Optické jevy v atmosféře

Proseminář z optiky

4. 11. 2021

Optické jevy v atmosféře

Jevy spojené s odrazem, lomem a difrakcí (rozptylem) na vodních kapičkách – duhy, koróny, glorioly

Jevy spojené s nehomogenitou indexu lomu vzduchu:

a) rychlé změny na malé prostorové škále – rozptyl, barva oblohy

b) kvazistatické na velké prostorové škále – zrcadlení, zelený záblesk

Jevy spojené s odrazem, lomem a difrakcí (rozptylem) na ledových krystalcích – halové jevy

Vznik duh

lomem a odrazem na vodních kapkách





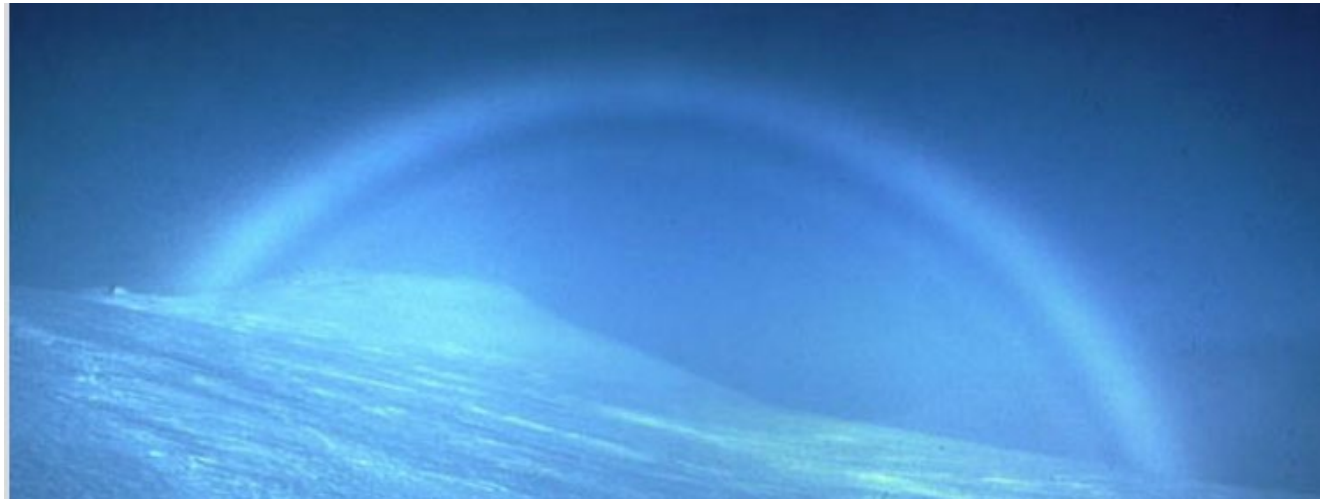
1. Proč je červená na vnějším okraji primární duhy?
2. Jaká je úhlová šířka duhy?
3. Jaká je intenzita světla vně a uvnitř?
4. Proč je červená na vnitřním okraji sekundární duhy?
5. Jaká je úhlová šířka sekundární duhy?
6. Je duha polarizovaná?
7. Vidíme duhu v polarizačních brýlích?



Vznik duh

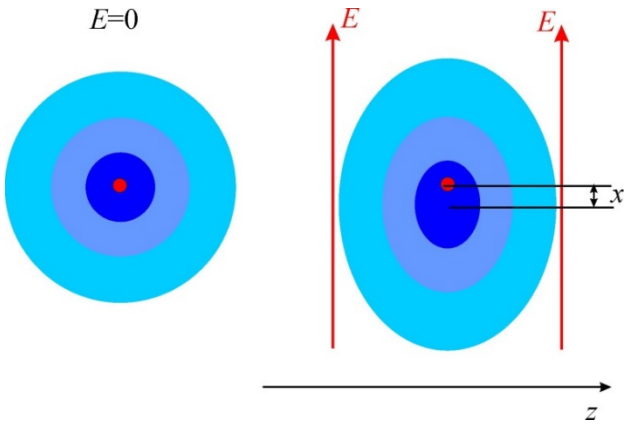


„Duha“
ve fialovém
světle“



„Mlžná duha“

Lorentzův model



$$m\frac{d^2\tilde{x}(t)}{dt^2} + m\frac{d\tilde{x}(t)}{dt} + k_H\tilde{x}(t) = q\tilde{E}(t)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_H}{m}}$$

$$\tilde{x}_0 = \frac{qE_0}{m}\frac{1}{\omega_0^2 - i\gamma\omega - \omega^2}.$$

$$\Delta\tilde{P}_x(t) = Nq\tilde{x} = Nq\tilde{x}_0 e^{-it} = \Delta\tilde{\chi}(\omega)\, E_0\, e^{-i\omega t}$$

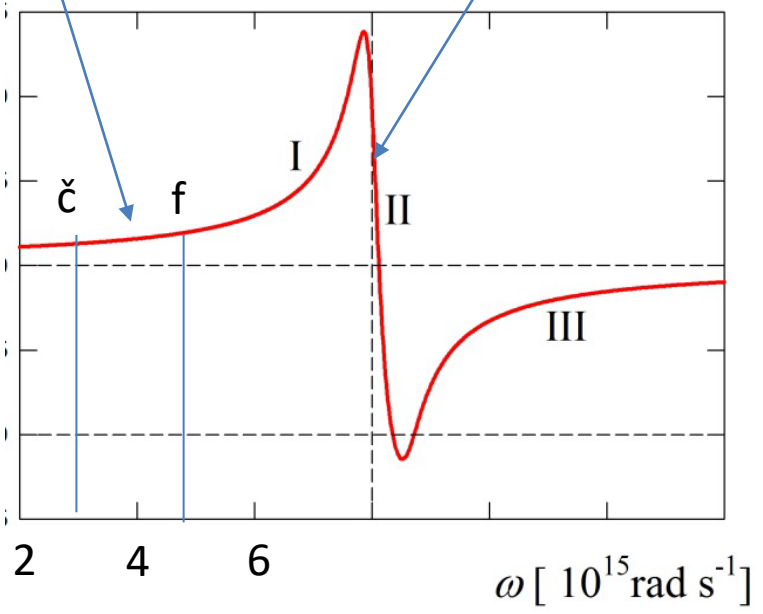
$$\tilde{\varepsilon}_r(\omega) = 1 + \tilde{\chi}(\omega)$$

$$\mathrm{Re}\{\tilde{\varepsilon}_r\} = \varepsilon_R = n^2 - \kappa^2$$

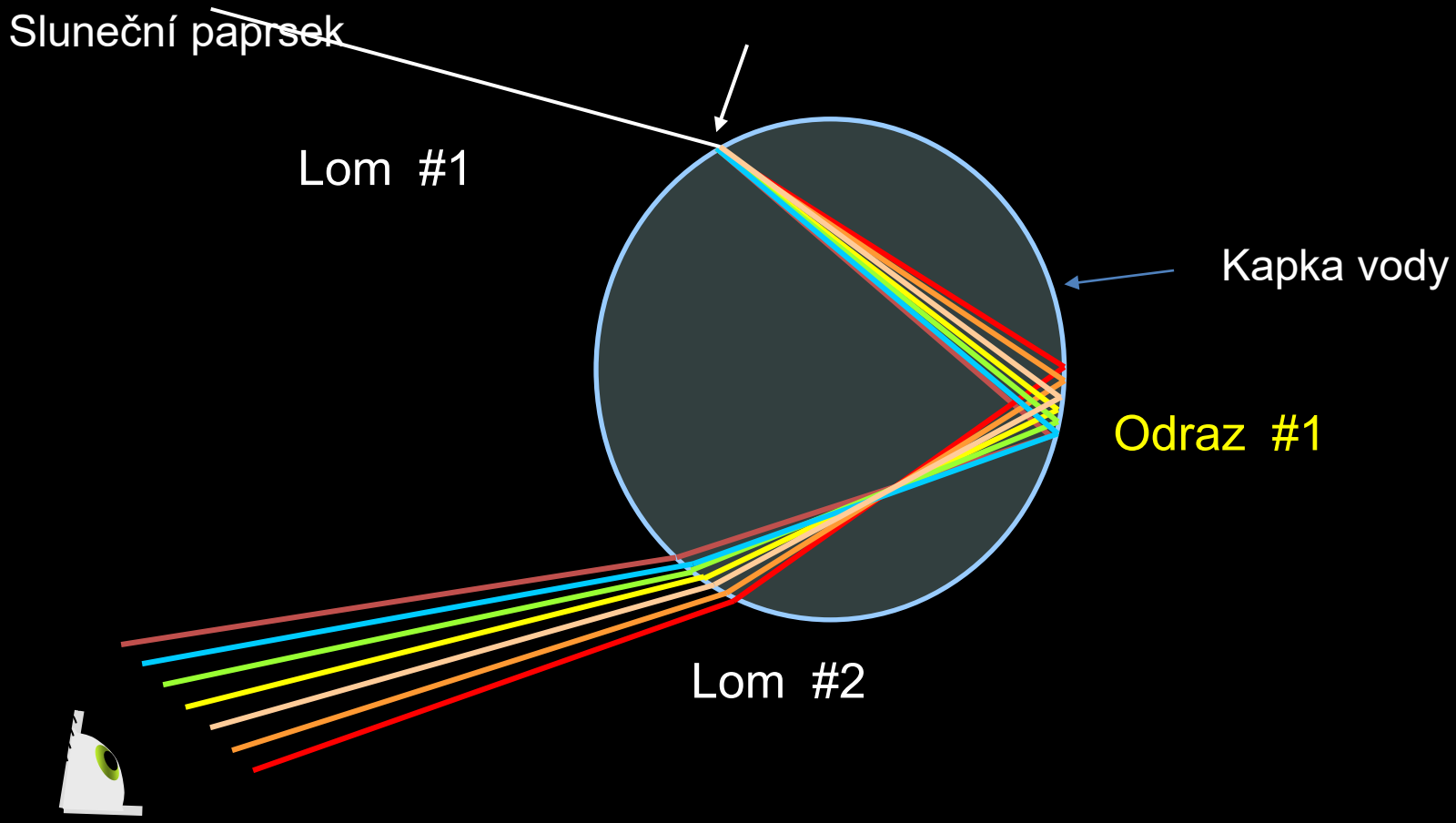
Index lomu Extinkční koeficient

Oblast normální disperze

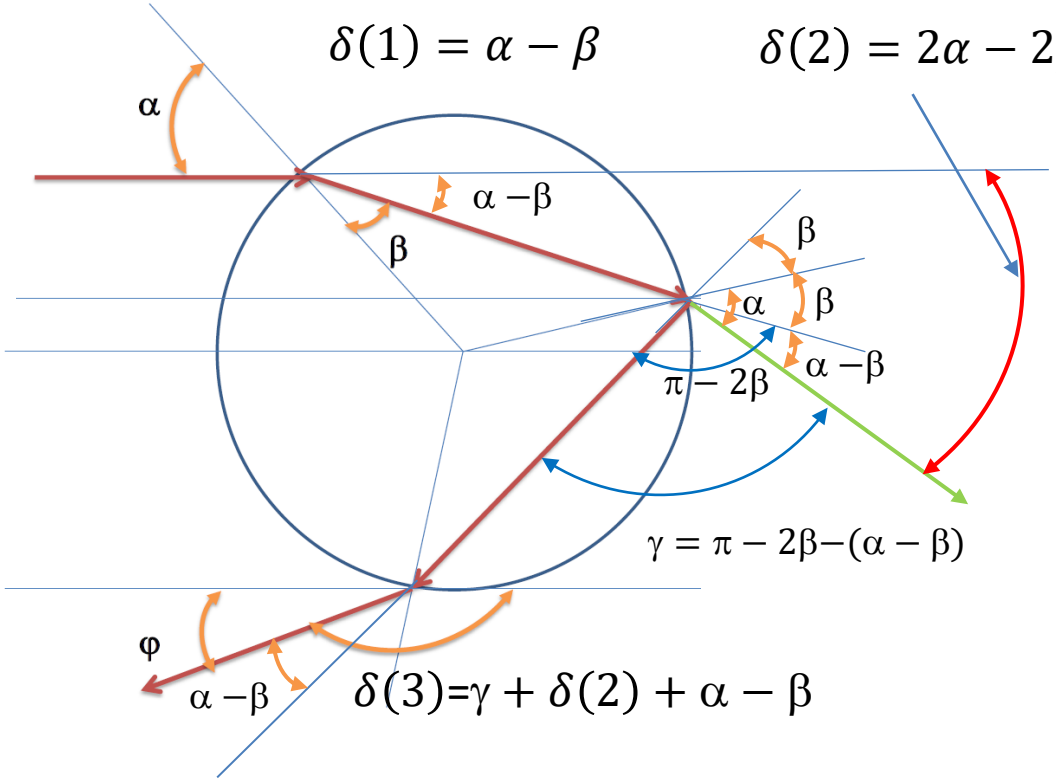
Oblast anomální disperze



Vznik duhy



Vznik duh – geometrická teorie



Lze ukázat, že

$$\frac{\partial^2 \delta(3)}{\partial \alpha^2} > 0$$

Jedná se tedy o minimum

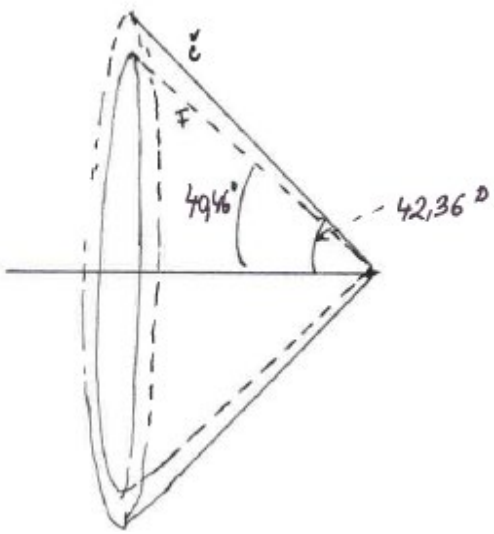
$\delta(3)_{min} \leftrightarrow \varphi_{max}$

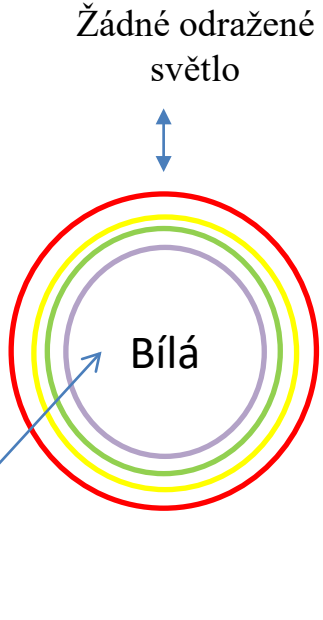
$$cos\alpha(\varphi_{max}) = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$$

$n_č$=1.331

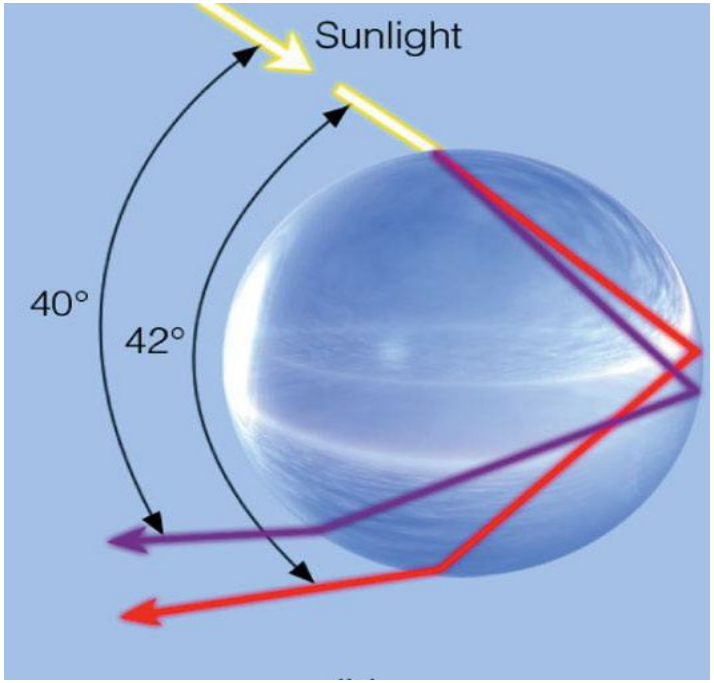
n_F=1.343

Primární duha



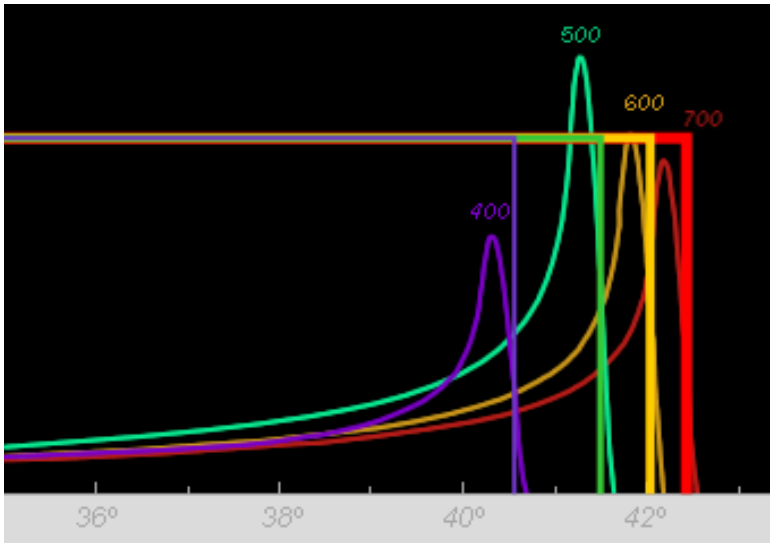


Bílé světlo – protože neexistuje minimální úhel φ



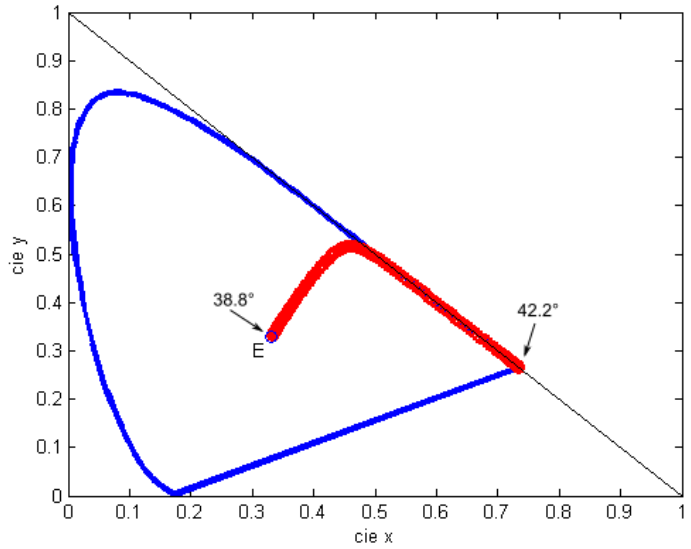
Proč je vidět spektrum?
Kdyby měly všechny paprsky stejnou intenzitu, měl by být jasně vidět jen červený okraj a ostatní barvy by měly být smíchané

