

Optické jevy v atmosféře

Proseminář z Optiky

07.11.2019

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

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

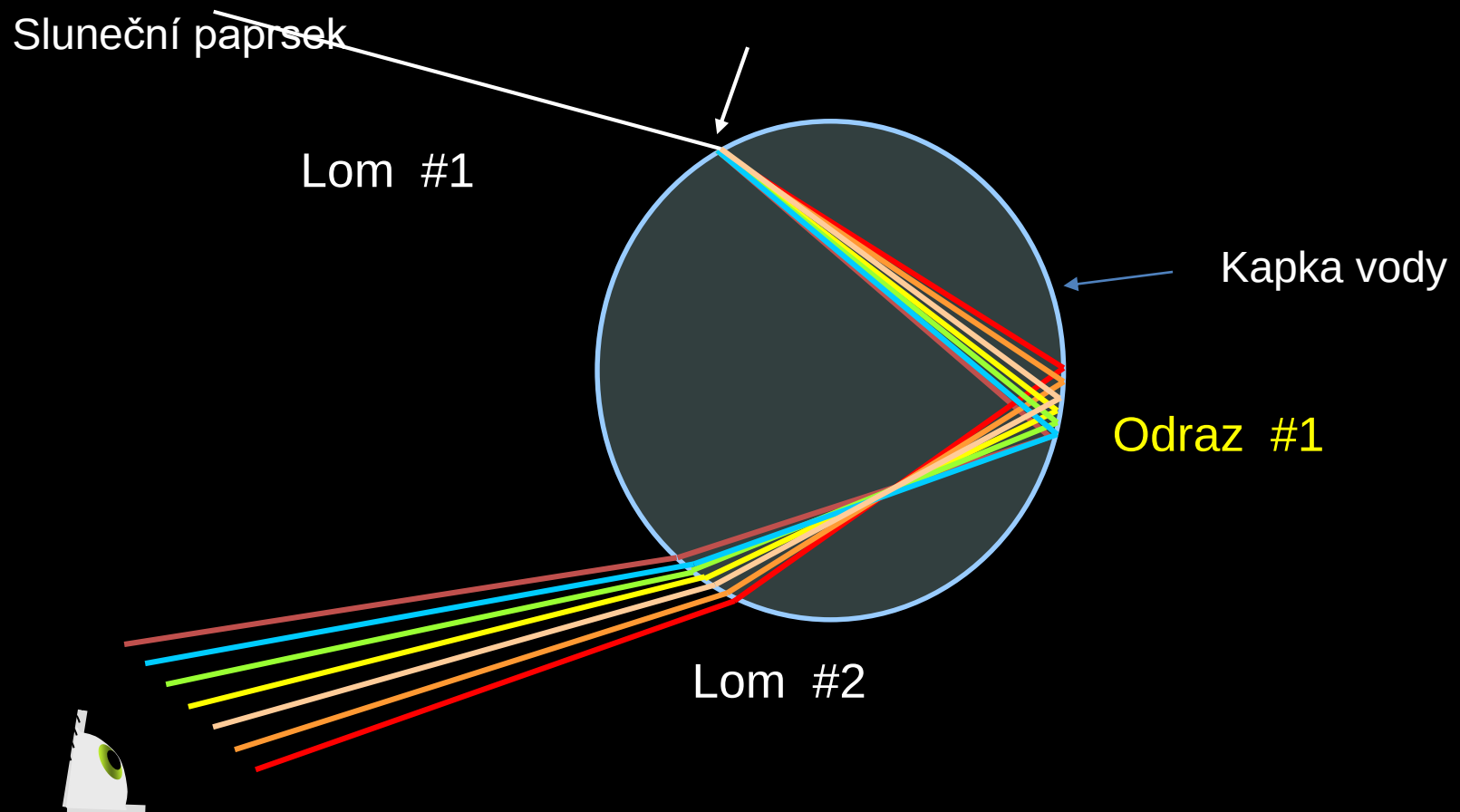


„Duha“
ve fialovém
světle“

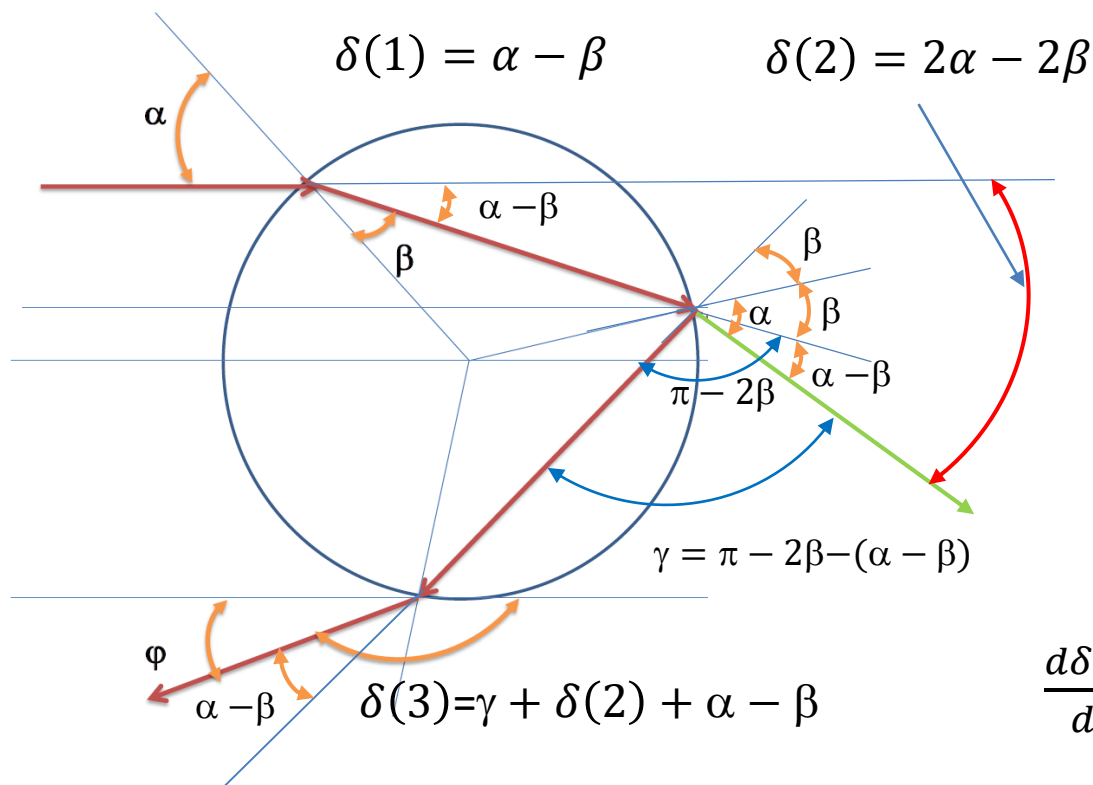


„Mlžná duha“

Vznik duhy



Vznik duh – geometrická teorie



$$\delta(3) = \pi + 2\alpha - 4\beta$$

$$\varphi = \pi - \delta(3) = 4\beta - 2\alpha$$

$$\sin \alpha = n \sin \beta$$

$$\cos \alpha \cdot d\alpha = n \cdot \cos \beta d\beta$$

$$\frac{d\delta(3)}{d\alpha} = 2 \left(1 - \frac{2 \cos \alpha}{n \cos \beta} \right) = 0$$

$$\frac{d\delta(3)}{d\alpha} = 2 - 4 \frac{d\beta}{d\alpha} = 2 - 4 \frac{d\beta}{d\alpha} = 0$$

Lze ukázat, že $\frac{\partial^2 \delta(3)}{\partial \alpha^2} > 0$

Jedná se tedy o minimum



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

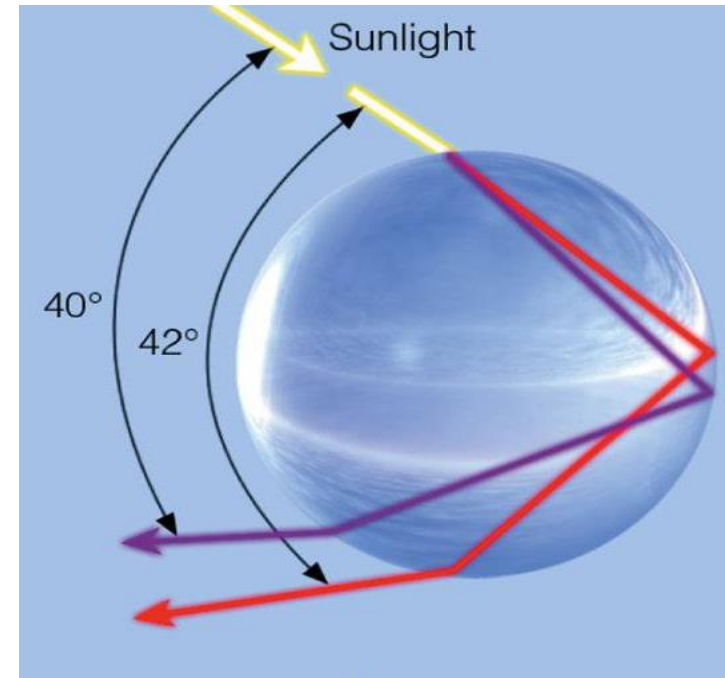
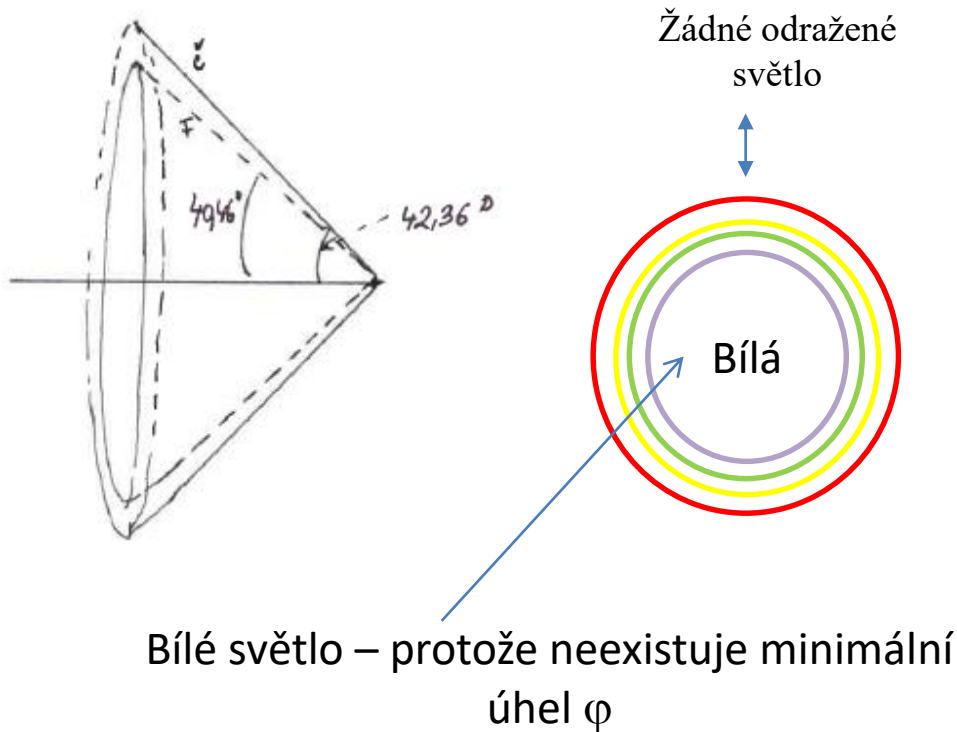
$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{1 \cos \alpha}{n \cos \beta}$$

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

$$n_{\text{c}} = 1.331$$

$$n_{\text{F}} = 1.343$$

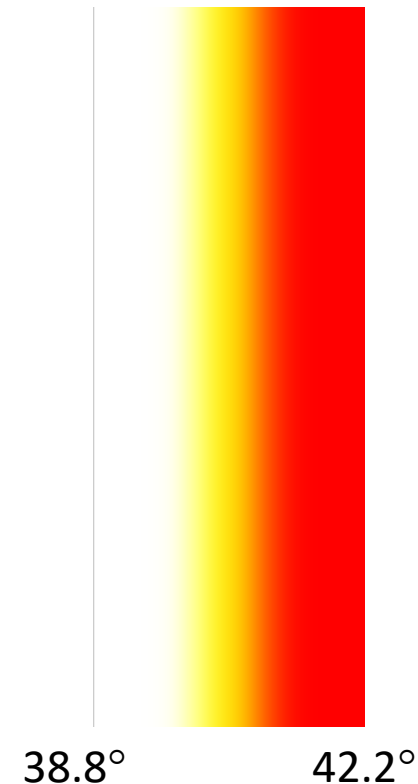
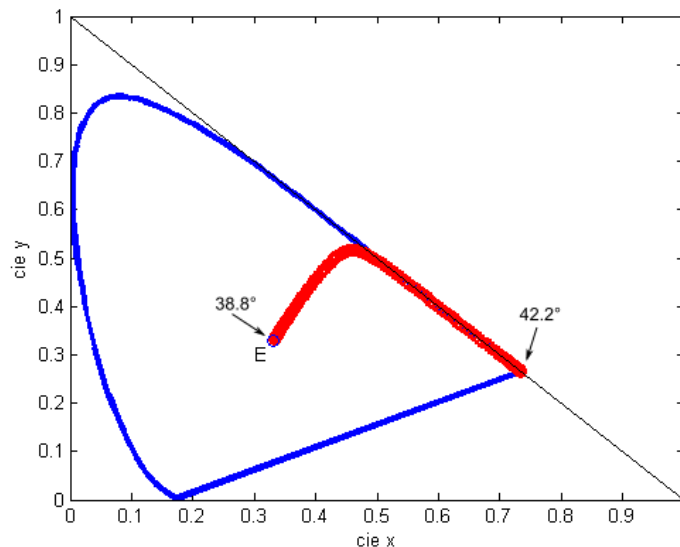
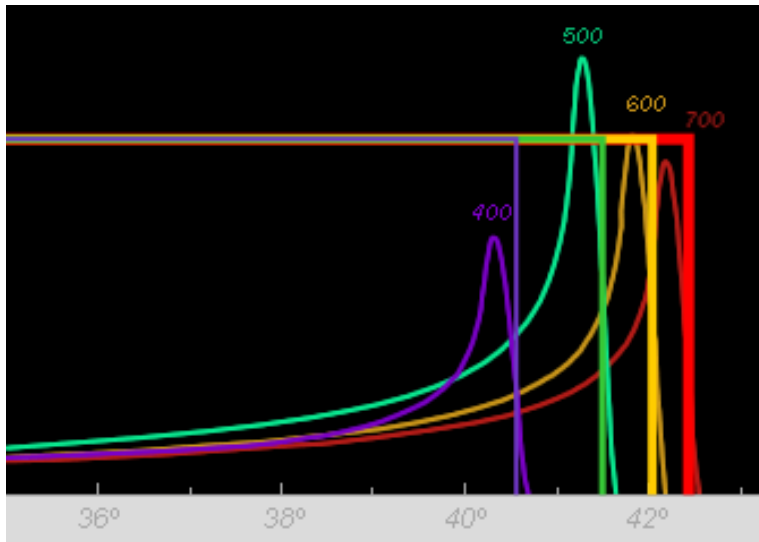
Primární duha



Proč je vidět spektrum?

