



Výfučtení: Jednoduché optické soustavy

Na následujících stránkách vám představíme pravidla, kterými se řídí světlo při průchodu různými optickými prvky. Část fyziky, která se těmito jevy zabývá, se nazývá *paprsková optika*. V běžném světě vnímáme světlo jako paprsek. To znamená, že se pohybuje rovně a přímočaře. Změna směru šíření nastává pouze při odrazu nebo průchodu do prostředí s jinými optickými vlastnostmi. Navíc se světlo šíří pro naše vnímání nepředstavitelně rychle, takže všechny děje paprskové optiky probíhají okamžitě.

Změna směru šíření světelných paprsků má dva možné důvody. Za prvé se může od nějakého materiálu odrazit, například od rovných nebo zakřivených zrcadel. O zákoně odrazu si povíme později. Za druhé, při dopadu paprsku na rozhraní dvou různých materiálů může dojít k lomu světla. Takovéto optické rozhraní může být například rozhraní vzduchu a vody. Lom světla se projevuje okamžitou změnou směru světelného paprsku, takže lomený paprsek světla poletí trochu jiným směrem, než dopadající. Tento jev je popsán Snellovým zákonem, o kterém si také povíme v dalších kapitolách.

Hlavní využití paprskové optiky nalezneme v zařízeních jako jsou dalekohledy nebo mikroskopy. Tyto tzv. optické soustavy jsou často složité posloupnosti optických prvků – čoček a zrcadel, které nám umožňují světlo koncentrovat a zvětšovat daleké nebo malé předměty. V tomto textu se naučíme popisovat tři optické prvky: rovinná zrcadla, vypuklá zrcadla a tenké čočky. Dále si povíme o tom, jak funguje samotné zobrazování předmětů.

Princip nejkratšího času

Oba výše popsané děje, tzn. odraz a lom světla, lze zobecnit do jednoho tvrzení, které se nazývá *Fermatův princip nejkratšího času*. Tento princip tvrdí, že světlo se mezi dvěma body pohybuje po takové trajektorii, která mu zabere nejmenší čas na uražení.

Tím se rovnou vysvětluje, proč se světlo pohybuje přímočaře – přímá spojnice dvou míst je nejkratší a zároveň i nejrychlejší volba. Fermatův princip navíc zahrnuje geometrii odrazu a lomu a také fakt, že se světlo v různých materiálech pohybuje různou rychlostí.¹ V praxi si platnost Fermatova principu ukážeme při odvození zákona lomu na Snellově zákonu.

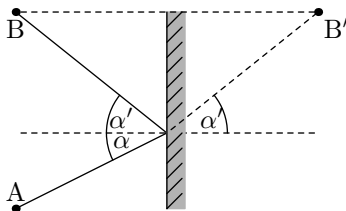
Zrcadla a zákon odrazu

Při odrazu světelný paprsek nepřechází do jiného optického prostředí. Jinými slovy, rychlost jeho šíření zůstává stejná a Fermatův princip se dá přeložit pouze na princip nejkratší vzdálenosti mezi zdrojem světla A, libovolným bodem na odrazivé ploše a místem B, kde odražený paprsek sledujeme, viz obr. 1. Úhel dopadu, měřený od kolmice označme α a odražený paprsek α' .

K nalezení nejkratší vzdálenosti si pomůžeme trikem. Bod B si zobrazíme osovou souměrností podle zrcadla na bod B' jako na obrázku 1. Vzdálenosti bodů B a B' od místa, kde se světlo odráží, se kvůli symetrii problému neliší.

Aby byla trajektorie mezi body A a B nejkratší, musí být nejkratší i mezi body A a B'. Tato nejkratší trajektorie ale není nic jiného než rovná čára! Úsečka spojující body A a B' nám vyznačuje místo, kam musí dopadnout světelný paprsek tak, aby splnil Fermatův princip.

¹Známa rychlost světla $c \doteq 300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ platí jen pro světelné paprsky pohybující se ve vakuu. V materiálech jako je sklo, voda, atd. se světlo pohybuje menší rychlostí.