Duha pro případ konstantní intenzity barev





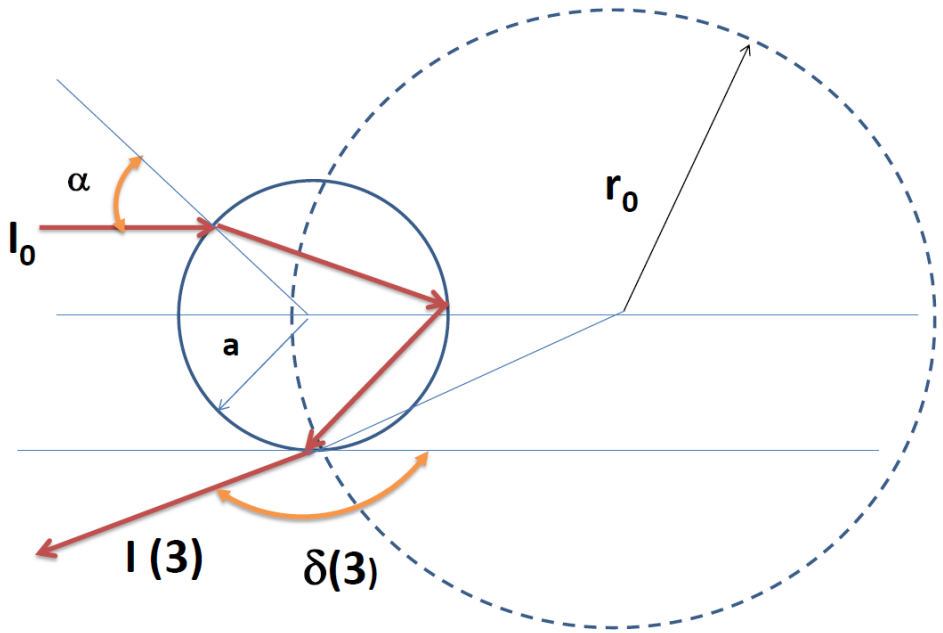
38.8° 42.2°



Spektrum odrazu jedné kapky v případě konstantního spektrálního průběhu intenzity odraženého světla

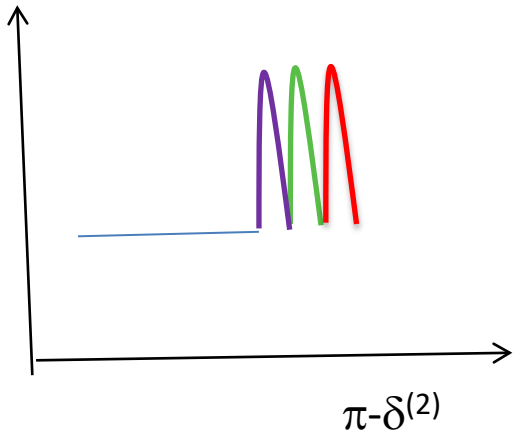
Jak závisí intenzita světla vystupujícího z kapky po 1 vnitřním odrazu?

T, R – Fresnelovy intenzitní koeficienty



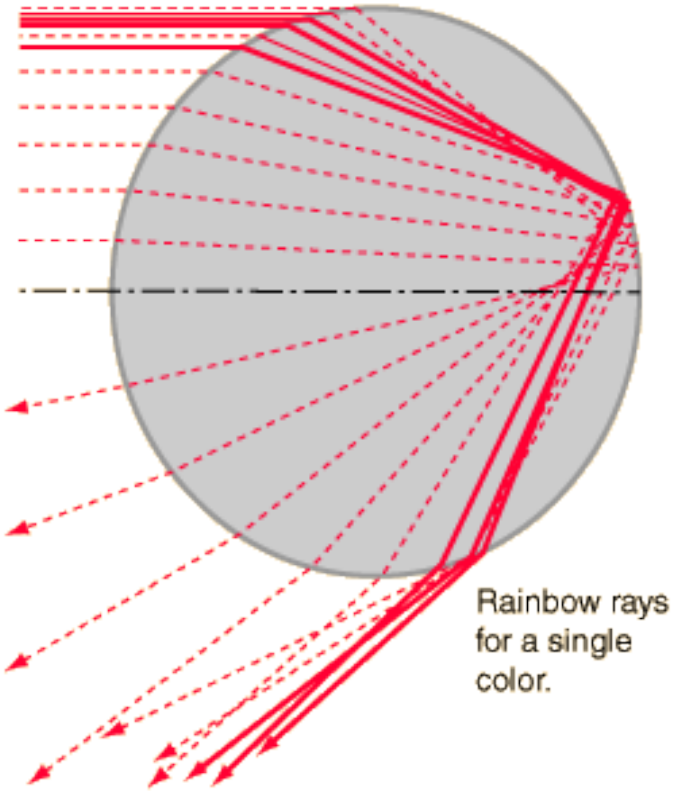
$$I^{(3)} = I_0 \frac{T^2 R.2\pi a^2 \sin 2\alpha d\alpha}{2r_0^2 \sin \delta^{(2)} \left|\frac{d\delta(3)}{d\alpha}\right|}$$

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

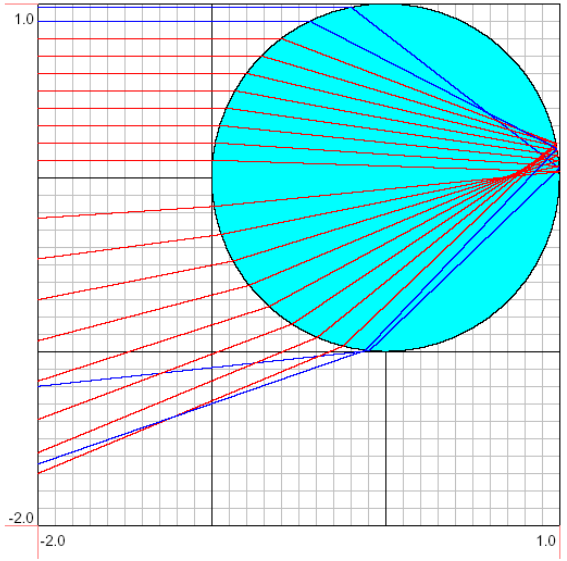


Pod úhlem minimální odchylky vychází maximální intenzita světla. Vzhledem k tomu, že tento úhel je funkcí vlnové délky, vychází jednotlivé barvy z kapky separátně.

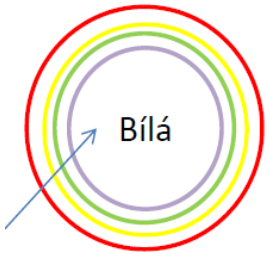
Naznačení role minimální deviace



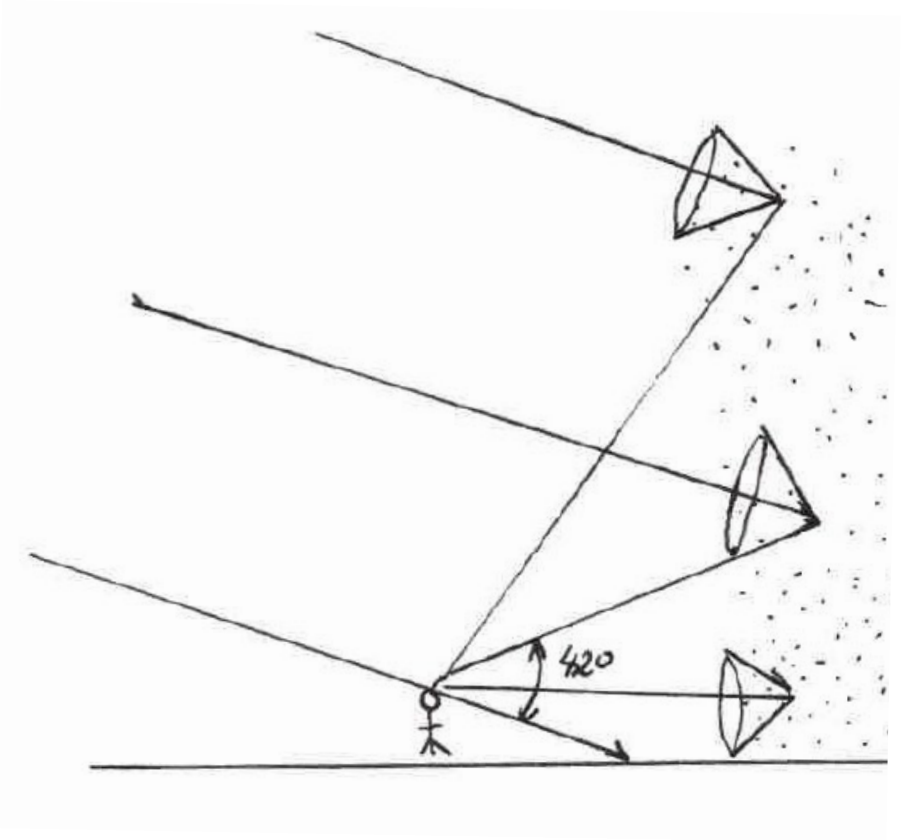
After Greenler, Rainbows, Halos and Glories.

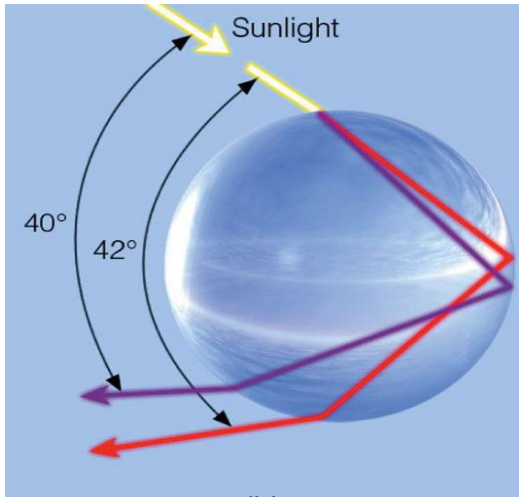


Tato závislost je způsobena tím, že maximum Intenzity vychází pod úhlem minimální odchylky - v tomto případě $\delta(3)_{min}$



Vznik primární duhy (I)



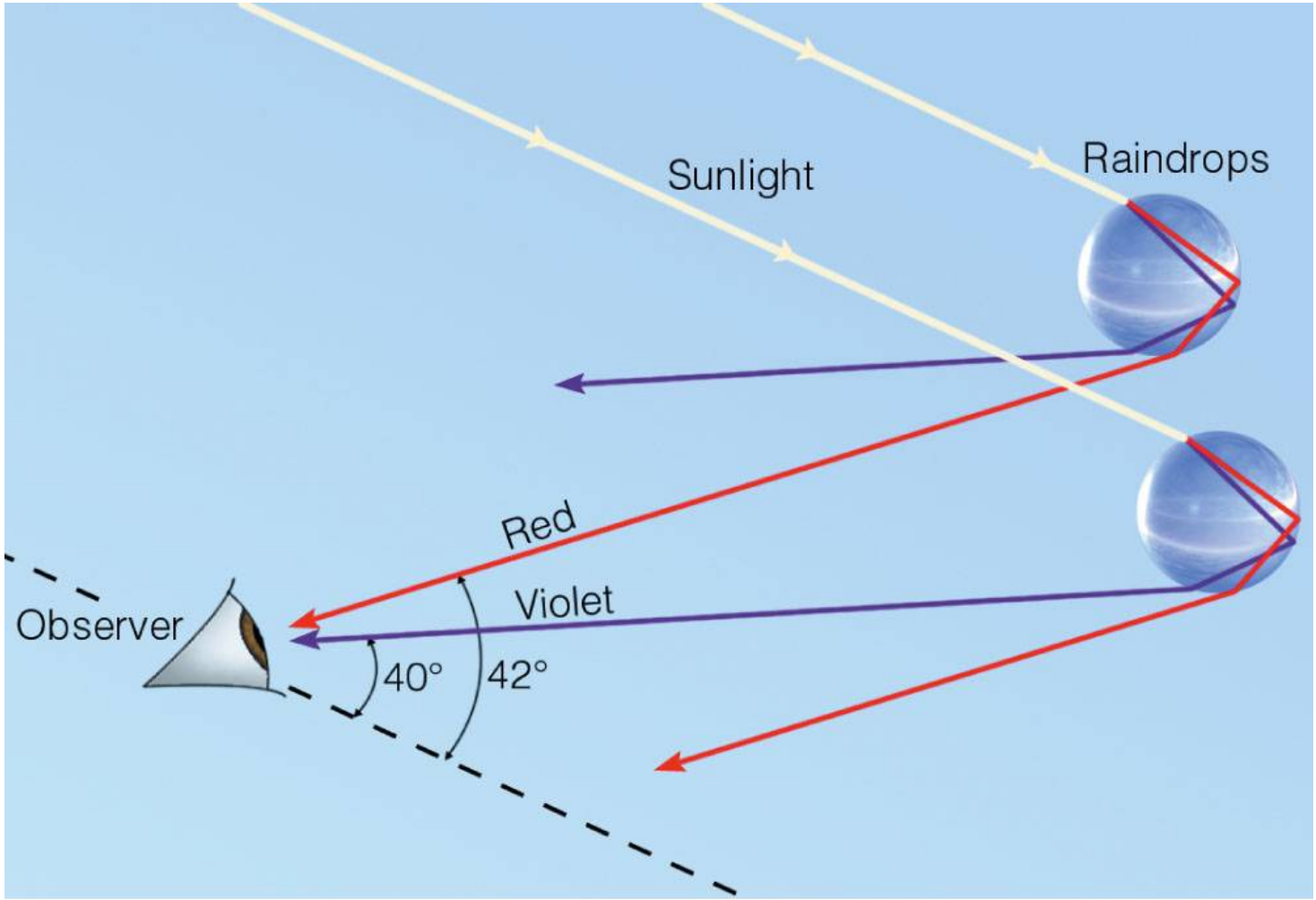






1. **Vidíme bílé světlo**
2. **Nevidíme žádné odražené světlo od kapek**
3. **Vidíme duhu**

Vznik primární duhy (II)



© 2007 Thomson Higher Education

Sekundární duha

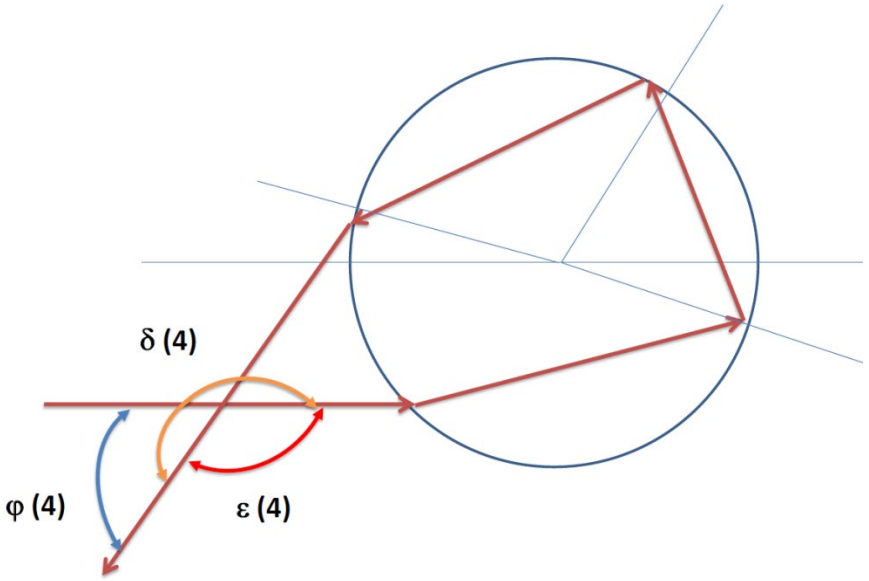
$\delta(p) = (p-2)\pi + \dot{2}(\alpha - (p-1))\beta$

