

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Fakulta pedagogická

Katedra fyziky

FYZIKÁLNÍ VÝKLAD PŘÍRODNÍCH JEVŮ S VYUŽITÍM IKT

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:
RNDr. František Špulák

Autor:
Vlastislav Chatrný

České Budějovice 2009

Anotace

Bakalářská práce se v první části zabývá stručnou historií výzkumu světla, podstatou a jeho fyzikálními vlastnostmi.

V druhé části se zabývá optickými jevy v atmosféře, jejich popisem, vznikem a vysvětlením.

Synopsis

In the introduction, this Baccalaureate thesis covers a brief history of the science of light including the associated research, its fundamentals and its physical characteristics.

Subsequently it presents the optical phenomenon in the atmosphere describing their description, inception and justification.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi pomohli k dokončení mé bakalářské práce. Děkuji pracovníkům katedry fyziky Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, kteří mě výborně připravovali zejména v oblasti fyziky a elektroniky. Především bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce RNDr. Františku Špulákovi, který mi vždy ochotně pomohl a poradil.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách

V Českých Budějovicích dne 25.4.2009

.....
Vlastislav Chatrný

Obsah

Úvod.....	7
1 Světlo.....	8
1.1 Rychlost a šíření světla	9
1.1.1 Rychlost světla	18
1.1.2 Rychlost šíření v jiných prostředích.....	18
1.2 Absorpce světla.....	19
1.3 Odraz a lom světla.....	20
1.3.1 Odraz světla (reflexe).....	20
1.3.2 Lom světla (refrakce).....	20
1.3.3 Snellův zákon.....	21
1.3.4 Úplný odraz světla.....	24
1.4 Disperze.....	26
1.5 Interference	28
1.5.1 Příklad a základní vlastnosti.....	29
1.5.2 Interference světla.....	33
1.5.3 Vznik stojatých vln při kolmém odrazu	33
1.5.4 Interference na planparalelní desce	34
1.5.5 Interference světel ze dvou bodových zdrojů.....	37
1.6 Difrakce.....	38
1.6.1 Druhy ohybových jevů.....	40
1.6.1.1 Fresnelovy ohybové jevy.....	40
1.6.1.2 Fraunhoferovy ohybové jevy.....	41
1.6.1.2.1 Ohyb světla na štěrbině.....	41
1.6.1.2.2 Ohyb světla na optické mřížce.....	43
1.6.1.3 Ohybové spektrum.....	44

2 Světelné jevy.....	45
2.1 Duha.....	45
2.1.1 Co je to duha.....	47
2.1.2 Jak duha vzniká.....	49
2.1.3 Odvození vzniku duhy.....	51
2.1.4 Alexandrův tmavý pás.....	53
2.2 Halové jevy.....	53
2.2.1 Kdy se halové jevy objevují?.....	55
2.2.2 Známé halové jevy.....	56
2.2.2.1 Malé halo (22° halo).....	57
2.2.2.2 Vedlejší slunce (parhelia, paslunce).....	57
2.2.2.3 Halový sloup.....	58
2.2.2.4 Dotykový oblouk malého hala.....	59
2.2.2.5 Velké halo (halo 46°).....	60
2.2.2.6 Cirkumzenitální oblouk.....	60
2.2.2.7 Parhelický kruh.....	61
2.2.2.8 Parryho oblouk.....	62
2.2.2.9 Ostatní halové jevy.....	63
2.2.3 Trocha z historie pozorování halových jevů.....	63
2.3 Ohybové jevy.....	64
2.3.1 Koróna.....	65
2.3.2 Irizace oblaků.....	66
2.3.3 Gloriola.....	67
Závěr.....	68
Použitá literatura.....	69
Přílohy.....	70

Úvod

Předkládaná bakalářská práce si klade za cíl poskytnout čtenáři stručný popis a fyzikální vysvětlení vybraných světelných jevů, se kterými se běžně setkáváme v zemské atmosféře. Atmosféra není jen prostým obalem Země. Je to i velmi složitý fyzikální systém, v kterém probíhá mnoho světelných jevů a dějů. Tyto světelné jevy odpradáвна upoutávaly lidskou pozornost. V dávných dobách, kdy si lidé nedokázali vysvětlit jejich podstatu, pochopitelně vzbuzovali strach a úzkost a postupně staly symbolem božské činnosti a častým námětem mýtů a pověr. V novodobější éře se světelné jevy v atmosféře stávaly také oblíbeným zdrojem literární inspirace. To vše pro svou tajemnost a krásu. Ovšem s postupným poznáním, docházelo k vysvětlování jednotlivých jevů. Vědci zjišťovali, že příčinou vzniku těchto úkazů jsou velmi dobře popsatelné fyzikální jevy. Díky němu dnes máme k dispozici podrobný popis pochodů, ke kterým dochází v zemské atmosféře a které pozorujeme.

Pro názornou ukázkou některých vlastností světla a popisovaných světelných jevů v atmosféře doplňuje práci v příloze na CD uložený soubor. Uložený soubor obsahuje aplikace pomocí kterých lze snadno a jednoduše tyto vlastnosti a jevy popsat a vysvětlit.

1 Světlo

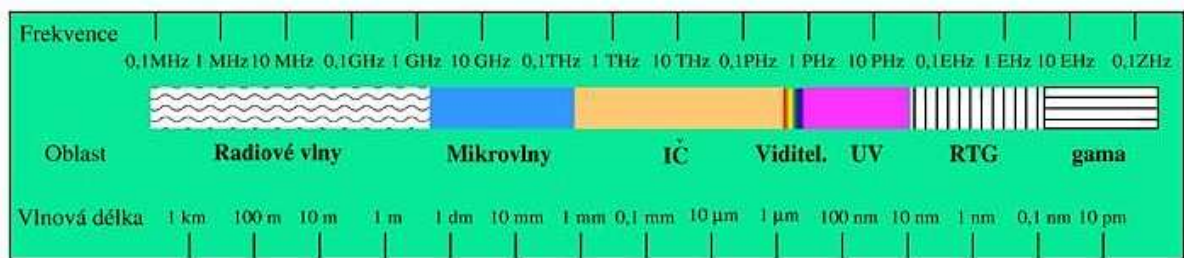
Viditelné světlo je elektromagnetické záření o vlnové délce 400–750 nm. Vlnové délky světla leží mezi vlnovými délkami ultrafialového záření (nejmenší vlnovou délku má fialová barva) a infračerveného záření (největší vlnovou délku má červená barva). Tři základní vlastnosti světla (a elektromagnetického vlnění vůbec) jsou svítivost (amplituda), barva (frekvence) a polarizace (úhel vlnění). Kvůli dualitě částice a vlnění má světlo vlastnosti jak vlnění, tak částice. Studium světla a jeho interakcemi s hmotou se zabývá optika.

Viditelné světlo je část elektromagnetického spektra o frekvenci 3.8×10^{14} Hz (hertz) až 7.5×10^{14} Hz, kde rychlost (c), frekvence (f), a vlnová délka (λ) zachovávají vztah:

$$c = f\lambda$$

Rychlost světla ve vakuu $c = 299\,792\,458$ m/s je konstanta a je to zatím největší známá rychlost. V optice se také používá kruhová frekvence ω , která je spojena s frekvencí f vztahem $\omega = 2\pi f$. Vlnová délka viditelného světla ve vakuu tedy je 400 nm až 750 nm. Přesněji řečeno, tento rozsah je viditelným světlem pro člověka. Některé druhy živočichů vnímají rozsah jiný - například včely jej mají posunut směrem ke kratším vlnovým délkám (ultrafialové záření), naopak někteří plazi vnímají i infračervené záření.

Rozsah vnímaných vlnových délek je dán především tím, že v oblasti viditelného světla je maximum elektromagnetického záření ze Slunce dopadajícího na zemský povrch, a tudíž je v tomto rozsahu nejlépe vidět. [2]



Obr. 1.1 Spektrum elektromagnetického vlnění

Barva	Vlnová délka	Frekvence
červená	~ 625 až 740 nm	~ 480 až 405 THz
oranžová	~ 590 až 625 nm	~ 510 až 480 THz
žlutá	~ 565 až 590 nm	~ 530 až 510 THz
zelená	~ 520 až 565 nm	~ 580 až 530 THz
azurová	~ 500 až 520 nm	~ 600 až 580 THz
modrá	~ 430 až 500 nm	~ 700 až 600 THz
fialová	~ 380 až 430 nm	~ 790 až 700 THz

obr.1.2 Viditelné spektrum

1.1 Rychlost a šíření světla

Až do nedávné minulosti byla rychlost světla z velké části jen otázkou dohadů. Antický filosof Empedoklés zastával názor, že světlo je něco, co se pohybuje a šíří mezi zemí a oblohou, aniž to můžeme pozorovat. Proto musí cesta světla z jednoho místa na jiné trvat určitý čas. Jiný řecký filosof Aristotelés to odmítal a tvrdil, že světlo vyplývá z určité přítomnosti, je to bezbarvá, statická matérie, jež je opakem tmy, ale nepohybuje se. Mimo to, jestliže by světlo mělo konečnou rychlost, musela by být velmi velká. Aristotelés tvrdil, že „je to až příliš neuvěřitelné“.

Jednou ze starověkých teorií vidění je, že světlo je vyzařováno z oka, nikoliv z jiného zdroje do oka odraženo. Z této teorie odvodil Hérón z Alexandrie argument, že rychlost světla musí být nekonečná, protože vzdálené objekty, jako například hvězdy, se objeví, jakmile se oko otevře.

Islámští filozofové Avicenna a Alhazen věřili, že světlo má konečnou rychlost, i když většina ostatních filosofů v tomto bodě souhlasila s Aristotelem. Podobně považovala rychlost světla za konečnou i árijská filosofická škola ve starověké Indii.

Johannes Kepler prosazoval názor, že světlo putuje neomezenou rychlostí, protože ve volném prostoru mu nestojí v cestě žádné překážky. Francis Bacon argumentoval, že rychlost světla nemusí být nutně nekonečná, ale může být tak velká, že to nejsme schopni vnímat. René Descartes tvrdil, že kdyby byla rychlost světla konečná, nemohly by Slunce, Měsíc a Země být během zatmění v zákrytu. Protože nic takového nebylo pozorováno, odvodil z toho, že rychlost světla je nekonečná. Descartes se domníval, že vesmír vyplňuje zvláštní látka, kterou nazýval plenum, která umožňuje vidění a ve skutečnosti byl přesvědčen, že kdyby připustil konečnost rychlosti světla, celý jeho filosofický systém by se zhroutil.

Isaac Beeckman, Descartův přítel, navrhl v roce 1629 experiment při kterém by se pozoroval záblesk z kanónu odražený ze zrcadla vzdáleného asi míli. Galileo Galilei v roce 1638 navrhoval měřit rychlost světla pozorováním prodlevy mezi odkrytím lucerny a zpozorováním světla z určité vzdálenosti. Descartes tento experiment kritizoval jako zbytečný, protože experiment během zatmění Měsíce, který měl lepší předpoklady ke zjištění konečné rychlosti, byl negativní. Takže experiment uskutečnila až v roce 1667 Florentinská Accademia del Cimento, s lucernami vzdálenými asi 1 míli. Vzdálenost však byla příliš malá a tak žádné zpoždění nebylo pozorováno. Robert Hooke negativní výsledek vysvětloval tak, že se nejedná o potvrzení nekonečné rychlosti světla, ale toho, že světlo se musí pohybovat velmi rychle.

První kvantitativní odhad rychlosti světla provedl v roce 1676 Ole Rømer, který pomocí Dalekohledu studoval pohyb Jupiterova měsíce Io. Vzhledem k tomu, že Io vchází a vychází z Jupiterova stínu v pravidelných intervalech, je možné změřit trvání doby oběhu. Rømer zaznamenal, že když je Jupiter nejbliž k Zemi, byla doba oběhu Io kolem Jupitera 42,5 hodiny. Také pozoroval, že jak se Jupiter a Země od sebe vzdalovaly, Io vycházel ze stínu

Jupitera postupně stále později. Bylo jasné, že tomuto výstupnímu „signálu“ trvalo déle než dosáhl Země. Jak se Země a Jupiter vzdalovaly, zvětšoval se interval mezi signály, na kterém se projevoval čas, který světlu zabere překonání dodatečné vzdálenosti mezi planetami. Podobně, asi o půl roku později, byly vstupy měsíce Io do stínu Jupitera o něco častější, protože se Země a Jupiter přibližovaly. Na základě těchto pozorování Rømer odhadoval, že na překonání průměru oběžné dráhy Země by světlo potřebovalo 22 minut (což je dvojnásobek astronomické jednotky), přičemž moderní odhad je přibližně 16 minut a 40 sekund. [2]

Přibližně ve stejné době byla velikost astronomické jednotky odhadována na 140 milionů kilometrů. Z této astronomické jednotky a Rømerova odhadu času vypočítal autor vlnové teorie holanďan Christiaan Huygens rychlost světla na 1 000 průměrů oběžné dráhy za minutu, což je asi 220 000 kilometrů za sekundu. To je sice významně méně než dnes uznávaná hodnota, ale i tak tato hodnota o mnoho převyšovala jakýkoliv fyzikální jev známý v té době.

Christian Huygens (současník Newtona)

v "Pojednání o světle" – popisuje světlo jako vlny přenášené v éteru (éter byl považován za látku, která je médiem pro šíření elektromagnetického záření).

vysvětlil na základě vlnové teorie světla tehdy známé optické jevy, "Huygensův princip".

(Huygensův princip nebyl zcela správný, neboť podle něj by se například vlna procházející vzduchem či vodou ze všech bodů vracela zpět do zdroje, aniž by se odrazila od nějaké překážky.)

Také Isaac Newton uznával, že rychlost světla je konečná. Ve své knize „Opticks“ dokonce publikoval přesnější hodnotu rychlosti světla - 16 průměrů Země za sekundu, kterou sám odvodil, ačkoliv není známo, jestli z Rømerových údajů, nebo z něčeho jiného. Stejný úkaz byl následně pozorován Rømerem na rotující „skvrně“ na povrchu Jupitera. Efekt byl zaznamenán i později u obtížnějšího pozorování tří dalších Galileových měsíců.

Isaac Newton (17. století)

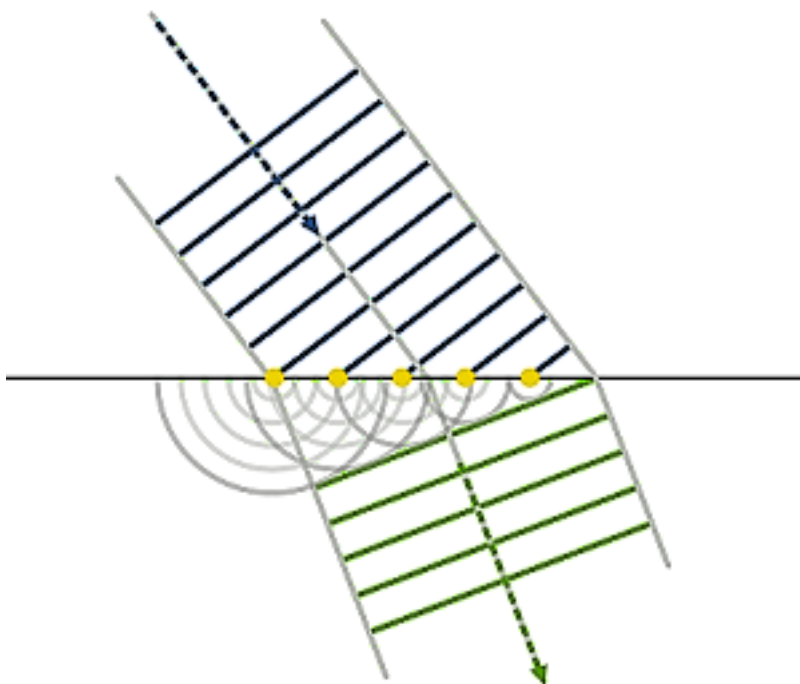
ve své práci "Optika" popisuje světlo jako částice – korpuskulární (emanační,částicová) teorie, (proud částíček, působících mechanickými silami na okolní předměty), popsal však rovněž "Newtonovy kroužky", které vycházely z vlnové povahy světla. (interference)

Ani tato pozorování však nepřesvědčila každého (především Giovanniho Domenica Cassiniho) a k definitivnímu odmítnutí hypotézy nekonečné rychlosti světla došlo až po pozorování Jamese Bradleyho v roce 1728. Bradley se původně pokoušel změřit paralaxu hvězd a tím určit jejich vzdálenost. Místo toho naměřil aberaci[2]. Vyvodil, že světlo hvězd dopadající na Zemi musí přicházet z mírného úhlu, který se dá vypočítat porovnáním rychlosti Země na její oběžné dráze k rychlosti světla. Tato aberace byla asi 1/200 stupně. Bradleyem vypočítaná rychlost světla byla 298 000 kilometrů za sekundu, což už je jen o málo méně než dnes uznávaná hodnota. Aberace byla během následujících století široce zkoumána, především Friedrichem von Struve a Magnusem Nyrenem.

Thomas Young (18. století, 100 let po práci Newtona "Optika")

předvedl experiment s dvouštěrbínovou interferencí světla, prokazující vlnový původ světla, popsal podobné chování jako mají vlny na vodě a zvukové vlny.

