

Duha a halo

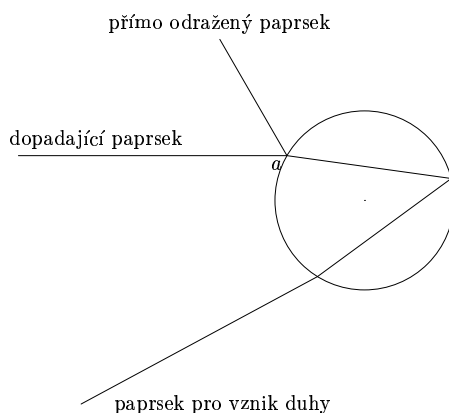
Duha



Obrázek 1: Duha.

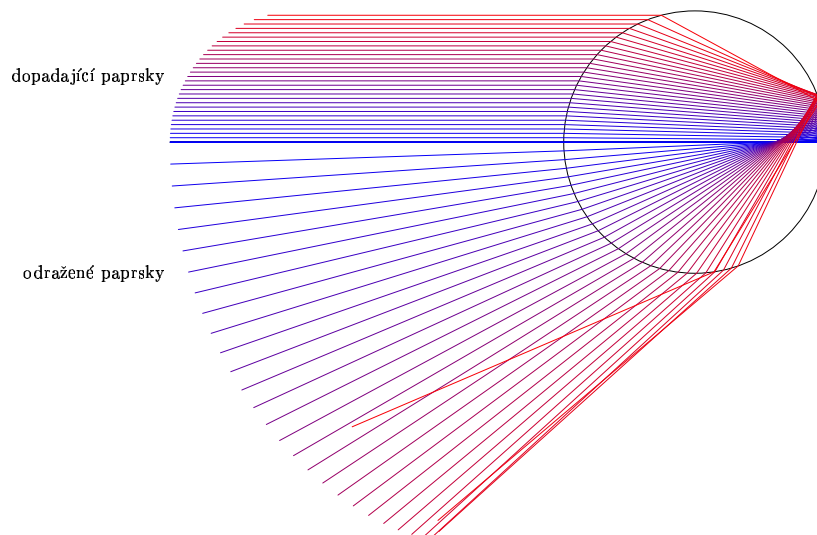
Duha je bezesporu nádherným optickým jevem, viz obr. 1. Jeho vysvětlení není tak jednoduché, jak by se mohlo na první pohled zdát, ale lze je pochopit. O jeho vysvětlení se teď pokusíme.

Duha vzniká na kapkách deště, které mají díky povrchovému napětí vody kulovitý tvar. Podívejme se, co se stane, když na kapku dopadne světelný paprsek ze Slunce. Vždy existuje rovina, která obsahuje dopadající paprsek i současně i střed kapky. Paprsek se celou dobu bude pohybovat v této rovině.



Obrázek 2: Kapka vody a lom světelného paprsku, který na ni dopadá. Část paprsku se odrazí od povrchu kapky a část pronikne dovnitř. Protože se světlo šíří v kapce jinou rychlostí než ve vzduchu, dojde k lomu světla. Prošlý paprsek se potom šíří kapkou, dokud nedopadne zevnitř na její stěnu. Zde část světla projde do vzduchu, ale část se odrazí zpět dovnitř kapky a po dalším dopadu na stěnu kapky část světla vyjde z kapky ven. A to je právě ta, která se podílí na vzniku duhy.

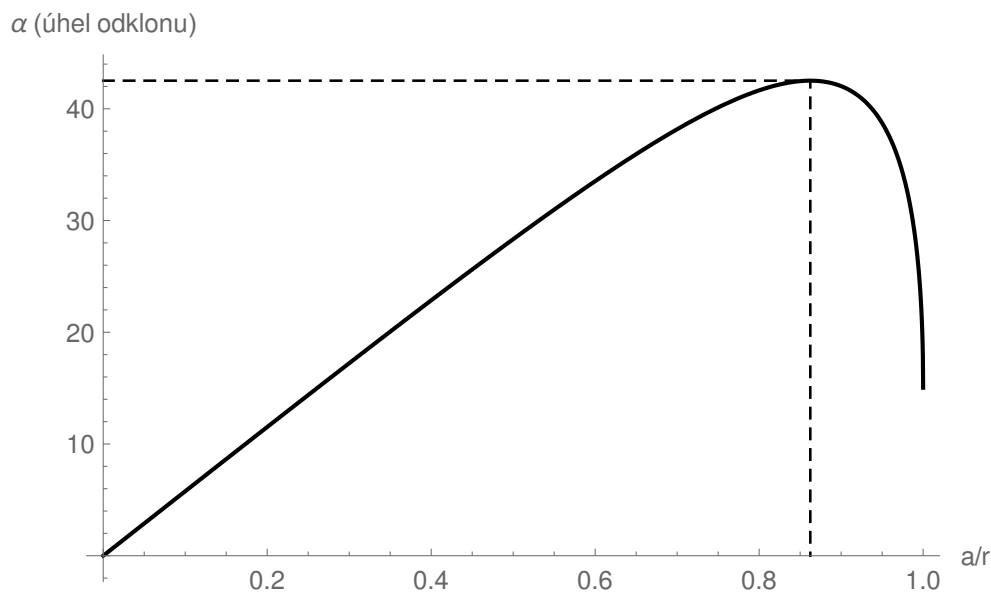
Když světelný paprsek ze Slunce dopadne na vodní kapku, část světla projde dovnitř a část se odrazí. Prošlý paprsek pak dopadne zevnitř na povrch kapky a opět se část odrazí a část projde ven



