

DCGI

KATEDRA POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A INTERAKCE

ŠÍŘENÍ SVĚTLA V OPTICKY AKTIVNÍCH PROSTŘEDÍCH

Opticky aktivní prostředí



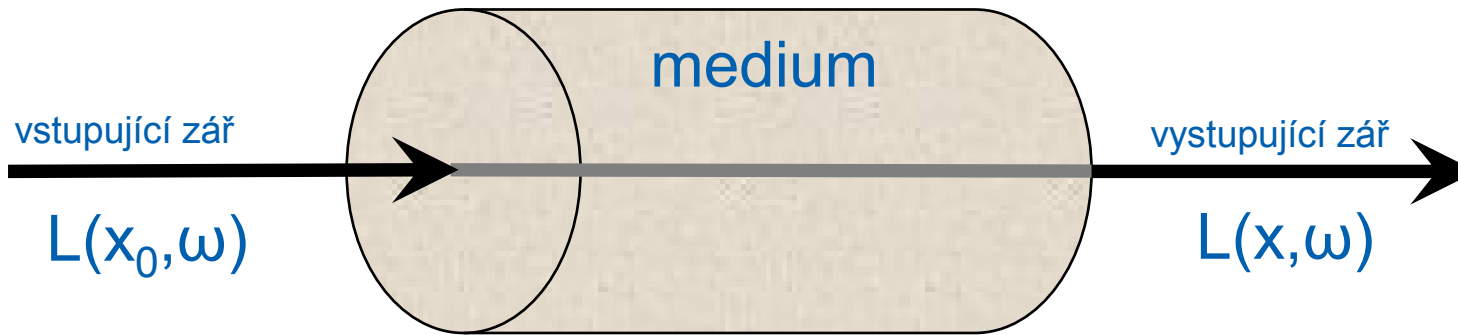
- Základní děje odehrávající se v médiu (opticky aktivní prostředí)

- rozptyl (*scattering*)
- absorpce (*absorption*)
- vlastní vyzařování (*emission*)

- Zakřivení světelné dráhy vlivem měnícího se indexu lomu



Opticky aktivní prostředí



| | |
|--|----------------|
| x | bod v R^3 |
| ω | směr v R^3 |
| L [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$] | zář (radiance) |

■ Charakteristika media

- koeficient absorpce
- koeficient rozptylu
- fázová funkce

- extinkční koeficient
- albedo

$$\kappa_a(x) \quad [m^{-1}]$$

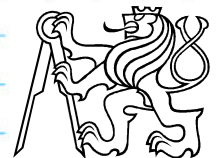
$$\kappa_s(x) \quad [m^{-1}]$$

$$\rho(x, \omega_o, \omega_i)$$

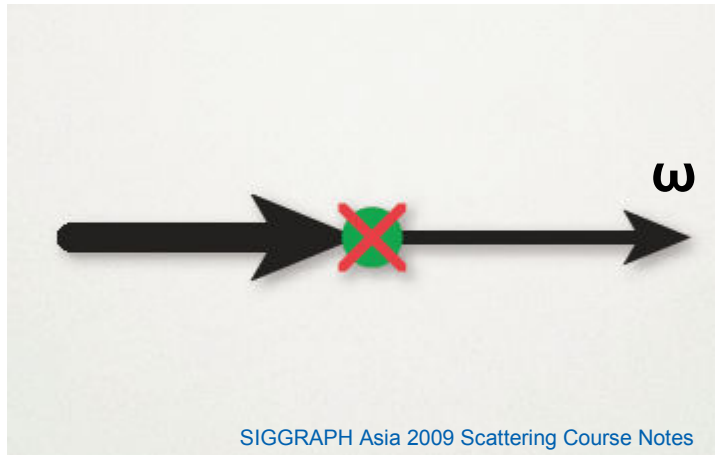
$$\kappa_t(x) = \kappa_a(x) + \kappa_s(x) \quad [m^{-1}]$$

$$\Omega(x) = \kappa_s(x) / \kappa_t(x)$$

vlastnosti media jsou závislé na vlnové délce $\lambda \rightarrow$ tato závislost není pro zjednodušení vztahů uváděna



