

# TIEŇOVANIE A OSVETĽOVANIE

doc. Ing. Branislav Sobota, PhD.

Katedra počítačov a informatiky, FEI TU v Košiciach

P 09

© 2024

# VRSTVY VIZUALIZAČNÉHO PROCESU

1. Definovanie/spracovanie modelu (reprezentácia, súradnicové systémy)
2. Transformácie nad objektami
3. Riešenie viditeľnosti
4. Tieňovanie
5. Osvetľovanie
6. Realistické zobrazovanie
7. Kompozícia a Vykresľovanie



# TIEŇOVANIE

Proces vplyvu svetelného zdroja na objekt (najčastejšie na jeho povrch).

Typy tieňovaní:

- Konštantné (flat)
- Gourardovo (interpolácia farby)
- Phongovo (interpolácia normály)

Podporné technológie:

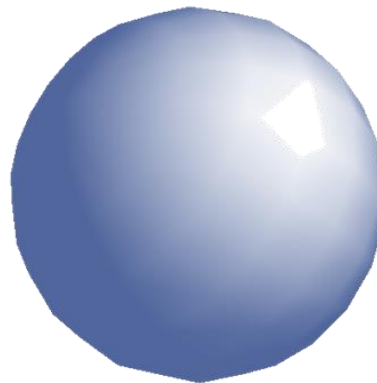
- Poltónovanie (halftoning)
- Rozptyľovanie (dithering)



