

# Osvětlování a stínování

Pavel Strachota

FJFI ČVUT v Praze

7. dubna 2020

# Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha

# Obsah

- 1 **Vlastnosti osvětlovacích modelů**
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha

# Úvod

## Dosud umíme:

- sestrojít 3D scénu, reprezentovat ji datovou strukturou
- promítnout scénu na průmětnu (obrazovku, plátno, ...)
  - každý bod scény má „barvu“

## Správnou „barvu“ vypočítáme **osvětlovacím modelem** za použití:

- definice vlastností materiálu, z něž jsou tvořeny objekty
  - barva, textura, mapovací funkce, koeficient odrazu, průhlednost, index lomu,... (a další v závislosti na osvětlovacím modelu)
- definice světelných zdrojů

# Osvětlovací model

- model pro výpočet parametrů (barva, intenzita) světla, které přichází z daného místa scény
- pouze **přiblížení reality** - čím složitější model, tím složitější popis vlastností materiálů i světelných zdrojů

## Dva typy osvětlovacích modelů:

- **fyzikální** - navržen na základě fyzikálních poznatků o šíření světla, pracuje s fyzikálními veličinami (radiance, intenzita, zářivý tok, zářivý výkon atd.)
  - **lokální** - uvažuje pouze přímé zdroje světla, zajímá se o každý bod scény zvlášť
  - **globální** - zahrnuje vícenásobně odražené a rozptýlené světlo ve scéně  
např. *metoda radiozity* - výpočet energetické bilance viditelného světla ve scéně  $\implies$  numerické řešení osvětlovací rovnice
- **empirický** - založený na pozorování a zkušenosti

# Návrh a použití empirického osvětlovacího modelu

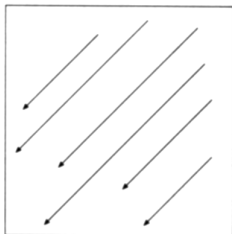
- **sestavení osvětlovací rovnice** (= předpisu, jak nalézt barvu daného bodu na povrchu objektu) na základě
  - poloh světelných zdrojů a pozorovatele
  - polohy zkoumaného bodu a normály povrchu, na němž leží
  - parametrů světelných zdrojů a materiálu, z něhož je zkoumaný bod (resp. celý objekt či alespoň část povrchu)
- **stínování** objektu, resp. polygonu
  - 1 „**osvětlování**“ = **aplikace osvětlovacího modelu** (vyčíslení osvětlovací rovnice) v několika místech objektu
  - 2 výpočet (skutečně vykreslované) barvy objektu ve všech pixelech, které zakrývá, s využitím informace z bodu 1

# Obsah

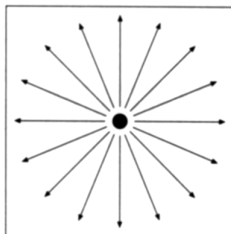
- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny**
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha

## Typy světelných zdrojů

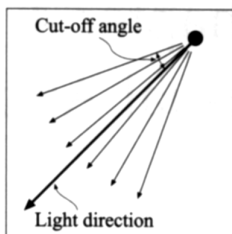
- **směrové světlo** - umístěné nekonečně daleko, vrhá rovnoběžně dopadající paprsky s konstantní intenzitou (slunce)
- **bodové světlo** - bod, který vyzařuje na všechny strany
- **reflektor (spot light)** - bodové světlo, které vyzařuje pouze v předepsaném kuželu.



