.2.1-2. b, c

KO4.2.1-3. a

KO4.2.1-4. b

U4.2.1-5. Bez ohledu na indexy lomu obou prostředí paprsek se nelomí. Vydeme ze zákona lomu. Dopadový úhel je 0° . Aby platil zákon lomu musí být i úhel lomu 0° .

4.2.2 Optické zobrazení

4.2.2.1 Zobrazení zrcadlem

U4.2.2.1-6.

Duté zrcadlo		
Poloha předmětu a	Poloha obrazu a'	Obraz bude:
$a > 2f$	$2f > a > f$	Skutečný, převrácený, zmenšený

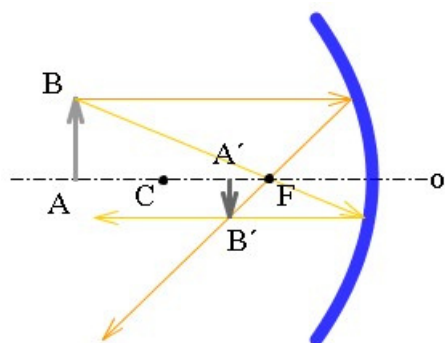
$a = 2f$	$a' = 2f$	Skutečný, převrácený, stejně veliký
$2f > a > f$	$a' > 2f$	Skutečný, převrácený, zvětšený
$a < f$	$-\infty < -a' < 0$	Neskutečný, vzpřímený, zmenšený

KO4.2.2.1-7. a

KO4.2.2.1-8. c

U4.2.2.1-9. $a' = 15 \text{ cm}$, $Z = -0,5$

Obraz bude reálný, převrácený, zmenšený. Grafické řešení je na obrázku, viz. obr. 23. Známe a , y , r , hledáme pomocí zobrazovací rovnice a vztahu pro zvětšení a' a Z .



obr. 23

U4.2.2.1-10. $a' = -0,075 \text{ m}$, $Z = 0,75$

Obraz bude zdánlivý, přímý, zmenšený. Známe a , y , r , hledáme pomocí zobrazovací rovnice a vztahu pro zvětšení a' a Z . Pozor ohnisková vzdálenost $f = r/2$ bude podle znaménkové konvence pro vypuklé zrcadlo záporná.

U4.2.2.1-11. $a = 0,67 \text{ m}$, $a' = 0,33 \text{ m}$

Známe r , $Z = -0,5$. Řešíme dvě rovnice o dvou neznámých.

4.2.2.2 Zobrazení čočkou

KO4.2.2.2-12. Vyjdeme z definice obrazového ohniska. Je to bod, do kterého se lámou paprsky přicházející rovnoběžně s optickou osou. Tyto paprsky jsou tedy rovnoběžné a zdroj musí být značně vzdálen. Takovým zdrojem je například naše Slunce.

Necháme tedy dopadat na zkoumanou čočku sluneční paprsky. Ty se nám budou lámat za čočkou do jejího obrazového ohniska. Do tohoto ohniska (nejmenší světelná stopa) umístíme papír. Jednoduše pak změříme vzdálenost papíru od čočky – ohniskovou vzdálenost.

KO4.2.2.2-13. Spojka je tlustší ve svém středu než na okrajích. U rozptylky je to naopak.

KO4.2.2.2-14. $f = -25 \text{ cm}$

Jedná se o rozptylku. Počítáme ze vztahu $\varphi = \frac{1}{f}$. Vyjde nám ohnisková vzdálenost v metrech.

U4.2.2.2-15.

spojka		
Poloha předmětu a	Poloha obrazu a'	Obraz bude:
$a > 2f$	$2f > a' > f$	Skutečný, převrácený, zmenšený
$a = 2f$	$a' = 2f$	Skutečný, převrácený, stejně veliký
$2f > a > f$	$a' > 2f$	Skutečný, převrácený, zvětšený
$a < f$	$-\infty < -a' < 0$	Neskutečný, vzpřímený, zmenšený
rozptylka		
$\infty > a > 0$	$f < a' < 0$	Neskutečný, vzpřímený, zmenšený

KO4.2.2.2-16. a

KO4.2.2.2-17. a

KO4.2.2.2-18. Obrazové ohnisko první čočky musí splývat s předmětovým ohniskem druhé čočky.

U4.2.2.2-19. $f = 0,096$ m Dosadíme do rovnice pro výpočet ohniskové vzdálenosti

U4.2.2.2-20. $f = 0,6$ m

Využijeme zobrazovací rovnice tenké čočky a vztahu pro její zvětšení. Dosazujeme $a = 3000$ m, $Z = -1/5000$ (- protože obraz bude převrácený – objektiv je spojná čočka).

