Atmosférické

OPTICKÉ JEVY

Petr Skřehot

M.O.R.
Meteorologická Operativní Rada

OBSAH

1 ATMOSFÉRA ZEMĚ 3

1.1 STRUČNÁ HISTORIE VÝVOJE ATMOSFÉRY 3
1.2 ATMOSFÉRICKÁ FAKTOGRAFIE 4

2 ATMOSFÉRICKÁ OPTIKA 6

2.1 ŠÍŘENÍ SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ V DIELEKTRIKU 6
2.2 TRAJEKTORIE SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ V ATMOSFÉŘE 7
2.3 ROZPTYL SVĚTLA NA VODNÍCH KAPKÁCH 9
2.3.1 Odraz světla na sférické kapce 9
2.3.2 Lom světla bez vnitřních odrazů 10
2.3.3 Lom světla s vnitřními odrazy 12
2.4 ROZPTYL SVĚTLA NA LEDOVÝCH KRYSTALCÍCH 14

3 FOTOMETEORY 17

3.1 DUHY 17
3.2 KORÓNY 19
3.3 GLÓRIE 20
3.4 IRIZACE OBLAKŮ 21
3.5 HALOVÉ JEVY 22
3.5.1 Přehled nejčastějších halových jevů 22
3.5.1.1 Malé halo 23
3.5.1.2 Velké halo 23
3.5.1.3 Horizontální kruh 23
3.5.1.4 Halový sloup 23
3.5.1.5 Vedlejší slunce malého hala 24
3.5.1.6 Lowitzovy oblouky 24
3.5.1.7 Paranthelia 24
3.5.1.8 Dotykové oblouky malého hala 24
3.5.1.9 Parryho oblouk 24
3.5.1.10 Dotykové oblouky velkého hala 24
3.5.1.11 Protislunce 25
3.5.1.12 Horní cirkumzenitální oblouk 25
3.6 SOUMRAKOVÉ JEVY 26
3.6.1 Fialová záře 27
3.6.2 Zelený paprsek 27
3.6.3 Ostatní soumrakové jevy 28
3.6.4 Zdánlivé zvětšení slunečního nebo měsíčního disku 28

4 OSTATNÍ OPTICKÉ ÚKAZY 29

4.1 BLESKY 29
4.1.1 Čárový blesk 29
4.1.2 Rozvětvený blesk 29
4.1.3 Kulový blesk 29
4.1.4 Plošný blesk 30
4.2 ELIÁŠŮV OHEŇ 31
4.3 POLÁRNÍ ZÁŘE 32
4.4 TYNDALLŮV JEV 33
4.5 BISHOPŮV KRUH 33
4.6 METEORY 33

1 ATMOSFÉRA ZEMĚ

1.1 Stručná historie vývoje atmosféry

Zemská atmosféra tvoří plynný obal naší planety Země. Pro vznik života a pro jeho další vývoj na naší planetě sehrála v historii nepochybně jednu z nejdůležitějších rolí. Neméně důležitou úlohu má i dnes, neboť je stále sférou, která život na této planetě chrání, udržuje a napomáhá k jeho dalšímu rozvoji.

Složení i hustota atmosféry se během věků měnily a to v závislosti na geologických i biologických podmínkách, které zde v minulosti panovaly. Moderní představy hovoří o tom, že Země vznikla před 4,5 miliardami let. Spolu se vznikem naší planety vznikala také atmosféra, která byla o to hustší, oč větší původní protoplaneta byla. Atmosféra Země byla zpočátku natolik hustá, že ji lze, a to i na základě svého složení, připodobnit k atmosféře na dnešní Venuši. Hlavními složkami byl oxid uhličitý (CO_2), oxidy síry – zejména oxid siřičitý (SO_2), dusík (N_2), oxidy dusíku (NO_x), vodní pára a stopové množství vzácných plynů a ostatních plynů (čpavek, vodík, methan). Kromě jiného obsahovala tehdejší atmosféra, díky častým sopečným erupcím, také mnoho prachových částic, které sehrály v pozdějších údobích velmi důležitou roli coby kondenzační jádra.

Postupem času, když začala vulkanická činnost ustávat, začala Země chladnout. Teplota atmosféry z původních několika set stupňů klesla až na hodnotu, kdy mohlo docházet ke vzniku oblačnosti a též k prvním atmosférickým srážkám. Této etapě vývoje atmosféry říkáme fáze kondenzace vodní páry při níž postupně většina vodní páry zkondenzovala a vznikly první řeky, jezera a oceány.

Světový oceán se již před 3,9 miliardami let stal kolébkou života. Vznikly zde první jednobuněčné organismy, které měly svou životní existenci spjatou se spotřebou oxidu siřičitého. Snižující se koncentrace oxidu siřičitého a ústup vulkanické činnosti však postupně tyto mikroby předurčila k zániku. Postupnou genezí ale na jejich místo nastoupily zprvu organismy spotřebovávající oxid uhličitý a nakonec i ty, jež kyslík ke svému životu nezbytně potřebují.

Od okamžiku, kdy v atmosféře začalo docházet k úbytku oxidu uhličitého, se začalo také výrazně měnit globální klima. To bylo výrazně ovlivňováno skleníkovým efektem, jehož důsledky začaly být postupně tlumeny a teplota atmosféry postupně poklesla až na dnešní hodnoty. Současná úroveň skleníkového efektu, která se zde udržuje již po několik stovek miliónů let, upravuje globální klima tak, že poskytuje na souších příhodné podmínky pro život.

1.2 Atmosférická faktografie

Dnešní podoba a složení atmosféry je známá i žáku základní školy. Nicméně opakování matka moudrosti, jak prohlásil J.A.Komenský, takže si zopakujme oněch několik faktů vážících se k atmosféře. V tabulce 1 je zrekapitulováno chemické složení atmosféry

Tabulka 1: Zastoupení jednotlivých plynů v dnešní atmosféře

Plyn	**Chemický vzorec**	**Zastoupení v hmotnostních procentech**
Dusík	N_2	78,08%
Kyslík	O_2	20,95%
Argon	Ar	0,93%
Oxid uhličitý	CO_2	0,038%
Vodní pára a ostatní plyny	H_2O	0,01%

Vedle výše uvedených plynů obsahuje atmosféra i množství tuhých částic, kapiček vody a krystalů ledu či solí a to ať už přírodního nebo anthropogenního původu. Z fyzikálního hlediska lze atmosféru tedy považovat za řídký aerosol.

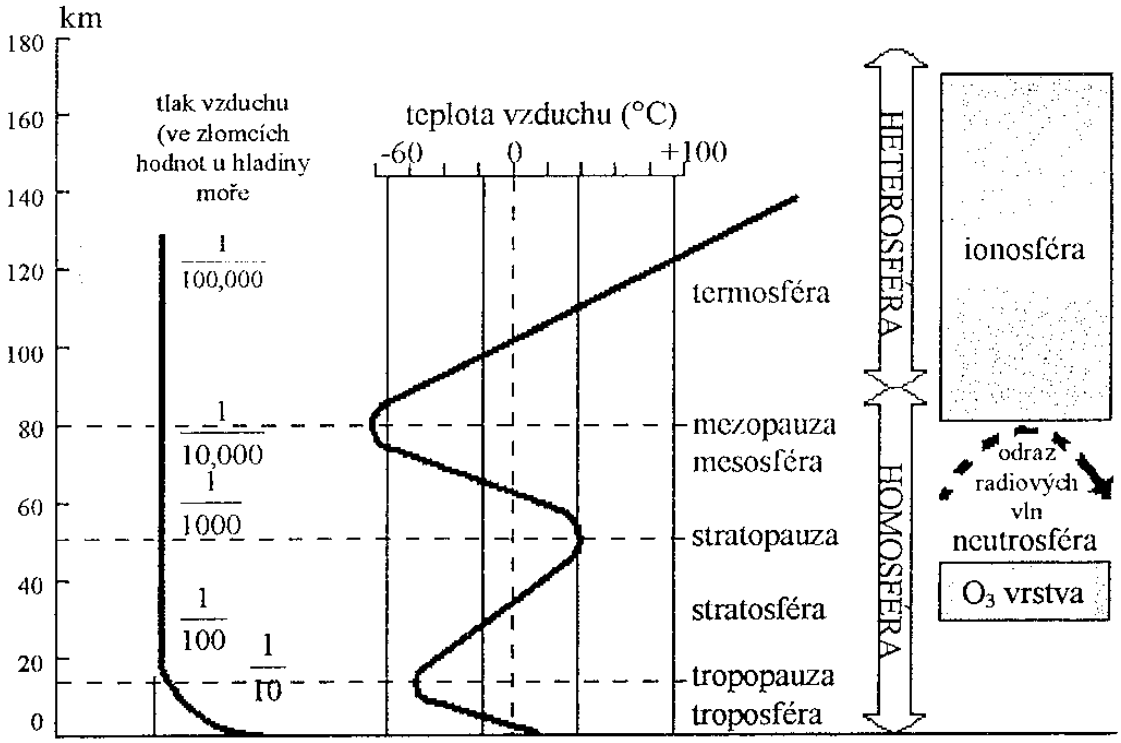
Atmosféra Země sahá do výšek 30 až 40 tisíc kilometrů a přechází bez výrazné horní hranice do meziplanetárního prostoru. V důsledku promíchávání vzduchu se jeho složení do výšky přibližně 90 až 95 km nemění (kromě obsahu oxidu uhličitého a ozónu). Množství oxidu uhličitého se mění v závislosti na čase a místě, množství ozónu především pak na výšce. U zemského povrchu je koncentrace přírodního ozónu nepatrná, větší je ve výškách 10 až 50 km, v tzv. ozonosféře. V nižších výškách, zvláště ve městech, se vyskytuje tzv. přízemní ozón, za jehož výskyt může zejména automobilový provoz. Nutno poznamenat, že ozón je velmi reaktivní a smrtelně jedovatý plyn.

Jak už bylo zmíněno výše, velmi významnou roli hraje v atmosféře voda. Můžeme ji zde nalézt ve skupenství pevném, kapalném i plynném. Její převážná část je soustředěna v troposféře, tedy ve spodních 10 km atmosféry. Její obsah se zde pohybuje od 0,2 do 4 objemových procent. Průměrný obsah vláhy v zemské atmosféře se rovná podle P.D.Astapenka $1{,}23.10^{16}$ kg, což odpovídá celosvětové srážkové vrstvě 22 mm. Průměrný roční úhrn atmosférických srážek na Zemi se odhaduje na $5{,}26.10^{17}$ kg. Vodní pára se nad každým místem zemského povrchu obnovuje v důsledku oběhu vláhy v průměru 47krát za rok, tedy asi každých 8 dní.