Obrázek 3: Kapka vody a lom mnoha světelných paprsků, které na ni dopadají.

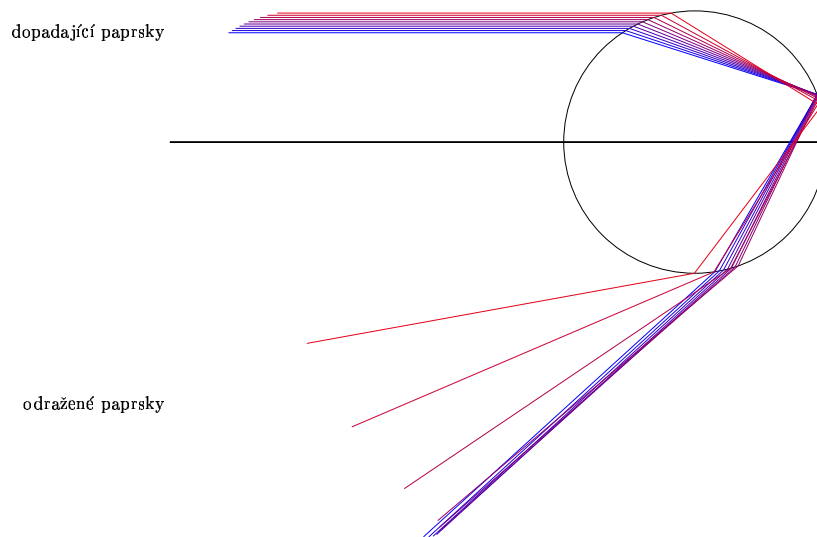
do vzduchu. Pro vznik duhy je důležitá ta část paprsku, která po dopadu na kapku pronikne dovnitř, potom se odrazí od vnitřní stěny kapky a nakonec projde do vzduchu, viz obr. 2.

Důležitý je úhel, o který se paprsek odchýlí, tedy úhel mezi dopadajícím a odchozím paprskem na obr. 2. Tento úhel závisí na tom, kde na kapku paprsek dopadá. Pokud například míří přímo na její střed, odrazí se přesně zpátky a úhel mezi přicházejícím a odcházejícím paprskem je v tomto případě 0 stupňů.



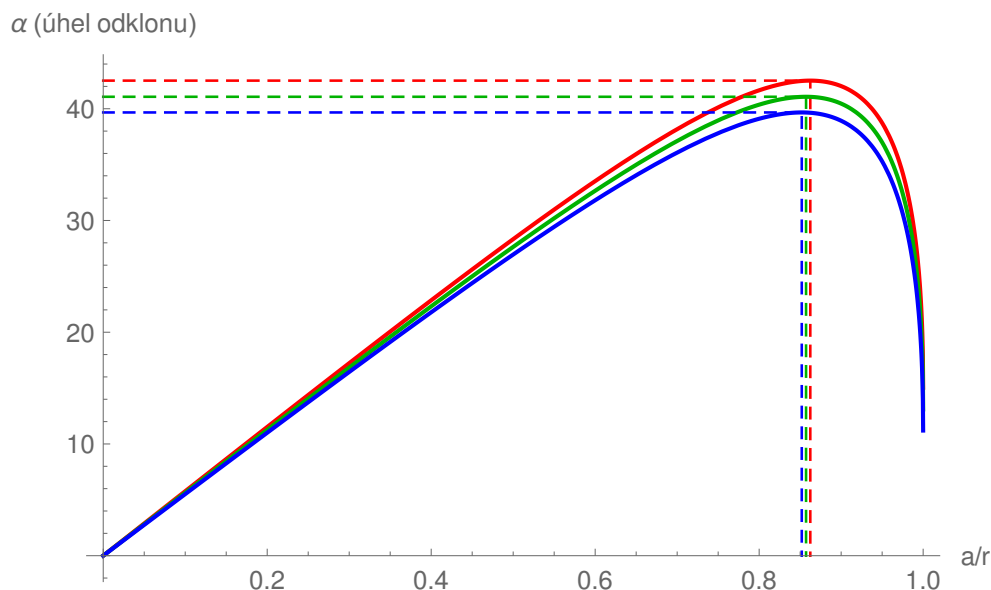
Obrázek 4: Úhel odklonu světelného paprsku α jako funkce poměru a/r , kde a je impaktní parametr a r je poloměr kapky. Úhel odklonu dosahuje vyznačeného maxima $\alpha = \alpha_{\max}$ pro určitou hodnotu impaktního parametru $a = a_0$, což je klíčové pro vznik duhy.