Útlum vlivem absorpce a rozptylu

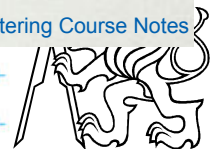
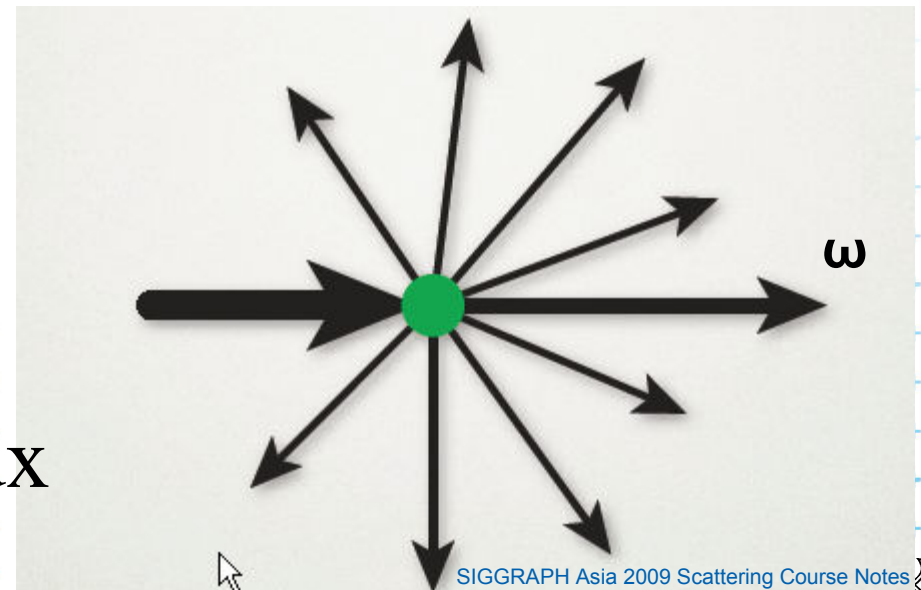


- koeficient absorpce $\kappa_a(x)$ [m^{-1}]
ztráty způsobené přeměnou světla na jiné formy energie (např. teplo)
- ztráty vlivem absorpce
$$dL(x, \omega) = - \kappa_a(x) L(x, \omega) dx$$

- koeficient rozptylu $\kappa_s(x)$ [m^{-1}]
ztráty způsobené rozptylem světla do ostatních směrů

- ztráty vlivem rozptylu

$$dL(x, \omega) = - \kappa_s(x) L(x, \omega) dx$$



Útlum vlivem absorpce a rozptylu

$$\begin{aligned}dL(x, \omega) &= -\kappa_a(x) L(x, \omega) dx - \kappa_s(x) L(x, \omega) dx \\ &= -\kappa_t(x) L(x, \omega) dx\end{aligned}$$

- Integrace → Bouguerův (Beerův) zákon

$$L(x, \omega) = L(x_0, \omega) e^{-\int_{x_0}^x \kappa_t(u) du} = L(x_0, \omega) \tau(x_0, x)$$

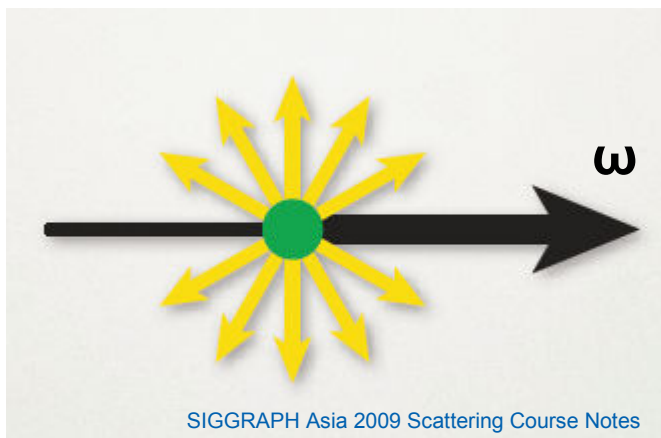
- Propustnost (*transmittance*) mezi body x_0 a x

$$\tau(x_0, x) = e^{-\int_{x_0}^x \kappa_t(u) du}$$

- Optická tloušťka (*optical thickness*) $\int_{x_0}^x \kappa_t(u) du$



Vlastní vyzařování (*emission*)



- emitovaná zář $L_e(x)$
absorpce → zahřátí prostředí na teplotu T → záření černého tělesa → Planckův vyzařovací zákon $L_e(\lambda, T)$
- změna záře vlivem vyzařování

$$dL(x, \omega) = \kappa_a(x) L_e(x, \omega) dx$$

Polární záře - částice slunečního větru se sráží s atomy atmosféry a ty vyzařují energii ve formě světla.