**Directional Light**



**Point Light**



**Spot Light**



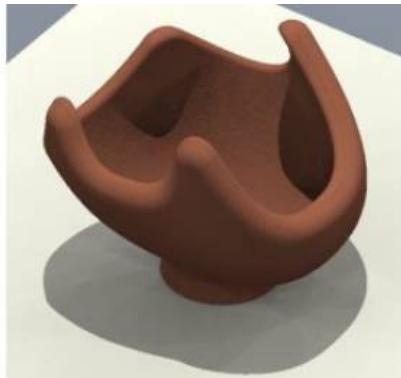
# Vlastnosti světelných zdrojů

- bodové světlo + reflektor = poziční světlo (má danou pozici v prostoru)
  - úbytek intenzity se vzdáleností (ne vždy uvažován)
- každý světelný zdroj má svoji intenzitu, resp. barvu (stačí v RGB tvaru)
- skutečné světelné zdroje nejsou bodové  $\implies$  stíny vrhané objekty nejsou ostré (viz dále)

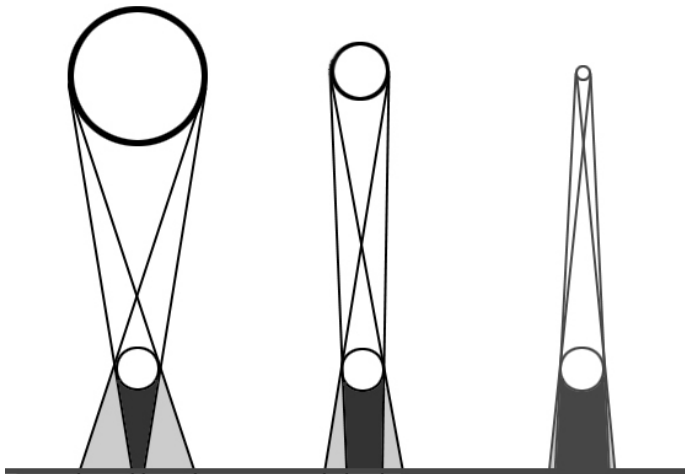
# Stíny

- zvyšují realističnost scény, vypovídají o umístění světelných zdrojů
- **bodové** zdroje světla  $\implies$  **ostré** stíny (*hard shadows*) - nereálné
- **plošné** zdroje světla  $\implies$  **měkké** stíny (*soft shadows*)
  - úplný stín (*umbra*)
  - polostín (*penumbra*)
- stín (z hlediska počítačové grafiky)
  - **vlastní** - těleso zastiňuje část sebe sama
  - **vržený** - stín tělesa vržený na jiné objekty

## Tvrdé a měkké stíny



# Úplný stín a polostín (zatemnění Slunce)



# Metody vykreslování stínů

## 1 globální zobrazovací metody

- používají globální osvětlovací model, nebo rekurzivně aplikovaný lokální model (raytracing)
- stíny jsou přímo součástí scény
- výpočetně náročné, pomalé
- metody zobrazující měkké stíny: distribuovaný (stochastický) raytracing, radiozita, fotonové mapy

## 2 samostatné metody

- použití v reálném čase
- převod zobrazení stínu na geometrický problém - obvykle řešení viditelnosti

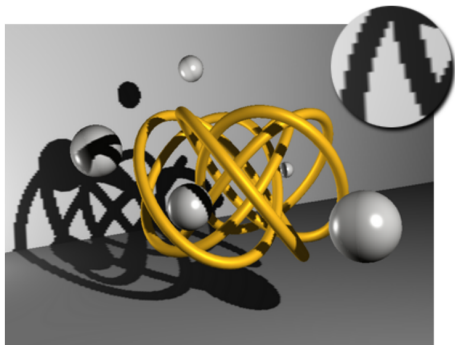
# Mapování a vykreslování stínů

(pouze pro bodové zdroje světla)

- *shadow mapping*
- **projekční metody** - promítání jednoho tělesa na zbytek 3D scény (průmětny = polygonální plošky), kde středem promítání je světelný zdroj
- **metoda stínového tělesa** - průniky polygonů se zobecněným komolým kuželem:
  - podstava - polygon, který vrhá stín
  - vrchol - světelný zdroj
- **stínová paměť hloubky** (z-buffer)