Obr. 1: Obecný odraz světla a nejkratší trajektorie

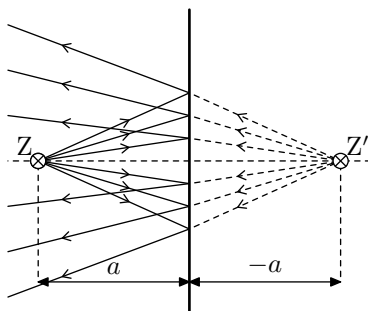
Je jednoduché všimnout si, že pro úhly dopadu a odrazu platí $\alpha = \alpha'$. Ukázali jsme tedy, že pokud světelný paprsek dopadá na zrcadlo pod úhlem α , pod stejným úhlem se i odráží. Těto skutečnosti se říká zákon odrazu.

Zobrazení rovinným zrcadlem

Před tím, než se pustíme do samotného zobrazování, si představíme základní pojmy. Jako zobrazovaný *předmět* budeme uvažovat pouze bodový zdroj světla, ze kterého vycházejí paprsky do všech směrů stejně (tímto zdrojem může být například malá žárovka). *Obraz* je pak to, co uvidíme po přechodu světla vycházejícího z předmětu optickou soustavou.

Zobrazování rovinným zrcadlem uvádíme na obrázku 2. Bodový zdroj Z vysílá světelné paprsky směrem k zrcadlu. Tyto paprsky se od něj odrážejí tak, aby splňovaly zákon odrazu a vzájemně se rozcházejí. Můžeme si povšimnout, že tyto rozcházející se paprsky vypadají jako kdyby vycházely ze smyšleného zdroje světla Z' nacházejícího se za zrcadlem (vizte čárkované čáry).

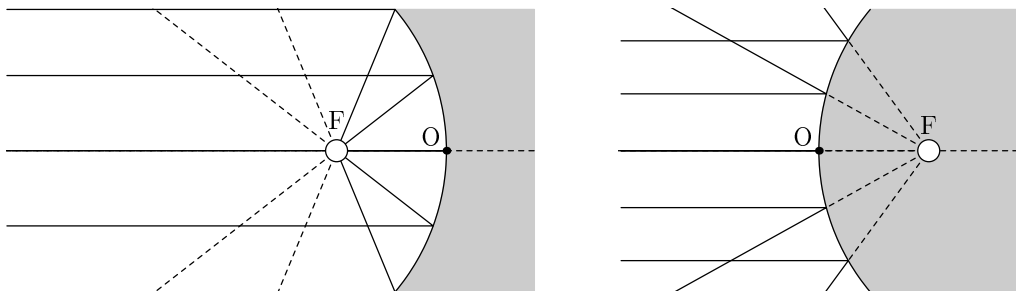
Tento falešný zdroj je tedy naším obrazem. Jelikož se ale nachází „za zrcadlem“, obraz nazýváme virtuální. Ze symetrie obrázku 2 vidíme, že se obraz vytvořil ve stejné vzdálenosti a od zrcadla, v jaké je umístěn předmět. Abychom označili, že předmět leží až za zrcadlem, označíme tuto vzdálenost se záporným znaménkem (tomuto říkáme tzv. znaménková konvence).



Obr. 2: Obecný odraz světla od odrazivé roviny

Kulová zrcadla

Kulové zrcadlo je část kulové zrcadlové plochy, přičemž zrcadlová plocha může být uvnitř (tzn. duté zrcadlo, na obrázku 3 vlevo) nebo zvenku (tzn. vypuklé zrcadlo, na stejném obrázku vpravo). Pokud letí k zrcadlu svazek paprsků rovnoběžný s optickou osou (to je spojnice středu a povrchu zrcadlíci koule, obvykle je to osa symetrie zrcadla), poblíž optické osy se všechny paprsky soustředí do jednoho bodu. Tomuto bodu se říká ohnisko a často se značí F . Vzdálenost ohniska od bodu O se nazývá ohnisková vzdálenost a značí se f . Pokud je poloměr kulové plochy R , pak platí $f = R/2$, jak můžeme vidět mj. na obrázku 3. S použitím znaménkové konvence můžeme napsat, že pro duté zrcadlo platí $f = R/2$ a pro vypuklé zrcadlo $f = -R/2$.



Obr. 3: Vlevo duté zrcadlo, vpravo vypuklé

Gaussova zobrazovací rovnice

Výše popsané zobrazení lze zobecnit tak, aby bylo možné spočítat polohu obrazu při dané poloze zdroje. Omezme se na zdroje, které se nacházejí na optické ose zrcadla ve vzdálenosti a od průsečíku optické osy a zrcadla. Toto tzv. zobrazovací zařízení má ohniskovou vzdálenost $f = R/2$ a předmět zobrazí do obrazu, který je vzdálen od průsečíku optické osy a zrcadla o vzdálenost a' .