RSO - Participating Media

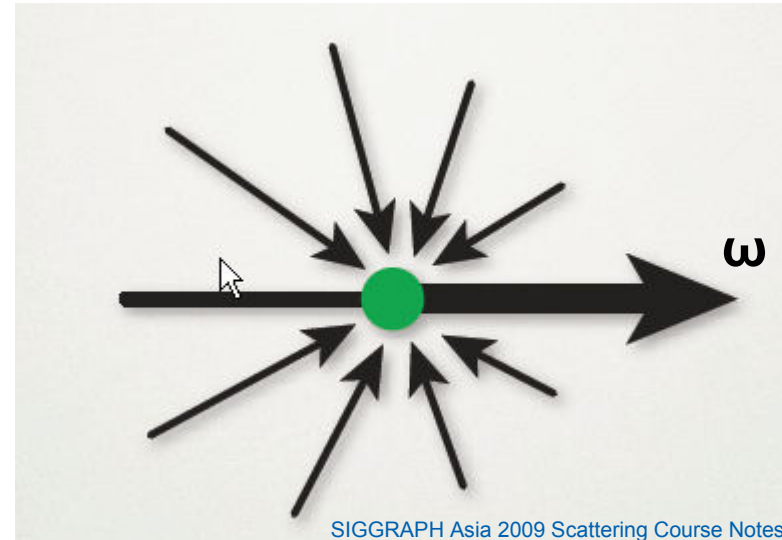
(6)



Rozptyl (*in-scattering*)

rozptyl světla vede také ke zvýšení záře ve zvoleném směru ω

- **přírůstek vlivem rozptylu**
= množství světla dopadajícího ze všech směrů ω_i , které je v bodě x rozptýleno do zvoleného směru ω



$$dL(x, \omega) = \frac{\kappa_s(x)}{4\pi} \int_{\text{sphere}} L(x, \omega_i) p(x, \omega, \omega_i) d\omega_i$$

fázová funkce

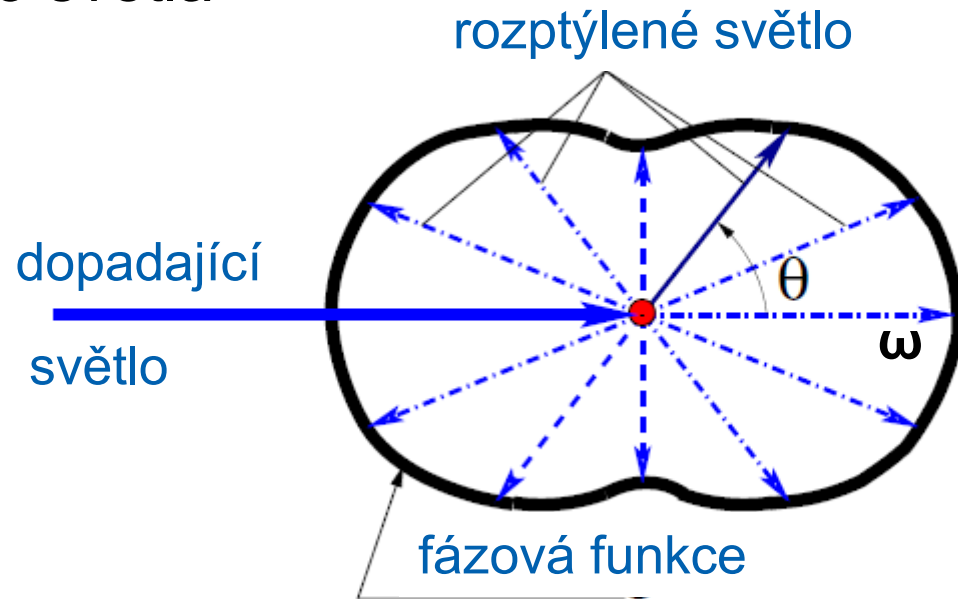
prostorový úhel odpovídající směru ω_i



Fázová funkce (*phase function*)

- Fázová funkce $p(x, \omega, \omega_i)$ – definuje prostorové rozložení rozptýleného světla

$$\int_{\text{sphere}} p(x, \omega, \omega_i) d\omega_i = 1$$



- závislost na velikosti částic a vlnové délce



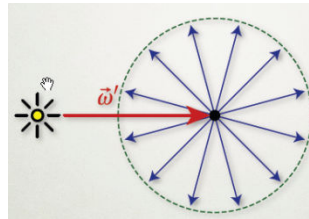
Henyeey-Greensteinova fázová funkce

Jednoduchá aproximace fázové funkce

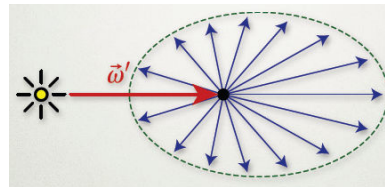
$$p(x, \omega, \omega_i) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad \cos \theta = \omega \cdot \omega_i$$