Celková hmotnost atmosféry je podle K. E. Trenbertha $5{,}137.10^{18}$ kg, tj. přibližně jedna miliontina hmotnosti planety Země. Přibližně celá polovina hmotnosti atmosféry

je soustředěna ve spodních 5,5 km, zhruba 75% ve spodních 10 km, 90% pod 20km a nad 36 km se vyskytuje jen asi jen 1% její celkové hmotnosti.

Podle průběhu některých fyzikálních prvků se zemská atmosféra rozděluje do řady vrstev (viz obr. 1).



Obr. 1: Výškové členění zemské atmosféry na jednotlivé vrstvy

Na závěr uveďme ještě něco málo o teplotě, tlaku a hustotě vzduchu, což jsou veličiny měnící se v závislosti na výšce. V tabulce 2 jsou uvedeny průměrné hodnoty těchto veličin považované za standardy pro spodní a horní hranici troposféry.

Tabulka 2: Průměrné hodnoty teploty vzduchu, tlaku vzduchu, hustoty vzduchu a gravitačního zrychlení v různých nadmořských výškách

Nadmořská výška	Teplota	Tlak	Hustota	Gravitační zrychlení
0 m	15°C	1013,25 hPa	1,225 kg/m^3	9,8066 m/s^2
11 019 m	–56,5°C	226,32 hPa	0,36319 kg/m^3	9,7727 m/s^2

Od hladiny moře do výšky 11 019 metrů teplota vzduchu za normálních podmínek (ne za teplotní inverze) ubývá o 0,65°C na každých 100 metrů výšky. Průměrná teplota celé atmosféry byla vypočtena na –20,7°C, což odpovídá teplotě vzduchu ve výšce 5500 metrů.

2 ATMOSFÉRICKÁ OPTIKA

2.1 Šíření světelných paprsků v dielektriku

Viditelné světlo je druh elektromagnetického záření o vlnových délkách od 400 nanometrů do 750 nanometrů. Vzduch představuje dielektrikum, ve kterém se světlo šíří. Pro výpočet rychlosti šíření světla v tomto prostředí je potřeba vycházet z Maxwellových rovnic. Pro naše potřeby postačí, když budeme vycházet z již odvozených výsledků těchto rovnic pro atmosférické prostředí. Případné zájemce o jednotlivá řešení těchto rovnic směle odkazuji na publikaci Pozoruhodné jevy v atmosféře .

Pro rychlost světla ve vakuu platí vztah:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

kde ε_0 je permitivita vakua a μ_0 magnetická permeabilita vakua.

Pro velikost postupné rychlosti, kterou se elektromagnetické vlnění šíří v určitém prostředí o různém ε_r a μ_r platí:

$$\frac{\varepsilon_r \mu_r}{c^2} = \frac{1}{v^2}$$

odkud dostáváme

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$$

Jelikož se pro vzduch μ_r rovná přibližně 1, zjednodušujeme rovnici do tvaru

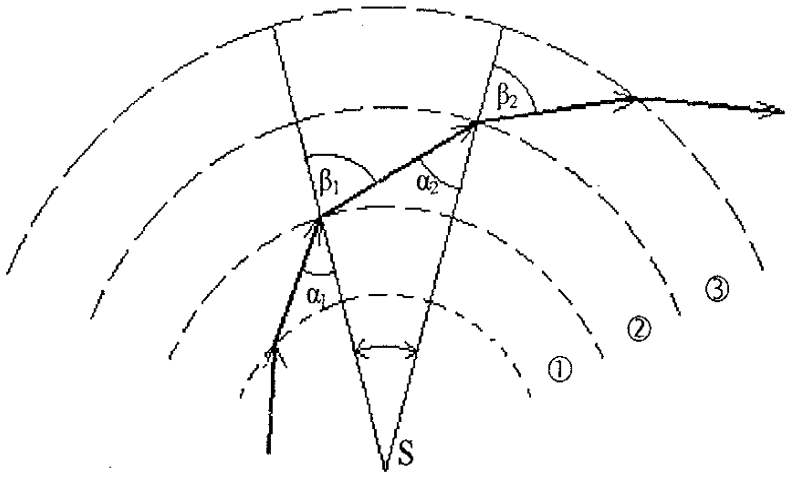
$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

2.2 Trajektorie světelných paprsků v atmosféře

Na základě průchodu paprsku dvěma vrstvami o různých hustotách, v nichž se šíří různou rychlostí, dochází na rozhraní těchto vrstev ke změně trajektorie paprsku. Tato změna je charakterizována veličinou nazývanou index lomu, který fyzikálně popisuje vztah:

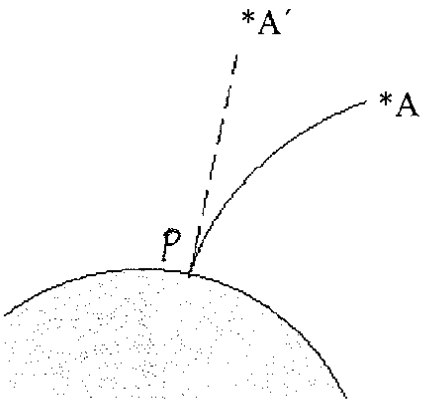
$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}\mu_{r1}}}$$

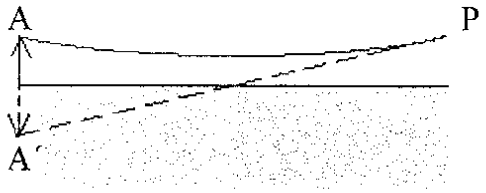
Budeme-li uvažovat, že se vzrůstající výškou se mění fyzikální parametry atmosféry, můžeme problém průchodu paprsku aproximovat tak, že jednotlivé vrstvy atmosféry budeme považovat za nespojitě se měnící prostředí s ostrými rozhraními. Tato aproximace je uvedena schematicky na obrázku 2, kde zóny 1, 2, 3 značí jednotlivé vzduchové hmoty, bod S pak charakterizuje střed Země. Jelikož je však atmosféra ve svých nižších partiích prostředím měnícím se spojitě, přejde lomená křivka v parabolu.



Obr. 2: Trajektorie světelného paprsku průchodem atmosférou

Na základě výše uvedené příčiny, kterou jsme si alespoň povrchně vysvětlili, vzniká jev nazývaný **astronomická refrakce** (viz obr. 3). Pozorovatel nalézající se v bodě P sleduje např. určitou hvězdu, která by se při neexistenci lomu světelných paprsků v atmosféře nacházela na nebeské klenbě v bodě A. Světelný paprsek procházející ovzduším shora dolů však postupuje do stále hustších vzduchových vrstev a lomí se proto ke kolmici. Pozorovatel potom vnímá danou hvězdu ve směru tečny vedené ke křivce trajektorie zakřiveného paprsku a vnímá hvězdu v bodě A'.

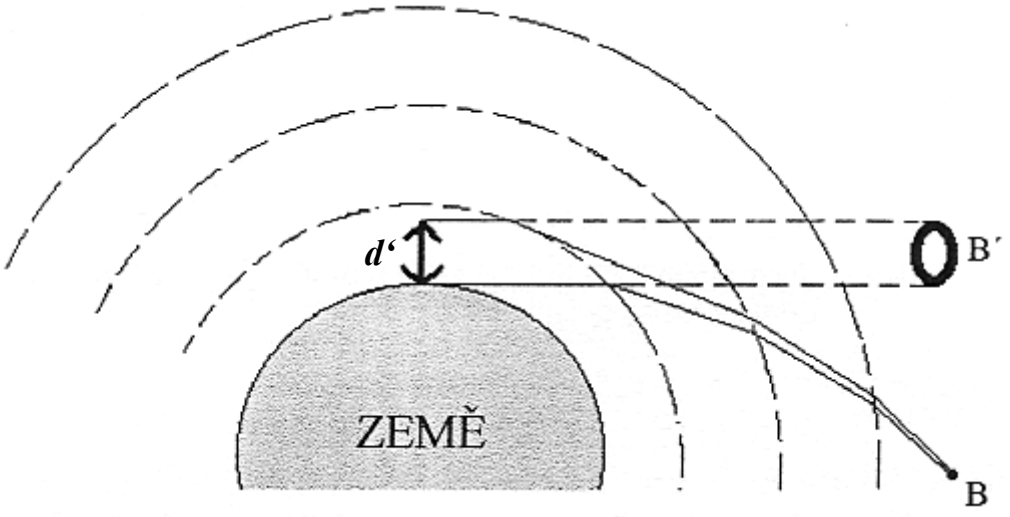




Obr. 3: Vznik astronomické refrakce

Obr. 4: Vznik spodního zrcadlení

Podobnými principy vznikají další pozoruhodné jevy jakými jsou **zvednutí obzoru, svrchní a spodní zrcadlení (fata morgána)** (viz obr. 4), ale též zdánlivé zvětšení kotoučů Slunce a Měsíce při východu či západu (viz obr. 5).



Obr. 5: Zdánlivé zvětšení kotouče Slunce či Měsíce při jejich východu či západu

Polohu kotouče vnímá pozorovatel v bodě B‘, což je, jak nám ukazuje obrázek, výše, než jak je tomu ve skutečnosti (bod B).

2.3 Rozptyl světla na vodních kapkách

Detailní studium fyzikálních jevů provázejících interakci světla s vodními kapkami umožňuje popis a vysvětlení vzniku duh, korón a glórií. Malé částice splňující podmínky Rayleighova rozptylu z našeho studia vynecháme, neboť pro vysvětlení výše uvedených fotometeorů musíme uvažovat kapky větších rozměrů (řádu desetin až jednotek milimetrů).