U4.2.2.2-21. $a' = -6$ cm, $Z = 0,75$. Dosazujeme do zobrazovací rovnice tenké čočky za $a = 8$ cm, $f = -24$ cm (jedná se o rozptylku). Obraz bude virtuální, přímý a zmenšený.

4.2.2.3 Oko

KO4.2.2.3-22. Od dalekozrakého, potřebujeme ke koncentraci slunečních paprsků do ohniska spojku.

KO4.2.2.3-23. Přibližně 3,5 km.

Vycházíme z toho, že tangenta zorného úhlu $\tau = 1'$ je rovna podílu vzdálenosti reflektorů a hledané vzdálenosti.

4.2.2.4 Lupa

KO4.2.2.4-24. Pokud bychom požili rozptylku, nezískáme nikdy zvětšený předmět. Také spojka o ohniskové vzdálenosti větší než konvenční zraková vzdálenost vytváří zmenšený obraz (viz vztah pro zvětšení lupy)

KO4.2.2.4-25. a) 10, b) 12,5

V obou případech vycházíme ze vztahu pro zvětšení lupy. V prvním případě dosazujeme do jmenovatele ohniskovou vzdálenost, v druhém pak vzdálenost předmětu od lupy.

4.2.2.5. Mikroskop

KO4.2.2.5-26. Objektiv vytvoří obraz zvětšený, ale převrácený, protože jej umístíme do vzdálenosti $a > f$. Tento obraz pak pozorujeme okulárem jako lupou a ta dává obraz nepřevrácený.

KO4.2.2.5-27. Nemůže. Obrazu vytvořený objektivem musí být reálný protože jej pak dále pozorujeme okulárem jako lupou.

U4.2.2.5-28. 112,5

Do vztahu pro zvětšení dosazujeme za optický interval vzdálenost čoček zmenšenou o ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru.

4.2.2.6. Dalekohled

KO4.2.2.6-29. c

Rozptylkou nevytvoříme reálný obraz vzdáleného předmětu. Protože na dalekohledu požadujeme zvětšení předmětu, musí být jeho ohnisková vzdálenost větší než konvenční zřaková vzdálenost. Nakreslete si obrázek.

KO4.2.2.6-30. a, c

4.2.3 Fotometrie

KO4.2.3-31. b

KO4.2.3-32. d

KO4.2.3-33. c

U4.2.3-34. 188,5 lm Vydeme z definičního vztahu pro svítivost $\rightarrow \Phi = I 4\pi$

U4.2.3-35. 100 cd Vydeme z definičního vztahu pro svítivost $\rightarrow I = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{1260}{4\pi}$

U4.2.3-36. 10 lx Vydeme definičního vztahu pro osvětlení $\rightarrow E = \frac{I}{r^2} = \frac{160}{4^2}$

4.3 Vlnová optika

4.3.1 Interference světla

KO4.3.1-1. b

KO4.3.1-2. a Fáze se mění, protože dochází k odrazu na opticky hustším prostředí – sklo má větší index lomu než vzduch.

KO4.3.1-3. b,d Pouze $2 \cdot \lambda/2$ a $4 \cdot \lambda/2$ jsou sudé násobky půl vlnové délky

U4.3.1-4. maximum. Vydeme z podmínek pro vznik maxim a minim. Když dosadíme zadané hodnoty do rovnice pro minimum $295 \cdot 10^{-6} = (2k - 1) \frac{590 \cdot 10^{-9}}{2}$ nevyjde k celé číslo.

Dosadíme-li do podmínky pro maximum $295 \cdot 10^{-6} = 2k \frac{590 \cdot 10^{-9}}{2}$ vyjde $k = 5$. To je celé číslo, zadané údaje splňují podmínky pro vznik interferenčního maxima.

U4.3.1-5. 600 nm. Jedná se opět o Youngův pokus.

