

Optické jevy v zemské atmosféře

V nejrůznějších sděleních mnoha fantastů se vyskytují zmínky či většinou neurčité popisy zjevů, které lze zpravidla vysvětlit zcela racionálně jako známé jevy optiky atmosféry. Proto jsme do sborníku zahrnuli pojednání obsahující stručnou charakteristiku hlavních optických jevů pozorovaných v zemské atmosféře. Samozřejmě to však neznamená, že bychom odmítali mnohé případy krásných básnických a dalších literárních reflexí optických úkazů v atmosféře, které se vyskytují ve světové literatuře.

Optické jevy v zemské atmosféře bezesporu patří k nejpůsobivějším přírodním úkazům. Již od pradávna upoutávaly pozornost člověka, což se projevuje v řadě bájí, mýtů a mnoha dalších slovesných a literárních památkách. V historii fyziky sehrály roli významného impulsu k rozvoji bádání na poli optiky, vlnové fyziky obecně apod. V současné době představují mj. překrásný didaktický materiál k názorným demonstracím a výkladům prakticky celé klasické geometrické a vlnové optiky.

Z metodického hlediska lze jevy atmosférické optiky rozdělit podle povahy jejich vzniku následujícím způsobem:

1. Jevy vzniklé odrazem a lomem světelných (zpravidla slunečních) paprsků na nehomogenitách v poli hustoty vzduchu.
 - a) refrakce světelných (obecně elektromagnetických) paprsků v atmosféře;
 - b) astronomická (zemská, boční) refrakce;
 - c) deformace slunečního disku v blízkosti obzoru;
 - d) zelený záblesk, laminace slunečního disku;
 - e) svrchní neboli horní zrcadlení;
 - f) spodní neboli dolní zrcadlení;
 - g) zvednutí obzoru;
 - h) snížení obzoru;
 - i) mihotání hvězd.
2. Jevy vznikající rozptylem světelných paprsků na molekulách plynných složek vzduchu.
 - a) modrá barva oblohy;
 - b) bílá barva sluncem ozářených oblaků.
3. Jevy vznikající lomem, vnitřními odrazy, event. ohybem světelných paprsků na vodních kapičkách.
 - a) duhy;

- b) koróny;
- c) glórie.

4. Jevy vytvářené odrazem, lomem, popř. vnitřními odrazy světelných (slunečních, měsíčních) paprsků na ledových krystalcích.
Halové jevy (např. malé a velké halo, boční a vedlejší slunce, spodní slunce, různé světelné pruhy, oblouky atd.).

Ad 1a) Refrakce světelných paprsků v atmosféře

Absolutní index lomu n pro elektricky nevodivá prostředí je dán vztahem

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad ,$$

kde ϵ_r je relativní elektrická permitivita a μ_r relativní magnetická permeabilita. Elektrická vodivost vzduchu v troposféře a stratosféře je natolik malá, že tento vztah zde můžeme pro elektromagnetické paprsky plně aplikovat a navíc, vzhledem k tomu, že pro vzduch je μ_r prakticky rovno jedné, zjednodušíme do tvaru

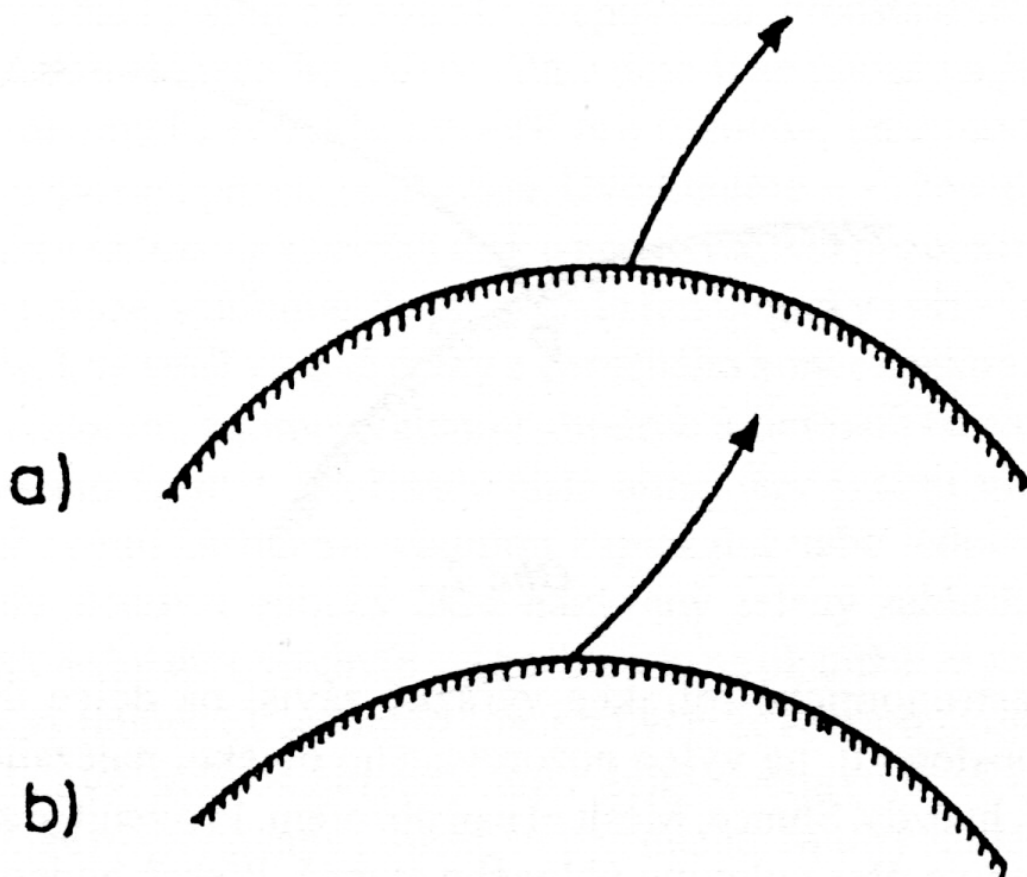
$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad .$$

V oboru viditelného elektromagnetického záření lze využít též vztahu

$$\frac{n-1}{n_o-1} = \frac{\rho}{\rho_o} \quad ,$$

v němž ρ značí hustotu vzduchu, jíž odpovídá index lomu n , a n_o je index lomu při konvenčně stanovené počáteční (standardní, normální) hustotě vzduchu ρ_o . Za ρ_o obvykle volíme hustotu suchého vzduchu při tlaku 1000 hPa a teplotě 0 °C.

Z naposled uvedeného vztahu vyplývá, že index lomu, tj. optická hustota prostředí, roste se zvětšující se hustotou vzduchu. Za běžného stavu v atmosféře, kdy hustota vzduchu klesá s výškou, se tedy paprsek vyslaný ze zemského povrchu šikmo vzhůru láme od kolmice (viz obr. 1a), tj. je zakřiven ve směru odpovídajícím zakřivení zemského povrchu. Paprsek šířící se atmosférou šikmo dolů je zakřiven ve stejném směru, tj. láme se ke kolmici.



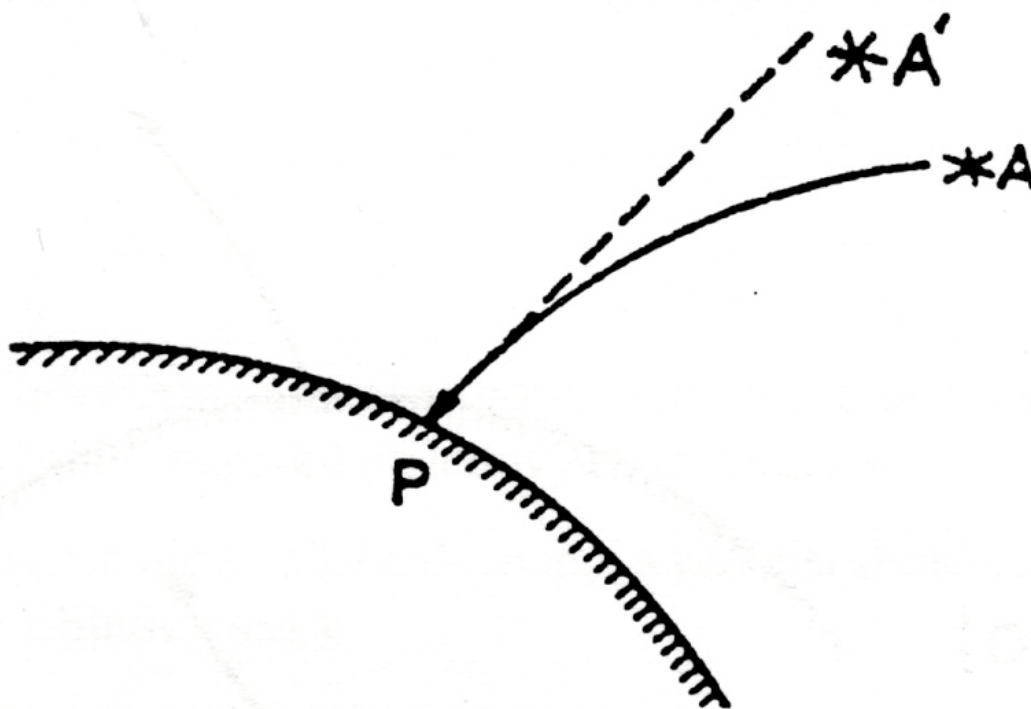
Obr. 1

V atmosféře, a to v relativně tenké vzduchové vrstvě nad zemským povrchem silně ohřátým slunečním zářením, však může vzniknout anomální situace, kdy hustota vzduchu s výškou roste. Tento případ vzniká tehdy, jestliže teplota vzduchu klesá s výškou rychleji než o $0,00342 \text{ K/m}$, což je velmi silně instabilní stav. Potom nastávají z hlediska lomu světelných paprsků případy, kdy paprsek šířící se ovzduším šikmo vzhůru se láme ke kolmici (viz obr. 1b) a paprsek postupující šikmo shora dolů od kolmice. Zakřivení paprsků má potom opačný smysl vzhledem k zakřivení zemského povrchu.