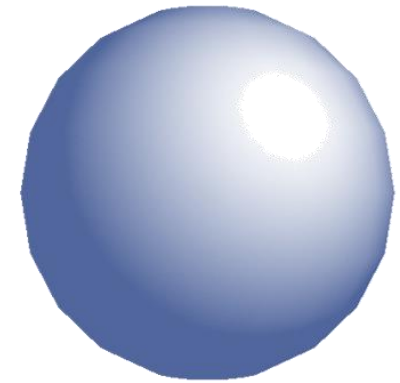
# TIEŇOVANIE



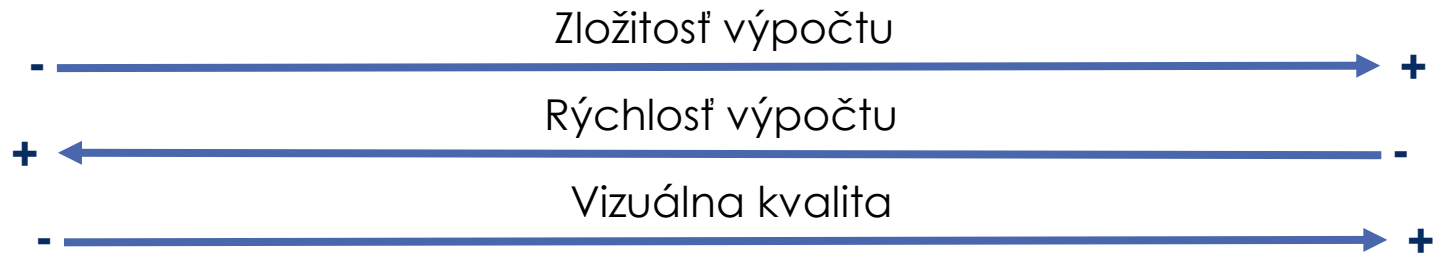
Konštantné  
tieňovanie



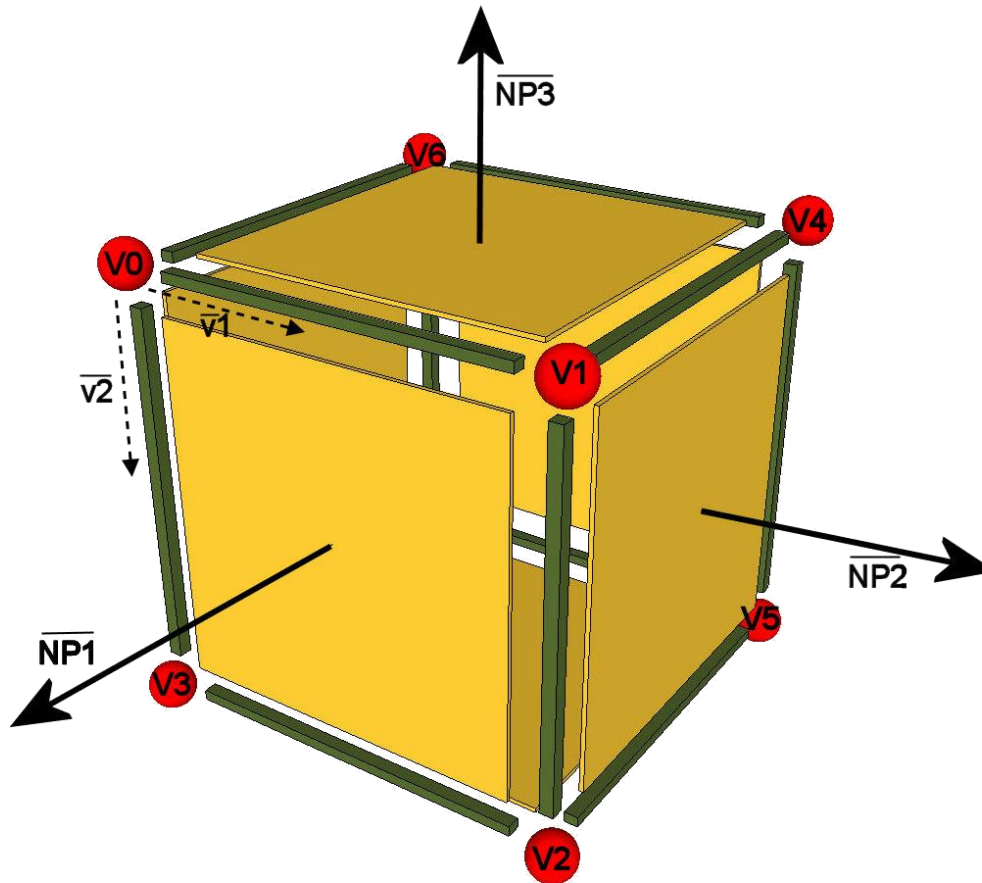
Gourardovo  
tieňovanie



Phongovo  
tieňovanie



# KONŠTANTNÉ TIEŇOVANIE (FLAT)



$$\overline{NP1} = \overline{v1} \otimes \overline{v2}$$

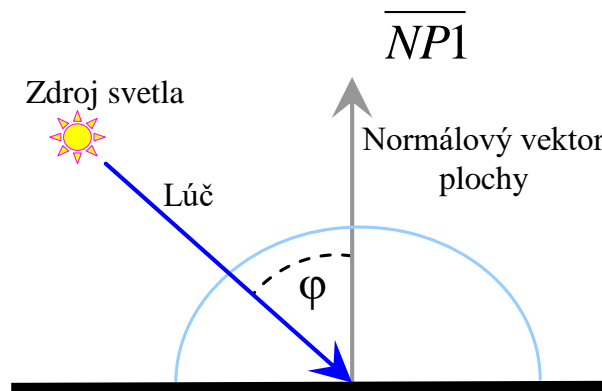
podmienka: rovnaká orientácia  
všetkých stien v scéne

určenie normál pri konštantnom tieňovaní

# KONŠTANTNÉ TIEŇOVANIE (FLAT)

Intenzita tieňa je závislá od uhla  $\varphi$  medzi vektorom dopadu lúča  $\vec{l}$  zo svetelného zdroja a normálou steny  $\vec{n}$ .