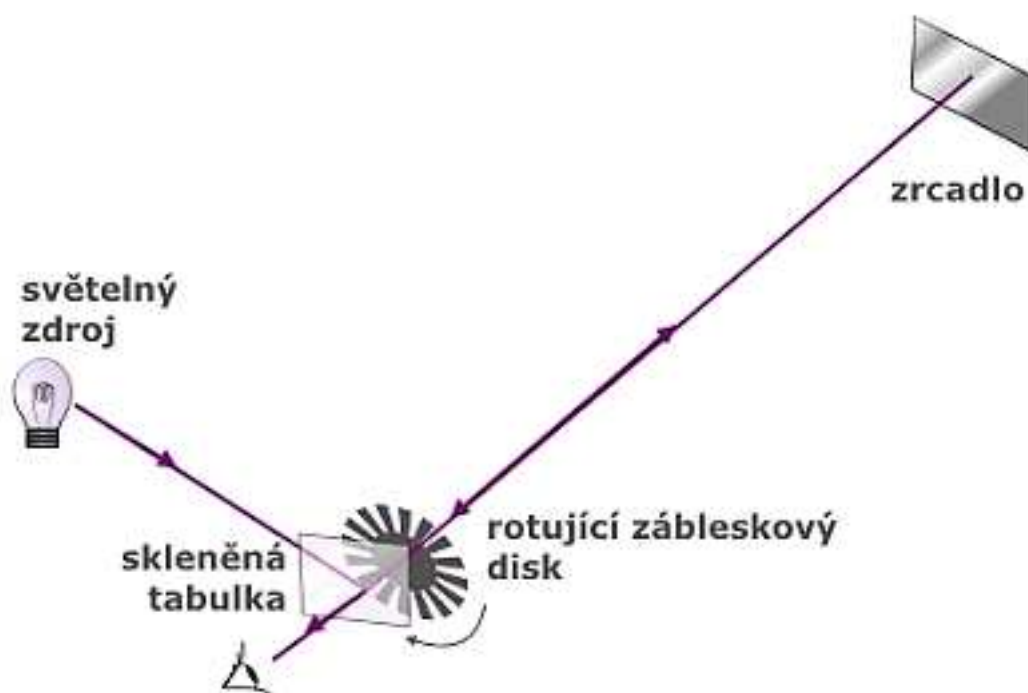
Augustin Jean Fresnel (1821) Užil Huygensův princip pro popis Youngova pokusu (syntéza dvou teorií), zavedl příčné vlnění a polarizaci světla. Vysvětlil optický dvojlom na kalcitu, odvodil tzv. "Fresnelovy vztahy" pro odraz, polarizaci a propuštěné světlo.



obr.1.1.1 Huygensův-Fresnelův princip

První úspěšné měření rychlosti světla pozemním přístrojem provedl v roce 1849 francouzský fyzik

Hippolyte Fizeau. Fizeauv experiment byl koncepčně podobný návrhům Beeckmana a Galilea. Paprsek světla byl namířen na zrcadlo umístěné ve vzdálenosti 8633 m. Na cestě od zdroje světla k zrcadlu paprsek procházel rotujícím diskem se zářezy. Při určité rychlosti rotace disku projde paprsek směrem od zdroje jedním zářezem a při návratu zářezem následujícím. Jestliže dojde třeba i jen k malému zrychlení nebo zpomalení rotace disku, zasáhne zpětný paprsek samotný disk (jeho zub) a nedostane se nazpět. Rychlost světla se dá vypočítat ze známé vzdálenosti zdroje a zrcadla, počtu zářezů (resp. zubů) na disku a rychlosti rotace. Rychlost světla publikovaná Fizeaem byla 313 000 kilometrů za sekundu. Fizeauova metoda byla později zdokonalena M. A. Cornuem (1872) a J. Perrotinem (1900).



obr.1.1.2 Fizeau-Foucaultův přístroj

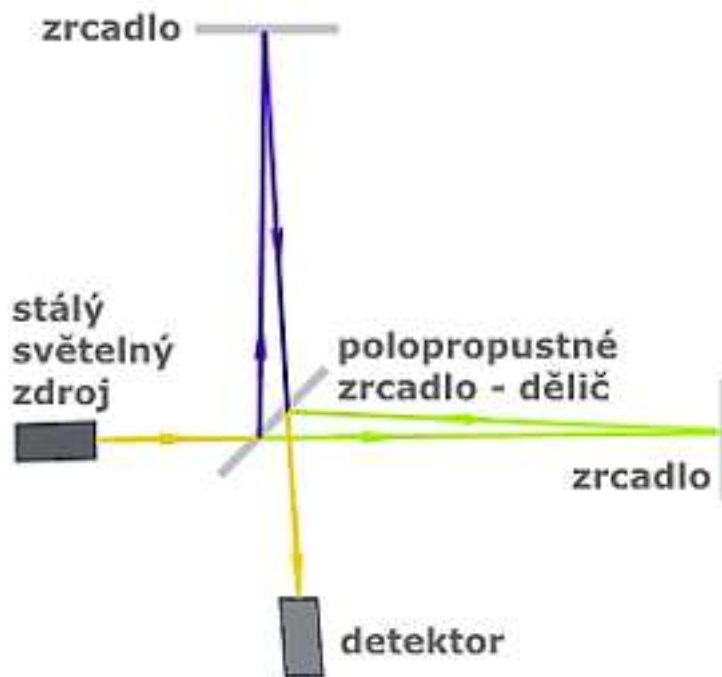
Leon Foucault vylepšil Fizeauovu metodu tím, že nahradil disk se zářezy rotujícím zrcadlem. Foucaultův odhad publikovaný v roce 1862 byl 298 000 kilometrů za sekundu. Foucaultovu metodu použili i Simon Newcomb a Albert A. Michelson.

Albert Abraham Michelson použil v roce 1926 rotující zrcadla pro změření času, který světlo potřebuje na překonání vzdálenosti 131 km mezi horami Mount Wilson a Mount San Antonio v Kalifornii. Výsledkem těchto měření byla relativně přesně určená rychlost světla na 299 796 +/-4 km/s.

Díky práci Jamese Clerka Maxwella (**1865**), který popsal světlo "Maxwellovými rovnicemi" odvozenými v elektřině a magnetismu (měnící se pole elektrické vyvolává pole magnetické a naopak, kmitavý obvod vysílá elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí světla) bylo známo, že rychlost elektromagnetického záření je konstanta definovaná elektromagnetickými vlastnostmi vakua (permitivitou a permeabilitou). Fyzikové v 19. století se však domnívali, že rychlost je dána relativně k světlonosnému éteru. Éter měl být

nekonečně jemné médium, kterým všechny látky pronikají a které současně vyplňuje veškerý prostor kolem nás. Podle těchto představ se světlo mohlo šířit právě jen prostřednictvím éteru.

V roce 1887 byl uskutečněn fyziky Albertem Michelsonem a Edwardem Morleyem významný experiment za účelem změření rychlosti světla vzhledem k pohybu Země. Cílem tohoto experimentu, dnes zvaného Michelson-Morley experiment, bylo měření rychlosti Země pohybující se domnělým „světlonosným éterem“.



obr.1.1.3 Schéma Michelsonova interferometru, použitého pro Michelson-Morley experiment.

Jak je znázorněno na nákresu Michelsonova interferometru, k rozdělení světla na dva monochromatické paprsky (t. j. mající jen jednu vlnovou délku), které se dále šíří v pravém úhlu, bylo použito polopropustné zrcadlo s tenkou vrstvou stříbra.

Po opuštění tohoto dělicího zrcadla se oba paprsky odrážejí několikrát mezi dalšími zrcadly. Aby oba paprsky urazily stejnou vzdálenost, je pro ně počet odrazů shodný (během skutečného Michelson-Morleyova experimentu bylo použito více zrcadel než je vidět na obrázku). Po jejich následném sloučení vznikne obrazec konstruktivní a destruktivní interference. I malá změna rychlosti světla v některém z ramen interferometru (způsobená tím, že se přístroj společně se Zemí měl pohybovat předpokládaným „éterem“) by měla zapříčinit změnu doby, kterou paprsek potřebuje na překonání vzdálenosti, což se mělo projevit jako změna interferenčního obrazce. Celé zařízení se otáčelo, aby se změnila dráha paprsků v „éteru“ vlivem toho, že rychlosti světla a Země by se měly sčítat. Experiment neměl žádný výsledek, ať bylo aparaturou otáčeno jakkoliv a stal se pravděpodobně nejznámějším a nejužitečnějším neúspěšným experimentem v historii fyziky.

Česko-rakouský fyzik Ernst Mach byl jeden z prvních, který tvrdil, že experiment vlastně vyvrátil teorii éteru. Pokrok v oblasti teoretické fyziky v té době už nabízel alternativní teorii, Lorentz-Fitzgeraldovu kontrakci, která dovolila vysvětlit i negativní výsledek Michelson-Morleyova experimentu.

Není jisté, jestli Albert Einstein znal výsledek Michelson-Morleyova experimentu, ale jeho nulový výsledek velmi pomohl všeobecnému přijetí teorie relativity. Einsteinova teorie byla zcela v souladu s výsledkem experimentu: éter neexistoval a rychlost světla byla stejná v každém směru. Konstantní rychlost světla je (společně s kauzalitou a rovnocenností inerciálních vztažných soustav) jedním ze základních východisek speciální teorie relativity.

Max Planck (1900)

energie světelného kvanta – diskrétní foton ($E = hf$),
popsal vyzařování "černého tělesa".

Albert Einstein (1905)

popsal a vysvětlil fotoelektrický jev na základě fotonů s energií $E = hf$. (Se vzrůstající frekvencí roste energie – z hlediska vlnové povahy světla nepochopitelné)

Postoj v současnosti: částicově–vlnový dualismus

Planck, Einstein, de Broglie, Schroedinger, Heisenberg, Born, Dirac, Pauli (střed 20. století)
rozvoj kvantové mechaniky popisující látku i světlo současně jako vlnění i částice.

Další měření bylo provedeno po přistání na Měsíci a umístěním zrcadla na jeho povrch. Měřením času, za který se odražený paprsek laseru vrátil zpět na zem. Dnes je rozšířena ta domněnka, že to může být oběma způsoby a že o světlu je pravděpodobně nejvhodnější přemýšlet jako o kmitajících dávkách energie (Korpuskulárně-vlnový dualismus).

1.1.1 Rychlost světla

Rychlost světla se označuje písmenem c (pravděpodobně z latinského *celeritas*, což znamená rychlost). Tato rychlost dává přirozený poměr měřítek prostoru a času a je nejvyšší možnou rychlostí šíření signálu či informace. Samotná jednotka délky metr je určena jako vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za $1/299\,792\,458$ sekundy.

Rychlost světla v látkovém prostředí je menší než rychlost světla ve vakuu c a je rovna c/n , kde „ n “ je index lomu příslušné látky (materiálu).

1.1.2 Rychlost šíření v jiných prostředích

V jiném prostředí se světlo šíří rychlostí v , která je vždy nižší než c . Podíl těchto rychlostí je roven indexu lomu daného prostředí n , tj. $n = c/v$. V důsledku toho dochází na rozhraní látek s různými hodnotami n k lomu světla.

Přesněji řečeno, toto se týká prostředí bez disperze, tj. případů, kdy index lomu nezávisí na vlnové délce. V prostředí s disperzí je třeba rozlišovat fázovou a grupovou rychlost: fázová rychlost popisuje rychlost šíření ploch se stejnou fází, zatímco grupová rychlost se vztahuje k obálce amplitudy, neboli k rychlosti šíření signálu (informace).

Je-li závislost indexu lomu na kruhové frekvenci $n(\omega)$, pak fázová rychlost má hodnotu:

$$v(\omega) = \frac{c}{n(\omega)}$$

a grupová rychlost je rovna:

$$v_g(\omega) = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega}}$$

Grupová rychlost nemůže přesáhnout hodnotu c ve shodě s teorií relativity. Naproti tomu fázová rychlost, která není spojena s přenosem informace, může nabývat téměř libovolných hodnot, vyšších než c nebo dokonce záporných (viz též index lomu).

Šíření světla ve hmotě můžeme vnímat jako opakované pohlcování a vyzařování fotonů, a to tak, že po ozáření se dostane atom do excitovaného stavu, ve kterém setrvá pouze zlomek času a následně foton zpět vyzaří, ten následně pohlí další atom atd.... Světlo se pohybuje pomaleji, protože atomy setrvávají v excitovaném stavu určitý čas. Světlo se tudíž ve hmotě šíří rychlostí stejnou jako ve vakuu, ale je neustále pohlcováno a vyzařováno atomy hmoty.

1.2 Absorpce světla

Když světlo narazí na povrch, část je pohlcena atomy povrchu daného předmětu, přičemž povrch se velmi slabě zahřeje. Každý druh atomu absorbuje určité vlnové délky (barvy) světla. Barva povrchu závisí na tom, které vlnové délky vstřebává a které odráží. List tedy je viděn jako zelený, protože absorbuje všechny barvy, kromě zelené, a my vidíme jen odrážené zelené světlo.

1.3 Odraz a lom světla

Pokud se vlnění dostane k rozhraní dvou prostředí, může dojít k jeho odrazu zpět do prostředí, ze kterého k rozhraní přichází, nebo může dojít při průchodu vlnění tímto rozhraním ke změně směru šíření vlnění.

1.3.1 Odraz světla (reflexe)

V místě dopadu světla na rozhraní vztyčíme kolmici dopadu k tomuto rozhraní, kterou nazýváme kolmice dopadu. Úhel α , který svírá paprsek dopadajícího světla s kolmicí dopadu, nazýváme úhel dopadu.

Úhel α' , který svírá paprsek odraženého světla s kolmicí dopadu, je úhel odrazu. Rovina dopadu je určena paprskem dopadajícího světla a kolmicí dopadu. Pro odraz světla platí zákon odrazu: Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α , paprsek dopadajícího i odraženého světla leží v rovině dopadu.

Při odrazu se nemění rychlost světla, neboť celý děj probíhá v jednom prostředí.

1.3.2 Lom světla (refrakce)

Pokud se vlnění dostane k rozhraní dvou prostředí, ve kterých má vlnění různou fázovou rychlost, může dojít při průchodu vlnění tímto rozhraním ke změně směru šíření vlnění. Tento jev se označuje jako lom vlnění (nebo také refrakce). Lom vlnění je obecná vlastnost vlnění vycházející z Huygensova principu.

Lom světla je optický jev, ke kterému dochází na rozhraní dvou prostředí, kterými světlo prochází. Je důsledkem různých rychlostí šíření světla v různých prostředích.

Zpomalení světla oproti jeho rychlosti ve vakuu popisuje index lomu n .

V nejjednodušším případě – pro průhledné a čiré látky – lze index lomu n považovat za konstantu, vztahující se k celému rozsahu viditelného světla. V tom případě je index lomu vždy větší než 1 a rychlost šíření světla v dané látce v je určena vztahem:

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

kde c je rychlost světla ve vakuu a v rychlost světla v daném prostředí. Samotný lom světla na rozhraní dvou prostředí lze popsat v rámci geometrické optiky pomocí Snellova zákona.

Snellův zákon patří k základním zákonům popisujícím šíření vlnění, které přechází (tzv. lomem) z jednoho prostředí do jiného prostředí.

Je důležitou součástí geometrické optiky, kde popisuje lom paprsku světla a obecněji elektromagnetického záření na rovinném rozhraní.

Nese jméno jednoho z objevitelů, holandského matematika W. van Snella.