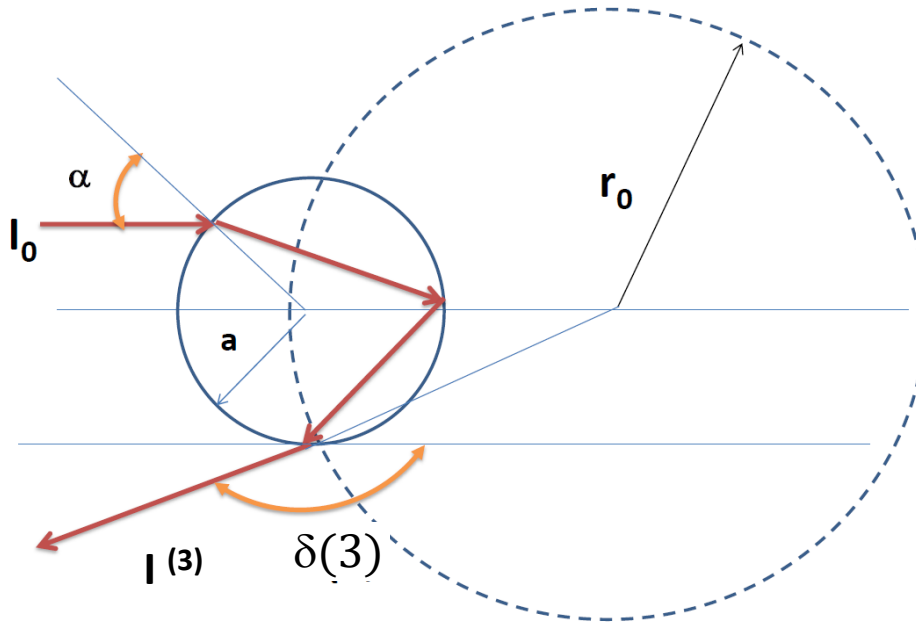
Kdyby měly všechny paprsky stejnou intenzitu, měl by být jasně vidět jen červený okraj a ostatní barvy by měly být smíchané

Duha pro případ konstantní intenzity barev



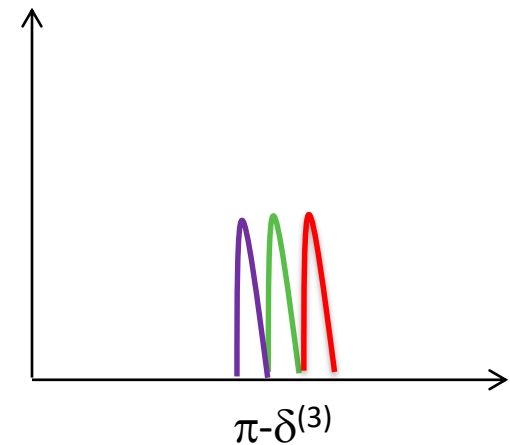
Duha pro případ konstantního spektrálního průběhu intenzity odraženého světla

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



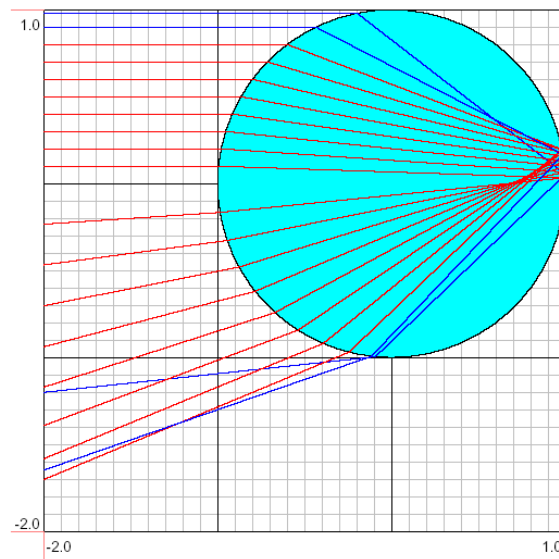
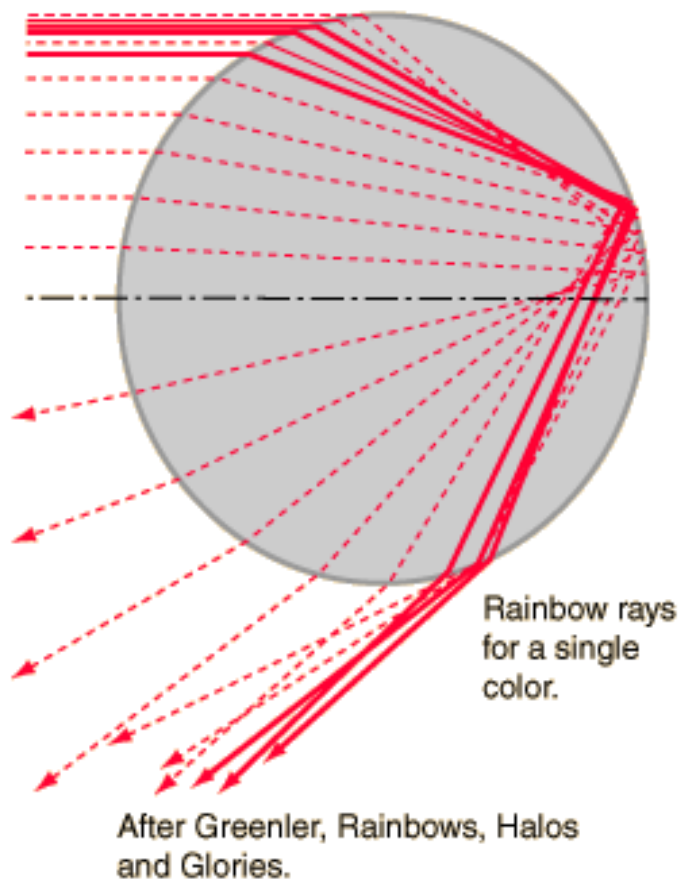
$$I^{(3)} = \frac{T^2 R 2\pi a^2 \sin 2\alpha d\alpha}{2r_0^2 \left| \frac{d\delta(3)}{d\alpha} \right| \sin \delta(3)}$$

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

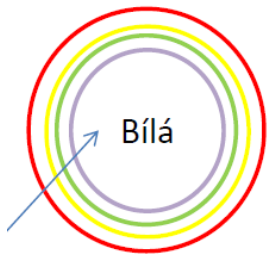


Pod úhlem minimální odchylky vychází maximální intenzita světla. Vzhledem k tomu, že tento úhel je funkcí vlnové délky, vychází jednotlivé barvy z kapky separátně.

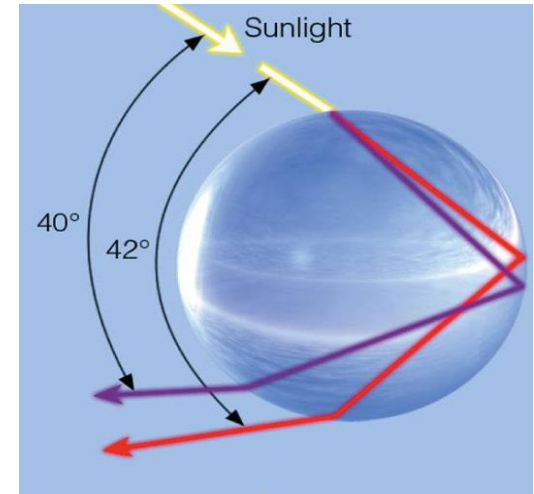
Naznačení role minimální deviace



Tato závislost je způsobena tím, že maximum Intenzity vychází pod úhlem minimální odchylky - v tomto případě $\delta(2)_{\min}$



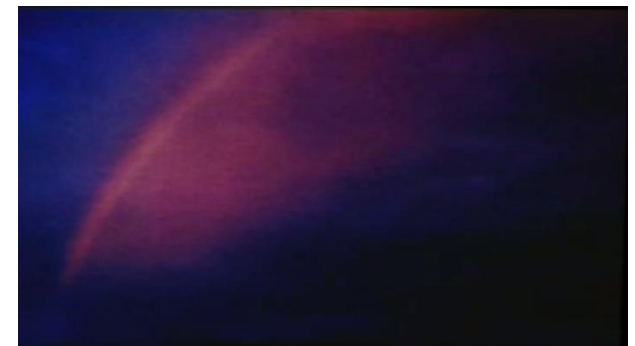
Vznik primární duhy (I)



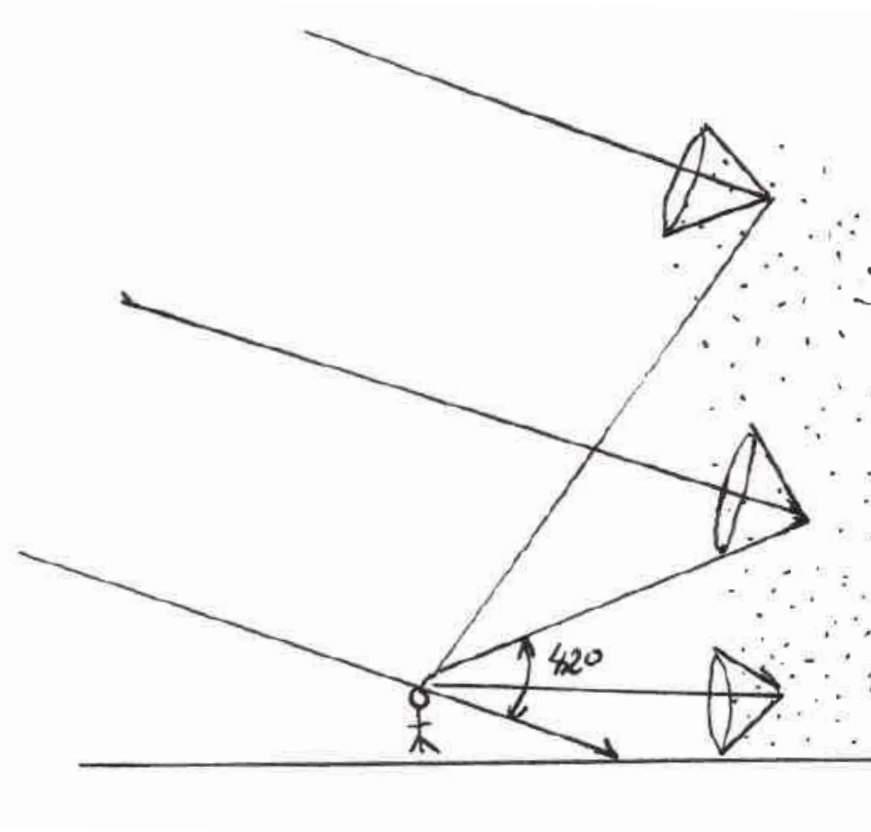
2



3

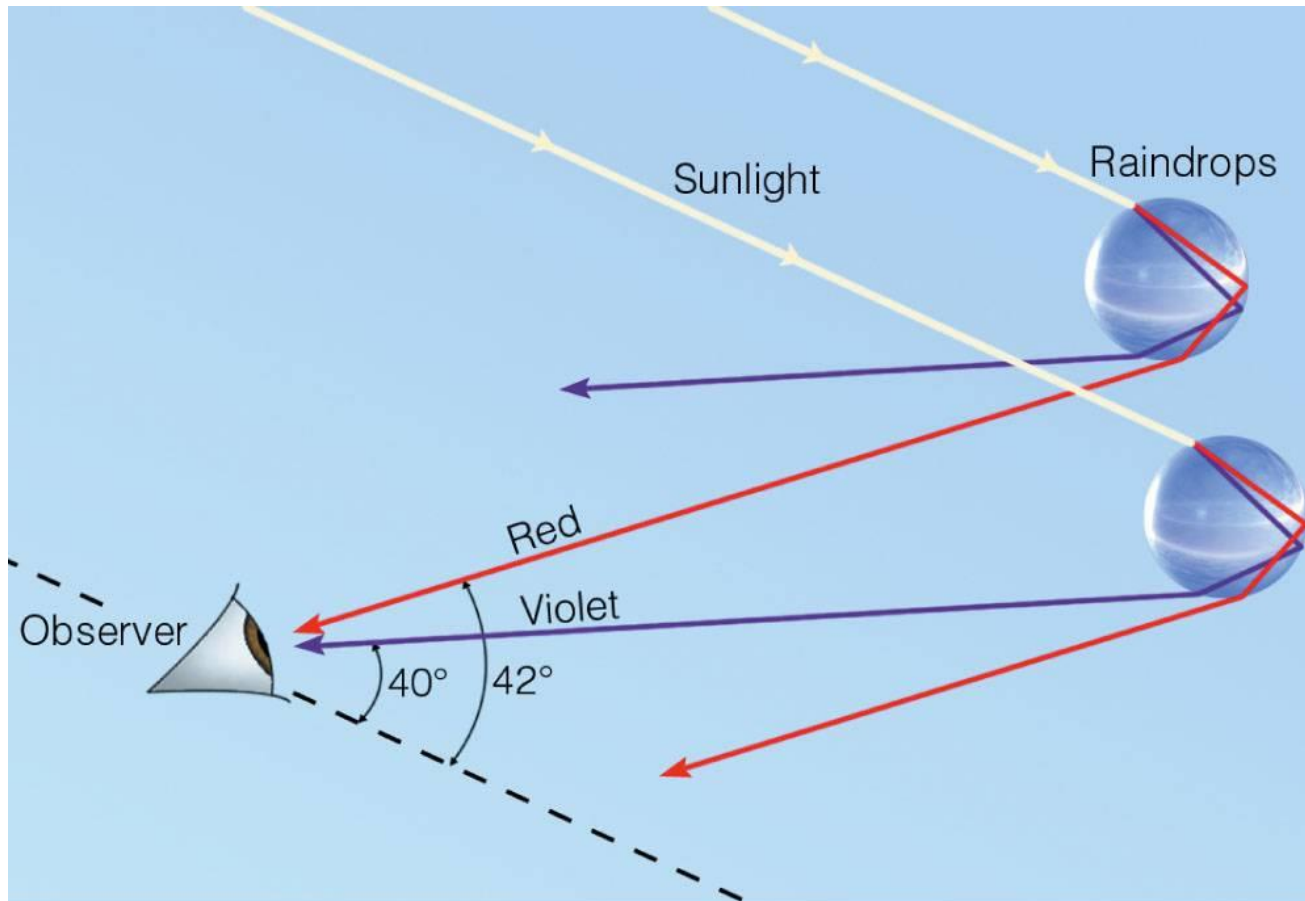


1



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

Vznik primární duhy (II)



© 2007 Thomson Higher Education



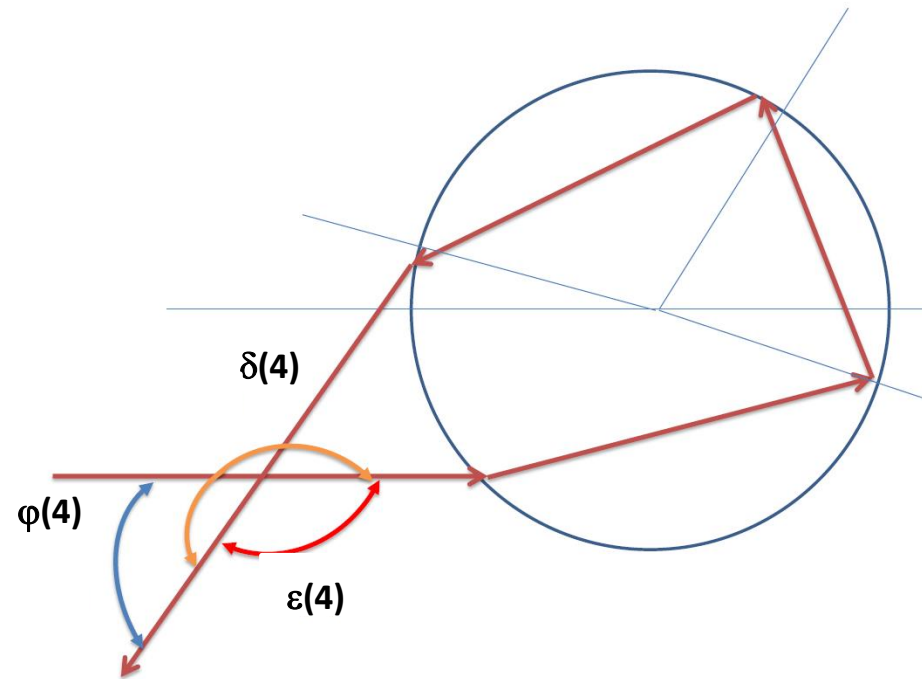
Sekundární duha

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

$\delta(4)$...minimum

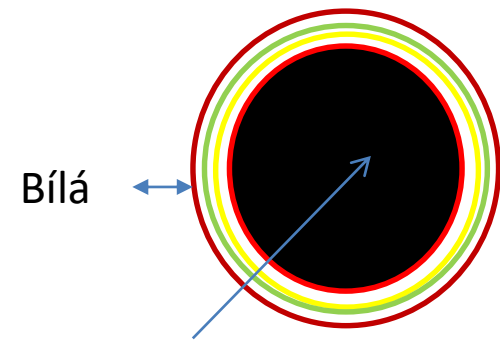
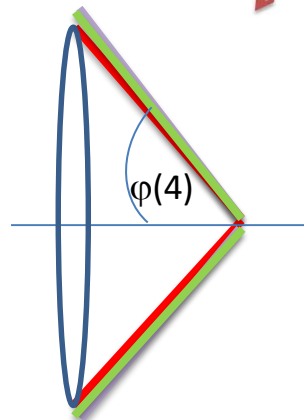
$\varepsilon(4)$...maximum