Ad 1b) Astronomická (zemská, boční) refrakce

Astronomickou refrakcí nazýváme celkové stočení trajektorie světelného paprsku způsobené jeho lomem od vstupu shora do zemské atmosféry až po úroveň zemského povrchu. Pozorovatel nalézající se na zemském povrchu v bodě P (viz obr. 2) nechť 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 k zakřivenému paprsku v bodě, kde tento paprsek vstupuje do jeho oka, tj. na obr. 2 ve směru od bodu P do bodu A' .



Obr. 2

Velikost astronomické refrakce výrazně závisí na délce dráhy paprsku v zemské atmosféře, tj. na výšce pozorovaného objektu nalézajícího se mimo ovzduší (např. hvězdy, Slunce, Měsíce) nad obzorem. Pro zenit je zřejmě nulová, u obzoru dosahuje přes polovinu úhlového stupně. Přesná hodnota však závisí i na konkrétním prostorovém rozložení hustoty vzduchu v daném případě.

Analogickým jevem je tzv. zemská refrakce definovaná inverzně jako úhel stočení trajektorie paprsku vycházejícího ze zemského povrchu a procházejícího atmosférou šikmo vzhůru do kosmického prostoru.

Obdobným úkazem, avšak v podstatně menším prostorovém měřítku, je tzv. boční refrakce působená lomem přibližně horizontálních světelných paprsků na nehomogenitách hustoty vzduchu, vznikajících nejčastěji následkem intenzivního nerovnoměrného zahřívání zemského povrchu slunečním zářením během denních hodin. Tento jev působí např. obtíže při geodetických pracích v terénu.

Ad 1c) Deformace slunečního disku v blízkosti obzoru

Ze skutečnosti (viz 1b), že astronomická refrakce je pro dolní okraj slunečního disku poněkud větší než pro okraj horní, vyplývá, že sluneční disk se jeví při své poloze těsně u obzoru poněkud zploštělý. Ve skutečnosti však bývá situace složitější, a to zejména v případě východu Slunce, neboť v ranních hodinách je průběh teploty vzduchu s výškou v blízkosti zemského povrchu obvykle komplikovaný s tendencí k vytváření přízemních inverzí teploty. V důsledku toho je složitý i vertikální gradient hustoty vzduchu a sluneční paprsky procházející relativně velmi dlouhou dráhu v přízemních vrstvách ovzduší vytvářejí svým lomem vzhled slunečního disku spíše v podobě připomínající mnohoúhelník (tzv. pyramidální slunce). O barevných efektech při poloze Slunce u obzoru viz 1d).

Ad 1d) Zelený záblesk, laminace slunečního disku

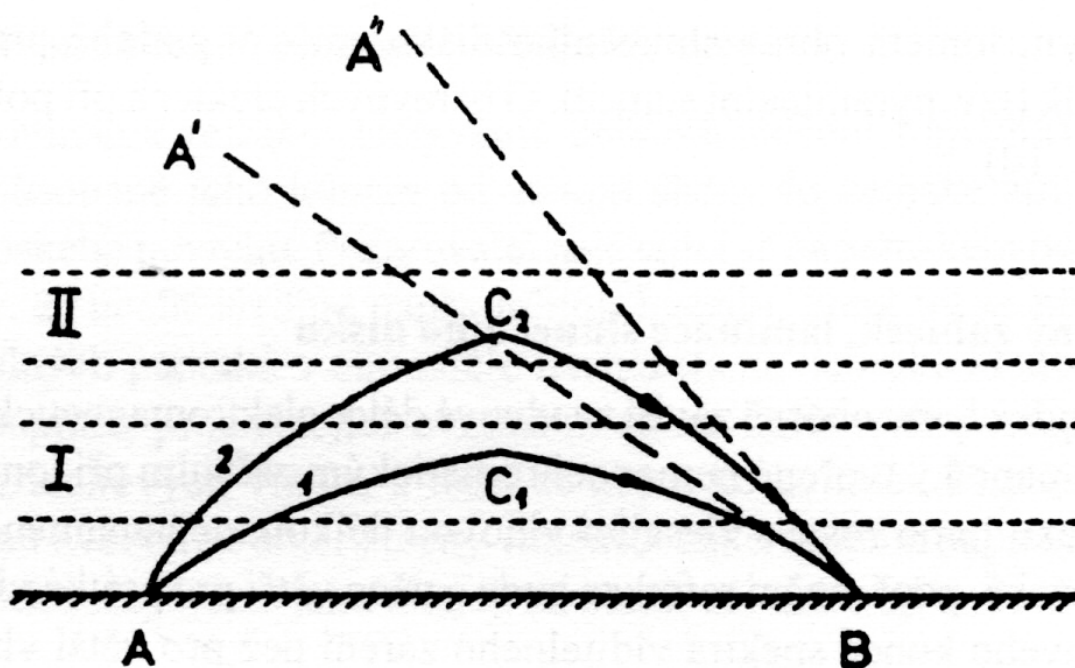
Protože index lomu obecně závisí na vlnové délce elektromagnetického záření, jeví světelné paprsky tvořené nemonochromatickým zářením při lomu disperzi. Velikost indexu lomu roste s klesající vlnovou délkou, což znamená, že astronomická, zemská, popř. boční refrakce bude o něco větší pro krátké vlnové délky z modrofialového konce spektra viditelného záření než pro větší vlnové délky z červeného konce. Vezměme si paprsek, který vstoupil z kosmu do zemské atmosféry a prochází jí šikmo k zemskému povrchu. Představme si, že např. jde o paprsek přímého slunečního záření a omezíme-li se pouze na jeho viditelnou složku, je astronomická refrakce největší pro fialovou, dále modrou a zelenou část spektra a nejmenší pro část červenou. Uvědomíme-li si, že v důsledku astronomické refrakce vnímáme sluneční disk o něco výše nad obzorem, než odpovídá jeho skutečné poloze, je zřejmé, že při západu (analogicky i při východu) Slunce nastává situace, kdy větší vlnové délky z červeného konce spektra jsou již (ještě) „zapadlé“ za obzorem, zatímco zelenou, modrou a fialovou barvu lze ještě (již) po několik sekund vnímat. V případě čisté atmosféry (velmi malého zakalení vzduchu prachovými částicemi, vodními kapičkami nebo ledovými krystalky) můžeme někdy sledovat optický úkaz nazývaný zelený záblesk, popř. zelený paprsek, kdy sluneční disk ve chvíli svého západu na okamžik zazáří nazelenalým světlem. Na první pohled by se mohlo zdát podivné, že se neobjevuje spíše záblesk modrý nebo fialový, avšak nejkratší vlnové délky světla (fialová a modrá barva) jsou velmi účinně rozptylovány molekulami vzduchu. Modrý záblesk v okamžiku západu Slunce je proto jevem zcela výjimečným.

Stejným způsobem lze snadno vysvětlit i tzv. laminaci slunečního disku při jeho poloze v bezprostřední blízkosti obzoru. Jeho dolní část

bývá zbarvena sytě červeně, tato barva směrem vzhůru pak přechází v oranžovou, žlutou, někdy až nazelenalou na horním okraji.

Ad 1e) Svrchní neboli horní zrcadlení

Jedním z nejatraktivnějších optických jevů v atmosféře je tzv. svrchní (horní) zrcadlení. Vznik tohoto úkazu schematicky znázorňuje obr. 3. Povšimněme si nejprve světelného paprsku 1, který z místa A postupuje atmosférou šikmo vzhůru, přičemž dochází k lomu od kolmice (následek poklesu hustoty vzduchu, a tím i absolutního indexu lomu s výškou).