$\delta(\dot{p})$ vždy minimum (pro všechna p)

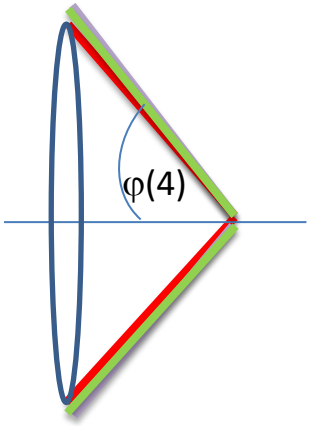
δ(4) …minimum

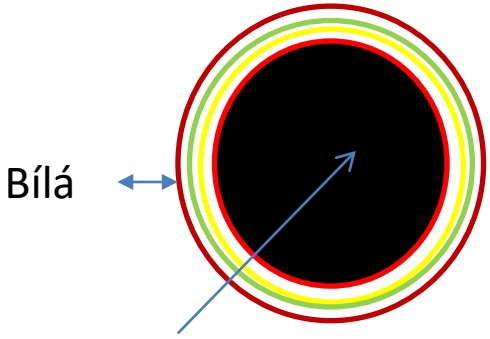
ε(4) …maximum

φ(4) …minimum vs. φ(3) …maximum



φ(4) = 50,37° červená
φ(4) = 53,47° fialová

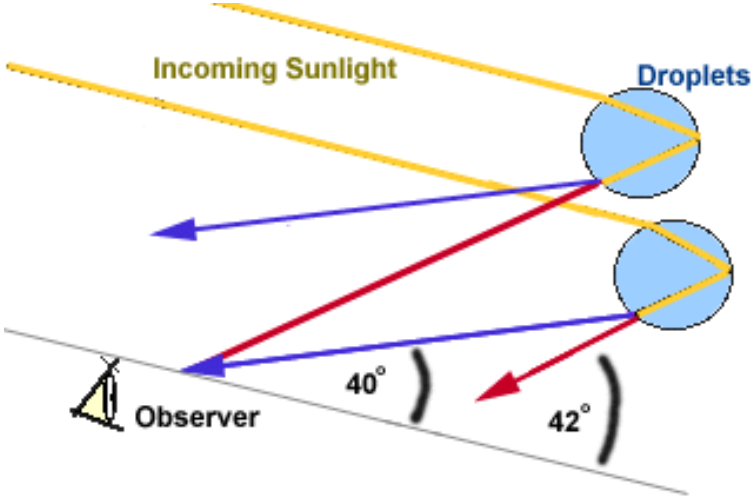


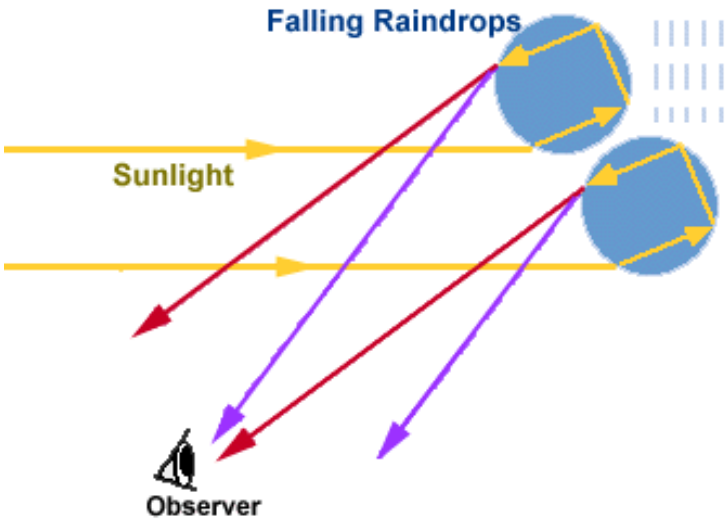


Žádné odražené světlo

Úhlový rozměr 3,1 ° + 0,5 ° (úhlový rozměr slunce)

Odrazy na vodní kapce - shrnutí

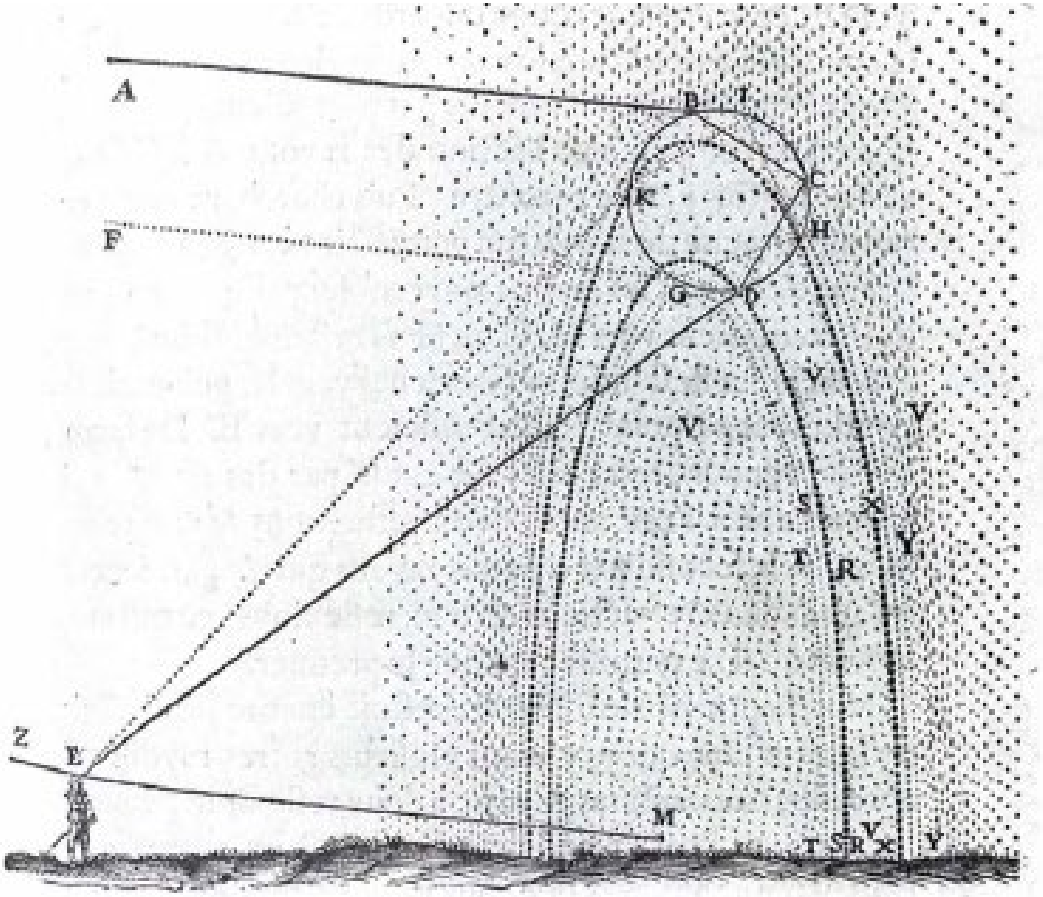




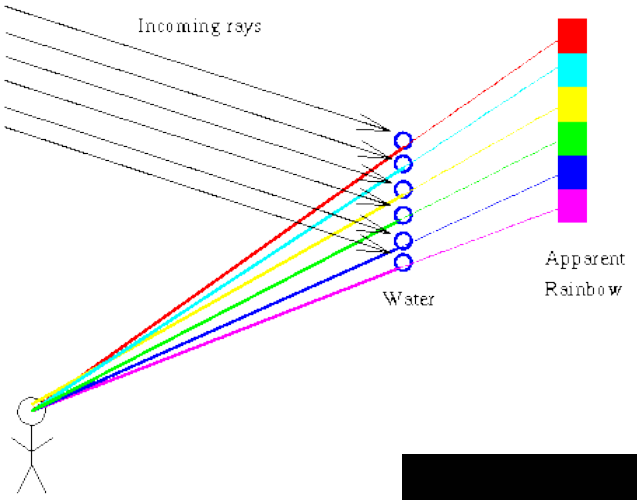
Primární duha – 1 vnitřní odraz,
paprsek dopadá na horní část kapky

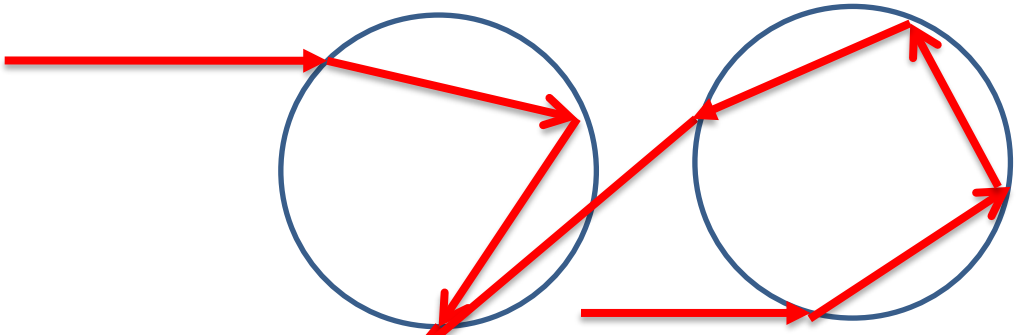
Sekundární duha – 2 vnitřní odrazy,
paprsek dopadá na spodní část kapky

Rene Descartes



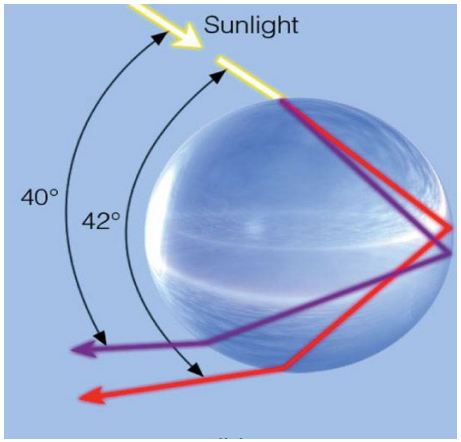
Primární a sekundární duha

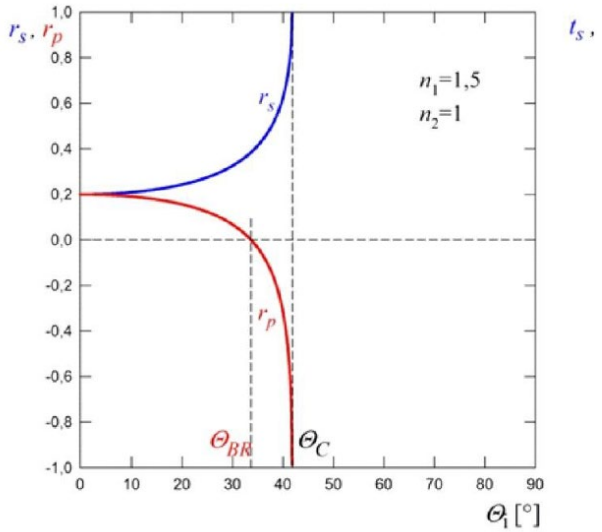


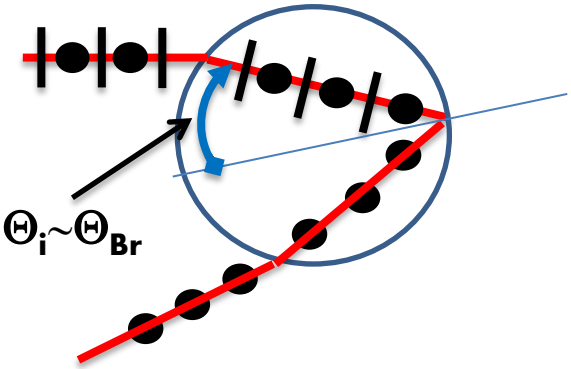




Polarizace duhy

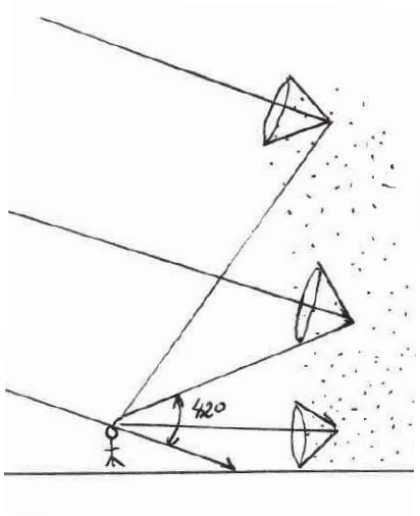


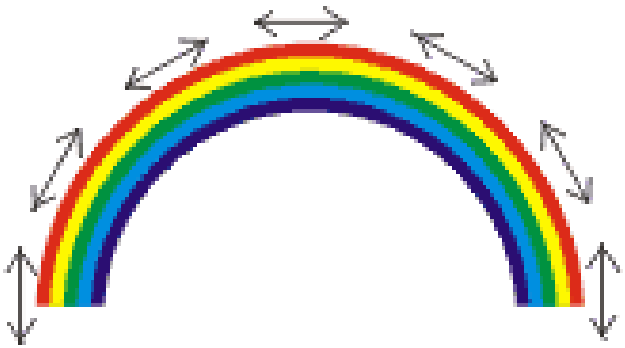




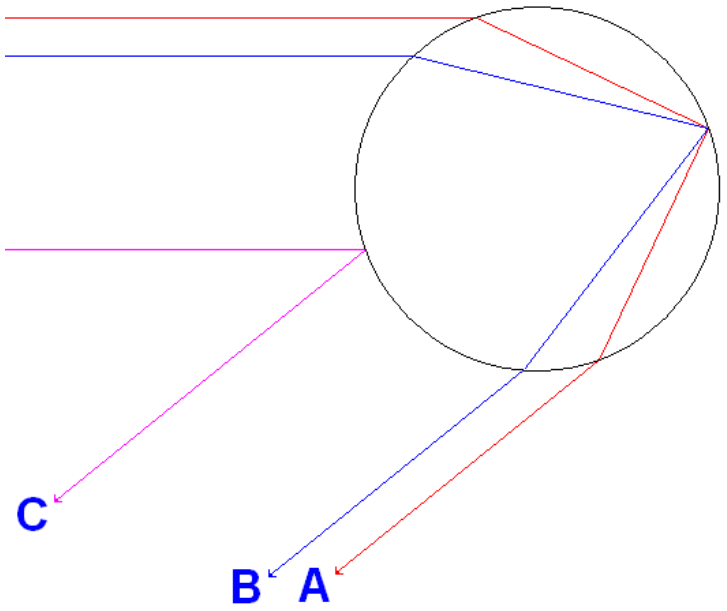
$$tg\Theta_{Br} = \frac{1}{1.336}$$

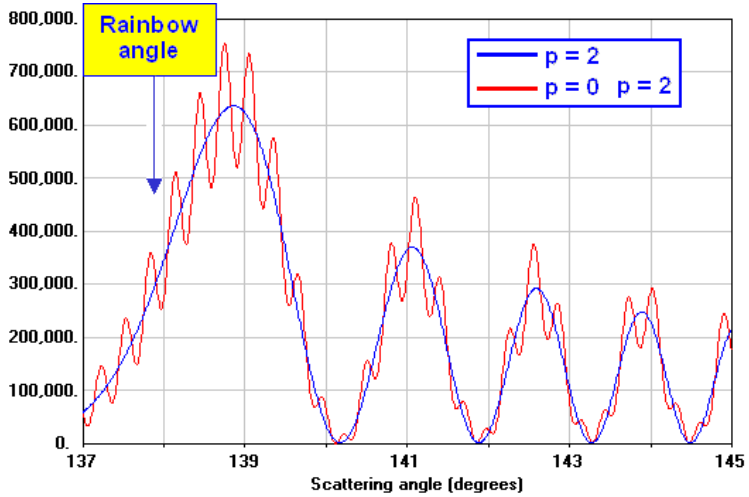
Lomený paprsek dopadá na zadní stěnu kapky pod úhlem blízkým Brewsterovu úhlu. Tím dojde k vysoké míře odrazu složky polarizace kolmé k rovině dopadu