Podívejme se nyní, co se děje s odchozím paprskem, jestliže necháme přichozí paprsek dopadat nejprve přímo na střed a pak s ním míříme stále výš a výš, až se nakonec kapky jen dotkne. Jinak řečeno, zkoumejme, jak se bude měnit úhel α mezi přicházejícím a odcházejícím paprskem, když budeme měnit vzdálenost a , o kterou dopadající paprsek míří mimo střed kapky. Není těžké nahlédnout, že zpočátku se tento úhel bude zvětšovat se zvětšujícím se a , jak je vidět i z obrázku 3. Ukazuje se



Obrázek 5: Kapka vody a lom světelných paprsků, které na ni dopadají v bezprostředním okolí paprsku rozptýleného o maximální úhel.

ale (dá se to např. vypočítat), že úhel α se zvětšuje s rostoucím a jen do určité chvíle a pak zase začne klesat, což je opět vidět na obrázku 3 nebo ještě lépe na grafu závislosti $\alpha(a)$ na obrázku 4. Obrázek 5 ukazuje paprsky v těsném okolí paprsku, pro který nastává maximální úhel.

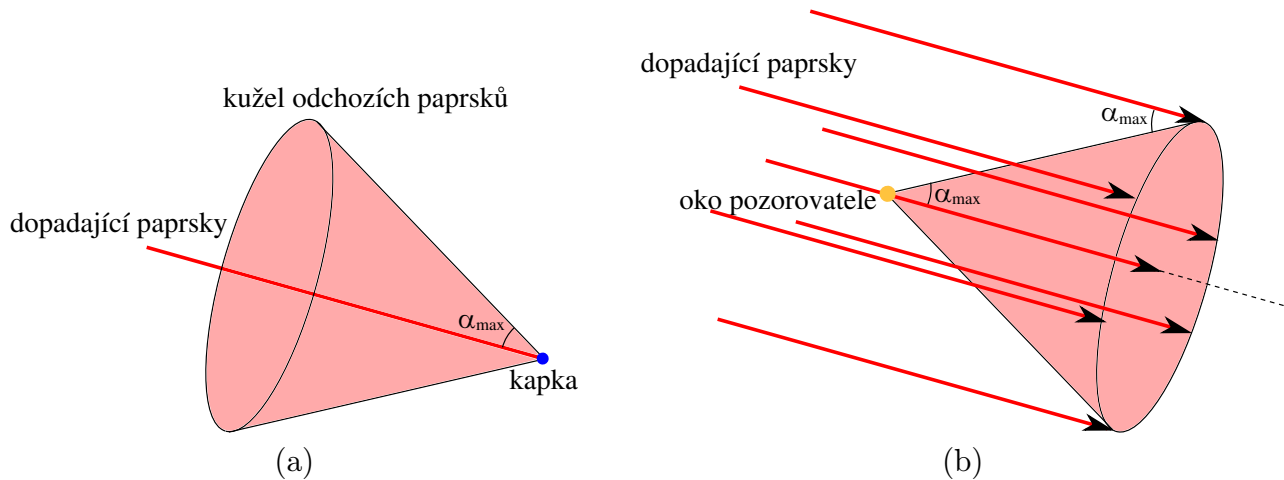


Obrázek 6: Totéž jako na obr. 4, ale pro tři různé indexy lomu odpovídající různým vlnovým délkám světla. Protože pro každou vlnovou délku je α_{\max} trochu jiné, je pro každou barvu i jiná velikost oblouku duhy.