KO4.3.1-6. b

KO4.3.1-7. c

KO4.3.1-8. a

KO4.3.1-9. d

U4.3.1-10. $0,84 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

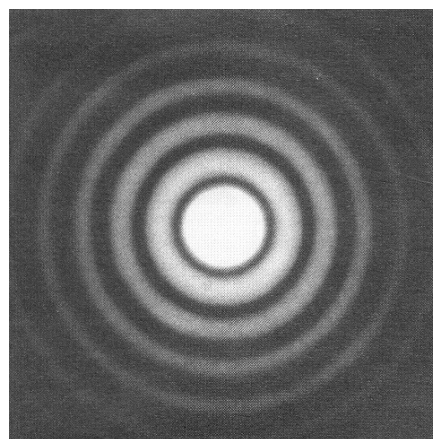
4.3.2 Ohyb světla

KO4.3.2-11. Difrakcí na štěrbině dojde k rozložení bílého světla na jednotlivé barevné složky – k disperzi světla. Centrální maximum bude bílé – úhel α bude pro všechny vlnové délky stejný 0° . Pak následuje černé první minimum. Ale již pro první maximum ($k = 1$) se budou úhly pozorování α lišit. Nejmenší bude pro nejmenší vlnové délky viditelného spektra – modré, největší pak bude pro největší vlnové délky viditelného spektra – červené. Vedle bílého centrálního maxima pak budeme pozorovat po obou stranách první maxima od modré barvy, přes zelenou, žlutou až po nejvzdálenější červenou barvu, viz. obr56

KO4.3.2-12. a

KO4.3.2-13. b)

KO4.3.2-14. Ohybový obrazec kopíruje tvar předmětu, na kterém dochází k ohybu. Ohybový obrazec na kruhovém otvoru bude se tedy skládat ze soustředných kroužků. Ve středu bude centrální světlý kroužek – maximum, následovat bude tmavé mezikruží – první interferenční minimum. A pak se budou postupně střídát tmavá a světlá mezikruží, jak je vidět na obrázku, viz. obr. 58.



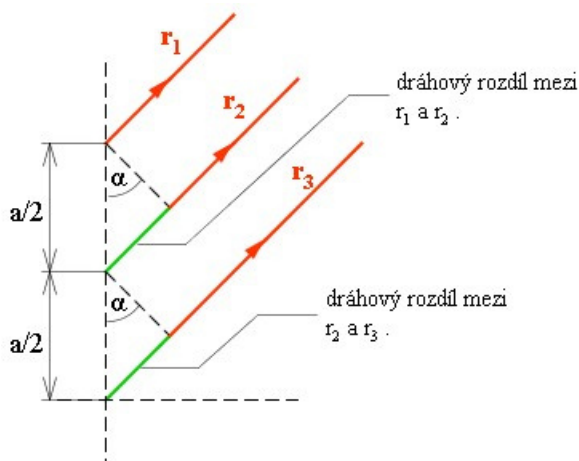
U4.3.2-15. V obou případech platí interferenční podmínky pro vznik maxim a minim. Rozdíl je ve způsobu výběru obou interferujících vlnění. U Youngova pokusu je to jasné, potřebný dráhový rozdíl je rozdíl drah vlnění jdoucích z jedné a druhé štěrbině.

Jinak musíme přistoupit ke stanovení dráhového rozdílu skládajících se vlnění při interferenci a při ohybu. Vyjdeme z obrázku obr. 57.

Vidíme, že šířku štěrbině a máme rozdělenou na dvě poloviny. Stínítko, na kterém pozorujeme interferenci, bude hodně vzdálené, takže vyšetřujeme dráhový rozdíl rovnoběžných paprsků. A teď uvažujeme vždy dvojici paprsků, jeden z horní poloviny, druhý ze spodní poloviny. Dvojice volíme tak, že paprsky mají vždy dráhový rozdíl $\Delta l = \frac{a}{2} \sin \alpha$. A teď

požadujeme, aby ve voleném směru daném úhlem α jsme pozorovali první minimum.

Z podmínky pro vznik prvního interferenčního minima vyplývá, že dráhový rozdíl musí být roven lichému násobku poloviny vlnové délky. Pro první minimum, pro $k = 1$ tedy $\frac{\lambda}{2}$.



Spojíme-li obě rovnice dostáváme vztah $\frac{a}{2} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}$. A po vykrácení dvojky obdržíme hledaný vztah pro $k = 1$.

