

# Přímé zobrazování objemových dat – DVR

© 2009-2016 Josef Pelikán, CGG MFF UK Praha

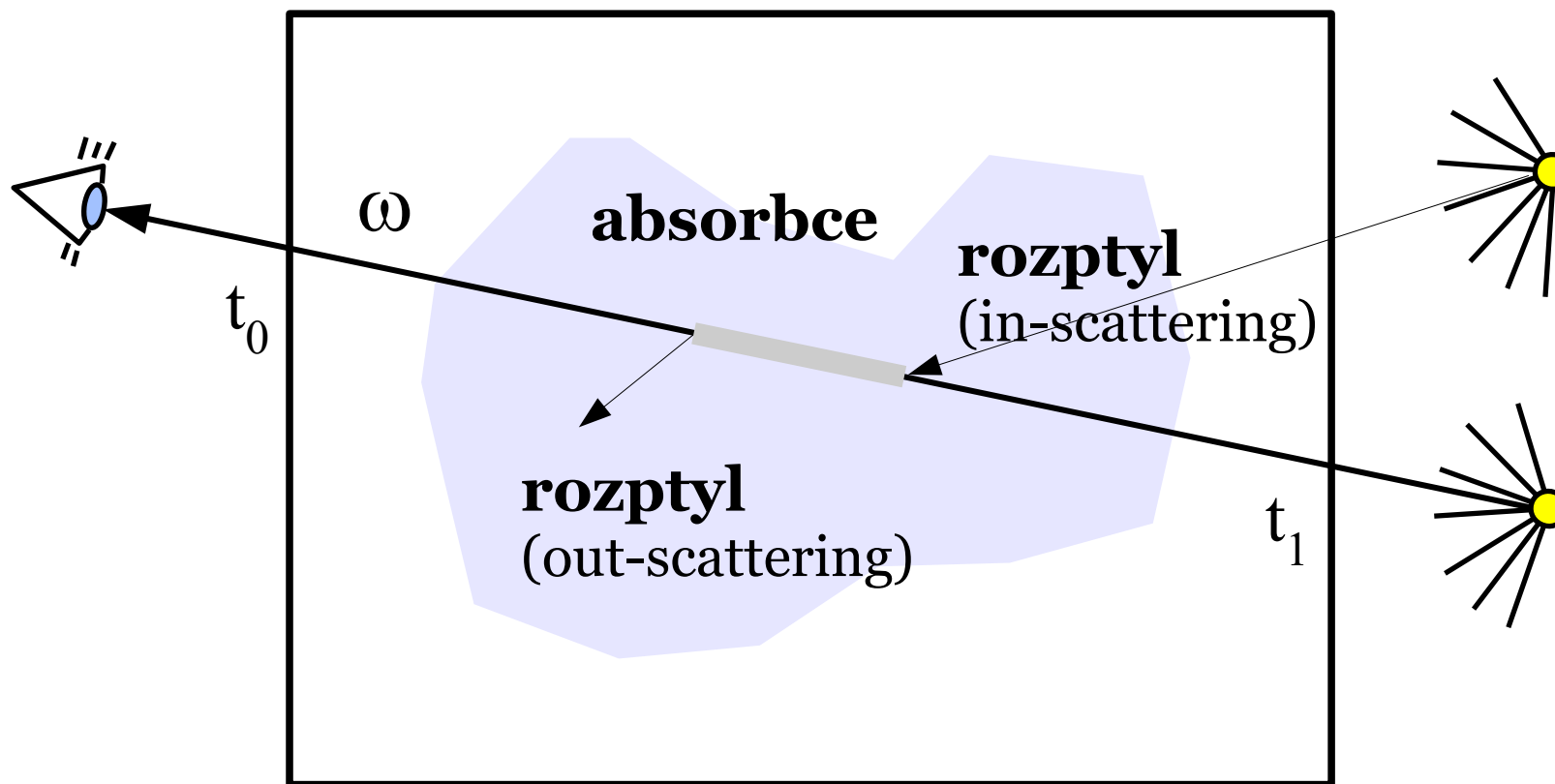
<http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/>  
[pepca@cgg.mff.cuni.cz](mailto:pepca@cgg.mff.cuni.cz)