Obr. 3

V případech, kdy hustota vzduchu klesá s výškou zvláště rychle, což je typické zejména pro vrstvy s teplotními inverzemi (vrstvy I a II na obr. 3), může úhel dopadu, tj. úhel sevřený paprskem a vertikálou, nabýt kritické hodnoty pro totální odraz a takovou situaci máme na uvažovaném paprsku znázorněnu v bodě C_1 . Paprsek se potom ohne zpět k zemskému povrchu a na svém dalším postupu prochází stále hustšími vrstvami vzduchu, lomí se tedy ke kolmici, až se v místě B dostává do oka pozorovatele. Z bodu B pak lze ve směru tečny k paprsku 1, která na obr. 3 směřuje k bodu A' , spatřit převrácený obraz situace v místě A, jež se může nalézat za geometrickým obzorem. V případě, kdy v atmosféře existuje více vrstev s teplotní inverzí nad sebou, může dojít k úkazu, při němž lze pozorovat vícenásobně svrchní zrcadlení (dva nebo i více

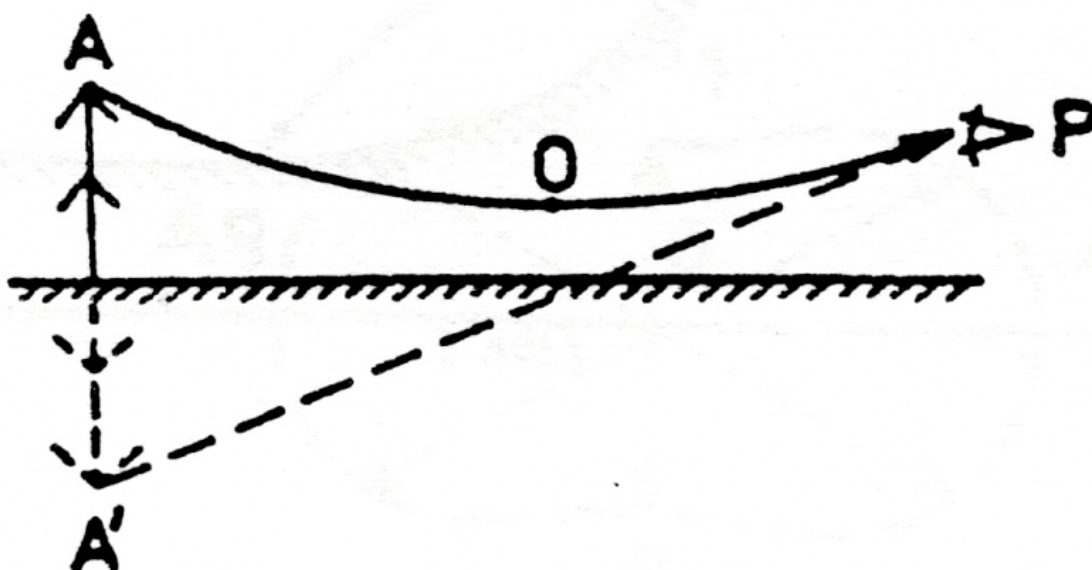
obrazů vzdálených objektů nad sebou). Schematické znázornění opět vidíme na obr. 3, uvažujeme-li kromě paprsku 1 i zakreslený paprsek 2, který je totálně odrážen v bodě C_2 na teplotní inverzi II a vytváří pozorovateli nalézajícímu se v bodě B zdánlivý převrácený obraz místa A znázorněný jako A'' .

Vznik právě popsaného úkazu svrchního zrcadlení je typický pro geografické oblasti vyznačující se výskytem mohutných výškových inverzí teploty. Patří sem především polární oblasti a v některých případech oblasti suchých tropických pásů (pouští). Ve druhém z těchto případů však může být kombinován vlastní jev svrchního zrcadlení se spodním zrcadlením (viz dále) v silně přehřáté přízemní vrstvě vzduchu, což má za následek, že zdánlivý obraz vzdálených objektů vidíme nepřevrácený a těsně při obzoru (ve skutečnosti znovu převrácený do přirozené polohy). U nás je svrchní zrcadlení poměrně řídkým jevem a pokud se vyskytne, bývá to zpravidla v zimním období, neboť v chladné polovině roku jsou v našich oblastech podstatně příznivější podmínky pro vytváření mohutných teplotních inverzí než v létě.

Ad 1f) Spodní neboli dolní zrcadlení a

1h) snížení obzoru

Při velmi intenzivním ohřívání zemského povrchu slunečním zářením někdy vzniká situace, za níž v přehřáté přízemní vrstvě vzduchu silné několik centimetrů až několik metrů hustota vzduchu s výškou roste, neboť teplota klesá s vertikální souřadnicí rychleji než o $0,0342 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. V souvislosti s tím si na obr. 4 povšimněme světelného paprsku, který vychází z objektu A a postupuje přehřátou přízemní vrstvou (s anomálním vertikálním růstem hustoty vzduchu) do naznačeného oka pozorovatele P . V tomto případě se uvažovaný paprsek nejprve lomí od kolmice, jeho úhel dopadu roste, až v bodě O dosáhne kritické hodnoty potřebné pro totální odraz, paprsek se ohýbá směrem vzhůru a začne se lámat ke kolmici. Pozorovatel P pak ve směru tečny vedené z jeho oka k danému paprsku vidí zrcadlově převrácený obraz objektu A . Takto popsaný jev, tzv. spodní zrcadlení, je typickým úkazem zejména v horkých pouštích, ale vyskytuje se zcela běžně i u nás, a to především nad sluncem rozpálenými betonovými nebo asfaltovými plochami. V případě, že se pozorovatel na obr. 4 nalézá mezi objektem A a bodem totálního odrazu O , nepozoruje spodní zrcadlení, avšak objekt A se mu jeví nepřevrácený poněkud níže, než se ve skutečnosti nalézá. Tímto způsobem vzniká tzv. snížení obzoru.

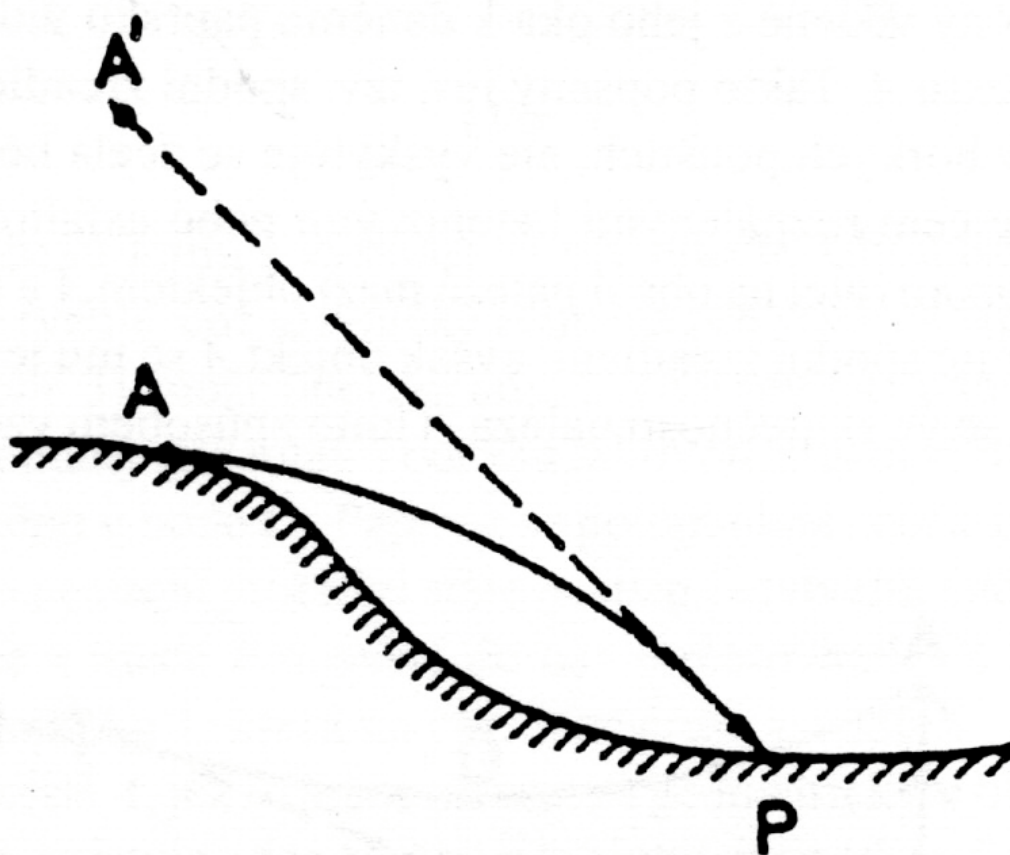


Obr. 4

V souvislosti s optickými přeludy vytvářenými v atmosféře svrchním a spodním zrcadlením, popř. jejich kombinací, se často používá název *fata morgána*, který však nemá charakter striktně odborného termínu. V původním smyslu jde o staré lidové označení klamných obrazů v ovzduší pocházející z oblasti Messinské úžiny.

