

Cumulonimbus – oblak známý i neznámý

Díl devátý – Kde leží duha

Petr Zacharov¹, Jana Žďárská²

¹ Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Boční II 1401/1a, 141 31 Praha 4; petas@ufa.cas.cz

² Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 00 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz



Možná vás to překvapí, ale i krásná a křehká duha má svoje místo v seriálu o cumulonimbu. I když nezapadá do nebezpečných jevů, které jsme dosud rozebírali, vzniká nejčastěji na letní přeháňce, způsobené právě cumulonimbem. A i když duhu všichni důvěrně známe, pořád je na ní co objevovat. Je zajímavé, že duha je pouhá optická „iluze“, není nakreslená nikde na oblačnosti ani srážkách. Každý má formálně vzato v očích svoji vlastní duhu, protože se mu do oka trefí pokaždé jiné kapičky jinými paprsky světla.

Duha patří mezi nejkrásnější a nejpoetičtější optické úkazy v přírodě, které fascinují lidstvo už po staletí. Tento barevný oblouk na obloze bývá často vnímán jako symbol naděje, klidu či kouzla, ale za jeho vznikem stojí čistě fyzikální procesy spojené s lomem a odrazem světla v kapkách vody. Možná jste si jí všimli po dešti, když se slunce opět prodralo skrz kupovitou oblačnost – právě tehdy vznikají ideální podmínky pro její zformování. Ačkoliv duha působí poměrně jasně a křehce, její podstata je matematicky přesná a její tvar, barvy i poloha na obloze se dají vysvětlit pomocí zákonů optiky. Pojďme se podívat, jak přesně duha vzniká, proč vidíme několik barev, proč má tvar oblouku – a kde lze najít její konec.

Představme si pěkné letní odpoledne po příjemné přeháňce. Slunce ozařuje vzdalující se cumulonimbus s přeháňkou a sluneční paprsky dopadají na kapky deště.

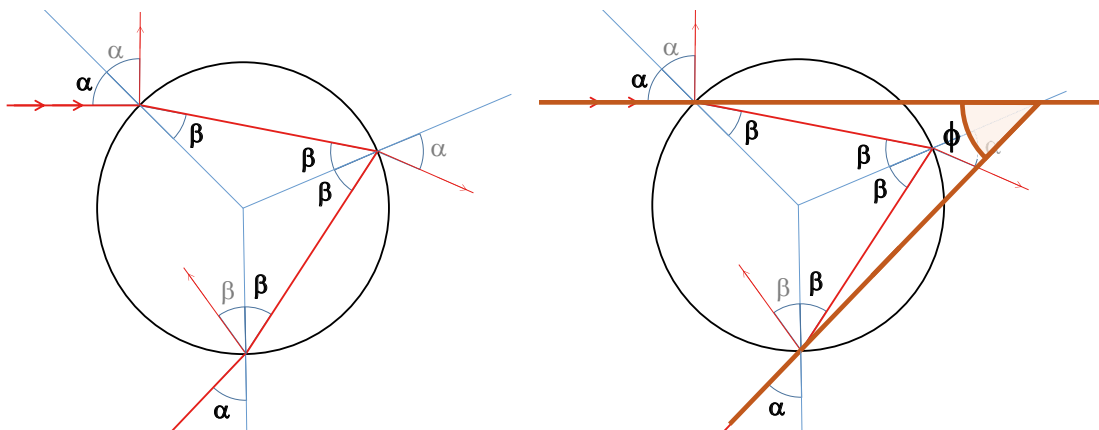
Na povrchu každé kapky se malá část světla odrazí a většina světla se lomí na rozhraní vzduch–voda podle známého Snellova zákona¹ (obr. 1). Paprsek prochází kapkou, až narazí na druhý okraj kapky. A opět se část světla odrazí zpět do kapky a část světla se lomí na rozhraní voda–vzduch a kapku opouští. Toto světlo nás zajímat nebude, protože prochází kapkou směrem od Slunce a žádnou duhu nevytváří.