$\varphi(4)$...minimum vs. $\varphi(3)$...maximum



$\varphi(4) = 50,37^\circ$ červená

$\varphi(4) = 53,47^\circ$ fialová

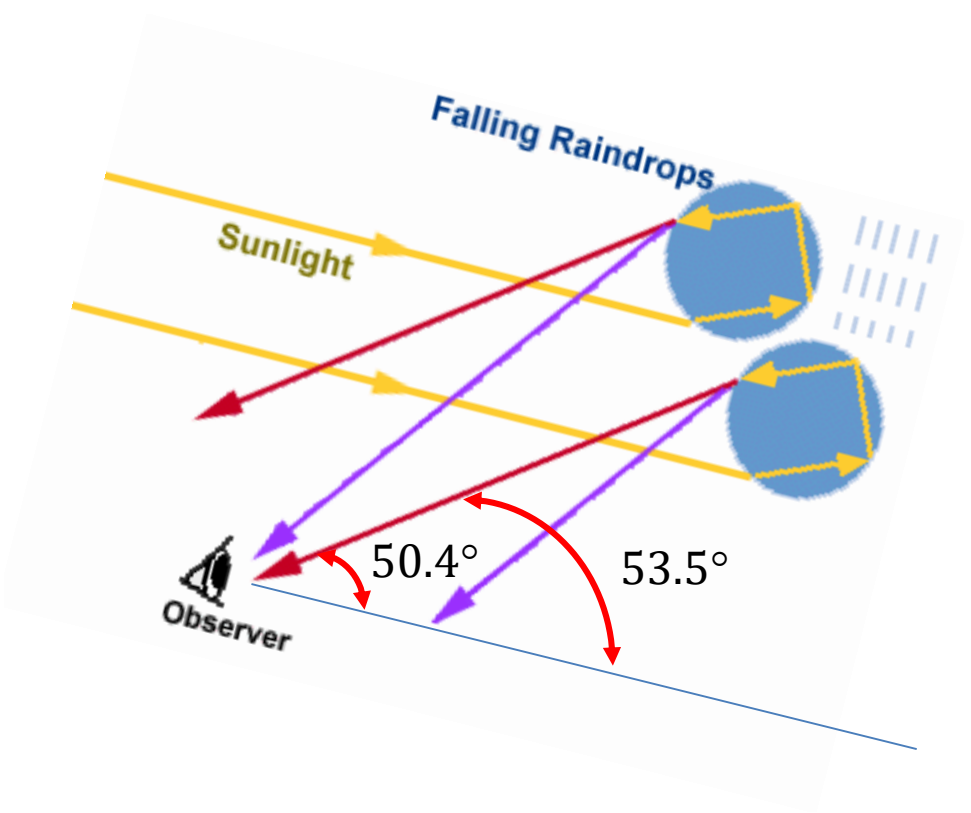
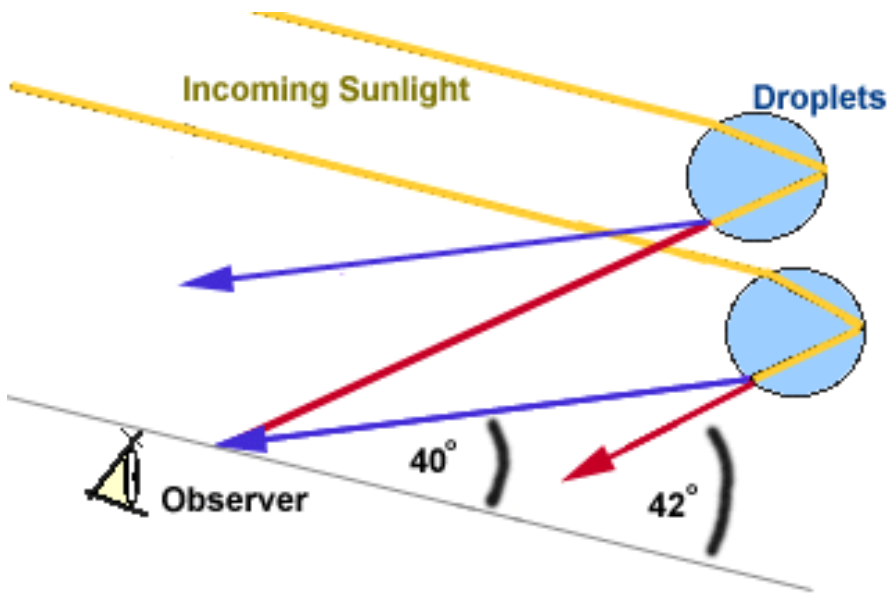


Bílá

Žádné odražené světlo

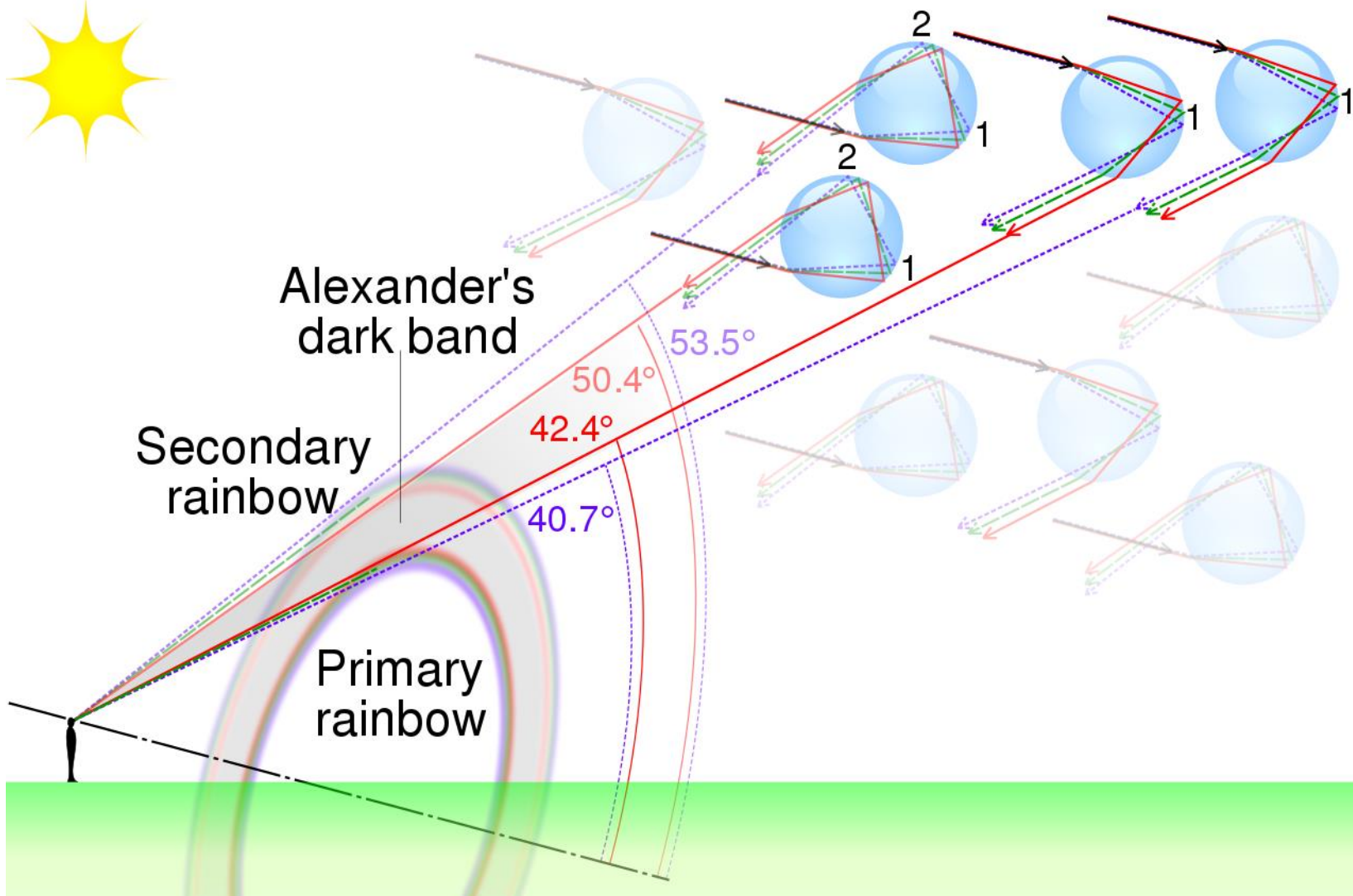
Úhlový rozměr $3,1^\circ + 0,5^\circ$ (úhlový rozměr slunce)

Odrazy na vodní kapce - shrnutí

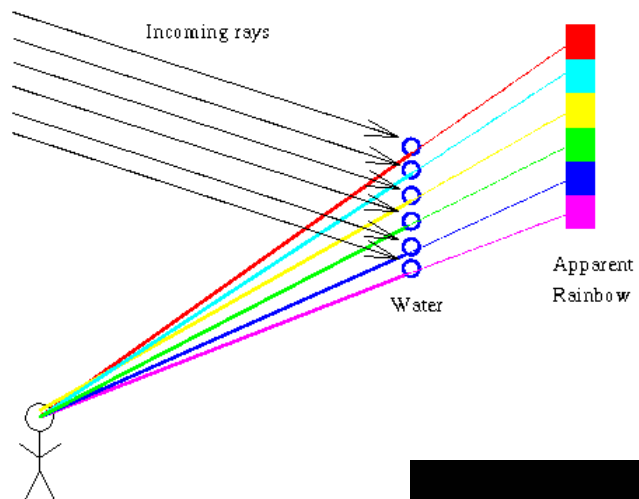


Primární duha – 1 vnitřní odraz,
paprsek dopadá na horní část kapky

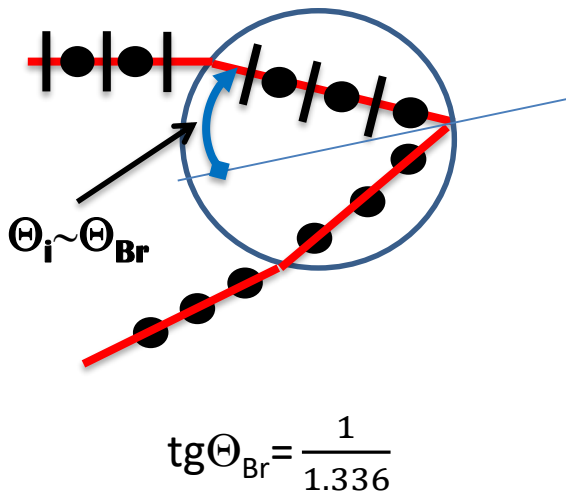
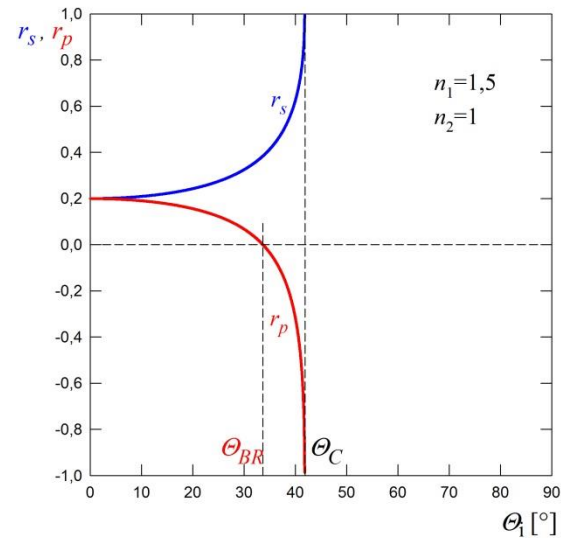
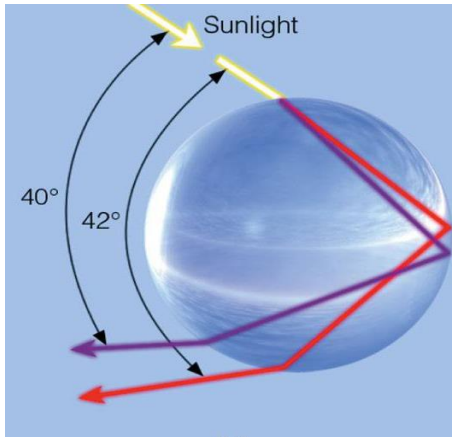
Sekundární duha – 2 vnitřní odrazy,
paprsek dopadá na spodní část kapky



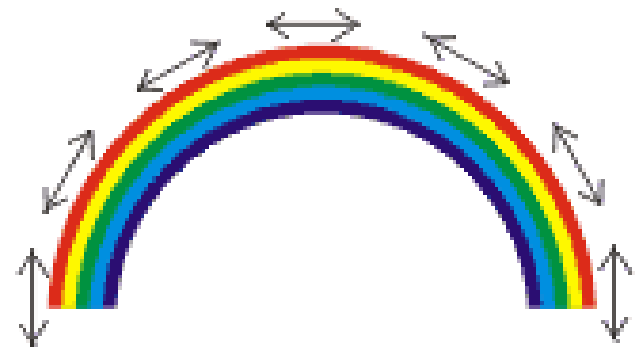
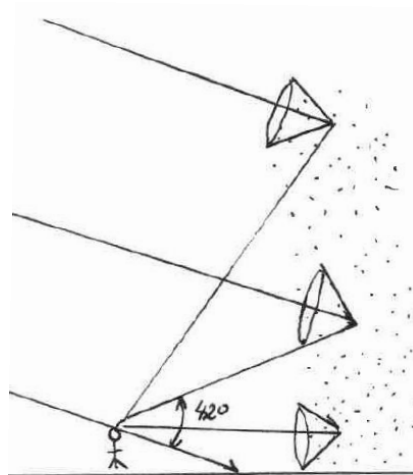
Primární a sekundární duha



Polarizace duhy

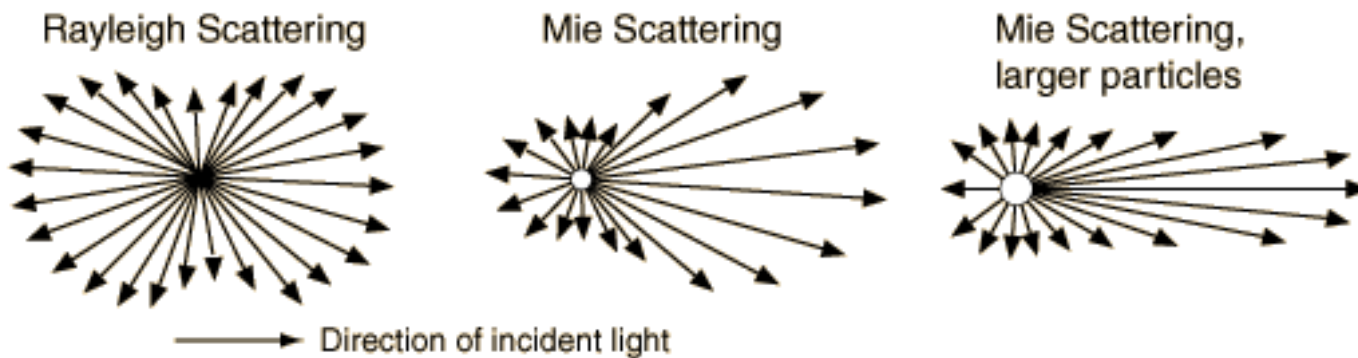


Lomený paprsek dopadá na zadní stěnu kapky pod úhlem blízkým Brewsterovu úhlu. Tím dojde k vysoké míře odrazu složky polarizace kolmé k rovině dopadu



Interakce světla s kapkou - modely

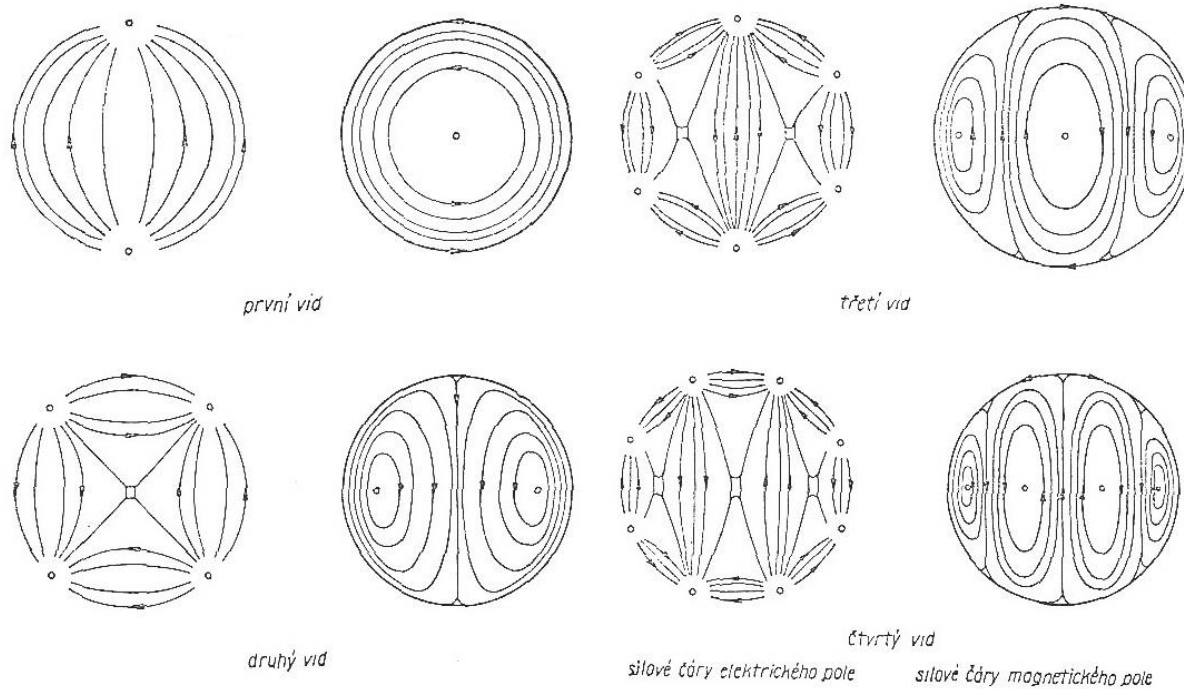
1. $\lambda \gg d$ dipólový model, Rayleighův rozptyl (molekuly)
2. $\lambda \geq d$ Mieho rozptyl (malé kapky)
3. $\lambda \ll d$ geometrický rozptyl (velké kapky, odraz, lom)



