

Šíření světla

Když se zeptáte lidí, jak se pohybuje světelný paprsek, většinou řeknou, že přímo (po přímce). To je skutečně nejběžnější způsob, jakým se světlo šíří homogenním prostředím. Pokud se ale optické vlastnosti prostředí mění v prostoru, je šíření světla složitější. Dopadne-li například světelný paprsek na ostré rozhraní dvou optických prostředí (třeba vzduchu a vody), změní náhle směr svého pohybu – říkáme, že se láme. Pokud je změna optického prostředí postupná (spojitá), jako např. v létě v blízkosti rozpálené silnice, paprsek změní směr svého pohybu rovněž postupně – ohne se. Tato situace je běžnější, než by se zdálo, a později se k ní vrátíme. Pro tuto chvíli ale zůstaňme u samotného lomu světla.

Lom světla – ke kolmici nebo od kolmice?

Lom světla se dá popsat kvalitativně i kvantitativně. Kvalitativní popis spočívá v poučce, že při přechodu do opticky hustšího prostředí se světlo láme ke kolmici, při přechodu do prostředí řidšího naopak od kolmice. Kvantitativní popis pak spočívá v tzv. zákonu lomu (Snellovu zákonu), který svazuje indexy lomu obou prostředí a úhly, které v nich paprsek svírá s kolmicí k rozhraní. Řadě lidí činí potíže zapamatovat si, kdy se světlo lomí ke kolmici a kdy od kolmice a hledají si různé mnemotechnické pomůcky. A vůbec celý jev lomu světla je pro někoho obestřen určitou záhadností – proč by se vůbec světlo mělo lámat? Dá se to vůbec nějak srozumitelně vysvětlit a názorně pochopit? Ano, dá. Existuje velice názorná a krásná ilustrace lomu světla inspirovaná knihou *Zajímavá fyzika* od J. I. Perelmana, kterou s oblibou předvádím se studenty *Zajímavé fyziky*. Při jejím sledování se lom světla stává něčím velmi přirozeným, a rovněž to, zda v daném případě nastane ke kolmici či od kolmice, je pak zcela zřejmé. Popišme si nyní tuto demonstraci.

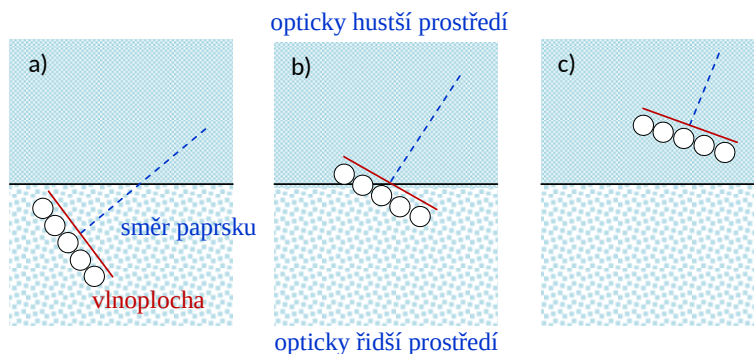
Světelná vlnoplocha tvořená studenty

Potřebujeme vědět dvě věci: Za prvé, světlo je vlnění, které se v opticky hustším prostředí (např. voda) šíří pomaleji než v opticky řidším (např. vzduch), přičemž podíl rychlosti světla ve vakuu a v prostředí je tzv. index lomu tohoto prostředí. A za druhé, paprsek je stále kolmý na vlnoplochu.