1.3.3 Snellův zákon

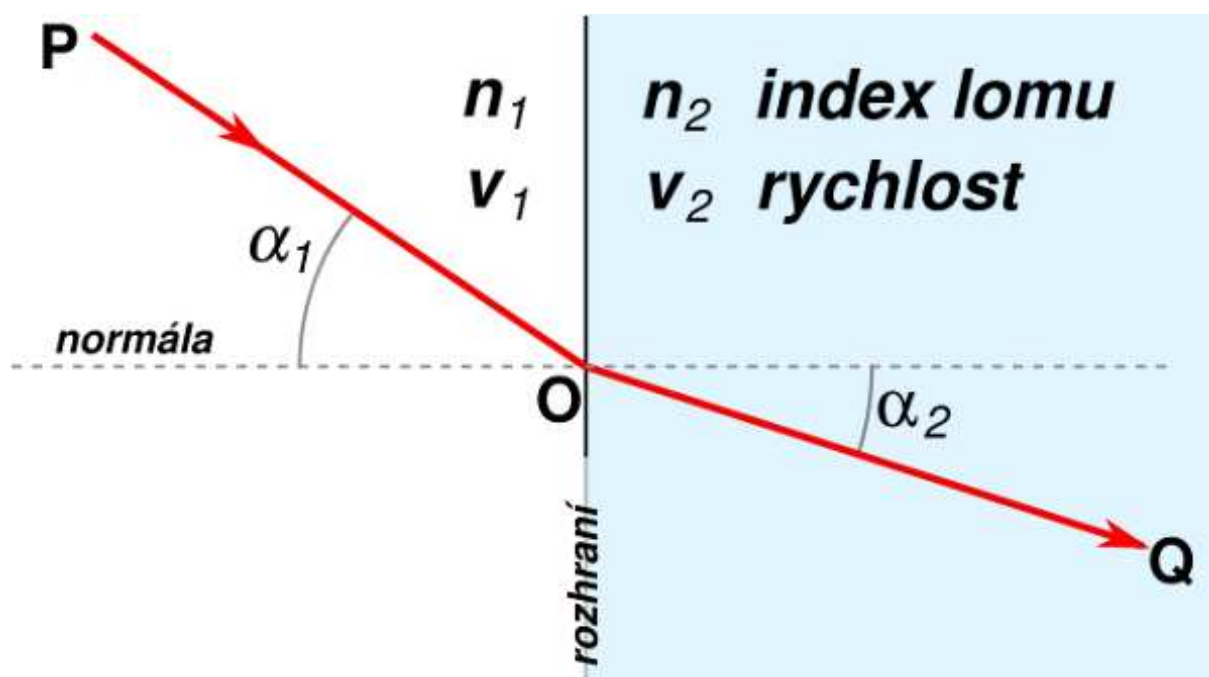
Pokud máme dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné, jsou-li indexy lomu těchto dvou prostředí n_1 resp. n_2 , a označíme-li úhly dopadajícího resp. lomeného svazku α_1 resp. α_2 (měřeno ke kolmici rozhraní), pak podle Snellova zákona platí

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2,$$

nebo také v jiném tvaru (v_1 a v_2 jsou rychlosti šíření vlnění v daném prostředí)

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Úhly se vždy měří od normály, tj. při kolmém dopadu je $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$. Paprsky se šíří vždy přímočaře.



obr.1.3.1 Snellův zákon

Ze Snellova zákona plyne, vyjádřeno slovy, že:

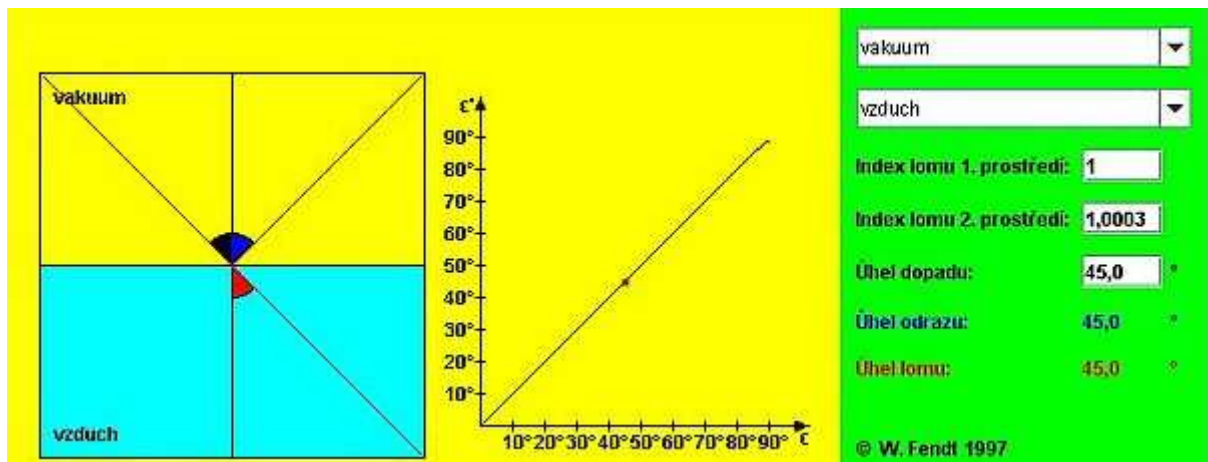
Při šíření záření z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího prostředí se paprsky lámou směrem ke kolmici (tzv. lom ke kolmici).

Při šíření záření z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího prostředí se paprsky lámou směrem od kolmice (tzv. lom od kolmice).

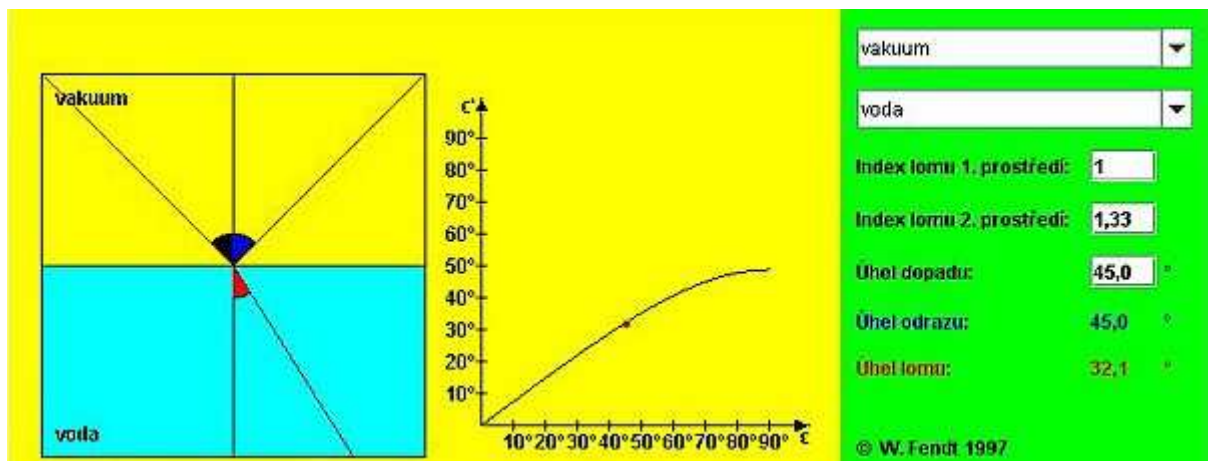
Opticky hustším resp. řidším prostředím je míněno prostředí s vyšším resp. nižším indexem lomu.

Tabulka vybraných materiálů a ilustrace:

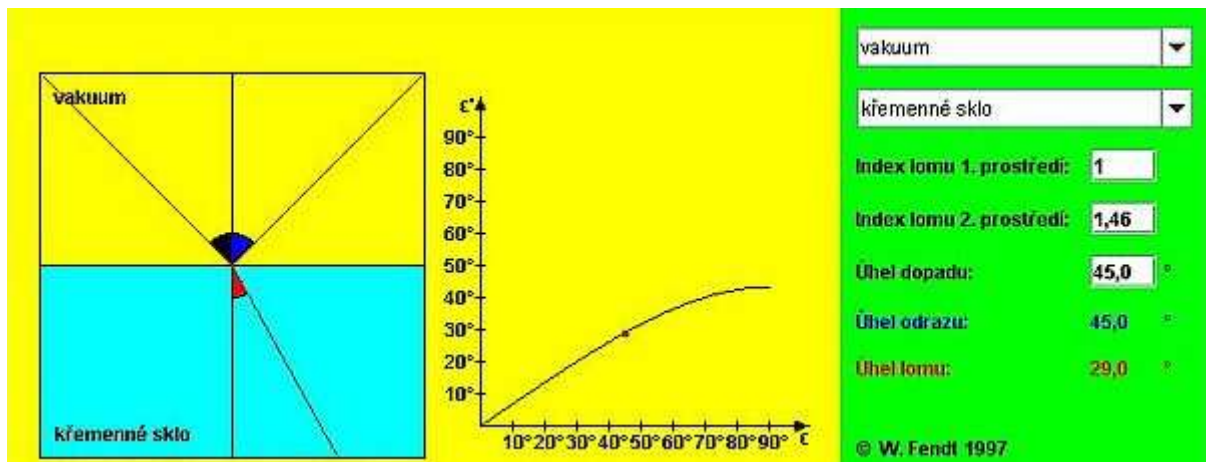
látka	index lomu n	rychlost světla v látce v
absolutní vakuum	1	$v = c$
vzduch	1,0003	$v = 0,9997c$
voda	1,33	$v = 0,75c$
sklo	$1,4 < n < 1,8$	$0,56 c < v < 0,71 c$
diamant	2,4	$v = 0,42c$



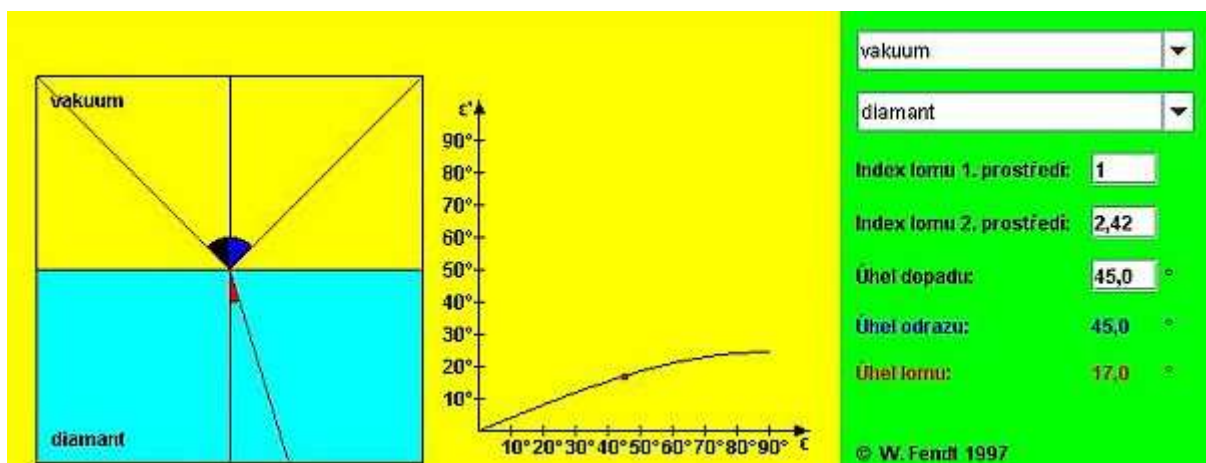
Obr.1.3.2 Přechod vakuum – vzduch



Obr.1.3.3 Přechod vakuum – voda



Obr.1.3.4 Přechod vakuum – sklo



obr.1.3.5 Přechod vakuum – diamant

1.3.4 Úplný odraz světla

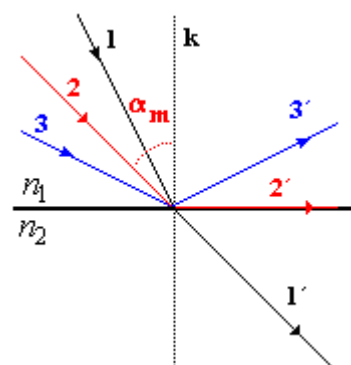
Jestliže světlo proniká z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, nastává lom od kolmice a s rostoucím úhlem dopadu α se zvětšuje i úhel lomu β . Při určitém, tzv. mezním úhlu dopadu α_m , dosáhne úhel lomu největší možné hodnoty $\beta = 90^\circ$. Úhel α_m je největší úhel, při kterém ještě nastává lom světla a lomený paprsek splývá s rozhraním.

Při větších úhlech dopadu než je α_m již světlo do druhého prostředí nepronikne. A takovému ději říkáme úplný odraz světla. Při úplném odrazu se odráží všechno dopadající světlo. Hodnotu α_m určíme ze vztahu:

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{tedy} \quad \sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$$

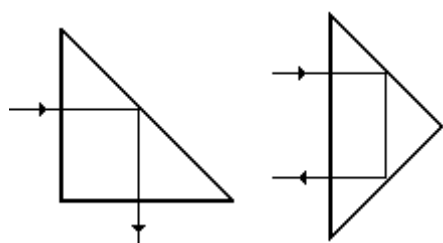
Na tomto principu jsou založeny refraktometry - přístroje pro měření indexu lomu.

Úplný odraz se používá ke konstrukci odrazných hranolů, které v mnoha optických přístrojích slouží ke změně chodu paprsků. Na rozhraní sklo - vzduch je mezní úhel $\alpha_m = 42^\circ$, takže při úhlu dopadu 45° nastává již totální odraz.

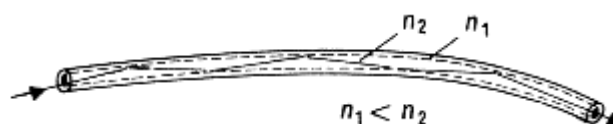


Na úplném odrazu světla jsou založeny také vláknové vlnovody, které se využívají v optoelektronice a ve sdělovací technice. Základem vláknového vlnovodu je skleněné vlákno, jehož střední část má větší index lomu než obvodová vrstva. Světelný paprsek se na obvodové vrstvě úplně odráží a světlo se šíří po trajektorii dané tvarem vlákna.

Obr.1.3.6 Úplný odraz



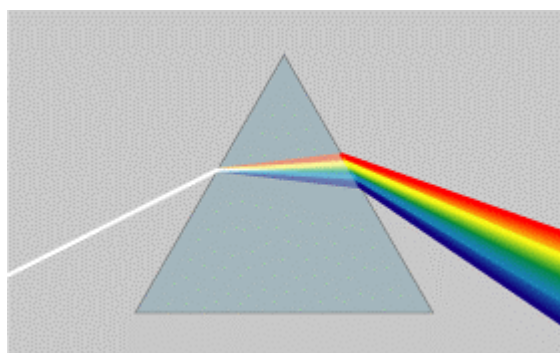
Obr.1.3.7 Úplný odraz na skleněném hranolu



Obr.1.3.8 Úplný odraz v optickém vlákně

1.4 Disperze

Index lomu je veličina charakterizující optické vlastnosti látky. Tato veličina však není konstantní, ale je závislá na vlnové délce (nebo frekvenci). Tato závislost se výrazně projevuje při lomu světla, kdy dochází k odlišnému lámání různých barevných složek světla. Jevy, které vznikají v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce se nazývají disperzí (rozkladem) světla. Disperze je tedy jev, při němž dochází během průchodu světla látkou k rozložení bílého světla na jednotlivé barvy.

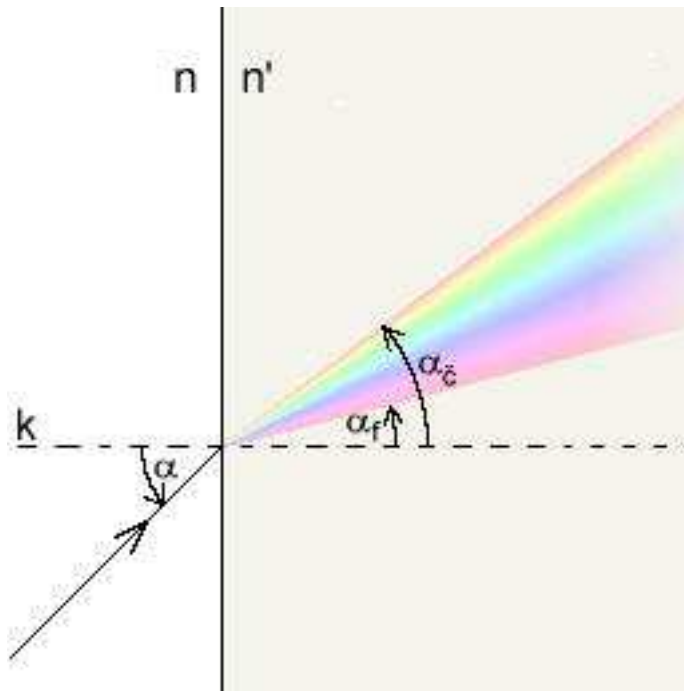


obr. 1.4.1 Disperze vskleněném hranolu

Vzhledem k tomu, že světlo je částí spektra elektromagnetického vlnění, je podstata disperze světla stejná jako u disperze vlnění.

Index lomu n se obvykle s rostoucí vlnovou délkou zmenšuje, tzn. při vstupu paprsku bílého světla z vakua do optického prostředí se nejméně odchyluje červená složka světla, pak následují oranžová, žlutá, zelená, modrá a nejvíce se odchyluje fialová složka.

System barevných pruhů, který vzniká na stínítku v důsledku rozkladu světla, se nazývá spektrum.



obr.1.4.2 Disperze světla lomem.

Pro jednotlivé látky se závislost indexu lomu na vlnové délce udává disperzní křivkou. Obvykle index lomu s rostoucí vlnovou délkou klesá, což je označováno jako normální disperze. Normální disperzi lze vyjádřit pomocí Cauchyova disperzního vzorce:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

kde A, B a C jsou materiálové konstanty. Pro úzké intervaly vlnových délek se v praxi obvykle omezujeme na první dva členy, tzn.

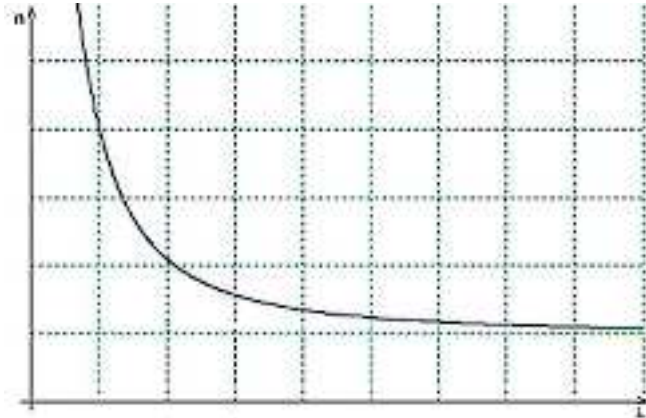
$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

Jako charakteristická disperze se označuje veličina $\frac{dn}{d\lambda}$. Tato veličina udává rychlost změny indexu lomu v závislosti na změně vlnové délky. Pro normální disperzi platí

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0$$

Z Cauchyova disperzního vztahu lze pak pro charakteristickou disperzi získat výraz

$$\frac{dn}{d\lambda} = -2 \frac{B}{\lambda^3}$$



obr.1.4.2 Graf normální disperze

Existují také látky, pro které Cauchyův vzorec neplatí. V takových látkách dochází s růstem vlnové délky k růstu indexu lomu. Tento jev se nazývá anomální disperze. Anomální disperze úzce souvisí s absorpcí světla. Pro anomální disperzi platí

$$\frac{dn}{d\lambda} > 0$$

1.5 Interference

Interference (interferenční jev) znamená vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetání jevů či hmoty. Nejčastěji se jedná o charakteristickou vlastnost vln. Při jejich pohybu a prolínání se v určitém bodě vzájemně zesilují, zatímco v jiných bodech vzájemně ruší. Tyto jevy se zobrazují pomocí interferenčního obrazu (interferenčního obrazce), kde je vidět střídající se projevy zesilování a zeslabování.