4.4 Kvantová optika

4.4.1 Kvantová povaha elektromagnetického záření

KO4.4.1-1. d, a, b, c

KO4.4.1-2. c

4.4.2 Fotoelektrický jev

KO4.4.2-3. a

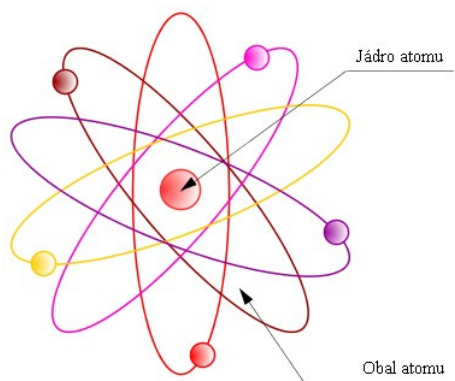
KO4.4.2-4. d

Vycházíme z Einsteinovy rovnice fotoefektu. Nejdříve si stanovíme energii fotonu. Ta bude $hf = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 5 \cdot 10^{14} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Tato energie je však podstatně menší než výstupní práce hliníku.

5. Stavba atomu

5.1. Model atomu

KO5.1-1. Ano i ne. Atom v normálním stavu má velikost celkového náboje jádra stejnou jako je celkový náboj elektronového obalu. Pokud se jedná o ionizovaný atom, pak celkový náboj obalu je menší, viz. obr. 5.



KO5.1-2. Může. Například u vyzařování vodíku je Limanova série v ultrafialové oblasti, Paschenova zase v infračervené oblasti.

KO5.1-3. 1,58 eV. Můžeme to přímo vyčíst z grafu energetických hladin vodíku ($E_3 - E_2$), nebo vypočítat ze vztahu $\Delta E = h \frac{c}{\lambda}$.

KO5.1-4. 13,6 eV

5.2. Atomové jádro

KO5.2-5. ¹¹⁾ Můžeme, a také se to používá. Tak proton zapisujeme jako 1_1p , neutron 1_0n a elektron ${}^0_{-1}e$.

KO5.2-6. b

KO5.2-7. c

KO5.2-8. a

KO5.2-9. b, viz obr. 6

U5.2-10. 26, 14, Ag. Vyhledáme v Mendělejevově tabulce.

KO5.2-11. c

KO5.2-12. a, v odpovědi c) je sice správně uveden vztah, ale ještě byl proveden převod jouľů na elektronvolty.

U5.2-13. 935,5 MeV. Počítáme ze vztahu $E_j = u c^2$. Výsledek bude v joulech, ten převedeme na elektronvolty.

U5.2-14. 1737 MeV. Nejdřív si stanovíme hmotnostní schodek.

$$B = 92.1,007276 u + 143.1,008665 u - 235,043925 u = 1,864562 u = 1,864562 \cdot 1,66053 \cdot 10^{-27} = 3,09616 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Vynásobíme druhou mocninou rychlosti světla ve vakuu a dostaneme vazebnou energii v joulech:

$$E_j = 3,09616 \cdot 10^{-27} \cdot (2,997928 \cdot 10^8)^2 = 2,7827 \cdot 10^{-10} \text{ J}.$$

A převedeme na elektronvolty:

$$E_j = \frac{2,7827 \cdot 10^{-10}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,737 \cdot 10^9 \text{ eV} = 1737 \text{ MeV}.$$

5.3. Radioaktivita

U5.3-15. Thorium ${}_{90}^{234}\text{Th}$. Musí jít o prvek, který má o dva méně protonů – tedy 90. V Mendělejevově tabulce to odpovídá právě thoriu, půjde o jeho izotop s 234 nukleony.

U5.3-16. $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$. Odvození tohoto vztahu je jednoduché. Vyjdeme ze zákona radioaktivní přeměny. Do něj dosadíme za N polovinu původního počtu jader – $N_0/2$. Z rovnice vyjádříme čas t , kterým však teď bude poločas přeměny T .

KO5.3-17. d

KO5.3-18. b)

KO5.3-19. c)

KO5.3-20. a)

KO5.3-21. a)

KO5.3-22. c) Za 14 dní se rozpadne polovina jader. Za dalších 14 dní se rozpadne polovina této poloviny, tedy čtvrtina původního množství. Zůstává tedy 25%.

KO5.3-23. a, b

KO5.3-24. a)

U5.3-25. $1,24 \cdot 10^4$ Bq. Vycházíme z definice aktivity jako počtu rozpadů za jednotku času.

5.4. Jaderné reakce

U5.4-26. $m_{oX}c^2 + E_{kX} + m_{oA}c^2 + E_{kA} = m_{oY}c^2 + E_{kY} + m_{oB}c^2 + E_{kB}$, m_o je klidová hmotnost a E_k je kinetická energie.

U5.4-27. $A_X + A_a = A_Y + A_b$, kde A je nukleonové číslo, viz. obr. 9

U5.4-28. ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{89}\text{Kr} + 3({}_0^1n)$