Část paprsku, která se uvnitř v kapce poprvé odrazila, zase putuje až na její protilehlý kraj. Tady se situace opakuje, část světla se odrazí a část světla se lomí na rozhraní kapky a vychází z ní ven. A teď začíná být situace mnohem zajímavější. René Descartes totiž zjistil o těchto paprscích, co se v kapce jednou odrazilo, úžasnou věc. I když paprsky slunečního světla dopadají

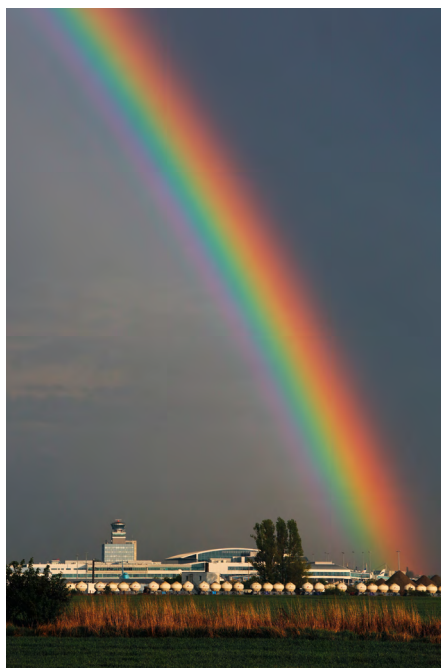
na celou přední část kapky, a tudíž díky zakřivení povrchu kapky dopadají pod úhly od 0° do necelých 90°, opouští paprsky kapku maximálně pod úhlem 42° vzhledem ke směru původních paprsků. Tento maximální úhel byl dokonce po Descartovi pojmenován.

U tohoto maximálního úhlu dochází navíc k nashromáždění paprsků, a tedy i k zintenzivnění světla. A protože je celá situace trojrozměrná, vychází z kapky celý kužel světla s vyšší intenzitou světla na povrchu kužele. Pokud byste chtěli tento jev simulovat, můžete pomocí baterky a skleněné koule na zdi pozorovat kruh světla ohraničený světlem vyšší intenzity. Na obloze pak pozorujeme toto zintenzivnění právě v místech duhy. Zatím ale máme pouze intenzivní světlo na kraji duhového oblouku. Descartes totiž duhu „pouze“ vysvětlil, obarvil ji až Isaac Newton. Ten totiž objevil rozklad

Obr. 1 Průchod slunečního paprsku (červeně) dešťovou kapkou (černý kruh). Písmenem α je označen vstupní úhel paprsku, písmenem β úhel lomu paprsku v kapce, případně vnitřního dopadu a odrazu. Tenkou modrou linií jsou vyznačeny kolmice na dané místo na povrchu kapky. Silnou hnědou čarou (vpravo) je vykreslen výstupní úhel ϕ .



¹ https://cs.wikipedia.org/wiki/Snellův_zákon



Obr. 2 Výrazná duha nad Letištěm Václava Havla. Autor: Jan Drahekoupil (www.dasaahonza.cz)

bílého světla do jednotlivých barev spektra. To nastává při lomu světla, protože je index lomu závislý na vlnové délce. Na tomto místě je dobré poznamenat, že i když se vysvětlení duhy připisuje Descartovi a Newtonovi, velký kus práce před Newtonem udělal

i český učenec Jan Marek Marci (renesanční lékař, fyzik a matematik, jeden z posledních českých polyhistorů), který pochopil, že vzniká rozkladem bílého světla a lomem a odrazem v dešťových kapkách. Bohužel se Isaac Newton o práci Jana Marka Marciho nezmiňuje...