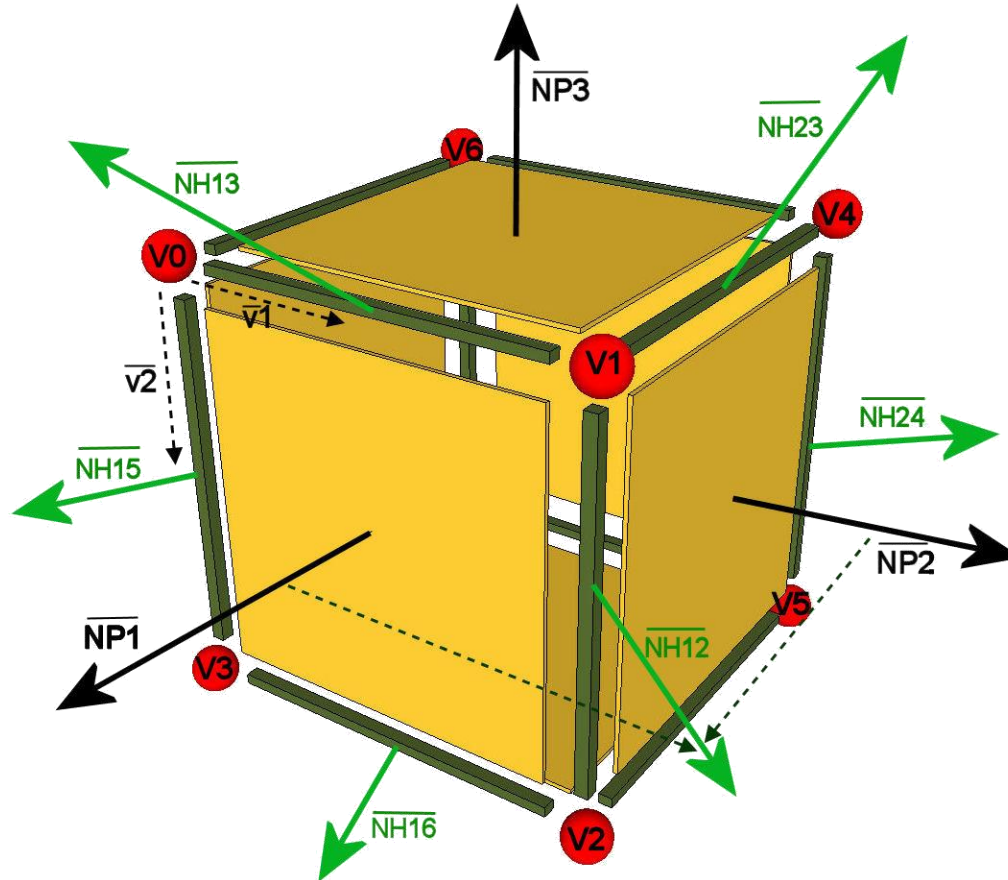
$$\varphi = \arccos \left( \frac{l_x \cdot n_x + l_y \cdot n_y + l_z \cdot n_z}{\sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} \cdot \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \right)$$



# GOURARDOVO TIEŇOVANIE (INTERPOLÁCIA FARBY)



Henri Gourard  
(1971)