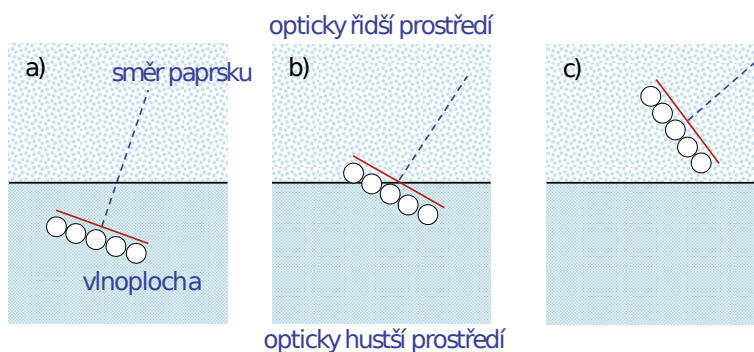
Obrázek 1: Studenti reprezentující světelnou vlnoplochu

Na začátku nakreslíme křídou na chodník rovnou čáru, která reprezentuje rozhraní mezi dvěma optickými prostředími – např. vzduchem a vodou. Pak dáme skupině (např. pěti) studentů do rukou tyč nebo trubku (viz obr. 1) a řekneme jim, že to je vlnoplocha. Studenti si poté nacvičí pohyb vlnoplochy v homogenním prostředí – jdou všichni stejnou rychlostí dopředu, kolmo na vlnoplochu. Odpovídající paprsek, na vlnoplochu kolmý, se tak pohybuje přímo.



Obrázek 2: Přechod světla s opticky řidšího do hustšího prostředí (pohled shora – studenti z obr. 1 jsou zakresleni jako kolečka).

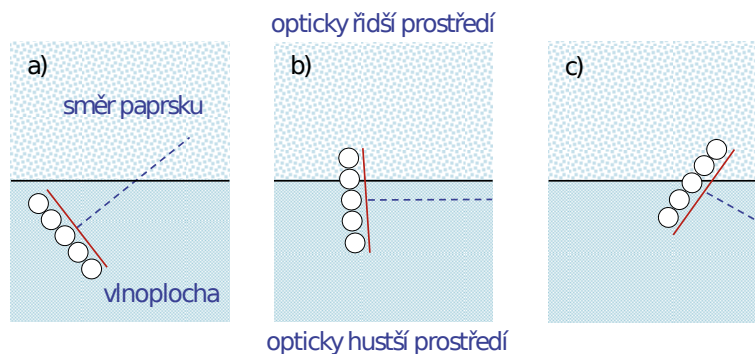
Když jsou takto secvičeni na homogenní prostředí, nastane demonstrace zákona lomu (viz obr. 2). Vyšleme studenty nesoucí vlnoplochu šikmo směrem k čáře na chodníku (optické rozhraní, viz obr. 2a) a řekneme jim, že každý z nich musí udělat toto: jakmile překročí rozhraní, zpomalí poněkud svoji chůzi. A pak se s ostatními studenty díváme, jak to dopadne. Výsledek je vždy velice pěkný. Díky tomu, že vlnoplocha se pohybuje vůči rozhraní šikmo, nepřejdou ji všichni studenti současně, ale postupně. První student, který ji přejde, zpomalí (viz obr. 2b), ale ostatní jdou ještě původní rychlostí. O chvíli později zpomalí i druhý student, pak další, až nakonec i ten poslední. Při tom dojde ke zřetelnému pootočení vlnoplochy (viz obr. 2c), protože během jejího přecházení přes rozhraní se jeden konec pohybuje ještě původní vyšší rychlostí, zatímco druhý již rychlostí menší. Je zřejmé, že se vlnoplocha natočí tak, že po průchodu do hustšího prostředí svírá s rozhraním menší úhel než před průchodem. Paprsek, který je na vlnoplochu kolmý, proto svírá po průchodu menší úhel s kolmicí k rozhraní než před průchodem: lom tedy nastává směrem ke kolmici.



Obrázek 3: Přechod světla s opticky hustšího do opticky řidšího prostředí.