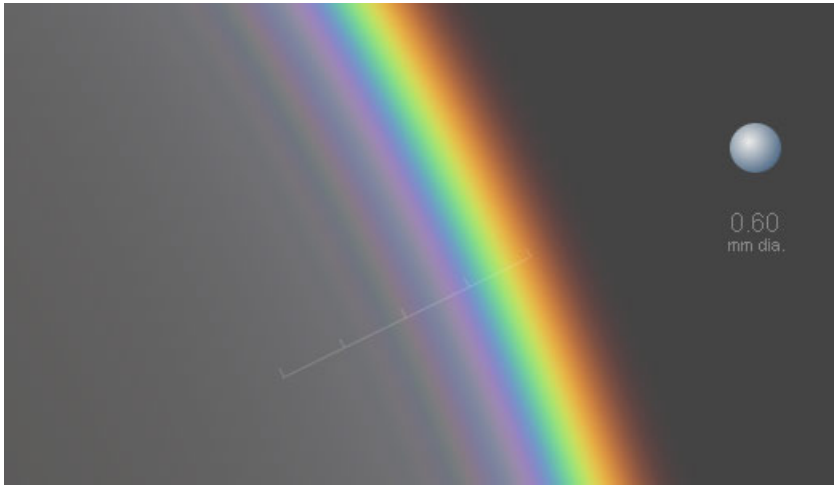
Jemná struktura duhy – podružné oblouky





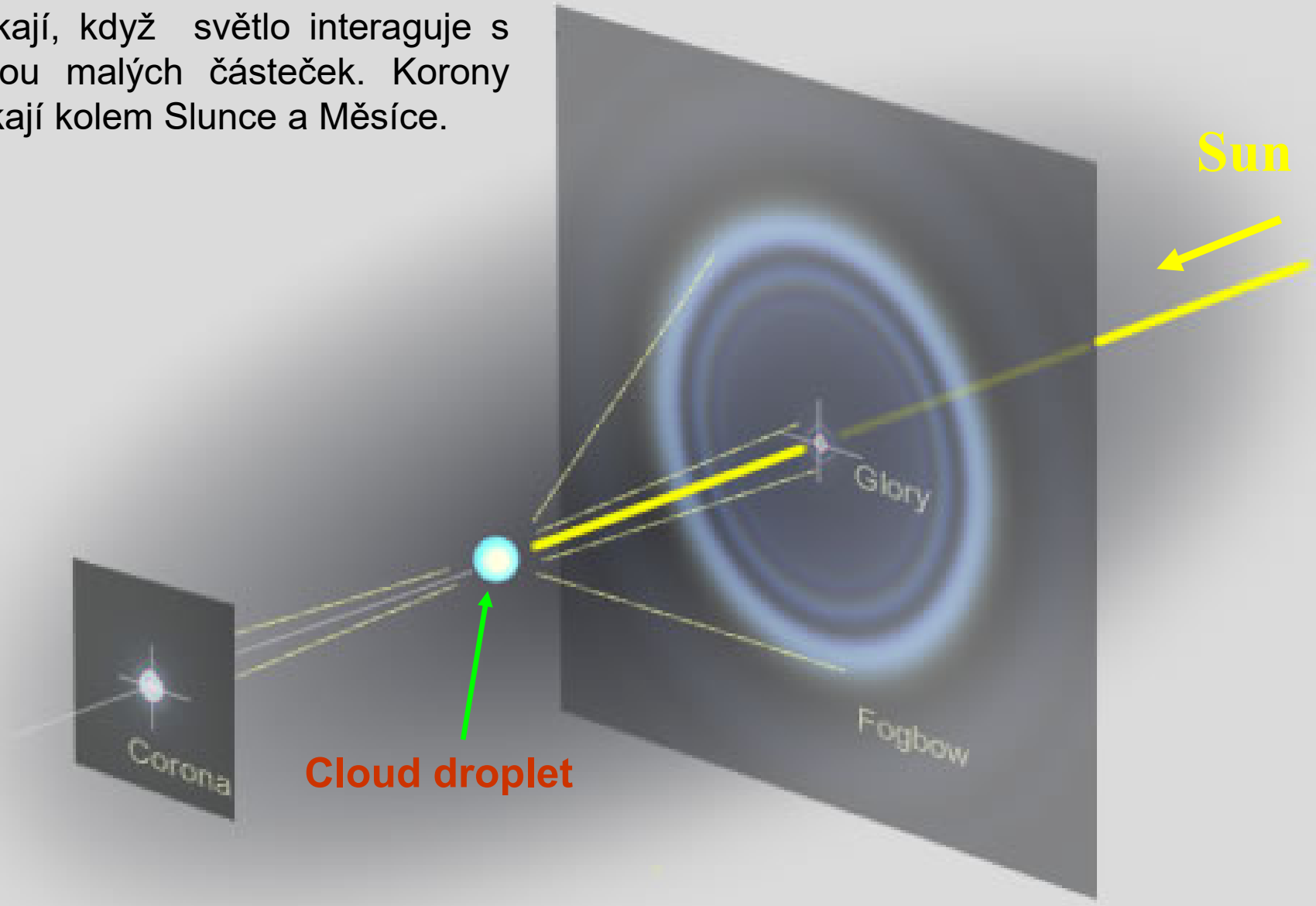
Hlavní maxima a minima vznikají interferencí paprsků A a B. Jemná struktura vzniká interferencí odraženého paprsku C a paprsků A a B.

Tři paprsky interagující s koulí - λ = 0.65 μm a index lomu n = 1.33257



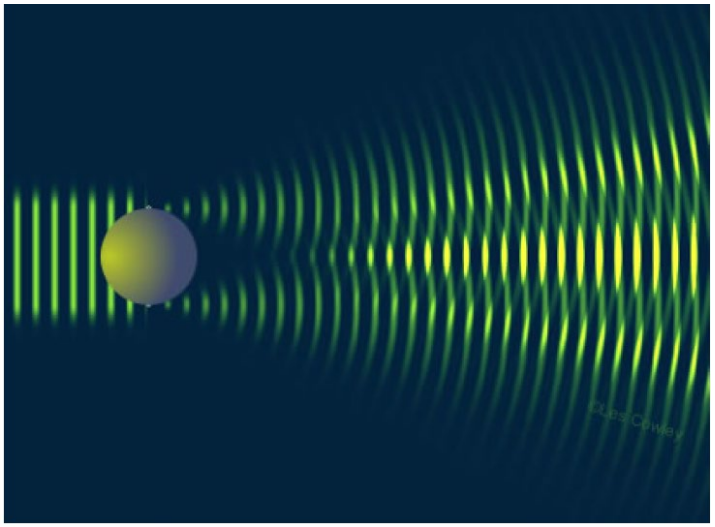
Koróny a glorioly

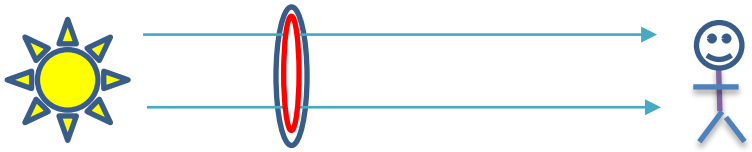
Vznikají, když světlo interaguje s vrstvou malých částeček. Korony vznikají kolem Slunce a Měsíce.

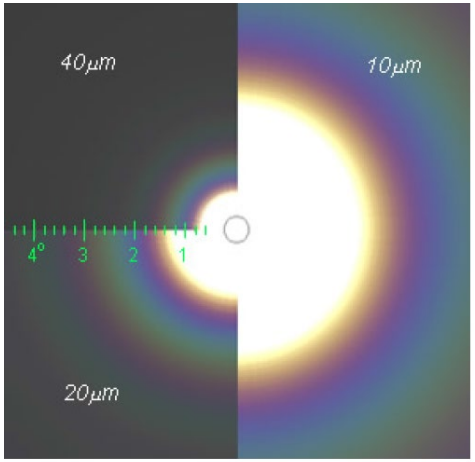



Koróna

Koróna



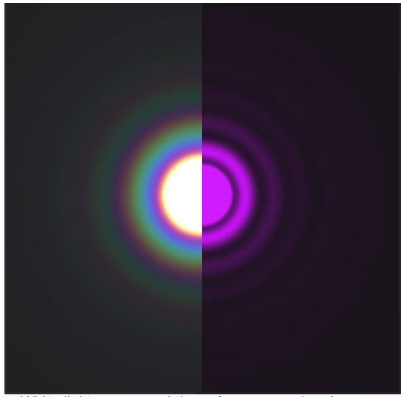


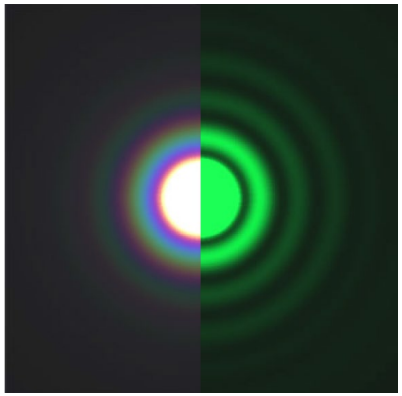


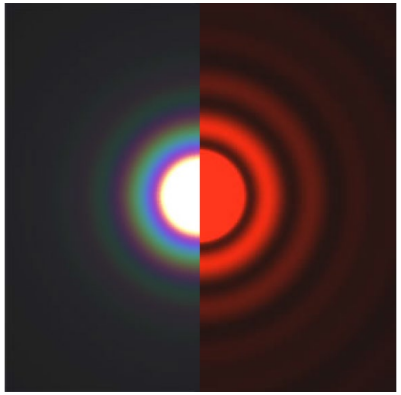
Droplet diameter

Malé kapky vytvářejí větší koróny

Příčinou vzniku koróny je difrakce



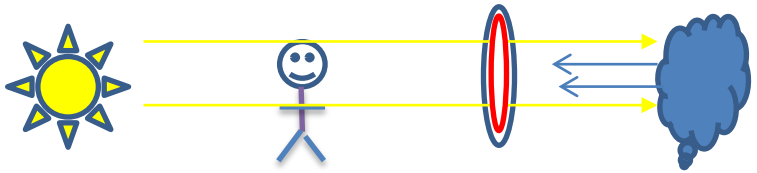




Gloriola

Vzniká však zpětným ohybem světelných paprsků a projevuje se jako slabé soustředné barevné prstence kolem stínů vržených do vrstvy oblačnosti či mlhy.

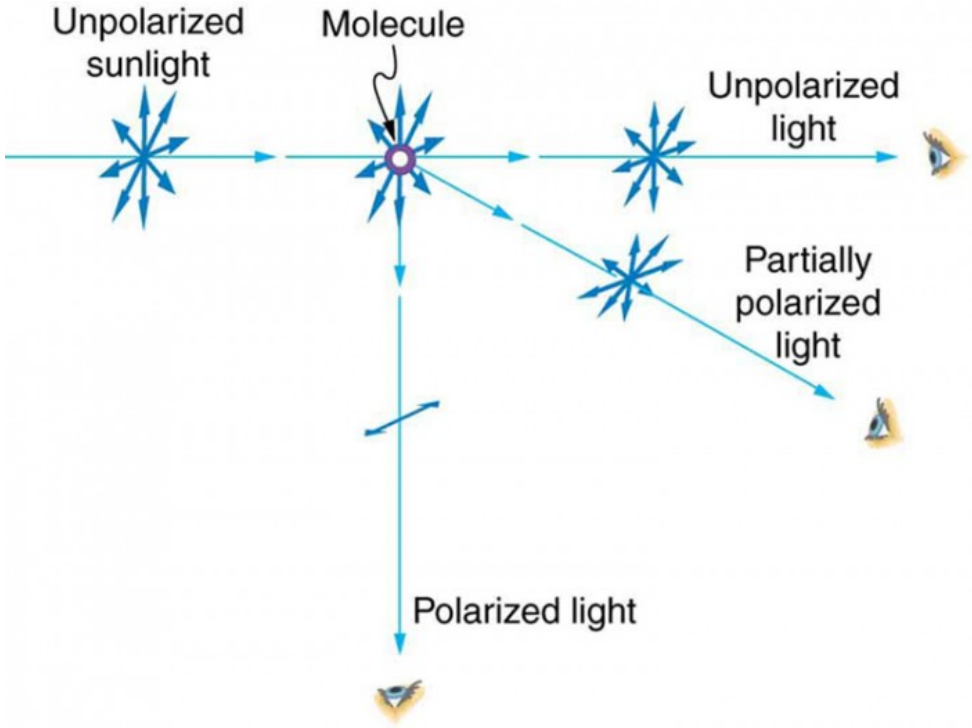






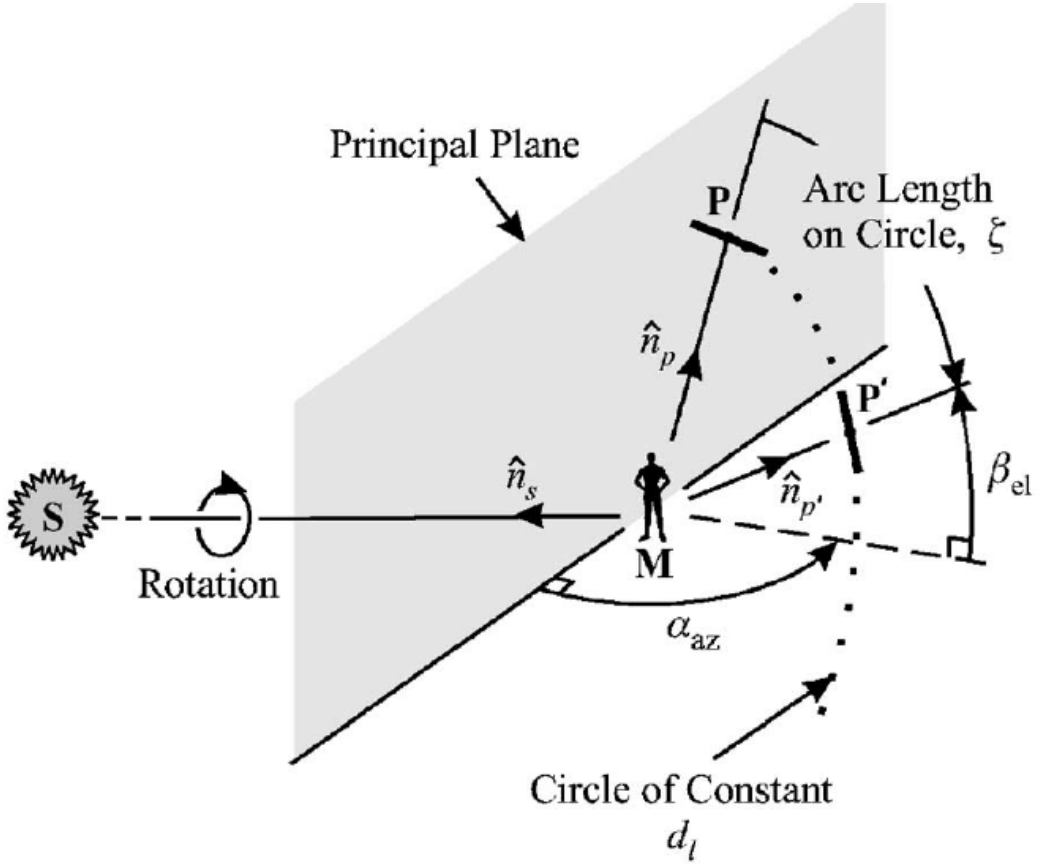


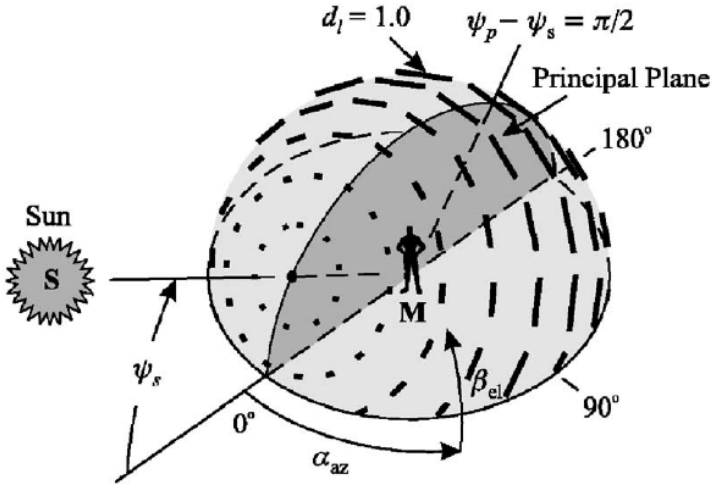
Polarizace rozptylem

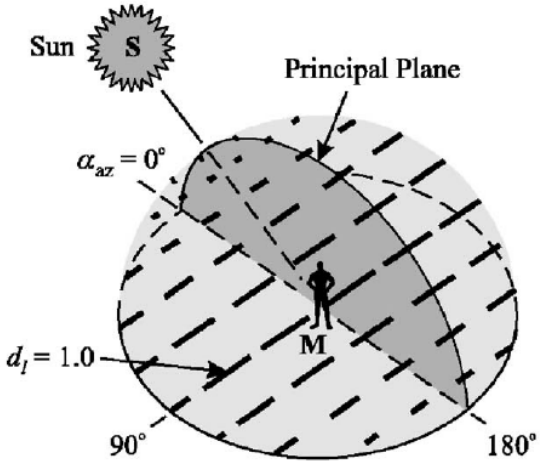


Při polarizaci rozptylem vidíme při pohledu vzhůru kolmo na směr slunečních paprsků téměř úplně polarizované světlo.

