

# Distribuované sledování paprsku

© 1996-2018 Josef Pelikán  
CGG MFF UK Praha

[pepca@cgg.mff.cuni.cz](mailto:pepca@cgg.mff.cuni.cz)

<http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/>

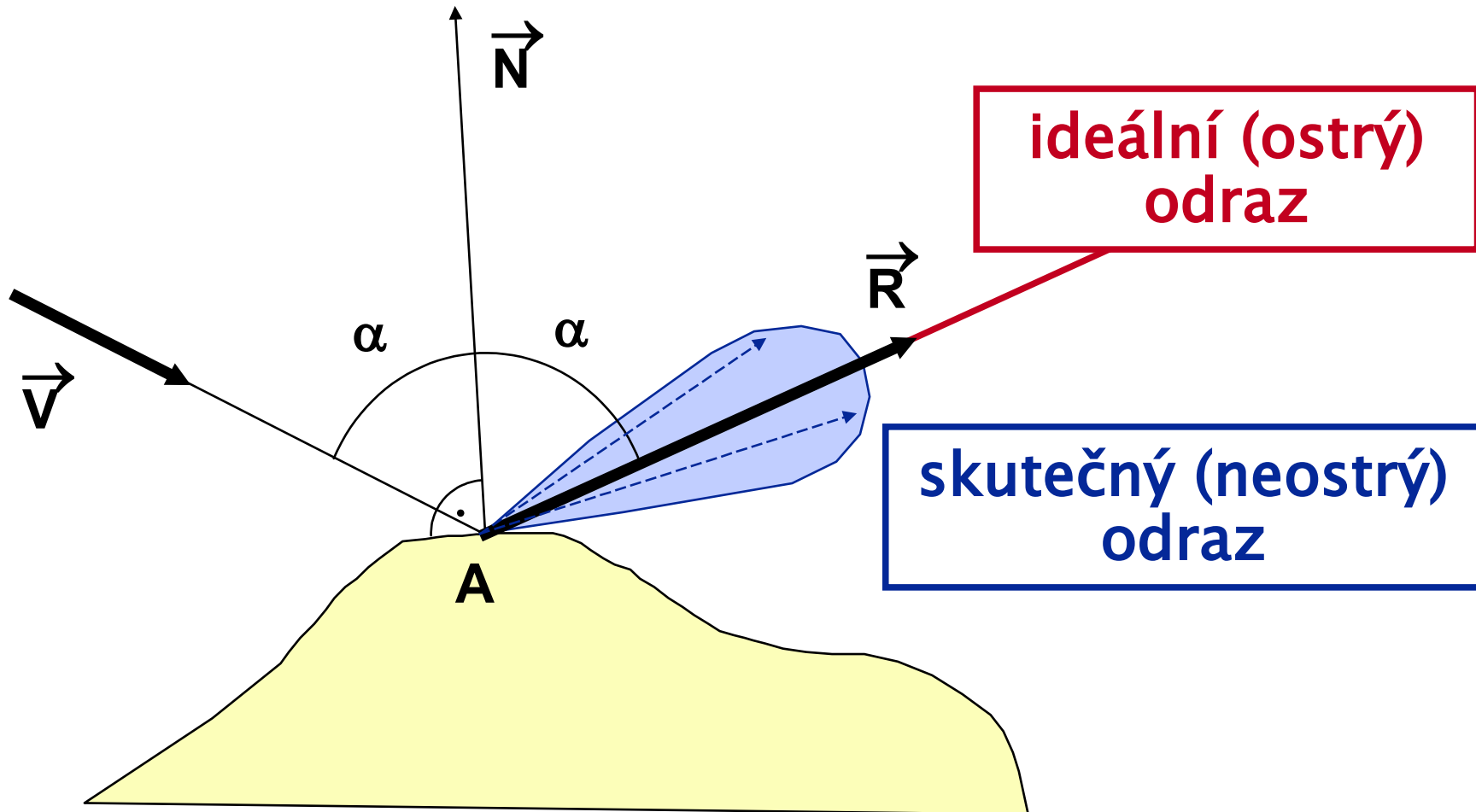
# Distribuované sledování paprsku



- ♦ **zvýšení kvality** (věrnosti) generovaného obrazu
  - měkké stíny, odrazy a lomy světla
  - rozmazání pohybem
  - simulace hloubky ostrosti světelného objektivu
  - rozklad světla při lomu (index lomu závisí na  $\lambda$ )
- ♦ zavedení **nových proměnných** do obrazové funkce
  - úhel odrazu, lomu, vlnová délka světla, pozice bodu na světelném zdroji, na čočce objektivu, čas, ..



# Vznik neostrého odrazu





# Výpočet neostrého odrazu

Ostrý odraz:

$$I(\mathbf{V}) = I(\mathbf{R})$$

(jeden odražený paprsek)