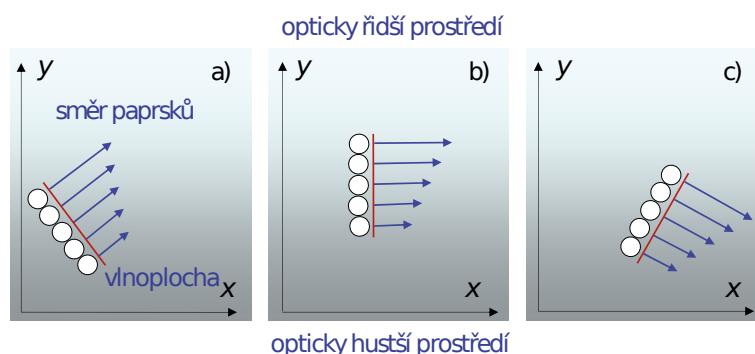
Jestliže vlnoplocha přechází z opticky hustšího prostředí do řidšího, studenti mají za úkol při přechodu rozhraní naopak poněkud zrychlit. Tím dojde k natočení vlnoplochy opačným směrem než v předchozím případě a tedy k lomu od kolmice, viz obr. 3.

Přitom může nastat zajímavá situace. Jestliže vlnoplocha při dopadu svírá s rozhraním dostatečně velký úhel (např. když je na ně skoro kolmá), má urychlení studentů, kteří již rozhraní přešli, dramatický efekt: tito studenti totiž předběhnou ty studenty, kteří rozhraní ještě nepřešli, a způsobí,



Obrázek 4: Situace při úplném odrazu.

že vlnoplocha se na chvíli stane k rozhraní zcela kolmou, načež se stáčí ještě dále, až se nakonec opět začne vracet do opticky hustšího prostředí (viz obr. 4). V tomto případě někteří studenti dokonce rozhraním ani neprojdou. Tato situace odpovídá **úplnému odrazu**.



Obrázek 5: Ohyb světla nastává v případě, že se index lomu mění nikoli skokem, ale spojitě.

Popsaným způsobem se dá simulovat i situace, kdy se index lomu mění nikoli skokem, ale spojitě. Představme si optické prostředí, jehož index lomu klesá směrem vzhůru, takže rychlost pohybu vlnoplochy směrem vzhůru roste. U demonstrace se studenty tomu bude odpovídat vyšší rychlost studentů v místech s větší souřadnicí y (viz obr. 5). Jestliže bude vlnoplocha například zpočátku rovnoběžná s osou y (a paprsek tedy půjde vodorovně), bude se díky vyšší rychlosti studentů, kteří jsou výše (mají větší souřadnici y) vlnoplocha stáčet směrem dolů. Světelný paprsek tedy bude zatáčet směrem dolů.

Uvedená demonstrace šíření světla je velice názorná a studenti jsou z ní většinou nadšeni.

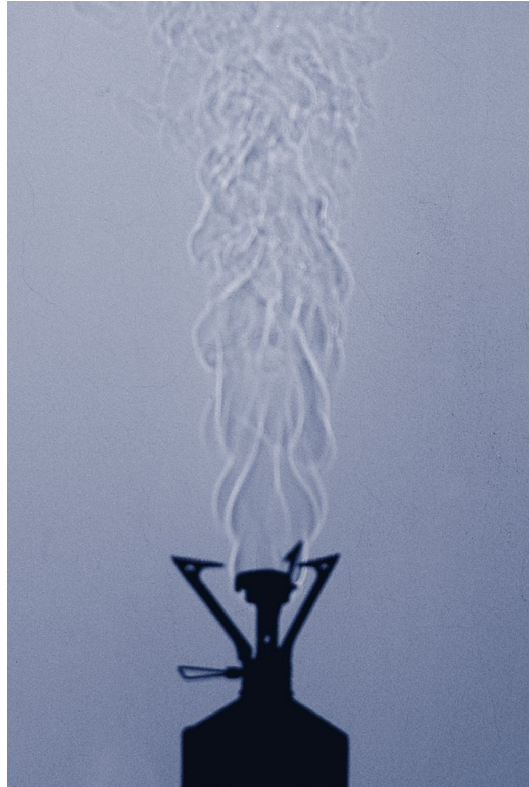
Ohyb světla je častější, než se zdá

Již jsme zmínili, že při spojitě změně indexu lomu se světelný paprsek ohýbá, tj. mění svůj směr, ale nikoli skokem jako při lomu, nýbrž spojitě. I když se to může zdát neobvyklé, v přírodě je to velmi častá situace.