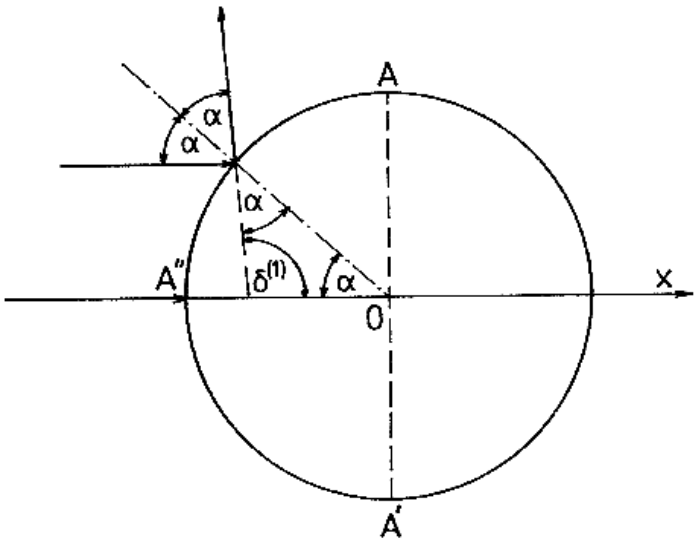
V podstatě se lze setkat se třemi hlavními typy jevů: **1) odraz světla na sférické kapce, 2) lom světla bez vnitřních odrazů a 3) lom světla s vnitřními odrazy na vodních kapkách.**

2.3.1 Odraz světla na sférické kapce

Uvažujme svazek rovnoběžných nepolarizovaných světelných paprsků dopadajících podél osy x na sférickou kapku (viz obr. 6) a omezme se pouze na tu jejich část, která se od povrchu kapky odráží. Úhel dopadu α se u paprsku ležícího v ose x procházející středem kapky rovná nule, avšak čím více je dopadající paprsek od osy x vzdálen, tím roste α až k hodnotě $\pi/2$ (v úhlových jednotkách rovno 90°), jíž nabývá u paprsku dotýkajícího se jen kontur kapky v bodě A nebo A'.

Pro vzájemný vztah relativního indexu lomu a úhlu dopadu, resp. odrazu zcela polarizovaného světla platí jednoduchá zákonitost:

$$\operatorname{tg} \alpha = n_r$$

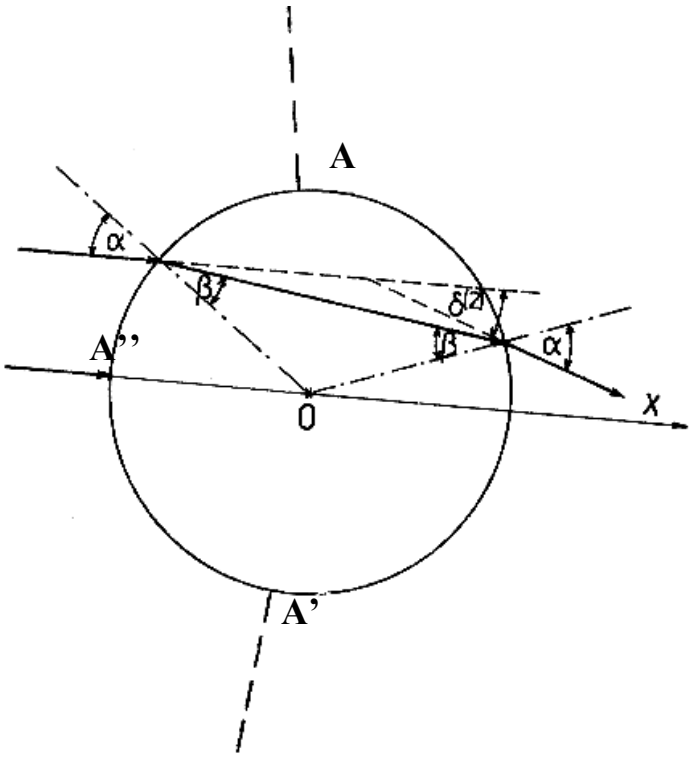


Obr. 6: Odraz světelných paprsků na sférické kapce

2.3.2 Lom světla bez vnitřních odrazů

Přichází-li světelný paprsek do styku s povrchem sférické kapky dochází ke změně jeho trajektorie. Část světelných paprsků se láme, vzhledem k tečně k povrchu kapky v bodě střetu paprsku s povrchem kapky, pod stejným úhlem pod jakým vzhledem k této tečně do kapky „narazil“. Celá situace se dá připodobnit k odrazu od rovinného zrcadla, bylo-li by toto zrcadlo rovinou tečnou k povrchu kapky právě v onom bodě střetu paprsku s kapkou. V tomto případě se paprsek po kapce jakoby sklouzne a směřuje posléze od kapky pryč.

Může však nastat případ, kdy se paprsek láme nikoliv vně ale dovnitř kapky. A právě tento případ je pro účel našeho studia důležitý. Na obrázku 7 je celá situace zakreslena. Dopadající světelný paprsek se v bodě A na povrchu kapky lomí, vstupuje do ní a v bodě B, kde se opět láme, kapku opouští. Úhel, pod kterým paprsek z kapky vystupuje je stejný, jako úhel pod kterým na ni dopadá (v obou případech označen α).



Obr. 7: Dvojnásobný lom světelného paprsku (bez vnitřních odrazů) na kapce

Detailním matematickým rozborem, kterým se zde však nebudeme zabývat, se můžeme dobrat k mezním hodnotám úhlu dopadu paprsku, aby byl lom na povrchu kapky směrem dovnitř realizovatelný. Z limitního zákona

$$\lim_{\alpha \to \pi/2} (\sin \beta)^{-1} = n_r$$

dostáváme za předpokladu, že relativní index lomu pro prostředí voda-vzduch je

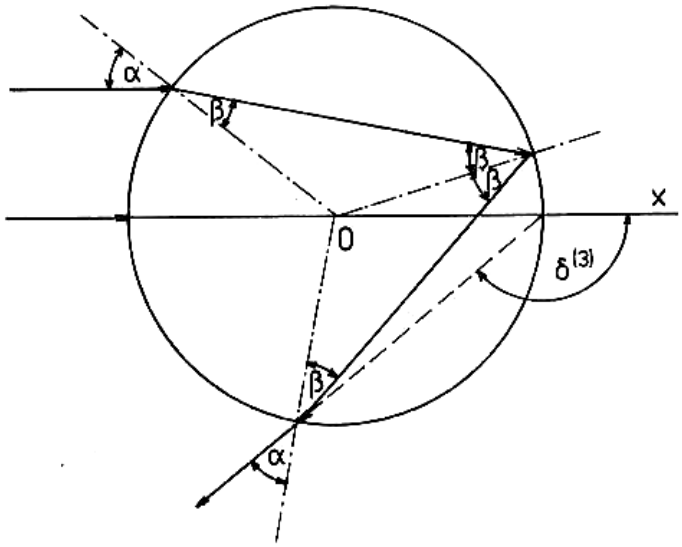
n_r=1,33 , hodnotu úhlu β=48°45′. Z toho vyplývá, že při lomu svazku rovnoběžných paprsků na sférické kapce směřují všechny vystupující paprsky do celého prostoru vyjma nekonečného kužele, který má osu symetrie rovnoběžnou se směrem dopadajících paprsků, kruhový průřez kolmý na osu *x* a vrcholový úhel o velikosti přibližně 165°. Na obrázku 7 je tento kužel znázorněn šikmými čárkovanými čarami, takže doprava od této hranice je prostor, kudy se mohou paprsky vycházející z kapky šířit.

K odrazu světla do směru původních paprsků dochází u sférické částice na jejích konturách znázorněných na obrázku 7 body A resp. A'. Úhel dopadu je v tomto případě roven 90° a vzhledem k faktoru odrazivosti pro tento případ, dochází k odrazu veškerého dopadajícího záření (žádné záření neproniká do kapky). Kvalitativně obdobný závěr platí i pro rovinné vodní plochy, což jen potvrzuje velkou schopnost nerozvlněných vodních ploch odrážet přímé sluneční záření, nalézá-li se Slunce velmi nízko nad obzorem. Naproti tomu při odrazu do směru přesně opačného ke směru dopadajících paprsků, je úhel dopadu roven nule (tj. paprsek dopadá kolmo na rozhraní dvou prostředí – na obr. 7 v bodě A''). Pro rozhranní vzduch-voda při relativním indexu lomu n_r=1,33 se pak odrážejí pouze 2% dopadající energie (ve směru opačném, než směr původní trajektorie paprsku). Podobně vodní plochy při polohách Slunce vysoko nad obzorem silně absorbují dopadající přímé sluneční záření.

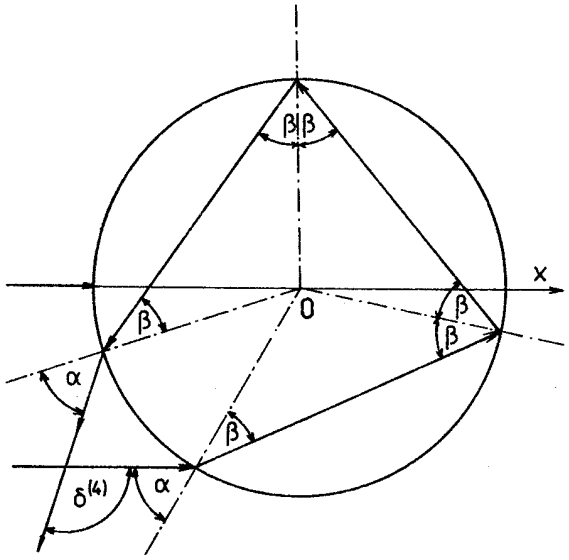
2.3.3 Lom světla s vnitřními odrazy

Třetím zmiňovaným případem, který může nastat při interakci světelného paprsku s vodní kapku, je lom světla spolu s probíhajícím jedním či vícero vnitřních odrazů uvnitř kapky. Skutečnost, že k tomuto jevu dochází, nám dokazují ty nejkrásnější optické jevy jakými jsou duhy.

Na obrázku 8 resp. 9 je schématicky zobrazen průchod světelného paprsku kapkou. V prvém případě (obr. 8) dochází k jednomu, v druhém (obr. 9) pak ke dvěma vnitřním odrazům. Z obrázku je patrné, že úhel, pod nímž paprsek na kapku dopadá (α) je stejný jako úhel pod nímž z kapky vystupuje. Úhel β pak značí úhel lomu.