## Stínová paměť hloubky

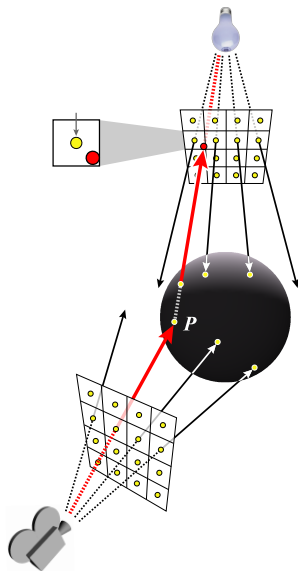
- využívá z-buffer pro kameru i pro světelné zdroje
- obecná, rychlá metoda vhodná pro HW implementaci
- obrazová metoda (*image-precision*)  
- viz řešení viditelnosti
- konečné rozlišení z-bufferů  
⇒ aliasing
  - např. tzv. *self-shadow* (polygon vrhá stín sám na sebe)



# Stínová paměť hloubky

## Algoritmus

- 1 výpočet **stínového z-bufferu** pro vzdálenost scény od světla
- 2 zobrazení scény pomocí (klasického) z-bufferu
- 3 transformace zobrazených bodů do VCS (souř. systému průmětny) světla
- 4 ztmavení bodů, které jsou dále od světla, než je uloženo v jeho stínovém z-bufferu



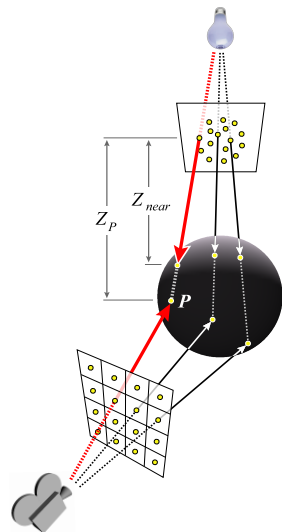
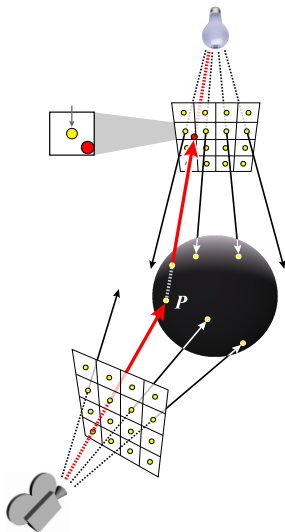


# Nepravidelná stínová paměť hloubky 1/2

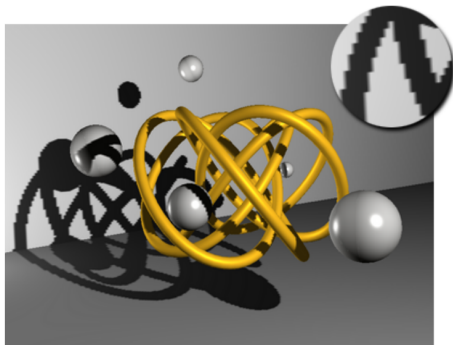
- vzorky v z-bufferu uloženy nepravidelně



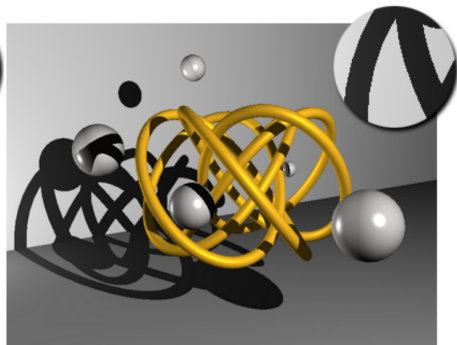
- nejprve zobrazení scény, pak teprve výpočet stínového z-bufferu
- ray casting* (objekt po objektu)



# Nepravidelná stínová paměť hloubky 1/2



klasický z-buffer



nepravidelný z-buffer

# Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model**
- 4 Stínování
- 5 Mlha

# Phongův osvětlovací model - úvod

- empirický, lokální osvětlovací model
- velmi populární, často používaný v reálném grafice
- implementován v HW i v knihovnách (OpenGL, ...)
- několik složek tvořících výslednou barvu objektu podle různých pravidel