Tetelení vzduchu nad ohněm

Každý například ví, že pokud se na něco díváme přes táborový oheň, části pozorovaného předmětu se nepravidelně vlní – říkáme, že **vzduch se nad ohněm tetelí**. Je to důsledek skutečnosti, že se v ohni a nad ním nepravidelně v prostoru i čase mění teplota plynu a tím i jeho index lomu. V takovém prostředí se paprsek náhodně odchyluje od přímého směru a my vnímáme nepravidelný pohyb kousků pozorovaného předmětu. Tento jev se dá pěkně demonstrovat tak, že prosvítíme plamen plynového

hořáku dataprojektorem. Nejlepší je umístit plamen asi do poloviny mezi projektor a plátno. Na plátně se pak objeví zřetelný „stín“ plamene (viz obr. 6). Ve skutečnosti však nejde o stín v pravém slova smyslu, protože plamen je (alespoň většinou) velmi dobře průhledný. Díky odchýlení paprsků, které je v různých místech plamene různé, dojde spíše k přerozdělení světelného toku na plátně, kde se objeví světlejší a tmavší místa. Když umístíme hořák blízko plátna, bude obraz velmi ostrý, ale také málo kontrastní, protože paprsky při své cestě od hořáku k plátnu už nemají dost místa převést svoji úhlovou odchylku na odchylku prostorovou.



Obrázek 6: „Stín“ plamene plynového hořáku prosvíceného dataprojektorem. Foto Tomáš Tyc

Mihotání hvězd

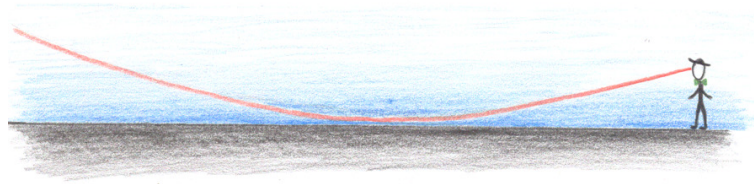
Podobná situace nastává při pozorování hvězd. Turbulence ve vzduchu totiž náhodně odchylují paprsek a chvílemi dokonce mohou působit i jako čočky, takže světlo z hvězdy chvíli koncentrují, chvíli rozřeďují. Hvězdy pak vypadají, jakoby blikaly, tedy měnily svůj jas. U planet tento jev nepozorujeme, protože jednotlivé části jejich kotoučku neblíkají synchronně a celkový jas planety tak zůstává po zprůměrování přes celý kotouček téměř konstantní.

Astronomická refrakce

Kromě uvedených turbulencí se index lomu v zemské atmosféře mění i proto, že blíže u povrchu Země je vzduch hustší než ve vyšších polohách. Index lomu tedy klesá svýškou, a když si představíme vlnoplochu z uvedené demonstrace se studenty, je zřejmé, že paprsek se ohýbá směrem k zemi (viz obr. 4). Tento jev se nazývá astronomická refrakce, a díky němu se objekty na obloze jeví poněkud výše nad obzorem, než jsou ve skutečnosti. Úhlová odchylka paprsku je většinou velmi malá¹. Pro paprsky vyslané téměř rovnoběžně se zemským povrchem však činí celého půl stupně. To je stejný

¹při výšce slunce nad obzorem 30° je odchylka $1,7'$ (tj. $1,7'$ úhlové minuty), při 2° je to $18'$ a na horizontu dokonce $35'$, tedy asi půl stupně

úhel, pod jakým je ze Země vidět sluneční nebo měsíční disk. Dá se tedy říci, že ve chvíli, kdy vidíme, jak se slunce dotýká spodním okrajem vzdáleného obzoru (např. moře), je ve skutečnosti už právě celé pod obzorem. Astronomická refrakce nám tedy poněkud prodlužuje den. V našich končinách jde jen o několik minut, ale v blízkosti pólů se může jednat i o řadu dní.