parametr anisotropie g

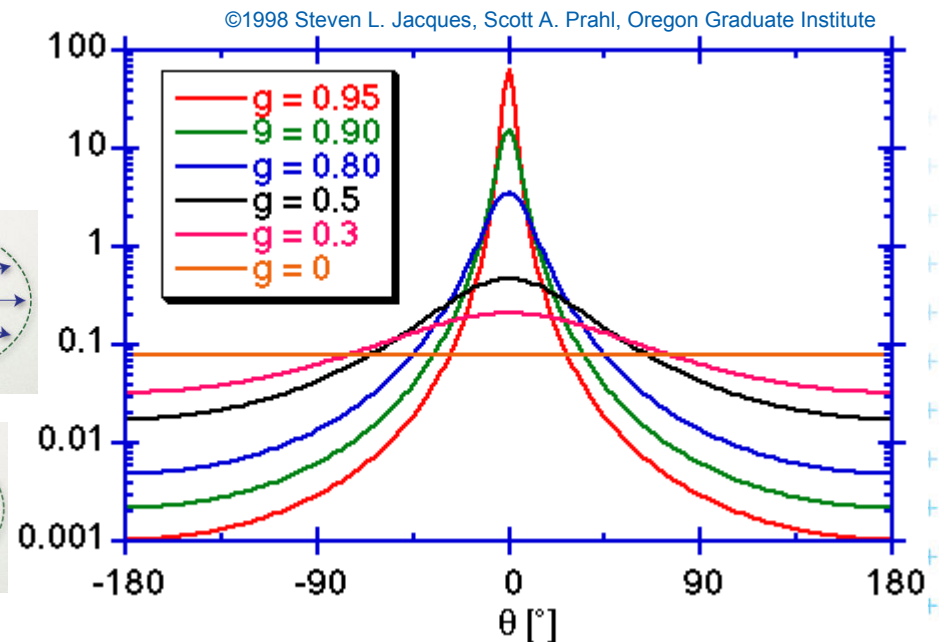
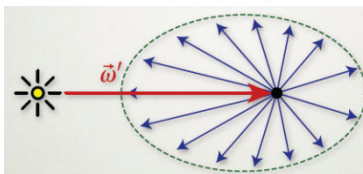
- $g=0$ isotropní funkce



- $g>0$ dopředný rozptyl



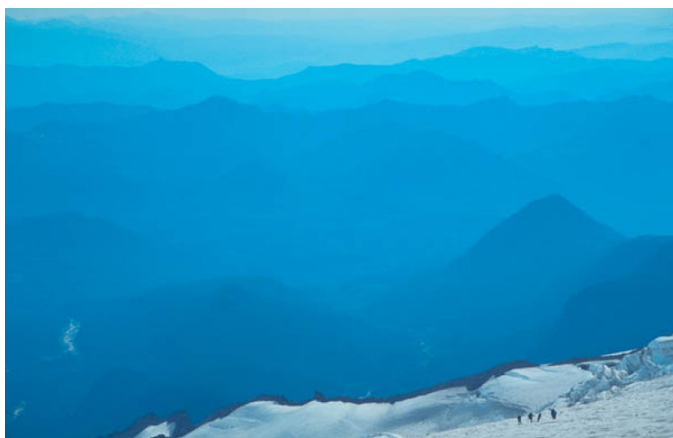
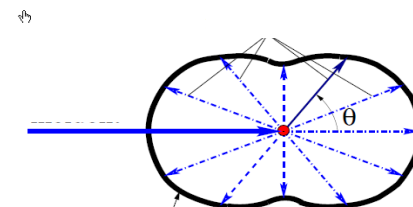
- $g<0$ zpětný rozptyl



Rozptyl světla v atmosféře

- Rozptyl světla na molekulách vzduchu (tzv. *Rayleighova teorie rozptylu*)

$$K_s(x) \approx \frac{1}{\lambda^4}$$



zenit – převládá “modrá část” spektra neboť modrá se rozptyluje snadněji než červená část spektra

horizont – převládá “červená část” spektra, modrá část spektra byla rozptýlena vzhledem k dlouhé dráze atmosférou



Rovnice šíření světla

$$\frac{dL(x, \omega)}{dx} = \kappa_a(x)L_e(x, \omega) + \frac{\kappa_s(x)}{4\pi} \int_{\text{sphere}} L(x, \omega_i) p(x, \omega, \omega_i) d\omega_i$$
$$- \kappa_a(x)L(x, \omega) - \kappa_s(x)L(x, \omega)$$

⇓

$$\frac{dL(x, \omega)}{dx} = \kappa_t(x)J(x, \omega) - \kappa_t(x)L(x, \omega)$$

- $J(x)$ - přírůstek záře v bodě x ve směru ω (*source function*)

$$J(x, \omega) = (1 - \Omega(x))L_e(x, \omega) + \frac{\Omega(x)}{4\pi} \int_{\text{sphere}} L(x, \omega_i) p(x, \omega, \omega_i) d\omega_i$$