Polarizace oblohy





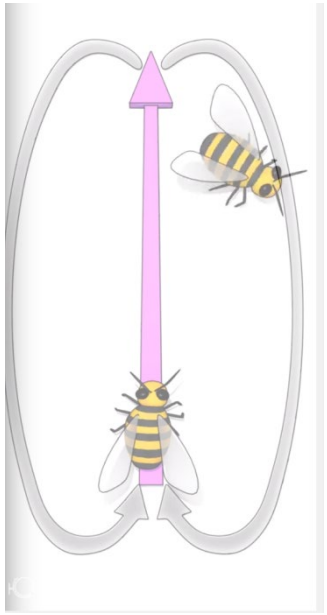


G.Smith, Am.J.Phys. 75(1), 2007

Využití polarizace oblohy k orientaci

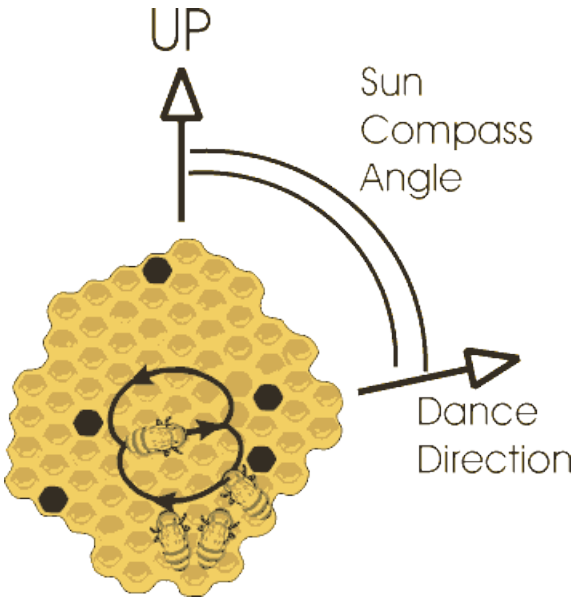
Vikingové – mořeplavba
Včely - sdělení o směru, kde se nachází potrava, orientace v prostoru v případě že není vidět slunce ale je vidět část oblohy

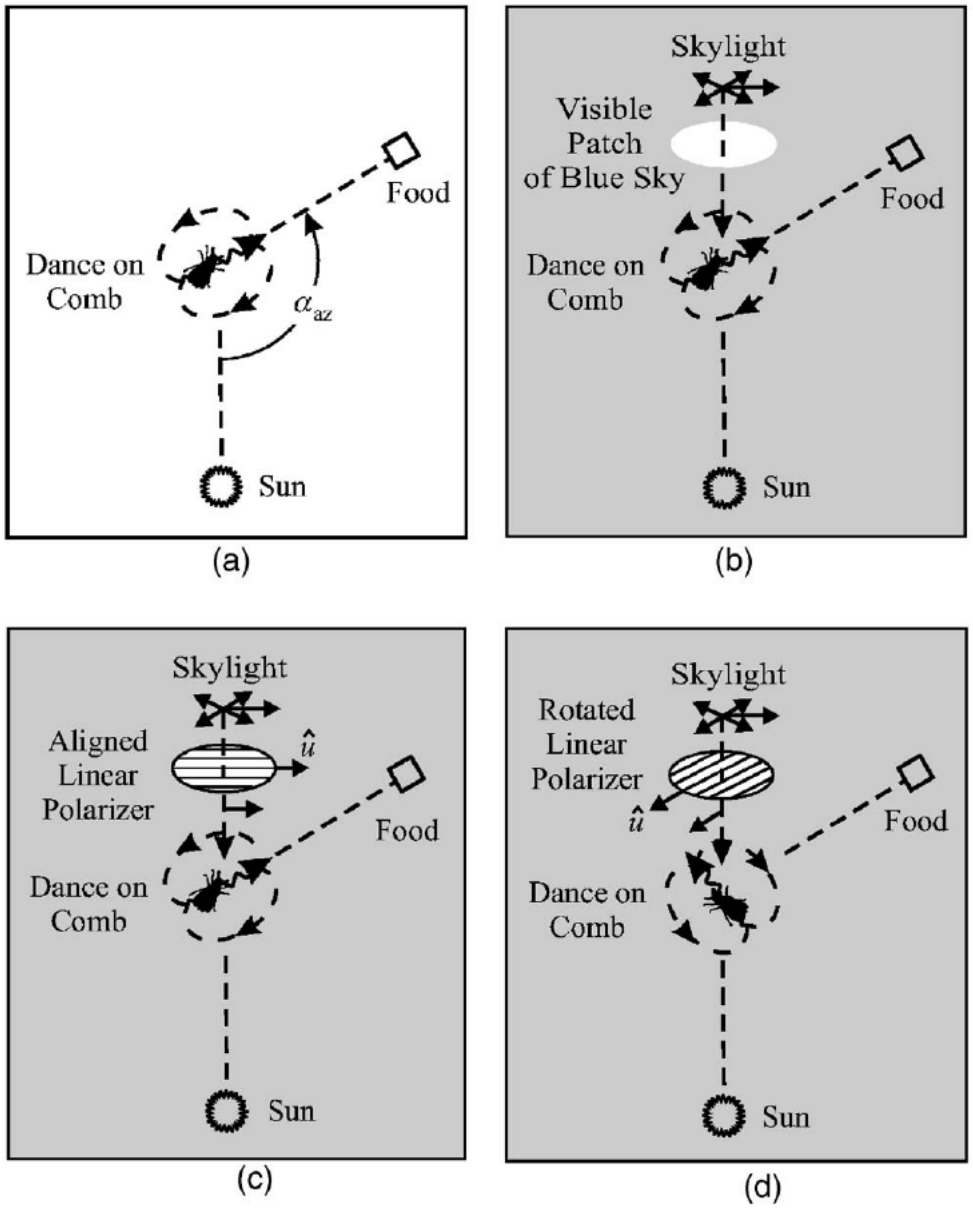
1s ~1km





Směr pohybu vyjadřuje orientaci vůči slunci

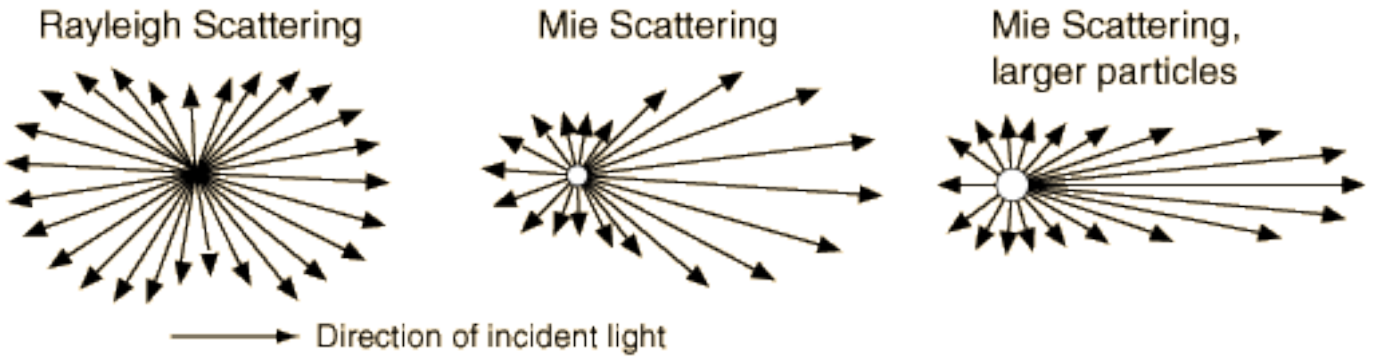




G.Smith, Am.J.Phys. 75(1), 2007

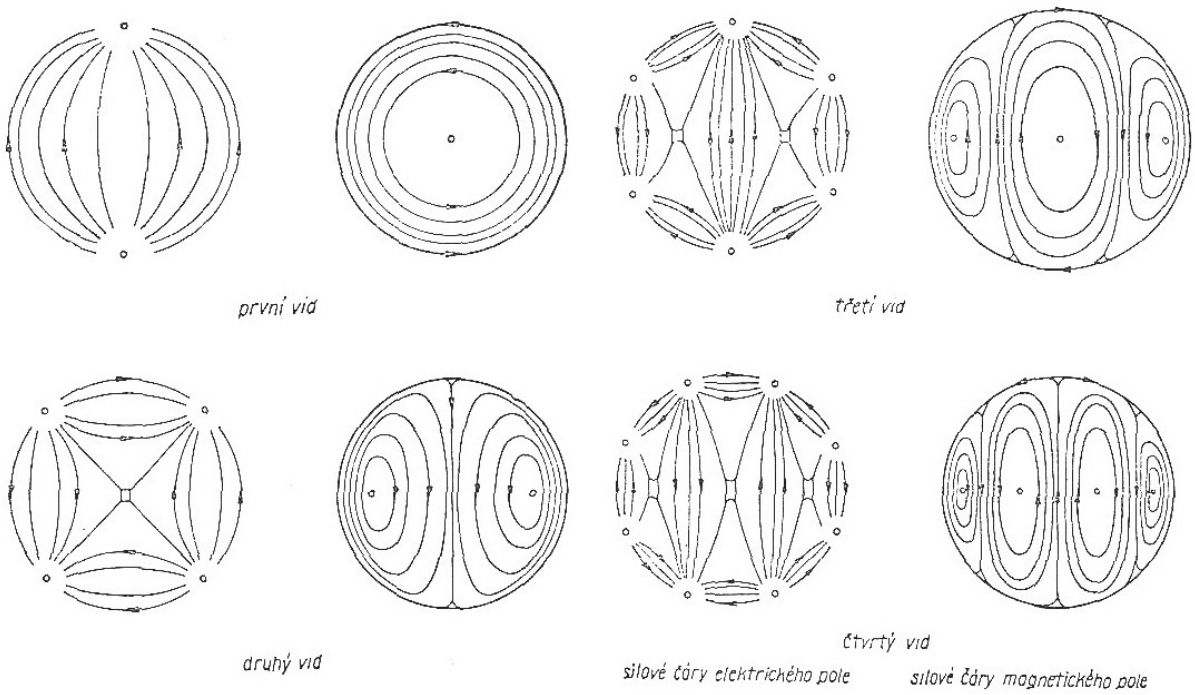
Interakce světla s kapkou - modely

1. $\lambda \gg d$ dipólový model, Rayleighův rozptyl (molekuly)
2. $\lambda \geq d$ Mieho rozptyl (malé kapky)
3. $\lambda \ll d$ geometrický rozptyl (velké kapky, odraz, lom)



Interakce EM záření s koulí – Maxwellovy rovnice

Rozptyl – Mieho teorie (řešení Maxwellových rovnic pro sférickou symetrii)
Debyeovy řady – jiná formulace Mieho teorie



Obr. 112. Silové čáry pole prvních čtyř elektrických vidů.

J.A.Stratton, Teorie elektromagnetického pole, SNTL 1961

Barva oblohy

Rayleighův rozptyl na molekulách + fluktuace koncentrace molekul na prostorové škále ~λ

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 \alpha^2}{\lambda^4 R^2}\left(1+\cos^2\Theta\right)$$

Rayleighův rozptyl na jedné osamocené molekule:
rozměr molekuly <<λ
dopadající nepolarizované záření
polarizovatelnost
vzdálenost od molekuly
úhel rozptylu

Ideálně homogenní prostředí: rozptýlené vlny se navzájem vyruší a pokračuje pouze původní vlna s indexem lomu; žádný rozptyl.

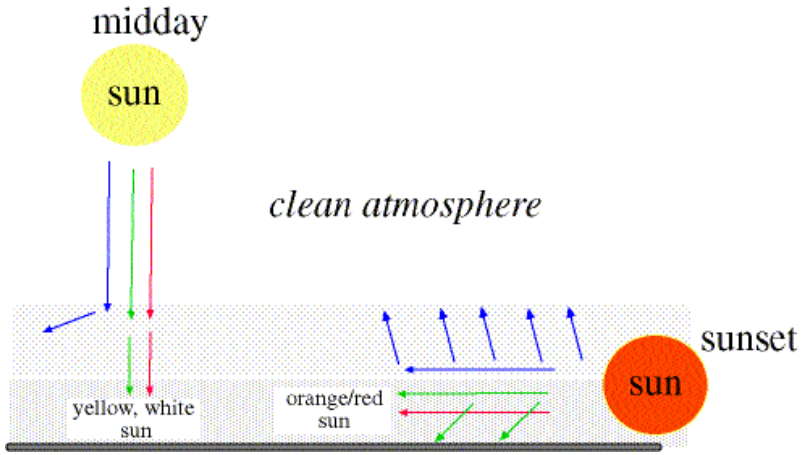
Pro „makroskopický“ rozptyl nutná nehomogenita = fluktuace v koncentraci molekul =fluktuace indexu lomu
Z hlediska modelu spojitého prostředí: přidání „zdroje“ do vlnové rovnice

Rayleighův rozptyl

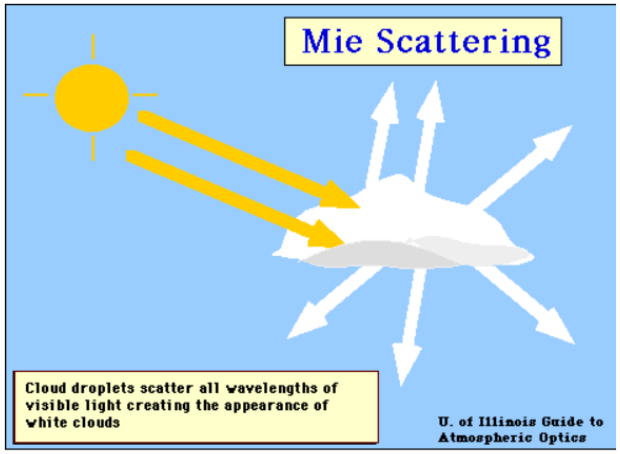


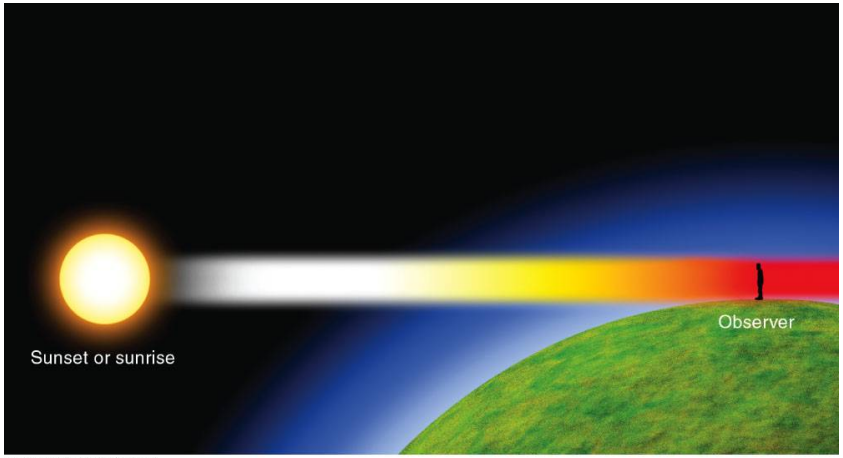
Rozptyl světla v atmosféře

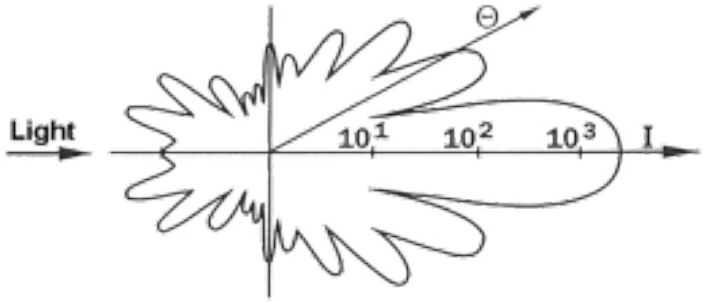
Rayleighův rozptyl – modrá obloha, červánky



Mieho rozptyl – bílá oblaka







Index lomu vzduchu

$$\frac{n-1}{n_0-1}=\frac{\rho}{\rho_0} \qquad \frac{p}{\rho}=RT$$

závisí na hustotě, tj. na teplotě a tlaku

$n(T,p)$ pomocí $n_0(T_0,p_0)$

$$\frac{n-1}{n_0-1}=\frac{p}{p_0}\frac{T_0}{T}$$

$$\frac{\partial p}{\partial h}=-g\rho$$

$$\frac{\partial n}{\partial h}=-(n_0-1)\frac{T_0}{T^2}\frac{p}{p_0}\left(\frac{g}{R}+\frac{\partial T}{\partial h}\right)$$

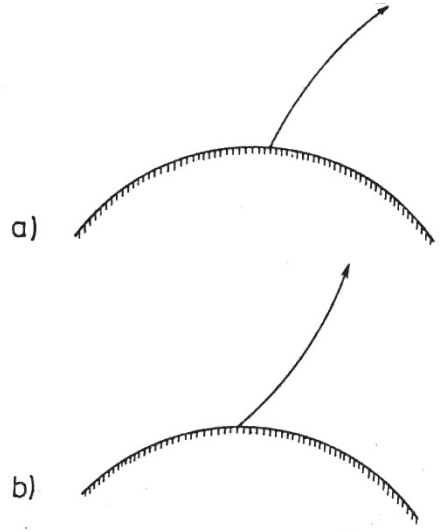
$g/R = 0{,}0342\ \mathrm{K.m^{-1}}$, (3,42 K / 100 m)

Standardní atmosféra – pokles o 0.65 K / 100m

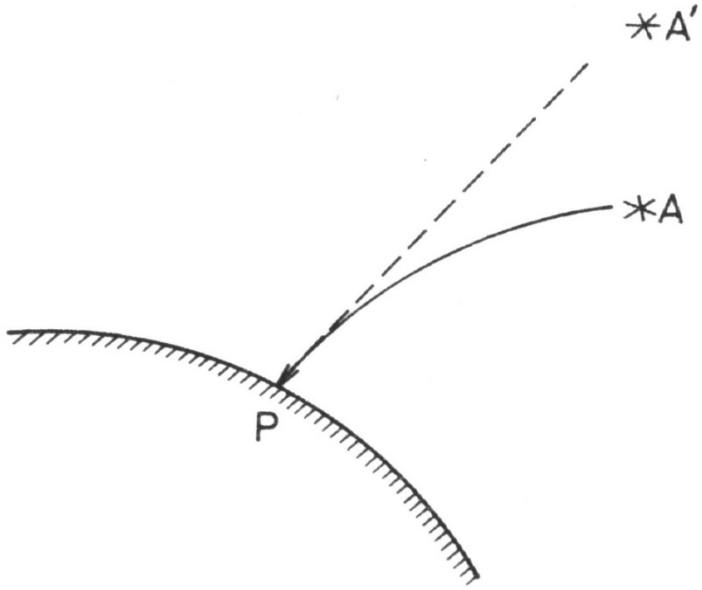
Je-li tento člen kladný, index lomu s výškou klesá. To nastává, roste-li teplota s výškou nebo klesá-li pomaleji než 3.42 K/100m. Při postupu paprsku vzhůru dochází k lomu od kolmice, může nastat totální odraz a svrchní zrcadlení.