Ad 1g) Zvednutí obzoru

V běžných případech, kdy hustota vzduchu klesá v atmosféře s výškou, se světelné paprsky procházející šikmo ovzduším zakřivují v důsledku lomu ve stejném smyslu jako je zakřiven zemský povrch. Paprsky pak pronikají i poněkud za obzor a dochází tak k jeho zdánlivému zvednutí, což je názorně patrné z obr. 5. Pozorovatel v bodě *P* vnímá objekt *A* ve směru tečny k paprsku, jenž od tohoto objektu přichází do jeho oka, tj. vidí daný objekt posunutý poněkud vzhůru do bodu *A'*. Právě zmíněné zvednutí obzoru je tím výraznější, čím rychleji klesá hustota vzduchu s výškou. Zvláště příznivé podmínky pro jeho pozorování se vyskytují za situací s mohutnými přízemními inverzemi teploty, kdy se u zemského povrchu nalézají relativně těžký studený vzduch, zatímco teplota roste s výškou, a hustota vzduchu směrem vzhůru proto relativně velmi rychle klesá.



Obr. 5

Ad 1i) Míhotání hvězd

V důsledku turbulentní struktury atmosférického proudění se v poli teploty a tím i hustoty vzduchu neustále vyskytují fluktuace s velmi rychlou časovou proměnlivostí. Na dráze světelného paprsku se tyto fluktuace projevují určitým kolísáním hodnoty indexu lomu, což má za následek vjem míhotání hvězd nebo i vzdálených bodových zdrojů světla na zemi.

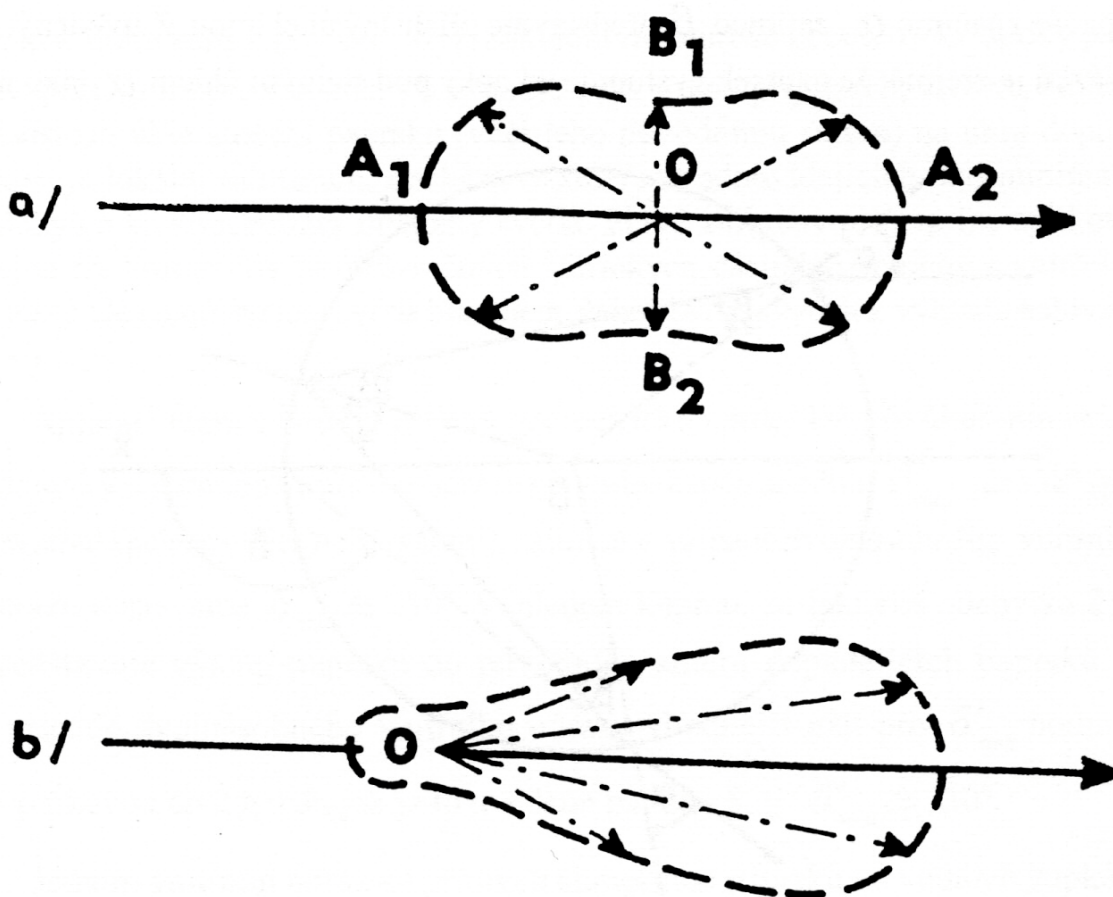
Ad 2a) Modrá barva oblohy a

2b) bílá barva ozářených oblaků

Světlo (elektromagnetické záření o vlnových délkách asi 400 – 750 nm) je v atmosféře rozptylováno molekulami plyných složek vzduchu a dále různými aerosolovými částicemi, jejichž rozměry mohou velikost molekul převyšovat až o několik řádů (vodní kapičky, ledové nebo prachové částice atd.). Dobrou aproximací pro popis tohoto rozptylu obecně je tzv. Mieova teorie, kterou německý fyzik G. Mie vypracoval na

počátku 20. století jako teorii řešící rozptyl elektromagnetického záření na částicích kulového tvaru. Za zvláštní případ dle Mieovy teorie lze považovat i dříve odvozenou teorii Rayleighova rozptylu platnou pro rozptyl na malých částicích. Při Rayleighově rozptylu je množství rozptýleného elektromagnetického záření přímo úměrné převrácené hodnotě čtvrté mocniny vlnové délky a rozptylová indikatrice má symetrický tvar vzhledem k rovině kolmé ke směru původních rozptylovaných paprsků a obsahující uvažovaný rozptylující element. Tvar této indikatrice vidíme na obr. 6a, přičemž rozptylovaný paprsek dopadá ve směru šipky na rozptylující element nalézající se v bodě O.

Rozptyl světla na molekulách vzduchu vyhovuje z hlediska zmíněné závislosti účinnosti rozptylu na vlnové délce i tvaru rozptylové indikatrice velmi dobře Rayleighově teorii, čímž lze snadno vysvětlit relativně bohatý výskyt krátkých vlnových délek (modrá a fialová barva jako převládající barvy oblohy) ve viditelném (světelném) oboru spektra rozptýleného slunečního záření, které vnímáme jako světlo oblohy.



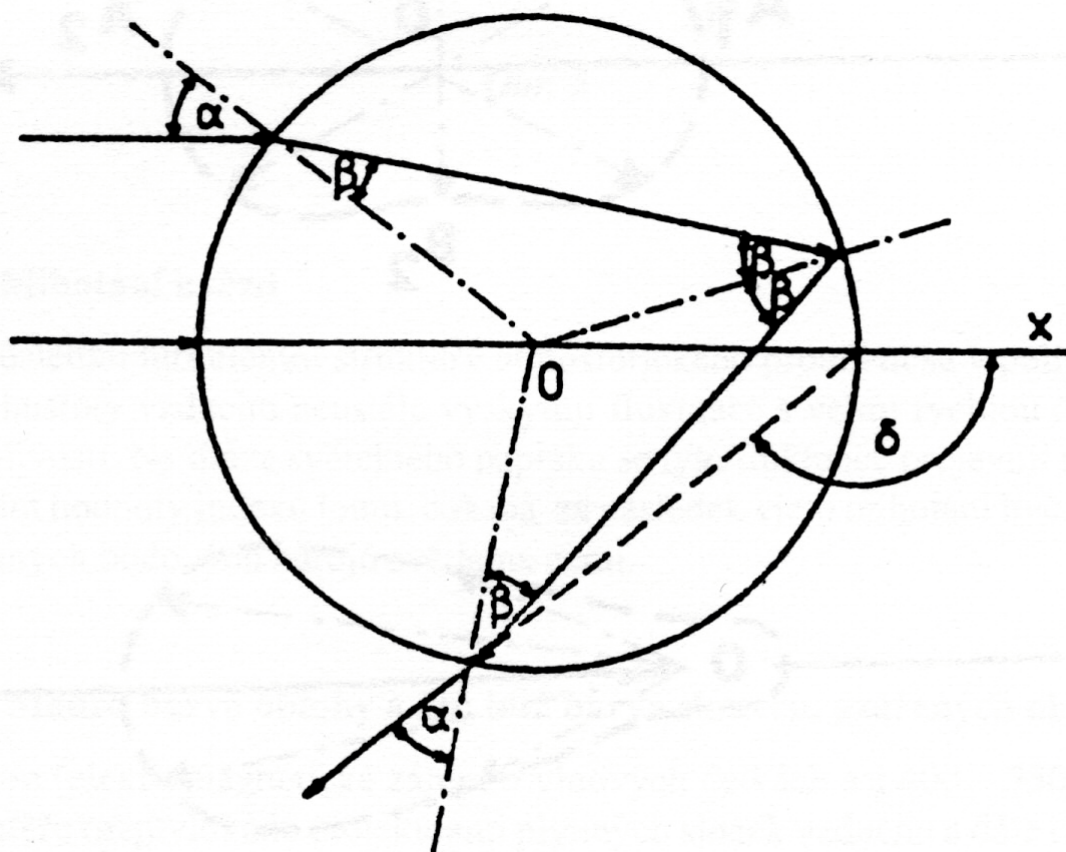
Obr. 6

Pro rozptyl světla na aerosolových částicích v atmosféře musíme použít obecnějších výsledků Mieovy teorie (popř. se zahrnutím i dalších

korekcí na nesférický tvar aerosolových částic). Pro částice velikostí typických pro běžné prachové, oblačné apod. částice v atmosféře je účinnost rozptylu světla prakticky nezávislá na vlnové délce (neutrální bílá barva sluncem ozářených oblaků) a rozptylová indikatrice má tvar silně protažený do směru původních rozptylovaných paprsků (viz obr. 6b).