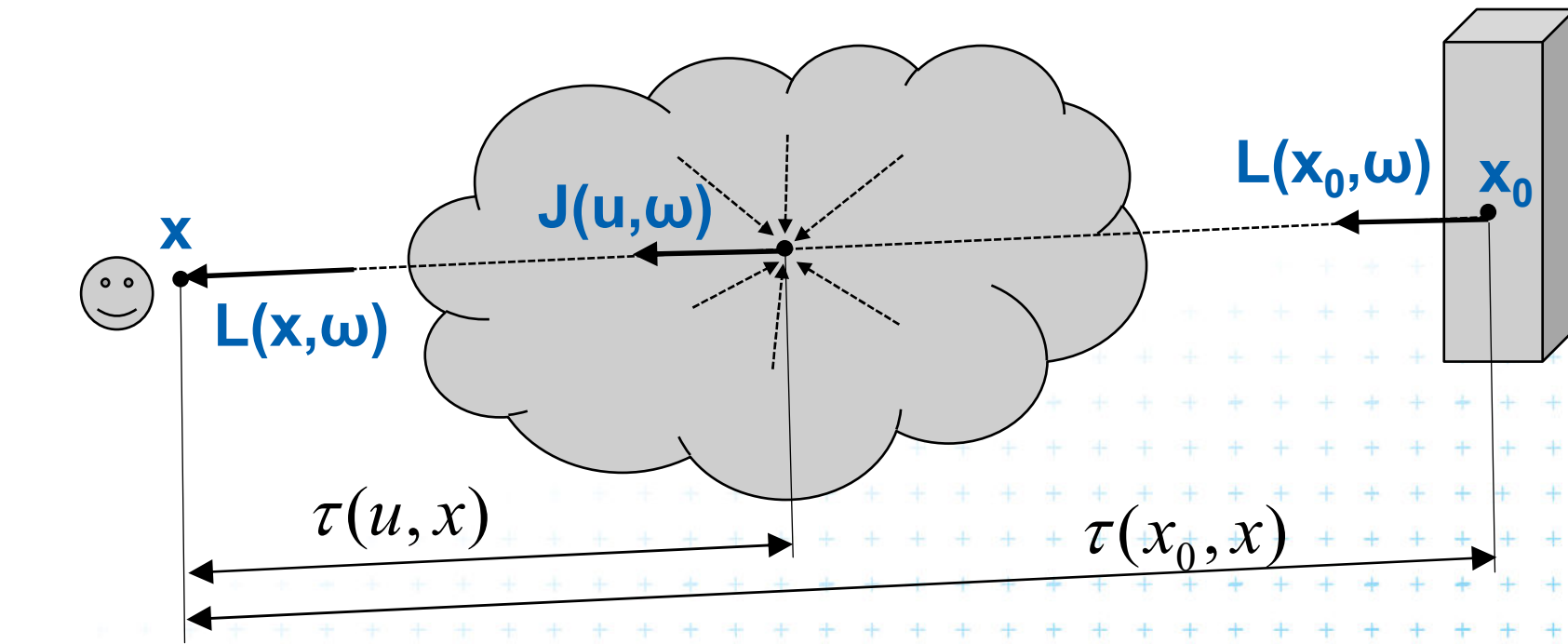


Rovnice šíření světla – integrální tvar

$$L(x, \omega) = \tau(x_0, x)L(x_0, \omega) + \int_{x_0}^x \tau(u, x)\kappa_t(u)J(u, \omega)du$$

$L_{ri}(x, \omega)$

$L_m(x, \omega)$



Rovnice šíření světla – integrální tvar

$$J(x, \omega) = (1 - \Omega(x))L_e(x, \omega)$$

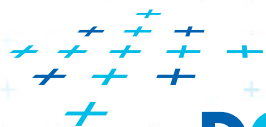
vlastní vyzařování

$$+ \frac{\Omega(x)}{4\pi} \int_{\text{sphere}} L_{ri}(x, \omega_i) p(x, \omega, \omega_i) d\omega_i$$

rozptyl prvního řádu
(single scattering)