Obr. 8: Jeden vnitřní odraz světelného paprsku na vodní kapce



Obr. 9: Dva vnitřní odrazy světelného paprsku na vodní kapce

Na základě podrobnějších matematických odvození ze zákonů optiky se lze dobrat k jednoduchému vzorci, který v případě jednoho vnitřního odrazu dává do vzájemné souvislosti úhel α a relativní index lomu n_r na rozhranní dvou opticky různých prostředí:

$$\cos\alpha = \sqrt{\frac{n_r^2 - 1}{3}}$$

odkud pro rozhranní vzduch voda ($n_r=1,33$) vyplývá hodnota pro $\alpha_{min}\cong 59,5°$. Dalšími výpočty, které vycházejí ze zde neuváděných vztahů (nejsou pro účely této práce důležité), lze dospět k hodnotám minimálního úhlu lomu uvnitř kapky $\beta_{min}\cong 40°20'$ a rozptylového úhlu $\delta^{(3)}_{min} \cong 138°$. Důležité je uvědomit si, že ve směrech odpovídajících tomuto rozptylovému úhlu dochází ke koncentraci intenzity světla. Stopa vystupujícího paprsku v prostorovém znázornění potom ve zpětné projekci na zdánlivou nebeskou sféru opíše kružnici, jejíž část je při dostatečné vzdálenosti slunečního disku od zenitu patrná nad obzorem. Protože však index lomu n_r závisí na vlnové délce světla, je pro různé barvy slunečního spektra při stejném úhlu dopadu α o něco odlišný úhel lomu β a tím i úhel minimální odchylky ($\delta^{(3)}_{min}$)(viz obr.13). Zmíněný oblouk pak vnímáme jako spektrum duhy.

Jedním vnitřním odrazem přímých slunečních paprsků na vodních kapkách vzniká duha hlavní (primární), který má vnější (horní) okraj červený a vnitřní (dolní) fialový. Úhlová šířka pásu barev bývá kolem 2° a nejvyšší část duhového oblouku se nalézá v úhlové výšce α^* nad geometrickým obzorem, jež lze získat ze vztahu:

$$\alpha^* = 42^\circ - \alpha_S$$

kde α_S značí úhlovou výšku Slunce nad obzorem. Klesá-li Slunce k obzoru, pak se oblouk duhy stále více vysouvá vzhůru a naopak při výšce Slunce nad obzorem více jak 42° není duha ze země pozorovatelná vůbec.

Dvojnásobným vnitřním odrazem slunečních paprsků na vodních kapkách se vytváří vedlejší (sekundární) duha a pro tento případ platí:

$$\cos\alpha = \sqrt{\frac{n_r^2 - 1}{8}}$$

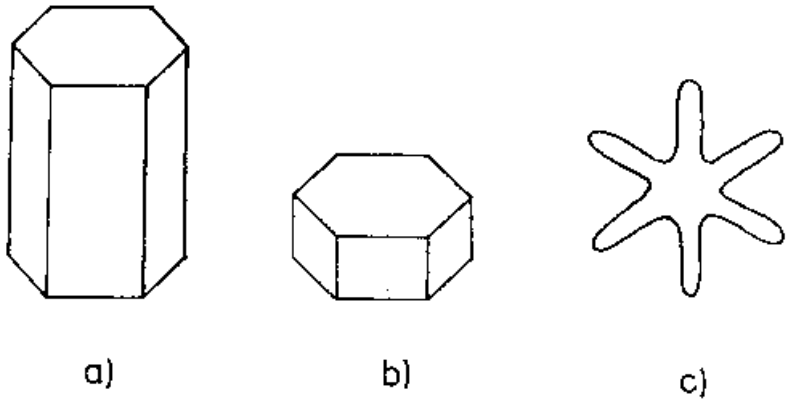
Pro $n_r=1,33$ pak $\alpha_{min}\cong 72°$, $\beta_{min}\cong 45°40'$ a $\delta^{(4)}_{min}\cong 230°$. Protože se zde jedná o sudý počet vnitřních odrazů, svírá vystupující paprsek se směrem dopadajících paprsků úhel doplňkový k $\delta^{(4)}_{min}$ do hodnoty 360°, tj. přibližně 130°, což při zpětné projekci na nebeskou sféru znamená, že vedlejší duha se nalézá asi 8° nad duhou hlavní. Jeden vnitřní odraz, který je u vedlejší duhy navíc ve srovnání s duhou hlavní, se projevuje větší úhlovou šířkou barevného pásu (asi 4°), jeho menší výrazností a převrácením sledu barev (vnější okraj fialový, vnitřní červený).

2.4 Rozptyl světla na ledových krystalcích

Budeme-li v této kapitole hovořit o optických jevech, jejichž podstatou je rozptyl a odraz světla na ledových krystalech, pak máme na mysli souhrnně celou skupinu halových jevů, jejichž jednotlivý zástupci jsou podrobněji popsáni v kapitole 3.5.1.

Podle způsobu vzniku můžeme halové jevy rozdělit na ty, které se vytvářejí pouhým odrazem slunečních paprsků na stěnách ledových krystalků, zatímco do druhé skupiny počítáme úkazy, k jejichž vysvětlení je nezbytné uvažovat lom světla. V prvém případě je halový jev pouze bělavý, ve druhém mívá duhové nebo perleťové zbarvení, přičemž červená barva je vždy na okraji bližším slunečnímu disku.

Připomeňme, že základním tvarem ledových krystalků je pravidelný šestiboký hranolek, který má podobu sloupku, popř. destičky, nebo jsou vyvinuty pouze krystalové osy tvořící ramena pravidelného šestiúhelníku, čímž vzniká tvar hvězdice neboli dendritu (viz obr. 10).

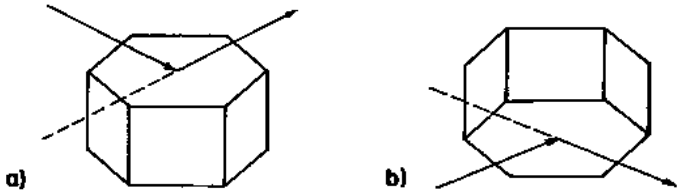


Obr. 10: Základní tvary ledových krystalků. a) sloupek, b) destička, c) dendrit

Odrazem slunečních paprsků na vertikálně orientovaných krystalových stěnách se vytváří **horizontální kruh**.

Šestiboké sloupky ledových krystalků, vyskytujících se v atmosféře, bývají někdy zakončeny jehlanci a odrazem slunečních paprsků na jejich šikmých plochách pak může vznikat halový jev v podobě části kružnice skloněné šikmo k horizontální rovině.

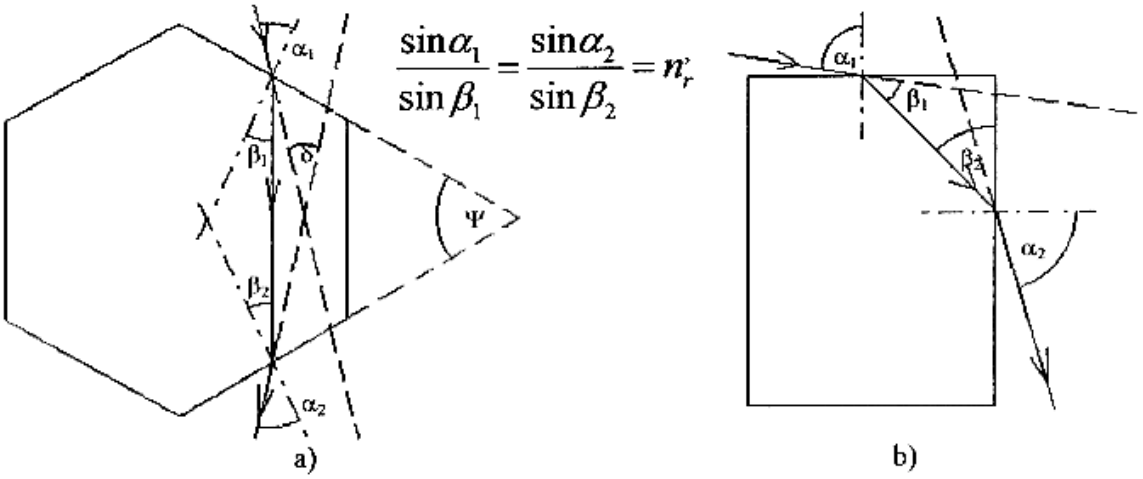
Odrazem paprsků na horizontálně orientovaných krystalových plochách (viz obr. 11) v případech kdy je Slunce nízko nad obzorem, vzniká **halový sloup**. Při stejném odrazu slunečních paprsků, tzn. na horizontálně orientovaných krystalových plochách, vzniká i **spodní slunce**, pozorovatelné z letadel nebo vysoko položených horských míst zrcadlovým odrazem slunečního disku na níže ležící vrstvě ledových oblaků.



Obr. 11: Vznik dolní (a) resp. horní (b) části halového sloupu

Poněkud složitější je výklad těch halových jevů, které předpokládají lom slunečních paprsků, a vyznačují se proto zabarvením získaným v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce světla. Značná rozmanitost úkazů vyplývá především z toho, že dochází k lomu na různých lámavých úhlech, při různé orientaci, popř. pohybech krystalků.

Poměrně jednoduše lze vysvětlit vznik **malého a velkého hala**. Na obr. 12a je znázorněna situace, kdy paprsek vstupuje od šestibokého hranolku ledového krystalu pláštěm kolmo k hlavní krystalové ose a pláštěm opět vystupuje ven, což má za následek vznik malého hala, zatímco při vzniku velkého hala paprsek vstupuje podstavou kolmo k jedné dvojici jejich protilehlých hran a vystupuje pláštěm, jak ukazuje obr. 12b. V obou případech značí α úhel dopadu a β úhel, pod nímž paprsek z krystalu vystupuje. Podle Snelliova zákona pak platí:



Obr. 12a: Lom slunečních paprsků podílejících se na vzniku malého hala
Obr. 12b: Lom slunečních paprsků podílejících se na vzniku velkého hala

kde n_r je relativní index lomu prostředí led-vzduch.

Podrobnějšími matematickými úvahami se více nebudeme zabývat, nicméně je zde nutné zmínit, že na základě dalších výpočtů lze odvodit minimální odchylku světelných paprsků, která činí pro malé halo 22° a velké halo 46°.

Pomocí obr. 12b můžeme ilustrovat i vznik **horního cirkumzenitálního oblouku**. Na rozdíl od velkého hala je v tomto případě nutná vertikální orientace hlavní osy hranolku. Horní cirkumzenitální oblouk lze pozorovat tehdy, jestliže Slunce není výše než 32° nad geometrickým obzorem. Není-li tato podmínka splněna, brání jeho vzniku totální odraz slunečních paprsků uvnitř ledových krystalků. Podobně i **dolní cirkumzenitální oblouk** se může vytvořit, není-li Slunce vzdáleno od zenitu více než 32°.