Interakce EM záření s koulí – Maxwellovy rovnice

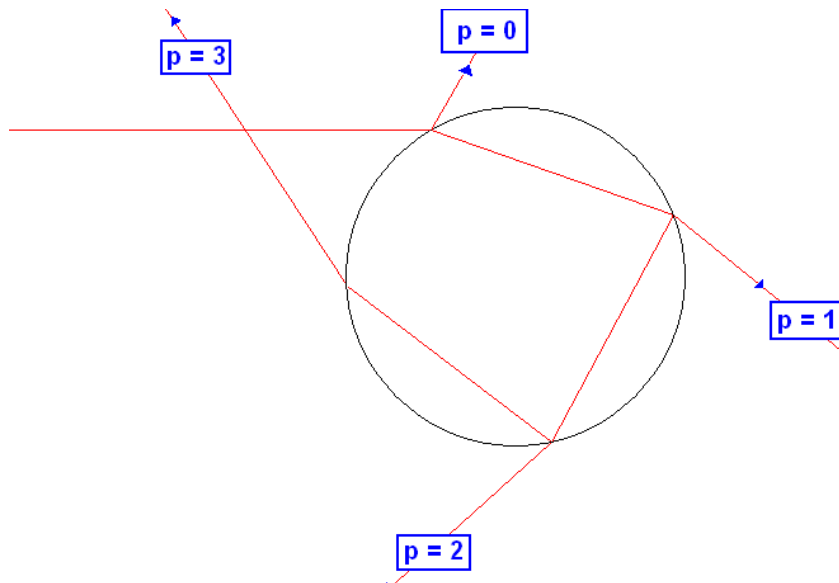
Rozptyl – Mieho teorie (řešení Maxwellových rovnic pro sférickou symetrii)

Debyeovy řady – jiná formulace Mieho teorie

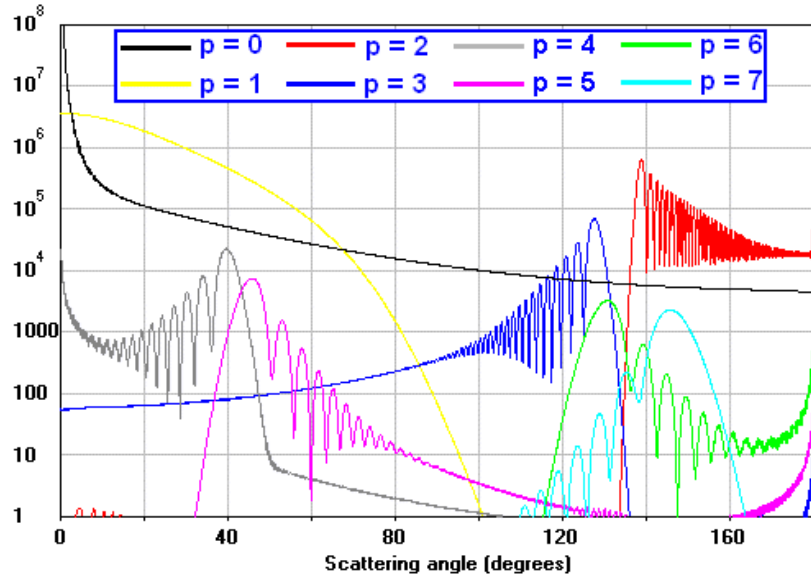


Obr. 112. Silové čáry pole prvních čtyř elektrických vidů.

Interakce EM záření s koulí – Debyeovy řady

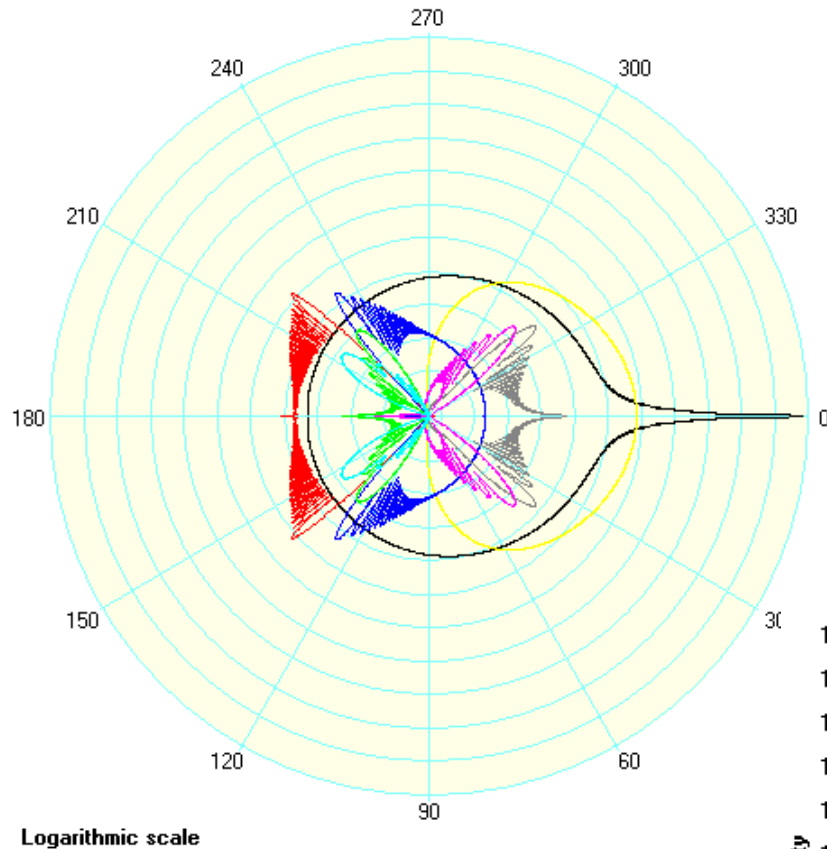


$p = 0$ odpovídá vnějšímu odrazu
 $p = 1$ odpovídá přímé transmisi přes kouli
 $p = 2$ odpovídá 1 vnitřnímu odrazu (primární duha)
 $p = 3$ odpovídá 2 vnitřním odrazům atd.

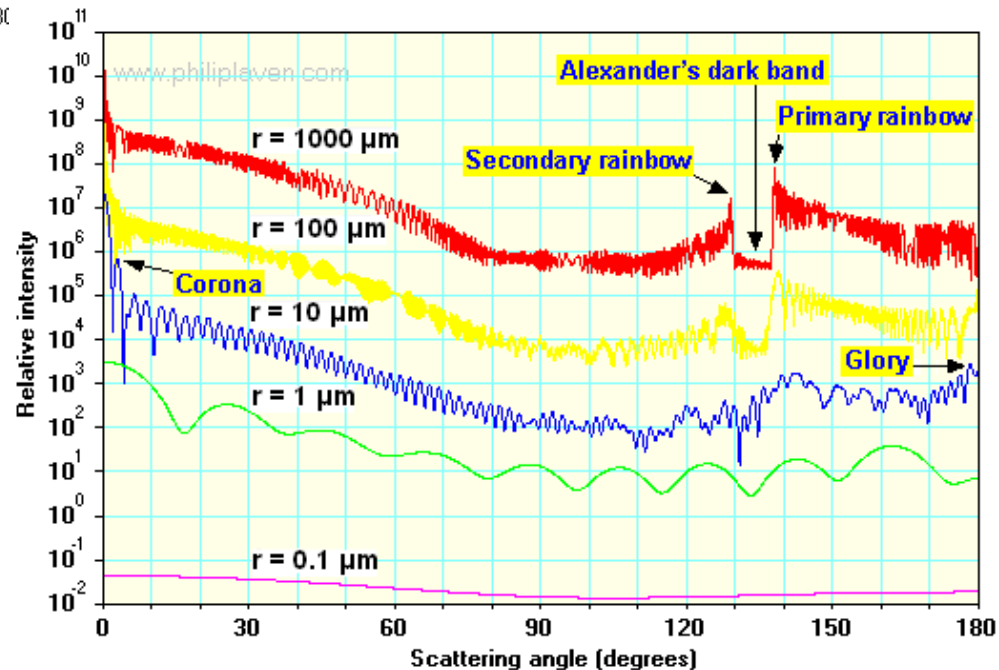
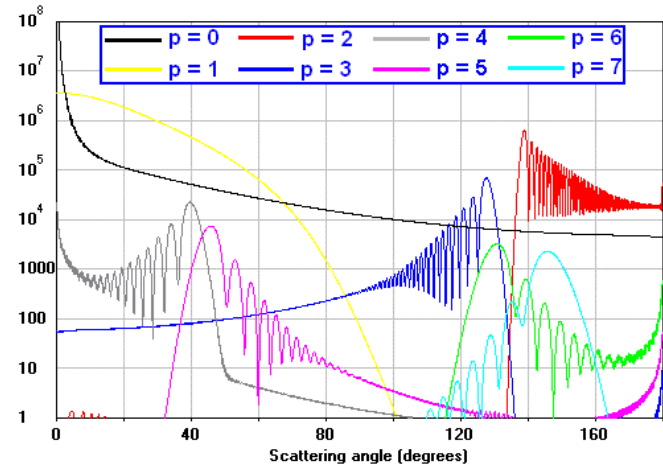


Použitím Debyeových řad lze identifikovat příspěvky od jednotlivých paprsků – výpočet pro rozptyl světla 0.65 od vodní kapky s poloměrem $r = 100 \mu\text{m}$

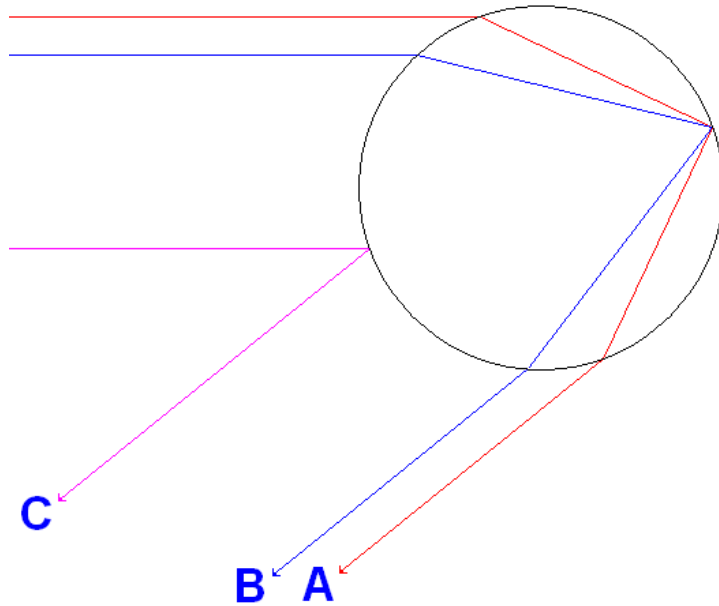
Numerický výpočet rozptylu



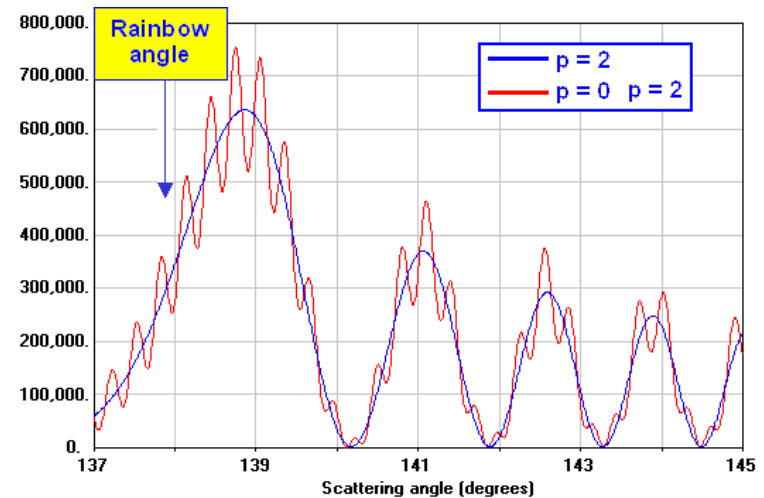
Polární diagram ukazující využití Debyeových řad pro rozptyl světla s vlnovou délkou $0.65 \mu\text{m}$ na vodní kapce o poloměru $r = 100 \mu\text{m}$



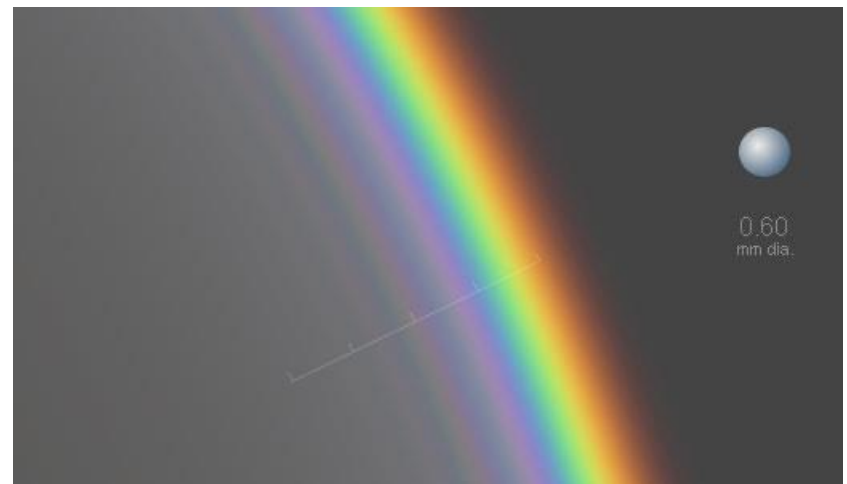
Jemná struktura duhy – podružné oblouky



Tři paprsky interagující s koulí - $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ a index lomu $n = 1.33257$

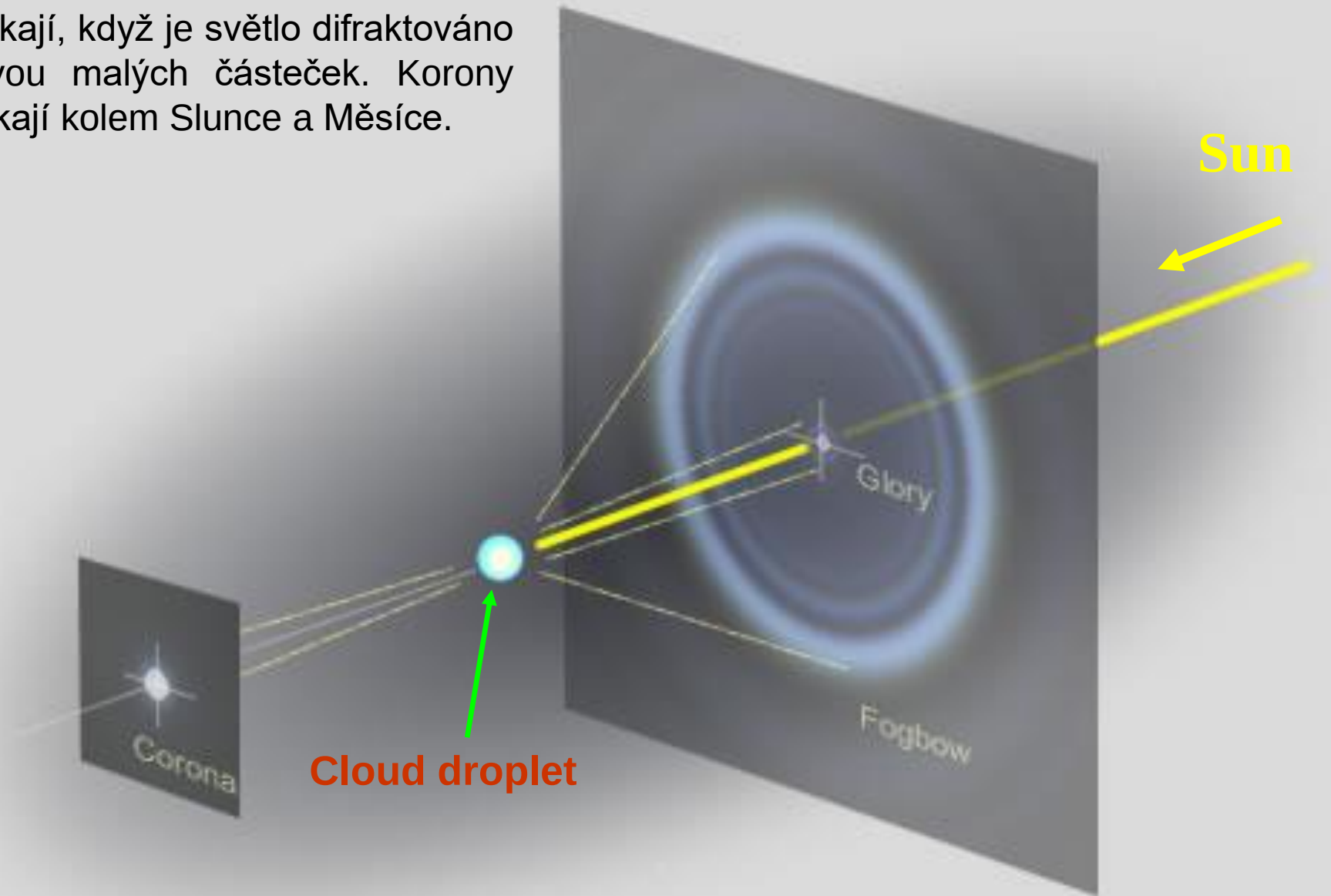


Hlavní maxima a minima vznikají interferencí paprsků A a B. Jemná struktura vzniká interferencí odraženého paprsku C a paprsků A a B.