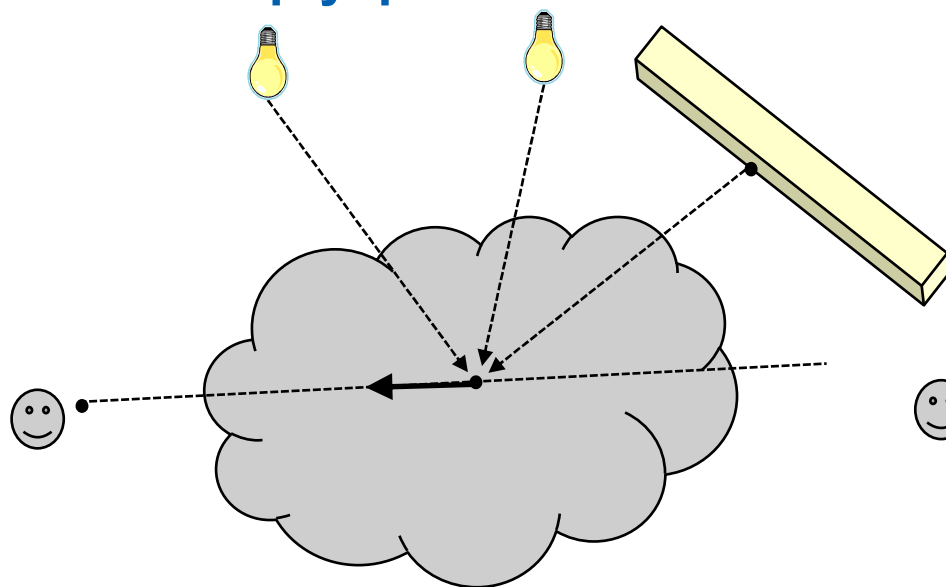
$$+ \frac{\Omega(x)}{4\pi} \int_{\text{sphere}} L_m(x, \omega_i) p(x, \omega, \omega_i) d\omega_i$$

vícenásobný rozptyl
(multiple scattering)

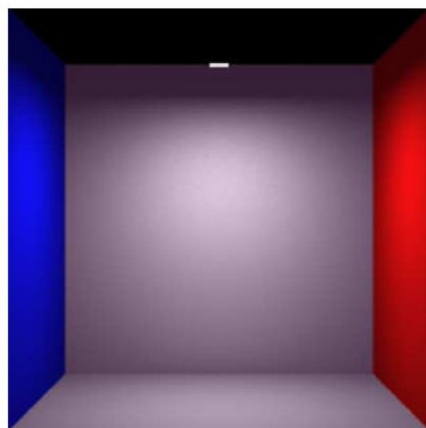
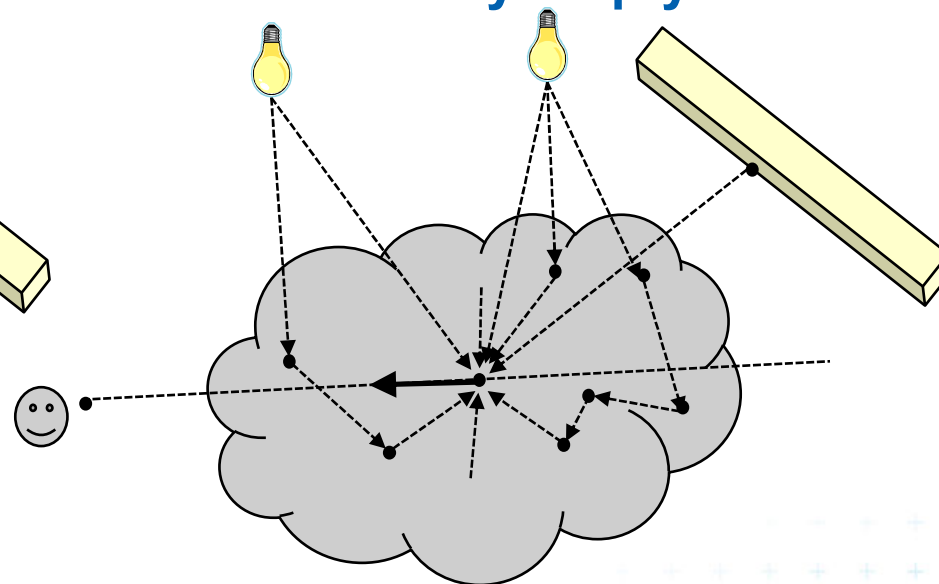