Jestliže se nějakým prostředím šíří současně více vlnění z různých zdrojů, šíří se každé z vlnění tak, jako by v daném prostředí jiná vlnění neexistovala. Tato charakteristická vlastnost vlnění se nazývá principem nezávislosti šíření vlnění.

Vzhledem k principu nezávislosti šíření vlnění dochází v dané oblasti, kde se různá vlnění setkávají, k jejich skládání. Principy skládání vln jsou obdobné jako při skládání kmitů. Výsledkem skládání vln je složené vlnění. Jevy, které jsou spojeny se skládáním vlnění se označují jako interferenční jevy. Hovoří se pak o interferenci vlnění. Výsledný kmitavý pohyb v daném místě je dán principem superpozice kmitání jednotlivých vlnění. V důsledku interference vlnění tedy dochází v některých místech ke zvýšení (zesílení) amplitudy a v některých místech k jejímu snížení (zeslabení).[10]

1.5.1 Příklad a základní vlastnosti

Určení výsledného vlnění je v obecném případě značně složitý proces, neboť skládaná vlnění se mohou odlišovat amplitudou, frekvencí, fází nebo směrem šíření. O vlastnostech interference však můžeme získat určitou představu prostřednictvím jednoduchého případu skládání dvou vlnění se stejnou frekvencí a fází nebo se stálým fázovým rozdílem. Takové vlnění se nazývá koherentní.

Uvažujme dvě koherentní vlnění s fázovým rozdílem $\Delta\varphi = 0$, které se od zdrojů vlnění šíří se stejnou fázovou rychlostí c ve směru osy x . Vlnová délka obou vlnění je stejná, $\lambda = cT$. Vzdálenost zdrojů vlnění označme d . Zdroje vlnění necht' vykonávají harmonické kmity, které lze zapsat vztahy

$$u_{10} = A_1 \sin \frac{2\pi x}{T}$$

$$u_{20} = A_1 \sin \frac{2\pi x}{T}$$

Z těchto vztahů je vidět, že v čase $t = 0$ procházejí body, které kmitají ve zdrojích svými rovnovážnými polohami, tzn. $u_{10} = 0$ a $u_{20} = 0$.

Zvolme nyní nějaký bod ležící mimo zdroje záření, např. ve vzdálenosti x_1 od prvního zdroje a x_2 od druhého zdroje, a předpokládejme, že sledovaný bod neleží mezi zdroji vlnění. V takovém případě bude platit $|x_2 - x_1| = d$. Provedme pro zjednodušení volbu bodu tak, aby platilo $x_2 - x_1 = d$.

Kmity v daném bodě x vyvolané zvlášť každým vlněním lze popsat vztahy

$$u_1 = A_1 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right)$$

$$u_2 = A_1 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$

Výsledné vlnění lze získat superpozicí těchto vln, tzn.

$$u = u_1 + u_2 = A_1 \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \right] = 2A_1 \cos \frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2 + x_1}{2\lambda} \right)$$

Označíme-li vzdálenost zvoleného bodu od středu spojnice mezi zdroji jako

$$x' = \frac{x_2 + x_1}{2}$$

a použijeme-li vzdálenost mezi zdroji d , pak lze předchozí vztah psát jako:

$$u = 2A_1 \cos \frac{\pi d}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x'}{\lambda} \right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x'}{\lambda} \right)$$

kde bylo pro zjednodušení zavedeno

$$A = 2A_1 \cos \frac{\pi d}{\lambda}$$

Amplituda A nezávisí na čase ani na poloze zvoleného bodu, takže je konstantou. Tato amplituda je však závislá na vzájemné vzdálenosti d zdrojů vlnění. Mezní hodnoty amplitudy A dostaneme, pokud položíme $\left| \cos \frac{\pi d}{\lambda} \right|$ rovno nule nebo jedné. V závislosti na vzdálenosti zdrojů a vlnové délce může tedy amplituda A dosahovat hodnot od $A = 0$ (tzn. vlnění nevzniká), kdy mezi vzdáleností d a vlnovou délkou vlnění λ platí vztah $d = (2k + 1)\lambda$ pro $k = 0, 1, 2, \dots$, až po $A = 2A_1$, kdy mezi vzdáleností zdrojů vlnění a vlnovou délkou platí $d = k\lambda$ pro $k = 0, 1, 2, \dots$

Uvedený vztah říká, že zvolený bod koná kmity se stejnou periodou T jako je perioda zdrojů a s fázovým posunem $\Delta\varphi = 2\pi \frac{x'}{\lambda}$, který závisí na poloze sledovaného bodu.

Pokud sledovaný bod leží mezi zdroji, přicházejí k němu jednotlivá vlnění z opačných směrů.

Výsledné vlnění lze popsat obdobně, avšak nyní má $x' = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{d}{2}$

konstantní hodnotu, kdežto rozdíl $x_2 - x_1 = 2x''_1$ se mění.

Zavedeme-li

$$A = 2\pi \cos \frac{2\pi x''}{\lambda}$$

$$\varphi = \frac{\pi d}{\lambda}$$

pak lze výsledné vlnění dvou protisměrných vln zapsat ve tvaru

$$u = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \varphi \right)$$

Uvažujme nyní případ interference dvou polarizovaných vlnění o rozdílných, ale blízkých frekvencích ν a ν' , které se šíří ve stejném směru stejnou fázovou rychlostí c a obě vlnění mají stejnou amplitudu. Taková vlnění lze popsat rovnicemi

$$u_1 = A \sin 2\pi v \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

$$u_2 = A \sin 2\pi v' \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

Výsledné vlnění, které získáme interferencí těchto vln je

$$u = u_1 + u_2 = 2A \cos 2\pi \left[\frac{v-v'}{2} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \sin 2\pi \left[\frac{v+v'}{2} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]$$

Pokud se frekvence v a v' od sebe příliš neliší, tzn. $v' - v = \Delta v$ je malá veličina, pak lze

položít $\frac{v+v'}{2} \approx v$ Z předchozího vztahu pak dostaneme

$$u = 2A \cos 2\pi \frac{\Delta v}{2} \left(t - \frac{x}{c} \right) \sin 2\pi v \left(t - \frac{x}{c} \right) = A_v \sin 2\pi v \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

Interferencí tedy vzniká postupná vlna s amplitudou

$$A_v = 2A \cos 2\pi \frac{\Delta v}{2} \left(t - \frac{x}{c} \right), \text{ která se s časem mění. Ve výsledném vlnění se tedy vyskytují}$$

rázy.

Je tedy vidět, že vlnění je určitým způsobem rozděleno na skupiny (grupy) vln, které se nacházejí mezi body, v nichž je amplituda A_v nulová. Vzdálenost mezi těmito body získáme tak, že položíme kosinus ve výrazu pro A_v roven nule, čímž dostaneme řešení

$$2\pi \frac{\Delta v}{n} \left(t - \frac{x_n}{c} \right) = (2n-1) \frac{\pi}{2} \text{ pro } n = 1, 2, 3, \dots \text{ Nulové body se tedy nacházejí na souřadnicích}$$

$$x_n = ct - \frac{2n-1}{2} \frac{c}{\Delta v} = x_{n-1} + \frac{c}{\Delta v}$$

, odkud pro vzdálenost nulových bodů můžeme s využitím fázové rychlosti dostat

$\left| \frac{c}{\Delta v} \right| = \left| \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \right|$ Tato místa však současně postupují ve směru vlnění. Vlny jsou tedy rozděleny do

určitých skupin (vlnových balíků), které mají délku $\frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$, a šíří se vpřed tzv. grupovou rychlostí.

1.5.2 Interference světla

Pod pojem interference světla jsou zahrnovány jevy, které jsou projevem skládání světelných vln. Interference světelných vln se projevuje podobnými jevy jako interference mechanických vln, především tedy zesilováním a zeslabováním intenzity světla v různých místech. Velmi malá vlnová délka světelného vlnění však může způsobit výskyt interferenčního jevu, aniž by došlo k odklonu od přímočarého šíření světla. To umožňuje odlišovat jevy ryze interferenční, při nichž nedochází k ohybu světla, od jevů ohybových, při nichž se světlo šíří i do oblastí, které nejsou přímočarým šířením světla dostupné.

Pozorovatelný interferenční jev nastává pouze mezi koherentními vlnami. Interferují samozřejmě také vlny, jejichž fázový rozdíl se s časem mění. U světelného vlnění je vzhledem k velké frekvenci tato změna tak rychlá, že ji nelze pozorovat.

Pro popis interference světla lze využít obecných závěrů pro interferenci vlnění. Interferenci světla lze ilustrovat na několika jednoduchých příkladech.

1.5.3 Vznik stojatých vln při kolmém odrazu

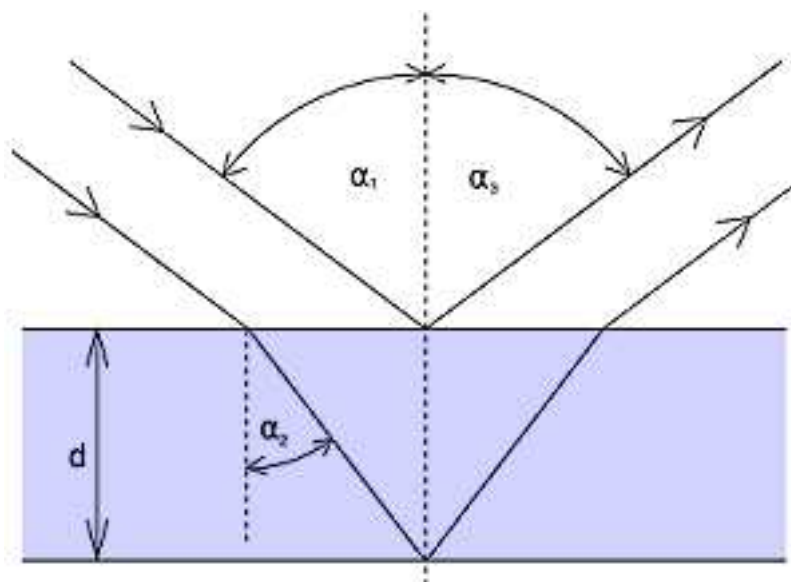
Pokud dopadá monochromatické světlo o vlnové délce λ kolmo na rovinné zrcadlo, dochází po odrazu tohoto světla ke vzniku stojatého vlnění. Při tomto jevu dochází ke skládání dvou samostatných vln, vlny dopadající a vlny odražené. Jedná se tedy o dvě proti sobě postupující vlny, které mají stejnou fázovou rychlost. Výsledné vlnění má pak charakter stojatého vlnění.

První maximum intenzity vlnění se nachází ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{4}$ od rovinného zrcadla. Další maxima jsou od prvního vzdáleny vždy o $k \frac{\lambda}{2}$, kde $k = 1, 2, \dots$.

1.5.4 Interference na planparalelní desce

Nejčastěji lze interferenční jevy pozorovat na tenkých vrstvách, jako např. na mýdlových bublinách, kde pozorujeme různé duhové barvy, nebo podobně na tenkých vrstvách oleje na vodní hladině, na mokré dlažbě, na prasklinách v ledu apod. Obecný případ tenké vrstvy lze zjednodušit na tzv. planparalelní desku (vrstvu), což je tenká rovinná vrstva, jejíž obě strany jsou vzájemně rovnoběžné.

Při dopadu rovinné světelné vlny na planparalelní desku dochází současně k odrazu i lomu vlny, což je příčinou vzniku interference vlny.



obr.1.5.1 Interference na planparalelní desce

Předpokládejme, že na planparalelní desku o indexu lomu n dopadá pod úhlem α rovinná vlna. Tato vlna se částečně odráží a částečně se láme do planparalelní vrstvy. Lomený paprsek se na spodním rozhraní planparalelní vrstvy opět odráží zpět, a poté se láme zpět do původního prostředí. V původním prostředí pak vzniká fázový rozdíl mezi odraženou vlnou a vlnou lomenou. Toto fázové zpoždění lze určit ze vztahu

$$\varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T} t = \frac{2\pi}{\lambda} vt = \frac{2\pi}{\lambda} \delta, \text{ kde } v \text{ je rychlost světla, } t \text{ je časové zpoždění mezi odraženým}$$

a lomeným paprskem, λ je vlnová délka a $\delta = vt$ označuje dráhový rozdíl v planparalelní desce. Jako dráhový rozdíl se označuje vzdálenost, o kterou se liší vzdálenosti uražené dvěma

různými paprsky. Dráhový rozdíl δ_d v planparalelní desce lze převést na dráhový rozdíl v původním prostředí pomocí vztahu

$$\delta_0 = v_0 t = \frac{v_0}{v_d} v_d t = n_{d0} \delta_d, \text{ kde } n_{d0} \text{ je relativní index lomu.}$$

Pro dráhový rozdíl δ_d v planparalelní desce platí $\delta_d = 2d \cos \alpha_2$. Použijeme-li zákona lomu,

$$\text{dostaneme } \cos \alpha_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{n_{d0}^2}}$$

. Pokud označíme $n = n_{d0}$ a $\alpha = \alpha_1$, dostaneme pro dráhový rozdíl výraz

$$\delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$$

Pro určení výsledného dráhového rozdílu, je nutno ke tomuto vztahu připočíst polovinu

vlnové délky vlny, tzn. $\frac{\lambda}{2}$. Důvodem je skutečnost, že paprsek se na hustším prostředí odráží

s opačnou fází, a na prostředí řidším se stejnou fází (podobně jako při odrazu na volném a pevném konci). Výsledný dráhový rozdíl mezi dvěma paprsky má tedy hodnotu

$$\Delta = \delta + \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}$$

V důsledku interference vlnění dojde k zesílení tehdy, bude-li dráhový rozdíl Δ roven sudému počtu půlvln, tzn.

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

pro $k = 1, 2, \dots$

Při kolmé dopadu světla na planparalelní desku, tzn. $\alpha = 0$, dojde tedy v odraženém světle k zesílení pro

$$d = \frac{2k-1}{4n} \lambda$$

a k zeslabení pro

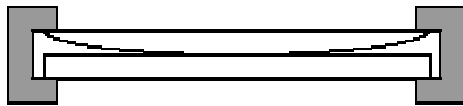
$$d = \frac{k}{2n} \lambda$$

Tyto vztahy odpovídají případu stojatých vln.

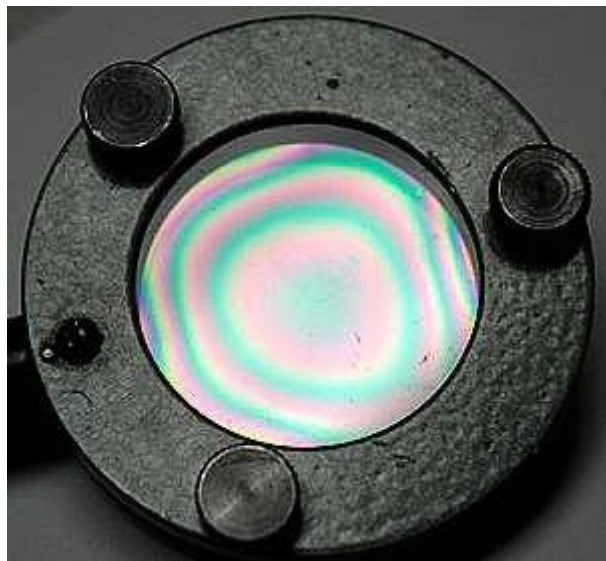
V případě světla se spojitým spektrem, lze zobecnit předchozí závěry, které byly získány pro monochromatické světlo. Výsledkem interference bílého světla na planparalelní vrstvě je světlo zbarvené v závislosti na tloušťce planparalelní vrstvy. Důvodem zbarvení

světla je to, že při určité tloušťce planparalelní vrstvy se budou některé vlnové délky světla zesilovat a jiné zeslabovat, což vede ke změně spektra.