# Metody přímého zobrazování



- ◆ zobrazení informace z **celého objemu dat**
  - zákryty trochu omezují množství zobrazené informace
  - výpočet bývá pomalejší, závislý na **směru pohledu**
- ◆ „splatting“
  - Westover: 1990, Laur, Hanrahan: 1991
- ◆ „V-buffer“
  - Upson, Keeler: 1988
- ◆ **vrhání paprsku** („ray casting“)
  - Tuy: 1984, Levoy: 1988-90, Sabella: 1988

# Objemový osvětlovací model



# Absorbce



- ♦ medium **pohlcuje** záření, a tak zeslabuje paprsek
- ♦ absorpční koeficient  $\sigma_a(P, \omega)$ 
  - pravděpodobnost, že bude foton pohlcen na paprsku dlouhém 1m
  - u neizotropního media záleží na poloze (P) a směru ( $\omega$ )
- ♦ diferenciální pohlcení:
$$L_o(p, \omega) - L_i(p, -\omega) = dL_o(p, \omega) = -\sigma_a(p, \omega) L_i(p, -\omega) dt$$
- ♦ celkové zeslabení paprsku (na dráze od  $t_0$  do  $t_1$ ):

$$e^{-\int_{t_0}^{t_1} \sigma_a(p+t\omega, \omega) dt}$$

# Emise



- ◆ medium **produkuje** záření, a tak zesiluje paprsek
- ◆ emitovaná radiance  $L_{ve}(P, \omega)$ 
  - množství emitované radiance na jednotku délky paprsku
- ◆ diferenciální emise:

$$dL_o(p, \omega) = L_{ve}(p, \omega) dt$$

# Rozptyl („out-scattering“)



- ◆ medium **rozptyluje** záření směrem ven z paprsku
- ◆ rozptylový koeficient  $\sigma_s(p, \omega)$ 
  - množství radiance rozptýlené na jednotku délky paprsku

- ◆ diferenciální rozptyl:

$$dL_o(p, \omega) = -\sigma_s(p, \omega) L_i(p, -\omega) dt$$

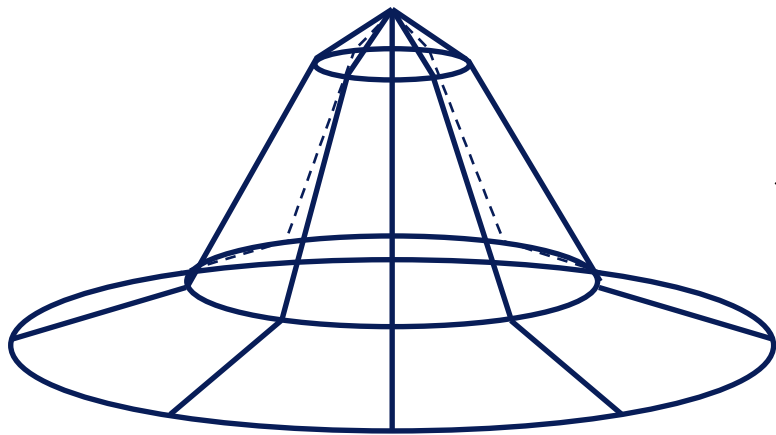
- ◆ **extinkce** = suma účinků absorpce a rozptylu

$$\sigma_t(p, \omega) = \sigma_a(p, \omega) + \sigma_s(p, \omega)$$

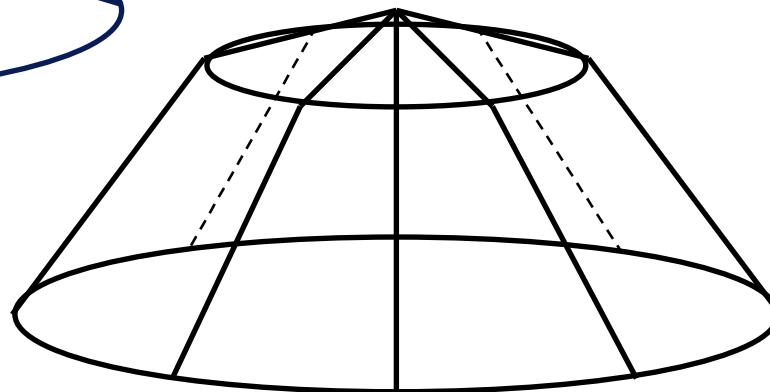
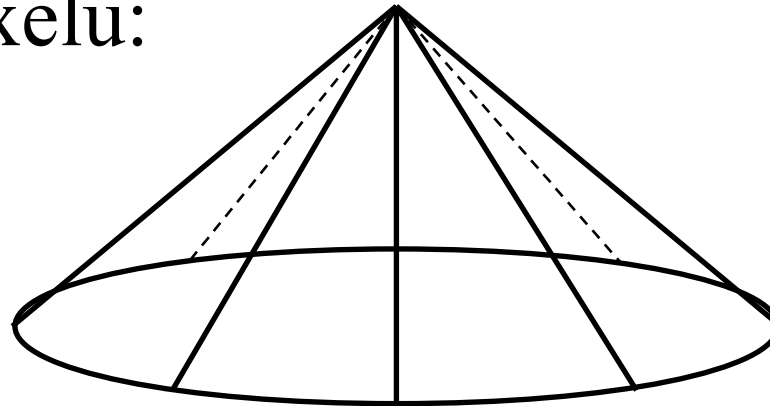
# „Splatting” (Westover)