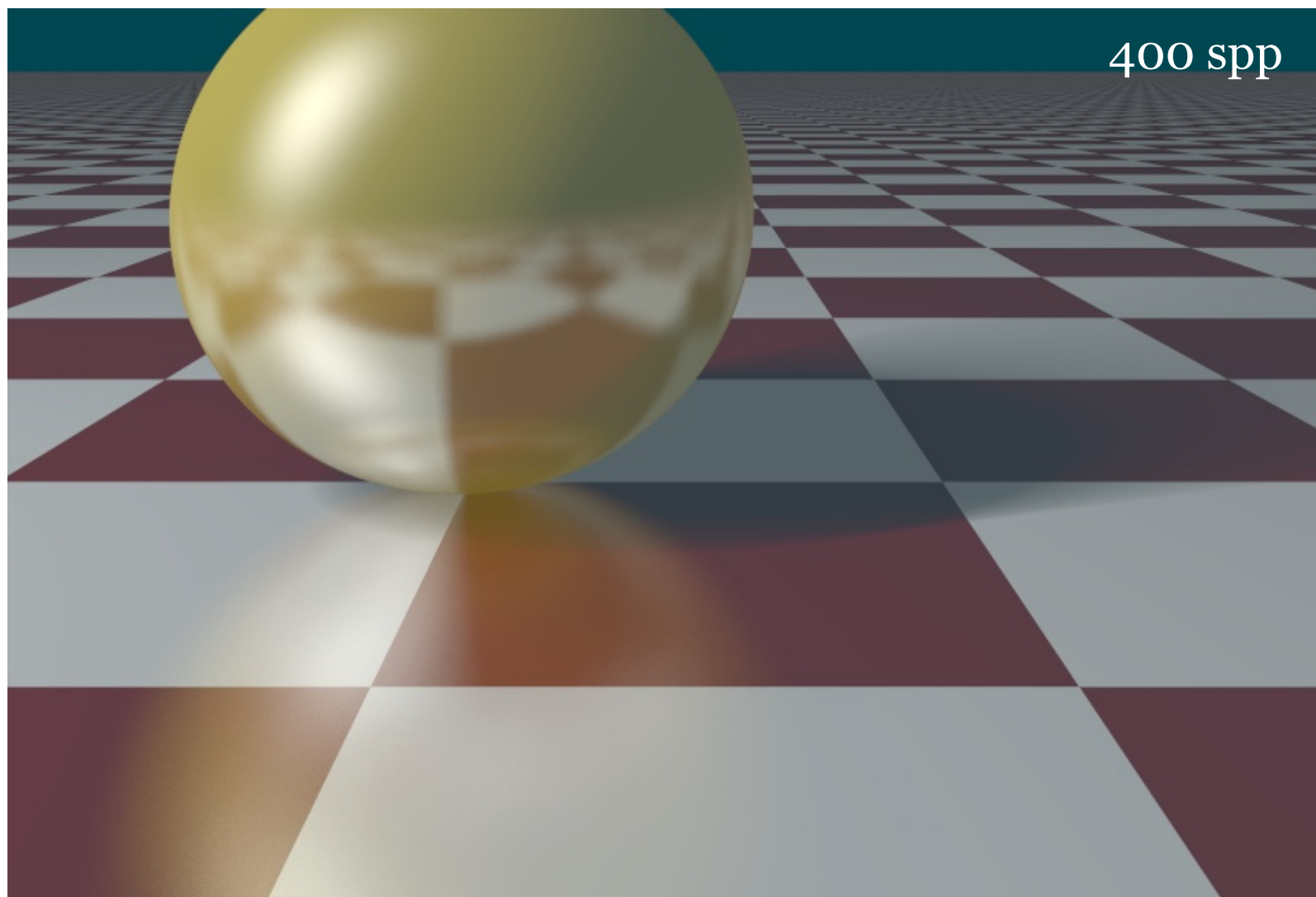
Neostrý odraz:

$$I(\mathbf{V}) = \iint_{\text{koule}} I(\mathbf{R}(\varphi, \theta)) \cdot \text{BRDF}(\alpha, \beta, \varphi, \theta) \, d\varphi \, d\theta$$

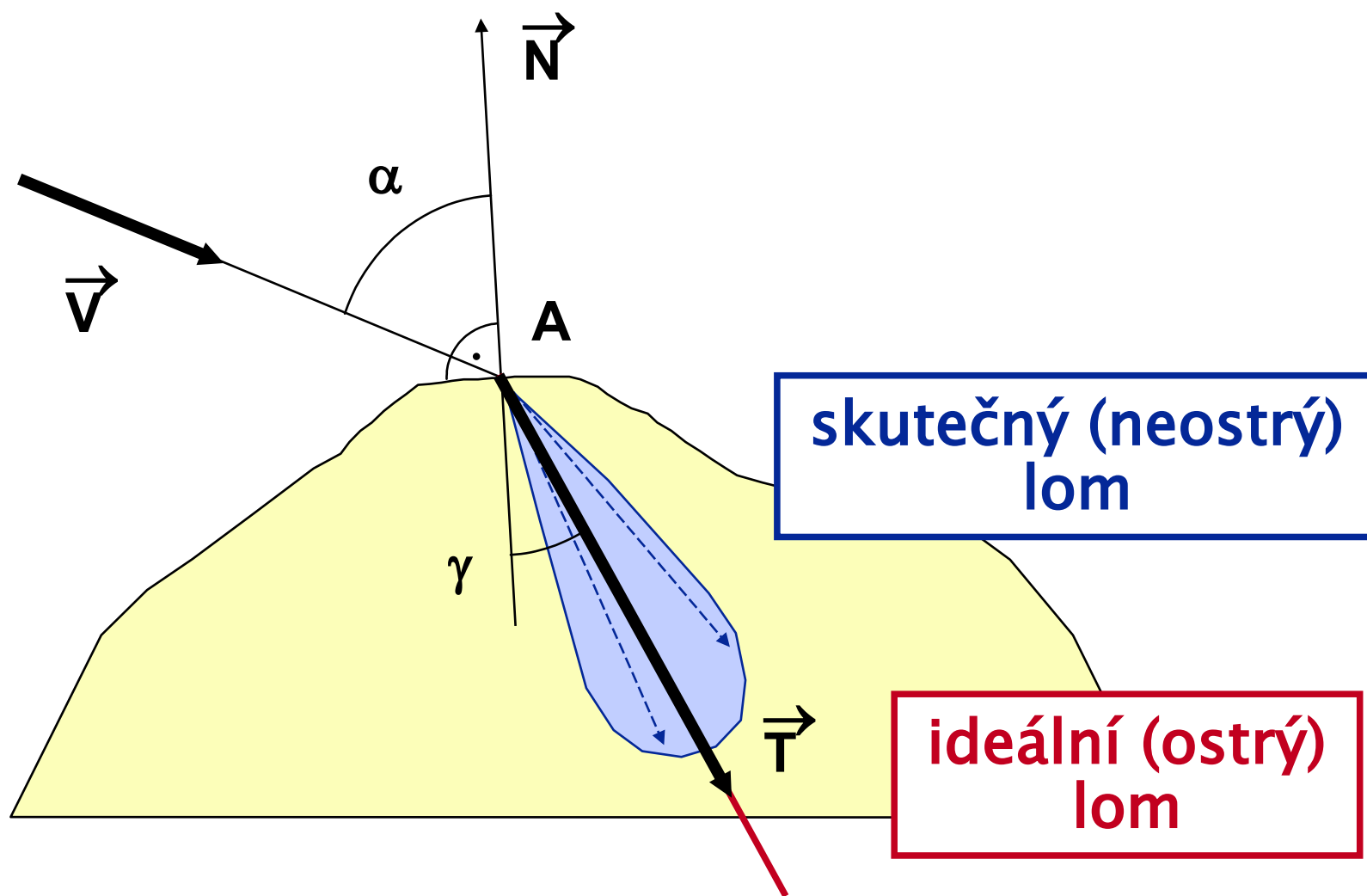
funkce odrazivosti

(vážený integrální průměr  
přes všechny směry odrazu)