## Úmluva

- barvy (a zároveň intenzity) vyjádřené pomocí RGB

$$c = (c_R, c_G, c_B)$$

- násobení barev po složkách:

$$c \otimes d = (c_R d_R, c_G d_G, c_B d_B)$$

## Složky světla tvořící barvu materiálu

- 1 **ambientní** - simuluje odražené a rozptýlené světlo ve scéně - materiálová konstanta  $m_A$  určuje barvu objektu vzhledem k ambientnímu světlu
  - 2 **difuzní** - odraz světla ze světelných zdrojů od matného povrchu - barva  $m_D$
  - 3 **zrcadlová** (*specular*) - odraz světla ze světelných zdrojů od lesklého povrchu - barva  $m_S$   
- a v rekurzivním raytracingu navíc ještě -
  - 4 **odražená** (*reflected*) - odraz světla přicházejícího od jiných objektů
  - 5 **lomená** (*refracted*) - příspěvek světla lomeného paprsku
- 
- rozlišení barev  $m_A$ ,  $m_D$ ,  $m_S$  nemá fyzikální podstatu, ale dává větší kontrolu nad vzhledem scény

## Ambientní složka

- ambientní složka osvětlení daného bodu je

$$I_A = s_A \otimes m_A,$$

kde  $s_A$  je barva ambientního osvětlení scény.

### Příklad

Ve žlutém světle se modrý objekt jeví jako černý, fialový objekt jako červený:

$$(1, 1, 0) \otimes (0, 0, 1) = (0, 0, 0),$$

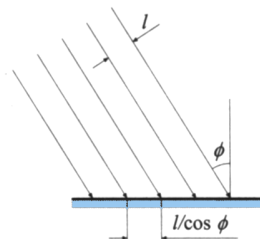
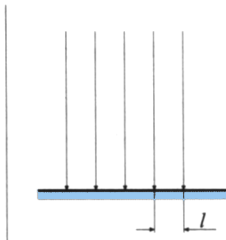
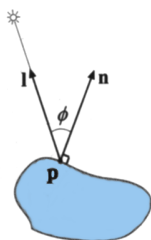
$$(1, 1, 0) \otimes (1, 0, 1) = (1, 0, 0).$$

## Difuzní složka 1/2

- složka invariantní vůči úhlu pohledu - povrch odráží světlo difuzně do všech směrů
- množství odraženého světla v bodě  $p$  s normálou  $n$  je však dáno polohou vůči světelnému zdroji barvy  $s$  ve směru jednotkového „světelného“ vektoru  $l$ :

### Lambertův zákon

$$I_D = s \otimes m_D \cdot \cos \phi = s \otimes m_D \cdot (l \cdot n)$$



## Difuzní složka 2/2

### Poznámky

- barva zdroje  $s$ , resp. jeho intenzita, může dále záviset na vzdálenosti bodu od zdroje
  - kvůli poklesu intenzity s druhou mocninou vzdálenosti (u bodových zdrojů)
  - kvůli tlumení způsobenému prostředím (*attenuation*)
- barva zdroje  $s$  může záviset na pozici  $\mathbf{p}$  vůči zdroji (pro reflektory)

⇒ obecně  $s = s(\mathbf{p})$

- pro úhel  $\phi > \frac{\pi}{2}$  (kdy  $\cos \phi < 0$ ) k odrazu nedochází (odvrácená plocha)

⇒ upravený vzorec pro Lambertův zákon

$$I_D = s(\mathbf{p}) \otimes m_D \cdot \max((\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}), 0)$$



## Zrcadlová složka 1/3

- odlesky vylepšují vnímání zakřivenosti povrchu a umístění světelných zdrojů
- závisí na
  - poloze světelného zdroje vzhledem k bodu  $\mathbf{p}$  (určena jednotkovým vektorem  $\mathbf{l}$ )
  - poloze pozorovatele vzhledem k  $\mathbf{p}$  (jednotkový vektor  $\mathbf{v}$ )
  - exponentu zrcadlového odrazu  $h$  (*specular reflection exponent*) - materiálová konstanta