Ad 3a) Duhy

Jedním z nejnápadnějších a zároveň vcelku běžných optických úkazů v atmosféře jsou duhy vznikající při průchodu slunečních paprsků vrstvami vzduchu obsahujícími v dostatečném počtu větší vodní kapky, obvykle kapky deště. Tento jev se vytváří v důsledku vnitřního odrazu světelných paprsků na povrchu kapek.



Obr. 7

Symbolem δ budeme značit úhel odchylky vystupujícího paprsku od směru původního paprsku dopadajícího na kapku (úhel stočení paprsku).

V případě jednoho vnitřního odrazu vystupuje paprsek nalézající se přímo v ose x (tzn. $\alpha = 0$) z kapky ve směru přesně opačném ke směru dopadajících paprsků a $\delta = \pi$. Posunujeme-li dopadající paprsek (při zachování jeho směru) dále od osy x , zmenšuje se úhel stočení až k jisté hodnotě $\delta_{\min}$ a s dalším vzdalováním dopadajícího paprsku od osy x ke konturám kapky úhel δ opět poněkud roste. Obdobnou situaci lze popsat i v případě dvojnásobného vnitřního odrazu. Paprsek ležící v ose x pak vystupuje z kapky ve směru původního dopadajícího paprsku a $\delta = 2\pi$. Provedeme-li stejnou operaci jako v předcházejícím případě, zmenšuje se s růstem vzdálenosti dopadajícího paprsku od osy x úhel δ až k určité hodnotě $\delta'_{\min}$ a s dalším vzdalováním dopadajícího paprsku směrem ke konturám kapky δ roste. Mezi základní zákonitosti geometrické optiky patří tzv. princip minimální odchylky, podle něž v těch případech, kdy ve funkční závislosti úhlu stočení paprsku (vůči jeho původnímu směru) na úhlu dopadu existuje lokální minimum, dochází ve směrech odpovídajících této minimální odchylce ke koncentraci intenzity světla. Právě zmíněný princip lze aplikovat nejen na lom světla na průzračných sférických částicích spojený s vnitřními odrazy, ale i např. na lom světla hranolem, čehož lze mj. využít k výkladu halových jevů.

Aplikací elementárních zákonů geometrické optiky lze pro úhel minimální odchylky u jednoho vnitřního odrazu na vodní kapce spočítat $\delta_{\min} \approx 138^\circ$ (pro cca střed spektra viditelného záření), zatímco v případě dvojnásobného vnitřního odrazu dostáváme $\delta'_{\min} \approx 230^\circ$. Vzhledem k tomu, že faktická odchylka 2π představuje výstup paprsku do původního směru dopadajících paprsků, je v případě dvojnásobného vnitřního odrazu vhodnější užít pro $\delta'_{\min}$ hodnotu doplňkovou do 2π tak, jak je to uvedeno na obr. 8, tj. $\delta'_{\min} \approx 130^\circ$.

Jedním vnitřním odrazem přímých slunečních paprsků na vodních kapkách vzniká hlavní (neboli primární) duha, která má vnější (horní) okraj červený a vnitřní (dolní) fialový.

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).

Vzácným optickým úkazem je terciární duha nazývaná též „duha kolem Slunce“, kterou vytvářejí paprsky podstupující na vodních kapkách tři vnitřní odrazy. V tomto případě svírají paprsky vystupující z kapky s minimálním stočením $\delta_{\min}''$ se směrem přímých slunečních paprsků úhel přibližně 43° , a duhu lze proto pozorovat v této úhlové vzdálenosti od slunečního disku, tzn. „kolem Slunce“ na protější straně oblohy, než se nalézají hlavní a vedlejší duha. Duhy ještě vyššího řádu vytvářené čtyř- a vícenásobným vnitřním odrazem slunečních paprsků jsou natolik slabé, že jejich pozorování pouhým okem by bylo třeba počítat ke zcela mimořádným optickým úkazům v atmosféře.

Na vnitřní straně hlavní duhy a na vnější straně vedlejší duhy bývají poměrně často patrné tzv. podružné duhové oblouky jevící se jako několikanásobné opakování slabě vyjádřeného spektra barev. Výklad tohoto úkazu nelze provést na základě geometrické optiky, neboť jde o interferenční jev obdobný ohybu světla na hraně. Paprsky určité vlnové délky, které na kapku dopadají pod úhly většími nebo menšími než odpovídá minimální odchylce, vystupují z kapky se stočením větším, než je příslušná hodnota $\delta_{\min}$ a nepronikají tedy mimo svoji část prostoru vymezenou pláštěm kuželu vytvořeného paprsky s minimální odchylkou. Tento plášť působí analogicky jako hrana pro světlo neprostupné poloviny, postavené do cesty světelným paprskům, čímž vzniká charakteristický ohybový jev patrný pro jednotlivé vlnové délky jako soustava maxim a minim intenzity světla. Ve spojitém spektru slunečního záření pak vzniká několikanásobné opakování duhového sledu barev, avšak jev velmi rychle slábne s rostoucí vzdáleností od hlavní nebo vedlejší duhy.

Ad 3b) Koróny

Koróna představuje optický jev vznikající ohybem světla na konturách vodních kapiček v oblacích, mlhách nebo volně rozptýlených v ovzduší v podobě tzv. kouřma. Je tvořena jedním nebo více sledy soustředných kruhových barevných prstenců těsně kolem Slunce, popř. Měsíce. V každém sledu je na vnitřní straně fialová nebo modrá barva, zatímco vnější kruh je červený, mezi tím se vyskytují ostatní barvy spektra. Výraznost a jasnost barev je největší, mají-li zmíněné vodní kapičky stejné poloměry. Není-li splněna tato podmínka, barvy se rozostřují, v případě větší rozmanitosti velikostí kapek má koróna vzhled pouze bělavého, popř. velmi mdle zbarveného kruhu kolem okraje slunečního nebo měsíčního disku. V této podobě bývá velmi často

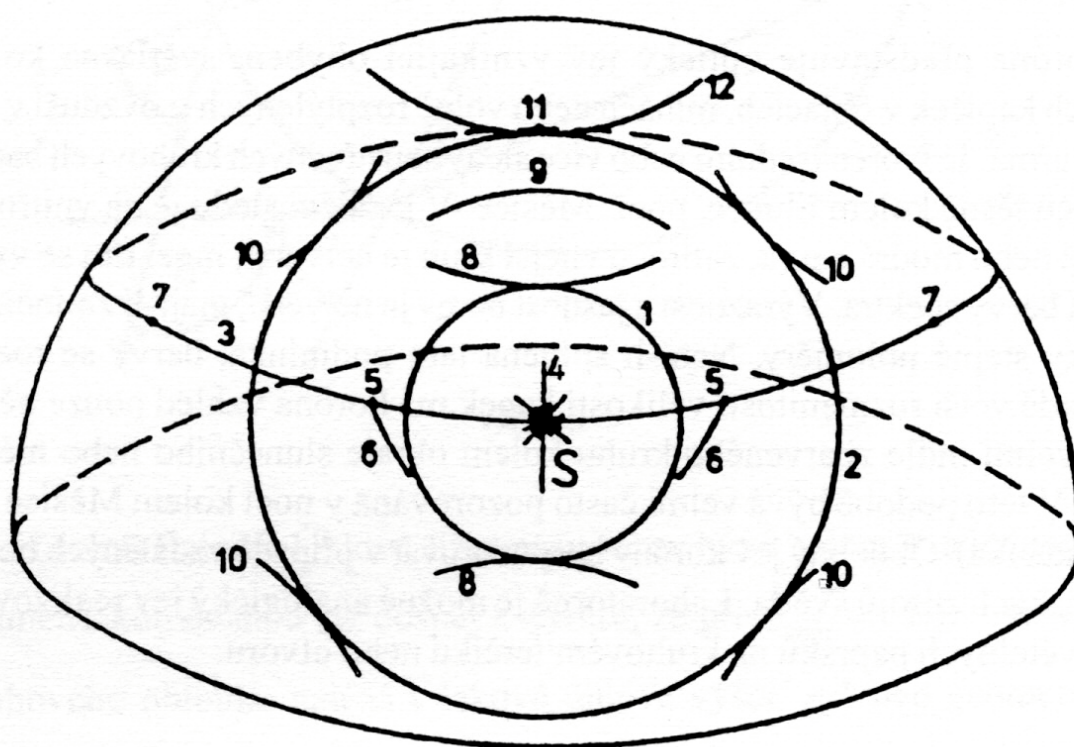
pozorována v noci kolem Měsíce (lidově tzv. studánka). Obdobný jev koróny lze pozorovat v případě vzdálených bodových pozemských zdrojů světla. Laboratorně je možné analogický jev realizovat ohybem světelných paprsků na kruhovém terčíku nebo otvoru.