# Ukázka neostrého odrazu

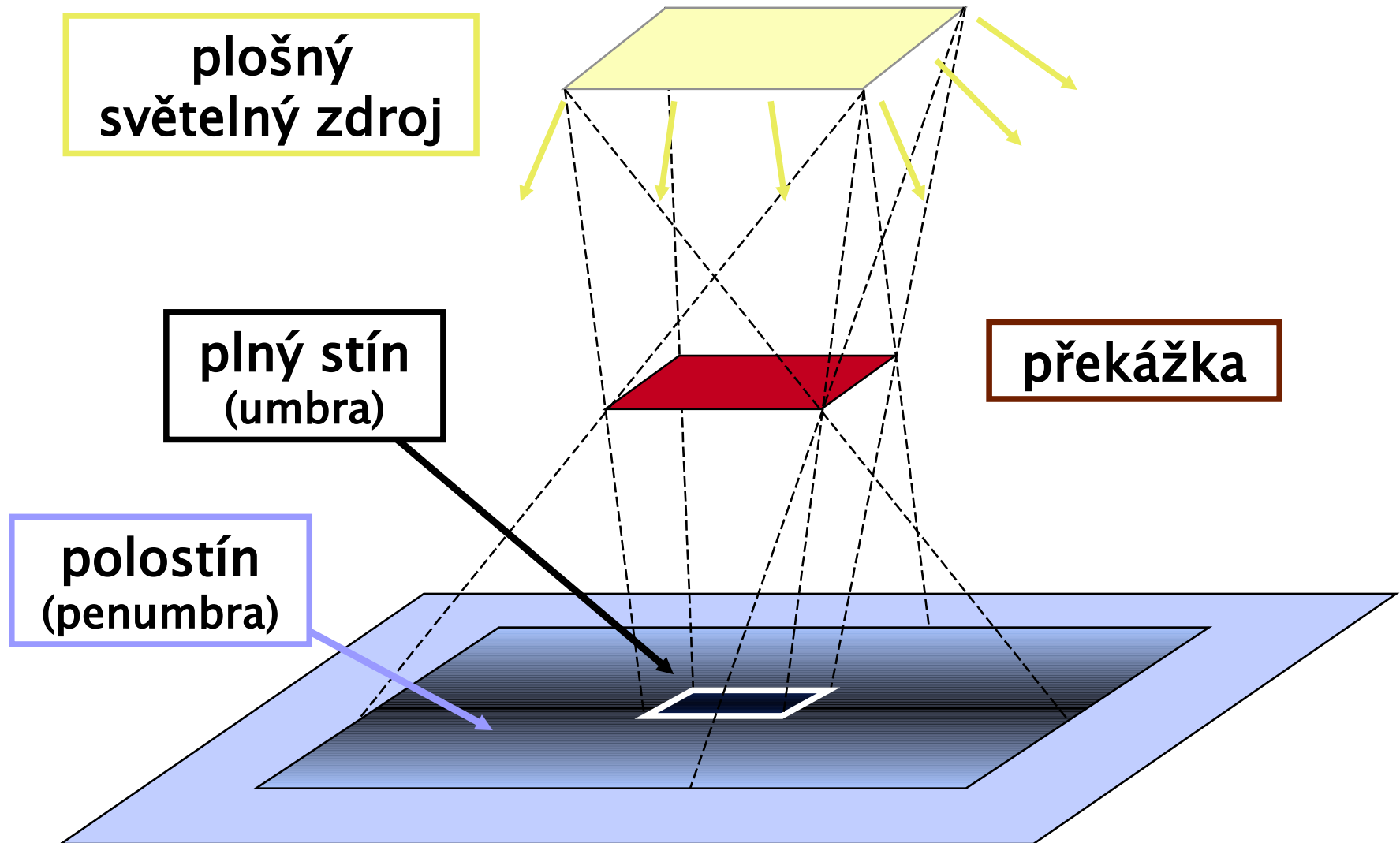


# Neostrý lom





# Vznik měkkého stínu





# Výpočet měkkých stínů

Příspěvek bodového světelného zdroje:

$$I(\mathbf{A}) = \begin{cases} I_L & \text{pokud je zdroj vidět z bodu } \mathbf{A} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

Příspěvek homogenního plošného zdroje:

$$I(\mathbf{A}) = I_L \cdot S[\%]$$

podíl části světelného zdroje viditelné z bodu  $\mathbf{A}$





# Výpočet měkkých stínů

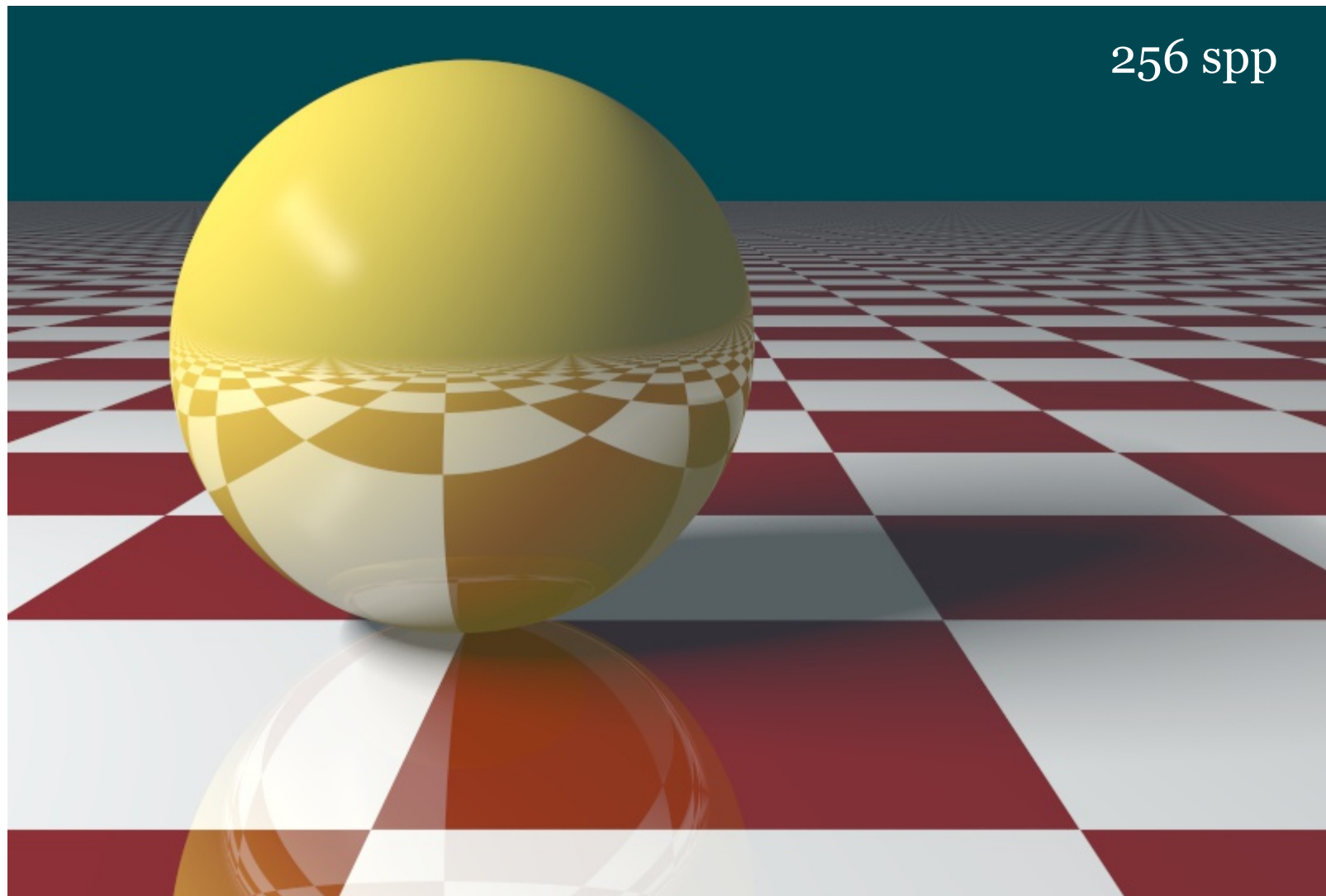
Příspěvek nehomogenního plošného zdroje:

$$I(\mathbf{A}) = \iint_{\text{plocha zdroje}} I_L(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \cdot \underline{\text{vis}(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{v})} \, du \, dv$$

funkce viditelnosti

$$\underline{\text{vis}(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{v})} = \begin{cases} 1 & \text{pokud je } \mathbf{S}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \text{ vidět z bodu } \mathbf{A} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

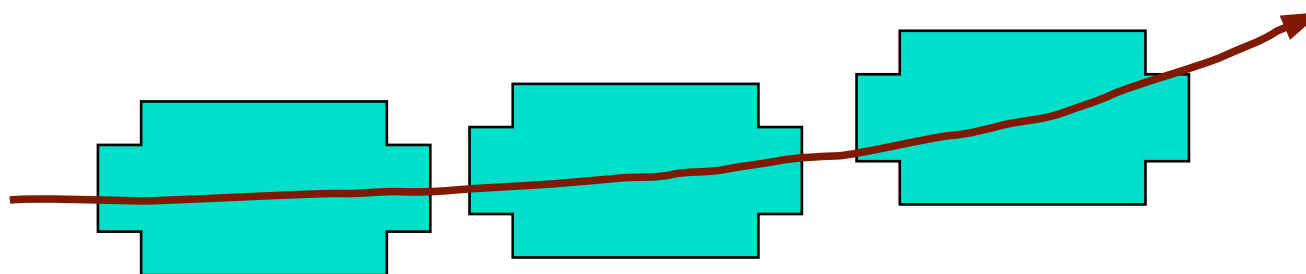
# Ukázka měkkých stínů



# Rozmazání rychlým pohybem



dráha tělesa  $s(t)$



snímaný interval:  
(doba otevření závěrky)

$[t_1, t_2]$

zobrazení scény v čase  $t$ :

$f(t) = f(x, y, t)$



# Rozmazání pohybem

Obecná pohybem rozmazaná scéna:

$$f_{\text{blurr}} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$$



# Rozmazání pohybem

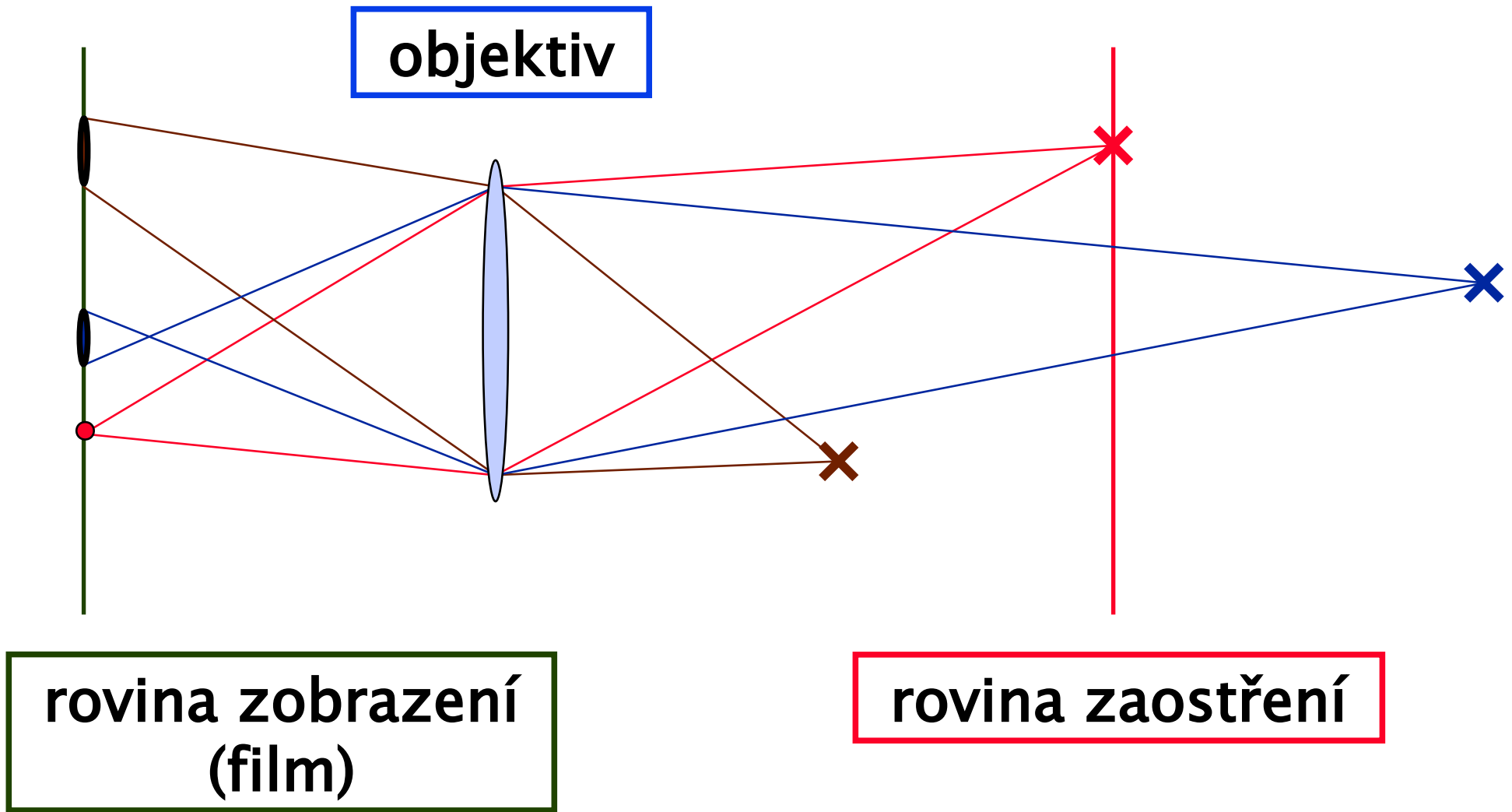
Zobrazení scény s jediným  
pohybujícím se objektem:

$$\mathbf{f}_{\text{blurr}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{f}(\mathbf{t}) \cdot |\mathbf{s}'(\mathbf{t})|^{-1} dt}{\int_{t_1}^{t_2} |\mathbf{s}'(\mathbf{t})|^{-1} dt}$$

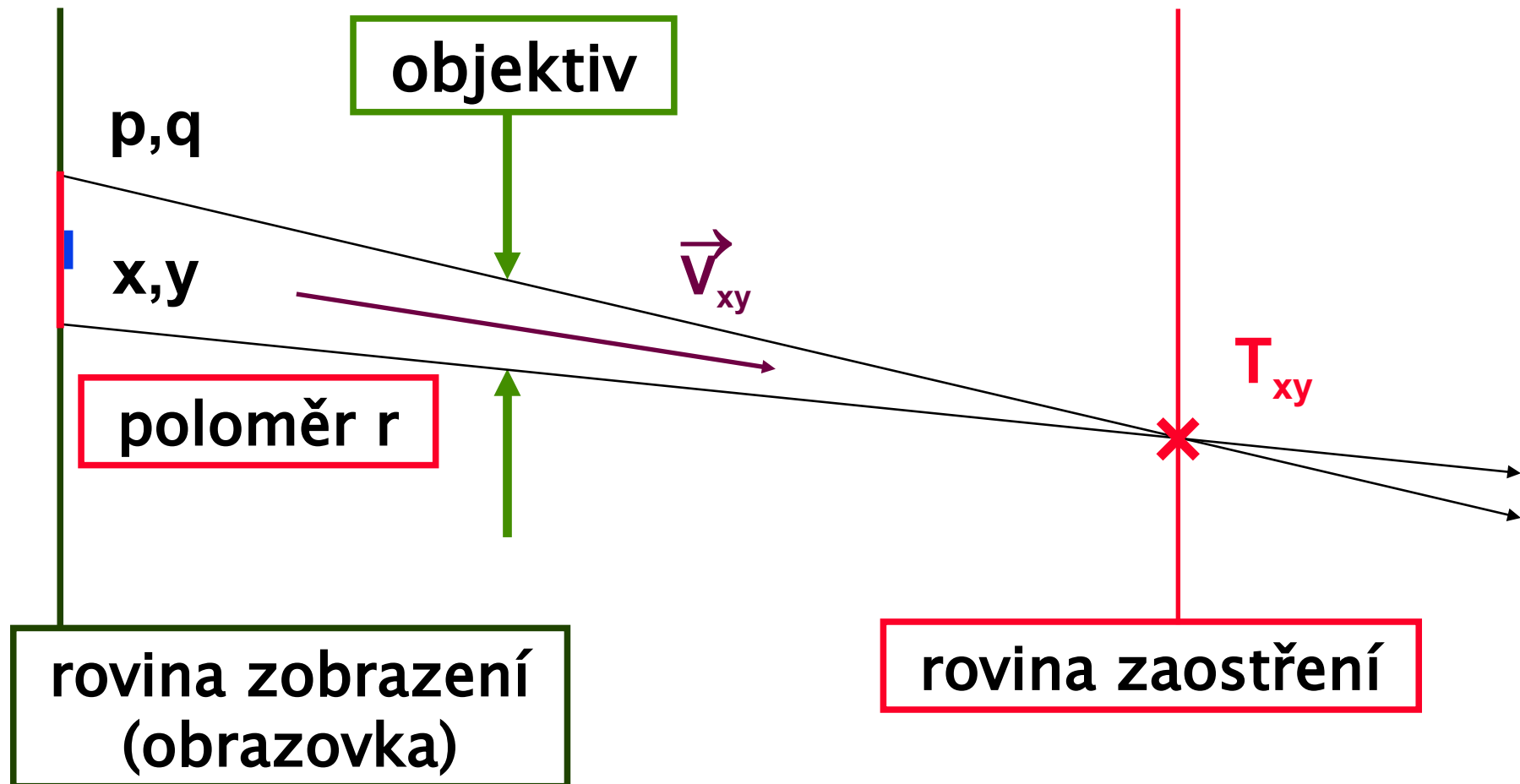
$$|\mathbf{s}'(\mathbf{t})| \neq 0 \text{ na } \langle \mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2 \rangle$$