Je-li tento člen záporný, index lomu s výškou roste. To nastává, klesá-li teplota s výškou rychleji než 3.42K/100m – spodní zrcadlení. Při postupu paprsku dolů dochází k lomu od kolmice, může nastat totální odraz a spodní zrcadlení.

Trajektorie světelných paprsků v atmosféře



4.2 Zakřivení trajektorie světelného paprsku v atmosféře; a) v případě poklesu hustoty vzduchu s b) v anomálním případě inverze hustoty vzduchu.



4.4 Vznik astronomické refrakce.

J. Bednář, Pozoruhodné jevy v atmosféře, Academia, 1989

Dráha paprsku –

závislost indexu lomu ve velké prostorové škále, geometrická optika

Obecně: paprsková rovnice

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[n(\mathbf{r}(s)).\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}s}\right] = \text{grad } n(\mathbf{r}(s))$$

$\mathbf{r}(s)$ dráha paprsku jako funkce parametru s

$n(\mathbf{r})$ prostorová závislost indexu lomu

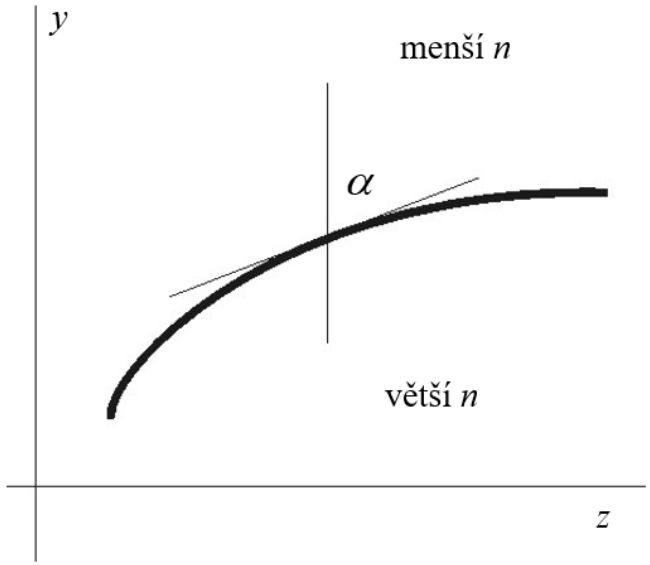
Případ $n(y)$

α úhel mezi tečnou k paprsku a směrem grad n

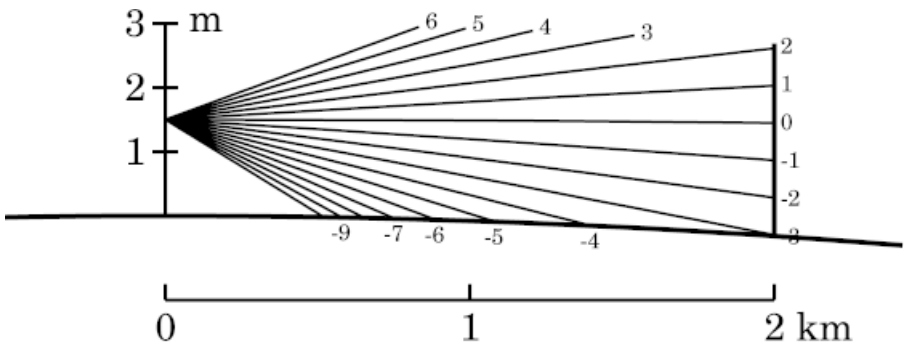
lokální křivost paprsku

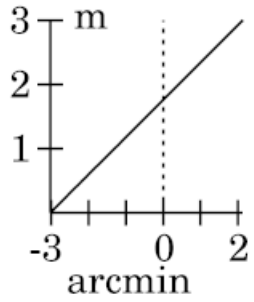
$$1/r_{\text{oskul}} = K = -\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}y}\frac{\sin\alpha}{n}$$

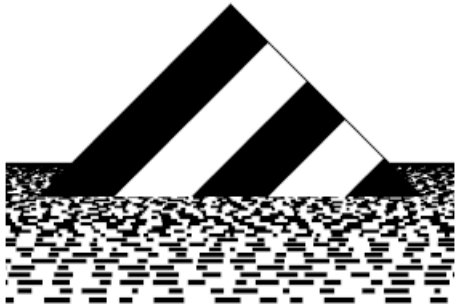
Paprsek je „vtahován“ do oblasti s vyšším n



Zobrazení – přenosová funkce







Pozorovatel ve výšce 1.5m

Cíl vysoký 2m ve vzdálenosti 1km

Zakřivení paprsků v důsledku

změn indexu lomu nepatrné

Přenosová funkce je závislost výšky místa ze kterého vstupují paprsky do oka na úhlu pod kterým dané místo vidí pozorovatel

http://www-rohan.sdsu.edu/~aty/mirages/mirsims/inf-mir/inf-mir.html

Svrchní zrcadlení

Pokud teplota stoupá s výškou (index lomu s výškou klesá) pozorujeme invertované obrazy protože světelné paprsky se lámou dolů při průchodu teplejším vzduchem který má menší index lomu.

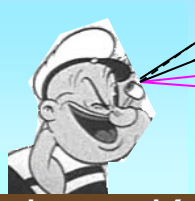
Někdy se těmto jevům říká **Fata Morgana**



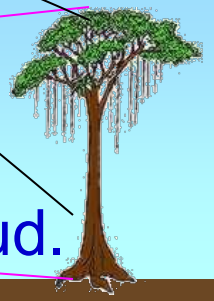
A způsobí invertovaný obraz nahoře na obloze

Teplý vzduch

Světelné paprsky se lámou dolů



Ve vrstvě vzduchu s konstantní teplotou (indexem lomu) je objekt zobrazen normálně



Stud.

Paprsky se lámou více tam kde je větší gradient teploty

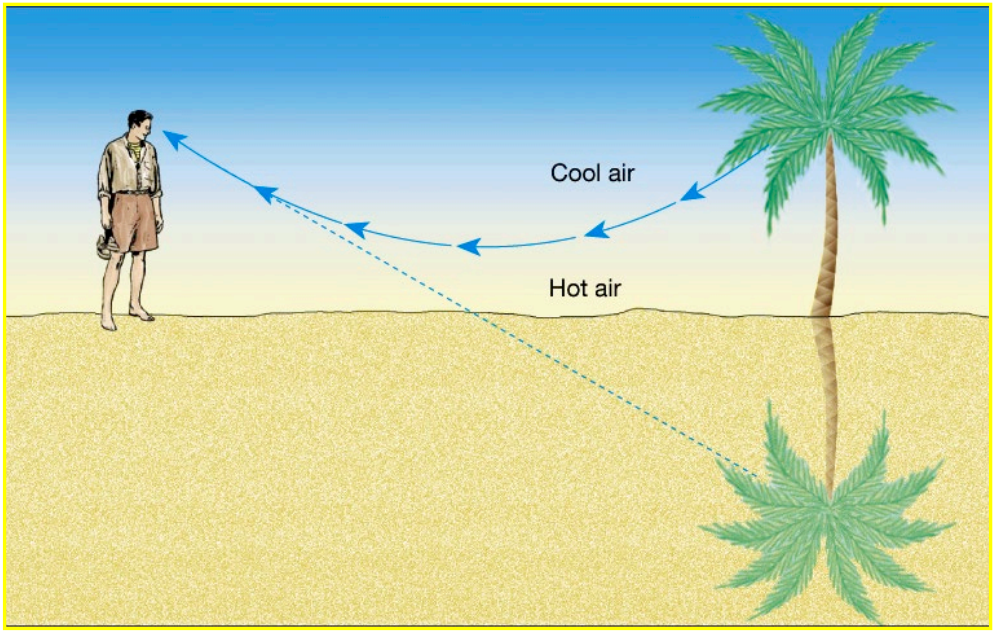
T →

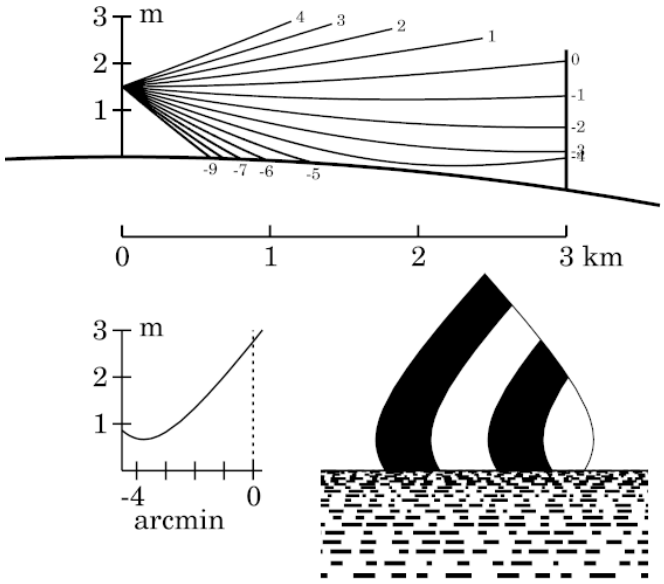
Příklad spodního zrcadlení

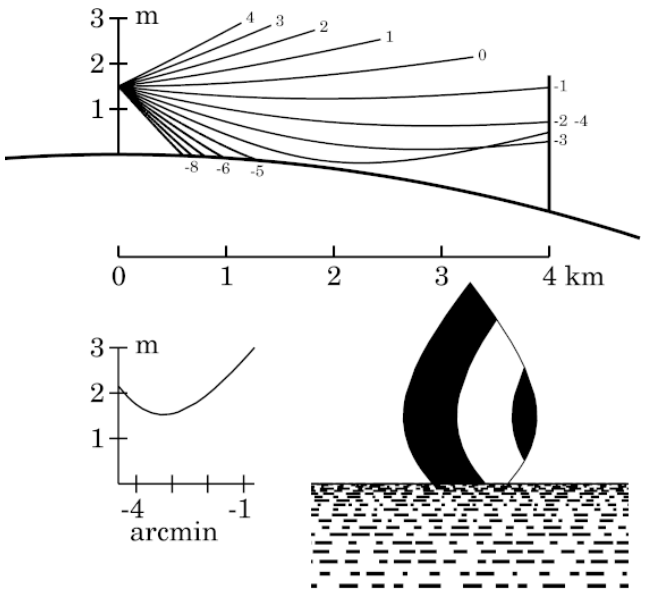
Pokud teplota rychle klesá s výškou

(index lomu s výškou roste)