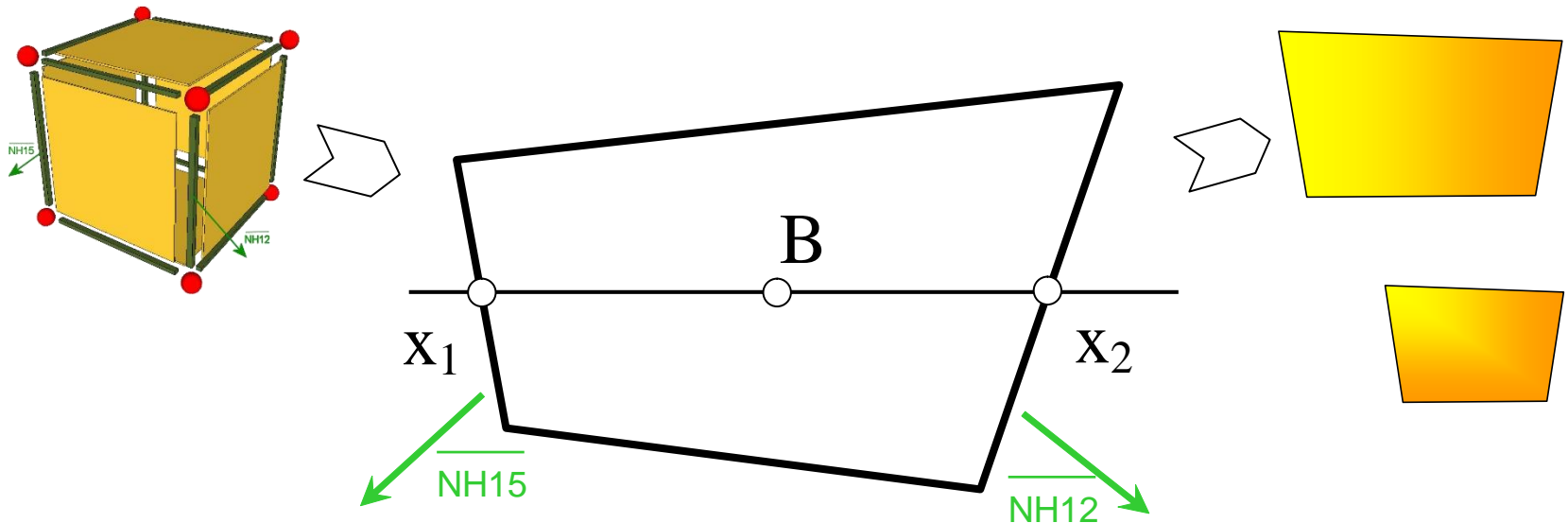


$$\overline{NH12} = \overline{NP1} \oplus \overline{NP2}$$

určenie normál pri Gourardovom tieňovaní

# GOURARDOVO TIEŇOVANIE (INTERPOLÁCIA FARBY)

$$I_B = I_{X1} \cdot \frac{X_2 - X_B}{X_1 - X_2} + I_{X2} \cdot \frac{X_B - X_1}{X_2 - X_1}$$



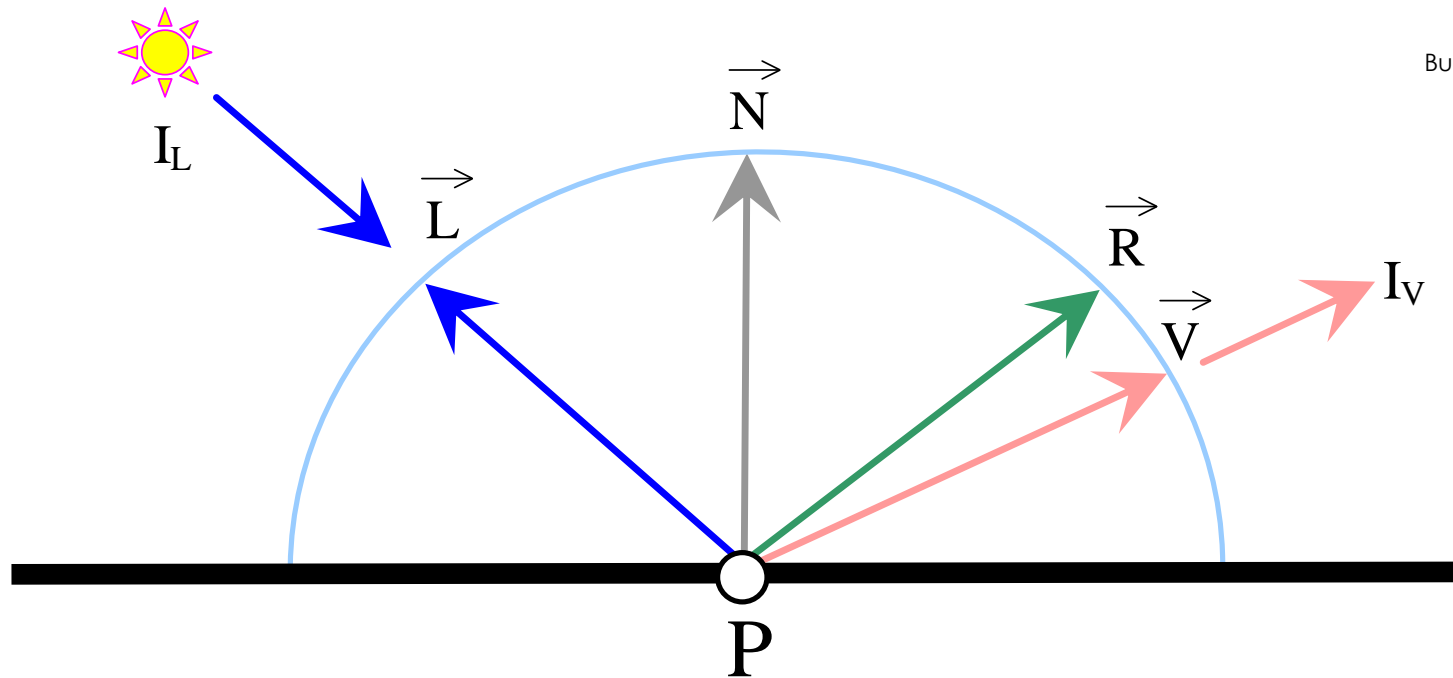
určenie farby interpoláciou pri Gourardovom tieňovaní