Gaussova zobrazovací rovnice spojuje veličiny a , a' a f vztahem

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

Při použití této rovnice nesmíme zapomínat na znaménkovou konvenci. Na jedné straně musíme použít správné znaménko ohniskové vzdálenosti v závislosti na typu použitého zrcadla, na druhé straně musíme správně porozumět znaménku, které vyjde pro a' . Je-li $a' < 0$, obraz se nachází „za zrcadlem“, a je tedy virtuální. Je-li ale $a' > 0$, předmět se zobrazí „před zrcadlo“ a jedná se o reálný obraz.

Zkusme si ověřit, zda-li Gaussova rovnice dává stejné výsledky jako jsme si popsali výše (například pro duté zrcadlo). Abychom z bodového předmětu dokázali vytvořit rovnoběžný svazek paprsků, musí být předmět od dutého zrcadla opravdu daleko, ideálně v nekonečnu (tzn. platí $a = \infty$). Jelikož v zobrazovací rovnici používáme převrácenou hodnotu $1/a$ a a je

nekonečně velké, můžeme se tohoto členu zbavit a psát $1/a = 0$.² Ze zobrazovací rovnice pak dostaneme

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \Rightarrow a' = f = \frac{R}{2}.$$

Jak vidíme, obraz umístěný v nekonečnu se zobrazí do ohniska, přesně tak, jak je řečeno výše. Sami si můžete zkusit, že rovnice dává dobré výsledky i pro vypuklé zrcadlo.

Pokud zdroj a obraz prohodíme, tzn. zdroj umístíme do ohniska ($a = f$), dostaneme rovnici

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{a'} = 0 \Rightarrow a' = \infty.$$

Zdroj umístěný do ohniska se tedy zobrazí až v nekonečnu. To znamená, že takto umístěný zdroj vytvoří svazek rovnoběžných paprsků.

V případě, že rovnici chceme použít pro rovinné zrcadlo, musíme udělat malý trik a představit si, že rovinné zrcadlo je vlastně kulové zrcadlo s velmi velkým poloměrem – takže položíme $R = \infty$. Ohnisková vzdálenost tohoto zrcadla je pak $f = R/2 = \infty$ a její převrácená hodnota je $1/f = 0$. Člen na pravé straně zobrazovací rovnice zanikne a platí

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = 0 \Rightarrow a' = -a.$$

I v tomto případě jsme dostali správný výsledek.

Snellův zákon

Dalším jevem, kterým se budeme zabývat je lom světla. K lomu dochází tehdy, když světlo prochází mezi materiály s různou rychlostí šíření. Již jsme si řekli, že světlo se ve vakuu šíří rychlostí $c \doteq 300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Průhlednými materiály se světlo šíří rychlostí $v = c/n$, kde $n \geq 1$ je veličina zvaná index lomu. Každé prostředí má tedy určen nějaký index lomu. Index lomu vakua je tedy přesně 1. Vzduch má rovněž index lomu velmi blízký jedničce, tzn. světlo téměř vůbec nezpomaluje. Naproti tomu takový diamant má index lomu až 2,4.

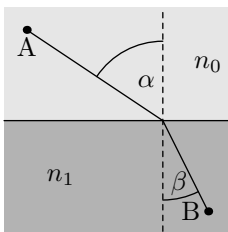
Příklad lomu světla zobrazuje obrázek 4. V něm světlo prochází z bodu A do bodu B, při tom ale prochází z prostředí s indexem lomu n_0 do prostředí s indexem lomu n_1 , přičemž platí $n_0 < n_1$. Trajektorie světelného paprsku i zde splňuje Fermatův princip nejmenšího času. Použitím právě tohoto principu a pokročilé matematiky lze dospět ke vztahu mezi úhlem dopadu α , úhlem lomu β a indexy n_0 a n_1 (vizte obrázek 4). Tomuto zákonu se říká Snellův zákon a matematicky lze vyjádřit jako