Podobné jevy lze pozorovat také při interferenci na tzv. Newtonových sklech, což je plankonvexní čočka s velkým poloměrem křivosti, která je svojí vypuklou stranou položena na rovinné skleněné destičce. Na klínové vrstvě pozorujeme v monochromatickém světle soustavu světlých a tmavých proužků, jejichž vzdálenost je závislá na velikosti klínu. Pokud světlo není monochromatické, objeví se na klínové vrstvě duhově zbarvené proužky. Podobný jev lze pozorovat také na Newtonových sklech, kde vznikají tzv. Newtonovy kroužky.[2]



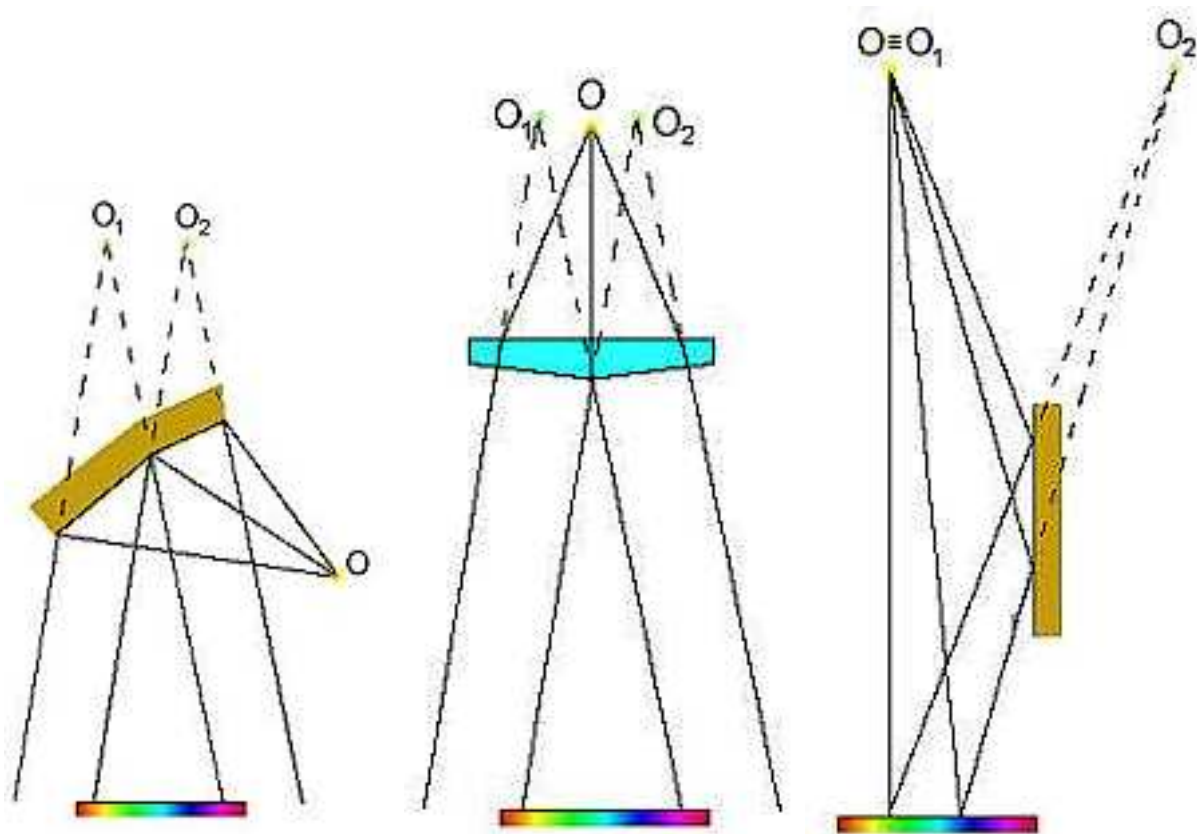
obr.1.5.2 Newtonova skla



obr.1.5.3 Newtonovy kroužky

1.5.5 Interference světla ze dvou bodových zdrojů

K interferenci dochází také v případě, že máme dva bodové zdroje světla, jejichž záření se v oblasti pozorování překrývá. K zajištění koherence obou zdrojů se v optice využívají soustavy zrcadel nebo hranolů, které způsobují změnu směru vlnění, které pochází z jednoho zdroje. Příkladem mohou být Fresnelova zrcadla nebo Fresnelův dvojhranol, Loydův pokus, popř. Youngův experiment.[2]



obr.1.5.4 Fresnelova zrcadla

obr.1.5.5 Fresnelův dvojhranol

obr.1.5.6 Loydův pokus

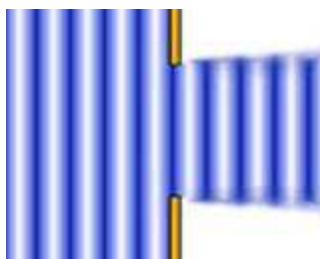
1.6 Difrakce

Difrakce (ohyb) vlnění označuje jevy, které vznikají při průchodu vlnění otvorem nebo kolem překážky způsobující narušení vlnění. Ohyb vlnění je charakteristickou vlastností vlnění a je vysvětlován pomocí Huygensova principu. Příkladem ohybového jevu je průchod vlnění otvorem v překážce.

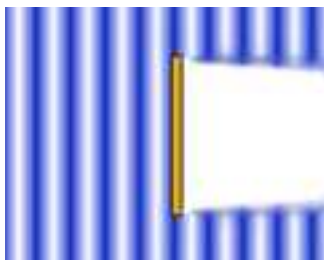
Předpokládejme, že na překážku s otvorem dopadá rovinná vlnoplocha. Pokud jsou rozměry otvoru dostatečně velké vzhledem k vlnové délce vlnění, šíří se za překážkou vlnění téměř přímočaře a difrakce se uplatňuje jen velmi málo. Má-li však otvor rozměry srovnatelné s vlnovou délkou vlnění, pak vlnění proniká i za okraje překážky do tzv. geometrického stínu, a vzniká tak ohybový jev.

Ohybový jev nastává nejen na otvoru v překážce, ale i na překážce, jsou-li její rozměry opět srovnatelné s vlnovou délkou vlnění. Je-li překážka velká ve srovnání s vlnovou délkou vzniká za ní stín. Je-li rozměr překážky srovnatelný s vlnovou délkou vlnění, nastává ohyb vlnění a vlnění se projevuje i za překážkou.

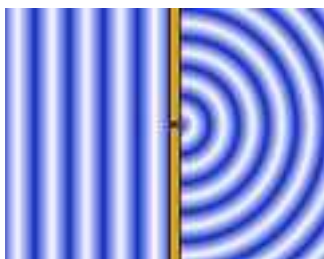
Následující obrázky schematicky zachycují některé jednoduché příklady ohybu vlnění.



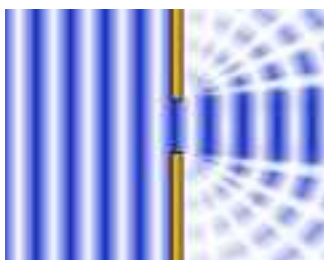
Obr.1.6.1 Schematické znázornění ohybu rovinné vlny na velké štěrbině. Po průchodu štěrbinou je vlnění omezeno rozměry štěrbiny.



obr.1.6.2 Schematické znázornění ohybu rovinné vlny za velkou překážkou.



obr.1.6.3 Schematické znázornění ohybu rovinné vlny za velmi malou (bodovou) štěrbinou. V takovém případě lze celou štěrbinu považovat za bodový zdroj vlnění, a podle Huygensova principu se vlnění bude šířit jako kulové vlnění do všech směrů se stejnou intenzitou.



obr.1.6.4 Schematické znázornění ohybu rovinné vlny za štěrbinou, jejíž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou vlnění. V tomto případě dochází k interferenci jednotlivých elementárních vlnění, což má za následek, že vlnění se šíří nejen přímočaře, ale také do stran. Intenzita vlnění je v tomto případě závislá na směru, pod kterým se vlnění za štěrbinou šíří, přičemž se zvětšujícím se úhlem od směru šíření vlnění se postupně objevují maxima a minima intenzity. Největší intenzita leží ve směru šíření vlnění. Vedlejší maxima mají intenzitu nižší. Podobný jev lze pozorovat při ohybu světla na štěrbině v optice.

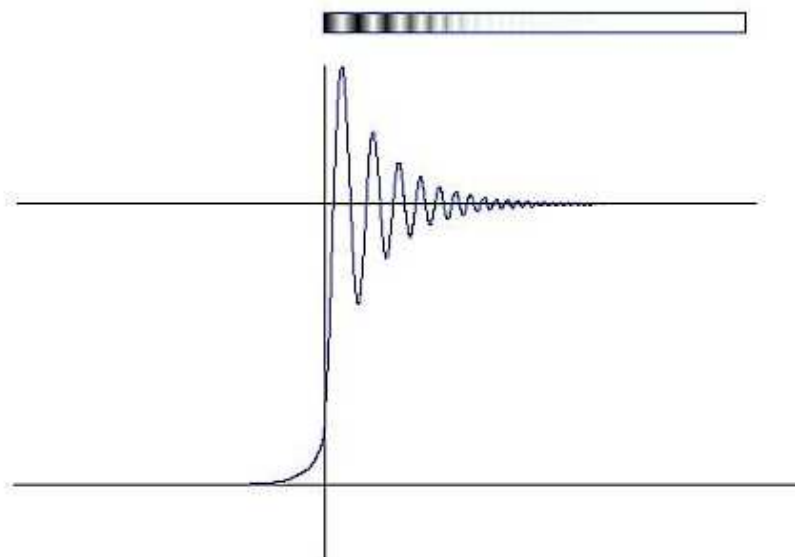
1.6.1 Druhy ohybových jevů

Ohybové jevy se výrazně projevují především tehdy, pokud jsou rozměry překážek srovnatelné s vlnovou délkou světla. Vlnová délka světla je však velmi malá, takže ohybové jevy jsou pozorovány především na úzkých štěrbinách, malých otvorech, úzkých neprůhledných drátech apod. Ohyb světla se využívá ve spektroskopii.

Rozlišujeme dva základní druhy ohybových jevů. [10]

1.6.1.1 Fresnelovy ohybové jevy

Fresnelovy ohybové jevy nastávají tehdy, je-li světelná vlna kulová, což nastává v dostatečné blízkosti bodového zdroje. Důležitým příkladem Fresnelova jevu je ohyb na přímé hraně.



obr.1.6.5 Fresnelův ohyb na přímé hraně.

V případě osvětlení monochromatickým světlem dochází při ohybu na hraně ke vzniku ohybových proužků, které jsou rovnoběžné s přímou hranou.

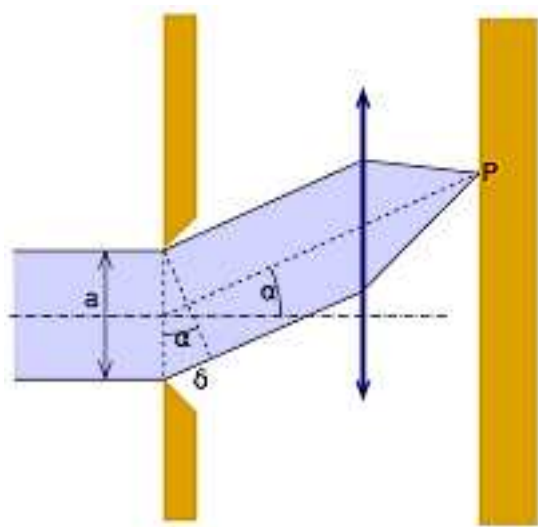
V horní části je zobrazen pozorovaný jev, a ve spodní části je rozdělení intenzity světla.

1.6.1.2 Fraunhoferovy ohybové jevy

Pokud jsou paprsky ve svazku paprsků vzájemně rovnoběžné, nastávají Fraunhoferovy ohybové jevy. Ohybové jevy ve velké vzdálenosti od (bodového) zdroje lze považovat za Fraunhoferovy. Z praktického hlediska lze za nejdůležitější Fraunhoferův ohybový jev považovat ohyb světla na štěrbině, popř. na optické mřížce.

1.6.1.2.1 Ohyb světla na štěrbině

O ohybu světla na štěrbině mluvíme tehdy, pokud na stínítko s malým otvorem dopadá světelná vlna, u které se po průchodu štěrbinou vyskytne ohybový jev. Každý bod štěrbiny lze podle Huygensova principu považovat za zdroj elementárního vlnění. Tato vlnění spolu interferují, čímž dochází ke vzniku ohybového jevu. Intenzita světla, kterou pozorujeme pod určitým úhlem α je závislá na interferenci všech elementárních zdrojů, které se nachází v prostoru štěrbiny. K nalezení úhlů, pod kterými lze nalézt maximální a minimální intenzitu světla si vybereme svazek paprsků, které vystupují ze štěrbiny pod úhlem α . V rovinné vlnoploše dopadajícího světelného svazku mají všechny paprsky stejnou fázi. To však neplatí ve vybraném svazku za štěrbinou. Mezi krajními paprsky svazku totiž vzniká dráhový rozdíl δ .



Obr. 1.6.6 Ohyb světla na štěrbině

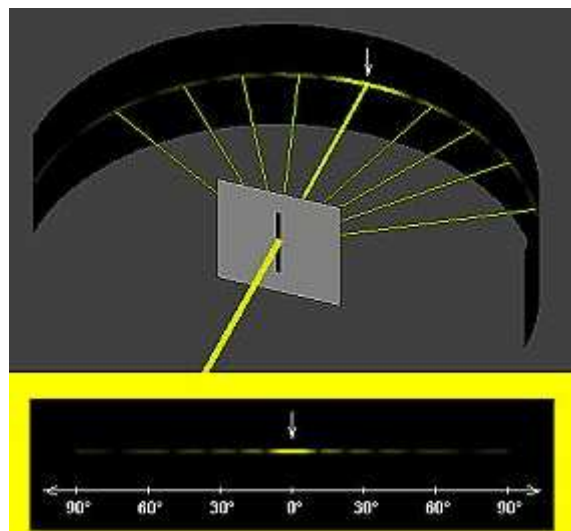
Je také vidět, že dráhové zpoždění paprsku, který se nachází uprostřed, tzn. ve vzdálenosti $\frac{a}{2}$ je poloviční, tedy $\frac{\delta}{2}$ ve srovnání s rozdílem mezi krajními paprsky. To lze využít k úvaze, že ke každému paprsku ze svazku lze ve vzdálenosti $\frac{a}{2}$, tedy ve vzdálenosti poloviny štěrbině, nalézt paprsek, jejichž vzájemný dráhový rozdíl je $\frac{\delta}{2}$. Pokud se budou všechny tyto dvojice paprsků vzájemně rušit, pak nastane interferenční minimum. Takový stav však může nastat jen tehdy, je-li tento dráhový rozdíl $\frac{\delta}{2}$ roven lichému počtu půlvln $\frac{\lambda}{2}$. To znamená, že celý dráhový rozdíl δ musí být roven sudému počtu půlvln, tedy celému počtu vln. K zeslabení tedy dojde pro

$$\delta = a \sin \alpha = k\lambda$$

pro $k = 1, 2, \dots$, kde λ je vlnová délka světla.

Z předchozí rovnice lze určit úhly α_k , pod nimiž se světlo nešíří, neboť intenzita světla je v těchto směrech nulová. Tyto úhly musí splňovat podmínku

$$\sin \alpha_k = k \frac{\lambda}{a}$$



obr.1.6.7 Ohyb světla na štěrbině

Mezi těmito směry se nachází místa s maximální intenzitou světla. Kolmo k rovině štěrbině dochází k zesílení všech paprsků, v tomto směru leží tzv. hlavní maximum světelné intenzity. Po obou stranách od hlavního maxima se pak nachází maxima vedlejší, která leží v takových

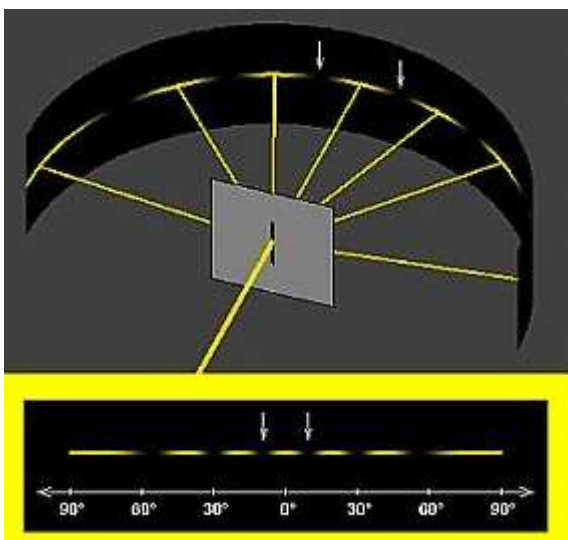
směrech, v nichž dochází k největšímu částečnému zesílení mezi dvěma sousedními úhly α_k . Tato maxima nastanou tehdy, je-li dráhový rozdíl δ roven lichému počtu půlvln, tzn. pro vedlejší maxima platí podmínka

$$\sin \alpha_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2a}$$

pro $k = 1, 2, \dots$. Mluvíme také o maximu 0. řádu (pro hlavní maximum), maximu 1. řádu, maximu 2. řádu, atd. (pro vedlejší maxima).

1.6.1.2.2 Ohyb světla na optické mřížce

Podobným způsobem lze sledovat ohyb také na větším počtu štěrbin. Velké množství pravidelně a hustě rozložených velmi tenkých štěrbin (vrypů) označujeme jako optickou (ohybovou nebo difrakční) mřížku. Vzdálenost d středů dvou sousedních štěrbin se nazývá mřížková konstanta.