# PHONGOVO TIEŇOVANIE (INTERPOLÁCIA NORMÁLY)

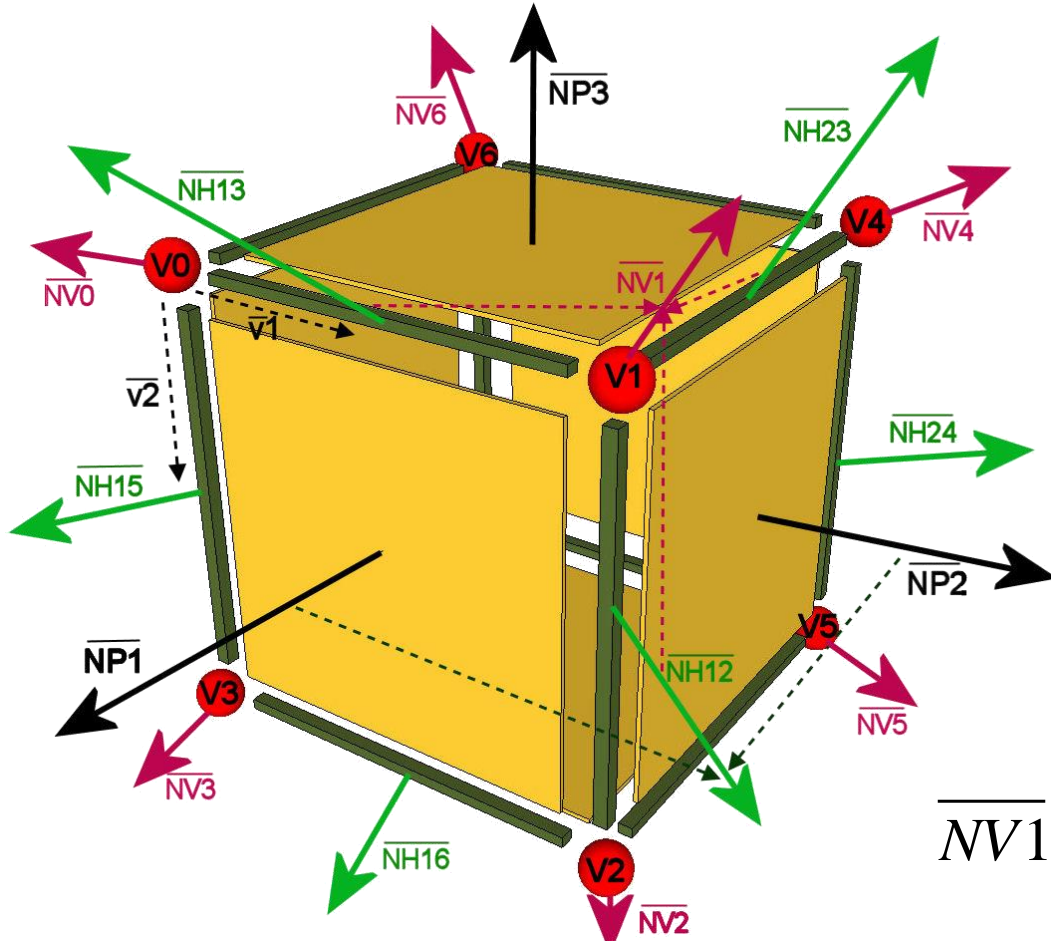


Bui Tuong Phong,  
(1942-1975)