### Phongův vzorec pro zrcadlovou složku - obecný tvar

$$I_S = s(\mathbf{p}) \otimes m_S \cdot \Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v})^h,$$

kde  $\Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v}) \in [0, 1]$  je míra odrazivosti závislá na vzájemné pozici zdroje, pozorovatele a  $\mathbf{p}$

## Zrcadlová složka 2/3

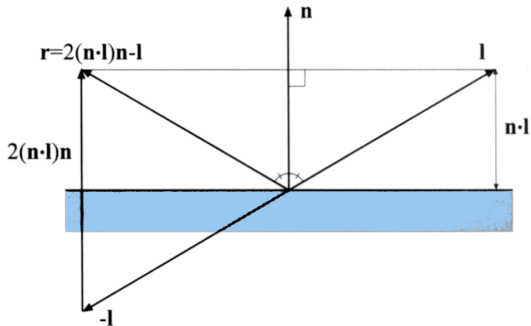
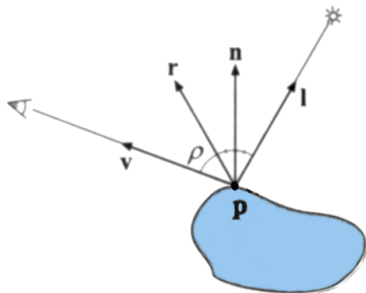
### 1. možnost výpočtu $\Sigma$

- vypočítáme vektor  $\mathbf{r}$  jako zrcadlový obraz  $\mathbf{l}$  podle  $\mathbf{n}$ :
  - projekce  $\mathbf{l}$  na  $\mathbf{n}$  je  $(\cos \phi) \mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{n}$  a proto

$$\mathbf{r} = 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{n} - \mathbf{l}$$

- vypočítáme  $\Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v})$  jako

$$\Sigma = \max(\cos \rho, 0) = \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}, 0)$$



# Zrcadlová složka 3/3

## 2. možnost výpočtu $\Sigma$

- vypočítáme „půlvektor“  $\mathbf{h}$  (*halfway vector*) mezi  $\mathbf{l}$  a  $\mathbf{v}$  a normalizujeme jej

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{l} + \mathbf{v}}{|\mathbf{l} + \mathbf{v}|}$$

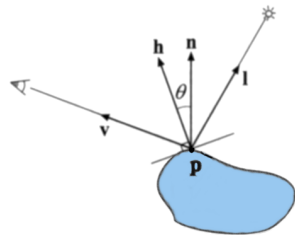
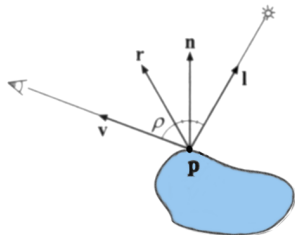
- vypočítáme  $\Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v})$  jako

$$\Sigma = \max(\cos \theta, 0) = \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}, 0)$$

místo

$$\Sigma = \max(\cos \rho, 0) = \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}, 0)$$

- výhoda: směrové světlo a rovnoběžné promítání  $\implies \mathbf{h}$  konstantní
- podobný, ale přesto **rozdílný** výsledek



## Phongův osvětlovací model - shrnutí

- osvětlovací rovnice - součet všech složek

$$I = I_A + I_D + I_S$$

- obecně  $n$  světelných zdrojů se světelnými vektory  $\mathbf{l}_k$  a barvami  $\mathbf{s}_k$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$

### Rovnice Phongova osvětlovacího modelu

$$I = \mathbf{s}_A \otimes m_A + \sum_{k=1}^n \mathbf{s}_k(\mathbf{p}) \otimes (m_D \cdot (\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{n}) + m_S \cdot \Sigma(\mathbf{l}_k, \mathbf{n}, \mathbf{v})^h)$$