Rozptyl prvního a vyšších řádů

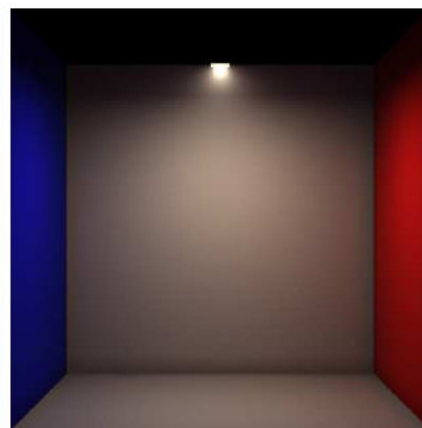
rozptyl prvního řádu



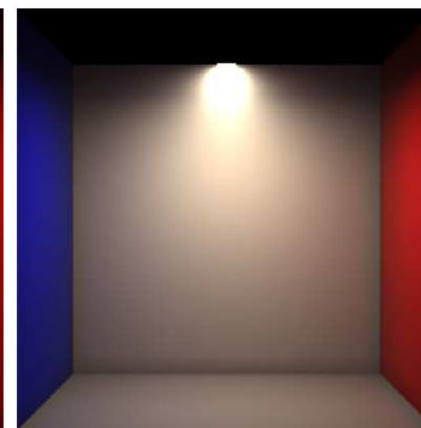
vícenásobný rozptyl



bez rozptylu



první řád



vícenásobný

Premože et al 2004

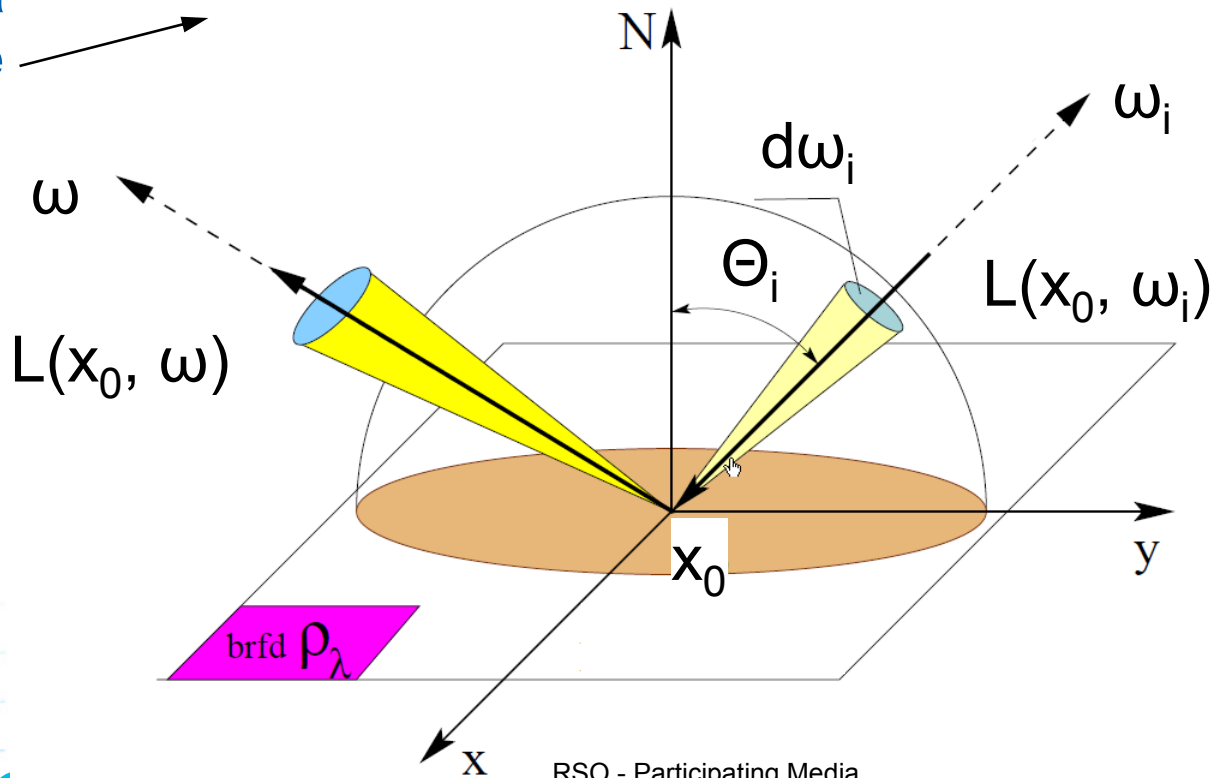


Okrajové podmínky

$$L(x_0, \omega) = L_e(x_0, \omega) \quad \text{vlastní vyzařování plochy}$$

$$+ \int_{\text{hemisphere}} L(x_0, \omega_i) \rho_{bd}(x_0, \omega, \omega_i) \cos \Theta_i d\omega_i$$