Světlo procházející do kapky se tedy rozkládá na jednotlivé barvy, z nichž každá putuje kapkou pod jiným úhlem. A také z kapky pod trochu jiným úhlem vychází, takže Descartův úhel je největší pro červené světlo, menší pro oranžové, zelené atd. Takže si můžeme situaci s kuzelem světla, který vychází z kapky, představit pro každou barvu zvlášť. Nejširší kužel bude z červeného světla s intenzivní červenou na povrchu kužele. V něm bude vnořený oranžový kužel s intenzivní oranžovou na povrchu kužele, v něm zelený atd. Výsledný kužel světla vycházející z kapky tak bude mít u povrchu vrstvičky barevného intenzivního světla. A uvnitř kužele se všechny barvy zase poslušně poskládají do bílého světla.

Díky tomu, že v kuželu červeného světla je zanořený kužel oranžové barvy a postupně dalších barev, nejsou barvy duhy úplně stejné jako barvy spektra, protože je v každé barvě obsažena i část barvy předchozí (od červené až po fialovou). Nicméně vysoká intenzita světla určité barvy na plášti příslušného kužele výrazně převyšuje intenzi-

tu světla předchozích barev, a tudíž je duha spektru podobná.

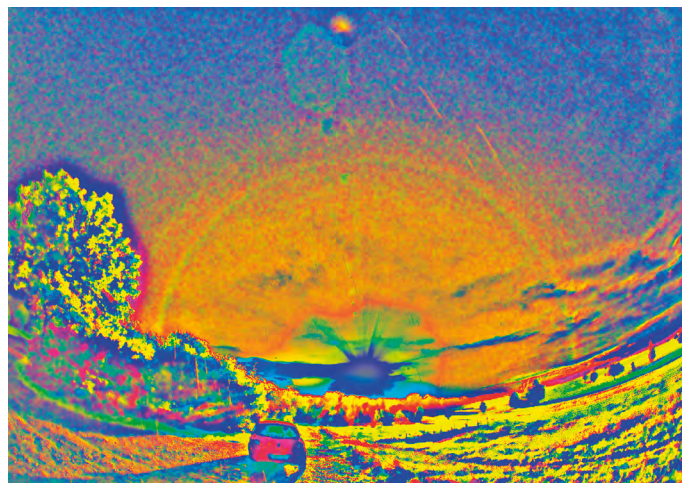
Každá kapka deště tedy posílá zpět k pozorovateli kužel bílého světla s barvami duhy u povrchu tohoto kužele. A teď už záleží jen na tom, který paprsek se z dané kapky trefí pozorovateli do oka. Ten pak „vidí“ nějakou kapku červenou, jinou oranžovou, zelenou atd. Některé kapky mu zase posílají do oka bílé světlo, a protože šířka kužele je omezena Descartovým úhlem, netrefí se některé kapky pozorovateli do oka vůbec žádným světlem. Až v očích se pak pozorovateli poskládá duha tak, jak ji známe. Barevný oblouk s bílým světlem uvnitř a tmavým pásem hned nad barevnými oblouky. Tento pás pozoroval již jistý Alexandros z Afrosiady ve starém Řecku a je po něm i pojmenován jako *Alexandrovův pás*. Setkat se můžete i s označením temný nebo tmavý pás.

Důležité je, že je duha čistě optický jev, není nakreslena nikde na oblačnosti ani srážkách. Každý pozorovatel má formálně vzato v očích svoji vlastní duhu, protože se mu do oka trefí pokaždé jiné kapičky jinými paprsky světla. Nedůvěřivcům můžete iluzi dokázat např. polarizačním filtrem, jehož pootočením můžete vymazat část duhy z oblohy. Duha je totiž tvořena silně polarizovaným světlem.