Příčiny vzniku **vedlejších sluncí malého hala** a jeho **horní i dolní dotykové oblouky** spočívají v lomu paprsků při lámavé úhlu 60°. Vytvoření těchto vedlejších sluncí vyžaduje, aby se šestiboké hranolky vyznačovaly vertikální orientací hlavní osy. Příslušné paprsky se potom po průchodu krystalky a zpětném promítnutí na nebeskou klenbu kupí po obou stranách slunečního disku, čímž vznikají světlé skvrnky vedlejších sluncí. Jestliže se sluneční disk nalézá těsně u ideálního geometrického obzoru, přímé sluneční paprsky procházejí v daném místě atmosférou horizontálně, svírají pravý úhel s hlavní osou vertikálně orientovaných šestibokých hranolků a vedlejší slunce se vzdalují od malého hala tak, že při výšce Slunce 50° nad obzorem je jejich úhlová vzdálenost od středu slunečního disku asi 32°. Naproti tomu horní a dolní dotykový oblouk malého hala vzniká lomem slunečních paprsků na krystalcích, jejichž hlavní osa je orientována horizontálně.

Další halové jevy vyžadují už různé speciální orientace ledových krystalků. **Parryho oblouk** patřící mezi vzácné úkazy vzniká lomem paprsků při lámavém úhlu 60° na šestibokých hranolcích ledových krystalků, jejichž hlavní osa má horizontální polohu a současně jedna dvojice protilehlých stěn pláště leží v přesně horizontálních rovinách. **Lowitzovy oblouky** naproti tomu vyžadují rotační pohyb sloupkovitých krystalků kolem horizontálně orientovaných hlavních os.

V souvislosti s popisem a výkladem hlavních halových jevů jsme uvažovali sluneční paprsky. Stejné úkazy však mohou být za vhodných podmínek pozorovány i v měsíčním světle. Vzhledem k podstatně menší intenzitě svitu Měsíce ve srovnáním se Sluncem jsou často méně výrazné, avšak pozorovatel si jich mnohdy na temné obloze snáze všimne.

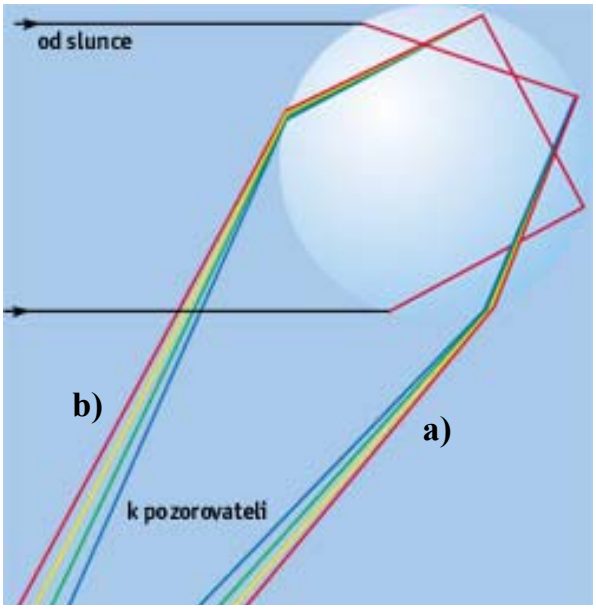
3 FOTOMETEORY

3.1 Duhy

Jedním z nejnápadnějších a zároveň vcelku běžných atmosférických optických jevů jsou **duhy**. Vznikají při průchodu slunečních paprsků vrstvami vzduchu obsahujícími v dostatečném počtu větší vodní kapky, obvykle kapky deště.

Tento jev, jehož vznik byl podrobně rozebrán v kapitole 2.3.3, se vytváří v důsledku vnitřního odrazu světelných paprsků na povrchu kapek. Na obrázku 13 je schématické znázornění průchodu světelného paprsku kapkou v případě, že dochází k jednomu (obr. 13a) resp. dvěma (obr. 13b) vnitřním odrazům.

Obrázek názorně ukazuje také rozklad slunečního světla na spektrum barev duhy. Princip tohoto barevného rozkladu je založen na tom, že vlnění o různých vlnových délkách se lomí na fázovém rozhraní pod různými úhly.



Obr. 13: a) Lom světla s jedním odrazem uvnitř kapky deště při vzniku hlavní duhy
b) Lom světla se dvěma odrazy uvnitř kapky deště při vzniku vedlejší duhy

Jedním vnitřním odrazem přímých slunečních paprsků na vodních kapkách vzniká **duha hlavní** (viz obr. 14) neboli primární, která má vnější (horní) okraj červený a vnitřní (dolní) fialový. Úhlová šířka pásu barev bývá okolo 2° prostorového úhlu. Úhlová vzdálenost primární duhy od protislunečního bodu činí 42°. **Protisluneční bod** je bod na nebeské klenbě, ve kterém by se nacházelo Slunce, kdybychom jej promítli v přímce Slunce – pozorovatel – nebeská klenba. Ve dne se tedy nachází pod obzorem. S klesající výškou Slunce nad obzorem se oblouk duhy stále více vysouvá vzhůru. V okamžiku západu Slunce za vodorovný horizont je protisluneční bod nejvýše a nalézá se na obzoru ve vzdálenosti 180° od Slunce.

Dvojnásobným vnitřním odrazem slunečních paprsků na vodních kapkách se vytváří **duha vedlejší** (viz obr. 14) neboli sekundární. Sled barev je v tomto případě

opačný než je tomu u duhy hlavní. Vedlejší duha se nalézá asi 8° nad duhou hlavní. Jeden vnitřní odraz světla na kapkách navíc se u sekundární duhy projeví tím, že úhlová šířka barevného pásu je větší než u duhy primární a činí asi 4°.

Vzácným optickým úkazem je **duha terciální** nazývaná též **duha kolem Slunce**, kterou vytvářejí paprsky podstupující na vodních kapkách tři vnitřní odrazy. Tuto duhu lze pozorovat asi 43° od Slunečního kotouče na protější straně oblohy, než se nalézá duha primární i sekundární. Do jisté míry může připomínat duhově zabarvené velké halo.

Duhy ještě vyššího řádu vytvářené čtyřmi a více násobnými odrazy paprsků na vodních kapkách jsou natolik slabé a vzácné úkazy, že jejich pozorování je zcela mimořádný případ.

Na vnitřní straně hlavní duhy a na vnější straně duhy vedlejší lze poměrně často pozorovat **podružné duhové oblouky** jevící se jako několikanásobné opakování slabě vyjádřeného spektra barev. Tento jev je založen na interferenci.

Vzhled duhy úzce souvisí s velikosti vodních kapek, na kterých dochází k lomu a odrazu slunečních paprsků. Na základě pozorování byla vypracována přehledná tabulka v níž je stručně charakterizován vzhled duhy v závislosti na velikosti poloměru *r* vodních kapek v milimetrech (viz tabulka 3).

Tabulka 3: Charakteristika vzhledu duhy v závislosti na velikosti kapek deště

r	**Charakteristika vzhledu duhy**
0,5 – 1 mm	Široký fialový pruh, jasně patrná zelená a červená barva, větší počet podružných duhových oblouků v nichž je nejzřetelnější fialová a zelená barva
0,25 mm	Slabší červená barva, menší počet podružných duhových oblouků s převládající fialovou a zelenou barvou
0,1 – 0,15 mm	Poměrně široký pás duhy téměř bez červené barvy, nažloutlé podružné duhové oblouky
0,04 – 0,05 mm	Široký a poměrně bledý pás duhy, nejvýrazněji patrná fialová barva
0,03 mm	Bílý pruh v hlavní duze
< 0,025 mm	Tzv. duha v mlze jevící se pouze jako bílý pruh

Obr. 14: Duha hlavní a vedlejší

3.2 Koróny

Koróna (viz obr. 15) je optický úkaz jevící se jako soustava barevných kroužků kolem zdroje rovnoběžných paprsků (Slunce, Měsíc, popř. velmi jasných hvězd). Sled barev je následující: vnitřní kruh je barvy modrobílé, vnější načervenalý až nahnědlý.

Princip vzniku korón, jehož úplné vysvětlení podal v roce 1852 francouzský fyzik E.Verdet, je podobně jako v případě duh založen na průchodu paprsků soustavou vodních kapiček (kouřmo, mlha či oblaka) s nepříliš rozdílnými velikostmi.

Není-li splněna podmínka přibližně stejné velikosti kapek, je koróna nevýrazná a má podobu světlého, popřípadě až mírně zbarveného kruhového pásu těsně kolem Měsíce. Tato varianta je lidově nazývána **studánka**. Pokud je ale koróna barevná, pak první barevný sled koróny, který se vyznačuje zřetelným vnějším kruhem červenavé až hnědavé barvy (jehož poloměr nebývá větší jak 5°), je nazýván **aureola**. Čím větší jsou kapky zapříčiňující vznik koróny, tím menší aureola je. V tomto faktu spočívá diagnostický význam aureoly pro popis situace, za které koróna vzniká.

Obr 15: Koróna

3.3 Glórie

Glórie (gloriola) je jev obdobný koróně, avšak podstatně slabší intenzity. Glórie představuje opačný sled kroužků barev kolem stínu vrženého postavou nebo předmětem na níže ležící oblačnou vrstvu či mlhu.

Vzniká zpětným rozptylem světla na velmi četných malých vodních kapičkách. Je-li oblak nebo mlha velmi blízko pozorovatele, může se jeho vržený stín zdát vzpřímený a jakoby zvětšený. Takový jev se pak nazývá **Brockenské strašidlo** (Brockenský přízrak)(viz obr. 16), který může, ale též nemusí být ověnčen barevnou glóriolou. Název pochází podle pozorování na horské observatoři na hoře Brocken v pohoří Harz (Německo), kde byl poprvé popsán. Jev podobný Brockenskému strašidlu lze sledovat z paluby letadel letících nízko nad mraky (viz obr. 17). Kolem pohupujícího se stínu letadla se objevuje jasná záře duhových kol.

Díky okolností, za kterých glórie může vznikat, vyskytuje se nejčastěji na horách za mlhavého počasí a za situace, kdy je Slunce nízko nad obzorem.