Koróny a glorioly

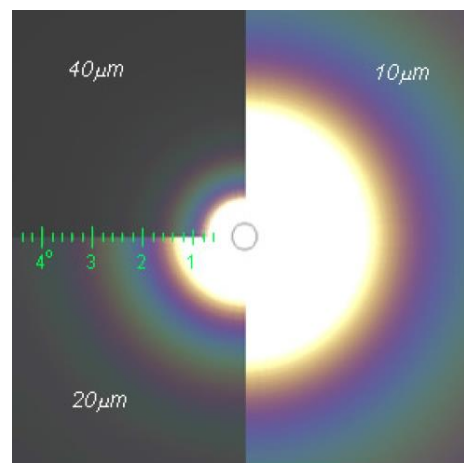
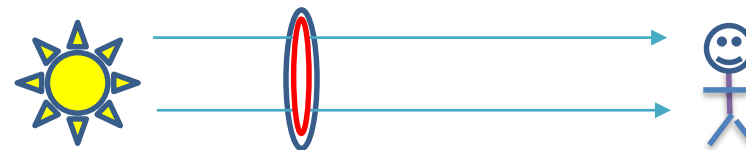
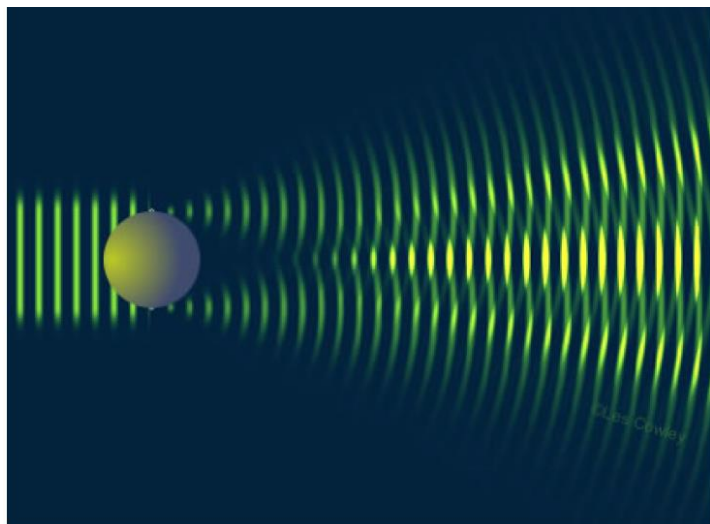
Vznikají, když je světlo difraktováno vrstvou malých částíček. Korony vznikají kolem Slunce a Měsíce.





Koróna

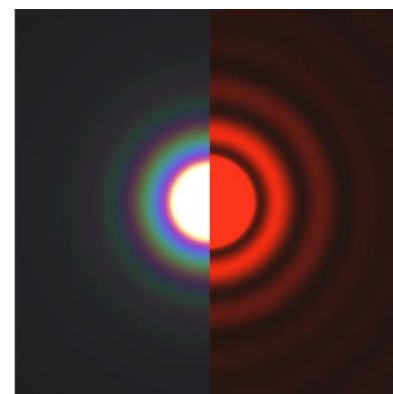
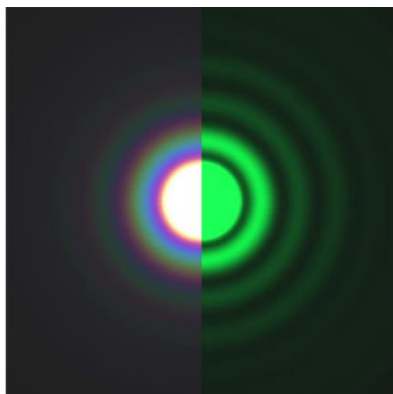
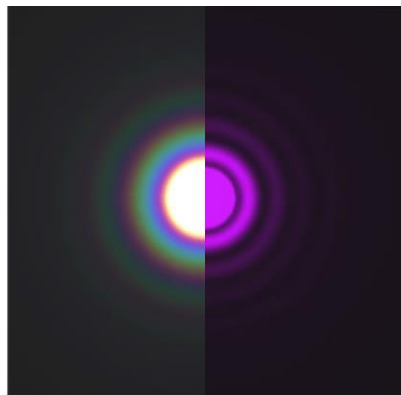
Koróna



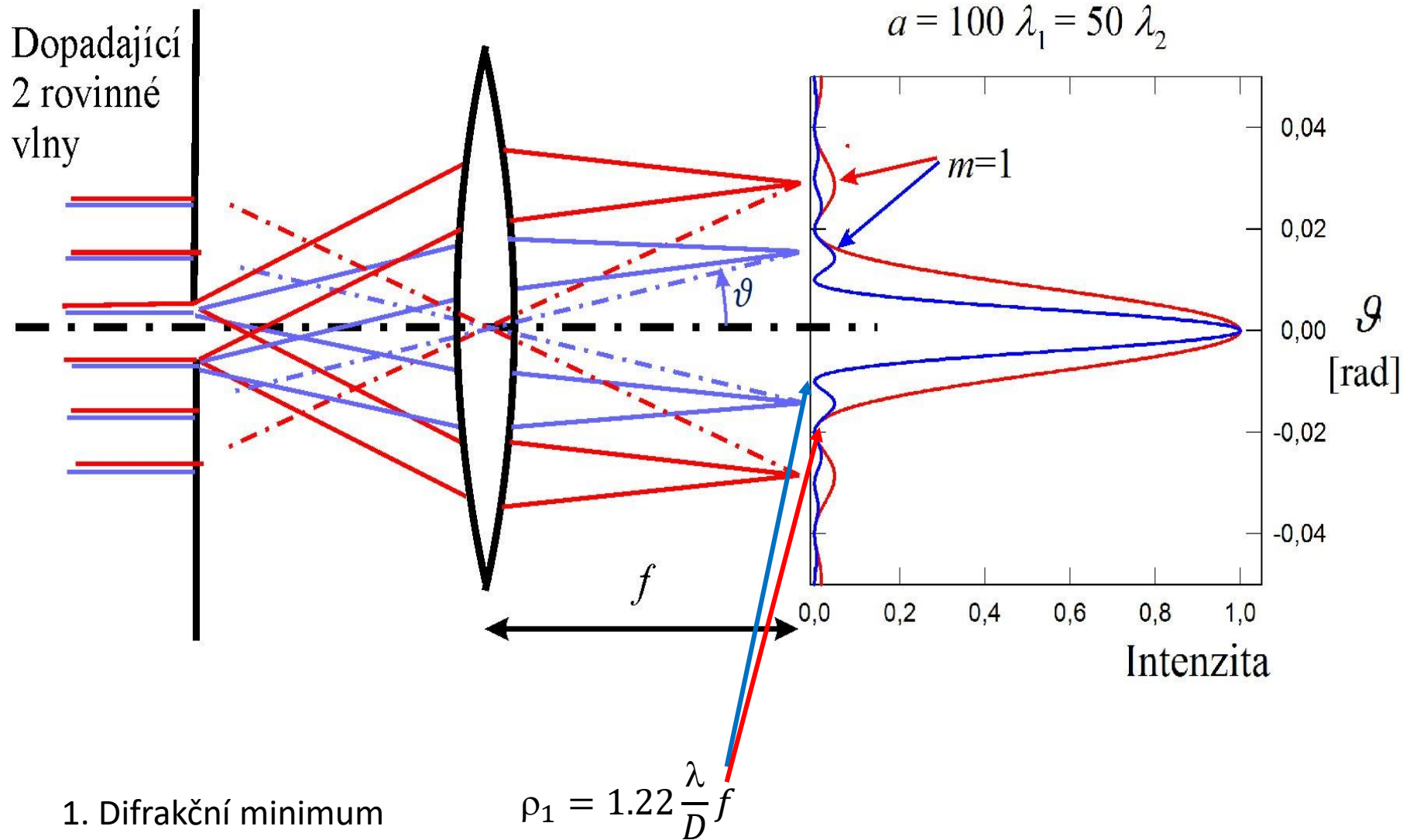
Droplet diameter

Malé kapky
vytvářejí
větší koróny

Příčinou vzniku koróny je difrakce

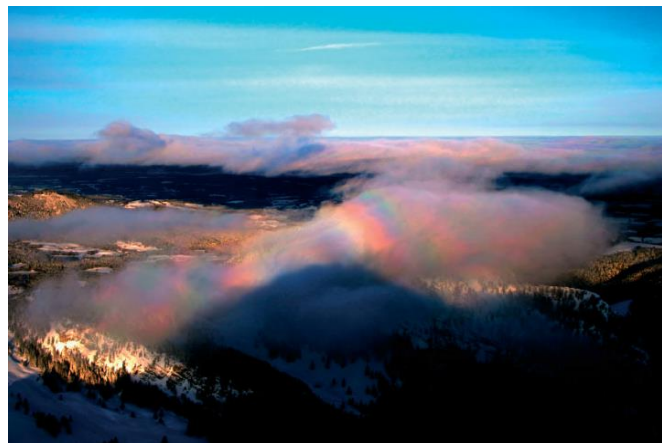
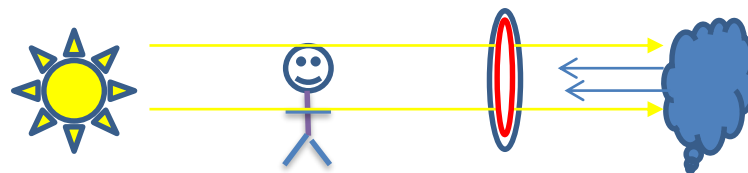


Spektrální rozklad světla při difrakci

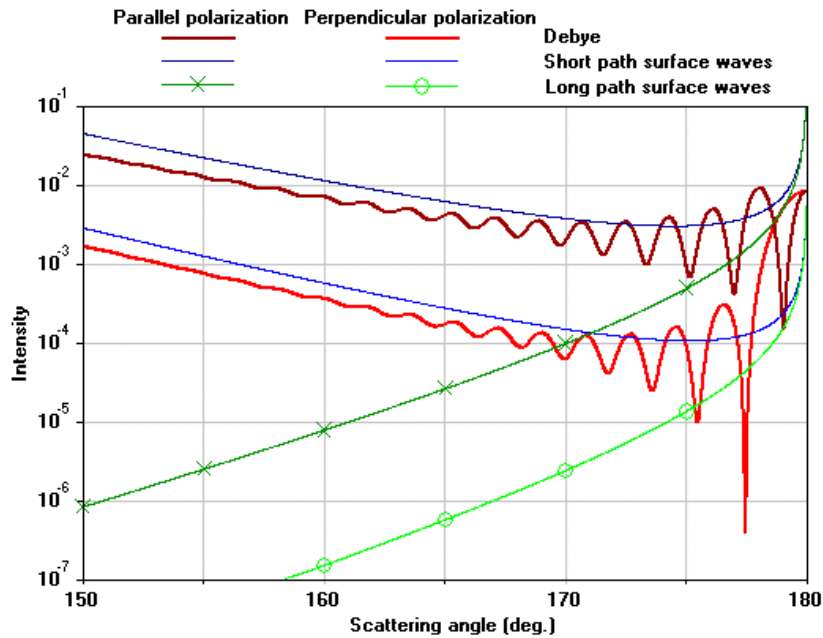


Gloriola

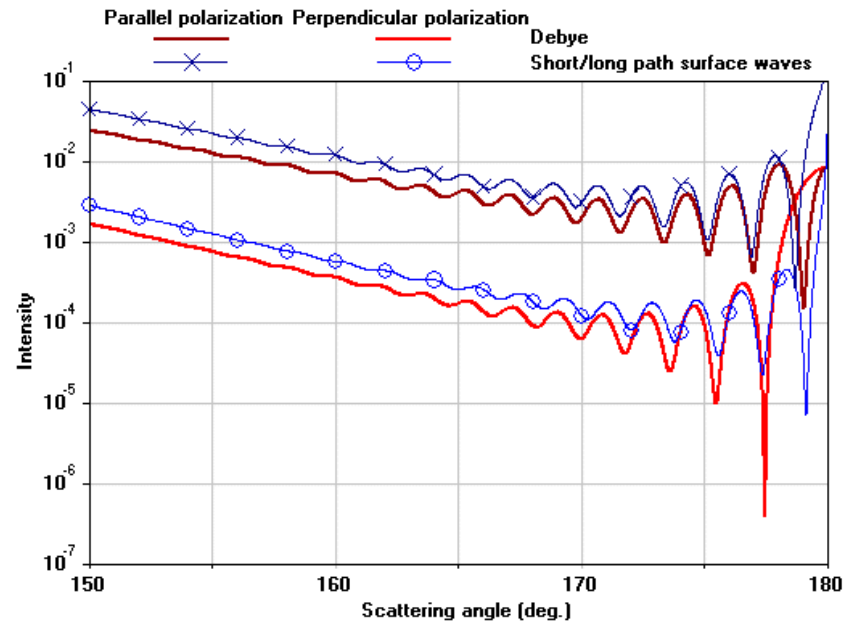
Vzniká však zpětným ohybem světelných paprsků a projevuje se jako slabé soustředné barevné prstence kolem stínů vržených do vrstvy oblačnosti či mlhy.



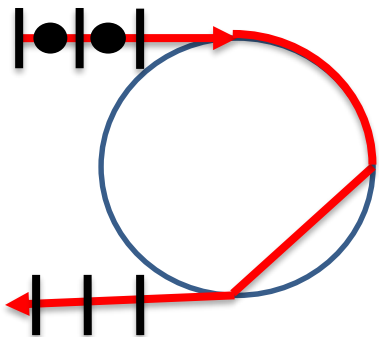
Glorioly – numerické výpočty (I)



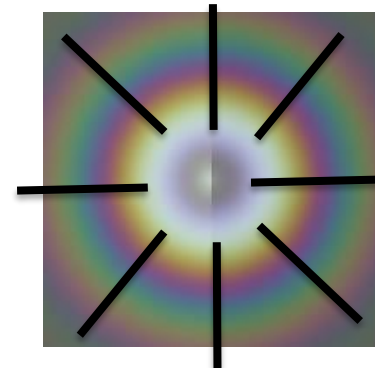
separátní příspěvky povrchových
vln s krátkou a dlouhou dráhou



vektorový součet příspěvků
povrchových vln s krátkou a dlouhou dráhou



Gloriola je polarizovaná
paralelně - radiálně), tj.
obráceně než duha.



Barva oblohy

Rayleighův rozptyl na molekulách + fluktuace koncentrace molekul na prostorové škále $\sim \lambda$

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

Rayleighův rozptyl na jedné osamoceně molekule:

rozměr molekuly $\ll \lambda$

dopadající nepolarizované záření

polarizovatelnost

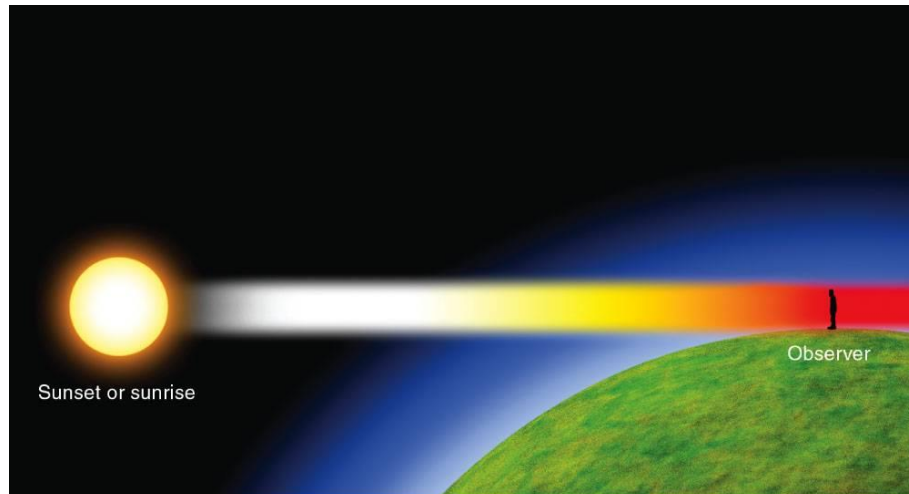
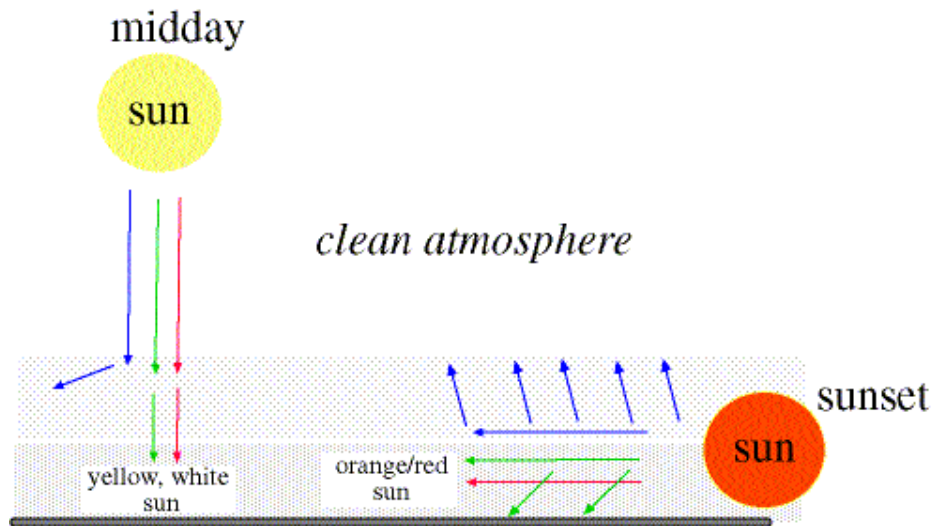
vzdálenost od molekuly

úhel rozptylu

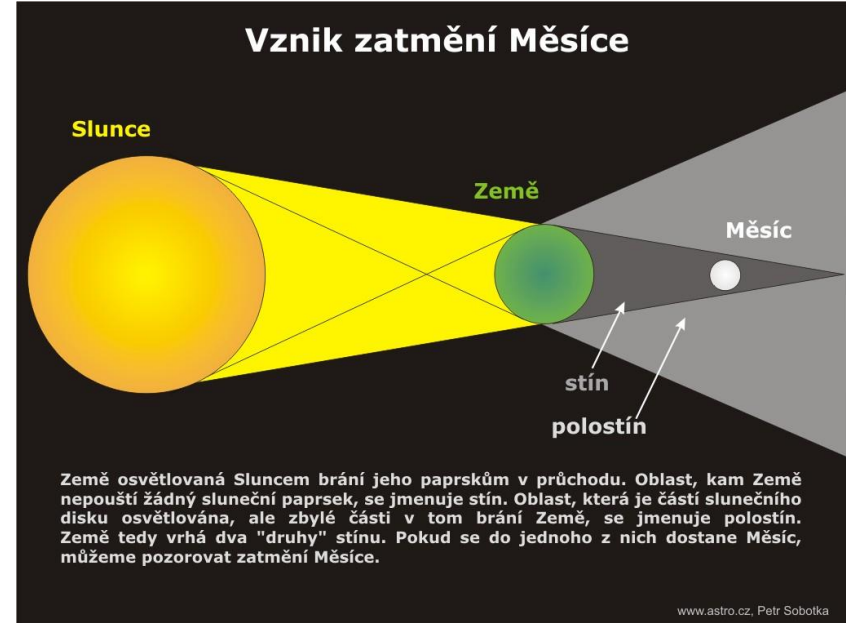
Ideálně homogenní prostředí: rozptýlené vlny se navzájem vyruší a pokračuje pouze původní vlna s indexem lomu; žádný rozptyl.