Pokud na mřížku dopadá rovnoběžný svazek světla, stanou se všechny body štěrbin zdroji elementárního vlnění. Budeme-li sledovat světlo, které z mřížky vystupuje pod úhlem α , uvidíme pouze paprsky, které jsou od kolmice k mřížce odchýleny o úhel α . Mezi paprsky ze dvou sousedních štěrbin je dráhový rozdíl δ . Pokud je splněna podmínka

$$\delta = d \sin \alpha = k \lambda$$

obr.1.6.8 Ohyb světla na optické mřížce

pro $k = 0, 1, 2, \dots$, pak dochází k zesílení, přičemž k určuje řád maxima. Při velkém počtu štěrbin se ve všech směrech, které nevyhovují uvedené podmínce světlo téměř úplně vyruší. Interferenční jev tedy při ohybu na optické mřížce dává sérii velmi úzkých tenkých maxim na tmavém pozadí.

1.6.1.3 Ohybové spektrum

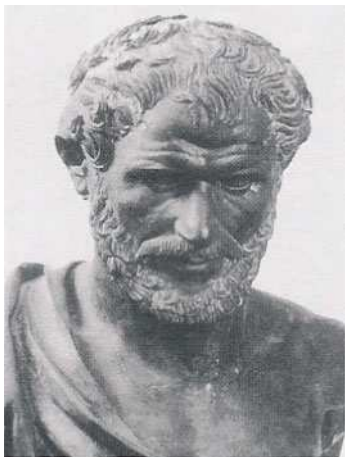
Pokud svazek světla dopadající na štěrbinu nebo mřížku není monochromatický, vytváří se ostrá maxima pro různé vlnové délky v různých směrech. Vedlejší maxima mají tedy pro různé vlnové délky odlišnou vzdálenost od maxima hlavního. Vzniká tzv. ohybové (difrakční) spektrum. Vzhledem k tomu, že úhly α_k bývají velmi malé, bývají vzdálenosti jednotlivých spektrálních čar od hlavního maxima úměrné vlnovým délkám. Na ohybové mřížce se červené světlo odchyluje více než světlo fialové. U spektra vytvořeného hranolem je tomu naopak.

2 Světelné jevy

2.1 Duha



obr.2.1.1 Duha



obr.2.1.2 Aristoteles (384-322 před n. l.)

Podle starověkých představ byla duha někdy vysvětlována zažehnutím hořlavých par slunečními paprsky. Tyto páry měly být do ovzduší vytlačeny z podzemí vsakující se dešťovou vodou. Jeden z nejvýznamnějších učenců starověkého Řecka Aristoteles, autor nejstaršího meteorologického pojednání *Meteórologika*, vysvětloval ve 4. století před naším

letopočtem duhu jako odraz slunečních paprsků na dešťovém mraku. Byl prvním, kdo tvrdil, že duhový oblouk neleží v určitém místě spatřené se zemí, ale že má smysl uvažovat jen o směru, kam se duha promítá.

Počátkem 14. století dominikánský mnich Dietrich z Freiberga (Theodoricus Teutonicus) objasňoval vznik duhy pomocí skleněných koulí naplněných vodou. Zjistil, že paprsek se při vstupu do baňky lámá a odráží, a tedy usuzoval, že duha vzniká na spoustě kapek deště. Barvy duhy mylně vysvětloval tím, že barva paprsku vystupujícího z kapky závisí na její velikosti. Pomocí dvojnásobného odrazu paprsku uvnitř kapky správně vysvětlil i vznik sekundární duhy. Tento scholastický učenec v latinském spise O duze a vjemech paprsků však přesto předběhl dobu, když poznal princip duhy a tvrdil, že duha nevzniká odrazem či zrcadlením od oblaku, ale lomem a odrazem světla na množství kapek. Nezávisle na Dietrichovi z Freiberga, téměř současně, ale v jiné části světa se duhou zabýval islámský učenec Kamal al Din al Farisi, jenž prý též konal podobné pokusy se skleněnými koulemi a vysvětlil správně vznik duhového oblouku.

V roce 1621 formuloval holandský fyzik Willebrord Snell (1580-1626) zákony lomu světla. O několik let později přišel se správným fyzikálním výkladem duhy René Descartes, jenž užil k vysvětlení právě zákony lomu, které snad též sám odhalil nezávisle na Snellovi v díle Dioptrice z roku 1637.

René Descartes (1596-1650) konal pokusy s vodou naplněnými lahvemi a propočtl dráhy paprsků vstupujících do kapky a po jednom resp. dvou vnitřních odrazech vystupujících ven. Po spočtení tisíce drah paprsků ukázal, že vycházející paprsky budou zahuštěny pod určitým úhlem (42° pro jeden resp. 52° pro dva vnitřní odrazy paprsku uvnitř kapky, což jsou poloměry primárního a sekundárního duhového oblouku). Descartes ještě nedovedl objasnit vznik barev duhy. To se podařilo až Newtonovi, jež ukázal, že bílé světlo se rozkládá na své barevné složky a že každá duhová barva má jiný index lomu, a tudíž paprsky vycházející z dešťové kapky se budou koncentrovat pro jednotlivé barvy v mírně odlišných úhlech, což vysvětluje jednotlivé barevné pásy v duze. Mnoho z tajů vzniku duhy se však již před Newtonem (1642-1727) podařilo objasnit Janu Markovi Marcimu (1595-1667). Tento význačný český fyzik popsal vznik duhy ve svém díle Thaumantias, aneb spis o nebeském oblouku, přirozené podstatě jeho barev, vzniku a příčinách z roku 1648. Marci nezávisle na Descartovi vysvětlil vznik duhy lomem a odrazem světla, sám konal pokusy s hranolem a zjistil, že bílé světlo se rozkládá na duhové barvy a úhel lomu je specifický pro jednotlivé barvy - a to ještě před Newtonem.

Když později Huygens přišel s vlnovou teorií světla, mohly být vysvětleny pomocí interference i podružné duhové oblouky. V objasňování dalších jevů souvisejících s duhou hraje roli také polarizace světla a další faktory. Odhalování nádherného přírodního úkazu, jak je vidět, prochází napříč historií fyziky a zasluhuje si naši pozornost i dnes.[1]

2.1.1 Co je to duha

Snad každý si někdy všiml barevného duhového oblouku při končící dešťové přeháňce. Déšť ještě padá, ale zároveň sluneční paprsky osvětlují dešťové kapky, v nichž se světlo láme, rozkládá a odráží, a tak právě na opačné straně než svítí Slunce můžeme pozorovat duhu. Ta opisuje část kružnice o poloměru asi 42° kolem místa, kam směřuje stín pozorovatelovy hlavy. Proto je možné duhu z rovného povrchu pozorovat je-li Slunce níže než 42 stupňů nad obzorem. Duhový oblouk pak vystupuje tím výše, čím níže se Slunce sklání k obzoru. Pokud by tedy Slunce zářilo právě na horizontu, objevil by se na opačné straně ve vodních kapkách obraz duhy ve tvaru půlkruhu.

Podobně jako po průchodu paprsku skleněným hranolem, kde se světlo při vstupu do opticky hustšího prostředí rozkládá, vidíme i v duze rozložené sluneční světlo na jednotlivé

barevné složky. Od vnějšího okraje duhy směrem k vnitřnímu plynule přechází v pořadí: červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá až fialová. Do pověstných sedmi barev duhy zbývá zařadit už jen barvu indigovou. Ve skutečnosti jsou však barevné přechody zcela spojitě.



Obr.2.1.3 primární a sekundární duha

Při intenzivnější dešti se objevuje nad duhou druhá, méně výrazná, tzv. sekundární duha o větším poloměru (asi 51°), v níž je sled barev opačný než u primární duhy. Tato vedlejší duha vzniká díky dvojnásobnému odrazu paprsků uvnitř kapek. Dále je patrné, že

obloha se jeví znatelně světlejší uvnitř primárního duhového oblouku a pás mezi oběma duhami je naopak tmavší. Při pozorování ze zemského povrchu lze pozorovat duhu jen jako neúplný kruh. Celistvý duhový kruh by mohl být vidět z vysoké věže nebo letadla.

Avšak duhu lze spatřit nejen díky dešťovým kapkám, ale třeba i ve tříšti kapek u vodopádů či fontán, nebo jen v kapkách rosy.

V našich zeměpisných šířkách se duha objevuje obvykle k večeru. Je to dáno tím, že u nás převládá západní proudění vzduchu, a tedy objeví-li se při končícím dešti pás jasného nebe, přichází nejčastěji od západu, odkud Slunce svítí právě navečer. A protože svítí již nízko, duhový oblouk tudíž vystupuje vysoko, což ho činí nápadnějším. Avšak svítí-li Slunce ráno nad východním obzorem, při západním proudění se ještě před deštěm nasune oblačnost která Slunce zakryje, a proto tedy duha nenastává ráno tak často.

Mezi nezapomenutelné zážitky lze zařadit spatření duhy v noci. Tu může vyvolat měsíční svit v nočním dešti. Taková duha je slabá s nevýraznými barvami a poměrně vzácná, neboť Měsíc dostatečně svítí jen v období nedlouho kolem úplňku. Do dob Aristotelových bylo dokonce spatření noční duhy považováno za pověru.

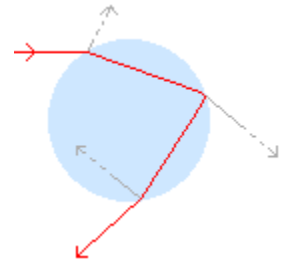
Na rozdíl od jiných přírodních úkazů nebyvala duha považována za špatné znamení, ale díky okolnostem jejího výskytu za ustávajícího deště spíše za symbol naděje a usmíření. Podle První knihy Mojžíšovy je duha znamením božské úmluvy se zemí, že již nedojde ke zhoubné potopě.

V některých kulturách však duha není přijímána s obdivem. Tak například pro barmské Kareny duha představuje nebezpečné démonické síly schopné pohltnout lidskou duši a vítaným jevem není ani pro africký kmen Zulů i další. Pro některé kmeny Finska či Laponska ztělesňuje duhový oblouk luk boha hromu, který střílí blesky místo šípů. K duze se váží i některé pověry. Dle jedné z nich by na koncích duhy v místech, kde se duha promítá k povrchu země, měl být zlatý poklad. Vzhledem k tomu, že se duha promítá jako oblouk o stále stejném poloměru z jakéhokoliv místa v okolí pozorovatele, pátral by případný hledač pokladu marně až do konce deště či svitu Slunce. [1]

2.1.2 Jak duha vzniká

Na vzniku duhy se podílí lom, rozklad, odraz a interference světla ve velkém množství vodních kapek, které obklopují pozorovatele při současném svitu Slunce resp. Měsíce.

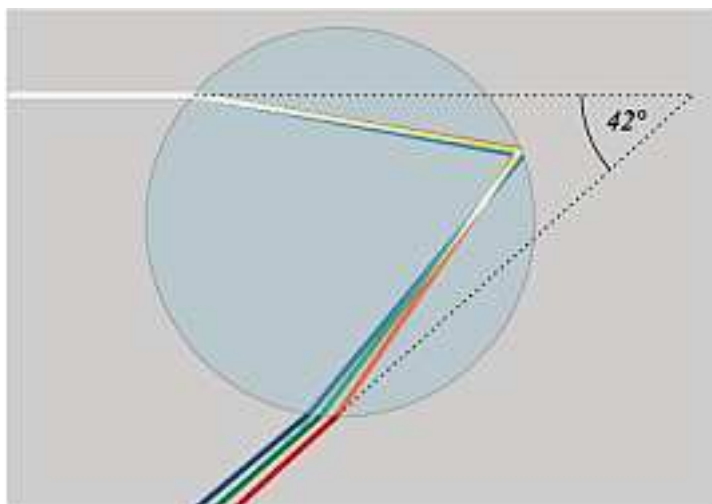
Světlo vstupující do opticky hustšího prostředí (např. ze vzduchu do vody) se láme směrem ke kolmici tak, jak je znázorněno na obrázku vpravo, kde vstupní úhel alfa je větší než úhel lomu beta. Sluneční paprsky vstupující do kapky se odráží a lámou. Pro vysvětlení primárního duhového oblouku nás budou zajímat paprsky, které se po vstupu do kapky lámou, odrážejí na protější straně kapky a vycházejí lomem opět na straně směrem ke Slunci pod ostrým úhlem vůči vstupu paprsku. Takový paprsek je vyznačen na obrázku červeně, ostatní odrazy a lomy pak šedě.



Obr.2.1.4 Lom světla

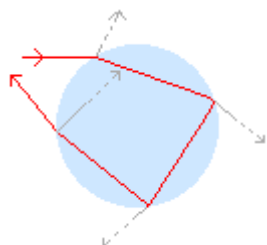
v kapce vody pro primární duhu

Pokud budou paprsky vstupovat do kapky v různých vzdálenostech od osy kapky směřující ke Slunci uvidíme, že vystupující paprsky se budou koncentrovat nejvíce kolem úhlu asi 42° (jež svírají se směrem ke Slunci) a ostatní paprsky budou vystupovat pod menšími úhly. Na obrázku vidíme průchod paprsku kapkou. Paprsek vstupuje zleva pod úhlem, který svírá s přímkou vedenou středem kapky a místem vniku do kapky - tj. úhel vstupu. Vystupující paprsek svírá se vstupujícím tzv. duhový úhel, který má maximum právě kolem hodnoty 42° .



obr. 2.1.5 Rozklad světla v kapce vody

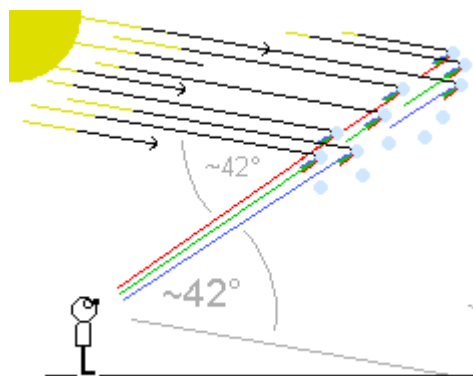
Uvnitř kapek však dochází také k více vnitřním odrazům paprsku. Paprsky odrážející se dvakrát uvnitř kapky budou vycházet nejčastěji pod úhlem asi 51° vůči vstupujícímu paprsku. Takto vzniká již ne tak výrazná tzv. sekundární duha, která se objevuje nad hlavní duhou.



Uvedený popis průběhu paprsků však neprobíhá jen v jedné rovině, ale v celé kapce zároveň a ve všech rovinách. Proto uvidíme duhu jako oblouk symetrický kolem osy, kam směřuje pozorovatelův stín vrhaný Sluncem.

Obr.2.1.6 Lom světla v kapce vody pro sekundární duhu

Protože je však sluneční světlo složeno z různých barev a paprsek každé barvy se láme pod trochu jiným úhlem, bude světlo po průchodu kapkou rozloženo v duhové spektrum. Záření různých barev se také bude po průchodu kapkou koncentrovat pod trochu odlišnými úhly, a proto uvidíme v duze soustředné barevné pásy. Na vzniku duhy se podílejí kapky v různých vzdálenostech od pozorovatele.



Obr.2.1.7 Úhel pozorování duhy

2.1.3 Odvození vzniku duhy

Základní objasnění vzniku duh vychází se Snellova zákona lomu. Jak bylo už uvedeno, paprsek vstupující do opticky hustšího prostředí se láme směrem ke kolmici, přičemž platí, že podíl sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu se rovná relativnímu indexu lomu n ; tedy:

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

kde relativní index lomu n je poměr rychlostí šíření světla v 1. a 2. prostředí. Je-li prvním prostředím vzduch a druhým prostředím voda, pak je index lomu n roven přibližně 1,33.