Obr. 16: Brockenský horský přízrak

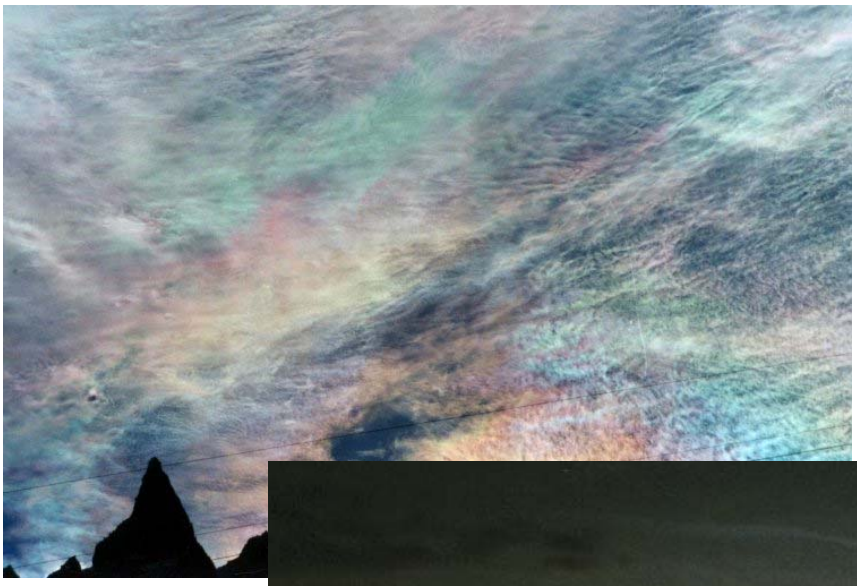
Obr. 17: Koróna kolem stínu letadla

3.4 Irizace oblaků

Ohybem a interferencí slunečních paprsků na vodních kapičkách oblaků vzniká jev nazývaný **irizace** (viz obr. 18). Je to duhové nebo perleťové zbarvení okrajů oblaků s různými barevnými odstíny, mezi nimiž převažuje zelená a růžová. Irizaci lze nejčastěji pozorovat u oblaků druhu Altocumulus a Stratocumulus, popř. u druhu Cumulus.

Zvláštním případem intenzívně irizujících oblaků jsou tzv. **perleťová oblaka** (viz obr. 19) v podobě živě barevných ploch nebo zlatavě zbarvených oblaků ve tvaru pásů nebo protáhlých ploch. Nalézají se ve výškách 20 až 30 km a vyskytují se při polohách Slunce blízko pod obzorem, kdy zemský povrch a nižší vrstvy atmosféry jsou již ve stínu. Nejčastěji bývají pozorovány ve vyšších zeměpisných šířkách, zejména ve Skandinávii.

Ještě zvláštnějším úkazem jsou tzv. **noční svítící oblaky**. Ty se nalézají ve výškách 70 až 80 km a rozptylují sluneční záření, není-li Slunce pod obzorem níže než asi 18°. V letních měsících mohou být v našich zeměpisných šířkách pozorovány ještě kolem půlnoci. O jejich původu existují 2 teorie. Podle prvé z nich se jedná o shluky prašných částic mimozemského původu, druhá počítá s tím, že se skládají z ledových částic, přičemž potřebná voda se v těchto výškách vytvořila fotochemickými reakcemi.



Obr. 18: Irizace oblaků

Obr 19: Perleťová oblaka

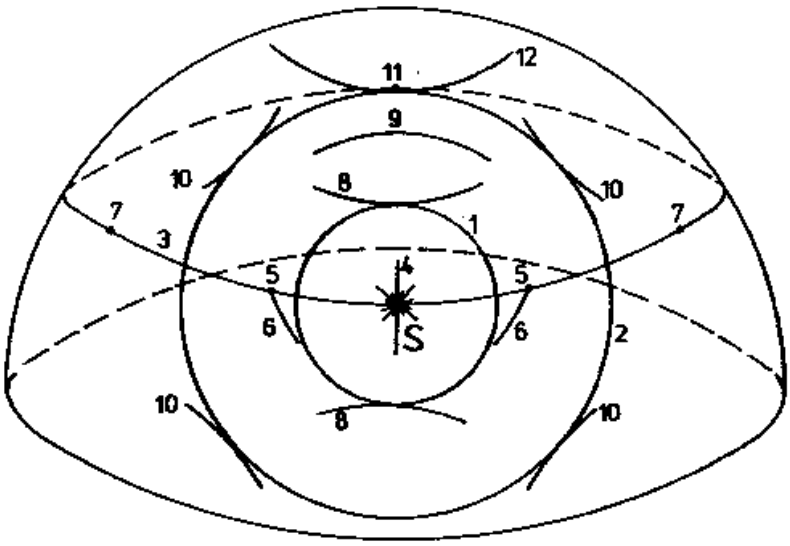
3.5 Halové jevy

Optické úkazy vznikající v důsledku odrazu a lomu slunečního popř. měsíčního světla na ledových krystalcích rozptýlených ve vzduchu nazýváme souhrnně **halovými jevy**.

Obecně se halové jevy pozorují jako světlé, bělavé, slabě duhově nebo mdle perleťově zbarvené pruhy, oblouky či kola při poloze Slunce nejčastěji nízko nad obzorem zejména pak večer. Pro pozorování některého z níže uvedených halových jevů je potřebný výskyt oblačnosti složené výhradně z ledových krystalků, zejména pak oblačnosti druhu Cirrostratus nebo Cirrus popř. jejich „směs“. Někdy se ale mohou některé z nich (malé halo, tečné oblouky, boční slunce) vyskytnout i v případě, kdy jsou v atmosféře přítomny ledové krystalky např. v zimním období při přeháňce sněhových vloček a ledových krystalků nebo při umělém zasněžování sjezdovek, kdy se do vzduchu dostávají drobné ledové krystalky. Ačkoli se v těchto případech nevyskytují tyto, dalo by se říci pseudohalové jevy, na vysoké oblačnosti, jejich podoba i příčiny vzniku jsou stejné.

3.5.1 Přehled nejčastějších halových jevů

Určitý přehled o nejčastějších z halových jevů můžeme získat ze schématického obrázku 20, kde S vyznačuje polohu Slunce na zdánlivé nebeské klenbě a jednotlivé úkazy jsou očíslovány a níže popsány konkrétněji.



Obr. 20: Schéma podob hlavních halových jevů a jejich poloha na obloze

Co se týče četnosti výskytu níže uvedených halových jevů, bylo v Holandsku v letech 1934 – 1956 prováděno G.Dietzem důkladné sledování výskytu halových jevů. Tabulka 4 jeho výsledky shrnuje.

Tabulka 4: Četnost výskytu některých halových jevů

Halový jev	**Průměrný počet dní s výskytem v roce**
Malé halo	209
Vedlejší slunce malého hala	71
Horní nebo dolní dotykový oblouk malého hala	59
Halový sloup	34
Cirkumzenitální oblouk	31
Velké halo	18
Horizontální kruh nebo jeho části	13
Lowitzovy oblouky	3
Dotykové oblouky velkého hala	1
Vedlejší slunce 120°	1
Protislunce	1

3.5.1.1 Malé halo

Malé halo (viz obr. 20 add 1) patří mezi nejběžněji se vyskytující halové jevy. Jeví se jako bělavá nebo duhově zabarvená úplná nebo též neúplná kružnice v podobě kruhového oblouku ve vzdálenosti 22° od slunečního disku. Vnitřní okraj mívá načervenalé zabarvení, vnější pak slabě zřetelné fialové.

3.5.1.2 Velké halo

Velké halo (viz obr. 20 add 2) je slabý světelný kruh (opět může být i neúplný) kolem Slunce nebo Měsíce ve vzdálenosti 46° od středu disku. Vyskytuje se přibližně 3x méně často než malé halo, vzhledem k němuž je také méně jasné.

3.5.1.3 Horizontální kruh

Horizontální kruh (viz obr. 20 add 3) je kružnice vedená po nebeské klenbě rovnoběžně s ideálním geometrickým obzorem ve stejné úhlové výšce nad obzorem, jako se právě nalézá Slunce. Jeho části mohou opět být opticky patrné jako části bělavého pruhu.

3.5.1.4 Halový sloup

Halový sloup (viz obr. 20 add 4) také patří mezi poměrně časté halové jevy. Prochází vertikálně Sluncem (popř. pouze jeho horní nebo dolní část) a v případě, že spolu s ním je opticky patrná i ke Slunci bezprostředně přiléhající část horizontálního kruhu, vzniká mnohem vzácnější **halový kříž**.

3.5.1.5 Vedlejší slunce malého hala

Vedlejší (boční) slunce malého hala (viz obr. 20 add 5) jsou dobře znatelná zjasnění v úhlové vzdálenosti nejčastěji okolo 22° vpravo nebo vlevo od slunečního disku a nacházející se ve stejné výši nad obzorem, kde se právě nalézá Slunce. Vedlejší slunce se mohou jevit jako žlutavé či mdle zbarvené jasné plošky většinou však ale s duhovým zabarvením s vnitřní stranou (strana blíže k Slunci) načervenalou. Velmi zřídka se mohou vyskytnout i tak jasná vedlejší slunce, která díky své jasnosti mohou být na první pohled zaměňována se skutečným Sluncem, které je v daný okamžik zahaleno hustšími částmi cirrostratovité oblačnosti. Tento případ byl pozorován v Praze 25. června 1998 okolo 17 hodiny. Nutno však poznamenat, že tyto jevy vzhledem k neustálým změnám v oblačnosti i atmosféře jsou pozorovatelné maximálně pár minut, většinou však jen desítek sekund. Vedlejším sluncím se odborně též říká **parhelia**.

3.5.1.6 Lowitzovy oblouky

Lowitzovy oblouky (viz obr. 20 add 6) se vyskytují velmi zřídka. Směřují od parhelií šikmo dolů k malému halu. Vzhledem ke Slunci mají vypuklý tvar s načervenalým vnitřním okrajem. Nesou jméno po ruském přírodovědci J.T.Lowitzovi, který je v roce 1794 poprvé popsal.

3.5.1.7 Paranthelia

Paranthelia (viz obr. 20 add 7) jsou vedlejší slunce nacházející se na horizontálním kruhu v úhlové vzdálenosti 120° od středu slunečního disku. Jejich pozorování na obloze patří mezi nejvzácnější úkazy.

3.5.1.8 Dotykové oblouky malého hala

Dotykové oblouky malého hala (viz obr. 20 add 8) lze někdy pozorovat u horní a vzácněji i dolní části malého hala v podobě světlých oblouků či pruhů.

3.5.1.9 Parryho oblouk

Parryho oblouk (viz obr. 20 add 9) se vyskytuje velmi vzácně. Nalézá se poněkud výše nad malým halem.