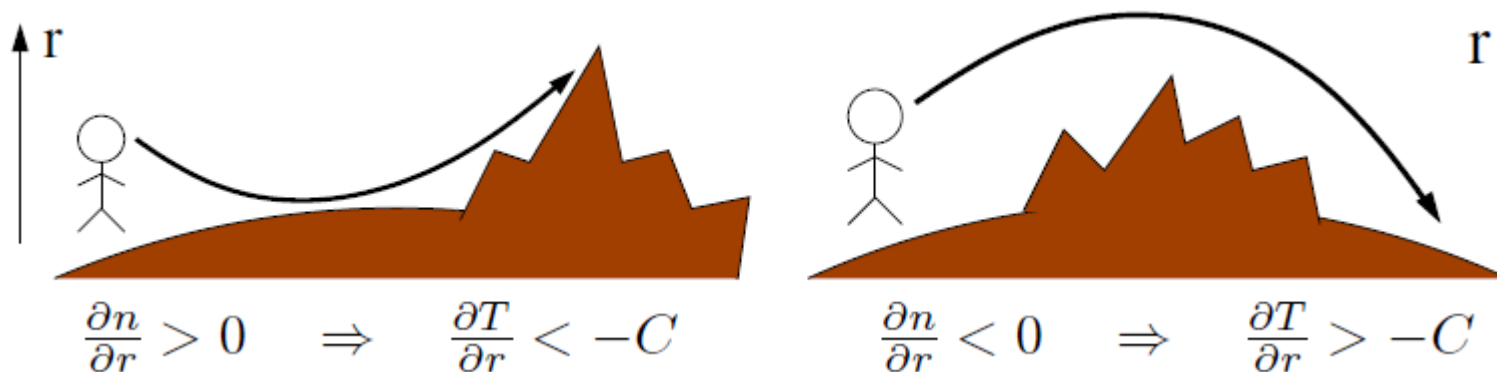
zář odražená od plochy ve směru ω



Zakřivení světelných paprsků v atmosféře

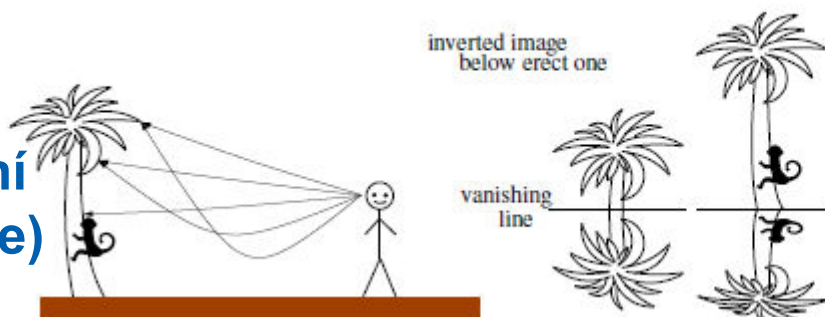
- zakřivení paprsků je způsobeno měnícím se indexem lomu, který závisí na teplotě T , tlaku p a vlnové délce λ

$$\frac{\partial n}{\partial r} = -(n_0 - 1) \frac{T_0 p}{p_0 T^2} \left(C + \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad C \approx 3.42 \frac{K}{100m}$$

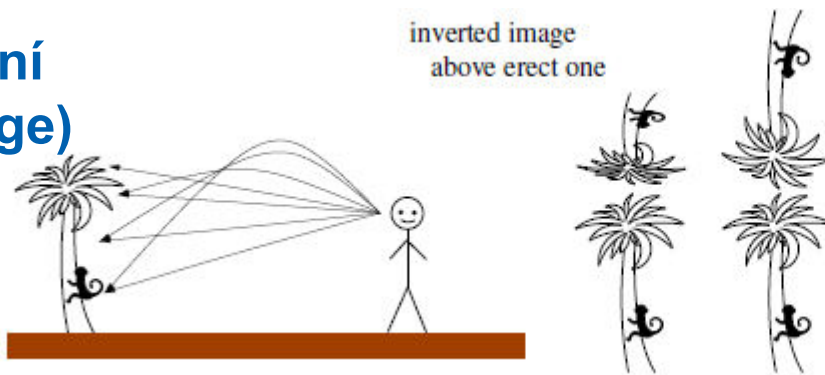


Zakřivení světelných paprsků v atmosféře

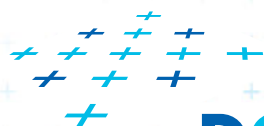
dolní zrcadlení
(inferior mirage)



horní zrcadlení
(superior mirage)

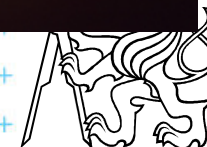


mock mirage,
green flash,
red flash



DCGI

RSO - Participating Media



Literatura

- Eva Cerezo, Frederic Perez, Xavier Pueyo, Francisco J. Seron, Francois X. Sillion: **A Survey on Participating Media Rendering Techniques**. The Visual Computer, Volume 21, Number 5, Springer, June 2005.
- Diego Gutierrez, Henrik Wann Jensen, Wojciech Jarosz, and Craig Donner: SIGGRAPH Asia 2009 Course: **Scattering**.
- Simon Premože, Michael Ashikhmin, Ravi Ramamoorthi, and Shree Nayar: **Practical Rendering of Multiple Scattering Effects in Participating Media**. Eurographics Symposium on Rendering, June 2004.