Ad 3c) Glórie

Jako glórie se označuje optický jev v podobě jednoho nebo více sledů barev spektra v podobě kruhů kolem stínu vrženého na vrstvu oblaku nebo mlhy obsahující vodní kapičky, někdy i na soubory kapek rosy. Vzniká zpětným rozptylem světla na sférických vodních kapičkách, což lze kvantitativně popsat např. prostřednictvím Mieovy teorie rozptylu elektromagnetického záření. Jestliže je zmíněná vrstva oblaku nebo mlhy velmi blízko předmětu vrhajícího stín, popř. se tento předmět nalézá uvnitř ní (typicky na horách), zdá se stín velmi zvětšený a jev pak bývá lidově označován jako tzv. horský nebo Brockenský přízrak (strašidlo). Barevná výraznost glórie je relativně nejlepších, jestliže rozptylující vodní kapičky jsou si vzájemně velikostí co nejbližší, obecně však bývá celý jev výrazně slabší ve srovnání s korónou.

Ad 4a) Halové jevy

Optické úkazy v atmosféře vznikající v důsledku odrazu a lomu slunečního, popř. měsíčního světla na ledových krystalcích rozptýlených ve vzduchu nazýváme souhrnně halovými jevy. Určitý přehled o nejtypičtějším z nich můžeme získat z obr. 9, kde S vyznačuje polohu Slunce na zdánlivé nebeské klenbě a jednotlivé úkazy jsou očíslovány. Obecně se halové jevy pozorují jako světlé, bělavé, slabě duhově nebo mdle perleťově zbarvené pruhy, kola apod. na obloze. K běžněji se objevujícím patří zejména malé halo, které se pozorovateli jeví jako bělavá kružnice nebo pouze její části v úhlové vzdálenosti asi 22° kolem středu slunečního disku (1). Vnitřní okraj mívá načervenalé zbarvení.



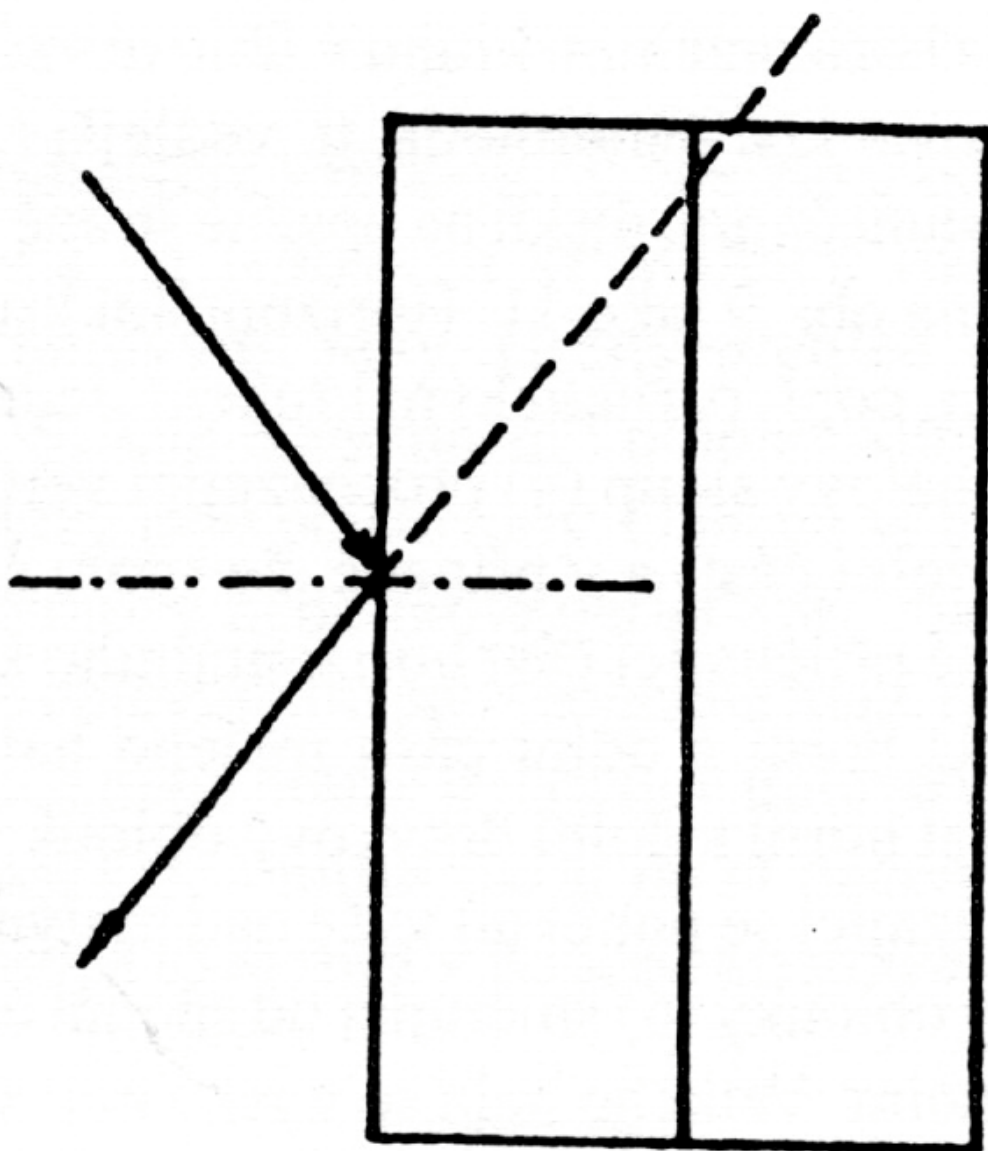
Obr. 9

Řidčeji lze pozorovat velké halo, a to rovněž v podobě kružnice, nebo jejích částí, kolem Slunce, ale v úhlové vzdálenosti přibližně 46° od jeho středu (2). Kružnici vedenou po nebeské klenbě rovnoběžně s ideálním geometrickým obzorem ve stejné úhlové výšce, jako se právě nalézá Slunce, nazýváme horizontální kruh (3) a rovněž jeho části mohou být opticky patrné v podobě bělavého pruhu. Na této kružnici po obou stranách vně malého hala bývají poměrně často dobře znatelná tzv. parhelia, tj. vedlejší (boční) slunce malého hala (5), jevící se jako světlé plošky, obvykle duhově zbarvené s vnitřní stranou (bližší ke Slunci) načervenalou. Při poloze Slunce těsně u geometrického obzoru se tato vedlejší slunce nalézají těsně u malého hala, s růstem výšky Slunce nad obzorem se od něho více vzdalují. Podstatně vzácněji lze na horizontálním kruhu v úhlové vzdálenosti 120° od středu slunečního disku pozorovat tzv. paranthelia, tj. vedlejší („stodvacetistupňová“) slunce (7) a přímo proti slunečnímu disku na opačné straně oblohy tzv. protislunce (antihelium), označené na obr. 1 jako 11. Horizontální kruh proto též nazýváme kruhem vedlejších sluncí, popř. parhelickým kruhem. Jedním z poměrně častých halových jevů je světlý halový sloup (4) procházející 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. U horní a dolní části malého hala lze někdy v podobě světlých pruhů pozorovat horní a dolní dotykový oblouk (8), vzácným jevem je Parryho oblouk (9), nalézající se poněkud výše nad malým halem, a dosti zřídka se vyskytují i Lowitzovy oblouky (6) směřující od spodní části malého hala šikmo vzhůru k vedlejším sluncím. Velkého hala se v jeho nejvyšším bodě dotýká tzv. horní cirkumzenitální oblouk (12), tvořící součást kružnice s pomyslným 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. U velkého hala se dále mohou vyskytovat dotykové oblouky (10), avšak jeho spodní část bývá v našich zeměpisných šířkách spolu s nimi obvykle pod obzorem. Ze stejného důvodu je u nás značně vzácný tzv. dolní cirkumzenitální oblouk přimykající se k velkému halu v jeho nejnižším bodě a orientovaný rovnoběžně s geometrickým obzorem. Bývá též nazýván cirkumhorizontálním obloukem a jeho horní okraj mívá načervenalé zbarvení.