3.5.1.10 Dotykové oblouky velkého hala

Také u velkého hala se mohou vzácně vyskytovat dotykové oblouky (viz obr. 20 add 10), avšak nikoliv v polohách jako je tomu u malého hala. Spodní dotykové oblouky bývají v našich zeměpisných šířkách obvykle pod obzorem, takže nejsou pozorovatelné.

3.5.1.11 Protislunce

Protislunce (viz obr. 20 add 11) je vzácným případem výskytu vedlejšího slunce ve vzdálenosti 180° od Slunce. Nachází se přímo proti slunečnímu disku na opačné straně oblohy, než kde se nachází pravé Slunce, tedy ve stejné výšce nad obzorem. (Poznámka: Nepleťme si tento bod s bodem protislunečním (viz kap. 2.3.1)).

Protislunci se též odborně říká **antihelium**.

3.5.1.12 Horní cirkumzenitální oblouk

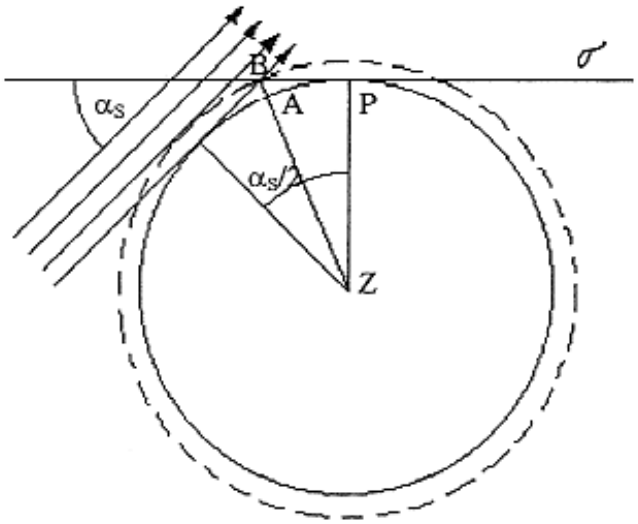
Horní cirkumzenitální oblouk (viz obr. 20 add 12) je vzácným případem halového jevu. Dotýká se velkého hala v jeho nejvyšším bodě a tvoří součást pomyslné kružnice se středem v zenitu. Z tohoto oblouku bývá jako světlý, často na dolním okraji do červena zabarvený pruh patrná zejména část bezprostředně přiléhající k velkému halu.

Obr. 21: Celá plejáda halových jevů pozorovaných v Antarktidě na vysoko zvířených ledových krystalcích (popisky číselného označení viz výše)

3.6 Soumrakové jevy

Po západu Slunce nebo před jeho východem je část oblohy osvětlována rozptýleným slunečním světlem, pokud tomu ovšem nebrání úplné pokrytí oblohy hustými oblaky. Při tom lze pozorovat některé optické úkazy, na jejichž vzniku se společně podílejí lom, rozptyl a absorpce slunečních paprsků v atmosféře.

Na obrázku 22 vidíme znázorněnou situaci, kdy se Slunce S nalézá pod obzorem v úhlové hloubce α_S, plná kružnice představuje povrch zemského tělesa, zatímco čárkovaná kružnice značí horní hranici té části atmosféry, která účinně rozptyluje sluneční záření a rovina σ je rovinou ideálního obzoru pozorovatele P. Zmíněný obrázek zachycuje mezní situaci v okamžiku konce večerního a začátku ranního astronomického soumraku. Jestliže by bylo Slunce v menší úhlové hloubce pod obzorem, potom by svazek vyznačených paprsků pronikal do těch oblastí atmosféry, kde dochází sice k rozptylu světla, ale které se nalézají nad rovinou obzoru σ. Naopak při větším úhlu α_S by pozorovatel P neviděl žádný úsek oblohy osvětlený rozptýleným slunečním zářením.



Obr. 22: Obrázek k výkladu soumraku

Zakreslená mezní situace nastává, jestliže se mezní úhel α_S rovná přibližně 18° a z této skutečnosti, spolehlivě ověřené mnoha pozorováními, lze snadno určit tloušťku té části atmosféry, která rozptyluje světlo. Z obrázku 22 je patrno, že velikost této tloušťky udává úsečka AB = h, a označíme-li ZP = r_Z velikost středního poloměru Země, dostaneme řešením elementární trigonometrické úlohy vztah:

$$h = r_Z \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_S}{2}\right)} - 1 \right]$$

který po dosazení $r_Z = 6378$ km a $\alpha_S = 18°$ poskytne výsledek h = 80 km. Řešením naší úlohy jsme dospěli k závěru, že zemská atmosféra účinně rozptyluje sluneční záření až do výšek kolem 80 kilometrů.

Uvědomíme-li si, že v době letního slunovratu klesá Slunce na naší zeměpisné šířce pouze asi 16,5° pod obzor, potom je zřejmé, že v této části roku (po dobu asi tří týdnů) trvá u nás **astronomický soumrak** celou noc, tj. nedochází k úplnému setmění.

Od astronomického soumraku se odlišuje tzv. **občanský soumrak**, za nějž se považuje doba po západu (popř. před východem) Slunce, pokud světelné poměry umožňují četbu běžného tisku. Při bezoblačné obloze bývá tato podmínka splněna, není-li Slunce více než 6 až 8° pod obzorem.

V době soumraku lze pozorovat tzv. soumrakové jevy, z nichž k nejznámějším patří **červánky**. Zvláště intenzívní červánky bývají pozorovány v případech nadměrného zakalení atmosféry aerosolovými částicemi, například po sopečných výbuších, velkých prachových bouřích a také při značném obsahu vodního aerosolu v atmosféře (kouřmo).

Jestliže se Slunce večer postupně blíží k obzoru, dostává načervenalé zabarvení a jeho tvar se stává vertikálně poněkud zploštělý a celkově zdánlivě mírně zvětšený. Nejvíce červená je dolní část slunečního disku, směrem nahoru na něm převládá žlutá barva a ve vzácných případech může horní okraj disku mít i zelený nádech. Souhrnně se tato barevná škála nazývá **soumrakovými barvami**.

Soumrakové barvy se považují za fotometeory pozorované při východu a západu Slunce. Tvoří se lomem, rozptylem a selektivní absorpcí slunečního záření při průchodu atmosférou, jak již bylo výše popisováno. O nejčastějších formách soumrakových jevů je pojednáno níže.

3.6.1 Fialová záře

Fialová záře je záře pozorovaná na bezoblačné obloze ve tvaru výseče velkého světelného kruhu. Šíří se vzhůru od obzoru, za nímž se nalézá Slunce. Její intenzita i velikost se zvětšují až do polohy Slunce 3° až 4° pod obzorem, mizí při poloze Slunce 6° pod obzorem. Celý jev trvá asi 20 až 30 minut a jeho intenzita vzrůstá s průzračností vzduchu a s nadmořskou výškou místa pozorování.

3.6.2 Zelený paprsek

Zelený paprsek je převážně zelené krátkodobé zabarvení oblohy, často jen záblesk, vycházející zdánlivě z vrchního okraje slunečního nebo měsíčního kotouče při jejich východu nebo západu. Je pozorovatelný pouze tehdy, je-li obzor zřetelně viditelný, tj. bez výskytu zákalu nebo kouřma. Vysvětluje se lomem a rozptylem světla blízko obzoru, a to nejčastěji nad rovnou mořskou hladinou nebo při pozorování na horách nad rovnou horní hranicí nízkých vrstevnatých oblaků. Ve zvlášť průzračném vzduchu může být tento paprsek až namodralý.

3.6.3 Ostatní soumrakové jevy

Mezi další soumrakové jevy patří např. i **soumrakový oblouk**, což je vlastně stín Země pozorovatelný na protější straně, než kde se nachází Slunce. Má tvar kruhové úseče a má tmavomodrou barvu, často s fialovým nádechem.

Podobným jevem jsou i **krepuskulární (soumrakové) paprsky**, které mají podobu temných pruhů ve směru slunečních paprsků. V podstatě jsou to stíny oblaků, promítající se na pevné nebo kapalné částice, vznášející se v atmosféře.

3.6.4 Zdánlivé zvětšení slunečního nebo měsíčního disku

Ačkoliv zdánlivé zvětšení slunečního nebo měsíčního disku nepatří mezi soumrakové jevy, pojednáme o nich zde už jen z toho důvodu, že jsou se západem či východem Slunce či Měsíce spojeny.

Princip zdánlivého zvětšení slunečního nebo měsíčního disku jednoduše vysvětluje už obr. 5 (viz strana 8). Vznik tohoto jevu je založen na lomu světelných paprsků při průchodu atmosférou, kdy se Slunce nebo Měsíc nacházejí poblíž obzoru. Lom paprsků je vysvětlen v úvodních partiích této práce, takže se již nebudeme jeho výkladem dále zabývat.

Jednoduchá geometrie nám ozřejmí, jak k tomuto jevu dochází. Obrázek nepotřebuje většího výkladu. Pozorovatel vnímá sluneční nebo měsíční disk jednak mírně zvětšený a jednak také o něco výše (bod B‘), než kde se ve skutečnosti nachází (bod B). Průměr zdánlivě zvětšeného kotouče je vyjádřen písmenem ***d’***. Tečna k místu pozorovatele vyjadřuje ideální horizont.

Při východu či západu Slunce či Měsíce dochází občas také k zčervenání jejich kotoučů. Příčinou tohoto jevu je opět kromě lomu a rozptylu světla také absorpce, jak již bylo výše uvedeno. Absorpce je způsobena zejména aerosolem přítomným v atmosféře, zvláště kouřmem nebo zákalem. Voda, jak je známo, účinně pohlcuje ultrafialové záření, tedy záření o krátkých vlnových délkách a tudíž také částečně i fialovou složku viditelného světla. Čím více je voda ve formě jemného aerosolu v atmosféře přítomna, tím více je fialová složka slunečního světla odfiltrována a tím více vynikne barva červená.

Ke zvýraznění celého jevu účinně přispívá také poloha slunečního nebo měsíčního disku na obloze. Z obrázku 5 je patrné, že čím blíže obzoru Slunce nebo Měsíc jsou, tím širší vrstvou znečištěné atmosféry musí jejich světlo procházet a tím červenější nádech získávají.