Obrázek 7: Šíření světla v blízkosti rozpálené silnice; ve skutečnosti je úhel mezi paprskem a silnicí mnohem menší než na obrázku. Kresba Milan Čermák



Obrázek 8: Zrcadlení nad horkou silnicí. Foto Tomáš Tyc

Zrcadlení

Dalším příkladem je ohyb světla nad rozpálenou silnicí. Zde je díky vysoké teplotě index lomu vzduchu blízko silnice menší než dále od ní. Paprsek se v takové situaci ohýbá směrem vzhůru, viz obr. 7. Přichází-li paprsek světla z oblohy k zemi pod velmi malým úhlem, může se ohnout natolik, že se začne šířit od země směrem vzhůru. Pokud nám pak dopadne do oka, uvidíme světlo z oblohy přicházet ze směru, ve kterém je silnice – úplně stejně, jako kdyby se světlo odráželo například ve vodě rozlité na silnici. Proto se nám zdá, jakoby na silnici bylo jezero nebo zrcadlo (viz obr. 8). Proto se také tento jev nazývá **zrcadlení**.

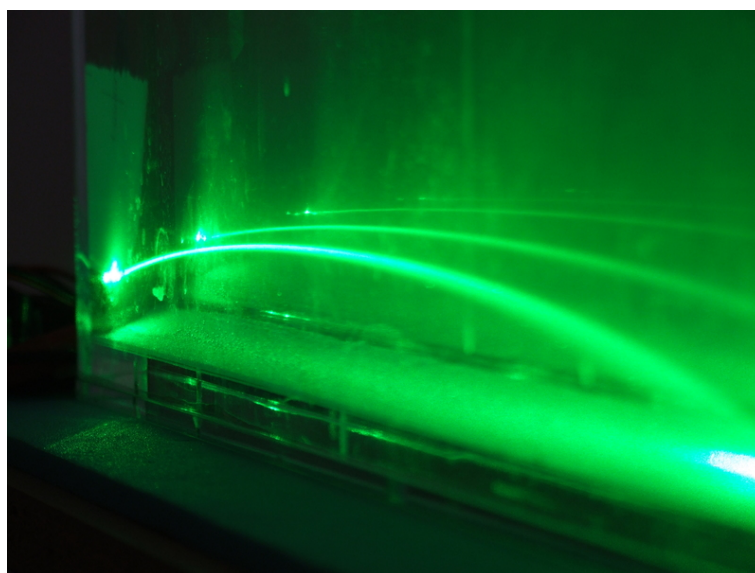
Zrcadlení může nastat i v situaci, kdy je vzduch ve větší výšce naopak teplejší než níže – tentokrát se paprsek ohýbá dolů. Kombinací obou jevů pak může nastat **fata morgana**, kdy se světlo šíří jako ve vlnovodu stovky kilometrů a přinese obraz z míst, která jsou daleko za obzorem.

Ohyb světla v akváriu

Krásný experiment s ohybem světla si můžeme udělat i doma. Potřebujeme k němu malé akvárium (ale postačí i vhodná širší sklenice), vodu, sůl nebo cukr a laserové ukazovátko. Do akvária napustíme vodu, počkáme, až se uklidní, a na dno nasypeme několikamilimetrovou vrstvu soli. Nemícháme, ale



Obrázek 9: Horní zrcadlení ve Skotsku. Foto Tomáš Tyc



Obrázek 10: Ohyb světla v akváriu, kde index lomu klesá s výškou nade dnem. Foto Marek Janáč a Tomáš Tyc