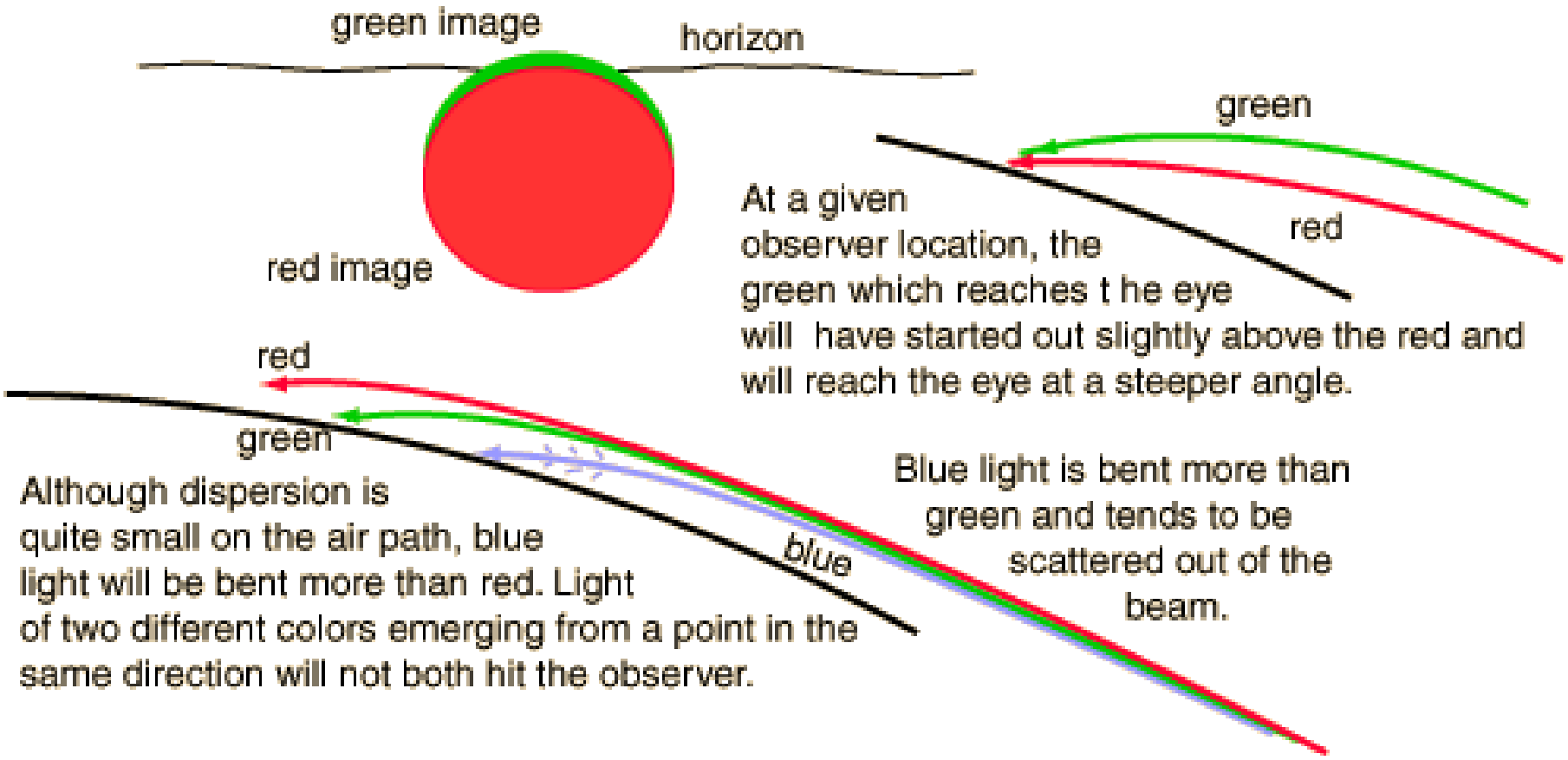
pozorujeme spodní zrcadlení

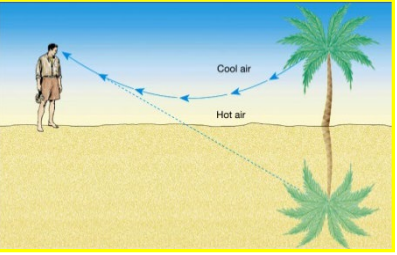




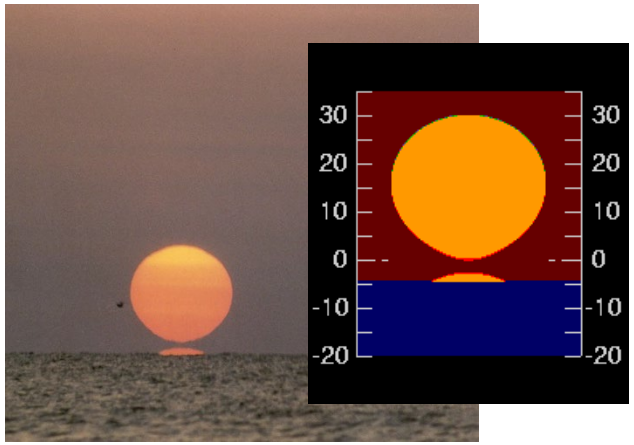


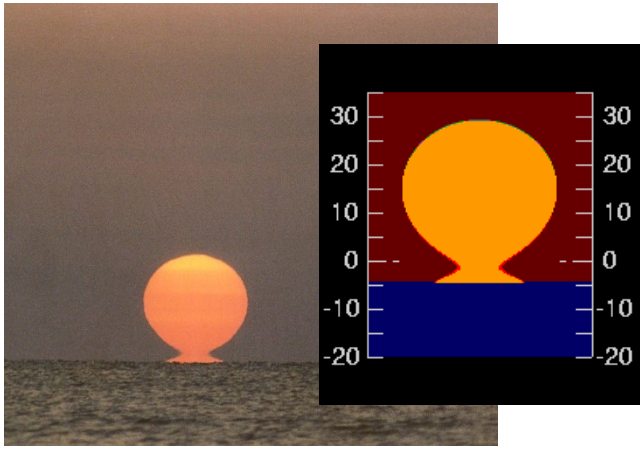
Zelený záblesk

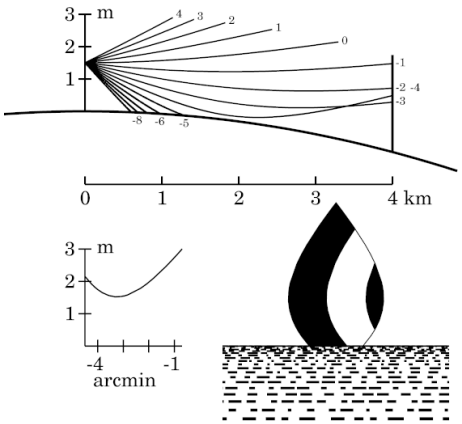


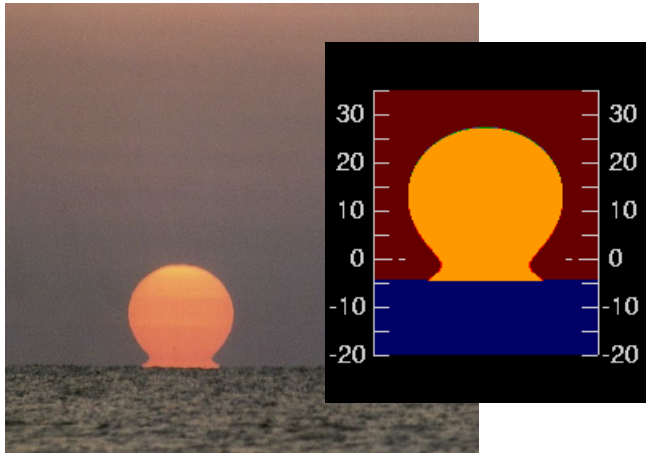


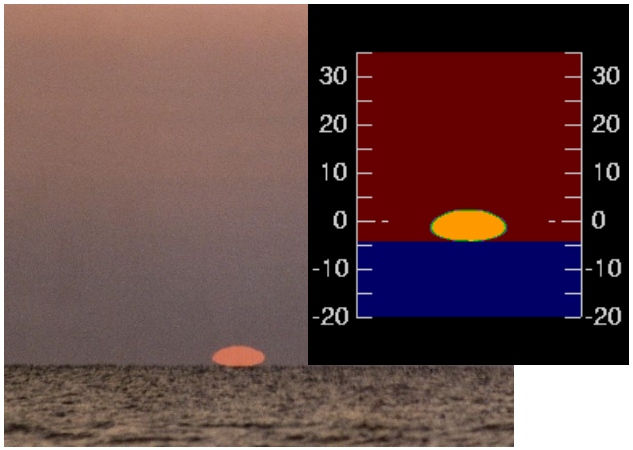
Západ slunce se spodním zrcadlením - zelený záblesk

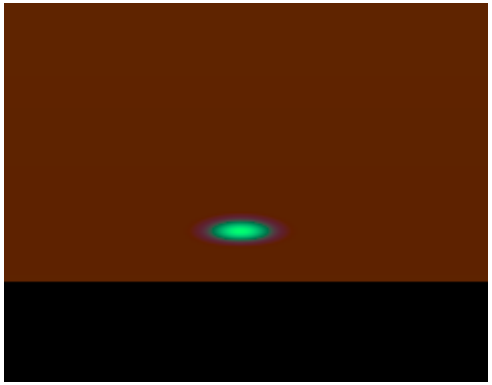










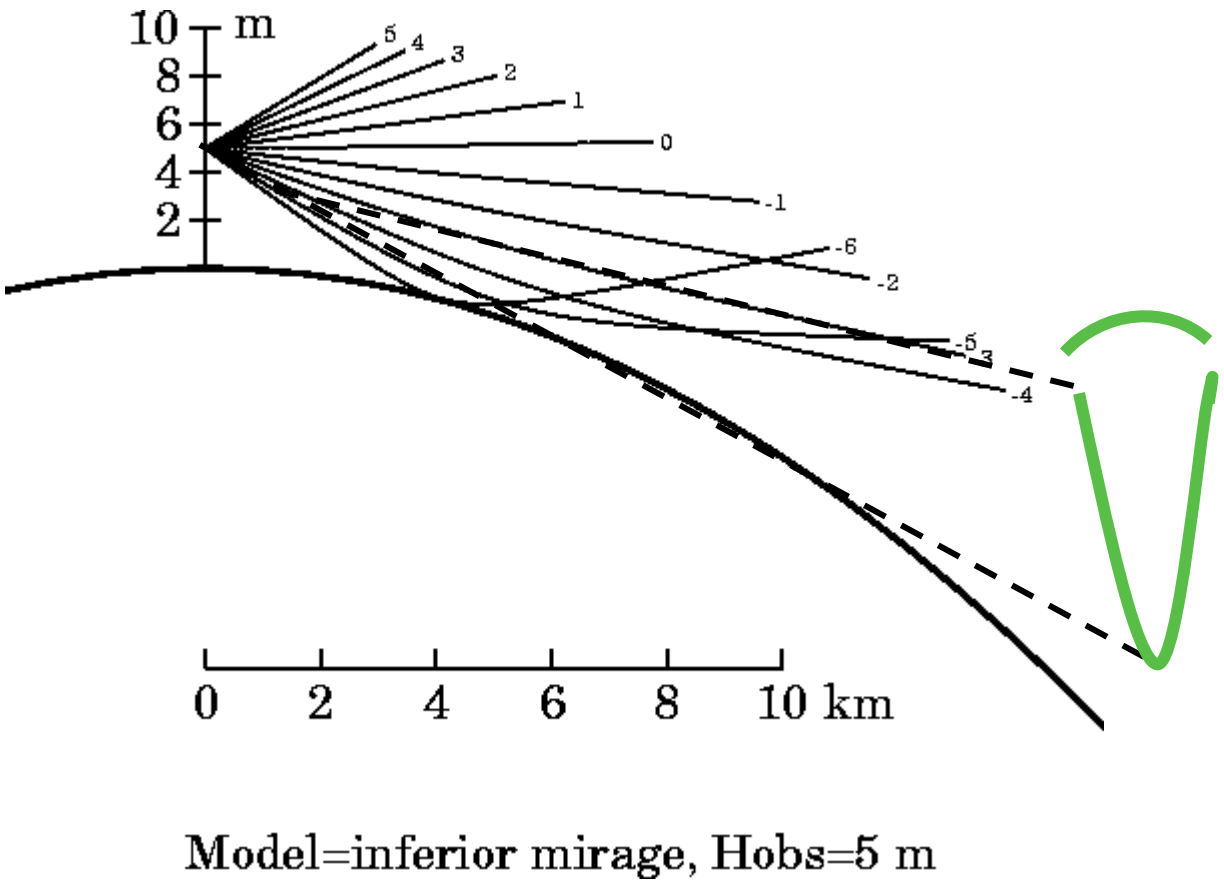




A perfect Green Flash Sunset.mp4

http://www-rohan.sdsu.edu

Zvětšení při spodním zrcadlení



Model=inferior mirage, Hobs=5 m

Paprsek vstupující do oka pod úhlem -5 přináší v důsledku lomu informaci o předmětu z místa ležícího nad paprsky -3 a -4. Dochází tedy k inverznímu zobrazení spojenému se zvětšením invertovaného obrazu.



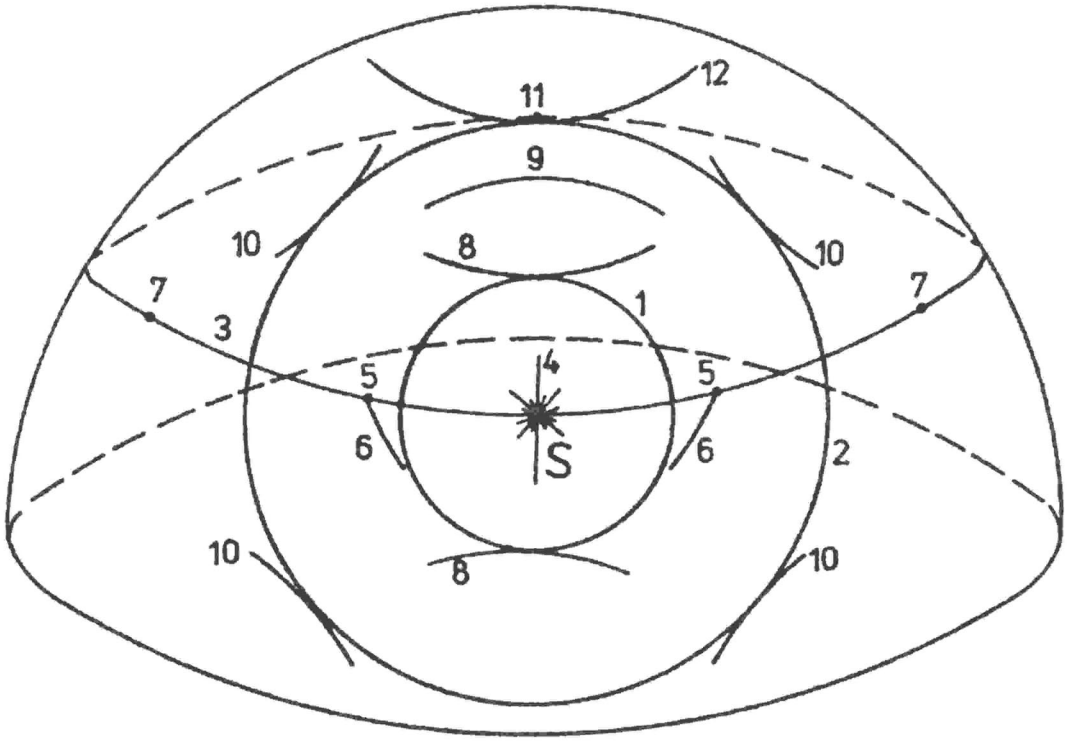
Halové jevy


circumzenithal arc
46° arc
tangent arc
22° arc
parhelic circl
sun dogs

Hlavní halové jevy

Hlavní halové jevy

odraz a lom na ledových krystalcích



4.20 Hlavní halové jevy.

1	malé halo 22°
2	velké halo 46°
3	horizontální kruh
4	halový sloup
5	parhelia (boční slunce malého hala)
6	Lowitzovy oblouky
7	paranthelia 120°
8	dolní a horní dotykový oblouk
9	Parryho oblouk
10	dotykové oblouky velkého hala
11	antihelium (protislunce na zadní straně horizontálního kruhu)
12	cirkumzenitální oblouk

J. Bednář, Pozoruhodné jevy v atmosféře, Academia, 1989

Horní a dolní sloup



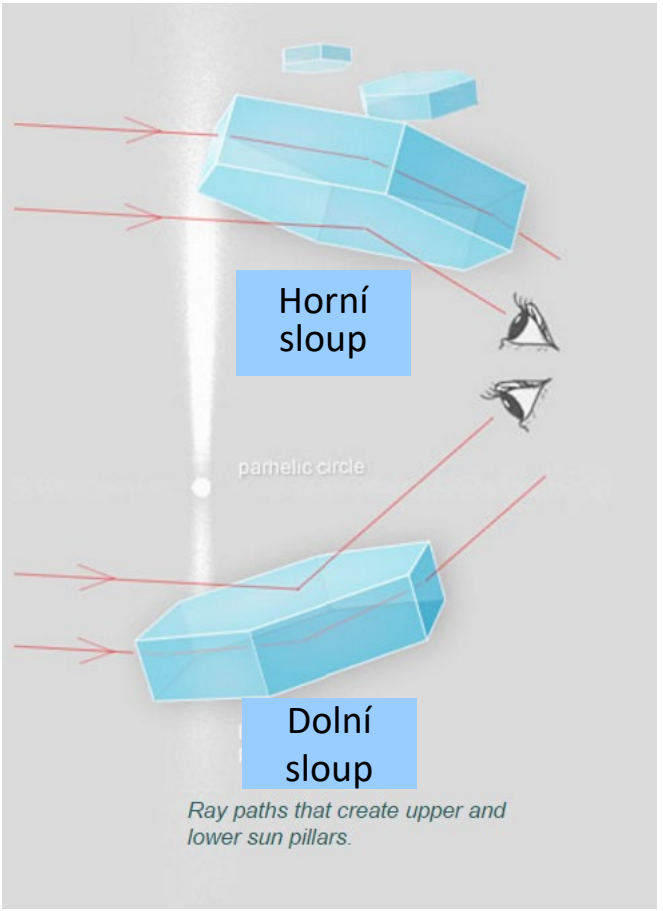
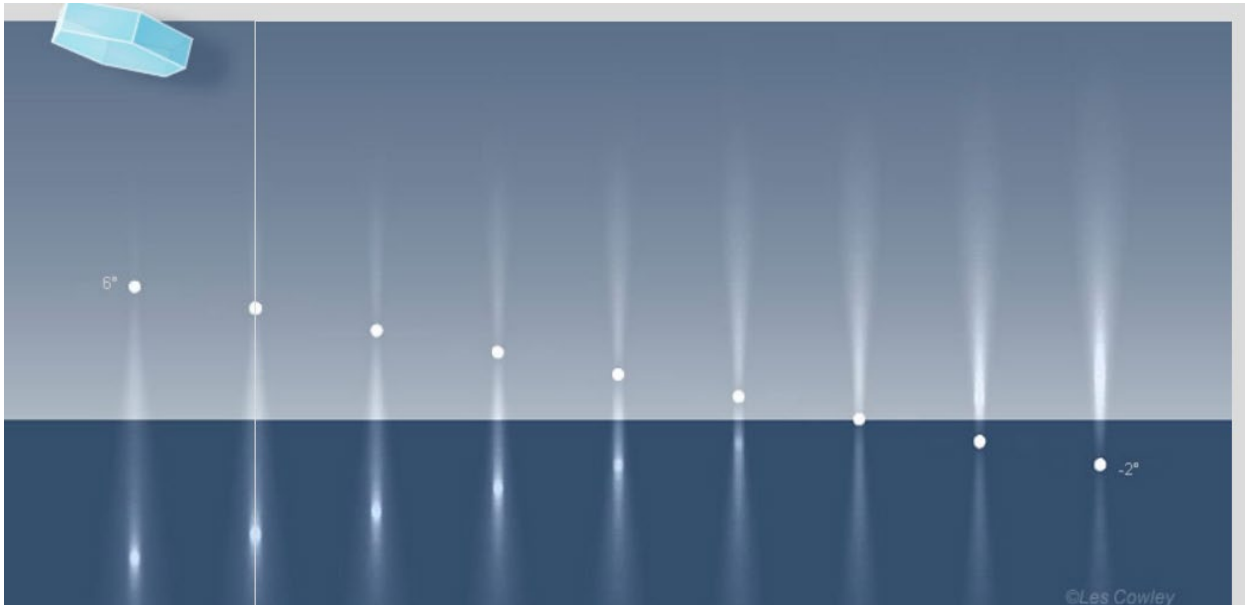