Různé typy otisků voxelu:



**Gauss**



# „Splatting”



- ◆ průchod datovým polem **zepředu-dozadu**
- ◆ pro každý voxel se vytvoří **poloprůhledný „otisk”** (stopa, „splat”)
  - zobrazení pomocí sítě polygonů
  - předpokládá se HW podpora poloprůhledného zobrazování ( $\alpha$ -kanál)
- ◆ otisky pro různé poloměry a hustoty jsou dopředu zpracovány v tabulce
  - ◆ používají se různé tvary otisků (kužel, Gauss)



# Hierarchický algoritmus



- ◆ **pyramidální reprezentace dat**
  - ◆ hierarchické dělení typu „octree”
  - ◆ každý **vnitřní uzel** obsahuje: průměrnou  $RGB\alpha$  hodnotu, střední kvadratickou chybu (při nahrazení skutečných hodnot průměrnými)
- ◆ možnost kreslení obrázků s různým **rozlišením** (nebo **kvalitou**)
  - ◆ při průchodu se zastavuji na voxelech s **malým průmětem** (u perspektivy to závisí i na vzdálenosti)
  - ◆ kompromis mezi **celkovou chybou** a **počtem voxelů**

# Substituce otisků



Superpozice dvou **shodných Gaussovských otisků**:

$$(1 - \alpha_2) \cdot \exp\left(-\frac{\mathbf{x}^2}{\sigma_2^2}\right) = \left[ (1 - \alpha_1) \cdot \exp\left(-\frac{\mathbf{x}^2}{\sigma_1^2}\right) \right]^2$$

Nahradí je otisk dvojnásobné velikosti:

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_1^2}{2}$$

$$\underline{(1 - \alpha_2) = (1 - \alpha_1)^2}$$

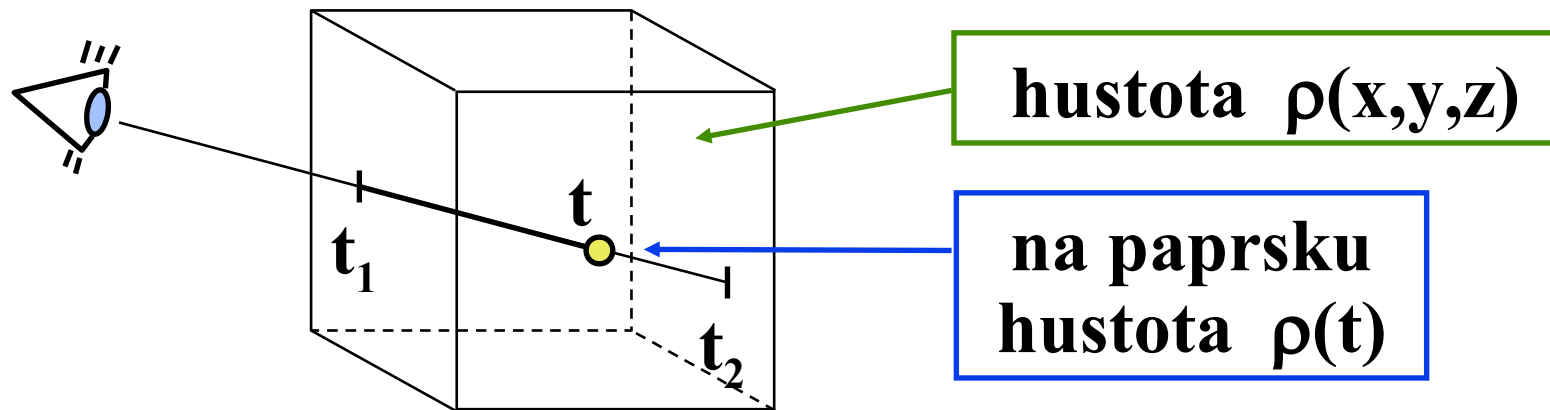
# Sledování paprsku (Sabella, '88)