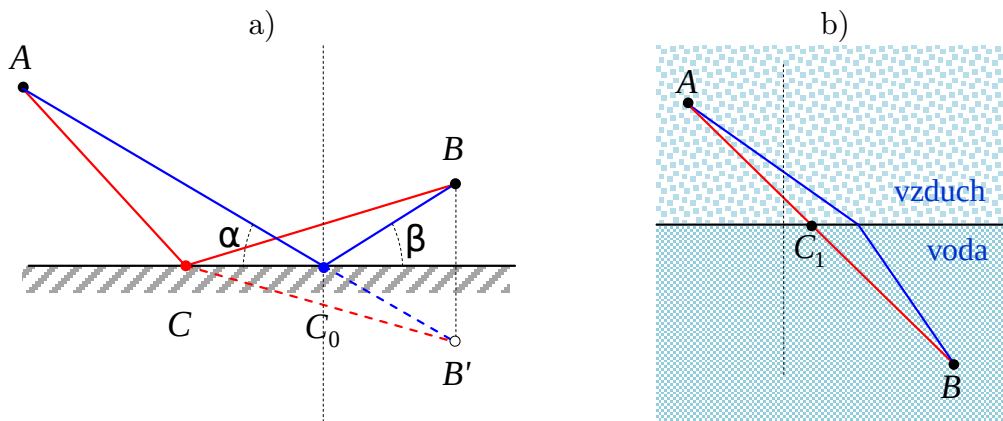
necháme vodu několik hodin stát, nejlépe celý den nebo i několik dní. Sůl se postupně rozpouští a její roztok difunduje ode dna vzhůru. Tím se vytvoří velký gradient koncentrace soli a tím i indexu lomu. Dole je index lomu největší, proto při vyslání paprsku z laserového ukazovátka se spodní část vlnoplochy opožďuje oproti horní části, což vede k ohnutí paprsku směrem dolů (viz obr. 10).

Před nasypáním soli může být vhodné rozmíchat ve vodě pár kapek mléka či kapičku lepidla Herkules pro zvýšení rozptylovací schopnosti vody a tím i viditelnosti paprsku.

Jiný pohled na šíření světla – odraz a lom světla z Fermatova principu

Zákonitosti odrazu, lomu i ohybu světla můžeme odvodit i z dalšího důležitého optického zákona, a to z **Fermatova principu nejmenšího času**. Ten říká, že má-li se světlo dostat z bodu A do bodu B, vybere si ze všech myslitelných trajektorií tu, jíž odpovídá nejkratší čas. V opticky homogenním prostředí, tj. takovém, v němž se světlo šíří stálou rychlostí, odpovídá nejkratšímu času nejkratší dráha, tj. úsečka spojující body A a B.

Jednoduše ze z Fermatova principu odvodí zákon odrazu od rovinného zrcadla (viz obr. 11 a). Kde se má na zrcadle nacházet bod C, aby čas šíření z bodu A do C a pak do B byl co nejmenší? Protože v tomto případě předpokládáme homogenní optické prostředí, hledáme bod C tak, aby součet délek úseček AC a CB byl minimální. Jestliže bod B přeneseme v rovinné souměrnosti na druhou stranu zrcadla do bodu B', bude dráha ACB' stejně dlouhá jako dráha ACB. Dráha ACB' je samozřejmě nejkratší, leží-li bod C na úsečce AB' (v obrázku 11 a) odpovídá této situaci bod C₀). Odtud pak



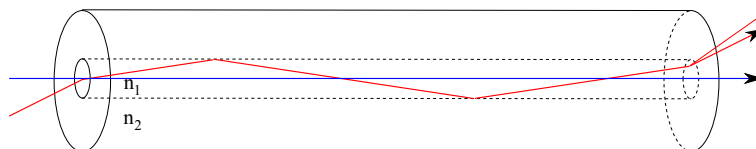
Obrázek 11: a) Odvození zákona odrazu. b) Geometricky nejkratší dráha není vždy časově nejkratší – modrá dráha odpovídá kratšímu času než červená.

plyne, že úhly α a β jsou stejné – tedy úhel odrazu je roven úhlu dopadu, což je známý **zákon odrazu**.