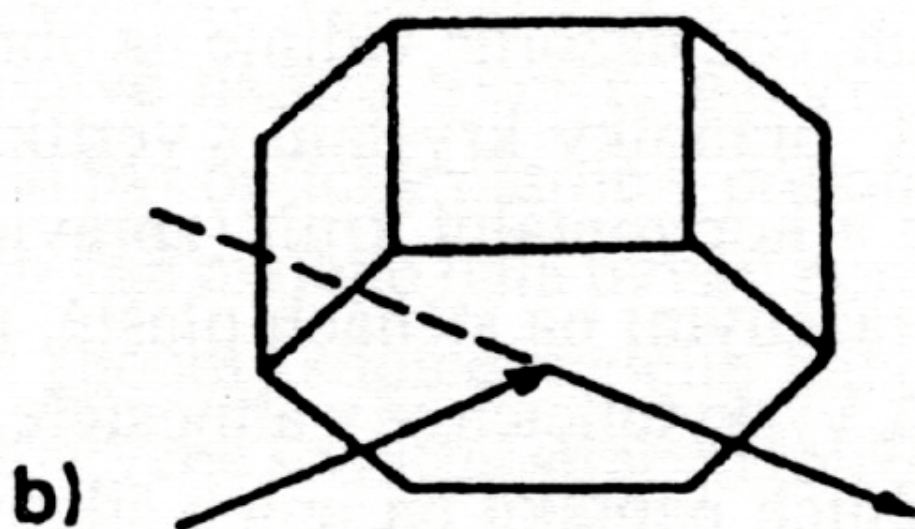
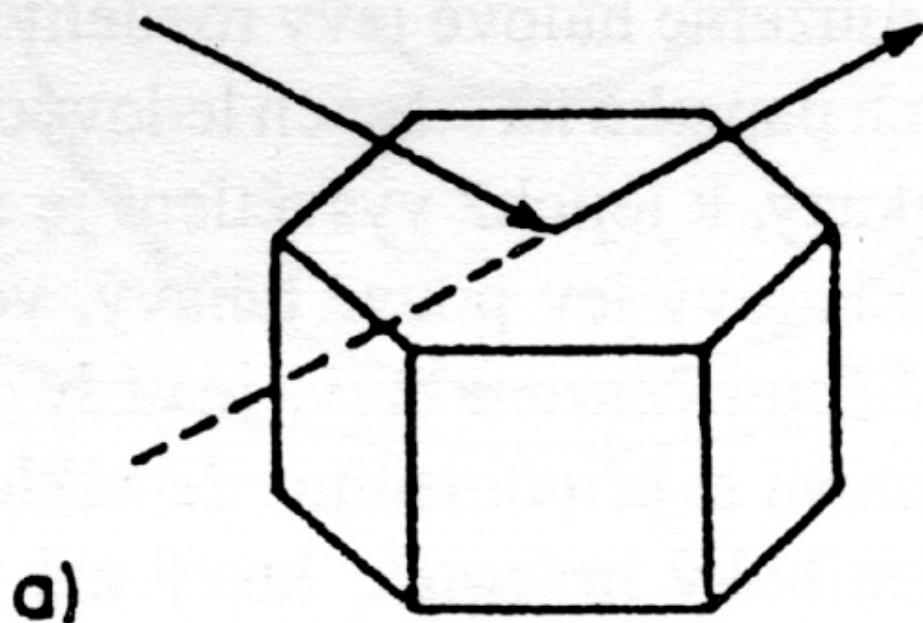
Podle způsobu vzniku můžeme halové jevy rozdělit na ty, které se vytvářejí pouhým odrazem slunečních paprsků na stěnách ledových krystalků, zatímco do druhé skupiny počítáme úkazy, k jejichž vysvětlení je nezbytné uvažovat lom světla. V prvním případě je halový jev pouze bělavý, ve druhém mívá duhové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

Odrazem slunečních paprsků na vertikálně orientovaných krystalových stěnách se vytváří horizontální kruh, což názorně vidíme na obr. 10. V tomto případě se zřejmě mohou uplatňovat hranolky krystalů s vertikálně, resp. horizontálně orientovanou hlavní osou a horizontální kruh (zpravidla pouze jeho části) je potom tvořen paprsky odraženými na stěnách pláště, resp. podstav. 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.



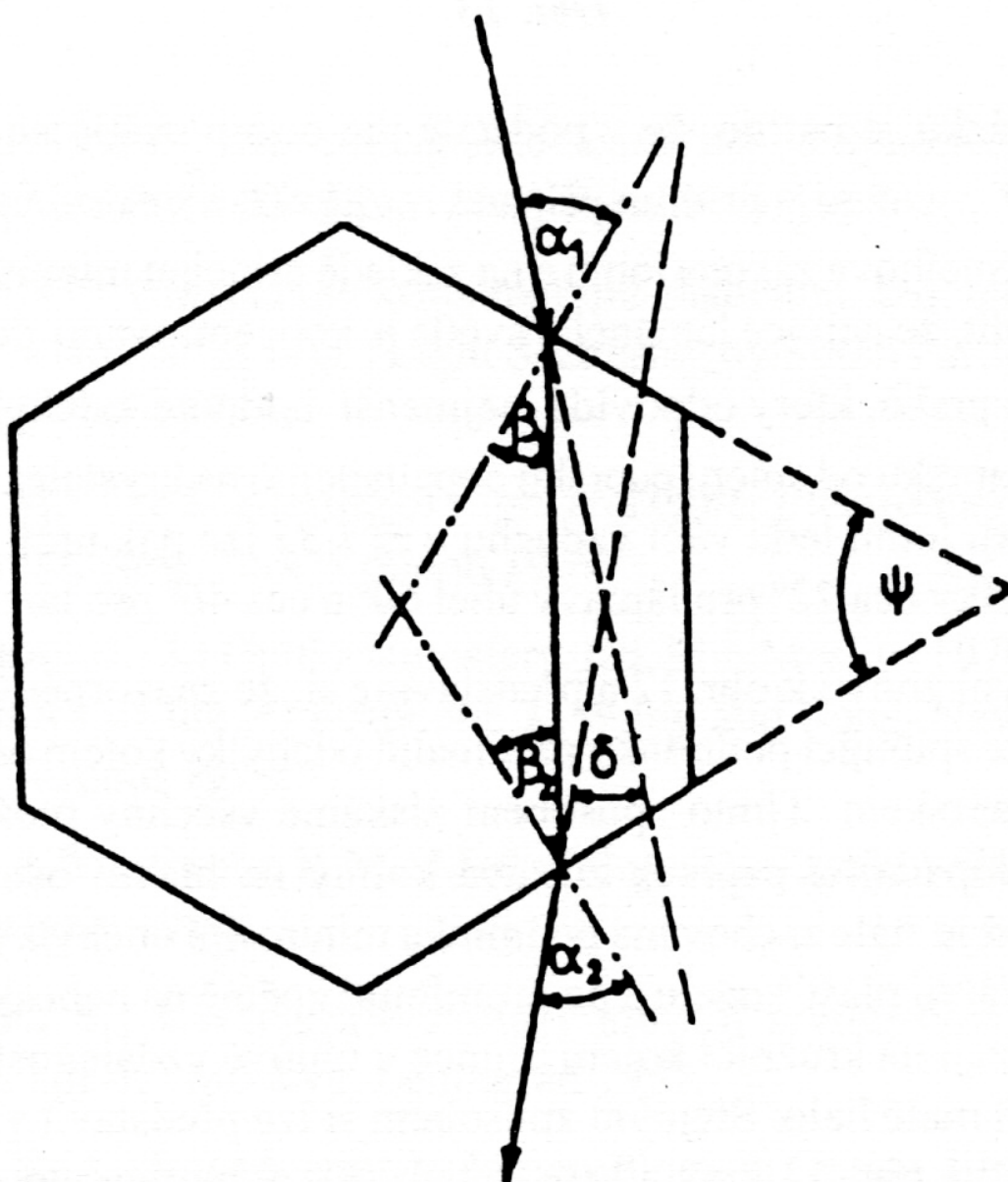
Obr. 10

Odrazem paprsků na horizontálně orientovaných krystalových plochách (podstavách hranolků při vertikální orientaci jejich hlavní osy nebo vhodně orientovaných plochách pláště při horizontální poloze hlavní osy), zejména v případě polohy Slunce velmi nízko nad obzorem, lze vysvětlit vytvoření halového sloupu, což názorně vidíme na obr. 11, kde část a) odpovídá dolní a b) horní polovině tohoto úkazu. Jednoduchým odrazem slunečních paprsků na horizontálně orientovaných krystalových plochách též vznikají tzv. spodní slunce,