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

Rozptyl světla v atmosféře



© 2007 Thomson Higher Education



www.astro.cz, Petr Sobotka



Index lomu vzduchu

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

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

závisí na hustotě, tj. na teplotě a tlaku

$$n(T, p) \quad \text{pomocí} \quad n_0(T_0, p_0)$$

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

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

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

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

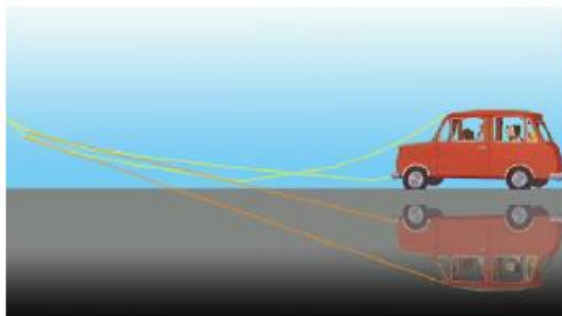
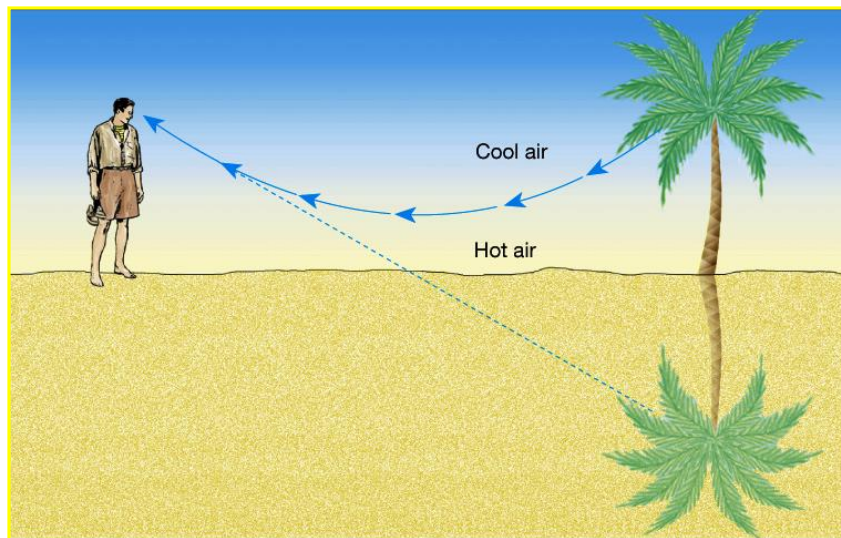
Standardní atmosféra – pokles o 0.65 K / 100m

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 3.42 K/100m – spodní zrcadlení. Při postupu paprsku **dolů** dochází k **lomu od kolmice**, může nastat totální odraz a **spodní zrcadlení**.

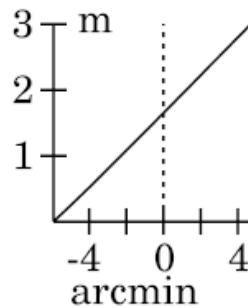
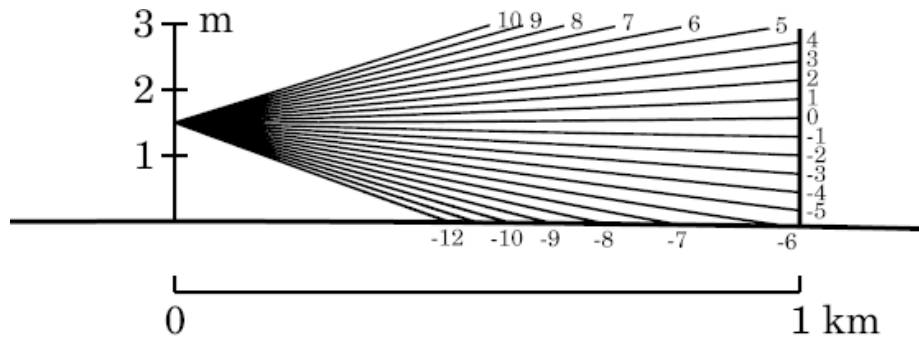
Spodní zrcadlení

Pokud teplota rychle klesá s výškou
(index lomu s výškou roste) pozorujeme spodní zrcadlení



Zobrazení – přenosová funkce

Standardní atmosféra, blízký cíl



Pozorovatel ve výšce 1.5m

Cíl vysoký 2m ve vzdálenosti
1km

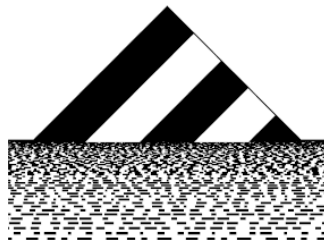
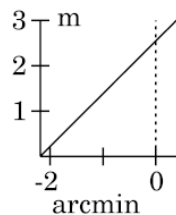
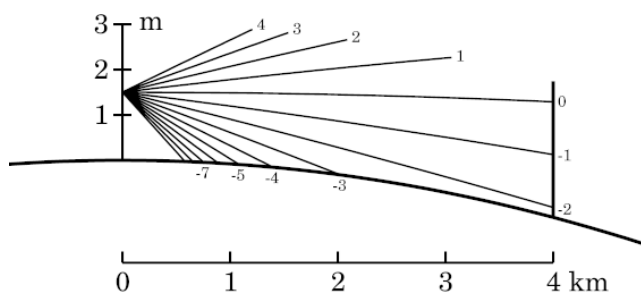
Zakřivení paprsků v důsledku
změn indexu lomu nepatrné

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

Standardní atmosféra

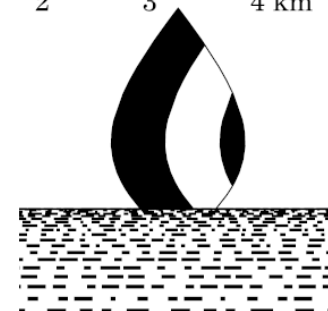
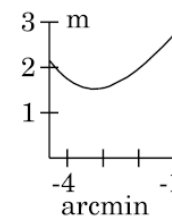
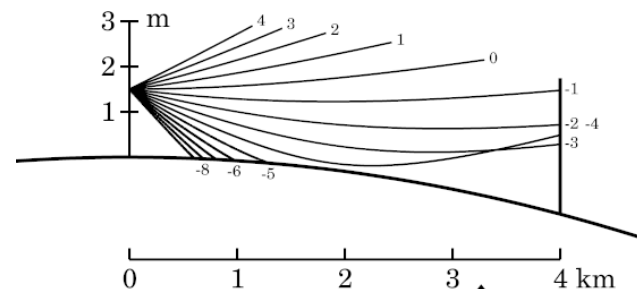
Teplota **klesá pomalu** s výškou
Index lomu s výškou **pomalou klesá**

Přenosová funkce téměř lineární
Cíl se jeví jako nedeformovaný



Spodní zrcadlení

Teplota s výškou **rychle klesá**
Index lomu s výškou **roste**



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.

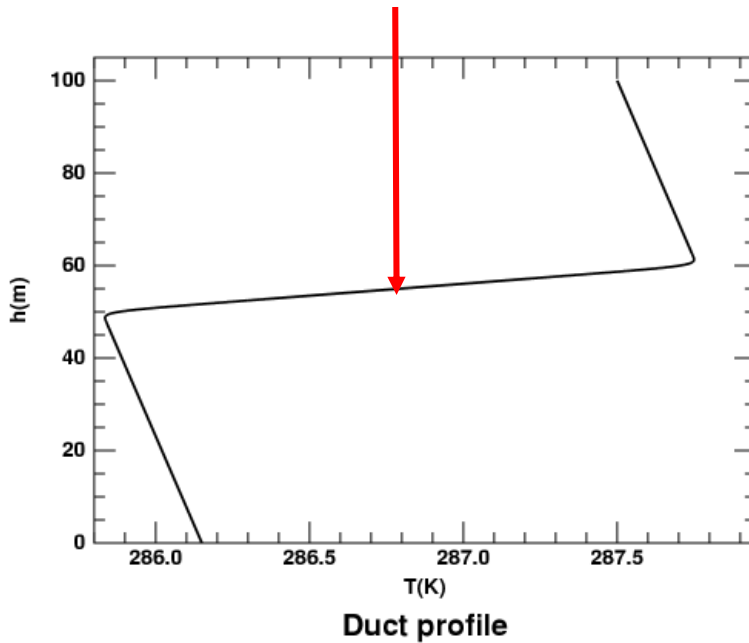
Někdy se těmto jevům říká **Fata Morgana**



Svrchní zrcadlení

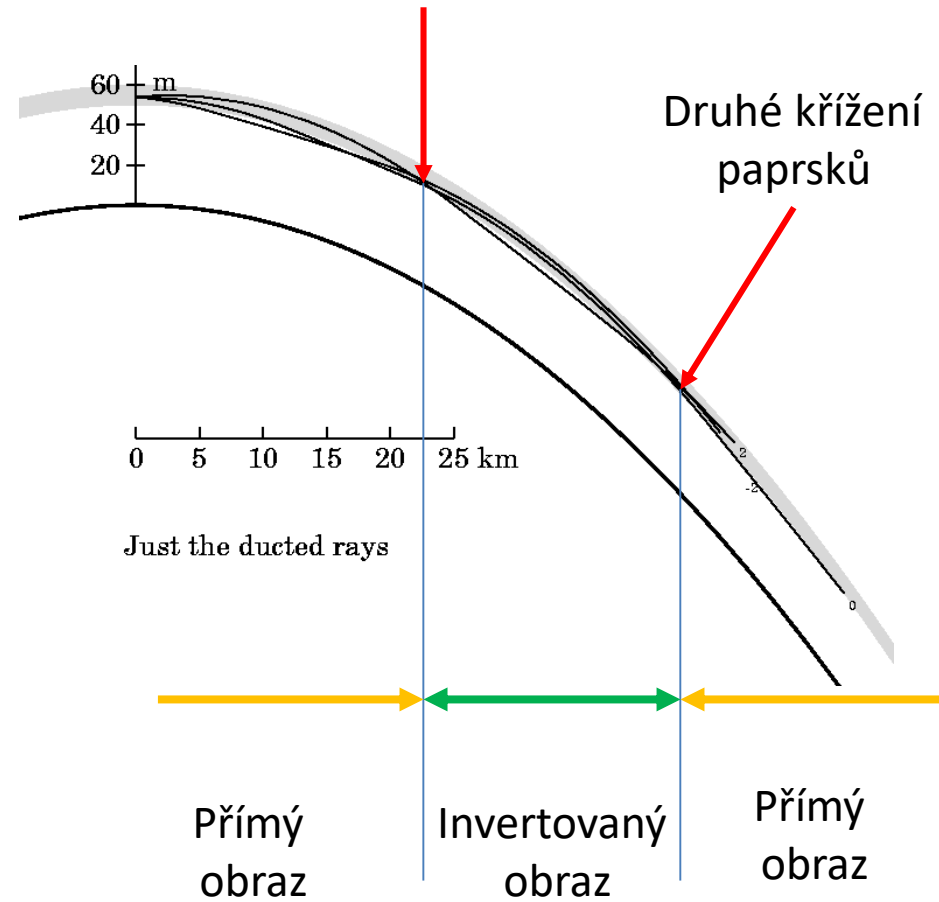
Vlnovodné efekty.