# Hloubka ostrosti objektivu



# Geometrické zjednodušení





# Výpočet hloubky ostrosti

Model dírkové kamery:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = I(\mathbf{V}_{xy})$$

$$\mathbf{V}_{xy} = \mathbf{T}_{xy} - [\mathbf{x}, \mathbf{y}, 0]$$

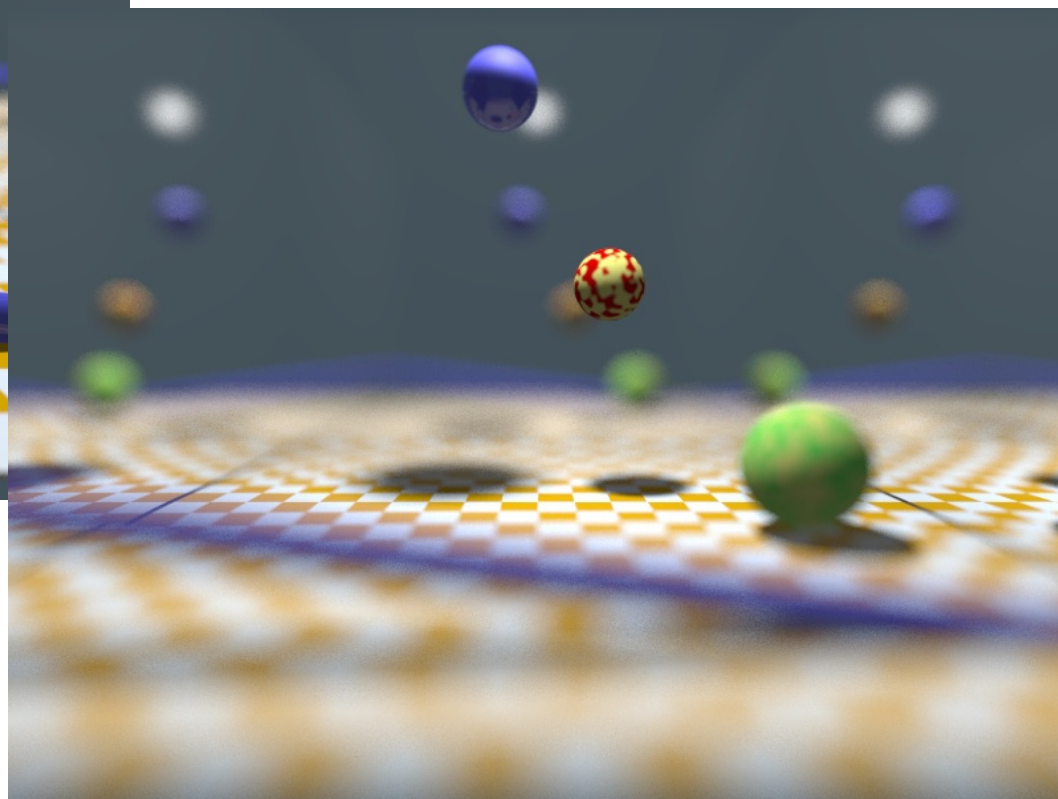
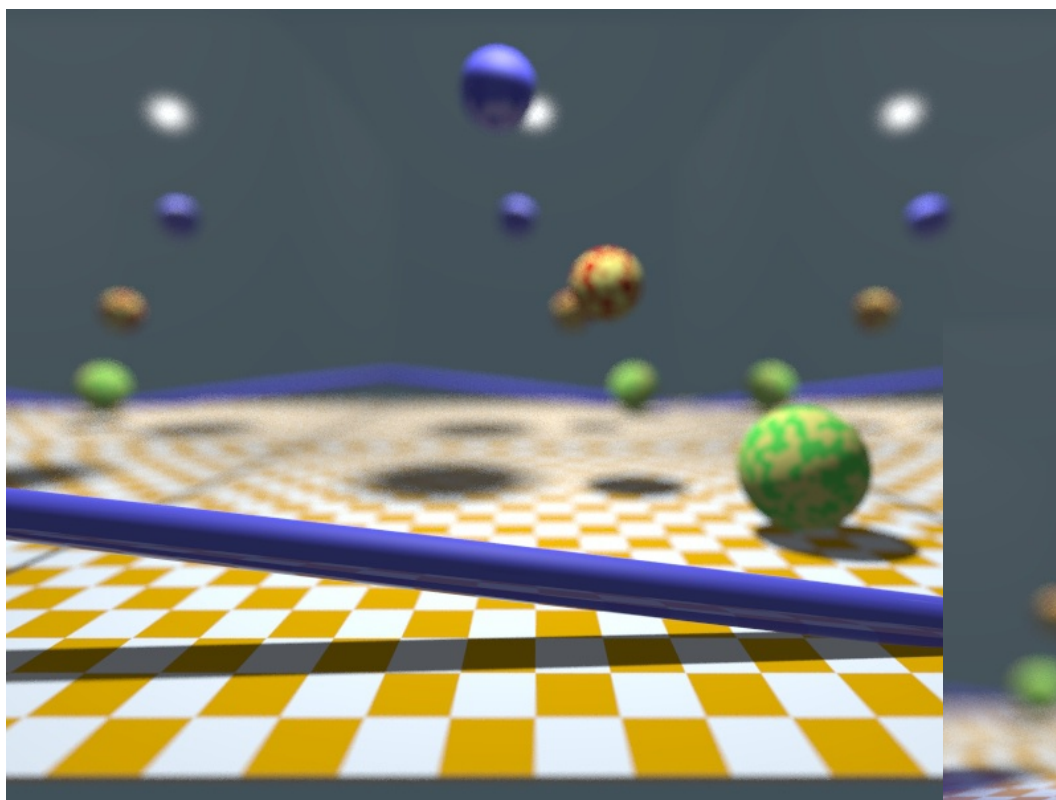
$$\mathbf{V}_{pq} = \mathbf{T}_{xy} - [\mathbf{p}, \mathbf{q}, 0]$$

Model plošného objektivu:

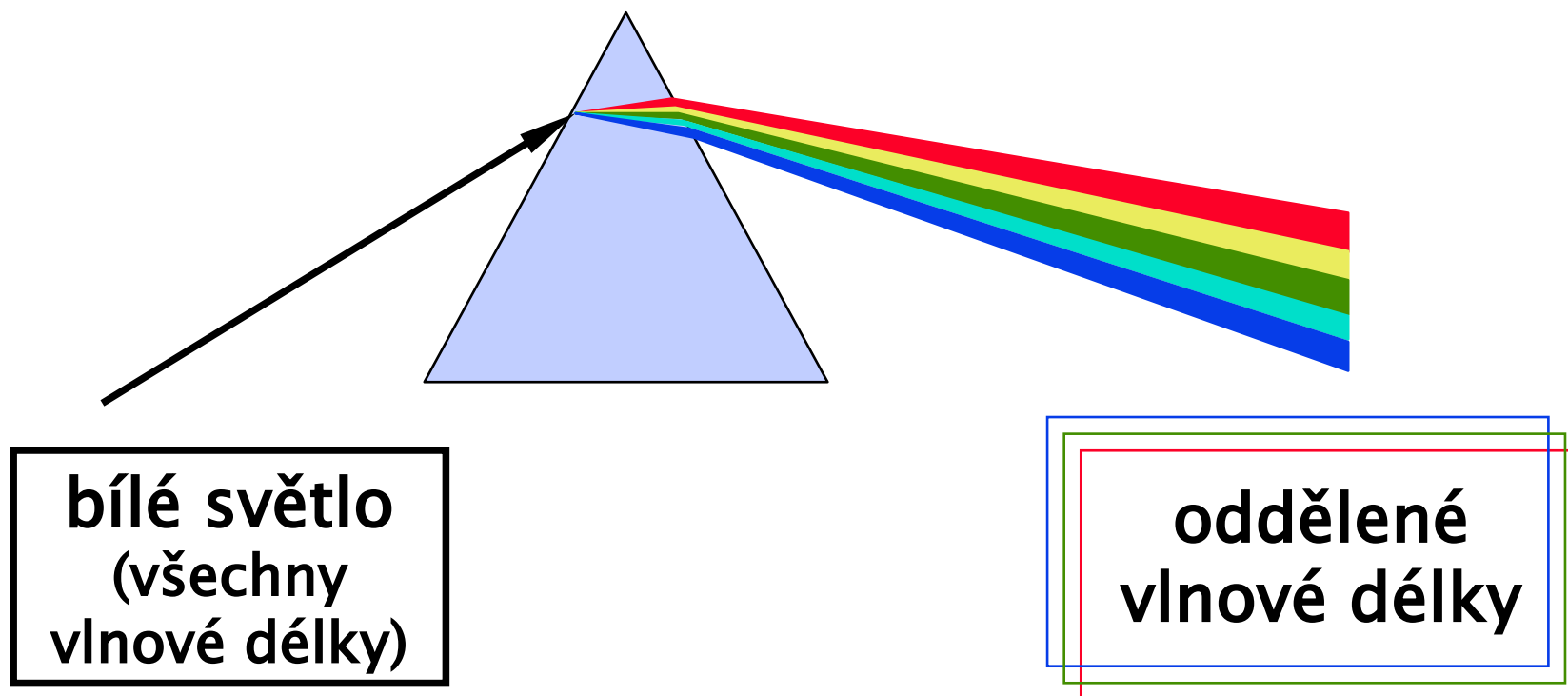
$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \int_{\text{kruh kolem } [\mathbf{x}, \mathbf{y}]} I(\mathbf{V}_{pq}) dp dq$$