## ◆ „zářící mlha”

- ◆ zobrazovaná látka se chová současně jako zářič i jako překážka šíření světla
- ◆ fyzikální základ - velké množství malých částic vyzařujících světlo
- ◆ vlastnosti **vyzařování** i **pohlcování** jsou funkce hustoty (zobrazované veličiny)
- ◆ pohlcování světla má exponenciální průběh

# Exponenciální pohlcování světla



Útlum světla na intervalu  $(t, t_1)$ :

$$P(t, t_1) = \exp \left[ -\tau \int_{t_1}^t \rho(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \right]$$

(pravděpodobnost, že paprsek po cestě narazí na alespoň jednu částici)

# Kumulovaná intenzita světla



Základní **zobrazovací rovnice** s vyloučením vnějšího osvětlení:

$$\text{intenzita } \mathbf{B}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \rho(\mathbf{t}) \cdot \exp \left[ -\tau \int_{t_1}^t \rho(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \right] dt$$

---

Distribuce hustoty se dá řídit exponentem  $\gamma$ :

$$\mathbf{B}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \rho^\gamma(\mathbf{t}) \cdot \exp \left[ -\tau \int_{t_1}^t \rho^\gamma(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \right] dt$$

---

# Diskrétní rovnice



System složený z jednotlivých **homogenních vrstev** (objektů):

$$\mathbf{B}(k, l) = \sum_{i=k}^l \mathbf{b}_i \cdot \prod_{j=k}^{i-1} \theta_j$$

↑  
světlo emitované vrstvou i

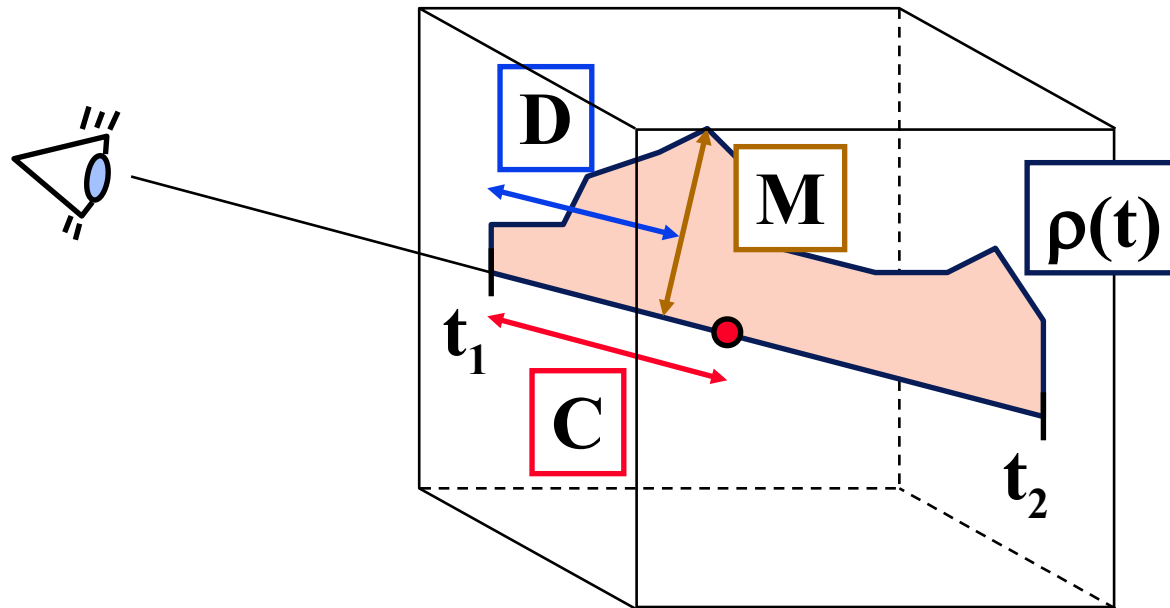
← útlum vrstvy j

Pro hustotu vrstvy  $\rho(\mathbf{t}_i)$  a její tloušťku  $\delta\mathbf{t}_i$ :

$$\mathbf{b}_i = \rho(\mathbf{t}_i) \delta\mathbf{t}_i \quad \theta_j = \exp[-\tau \rho(\mathbf{t}_j) \delta\mathbf{t}_j]$$