Empirický osvetľovací model (Phong, 1975)

# PHONGOVO TIEŇOVANIE (INTERPOLÁCIA NORMÁLY)



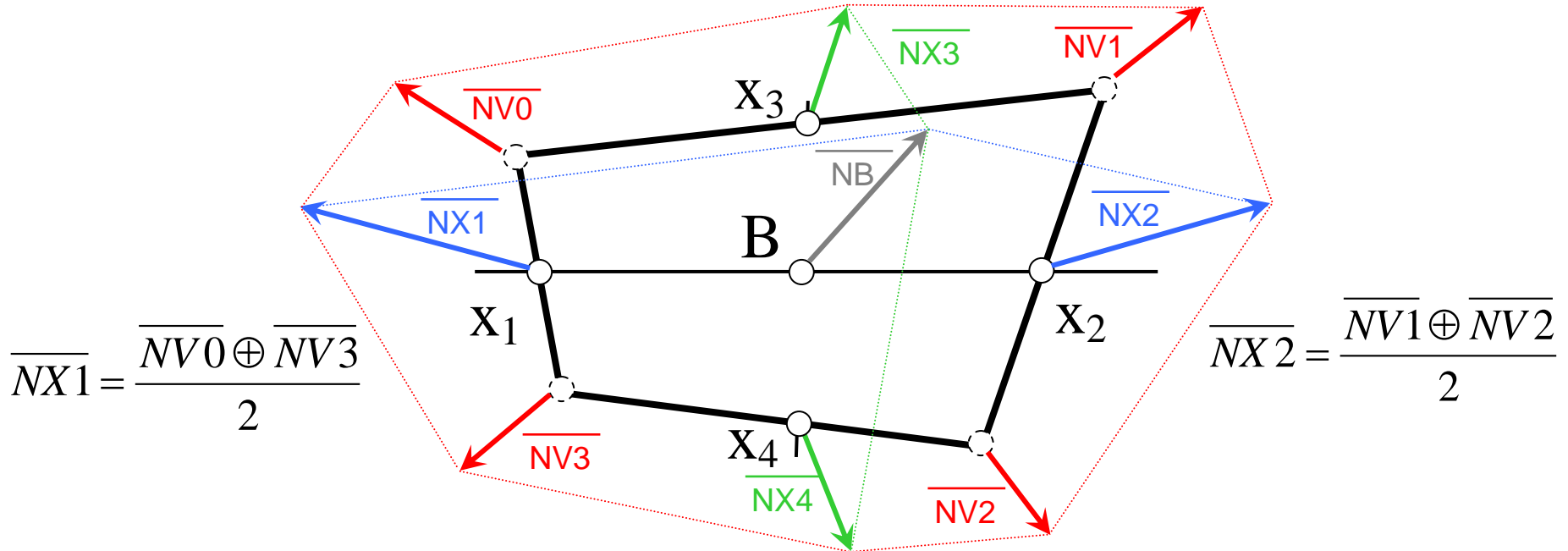
$$\overline{NV1} = \overline{NH13} \oplus \overline{NH12} \oplus \overline{NH23}$$