Teplota s výškou roste .
Index lomu s výškou klesá

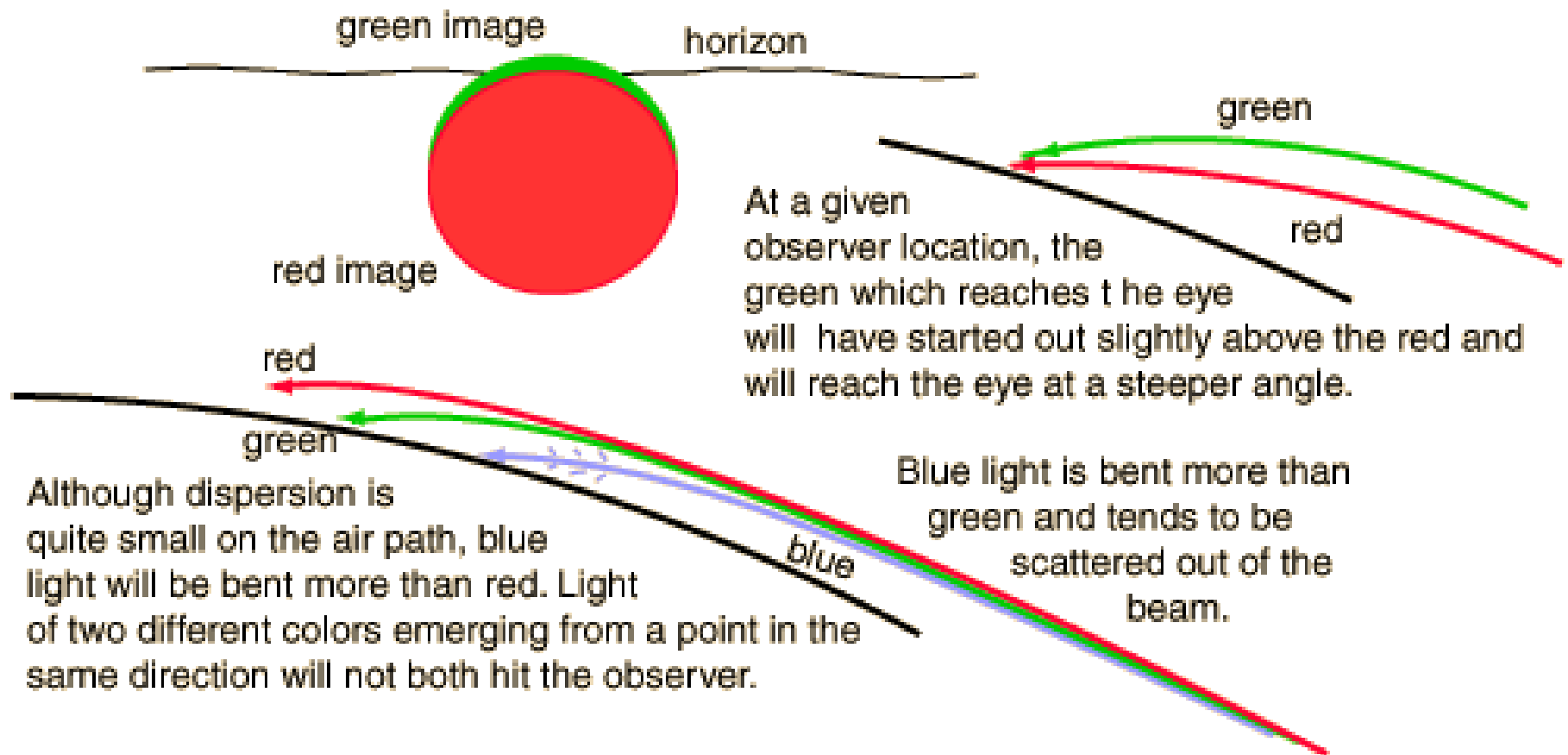


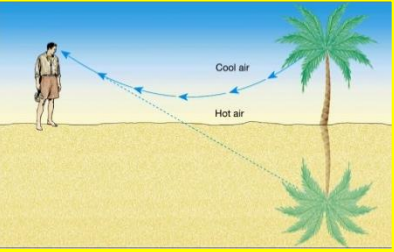
První křížení paprsků

Druhé křížení paprsků

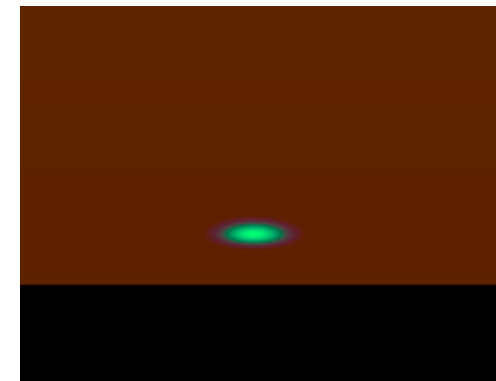
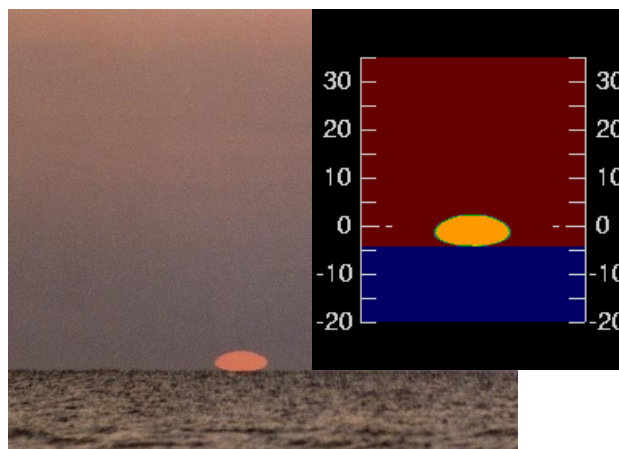
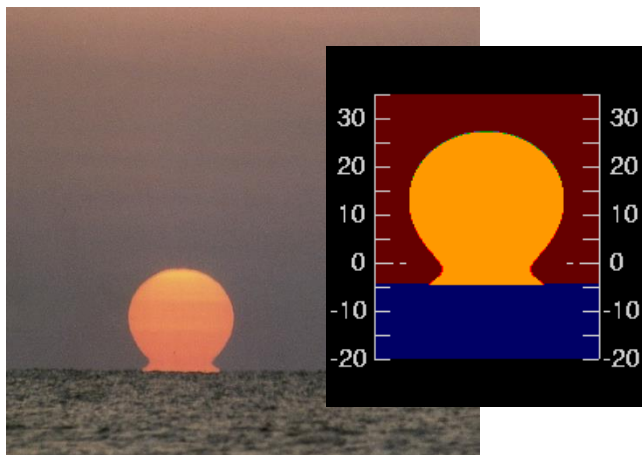
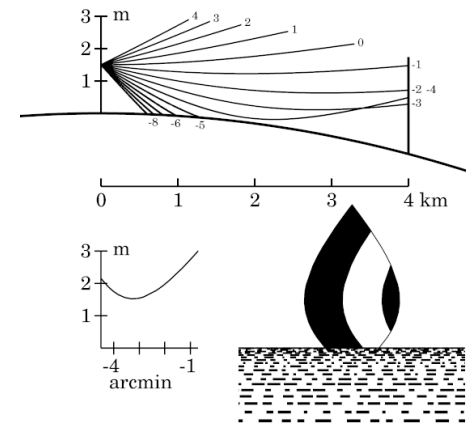
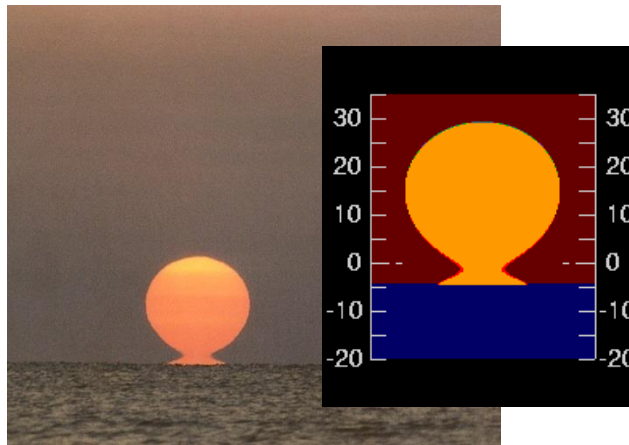
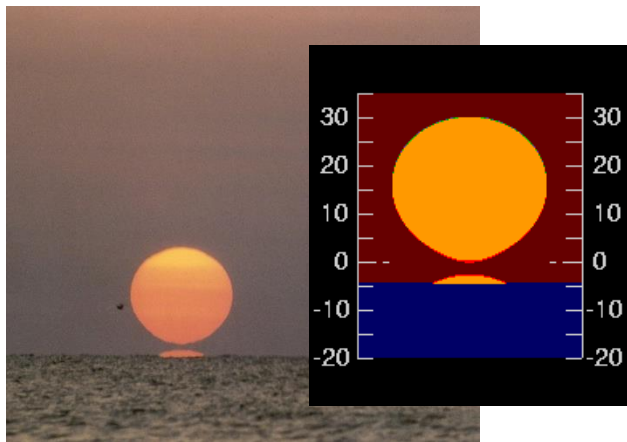


Zelený záblesk



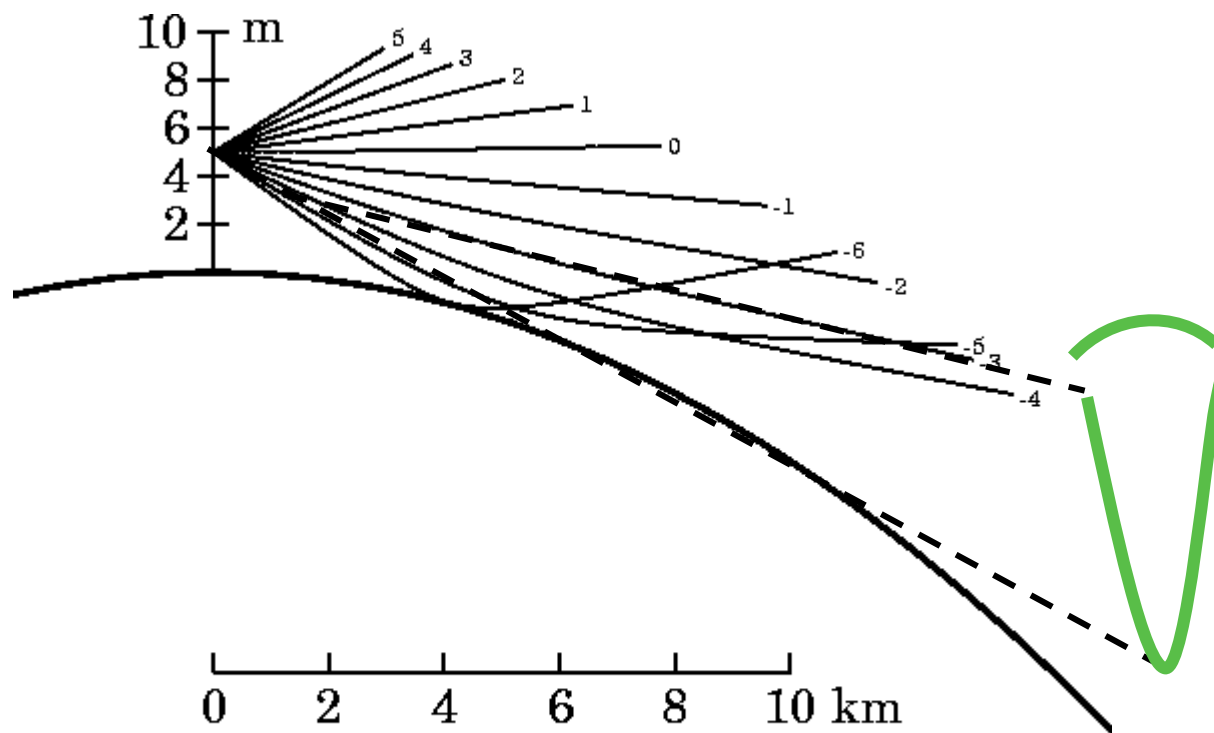


Západ slunce se spodním zrcadlením - zelený záblesk



A perfect Green Flash Sunset.mp4

Zvětšení při spodním zrcadlení



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.

Model=inferior mirage, Hobs=5 m

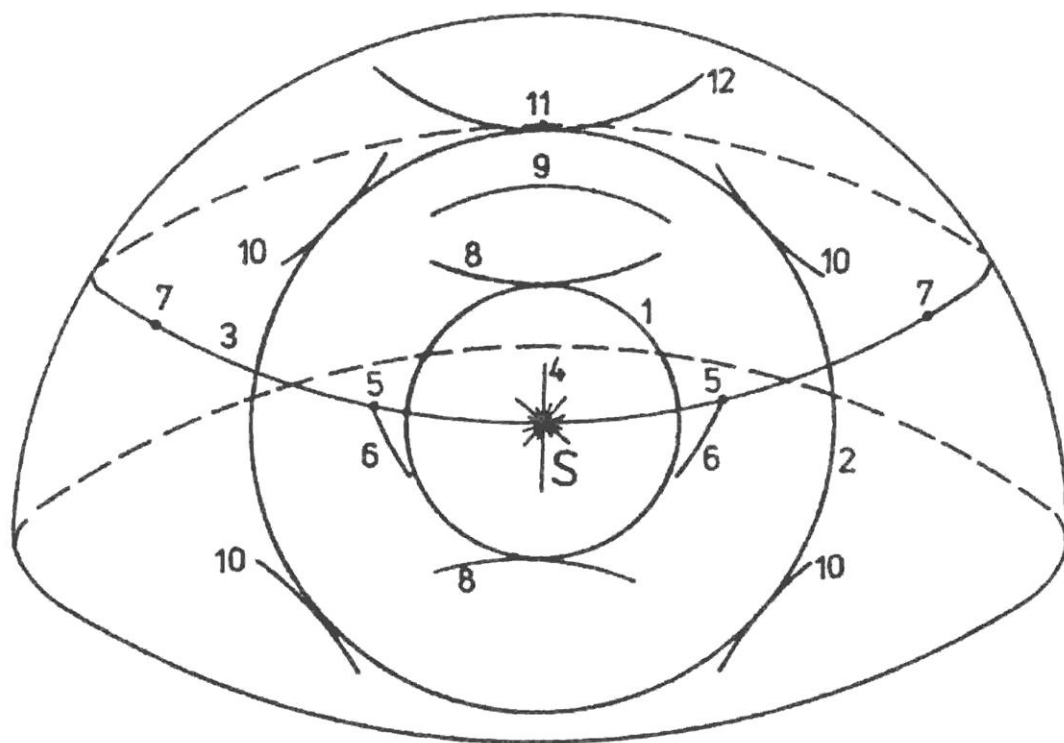
Halové jevy



Hlavní halové jevy

Hlavní halové jevy

odraz a lom na ledových krystalcích



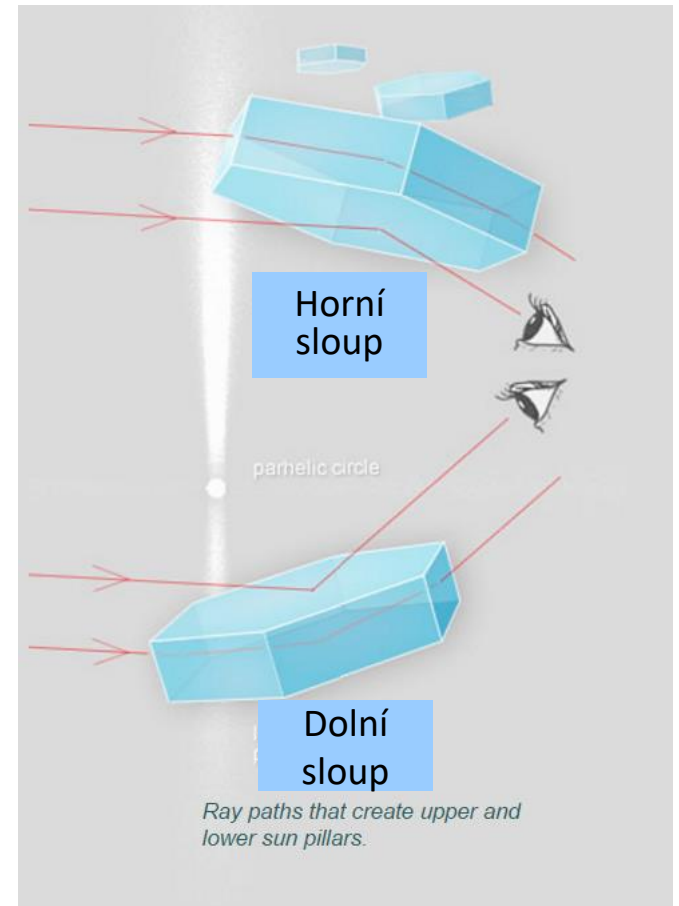
- 1 malé halo 22°
- 2 velké halo 46°
- 3 horizontální kruh
- 4 halový sloup
- 5 parhelia (boční slunce malého hala)
- 6 Lowitzovy oblouky
- 7 paranthelia 120°
- 8 dolní a horní dotkový oblouk
- 9 Parryho oblouk
- 10 dotkové oblouky velkého hala
- 11 antihelium (protislunce na zadní straně horizontálního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