---

# Přiřazování barev dle Sabelly



maximum **M**

vzdálenost maxima **D**

poloha těžiště **C**

intenzita světla **I**

# Počítané veličiny



Těžiště:

$$\underline{\mathbf{C}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda \cdot \rho(\lambda) \, d\lambda}{\int_{t_1}^{t_2} \rho(\lambda) \, d\lambda}$$

Intenzita světla:

$$\underline{\mathbf{I}} = \int_{t_1}^{t_2} \rho^\gamma(\mathbf{t}) \cdot \exp\left[-\tau \int_{t_1}^t \rho^\gamma(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}\right] dt$$



# Mapování barev



- ◆ **kvalitativní** reprezentace spočítaných veličin
  - ◆ uživatelský barevný systém **HSV**
- ◆ mapování  $(M, D, I) \rightarrow (H, S, V)$ 
  - maximální hustota **M**: **barevná škála** od modré až po červenou
  - vzdálenost maxima **D**: **sytnost barvy** od **1** (pro **D=0**) až do **0** (pro maximální **D**)
  - intenzita světla **I**: **intenzita barvy**
- ◆ jiná varianta:  $(M, C, I) \rightarrow (H, S, V)$

# Interpretace výsledků



- **barevný odstín (H)** udává polohu (lokálních) maxim v průmětu
  - oblasti s teplejší barvou (žlutá, červená)
- **sytnost (S)** určuje vzdálenost
  - bližší maxima se kreslí sytými, vzdálenější pastelovými barvami
  - fyzikální základ: „pohled přes bílou mlhu”
- pro lepší představu o průběhu funkce v celém objemu se používá **animace**

# Implementace



- **inkrementální průchod** paprsku jednotlivými buňkami 3D pole - **3D DDA** algoritmus
- průchod zepředu-dozadu: akumuluje se **útlum P** a **intenzita B**
  - ◆ v aktuální buňce se snažím aproximovat integrál pro **B** co nejpřesněji (někdy lze zanedbávat lokální útlum v buňce)
  - ◆ u lineární interpolace lze integrál počítat analyticky
  - ◆ průchod mohu předčasně ukončit při dosažení velké hodnoty útlumu