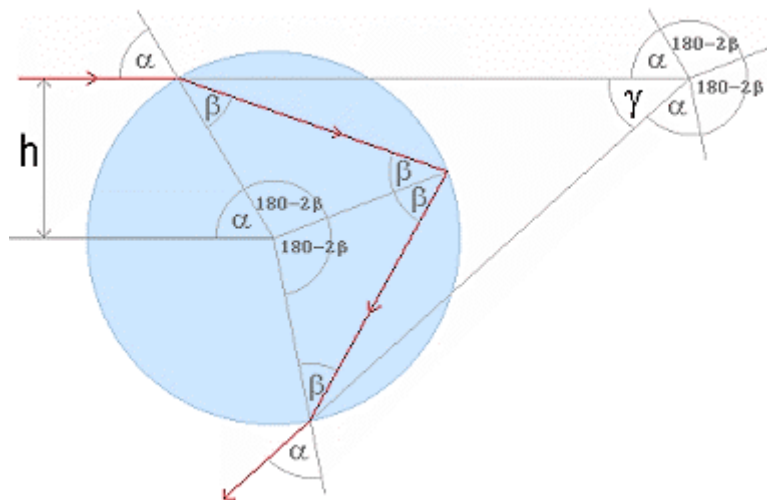
Viditelné světlo se skládá ze záření o různých vlnových délkách, které oko vnímá jako různé barvy v rozpětí od červené (záření o delších vlnových délkách) po fialovou (kratší vlnové délky). Záření kratších vlnových délek se při vstupu do hustšího prostředí láme více. Proto každá vlnová délka resp. barva má rozdílný index lomu. V následujícím textu budou hodnoty indexu lomu n pro jednotlivé barvy následující:

$n = 1,330$ pro červené paprsky

$n = 1,334$ pro zelené paprsky

$n = 1,337$ pro modré paprsky

Pro vznik hlavní duhy jsou důležité paprsky vstupující do kapky, odrážející se na její zadní stěně a opět lomené vycházející ven. Dráha takového paprsku je znázorněna na následujícím obrázku.



obr.2.1.8 Dráhy a úhly paprsku v kapce vody

Sluneční paprsek přichází zleva ve výšce h nad vodorovnou osou procházející středem kapky o jednotkovém poloměru (h tedy nabývá hodnot od 0 do 1), vstupuje do kapky pod úhlem α , láme se pod úhlem β , na protější straně se odráží a vystupuje z kapky ven, přičemž vystupující paprsek svírá s původně vstupujícím paprskem úhel γ . Pro velikost úhlu γ lze podle obrázku napsat:

$$\gamma = 360^\circ - 2\alpha - 2(180 - 2\beta),$$

po zjednodušení dostaneme:

$$\gamma = 4\beta - 2\alpha$$

Budeme-li uvažovat kapku na obrázku jako kružnici o jednotkovém poloměru, potom vzdálenost vstupujícího paprsku h od osy kapky se bude rovnat sinu úhlu α , tedy:

$$\sin \alpha = h$$

Z toho pro velikost úhlu α plyne:

$$\alpha = \arcsin h$$

a pokud víme, že sinus β se rovná h můžeme po dosazení do vzorce $\frac{\sin \lambda}{\sin \beta} = n$ napsat

velikost úhlu β jako: $\beta = \arcsin \frac{h}{n}$

Nyní lze tedy po dosazení zapsat velikost úhlu γ takto: $\gamma = 4 \arcsin \frac{h}{n} - 2 \arcsin h$

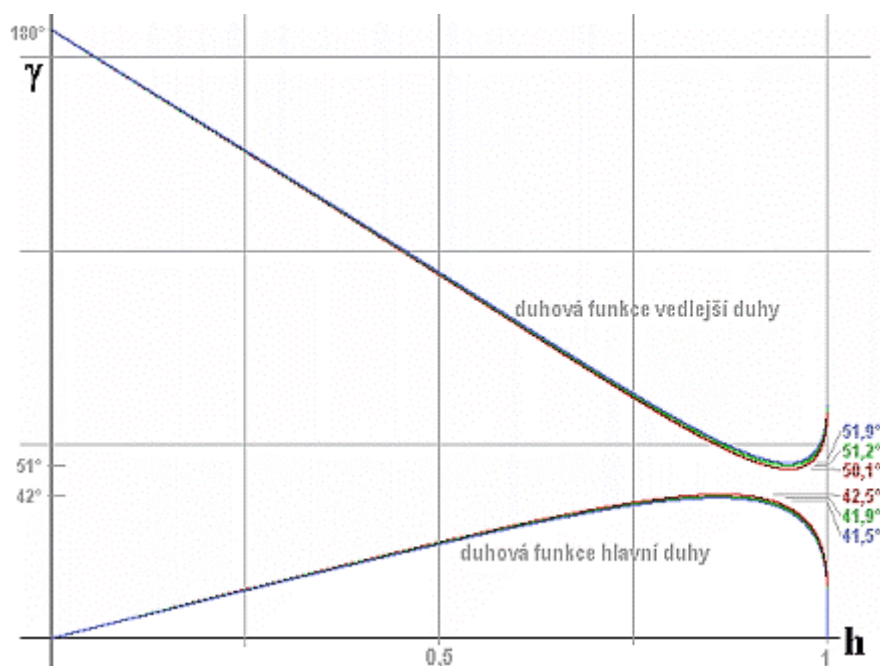
To je tzv. duhová funkce, která vyjadřuje velikost úhlu γ v závislosti na vzdálenosti h vstupujícího paprsku od osy kapky (kde h nabývá hodnot od 0 do 1). Je vidět, že hodnota úhlu γ bude mít své maximum kolem hodnoty 42° , což je právě poloměr hlavní duhy.

Pro dva vnitřní odrazy paprsku uvnitř kapky bychom analogicky mohli sestavit další duhovou funkci:

$$\gamma_2 = \pi - 6 \arcsin \frac{h}{n} + 2 \arcsin h$$

Ta bude mít extrém (resp. minimum - viz graf) kolem úhlu 51° , pod nímž můžeme vidět oblouk slabší, tzv. sekundární duhy.

Na následujícím grafu jsou vyneseny obě duhové funkce. Každá z nich je vynesena pro tři vybrané duhové barvy (červená, zelená, modrá), neboť index lomu n je specifický pro každou barvu.



obr.2.1.9 Duhové funkce

Vidíme, že duhová funkce pro hlavní duhu ve spodní části grafu má maximum úhlu gama pro červenou barvu na hodnotě 42,5°, pro zelenou 41,9°, pro modrou 41,5°. Proto má hlavní duha nejvýše červený a nejnižší modrý pás. Naopak na grafu funkce vedlejší (sekundární) duhy vidíme, že úhel gama2 vystupujících paprsků (po dvou vnitřních odrazech) dosahuje extrému pro červenou barvu na hodnotě 50,1° (zelená 51,2°, modrá 51,9°) - proto je pořadí barev v sekundární duze obrácené.

Také stojí za pozornost skutečnost, že ostatní paprsky vycházející z kapky po jednom vnitřním odrazu vycházejí pod úhly 42° až 0°. Proto je obloha uvnitř primárního duhového oblouku světlejší (viz galerii). Obdobně ostatní paprsky po dvou vnitřních odrazech vystupují pod úhlem od 51° až po 180° a tedy i obloha vně oblouku sekundární duhy je o něco světlejší. Pak zde zbývá pás mezi dvěma duhovými oblouky, jehož poloměr vidíme v rozsahu 42° až 51°. Tento pás, jenž bývá nazýván Alexandrovým obloukem, je viditelně tmavší. Vzhledem k tomu, že sluneční kotouč není bodovým zdrojem světla (jeho úhlový průměr na obloze je asi půl stupně), bude šířka duhového pásu větší, než by napovídaly hodnoty z grafu. Šířka duhového pásu hlavní duhy je asi 2°, šířka pásu sekundární duhy asi 4°.

Jistě se vtírá otázka, zda by se část paprsků které se uvnitř kapky vícenásobně odráží nemohla podílet na vzniku ještě dalších duh; duh vyšších řádů. Duhy 3. a údajně i 4. řádu (tj. po 3 resp. 4 vnitřních odrazech) se vzácně pozorují, musí být však velmi nevýrazné. Zatímco dříve popsané duhy 1. a 2. řádu se objevují na opačné straně od Slunce, duhy 3. a 4. řádu by se objevovaly kolem Slunce.

2.1.4 Alexandrův tmavý pás

Při důkladném pozorování zjistíme, že oblast mezi obouma oblouky je značně tmavší než ostatní část oblohy. Dokonce i když sekundární duha není postřehnutelná, můžeme na okrajích primárního oblouku rozeznat světlejší a tmavší „stranu“. Tmavá oblast dostala název Alexandrov tmavý pás podle řeckého filozofa Alexandra z Afrodisiady, který ji poprvé popsal asi r. 200 před n. l. [1]

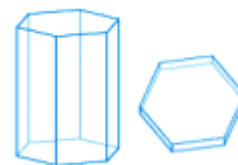
2.2 Halové jevy



Halové jevy jsou optické úkazy, které se objevují na obloze kolem Slunce i Měsíce v podobě kol, oblouků a skvrn. Podmínkou pro jejich objevení je přítomnost drobných ledových krystalů v atmosféře, na nichž dochází k odrazům a lomům paprsků.

Obr. 2.2.1 Halové jevy na obloze

Ledové krystalky se nacházejí v jemných řasových oblacích ve výškách nad 6 km, mohou se však vyskytovat za chladu i v přízemní vrstvě ovzduší. Vyskytují se v mnoha formách, ale pro vznik halových jevů jsou důležité krystalky ve tvaru šestiboké destičky a šestibokého sloupku. Podle toho, zda se světlo od krystalů odráží, nebo jimi prochází a láme se, mají halové jevy vzhled buď bělavý, či s duhovým nádechem.



Obr.2.2.2 Ledové krystalky

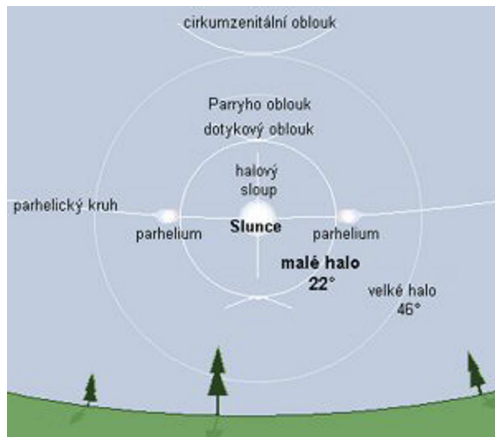
Halových jevů existuje celá řada. Některé jsou časté, jiné se objeví jen jednou za několik let. Nejčastěji se objevuje malé halo - světlý kruh o poloměru 22° kolem Slunce a dále tzv. vedlejší slunce, která přiléhají po stranách z vnějšku k malému halu. Vedlejší slunce mají tvar světlých skvrn, často duhově zbarvených. Obvykle se ale vyskytuje jeden či dva, řidčeji i více jevů současně.

2.2.1 Kdy se halové jevy objevují?

Podle dlouhodobých pozorování v západní Evropě lze některý z halových jevů pozorovat více než 100 dní v roce. Takové číslo by naznačovalo, že je lze pozorovat téměř kdykoli se na oblohu podíváme, ale výrazných a dobře pozorovatelných halových jevů je pochopitelně méně. Navíc jev může trvat jen několik minut.

Ledové krystalky v atmosféře na nichž vznikají halové jevy se vyskytují ve výškách 6 - 12 km v oblačnosti vysokého patra, kde se nachází jemné oblaky typu cirrus, cirrostratus, cirrocumulus. Za výskyt halových jevů však vděčíme především oblačnosti typu cirrostratus, která na obloze vytváří jemné bělavé závoje, které sluneční disk nezastiňují (narozdíl od oblaků nízkého patra, které jsou tvořeny převážně vodními kapkami). Taková oblačnost pokrývá oblohu často před příchodem teplé fronty, a proto mohou být objevující se halové jevy předzvěstí zhoršení počasí a příchodu srážek. V přízemní vrstvě atmosféry se ledové krystalky vyskytují především v arktických oblastech, kde se halové jevy často objevují. Proslulé jsou snímky z výzkumných stanic v Antarktidě. [1]

2.2.2 Známé halové jevy



obr.2.2.3 Popis halových jevů na obloze

Jednotlivých halových jevů existuje celá škála. Jak bylo již uvedeno, objevují se díky lomu a odrazu slunečního nebo měsíčního světla v drobných ledových krystalech vznášejících se v atmosféře.

Jaký konkrétní halový jev bude pozorovatelný a jaký bude mít tvar ovlivňují 3 hlavní faktory: typ krystalů (destičky, sloupky, aj.), orientace krystalů (náhodná, uspořádaná), výška Slunce nad obzorem

Objevení některých halových jevů nevyžaduje žádné pravidelné uspořádání krystalů (např. malé halo), jiné se objevují jen na shodně orientovaných krystalech určitého tvaru (např. Parryho oblouk).

Halové jevy které vznikají lomem světla v krystalech mají barevný nádech, kde červená barva oblouku či skvrny směřuje ke Slunci. Nejbarevněji se projevují vedlejší slunce - parhelia a cirkumzenitální oblouk. Bělavé jsou naopak jevy vznikající odrazem od krystalů, příkladem takových jevů je halový sloup nebo parhelický kruh.

Některé halové jevy jsou běžné, zato jiné, které vyžadují speciální orientaci ledových krystalů, lze spatřit jen několikrát za život. Jednotlivé halové jevy jsou blíže popsány v následující části.

2.2.2.1 Malé halo (22° halo)

Malé halo je nejčastěji se objevujícím halovým jevem. Má vzhled světlého kola o poloměru 22° kolem středu slunečního disku, které je na vnitřní straně směrem ke Slunci mírně načervenalé.



Obr.2.2.4 Malé halo

Kružnice malého hala vzniká lomem paprsků na náhodně orientovaných krystalcích ve tvaru šestibokých sloupků do nichž vnikají boční stěnou, lámou se, procházejí ledem krystalu a při výstupu se opět lámou na další stěně sloupku. Paprsky se přitom odchylují od směru vstupujícího paprsku v závislosti na úhlu dopadu na boční stěnu. Největší koncentrace vystupujících paprsků se však kumuluje kolem úhlu 22° (tzv. minimální odchylky), ostatní paprsky se odchylují o větší úhel. Proto je kolo malého hala poměrně ostře ohraničené směrem ke Slunci, zatímco vně malého hala světlejší lem postupně přechází do okolí. Tvar malého hala a dalších halových jevů vznikajících na náhodně orientovaných krystalech neovlivňuje výška Slunce nad obzorem.



2.2.2.2 Vedlejší slunce (parhelia, paslunce)

Vedlejší slunce se objevují jako dvě světlé skvrny na stranách vedle Slunce, s nímž mají totožnou výšku nad horizontem. Obě skvrny se nacházejí na vnější straně malého hala (to však nemusí být zároveň patrné), jejich úhlová vzdálenost od Slunce však závisí na výšce nad obzorem. Je-li Slunce právě na horizontu, jsou vedlejší slunce viditelná ve vzdálenostech 22° přímo na malém halo, s rostoucí výškou Slunce se vzdalují od malého hala - například při výšce 50° nad obzorem by vedlejší slunce byla vzdálena asi 32° od slunečního disku.

Obr.2.2.5 Vedlejší slunce (parhelia, paslunce)

Vedlejší slunce, další častý halový jev, bývají duhově zbarvená a mohou být velmi jasná. Vznikají totiž lomem paprsků, které procházejí bočními stěnami krystalků ve tvaru destiček, které se vznášejí v ovzduší podstavami téměř v horizontální rovině. Stejně orientované ledové destičky mohou dát vzniknout také halovému sloupu - to pokud se světlo odráží od jejich podstav.

2.2.2.3 Halový sloup

Halový sloup se jeví jako světelný pruh procházející vertikálně Sluncem. Z halového sloupu však bývá častěji patrná horní část, neboť se šance na jeho spatření zlepšuje při pozici Slunce nízko nad horizontem, kdy spodní část sloupu už není možné spatřit.



Obr.2.2.6 Halový sloup

Tento jev vzniká odrazem paprsků od podstav přibližně horizontálně orientovaných ledových destiček, může však vznikat i odrazem od stěn krystalových sloupků, jejichž hlavní osy jsou orientovány vodorovně, případně na ledových krystalech v Lowitzově orientaci, díky kterým může vzniknout halový sloup i při větší výšce Slunce nad obzorem.

Zobrazení halového sloupu lze připodobnit k pruhu světla vznikajícímu odrazem paprsků v okenních žaluziích nebo ke sloupu světla vzniklém na vodní hladině, v níž se zrcadlí nevysoko ležící světelný zdroj.

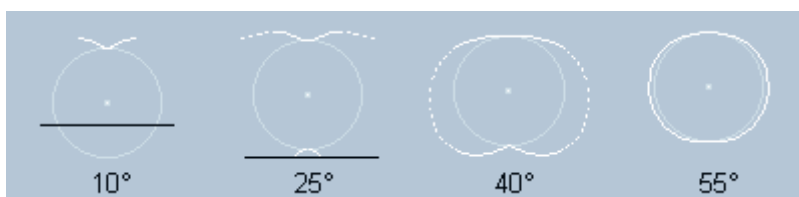


2.2.2.4 Dotkový oblouk malého hala (tečný, tangenciální oblouk)

V horní části malého hala lze dosti často pozorovat nápadné zjasnění. Tímto zjasněním se projevuje tzv. horní dotkový oblouk, jehož tvar silně závisí na výšce Slunce nad obzorem.

Obr.2.2.7 Dotkový oblouk malého hala

Je-li Slunce nízko, dotýká se malého hala oblouk ve tvaru písmene "v", s rostoucí výškou Slunce nad horizontem se oblouk více rozevívá a zároveň se nad obzor dostává i spodní část malého hala, k němuž zespoda přiléhá tzv. spodní dotkový oblouk, který je však zřídka patrný. Oba oblouky se s rostoucí výškou dále rozevívají, až se při výšce Slunce kolem 32° jejich rozevívající se větve spojí v halo oválného tvaru, které se nahoře a dole dotýká malého hala - v těch místech je také nejjasnější, zatímco postranní části hala jsou velmi nevýrazné. Konečně při výšce slunečního disku nad 55° se halo vzniklé spojením větví dotkových oblouků již nedá téměř odlišit od malého hala, které však nemusí být současně pozorovatelné. Jejich viditelnost závisí na rozdílné orientaci šestibokých ledových sloupků, na kterých oba zmíněné jevy vznikají.



obr.2.2.8 Dotkový oblouk malého hala v závislosti na výšce

Na vzniku dotkových oblouků (resp. eliptického hala v které se mohou spojit) se podílí sluneční paprsky procházející bočními stěnami šestibokých ledových hranolků, které jsou orientovány svou hlavní osou téměř rovnoběžně s horizontem. Díky lomu světla v takto orientovaných krystalech jsou oblouky duhově zbarveny a oproti malému halu, které vzniká na zcela náhodně orientovaných krystalech, poskytují živější spektrální barvy.