- možnost přidání členu vlastního vyzařování objektu (*emission*) -  $m_E$  - těleso samo „září“, ale není světelným zdrojem

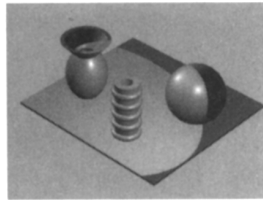
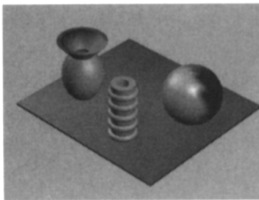
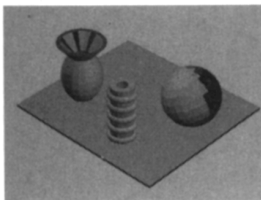
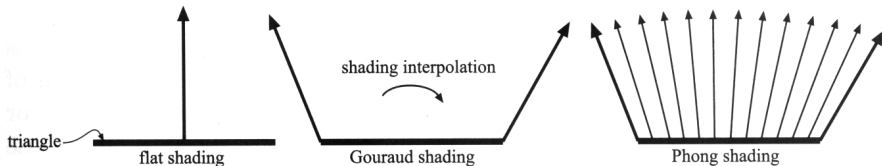
# Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování**
- 5 Mlha

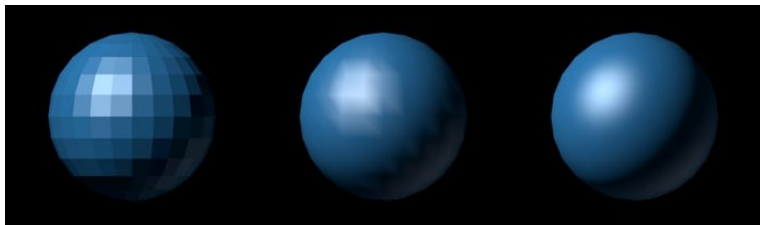
## 3 typické metody stínování

- 1 **konstantní stínování** (*flat shading*) - vyčíslíme osvětlovací rovnici pro jeden bod každého polygonu (trojúhelníku), celý polygon vyplníme výslednou barvou
  - nejjednodušší, nejrychlejší, ale nehezké: zachovává polygonální strukturu modelu
- 2 **Gouraudovo stínování** - spočítá osvětlení ve vrcholech trojúhelníku a získané hodnoty interpoluje
  - rychlé, obvykle implementováno v HW, dává dojem zakřivených povrchů
  - stále lze pozorovat polygonální strukturu, např. na stínech
- 3 **Phongovo stínování** ( $\neq$  Phongův osvětlovací model) - spočítá normály ve vrcholech, jejich hodnoty interpoluje pro každý bod  $\Delta$  a použije pro vyčíslení osvětlovací rovnice
  - z uvedených 3 metod nejrealističtější, nejnáročnější

# Schéma a srovnání metod stínování



# Metody stínování - další příklady srovnání



konstantní

Gouraudovo

Phongovo



## Metody stínování - další příklady srovnání



konstantní

Gouraudovo

Phongovo

# Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha**

## Mlha - úvod

- zvýšení realističnosti scény
- odstranění artefaktu náhlého oříznutí zadní ořezávací rovinou (viz *promítání*) - při průletu scénou se objekty vynořují z mlhy, neobjevují se náhle
- barva mlhy  $c_f$ , **mlhový faktor**  $f \in [0, 1]$  klesající směrem od pozorovatele
- barva povrchu s původní barvou  $c_s$  bude po „zamlžení“

$$c_p = fc_s + (1 - f) c_f$$

- směr růstu  $f$  neintuitivní, ale zjednoduší rovnice pro  $f$  (viz dále)