# Implementace



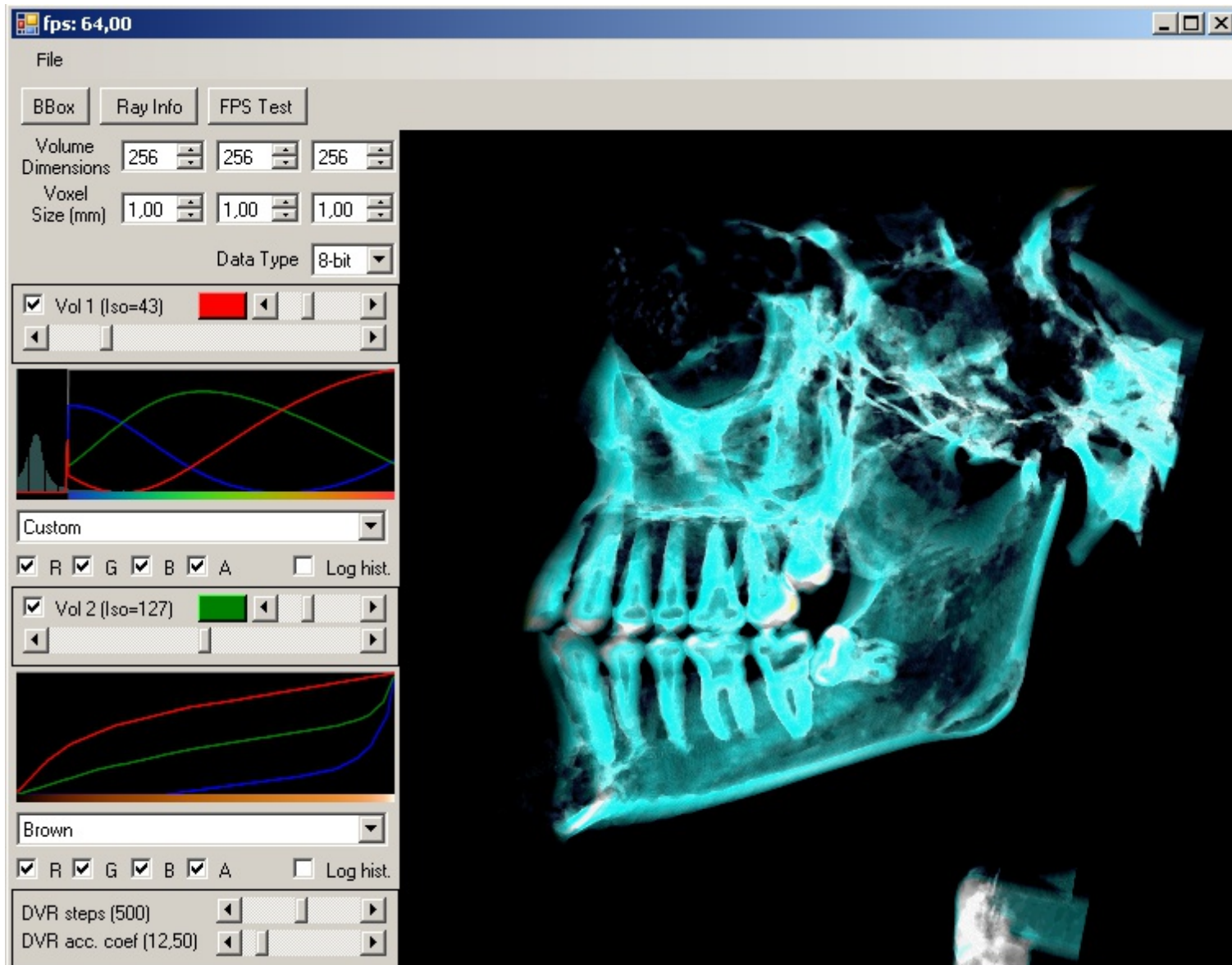
- průchod zezadu-dopředu: akumuluje se pouze **intenzita B**
  - v aktuální buňce aproximují integrál pro **B**
  - intenzita nastřádaná v zadních partiích se tlumí diskrétně (násobení útlumem aktuální buňky)
- spočítané hodnoty (**M,D,C,I**) se ukládají do bufferu
  - po ukončení výpočtu se mohou interaktivně ladit parametry barevného přiřazení