V předchozím textu jsme si rozebrali vznik duhy primární neboli duhy první-



Obr. 3 Duha prvního a druhého řádu s Alexandrovým pásem mezi nimi. Na fotce je dobře patrné bílé světlo uvnitř duhy prvního řádu i slabé světlo vně duhy druhého řádu, která vznikla opětovným složením barevných paprsků do bílého světla. Autor: Dagmar Drahekoupilová (www.dasaahonza.cz)



Obr. 4 Vzácná fotografie duhy třetího a čtvrtého řádu z Langebrücku u Drážďan. Vlevo standardní fotka s lehce patrnou duhou třetího řádu okolo Slunce, vpravo jasně patrný oblouk duhy třetího řádu (blíže ke Slunci) a částečně i duhy čtvrtého řádu. Autor: Alexander Haußmann

ho řádu. Tu všichni bezpečně známe, ale také víme, že občas zahlédneme i duhu sekundární neboli duhu druhého řádu. Tu vytváří světlo, které se uvnitř kapky neodrazilo pouze jednou, ale dvakrát. V popisu cesty paprsku kapkou jsme naposledy zůstali u světla, které po prvním vnitřním odrazu dopadá na okraj kapky, část světla se lomí, prochází ven z kapky a vytváří duhu prvního řádu. Část světla, která se opět ve vnitř odrazila do kapky (obr. 1), opět putuje kapkou a dopadá na její okraj. Tady se situace opakuje, pouze se sníženou intenzitou světla. Část světla se lomí, vychází z kapky ven a vytváří duhu druhého řádu. Zbytek putuje dále kapkou a cyklicky opakuje popsané chování se stále nižší a nižší intenzitou světla. V modelovém prostředí bychom tak nedostali pouze duhu prvního a druhého řádu, ale také duhy vyšších řádů.

O takových duhách jste asi neslyšeli a rozhodně jste je ani neviděli. Už duhu

druhého řádu máme často problém spatřit, natož duhy vyšších řádů s ještě nižší intenzitou světla (viz tabulka). A i kdyby nám nakrásně stačila intenzita světla duhy třetího řádu, neuvidíme ji díky její poloze u Slunce (obr. 4), nikoli na straně proti Slunci, jako je tomu u duhy prvního a druhého řádu. Duha čtvrtého řádu je také okolo Slunce (obr. 4), až duhy pátého a šestého řádu jsou opět na straně proti Slunci (viz tabulka). Intenzita jejich světla je však tak nízká, že je očima neuvidíme. Nicméně byly tyto duhy nedávno fotograficky prokázány^{2,3,4} (obr. 4), když zkušený fotograf věděl, kde a co má hledat.

- 2 M. Grossmann, E. Schmidt, A. Haussmann: Photographic evidence for the third-order rainbow. *Applied Optics* 50, 134–141 (2011).
- 3 M. Theusner: Photographic observation of a natural fourth-order rainbow. *Applied Optics* 50, 129–133 (2011).
- 4 H. Edens: Photographic observation of a natural fifth-order rainbow. *Applied Optics* 54, 26–34 (2014).

řád	umístění	intenzita	pozice barev
1	proti Slunci	100 %	červená vně oblouku
2	proti Slunci	43 %	červená uvnitř oblouku
3	u Slunce	24 %	červená vně oblouku
4	u Slunce	15 %	červená uvnitř oblouku
5	proti Slunci	10 %	červená vně oblouku
6	proti Slunci	8 %	červená uvnitř oblouku

Tab. 1 Umístění a intenzita světla duh vyšších řádů. Intenzity jsou vyjádřeny relativně vůči duze prvního řádu.

V dnešním díle jsme si tedy vyrobili a „obarvili“ duhu, v dalším díle se podíváme na její vlastnosti. Například kdy můžeme vidět z duhy jenom proužek, kdy můžeme vidět klasický duhový půlkruh a kdy můžeme vidět duhu celou. Víte, kdy jsou nejlepší podmínky na pozorování duhy?



Obr. 5 Krásná duha prvního řádu včetně části duhy druhého řádu s cumulonimbem v pozadí. Uvnitř duhy prvního řádu je dobře patrné bílé světlo, opětovně složené z barevných paprsků.