2.2.2.5 Velké halo (halo 46°)

V průměru jen několik málo dnů v roce lze na obloze pozorovat velké halo, jehož poloměr je asi 46° kolem středu slunečního kotouče. Toto halo je vždy méně výrazné než malé halo s poloměrem 22°. Velké halo vzniká lomem světla na náhodně orientovaných šestibokých ledových sloupcích do nichž paprsek vniká podstavou a vychází boční stěnou. Jeho vznik tedy vyžaduje stejnou orientaci krystalů jako malé halo, jen dráha paprsků v krystalu je odlišná.

Aby bylo velké halo patrné, je třeba opravdu velká koncentrace krystalů, kdy je malé halo velmi výrazné. I za takových podmínek však bude velké halo několikanásobně slabší. Jeho paprsky se koncentrují do většího poloměru a také lem velkého hala je širší. Vrchní část velkého hala lze obtížně rozeznat od supralaterálního oblouku (nepřesně tzv. dotykového oblouku velkého hala), který při výšce Slunce kolem 20° s velkým halem téměř splývá. Supralaterální oblouk vyžaduje stejnou orientaci krystalů jako dotykové oblouky malého hala. Pokud tedy v místech, kde bychom očekávali horní část velkého hala, spatříme výrazněji zbarvený oblouk a zároveň je jasně patrný horní dotykový oblouk, pak se jedná nejspíš právě o supralaterální oblouk, který bývá častější než velké halo.

2.2.2.6 Cirkumzenitální oblouk

Vysoko nad Sluncem se může ve vysoko ležících oblacích objevit poměrně jasný, duhově zbarvený oblouk, který jakoby opisoval část kruhu kolem zenitu - nadhlavníku. Je to cirkumzenitální oblouk, vznikající lomem světla na horizontálně orientovaných ledových destičkách, do nichž paprsky vcházejí horní podstavou a vychází ven boční stěnou.



Obr.2.2.9 Cirkumzenitální oblouk

Tento oblouk se blíží hornímu okraji velkého hala (to však nemusí být současně viditelné). Přesněji, nachází se 46° (či výše) nad Sluncem a je viditelný pouze je-li sluneční kotouč níže než asi 32° , jinak se nemůže vytvořit. Jeho poloměr kolem zenitu závisí na výšce Slunce nad obzorem. Při nízké zářící Slunci je oblouk vzdálen něco přes 30° od zenitu, ke kterému se s rostoucí výškou Slunce blíží. Nikdy však netvoří uzavřenou kružnici kolem zenitu. Cirkumzenitální oblouk často uniká pro svou polohu vysoko na nebi pozornosti. Zhlédneme-li jej však, překvapí nás sytostí svých barev díky kterým patří k nejkrásnějším halovým jevům.

Obdobou tohoto oblouku je tzv. cirkumhorizontální oblouk, který se nachází naopak hluboko pod Sluncem, a proto je obtížné ho z našich zeměpisných šířek spatřit. Může být pozorovatelný jen těsně při jižním obzoru v poledních hodinách dnů kolem letního slunovratu, nebo ještě vzácněji, v noci za úplňků v období zimního slunovratu.

2.2.2.7 Parhelický kruh (kruh vedlejších sluncí, horizontální kruh)



Obr.2.2.10 Parhelický kruh

Parhelický kruh je bělavý kruh obepínající dokola oblohu ve stejné výšce nad obzorem jako svítí sluneční disk. Ve stejné výšce se také nacházejí vedlejší slunce (parhelia) - odtud tedy pramení jeho název.

Parhelický kruh vzniká odrazem slunečních paprsků na svisle orientovaných plochách krystalů - podstavách "ležících" krystalových sloupků nebo na bočních stěnách téměř

vodorovně orientovaných ledových destiček. Kromě 22° parhelií lze na kruhu vzácně jako bělavá zjasnění pozorovat tzv. boční slunce ve vzdálenosti 120° od slunečního kotouče, případně přímo naproti Slunci ještě vzácnější protislunce (antihelium).

Parhelický kruh lze pozorovat až několikrát ročně, avšak většinou jen jako bělavé fragmenty. Celistvý kruh viditelný po celé obloze patří mezi vzácnou podívanou.

2.2.2.8 Parryho oblouk

K vzácným halovým jevům se řadí Parryho oblouky. Jejich objevení totiž vyžaduje speciální orientaci ledových krystalků. Podobně jako dotykové oblouky malého hala vyžadují, aby se ledové krystaly ve tvaru sloupků vznášely svými osami vodorovně, ale k objevení Parryho oblouků je navíc nutné, aby dvojice stěn šestibokých sloupků ležela v horizontální rovině.

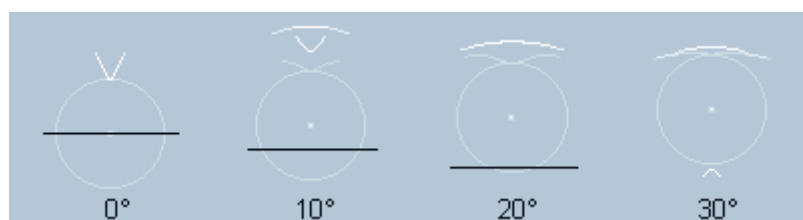


Obr.2.2.11 Parryho oblouk

Parryho oblouk se objevuje nad malým halem a jeho tvar velmi závisí na výšce Slunce nad obzorem, jak si můžeme všimnout na obrázku. Díky lomu světla v krystalech jsou Parryho oblouky duhově zbarveny.

Při poloze slunce na horizontu splývá Parryho oblouk s horním dotykovým obloukem malého hala. S rostoucí výškou nad obzorem se oblouk ve tvaru písmene "v" odpoutává od malého hala vzhůru a mizí, zatímco další oblouk s odlišným chodem paprsků v krystalu se naopak objevuje nad malým halem a při vzrůstající výšce Slunce se k němu shora blíží. Právě tento oblouk bývá nejčastěji pozorovatelný a zachytil jej na kresbě i jeho objevitel. Tento halový jev poprvé zaznamenal anglický admirál a polární badatel William Edward Parry

(1790-1855) na Melvilově ostrově během výpravy do kanadské Arktidy 8. dubna 1820.



Obr.2.2.12 Parryho oblouk v závislosti na výšce

2.2.2.9 Ostatní halové jevy

Některé další, vzácné halové jevy se pro svou nenápadnost objeví až při mimořádně jasném úkazu, jiné objevující se po vícečetných vnitřních odrazech v krystalu vyžadují dokonalé krystalové tvary. Další jevy vznikají buď při speciální orientaci krystalů, nebo při méně obvyklých krystalových formách.

-Protislunce, boční 120° slunce

zřídka se objevují jako bělavé skvrny na parhelickém kruhu

-Lowitzovy oblouky

oblouky vybíhající od malého hala k parheliím, vznikají na speciálně orientovaných ledových destičkách

-Hala s poloměry 9°, 18°, 20°, 23°, 24°, 35°

hala vznikající na náhodně orientovaných pyramidálních krystalech, při jejich částečném uspořádání mohou vzniknou atypická parhelia a oblouky

-Spodní slunce, subhorizontální oblouky

halové jevy objevující se pod horizontem, jsou viditelné z letadel nebo hor

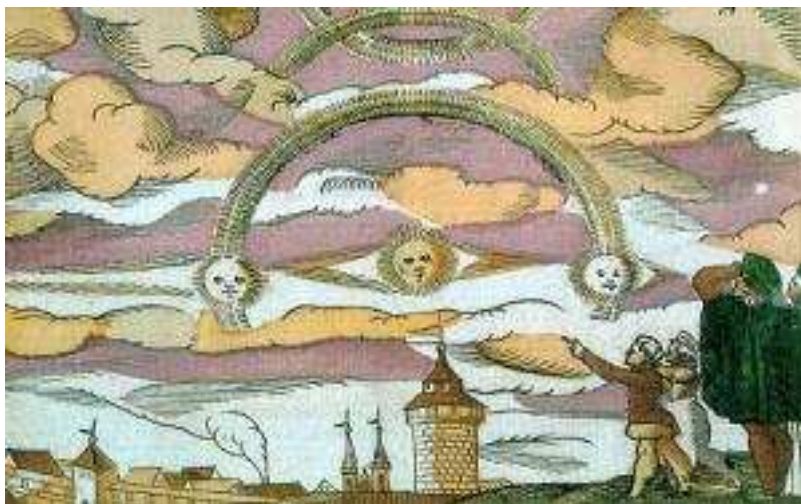
-Wegenerův, Trickerův, Hastingsův oblouk a další...

2.2.3 Trocha z historie pozorování halových jevů

Záznamy o halových jevech lze údajně odhalit již ve výtvarných projevech lidí doby bronzové, nicméně popsány byly ve 4. století před naším letopočtem Aristotelem, od něhož pochází i samotný termín. První zaznamenaný výskyt halových jevů z našeho území pochází ze 7. března 1135 z Prahy

Vysvětlení principu vzniku halových jevů odrazem a lomem světla pochází od René Descarta (1596-1650), který se též zapsal do historie zkoumání duhy. První soubornou teorii osvětlující vznik základních halových jevů podal v roce 1681 francouzský fyzik Edme Mariotte (1620-1684).

Z doby před vynálezem fotografie pochází záznamy o rozsáhlých úkazech nejčastěji z kronik, kde jsou líčeny podobně jako objevení polární záře jako symbolická zjevení.



Na obrázku je vyobrazení halových jevů od Michaela Peterleho zachycující úkaz pozorovaný z Norimberku v roce 1583.

Obr.2.2.13 "Vymalování divu a zázraku nedávno ukázaného, totiž tří sluncí a tří duh na obloze nebeské, což v městě Norimberce i jinde měsíce dubna léta tohoto 1583 vidno a spatřino bylo" [1]

Mezi nejlépe zdokumentované historické úkazy patří kromě Heveliova pozorování z roku 1681 též pozorování Johanna Tobiaše Lowitze (1757–1804) z 18. června 1790 v Petrohradu, nebo Williama E. Parryho (1790-1855) z 8. dubna 1820 na Melvillově ostrově v Kanadě.

2.3 Ohybové jevy

Koróna, irizace, gloriola - tato nepříliš obvyklá pojmenování patří těm optickým jevům v atmosféře, které vznikají na kapičkách oblaků. Liší se tak od halových jevů, které za svůj původ vděčí ledovým krystalkům, jež se nacházejí ve vysoko plujících oblačných vrstvách. Koróny, irizace a nepříliš četné glorioly představují další z působivých jevů, které lze v přírodě spatřit.

2.3.1 Koróna

Prosvítá-li Měsíc skrze vrstvu drobných kapek obsažených v oblaku, často lze pozorovat v těsném okolí jeho kotouče soustavu soustředných barevných prstenců, jejichž jas směrem od Měsíce postupně slábne. Tento jev se nazývá koróna a můžeme ji pozorovat i kolem Slunce či pozemských zdrojů světla. Někdy je koróna bělavá, jindy intenzivně duhově zbarvená.



Obr.2.3.1 Koróna

V takovém případě je nejbližší ke světelnému zdroji modravý prstenec, vně červený až temně cihlový a mezi nimi lze tušit další barvy spektra. Nejčastěji lze pozorovat jen jeden sled duhových barev, ale vzácněji je možné vidět až tři takové soustavy spektrálních barev za sebou. Koróna tak může sahát do vzdálenosti 5 až 10° od světelného zdroje (pro srovnání - kotouč Slunce či Měsíce má úhlový průměr asi 0,5°).

Koróna vzniká ohybem světla na drobných kapičkách vody, které jsou obsaženy v oblacích, mlze či kouřmu. Při ohybovém jevu se tvoří kolem zdroje světla soustavy prstenců barev spektra, jejichž poloměr závisí na velikosti kapiček a vlnové délce světla (červené paprsky mají delší vlnovou délku než modré paprsky - proto se maxima jednotlivých barev zobrazují v různých poloměrech kolem světelného zdroje). Pokud jsou kapičky mezi jimiž světlo prochází nestejně veliké, pak se ohybový jev slévá jen ve slabě zbarvený či bělavý kruh světla, v němž se světlo Měsíce nebo jiného zdroje rozpíjí. Vysvětlení tohoto jevu na základě ohybu světla podal v roce 1852 francouzský fyzik Emile Verdet (1824-1866).

Lidovým názvem pro korónu je studánka, dvůr, popřípadě se užívá také termín aureola. V astronomii má pojem koróna jiný význam - užívá se jako název pro atmosféru Slunce, kterou lze však spatřit jen při jeho úplném zatmění.

Ohyb světla způsobující vznik koróny mohou vyvolat také drobné pevné částice vznášející se v ovzduší; například pyl. V jarním období unáší vítr celé oblaky malých pylových zrněk a při jejich vysoké koncentraci můžeme vzácně pozorovat pylové koróny kolem jasných světelných zdrojů; tedy nejčastěji kolem Slunce a Měsíce. Sled barev je v takové koróně stejný jako u koróny vznikající na vodních kapkách, avšak vzhled nemusí vždy

nabývat podoby zcela pravidelných prstenců. Ten totiž také závisí na tvaru a orientaci pylových zrnků. Častým zdrojem pylových korón bývá pyl borovic a dalších dřevin.

Korónu si lze případně poplést s malým halem. Malé halo se však jeví jako mírně duhově zbarvená kružnice kolem Slunce a Měsíce až ve vzdálenosti 22° a prostor uvnitř je prázdný, naopak koróna se rozlévá přímo od zdroje světla. Podstata obou jevů je odlišná. Koróna vzniká ohybem světla na kapičkách vody, zatímco malé halo, které patří mezi nejčastější halové jevy, vzniká lomem paprsků v ledových krystalcích oblaků.

2.3.2 Irizace oblaků



Na okrajích tenčích oblaků plujících nedaleko od oslnivého slunečního kotouče je občas možné pozorovat jejich irizaci - výrazné perleťové zbarvení, v němž převládají červenavé a zelenavé odstíny. Tento jev vzniká ohybem a interferencí světla při průchodu slunečních paprsků kapičkami oblačné vrstvy.

Obr.2.3.2 Irizace oblaků

Irizace často kopíruje po obvodu tenký oblak nebo má nepravidelný tvar a nabývá tak vzhled části nesymetrické či zdeformované koróny. Intenzivní irizaci podléhá i vzácný druh tenkých oblaků vyskytujících se ve velkých výškách kolem 20 - 30 km, tedy již ve stratosféře. Tato vrstva atmosféry leží nad vrstvou, v níž se utváří počasí a kde běžné oblaky zasahují nejvýše do 10-12 km. Tyto zvláštní oblaky tvořené kapičkami podchlazené vody se díky výrazné irizaci nazývají perleťové oblaky. Jejich perleťový jas se projevuje nejvýrazněji jsou-li na soumravné obloze ještě osvětlovány paprsky již zapadého Slunce. U nás však perleťové oblaky spatřit nemůžeme, patří ke vzácným úkazům pozorovaným nejčastěji poblíž hornatých oblastí Skandinávie při rychlém vzdušném proudění.

2.3.3 Gloriola

Tento jev je svojí podstatou blízky již zmíněné koróně. Vzniká však zpětným ohybem světelných paprsků a projevuje se jako slabé soustředné barevné prstence kolem stínů vržených do vrstvy oblačnosti či mlhy, případně se dá pozorovat i na zemi kolem stínu vrženého do kapek ranní rosy.



Obr.2.3.3 Gloriola

Gloriolu lze zahlédnout například z letadla kolem jeho stínu promítnutého do oblačné vrstvy, nebo v horách, kde je možné vidět i vlastní stín na níže ležící oblačnosti ověňčený přízračnou gloriolou. Tento úkaz je též znám pod názvem Brockenský přízrak, podle hory Brocken nacházející se v pohoří Harz v Německu, kde byl často popisován. Zmíněný optický jev také zaznamenal francouzský astronom a meteorolog Camille Flammarion (1842-1925) při jednom ze svých letů balónem.

Závěr

Předkládaná bakalářská práce je koncipována tak, aby poukazovala na výskyt nejnámějších světelných jevů v atmosféře. Zároveň však tyto jevy objasňuje a vysvětluje s využitím základních fyzikálních principů a zákonitost. Čtenář, ať již se jedná o studenta, učitele či jen zájemce o danou problematiku, může díky této práci pochopit podstatu světelných jevů odehrávajících se v atmosféře. Navíc by však po jejím přečtení měl být schopen také lépe porozumět obecným fyzikálním principům, které vznik a průběh světelných atmosférických jevů determinují. A konečně, takto získané fyzikální znalosti může čtenář zobecňovat a využívat v běžném životě a to nejen v souvislosti s problematikou, kterou se zabývá tato práce.

Použitá literatura

- [1] <http://ukazy.astro.cz/>
- [2] <http://cs.wikipedia.org/>
- [3] <http://expedice.astronomie.cz/>
- [4] <http://www.walter-fendt.de/>
- [5] <http://fyzika.jreichl.com/>
- [6] <http://www.kof.zcu.cz/>
- [7] Josef Nahodil: Fyzika v běžném životě, Prometheus, Praha 1996
- [8] Václav Krejčí: Svět očima moderní fyziky, Horizont, Praha 1981
- [9] Ivan Štoll: Svět očima fyziky, Prometheus, Praha 1996
- [10] D.Halliday – R.Resnick – J.Walker: Fyzika, Vutium, Praha 2000

Přílohy