4 OSTATNÍ OPTICKÉ ÚKAZY

V atmosféře lze pozorovat optické úkazy, z nichž některé nejsou zahrnovány do skupiny fotometeorů. Mezi neznámější a nejhojněji se vyskytující patří zástupci elektrometeorů jakými jsou **blesky** či **Eliášův oheň**. Dalšími optickými úkazy, které vznikají v atmosféře a které zde můžeme pozorovat jsou **polární záře**, **Bishopův kruh**, **Tyndallův jev** a **meteory**.

4.1 Blesky

Blesky jsou výboje atmosférické elektřiny vznikající při bouřkách, jež spolu s hřměním provázejí. Bouřky rozlišujeme podle vzniku na bouřky frontální a místní – vznikající tzv. z tepla. Hlavním stavebním kamenem bouřky je mohutný oblak druhu Cumulonimbus.

Výboje atmosférické elektřiny mohou probíhat uvnitř bouřkových oblaků nebo mezi jednotlivými oblaky navzájem, anebo mezi oblakem a zemí, která plní formu kladně nabitého kondenzátoru. Ve všech třech případech dochází k výboji mezi různě nabitými oblastmi formou rychle probíhajícího blesku.

Blesky podle vzhledu dělíme na:

4.1.1 Čárový blesk

Je to nejčastější forma blesku. Má tvar lomené nebo klikaté, jasně svítící jediné čáry, která je dráhou elektronů pohybujících se rychlostí blížící se rychlosti desetiny rychlosti světla, tedy 3.10^4 km/s. Záblesk výboje trvá řádově tisíciny sekundy.

4.1.2 Rozvětvený blesk

Připomíná kořenový systém stromu s hlavní větví a postranními větvemi (viz obr. 23). Právě ve větvení proudového kanálu je spatřována nebezpečnost tohoto blesku, neboť má větší pustošící schopnost než blesk čárový.

4.1.3 Kulový blesk

Je zvláštní a dodnes ne zcela prozkoumanou formou blesku. Svou podobou připomíná kulatý svítící míček o průměru 3 až 20 cm. Vzniká zpravidla při silných bouřích, po četných výbojích běžných blesků, za deště, ale i při obloze bez mráčku. Doba jeho trvání je od několika sekund až do minuty. Rychlost jeho pohybu je nepatrná, několik sekund může setrvat i na místě. Nesvítí jasně, přibližně jako menší elektrická žárovka, barva je od nejasně červené přes oranžovou až po bílou. Někdy jiskří a točí se.

Podle teorie akademika P.L.Kapicy, která je dodnes považována za velmi blízkou skutečnosti, je kulový blesk shluk plasmy, tj. ionizovaného plynu, složeného ze směsi

iontů vzduchu a molekul vody vytvářejících složité komplexy, tzv. klastery. Avšak v posledních letech se objevují nové pohledy na fenomén kulového blesku a Kapicova teorie je stále více napadána. S velmi zajímavou teorií přišli novozélandští vědci J.Abrahamson a J.Dinniss, kteří podstatu existence kulového blesku spatřují v chemické reakci chomáčku hořících křemíkových par, jež se utvořily redukcí křemíku z křemičitanů nalézajících se na zemském povrchu v místě, kde udeřil klasický blesk.

4.1.4 Plošný blesk

Plošný blesk, lidově nazývaný blýskavice, je bezhlučný bělavý záblesk části bouřkového oblaku, trvající zlomek sekundy.

Obr. 23: Rozvětvený blesk

4.2 Eliášův oheň

Při bouřkách může na hrotech a vyvýšených kovových předmětech docházet k naakumulování náboje a k výbojům atmosférické elektřiny. Silné hrotové výboje jsou provázeny i zvukovými efekty (praskáním) a někdy dobře patrnými zrakovými vjemy spočívajícími v jiskření a sršení. Tento úkaz je označován též jako **oheň svatého Eliáše** či **Eliášovo světlo**.

Už od historie provází Eliášův oheň především námořníky, neboť byl pozorován za silných mořských bouřích na vrcholcích lodních stěžňů. Výskyt Eliášova ohně popisuje řada historických análů – například se o nich můžeme dočíst v Kolumbových lodních denících nebo ze zpráv o Cézarových vojenských nájezdech z dob starého Říma.

Intenzita hrotových výbojů a výraznost právě zmíněných doprovodných jevů je úměrná rozdílu elektrického potenciálu mezi uzemněným bodovým vodičem a okolním vzduchem, což je totéž jako potenciální rozdíl mezi zemským povrchem a hladinou ovzduší, kde se daný bodový vodič nalézá. Intenzita hrotových výbojů se také poněkud zvětšuje s rostoucí rychlostí větru.

4.3 Polární záře

Z hlediska vzhledu mají **polární záře** (viz obr. 24) buď paprsčitou nebo nepaprsčitou strukturu. V prvém případě jde zpravidla o rychle se pohybující světelné jevy ve tvaru barevných paprsků, závěsů, drapérií apod. Druhý typ bývá pozorován v podobě nepohyblivých nebo jen málo pohyblivých oblouků, popř. pouze difúzního světla.

Polární záře se nejčastěji vyskytují v oblastech kolem zemských magnetických pólů, největší četnost jejich výskytu bývá přibližně podél kružnice vedené po zemském glóbu v úhlové vzdálenosti cca 20 – 25° od zmíněných pólů. Zde bývá tento úkaz pozorován i více než stokrát ročně. Polární záře se vytvářejí interakcí elektricky nabitých částic s molekulami silně zředěného vzduchu, tedy ve výškách od 80 do 1000 km nad zemským povrchem.

V důsledku sluneční aktivity proniká do oblasti planety Země tok elektricky nabitých částic vyvrhovaných Sluncem, které po zachycení zemským magnetickým polem začnou v souladu se zákony magnetohydrodynamiky vykonávat spirálovitý pohyb podél jednotlivých siločar vycházejících ze zemských magnetických pólů. Zmíněný spirálovitý pohyb se po přiblížení na určitou vzdálenost k zemskému magnetickému pólu zastavuje a daná částice se začne obdobným způsobem pohybovat nazpět do oblasti protilehlého magnetického pólu, kde se celý děj opakuje. Takto se elektricky nabité částice dostávají v okolí zemských pólů do hladin, kde dochází k interakcím mezi nimi a molekulami zředěného vzduchu. V důsledku těchto srážek jsou molekuly a atomy vzduchu při změnách svých kvantových stavů excitovány a emitují pak záření odpovídající příslušným spektrálním čárám.

Intenzita a výskyt polárních září silně závisí na sluneční činnosti a v obdobích jejího značného zesílení můžeme tento jev vzácně pozorovat i v našich zeměpisných šířkách, jako tomu bylo na počátku dubna 2000, nebo v říjnu a listopadu 2003.

Obr. 24: Polární záře

4.4 Tyndallův jev

Tyndallův jev je založen na difúzním rozptylu světla procházejícím opticky heterogenní soustavou, projevující se tím, že dráha paprsku procházejícího dispersí pozorovaná kolmo k jeho směru, je viditelná. Z bílého světla se rozptylují nejvíce záření o kratší vlnových délkách a rozptýlené světlo pak nese modrobílý nádech.

4.5 Bishopův kruh

Bishopův kruh je zvláštní a ojedinělým optickým jevem. Lze jej pozorovat za jasné oblohy jako červenohnědý prstenec kolem Slunce, jehož vnitřní okraj má rozměry kolem 10° a vnější kolem 20°. Při snižování výšky Slunce nad obzorem se oba poloměry zvětšují. Vzniká ohybem světla na pevných částicích, obvykle vulkanického původu.

Úkaz je nazván podle S. Bishopa, který jej poprvé pozoroval a popsal 5. září 1883 v Honolulu po výbuchu sopky Krakatoa.

4.6 Meteory

Meteor je optický úkaz pozorovaný na temné obloze v podobě na okamžik zazářicí jasné světelné úsečky. Jeho příčinou je malé tělísko o velikosti obvykle řádu mikrometrů až milimetrů obíhající po eliptické dráze kolem Slunce rychlostí v řádech kilometrů za sekundu. Dojde-li k náhodnému setkání tělíska se Zemí, vniká toto tělísko do našeho ovzduší a svým průletem atmosférou se silně zahřívá a budí okolní částice vzduchu k záření. Při průletu atmosférou dochází na straně tělíska k roztavování povrchových vrstev popř. i celého tělesa vlivem tření tělíska o molekuly vzduchu.

Během noci lze napozorovat několik **náhodných meteorů**, avšak v určitých časových obdobích během roku se setkáváme s pravidelnými **meteorickými roji**. Nejznámějšími jsou **Perseidy**, které pozorujeme v nocích mezi 10. a 14. srpnem. Někdy můžeme napozorovat i více než 100 meteorů za hodinu. Mnoho meteorických rojů vzniká oddělováním částic z určité komety. Meteorické roje jsou pojmenovány podle souhvězdí, ze kterého zdánlivě vyletují a zdánlivý bod na nebeské klenbě, odkud se pozorovateli jeví, že odtud meteory vyletují, se nazývá **radiant**.

Tělesa jejichž průlet atmosférou pozorujeme jako meteory nikdy nedosahují zemského povrchu, neboť se v zlomcích sekundy vypaří do atmosféry. Ty, která při průletu atmosférou dosahují jasu většího nebo srovnatelného s planetou Venuší (asi -4 magnitudy), nazýváme **bolidy**. Největší z nich o velikosti v řádech centimetrů a větší, však již mohou ve vzácných případech zemského povrchu dosahovat.

Seznam použité literatury

[1] Astapenko P.D., Kopáček J.: Jaké bude počasí ?, Lidové nakladatelství Praha, *1987*

[2] Bednář J. a kol.: Meteorologický slovník výkladový a terminologický, Academia Praha, *1993*

[3] Bednář J.: Pozoruhodné jevy v atmosféře, Academia Praha, *1989*

[4] Čerman R.: Rekordy-neživá příroda, Mapa Slovakia, Bratislava, *1999*

[5] Kobzová E.: Počasí, Rubico Olomouc, *1998*

[6] Munzar J.: Malý průvodce meteorologií, Mladá fronta Praha, *1989*

© RNDr. Petr Skřehot, 2004

Ilustrace převzaty z publikací:

Jaké bude počasí? (obr. 1), Pozoruhodné jevy v atmosféře (obr. 2- 4, 6-12, 20, 22)

Vydala: © Meteorologická Operativní Rada (M.O.R.),
sekce odborných studií a popularizace meteorologie (SOSPM), Praha, 2004