# Ukázky hloubky ostrosti



# Rozklad světla



obrazová funkce:  $f(\lambda) = f(x, y, \lambda)$



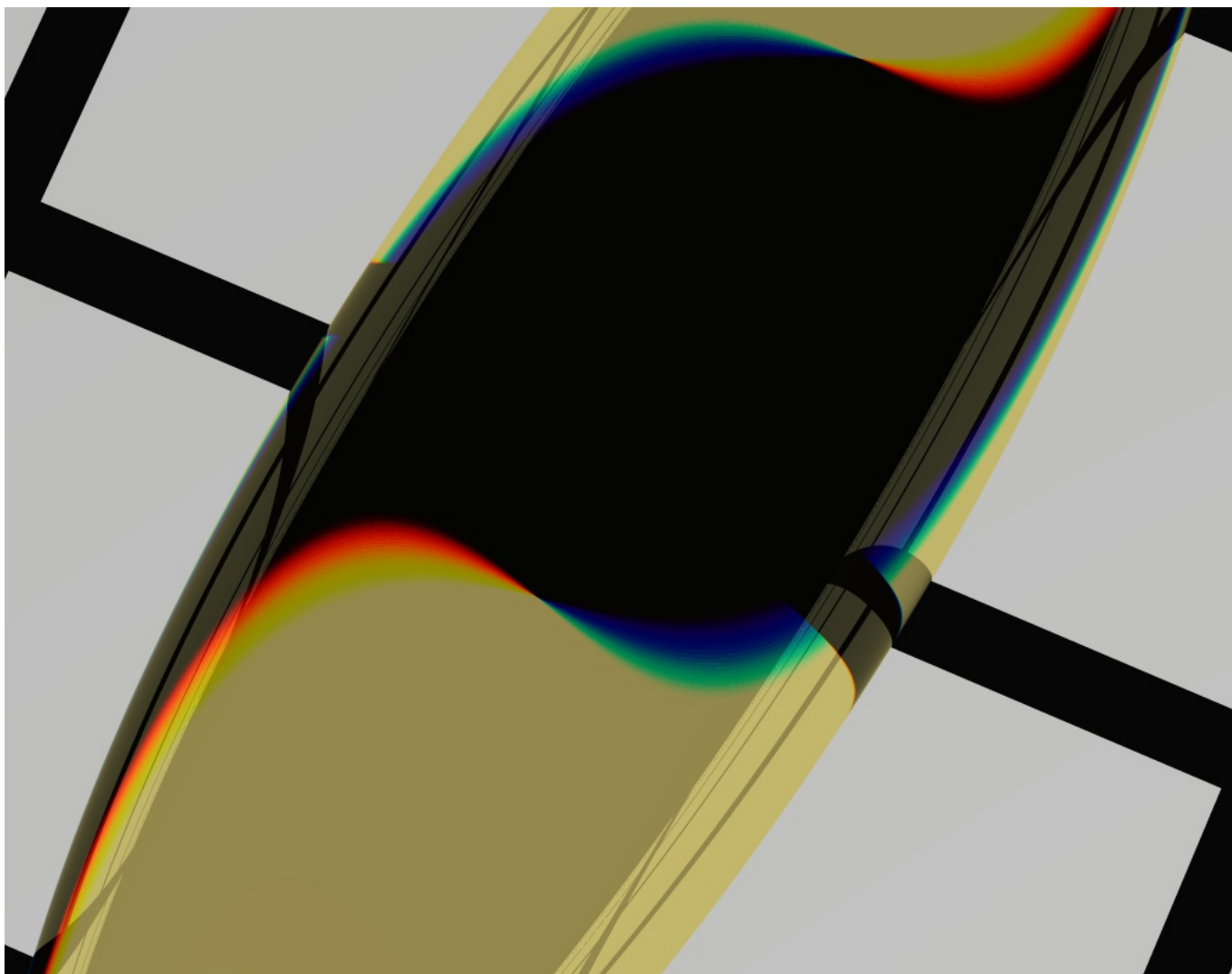
# Výpočet rozkladu světla

Barva pixelu při distribuci ve spektru:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \int_{\text{spektrum}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) \cdot \mathbf{R}(\lambda) \, d\lambda \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \int_{\text{spektrum}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) \cdot \mathbf{G}(\lambda) \, d\lambda \\ \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \int_{\text{spektrum}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) \cdot \mathbf{B}(\lambda) \, d\lambda \end{aligned}$$

trichromatické spektrální činitele

# Ukázka rozkladu světla





# Implementace

- integrály se odhadují **stochasticky** (metodami Monte-Carlo)
  - spočítá se konečný počet vzorků (paprsků)
  - integrál se odhadne sumou
- **vážená** integrální střední hodnota
  - použije se uniformní vzorkování a příslušná váhová funkce
  - konstrukce neuniformního vzorkování (sekvenční Poissonovo diskové vzorkování)

# Kombinované metody

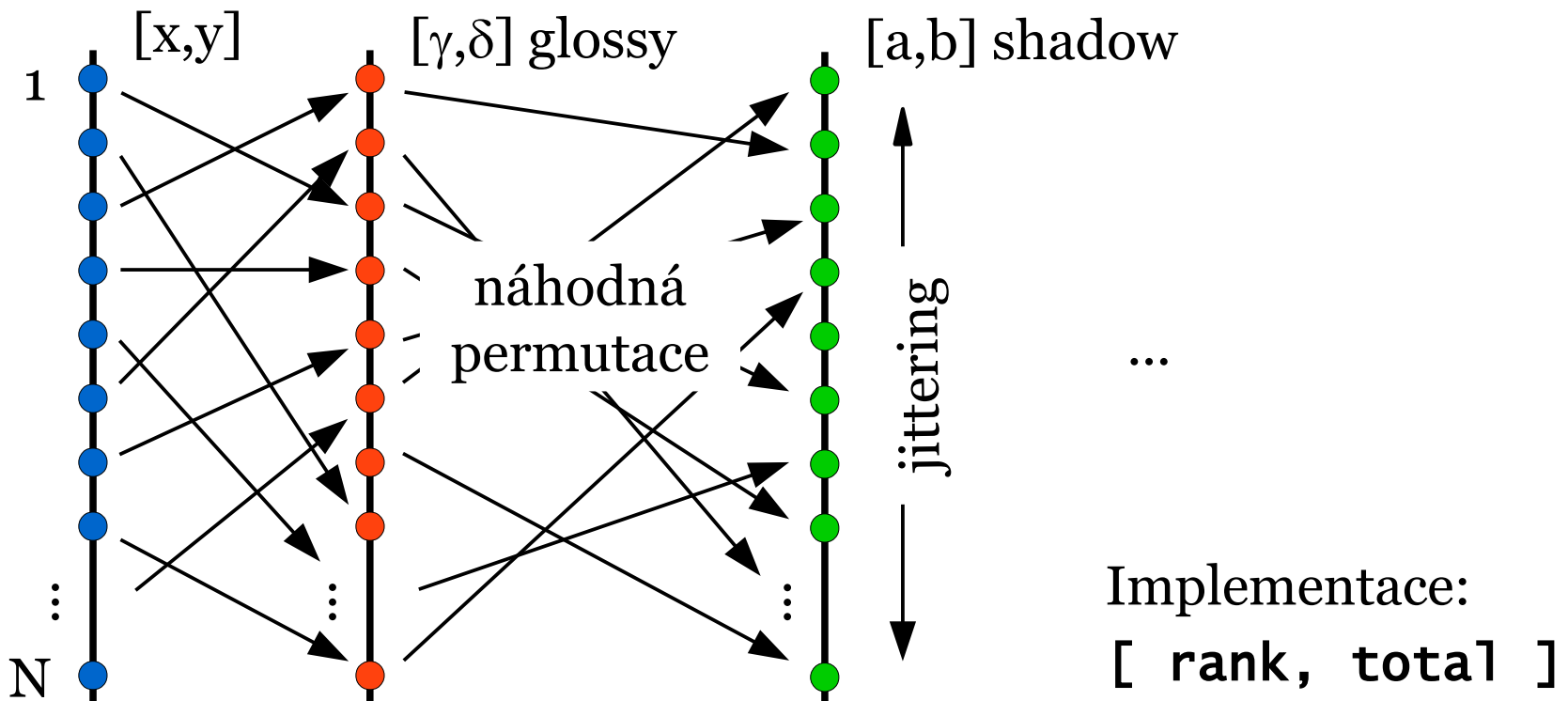


- ➔ libovolné metody lze vzájemně **kombinovat**
  - i s vyhlazováním („anti-aliasing“)
  - vznikají integrály vyšších řádů - např. dimenze 10:
    - vyhlazování (2), hloubka ostrosti (2), neostrý odraz (2), měkký stín (2), rozmazání pohybem (1), rozklad světla (1)
  
- ➔ výběr **vzorkovací metody**:
  - stochastické vzorkování („roztřesení“, ..)
  - ve vyšších dimenzích pracuje efektivně „nezávislé roztřesení“ („N věží“) - skryté vzorkování
  - adaptivní vzorkování



# Skryté vzorkování

- je dán **počet vzorků** (primárních paprsků) na pixel
  - každá vnitřní komponenta může vzorkovat sama
  - libovolný počet přidanych dimenzí vzorkování



# Literatura



**A. Glassner: *An Introduction to Ray Tracing*,  
Academic Press, London 1989, 171-199**

**A. Watt, M. Watt: *Advanced Animation and  
Rendering Techniques*, Addison-Wesley,  
Wokingham 1992, 262-265**