4.20 Hlavní halové jevy.

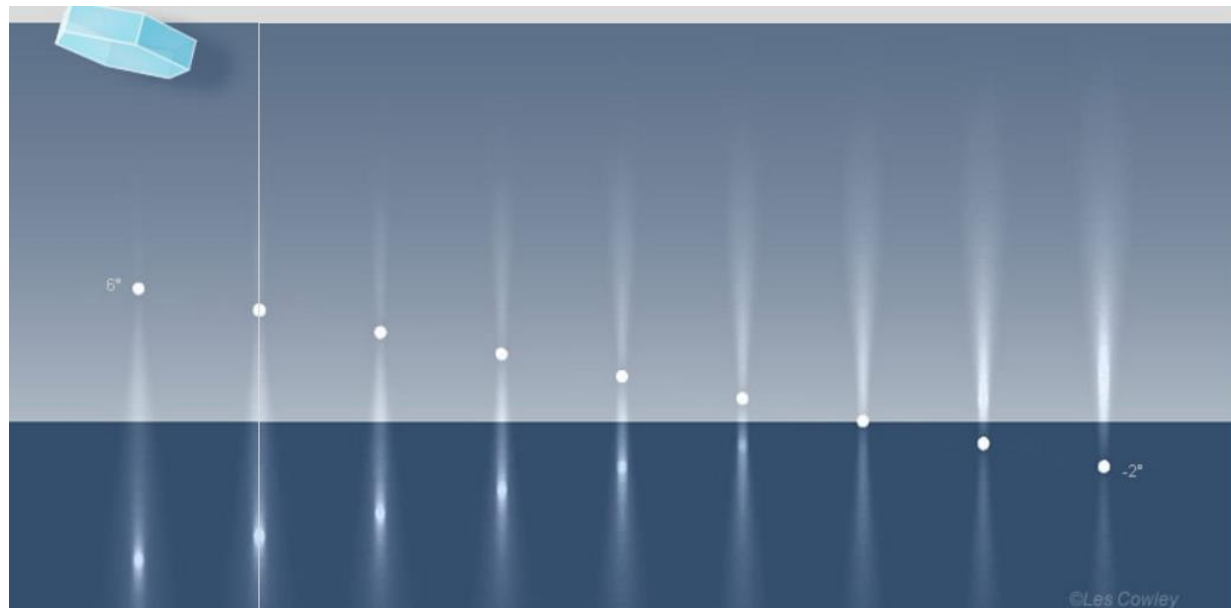
Horní a dolní sloup



Plate-like ice crystals

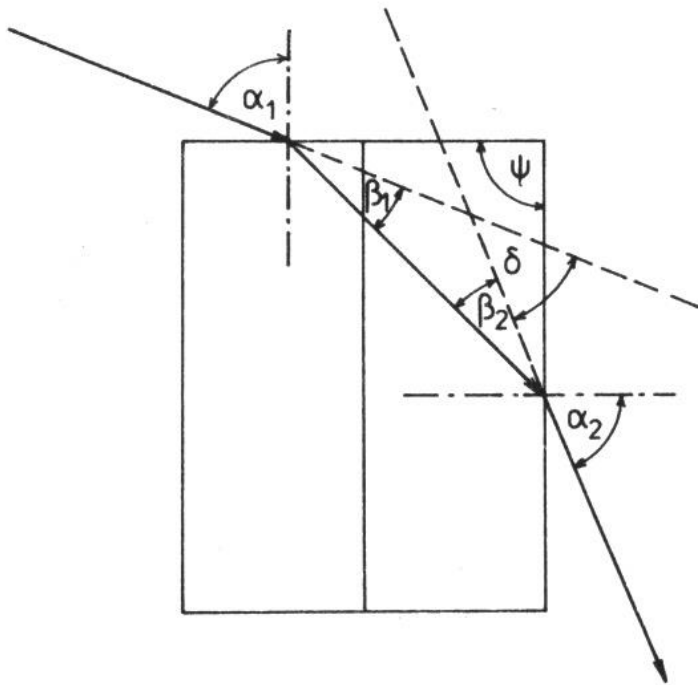


Horní a dolní sloup



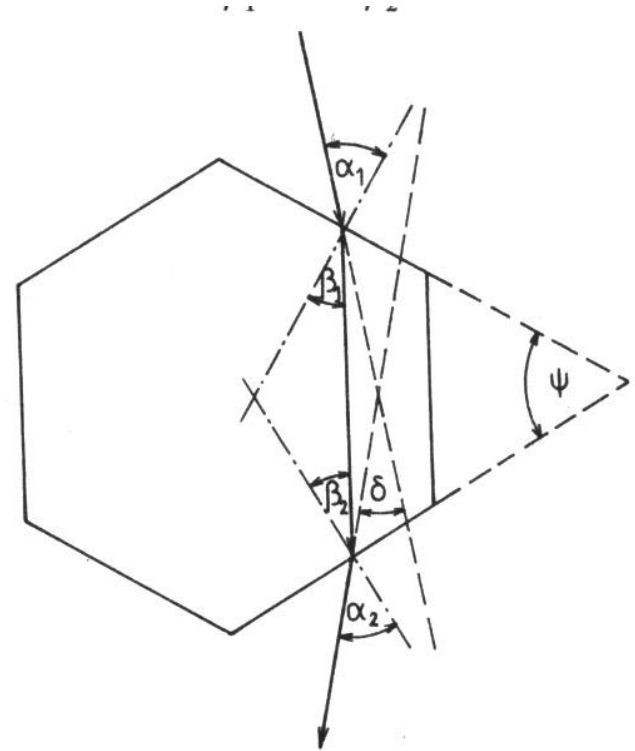
Malé a velké halo

Velké halo



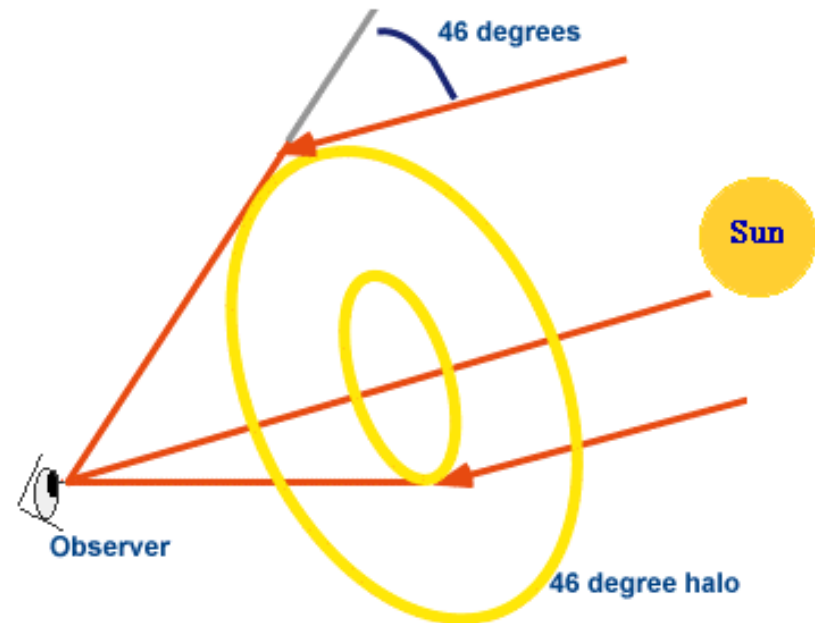
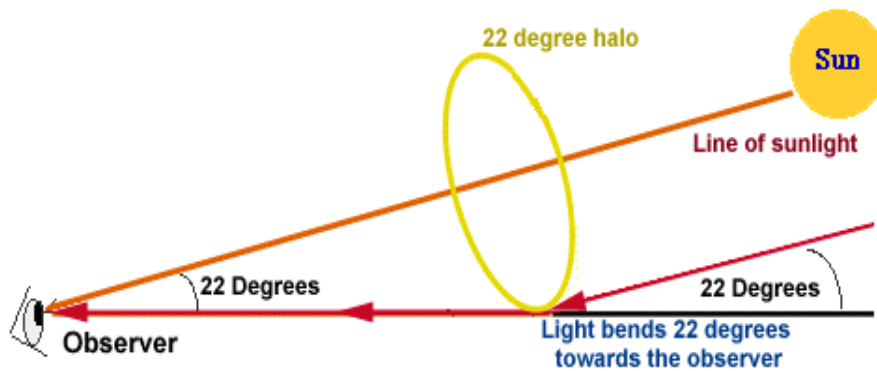
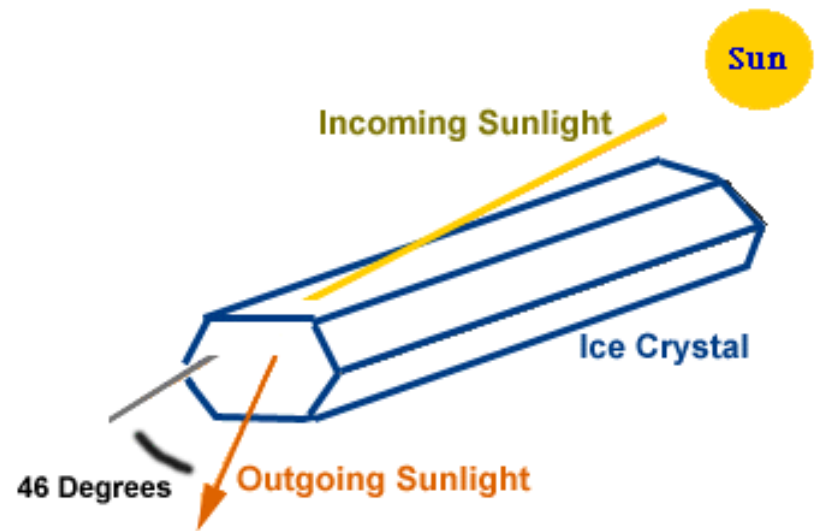
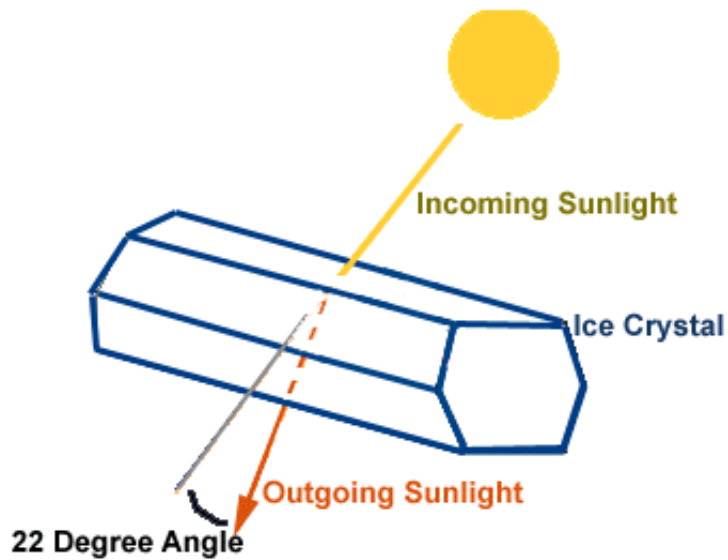
4.24 Lom slunečních paprsků podílejících se na vzniku velkého hala.

Malé halo



4.23 Lom slunečních paprsků podílejících se na vzniku malého hala.

Malé a velké halo



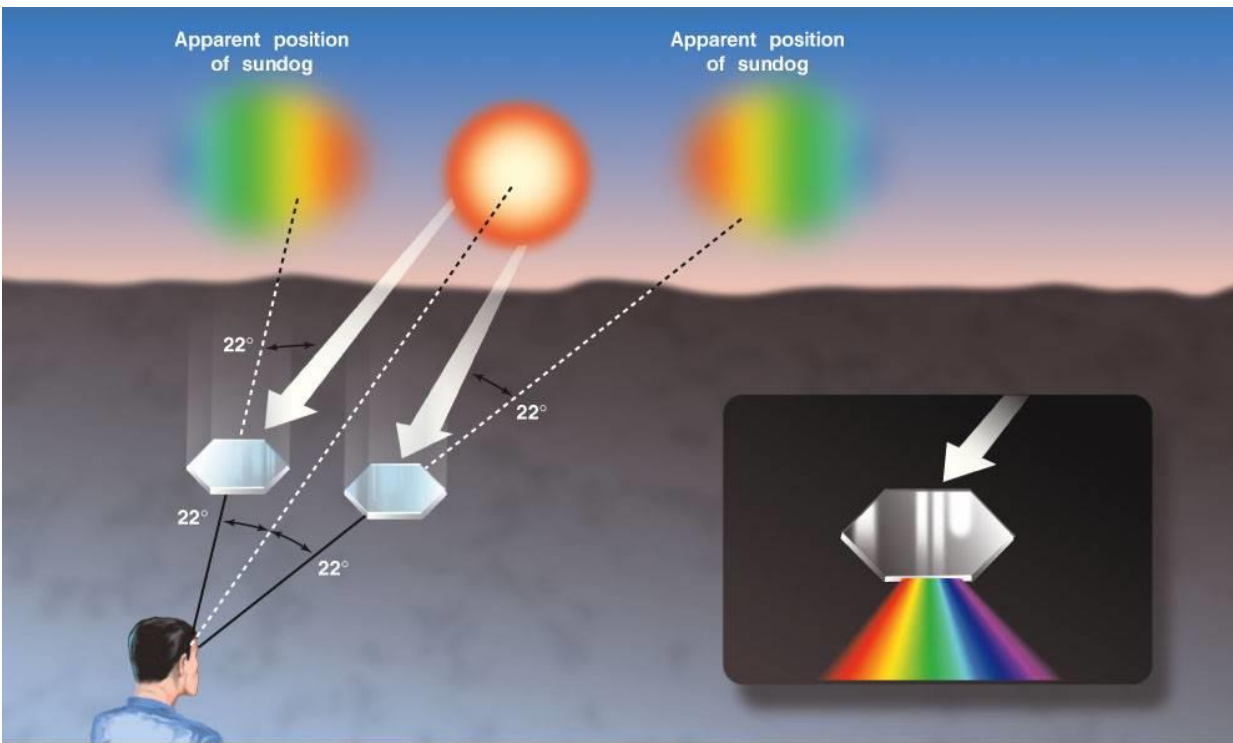
22 Degree Halo – Danson Festival



22 Deg Halo - Solar Observing Day



Parhelium –vedlejší slunce



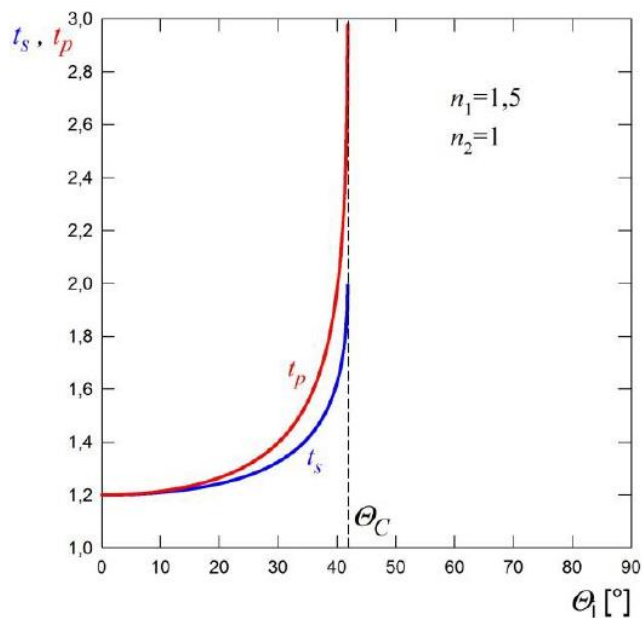
Vznikají lomem paprsků, které procházejí bočními stěnami krystalků ve tvaru destiček

spodní slunce

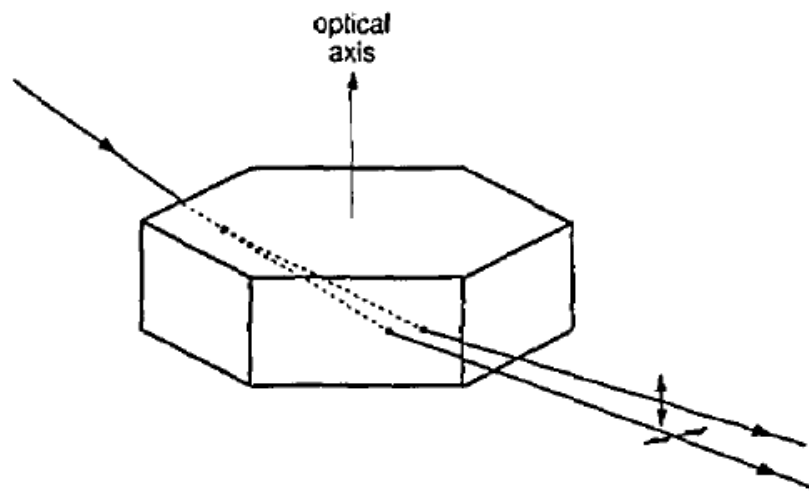


odraz na ledových krystalcích

Příčiny polarizace halových jevů



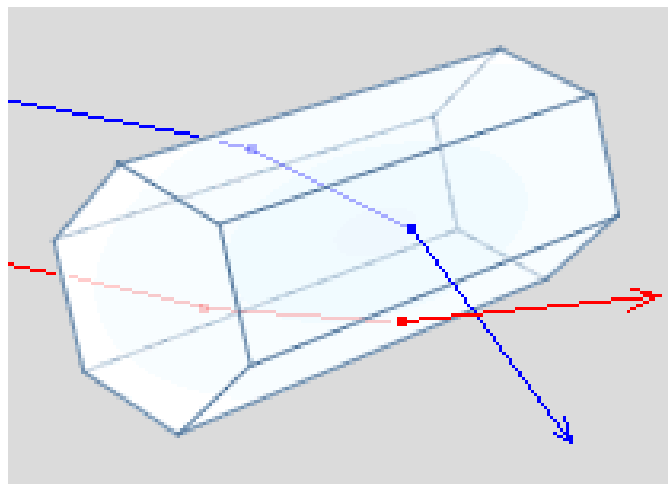
Fresnelovy vztahy – různá intenzita
odraženého a tím i procházejícího
světla pro obě složky lineární polarizace



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

Horní a dolní dotykový oblouk

Horní dotykový
oblouk

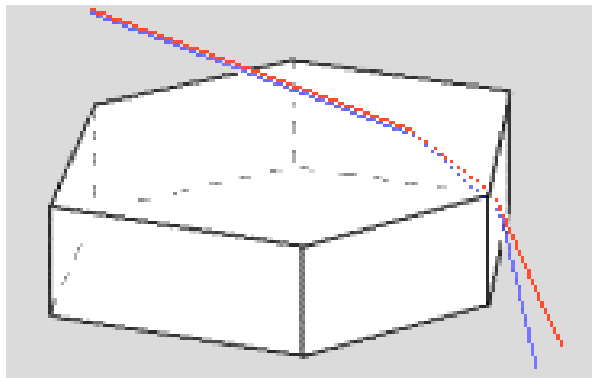


dolní dotykový oblouk

horní dotykový oblouk



Cirkumzenitální oblouk



orientované ploché krystaly

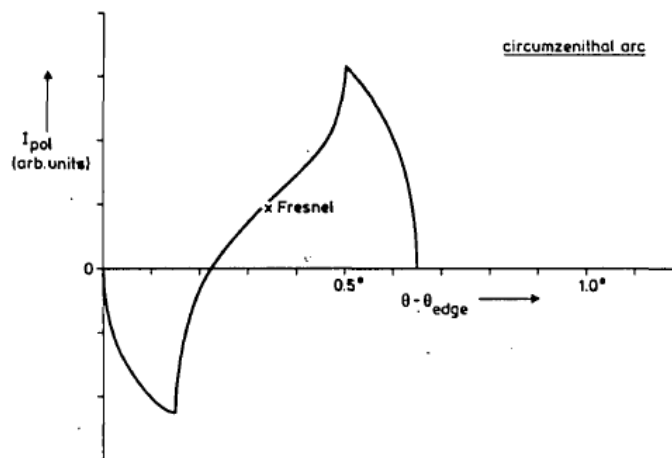


Fig. 6. Quantity of polarized light $I_{pol} = I_1 - I_2$ for the circumzenithal arc as a function of scattering angle θ in the solar vertical for a finite sun. θ_{edge} denotes the inner edge of the halo. Near θ_{edge} only ordinary refracted rays contribute to the light of the halo. For comparison, 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.





Stín nejvyšší hory Španělska
Pico del Teide (3408)