## Průběh mlhového faktoru

- **lineární mlha:** hodnota  $z_p$  ... vzdálenost bodu  $p$  od pozorovatele,  $z_{start}$  ... začátek mlhy,  $z_{end}$  ... konec mlhy

$$f = \frac{z_{end} - z_p}{z_{end} - z_{start}},$$

- **exponenciální mlha:**

$$f = e^{-d_f z_p},$$

- **kvadratická exponenciální mlha:**

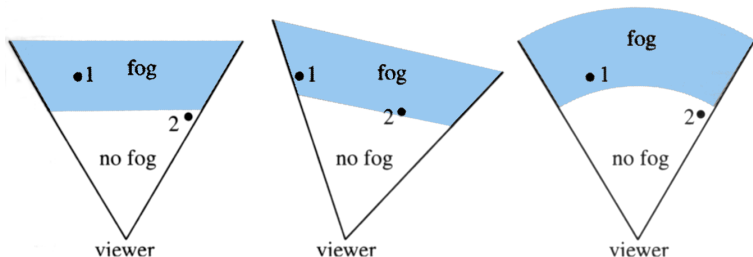
$$f = e^{-(d_f z_p)^2},$$

kde  $d_f$  je hustota mlhy.  $f$  po výpočtu ořízneme do intervalu  $[0, 1]$

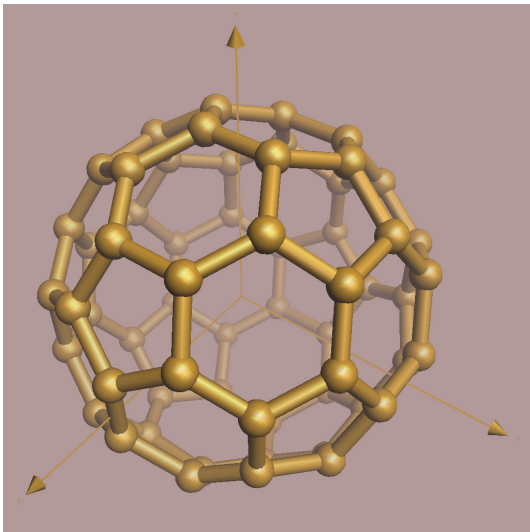
- mlhu lze počítat jen ve vrcholech  $\Delta$  a použít Gouraudovo stínování

## Vyjádření vzdálenosti od pozorovatele

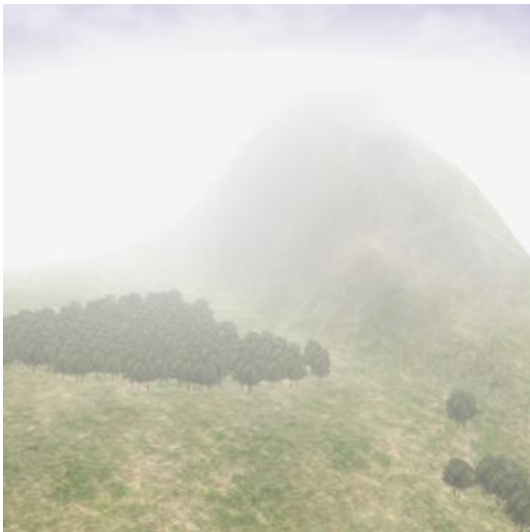
- 1 vzdálenost od průmětny: souřadnice  $z$ , resp.  $n$  ve VCS (viz promítání)
- 2 skutečná vzdálenost od středu promítání  $\implies$  radiální mlha





# MIha - příklady



# Mlha - příklady



# Literatura

-  J. F. Hughes, A. van Dam, M. McGuire, D. F. Sklar, J. D. Foley, S. K. Feiner, K. Akeley: *Computer Graphics: Principles and Practice (3rd ed.)*, Addison Wesley, 2014.
-  J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes: *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison Wesley, 1997.
-  Žára, Beneš, Sochor, Felkel: *Moderní počítačová grafika*. Computer Press, 2005s
-  G. S. Johnson, W. R. Mark, C. A. Burns: *The Irregular Z-Buffer and its Application to Shadow Mapping*. Technical Report, The University of Texas at Austin, 2004.