Obr. 11

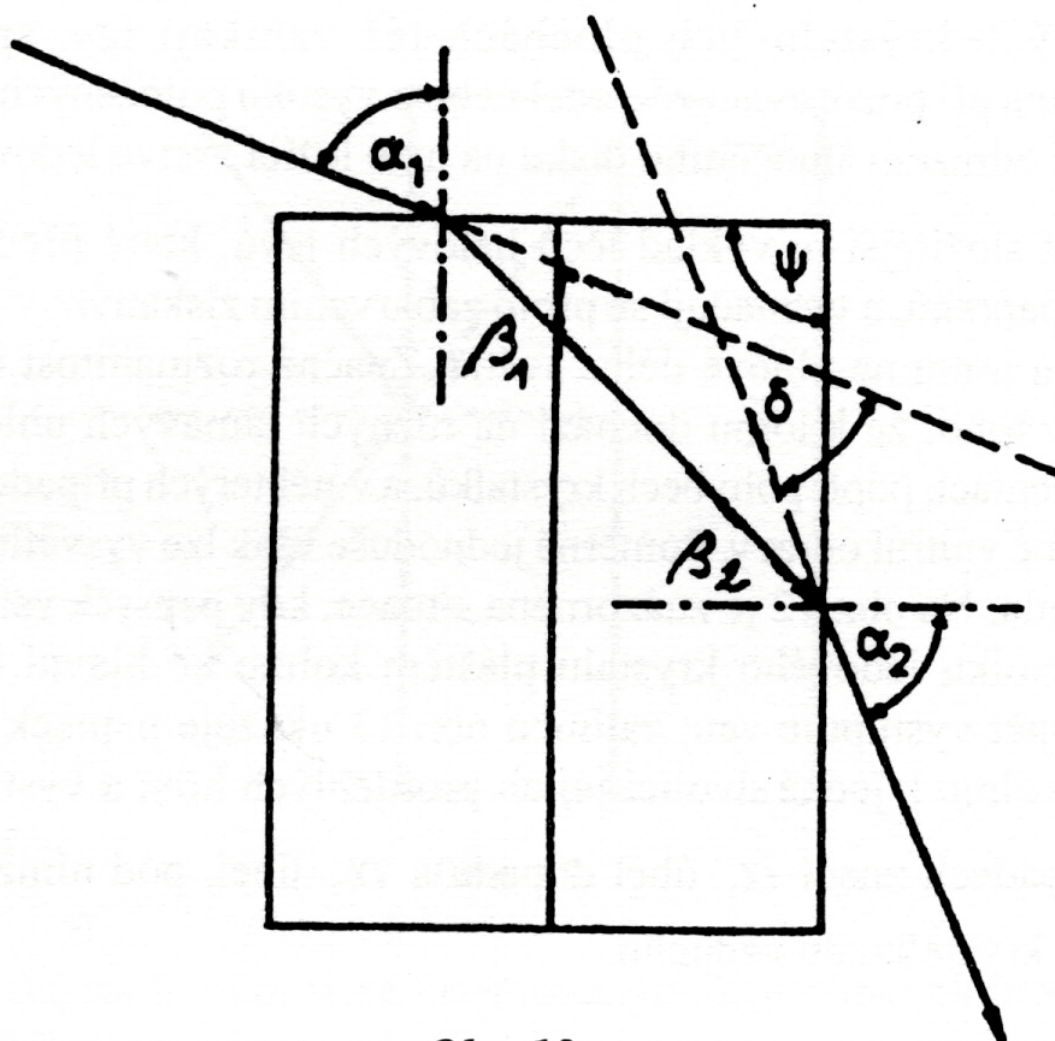
Poněkud složitější je výklad těch halových jevů, které předpokládají lom slunečních paprsků, a vyznačují se proto zabarvením získaným v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce světla. Značná rozmanitost úkazů vyplývá především z toho, že k lomu dochází na různých lámavých úhlech (viz dále), při různé orientaci, popř. pohybech krystalků, a v některých případech se uplatňují i vícenásobné vnitřní odrazy. Poměrně jednoduše však lze vysvětlit vznik malého a velkého hala. Na obr. 12 je znázorněna situace, kdy paprsek vstupuje do šestibokého hranolku ledového krystalu pláštěm kolmo ke hlavní krystalové ose a pláštěm opět vystupuje ven, zatímco obr. 13 ukazuje paprsek, jenž vstupuje podstavou kolmo k jedné dvojici jejích protilehlých hran a vystupuje pláštěm. V obou případech značí α_1 úhel dopadu a α_2 úhel, pod nímž daný paprsek vystupuje z krystalku do vzduchu.



Obr. 12

Z těchto obrázků je patrné, že v podstatě jde o lom světla na hranolu s lámavým úhlem ψ , jenž se v prvním případě rovná 60° a ve druhém 90° . Jednoduchou aplikací Snelliova zákona lomu a na základě principu minimální odchyšky lze snadno odvodit, že nejvíce lámaného světla je koncentrováno do toho směru vystupujících paprsků, který odpovídá nejmenší hodnotě odchyšky δ směru vystupujícího paprsku od směru paprsku dopadajícího na krystalek. Pro hodnotu relativního indexu lomu ledu vůči vzduchu $n \approx 1,33$ lze pak určit hodnotu této

minimální odchylky cca 22° pro lámavý úhel 60° a cca 46° pro lámavý úhel 90° .



Obr. 13

Vraťme se nyní znovu k obr. 12 a představme si, že znázorněným krystalem rotujeme v poloze splňující podmínky minimální odchylky kolem osy ztotožněné s dopadajícím paprskem. Tímto způsobem získáme všechny možné orientace krystalku, kdy dopadající paprsek zůstává kolmý na hlavní osu šestibokého hranolku, přičemž je stále zachována podmínka minimální odchylky. Vystupující paprsky pak vytvářejí plášť kuželu a po promítnutí zpětně na nebeskou klenbu se jejich stopy nalézají na kružnici kolem Slunce v úhlové vzdálenosti 22° od jeho středu, tj. vytvoří malé halo. Stejným způsobem si lze představit vznik velkého hala, rotujeme-li na obr. 13 krystalkem kolem osy vytvořené dopadajícím paprskem.

Pomocí obr. 13 můžeme ilustrovat i vznik horního cirkumzenitálního oblouku. Na rozdíl od velkého hala je v tomto případě nutná vertikální orientace hlavní osy hranolku. Zakreslená situace, kdy paprsek dopadá na horní podstavu kolmo k jedné dvojici jejích hran pod úhlem splňujícím podmínku minimální odchylky, pak odpovídá nejvyššímu bodu velkého hala, který na obr. 13 zároveň patří hornímu cirkumzenitálnímu oblouku. Představíme-li si nyní pootáčení hranolku krystalku kolem jeho hlavní vertikálně orientované osy, dostáváme jeho polohy, při nichž dopadající paprsek již není kolmý na určitou dvojici protilehlých hran podstavy a vystupující paprsek zpětně promítnutý na zdánlivou nebeskou klenbu opisuje stopu v podobě oblouku kolem zenitu. Horní cirkumzenitální oblouk je možno pozorovat pouze 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 se dolní cirkumzenitální (neboli cirkumhorizontální) oblouk může vytvořit, není-li Slunce vzdáleno od zenitu více než 32° . Na jeho vzniku se podílejí paprsky, které při vertikální orientaci šestibokých hranolků ledových krystalů podstupují lom na lámavém úhlu 90° , přičemž vstupují pláštěm a vystupují podstavou.

Literatura

1. **Deirmendjian D.:** Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersion, 1.ed. Elsevier Publishing Company, New York 1969.
2. **Hulst, H. C.:** Rassejanije sveta malymi časticami. Izd. inostr. lit., Moskva 1961. Překlad z angl. orig.: Light Scattering by Small Particles. J. Wiley and Sons, New York 1957.
3. **Kerker, M.:** The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiations. Acad. Press, New York, London 1969.
4. **Mc Cartney, E. J.:** Optika atmosfery. Izd. Mir, Moskva 1979. Překlad z angl. orig.: Optics of the Atmosphere. J. Wiley and Sons, New York, London, Sydney, Toronto 1977.
5. **Pernter, J. M., Exner, F. M.:** Meteorologische Optik. Wilhelm Braumüller, Wien, Leipzig 1910.
6. **Šifrin, K. S.:** Rassejanije sveta v mutnoj srede. Gos. izd. techniko-teoretičeskoj lit., Moskva, Leningrad 1951.
7. **Tricker, R. A.:** Introduction to Meteorological Optics. Elsevier Publishing Company, New York 1970.
8. **Tverskoj, P. N.:** Optické, elektrické a akustické jevy v atmosféře. Naše vojsko, Praha 1955 (překlad z ruštiny).