# Transfer funkce (TF)

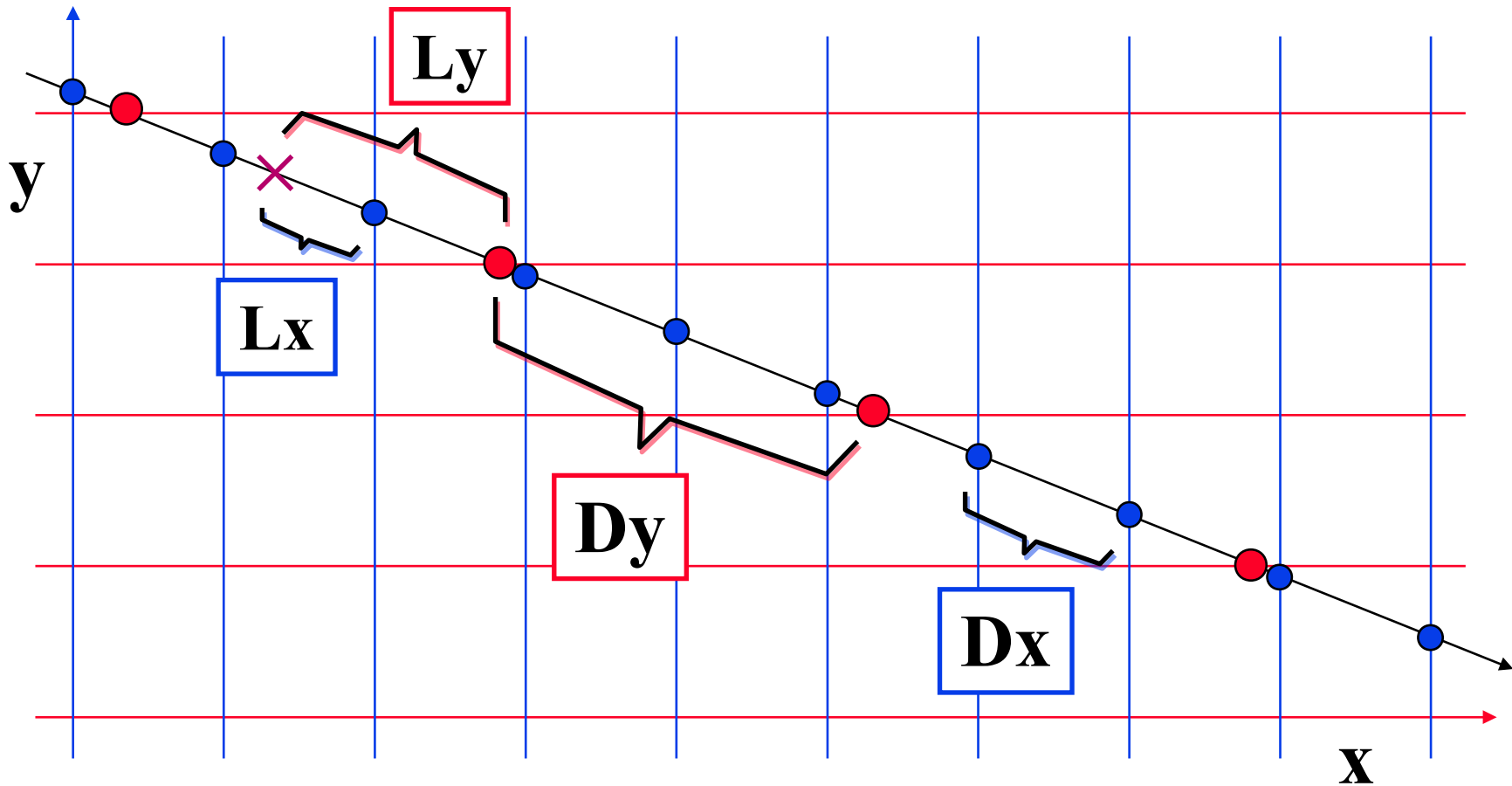


- mapuje hustotu tkáně na barvu a průhlednost
  - segmentace oblastí zájmu
  - napodobení předvýpočtu izoploch
  - pokročilejší mapování:
- definice TF
  - ruční editace (pokus & omyl), databáze osvědčených nastavení
  - [polo]automatické výpočty TF
    - hledání hran, malých „features“, automatické hledání nejvhodnějších  $\mathbf{h}_0$  pro izoplochy, statistika (momenty)
  - zobecněné TF ( $\nabla f + f$ , derivace, křivost, ..)

# Příklad – editace TF



# Průchod sítí buněk (3D DDA)



# Průchod sítí buněk



- **paprsek:**  $\mathbf{P}_0 + t \cdot \mathbf{P}_1$  pro  $t > 0$
- ① pro daný směr  $\mathbf{P}_1$  se předem spočítají **konstanty**  $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y, \mathbf{D}_z$ :
  - vzdálenost mezi sousedními průsečíky paprsku se sítí rovnoběžných rovin (kolmých na osy  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ )
- ① pro bod  $\mathbf{P}_0$  se určí **počáteční buňka**  $[i, j, k]$  a hodnoty proměnných  $t, L_x, L_y, L_z$ :
  - ♦ parametr polopřímky  $t$ , vzdálenosti k nejbližším průsečíkům paprsku se stěnami



# Průchod sítí buněk



- 2 **zpracování buňky** [  $i, j, k$  ] - výpočet světelného příspěvku, aktualizace útlumu
- 3 **postup do sousední buňky:**
  - $D = \min \{L_x, L_y, L_z\};$  /\* předpoklad:  $D = L_x$  \*/
  - $L_x = D_x; L_y = L_y - D; L_z = L_z - D;$
  - $i = i \pm 1;$  /\* podle znaménka  $P_{1x}$  \*/
- 4 **koncové podmínky:**
  - ♦ paprsek vyjde ven ze zobrazovaného pole
  - ♦ kumulovaný útlum překročí danou mez

# Literatura



- T. Elvins: *A Survey of Algorithms for Volume Visualization*, CG, August 1992, 194-201
- L. Westover: *Footprint Evaluation for Volume Rendering*, CG, August 1990, 367-376
- P. Sabella: *A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields*, CG, August 1988, 51-58
- M. Pharr, G. Humphreys: *Physically Based Rendering*, Morgan Kaufman, 2004
- C. Hansen, C. Johnson: *The Visualization Handbook*, Elsevier, 2005