určenie normál pri Phongovom tieňovaní

# PHONGOVO TIEŇOVANIE (INTERPOLÁCIA NORMÁLY)

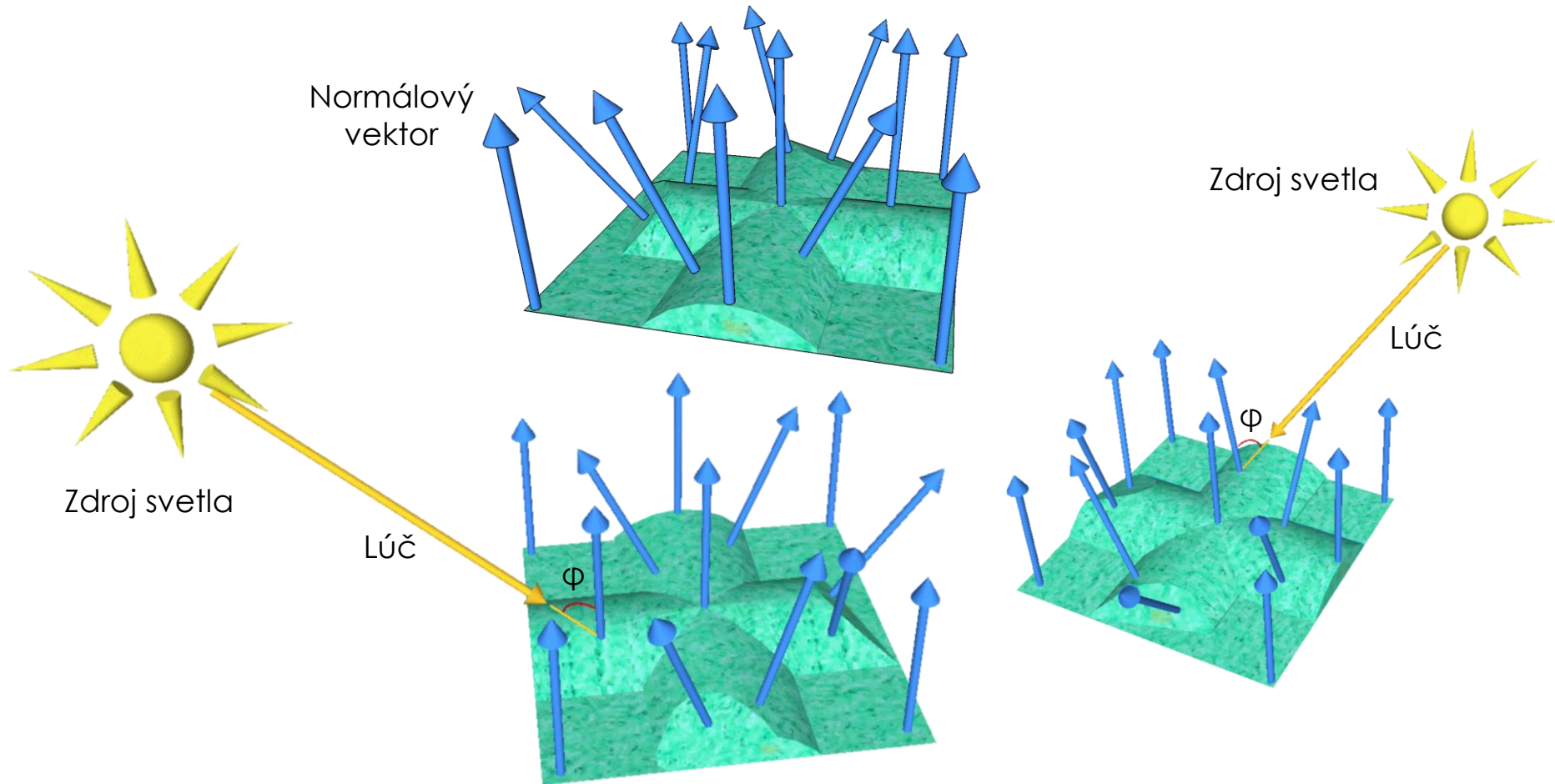
## URČENIE NORMÁL

$$\overline{NB} = \frac{\overline{NX1} \oplus \overline{NX2}}{2} \quad \text{ekvivalentne pre } \overline{NX3} \text{ a } \overline{NX4}$$