Když tedy budeme pomalu zvětšovat a od nuly, bude se pomalu od nuly zvětšovat i úhel α . Jakmile se ale začneme blížit k té hodnotě a , pro kterou je α největší (říkejme té hodnotě α_{\max} odpovídajícímu a pak a_0), bude se růst úhlu α zpomalovat, až nakonec se na okamžik zastaví a pak se α začne zase zmenšovat. A to je důležité: kolem vzdálenosti a_0 je to tak, že když trochu měním a , tak se α skoro nemění (matematicky vyjádřeno, je nulová derivace α podle a). Výsledkem je, že do toho směru α_{\max} jde hodně světla – všechno z okolí odpovídajícího a_0 . Lze spočítat, že pro vodu, jejíž index lomu je asi 1,33, je úhel α_{\max} asi 42 stupňů a díky disperzi světla slabě závisí na vlnové

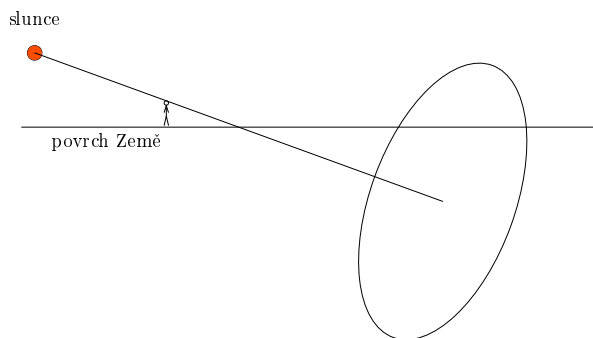
délce – největší je pro červené světlo, menší pro zelené a nejmenší pro fialové. To je vidět na grafu závislosti $\alpha(a)$ pro světlo několika vlnových délek, viz obr 6.

Výsledkem tedy je, že světlo od kapky může odcházet do různých směrů, ale nejvíce jej půjde do směru, který svírá s dopadajícím paprskem úhel α_{\max} . Kvůli rotační symetrii kapky tak odchozí paprsky vytvoří kužel s vrcholovým úhlem $2\alpha_{\max}$, přičemž nejvíce světla se bude šířit podél pláště tohoto kužele. Osa kužele je dána směrem dopadajících slunečních paprsků, viz obr. 7 (a).



Obrázek 7: (a) Po dopadu paprsků na vodní kapku vytvoří odchozí paprsky světelný kužel (znázorněn růžově). Světlo je uvnitř kužele i na jeho plášti, ale na plášti je mnohem silnější, protože tam dochází k nahromadění paprsků. (b) Díky tomu uvidí pozorovatel přicházet světlo ze všech kapek, které jsou uvnitř růžového kužele. Z jeho pláště bude do oka přicházet světlo nejsilnější, proto pozorovatel uvidí světelný oblouk.

Představme si nyní člověka, kolem nějž jsou dešťové kapky osvětlené sluncem. Ze kterých kapek k němu bude přicházet nejvíce světla? Objasňuje to obrázek 7 (b). Nejvíce světla bude přicházet z těch kapek, pro které je úhel mezi paprskem dopadajícím se Slunce a paprskem odchozím do oka pozorovatele právě α_{\max} . Tyto kapky leží na plášti kužele vyobrazeného na obr. 7 (b). Zevnitř kužele bude také nějaké světlo přicházet, ale slabší. Proto pozorovatel uvidí světlý oblouk, jehož vnitřní část bude světlejší než vnější, viz obr. 1 (b). Světelný oblouk má ale trochu odlišnou velikost pro různé barvy spektra, proto jej nevidíme bílý, ale duhový – duhu.



Obrázek 8: Poloha oblouku duhy vzhledem k pozorovateli.

Z našich úvah o kuželu je zřejmé, že duha tvoří na obloze kružnici, jejíž střed leží na obloze na přesně protilehlém místě vzhledem ke slunci a jejíž úhlový poloměr je α_{\max} . To, jakou část duhy uvidíme, je proto dáno polohou slunce na obloze. Pokud bude slunce skoro na obzoru, uvidíme téměř polovinu celého oblouku. Čím bude slunce výše, tím menší část uvidíme, a pokud bude výše než 42° ,

duhu už vůbec nespátříme. Mohli bychom ji ale vidět z letadla, kde nám ji nezakrývá Země. Z letadla dokonce můžeme vidět i celý oblouk.

Existenci maximálního úhlu α_{\max} odchylení odchozího paprsku můžeme demonstrovat pěkným pokusem, při kterém svítíme laserem na PET láhev naplněnou vodou. Při posouvání lahve vidíme, že odchozí paprsek se odchyluje stále více, jak zvětšujeme vzdálenost, o kterou míříme mimo osu lahve, ale pak se začne vracet.

Halové jevy

Vznikají podobným způsobem jako duha lomem světla, ale nikoli na kapkách vody, nýbrž na ledových krystalcích.



Obrázek 9: (a), (b) Halo. (c) Boční slunce.