Podobně nám Fermatův princip odhalí zákonitosti lomu světla. Po jaké dráze se má šířit světlo z bodu A, který je ve vzduchu, do bodu B, který je ve vodě (viz obr. 11 b)? Tentokrát už přímá dráha není časově nejkratší, protože světlo se šíří ve vodě pomaleji než ve vzduchu. Aby světlo nějaký čas ušetřilo, je potřeba posunout bod na rozhraní poněkud doleva; sice tak poněkud vzroste délka dráhy (a tím i čas šíření) ve vzduchu, ale zkrácením dráhy ve vodě se ušetří ještě více času, takže výsledný čas bude kratší. Poloha bodu C odpovídající minimu se dá najít přesně. Pokud bychom to udělali, došli bychom ke známému **Snellovu zákonu lomu**, který říká, že součin indexu lomu a sinu úhlu mezi paprskem a kolmicí k rozhraní je na obou stranách rozhraní stejný.

A jak světlo vlastně pozná předem, která dráha je nejkratší, aby se vydalo právě po ní a ne po nějaké jiné? Odpověď nám dává vlnová optika, konkrétně Huygensův princip. Z něj plyne, že světlo se ve skutečnosti nešíří jen po dráze, které odpovídá nejkratší čas, ale také po mnoha dalších. Příspěvky k vlně se pak sčítají přes všechny dráhy. Výsledkem pak většinou je, že příspěvky drah, kterým neodpovídá nejkratší čas (a to jsou skoro všechny), se vzájemně vyruší. Nevyruší se pouze příspěvek dráhy s nejkratším časem, a tu pak pozorujeme. Někdy to ale takto jednoduše nedopadne a pak nastane difrakce světla. O tom ale až v jiné přednášce Zajímavá fyzika.

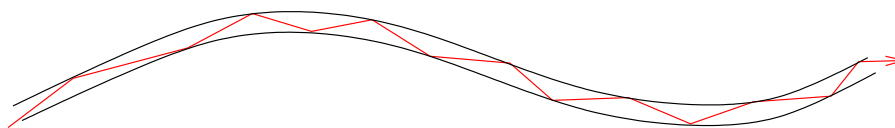
Šíření světla v optických vláknech



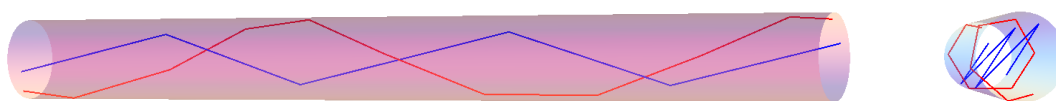
Obrázek 12: Optické vlákno se skládá ze dvou vrstev – jádra s indexem lomu n_1 obklopeného pláštěm s poněkud menším indexem lomu n_2 , $n_2 < n_1$. Paprsky se na rozhraní jádra a pláště totálně odrážejí.

Optické vlákno (viz obr. 12) může přenášet světlo na velkou vzdálenost (i stovky kilometrů). Přitom může přenášet obrovské množství informace, která je zakódována do jemné modulace frekvence či amplitudy světelné vlny. Ve vláknovém endoskopu, hojně používaném v lékařství např. pro prohlédnutí sliznice žaludku, zase vlákno přenáší jeden pixel obrazu zkoumaného orgánu. Optická vlákna jsou dnes v řadě oblastí lidské činnosti nepostradatelná. Je proto užitečné podívat se na to,

co se vlastně se světlem ve vlákne děje. Světlo je uvnitř vlákna vázáno díky **úplnému odrazu**, který nastává na rozhraní jeho jádra s větším indexem lomu a pláště s menším indexem lomu. Paprsek se tak ve vlákne neustále odráží a šíří se podél klikaté čáry a nevyletí z vlákna ani tehdy, když je ohnuté, viz obr. 13. Tato klikatá čára může protínat osu vlákna, v takovém případě leží celá v jedné rovině (např. modrá křivka na obr. 14). Pokud paprsek osu vlákna neprotíná, připomíná jeho trajektorie spíše jakousi lámanou šroubovici (červená křivka na obr. 14).



Obrázek 13: Úplný odraz světla v optickém vlákne. Paprsky z vlákna nevyletí, ani když je ohnuté.



Obrázek 14: Dva paprsky v optickém vlákne. Pro lepší představu je zobrazen pohled na vlákno ze dvou směrů.