$$n_0 \sin \alpha = n_1 \sin \beta,$$

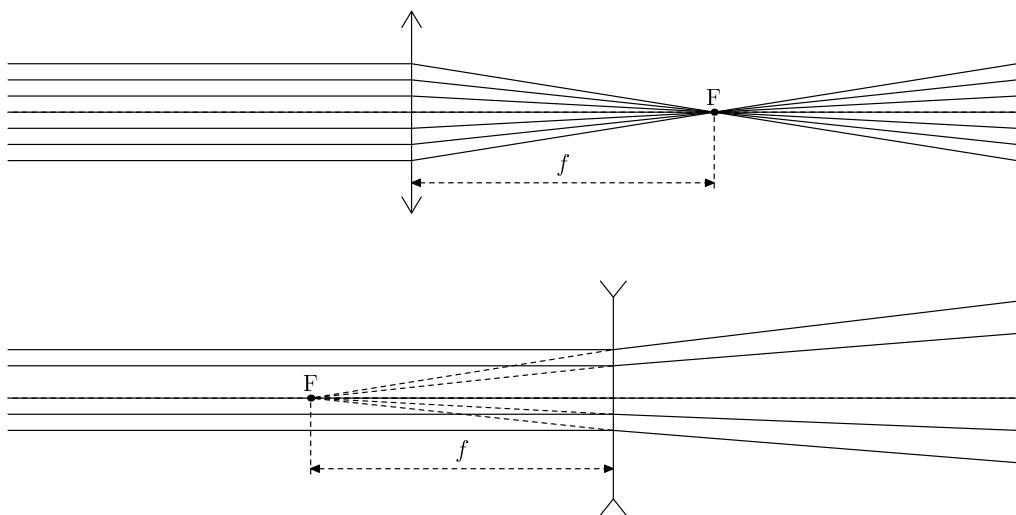
kde je písmeny \sin označena goniometrická funkce sinus. Pokud goniometrické funkce neznáte, nezoufejte. Na našich stránkách³ je zveřejněno nejedno Výfučení právě o goniometrických funkcích. Známe-li optické vlastnosti obou prostředí a úhel dopadu, snadno tedy umíme vypočítat úhel lomu β , tzn. spočítat, jak moc se světlo zlomí.

² *Odůvodnění* Představme si, že a není nekonečno, ale je to jenom hodně velké číslo, např. 1 000 000. Jeho převrácená hodnota je pak číslo velice malé: $1/1\,000\,000 = 0,000\,001$. Zvyšuje-li se hodnota a do nekonečna, jeho převrácená hodnota se pak snižuje do nuly.

³ <http://vyfuk.mff.cuni.cz/ulohy/vyfucteni>



Obr. 4: Lom světla na rozhraní dvou prostředí



Obr. 5: Nahoře spojka a její ohnisko, dole rozptylka a její ohnisko.

Tenké čočky

Také lom světla můžeme využít k soustředění světla podobně jako odraz od kulových zrcadel. Optickým prvkům s touto vlastností říkáme čočky. Jednodušeji lze popsat lom světla na čočkách se zanedbatelnou tloušťkou, tzv. tenkých čočkách. I tenké čočky lze popsat ohniskovou vzdáleností f . Pokud na čočku dopadá rovnoběžný svazek světelných paprsků podél optické osy čočky, pak se paprsky protnou opět v ohnisku.

Rozlišujeme dva druhy čoček. Pokud $f > 0$, čočka rovnoběžné paprsky zaostří do ohniska – takovým čočkám říkáme spojky (vizte obrázek 5 nahoře). Druhý typ čočky, rozptylku, vidíme na obrázku 5 dole. Pro rozptylku platí $f < 0$, takže původně rovnoběžné paprsky rozptýlí tak, že se zdá, jakoby vycházely z bodového zdroje ukrytého za čočkou. Abychom zdůraznili, že se jedná o tenké čočky, v obrázcích je značíme jako úsečky opatřené šipkami. Šipky směrem ven značí spojku, šipky směrem dovnitř zase označují rozptylku.

I pro čočky platí Gaussova zobrazovací rovnice, navíc se stejnou znaménkovou konvencí jako

u kulových zrcadel. Speciálně v rovnici místo převrácené hodnoty ohniskové vzdálenosti $1/f$ používáme tzv. optickou mohutnost čočky φ :

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

Jednotka této veličiny je formálně m^{-1} , ale častěji ji nazýváme *dioptrie* (značka D nebo dpt).

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.