Plate-like ice crystals



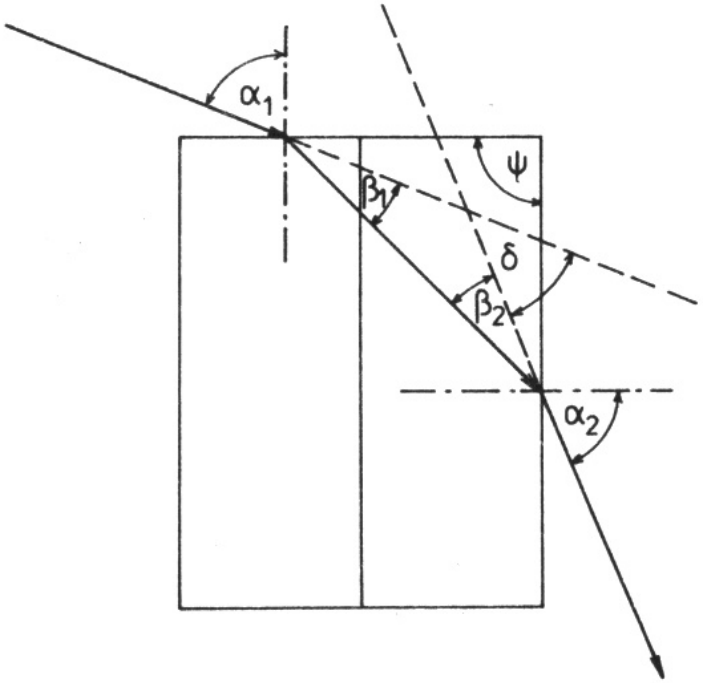
Horní a dolní sloup





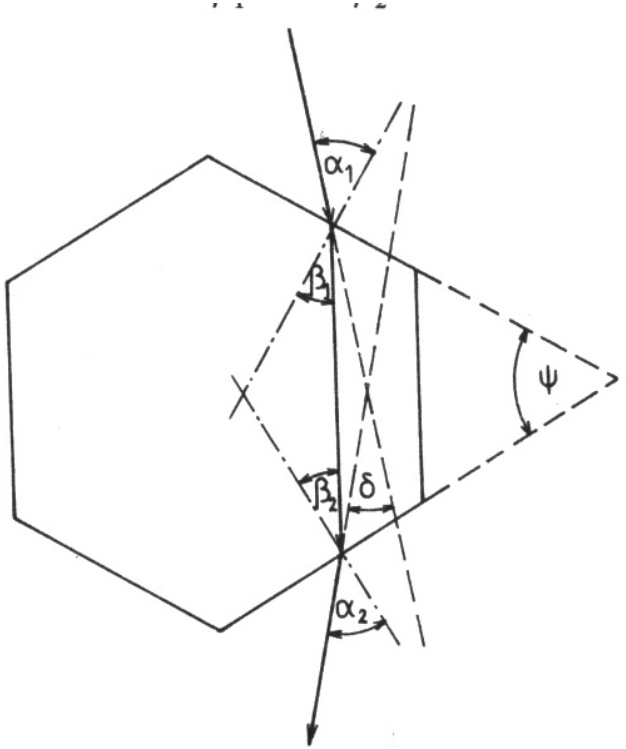
Malé a velké halo

Velké halo



4.24 Lom slunečních paprsků podílejících se na vzniku velkého hala.

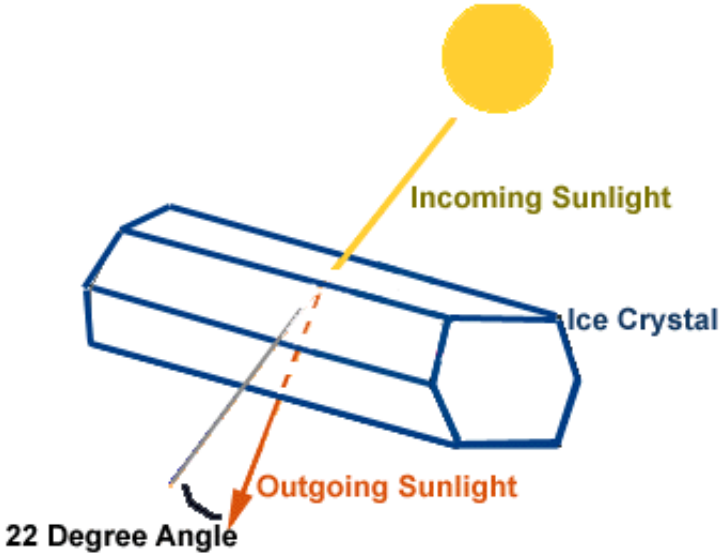
Malé halo

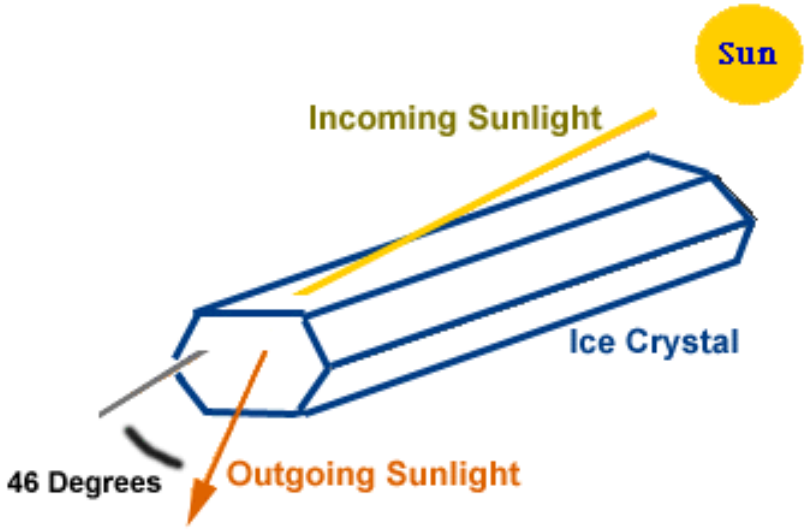


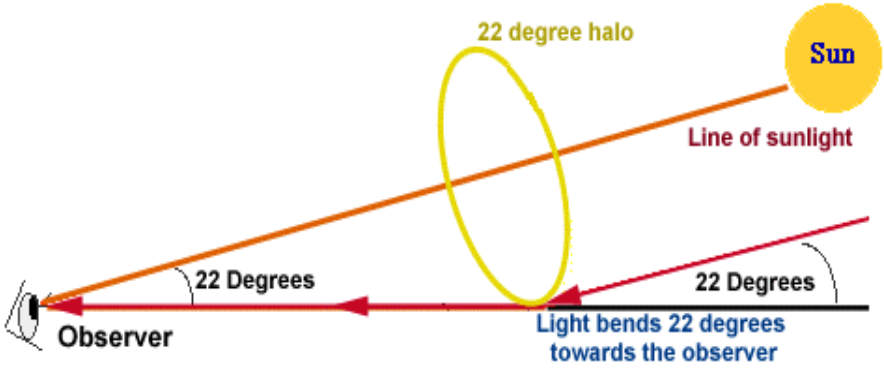
4.23 Lom slunečních paprsku podílejících se na vzniku malého hala.

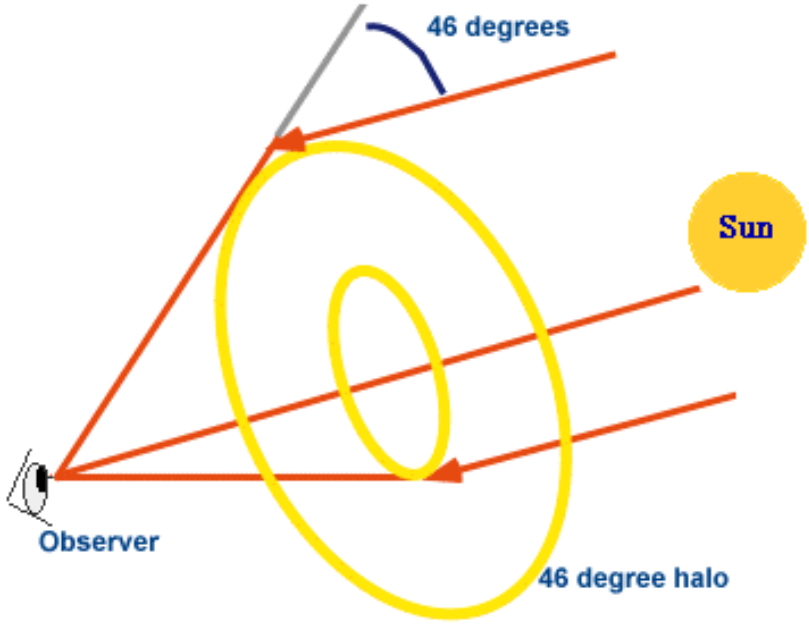
J. Bednář, Pozoruhodné jevy v atmosféře, Academia, 1989

Malé a velké halo









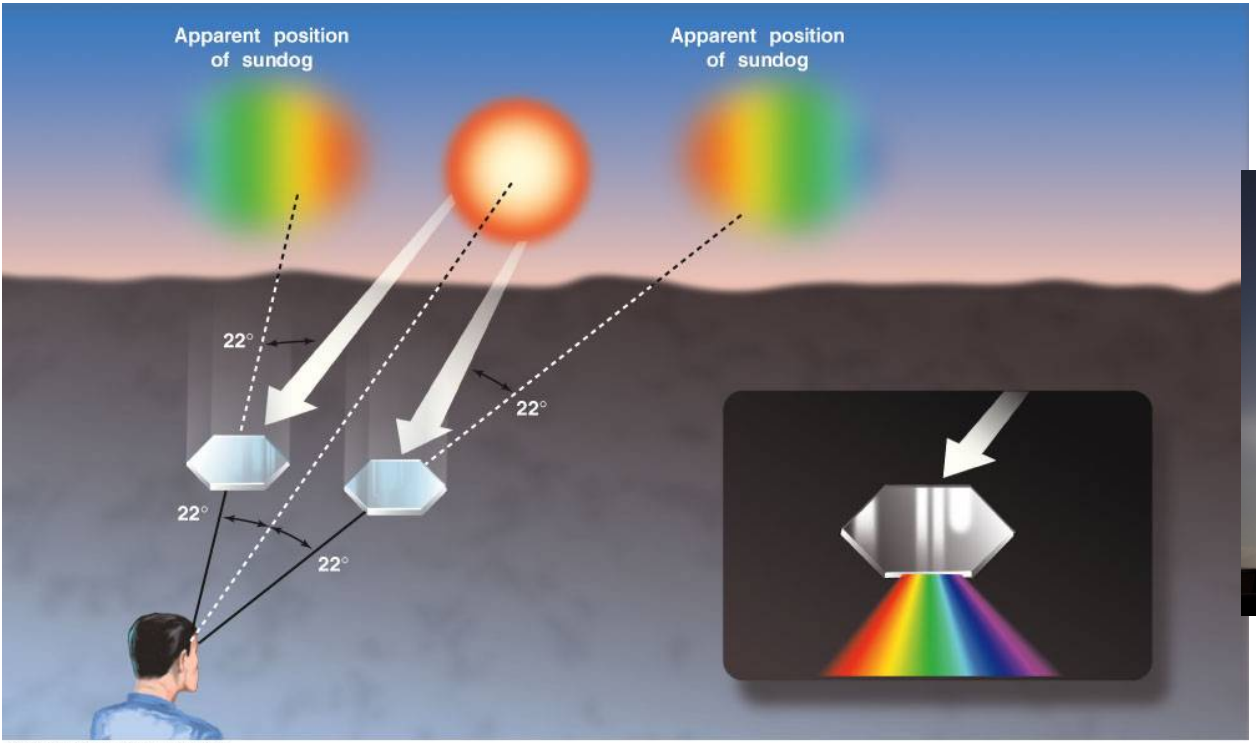


22 Degree Halo – Danson Festival

22 Deg Halo - Solar Observing Day



Parhelium –vedlejší slunce



© 2007 Thomson Higher Education



Vznikají lomem paprsků, které procházejí bočními stěnami krystalků ve tvaru destiček

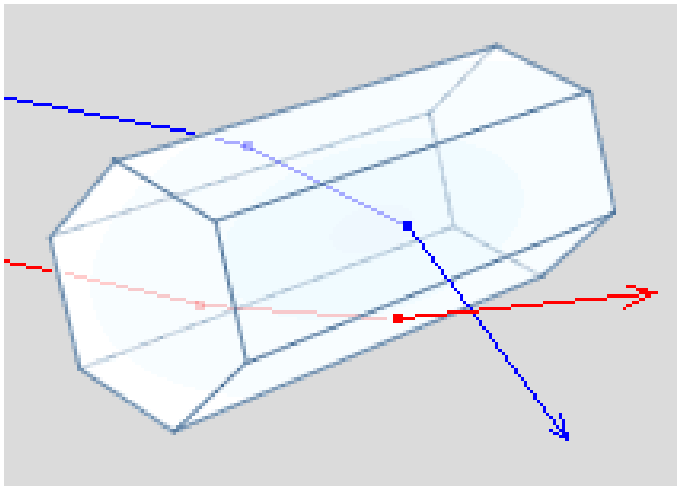
spodní slunce



odraz na ledových krystalcích

Horní a dolní dotykový oblouk

Horní dotykový oblouk

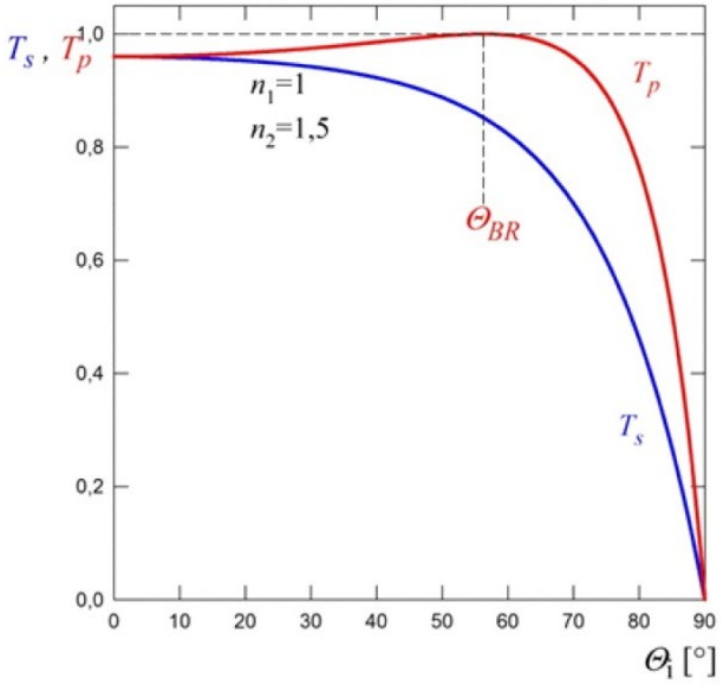


dolní dotykový oblouk

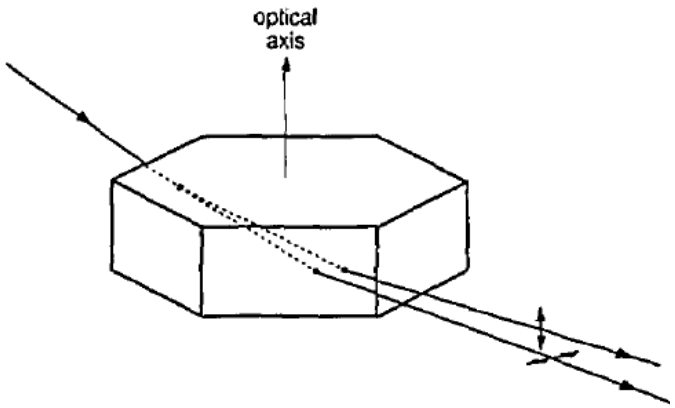
horní dotykový oblouk



Příčiny polarizace halových jevů

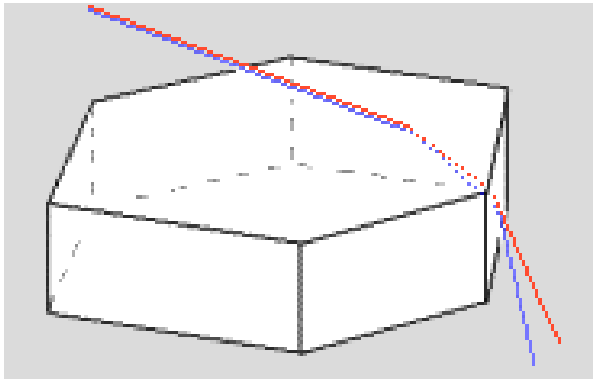


Fresnelovy vztahy – různá intenzita odraženého a tím i procházejícího světla pro obě složky lineární polarizace



Dvojlom – lomené paprsky vycházejí
z ledu prostorově oddělené s navzájem
kolmou polarizací

Cirkumzenitální oblouk



orientované ploché krystaly

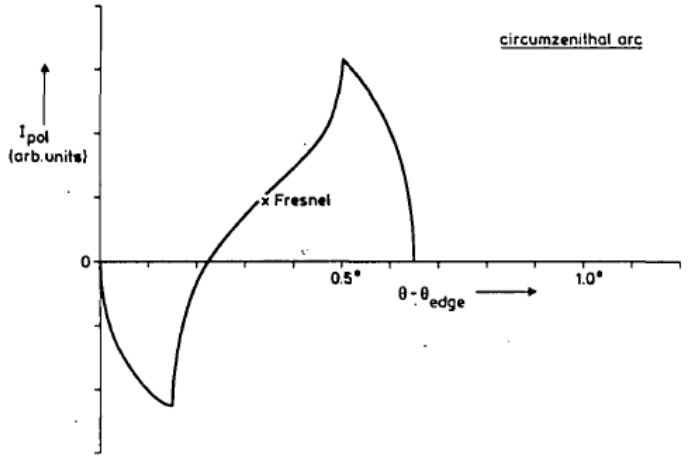


Fig. 6. Quantity of polarized light $I_{pol} = I_1 - I_2$ for the circumzenithal arc as a function of scattering angle θ in the solar vertical for a finite sun. θ_{edge} denotes the inner edge of the halo. Near θ_{edge} only ordinary refracted rays contribute to the light of the halo. For comparison, at the intensity maximum of the halo, I_{pol} is also given for Fresnel refraction alone. If $I_{pol} > 0$, the polarization is in the plane of scattering.



Děkuji za pozornost