Je zajímavé, že různým paprskům trvá různou dobu, než proběhnou vlákne dané délky, což je dobře vidět na obrázku 12 – červená lomená čára je jistě delší než přímá modrá. Proto se také budou lišit časy potřebné pro proběhnutí vlákne. Pošleme-li do vlákna velmi krátký světelný pulz, v němž bude obsaženo světlo odpovídající nejružnějším směrům vstupu paprsku do vlákna, vyjde z druhého konce vlákna pulz mnohem delší díky nestejným časům šíření. A podobně jestliže na světelnou vlnu namodulujeme vysokofrekvenční signál, bude ze stejného důvodu na druhém konci vlákna tento signál porušen a pomíchán. Proto se pro přenos informace na velkou vzdálenost používají tzv. jednomódová vlákna, v nichž se světlo může šířit pouze přímo a k uvedenému efektu rozšíření pulzu tak nedochází.

Proč je obloha modrá?

Modrá barva oblohy souvisí s tím, že vzduch není dokonale průhledný, ale trochu rozptyluje světlo, které se jím šíří. To je způsobeno jednak nečistotami (prachové částice, kapičky vody), jednak fluktuacemi hustoty: vzduch je plyn a v plynu na mikroskopické úrovni není hustota všude stejná, ale kolísá od místa k místu (a rovněž v čase) tak, jak se jednotlivé částice k sobě přibližují a vzdalují. Část světla šířícího se silnou vrstvou vzduchu pak nedolétne přímo až do cíle, ale odkloní se do náhodného směru – říkáme, že se světlo rozptyluje. Pokud by tomu tak nebylo, byla by obloha černá a hvězdy by byly vidět i ve dne, jako je tomu např. na Měsíci, který nemá atmosféru.

Tím se dá vysvětlit, že obloha není černá, ale proč je modrá? Je to proto, že rozptyl není stejně silný pro všechny barvy spektra, ale je tím silnější, čím má světlo menší vlnovou délku. Světlo s delší vlnou, např. červené, totiž lépe „zprůměruje“ vlastnosti prostředí, zatímco kratší vlna (např. modrého či fialového světla) je citlivější ke změnám optických vlastností na mikroskopické úrovni. Výsledkem je, že modré světlo se rozptyluje více než červené či zelené a obloha se nám tedy jeví jako modrá. Ve světle oblohy je ovšem i mnoho červeného i zeleného světla, nejen modré a fialové. Modrého je ale trochu více a proto se nám obloha jeví jako modrá.

Pokud je slunce nízko nad obzorem, šíří se z něj světlo do našeho oka velmi silnou vrstvou atmosféry (až stovky km). Tehdy je rozptyl velmi silný a modré světlo se z původního směru téměř zcela odpoutá. Světlo, které vidíme, již proto modrou složku téměř neobsahuje a slunce se nám tak jeví jako oranžové či dokonce červené.

Z podobného důvodu se nám kouř jeví při bočním osvětlení jakoby mělo modravý nádech, zatímco při pohledu v protisvětle je žlutooranžový (to je vidět u hustého dýmu, např. když na oheň hodíme mokrou travu a podíváme se skrz vzniklý dým na slunce).

V Zajímavé fyzice si uvedený rozptyl demonstrujeme pokusem se sklenicí mléka osvětlenou protisvětlem (uvidíme žlutooranžovou barvu) a bočním světlem (uvidíme modravý nádech).

Výjimečným jevem je **zelený paprsek (záblesk)** vznikající kombinací uvedeného jevu a astronomické refrakce, o níž už byla řeč výše.

Seznam pokusů

- Studenti na tyči jako simulace vlnoplochy, lom světla
- Lom světla v akváriu
- Úplný odraz v akváriu
- Ohyb světla v akváriu
- Plamen vařiče prosvěcovaný světlem z dataprojektoru
- Světlovodná vlákna a laser
- Model neviditelného pláště z optických vláken
- Světlovodné vlákno z vodního proudu
- Mléko v rozptýleném a prošlém světle – demonstrace toho, že je obloha modrá
- Totéž s kouřem z vonné tyčinky