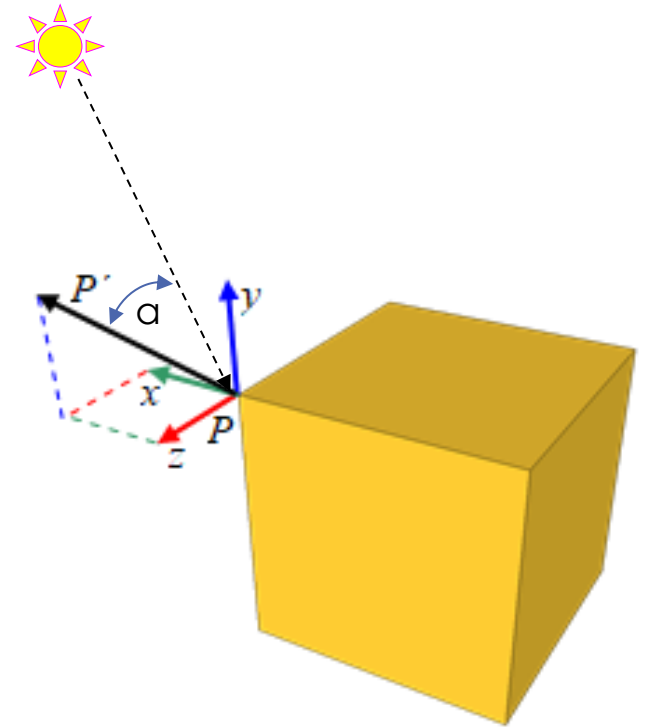
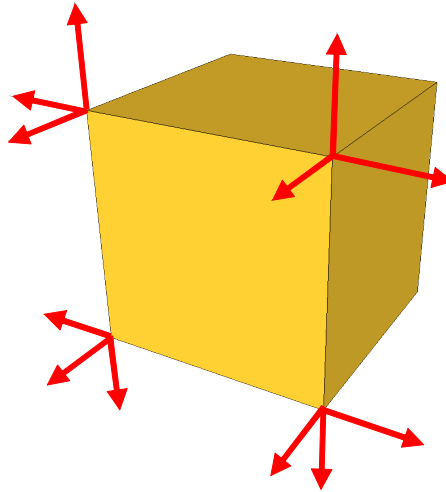
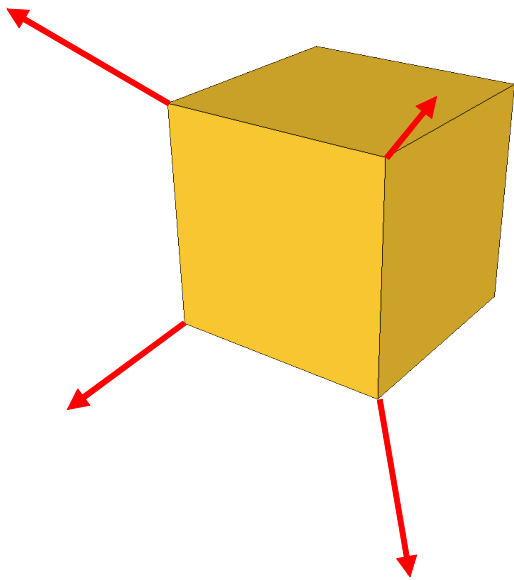


# PHONGOVO TIEŇOVANIE (INTERPOLÁCIA NORMÁLY)

## URČENIE NORMÁL PO INTERPOLÁCII (PRÍKLAD)



# VRCHOLOVÉ TIEŇOVANIE



# OSVETĽOVANIE

Proces vplyvu svetelného zdroja/zdrojov, materiálu a iných objektov na svoje okolie resp. na iné objekty – vrhanie tieňov

Typy osvetľovaní:

- statické
- dynamické



# OSVETĽOVANIE A OSVETĽOVACÍ MODEL

*Osvetľovací model* je model, ktorým môžeme sledovať vlastnosti povrchu ako je *farba, lesklosť, matnosť, drsnosť* a podobne.

Základom osvetľovacieho modelu je *odrazová funkcia* (reflection function). Je to matematická funkcia vyjadrujúca intenzitu svetelného lúča rozptýleného svetla v závislosti na jeho smere a smere intenzity a vlnovej dĺžky dopadajúceho lúča. Čím lepšie popisuje odrazová funkcia chovanie skutočného svetla, tým lepší a presvedčivejší je dojem z generovanej počítačovej reprezentácie priestorového objektu.

# OSVETĽOVANIE

Typy svetelných zdrojov podľa farby:

- Monochromatické
- Achromatické

Typy svetelných zdrojov podľa spôsobu vyžarovania:

- Bodové
- Reflektorové (spot)
- Plošné

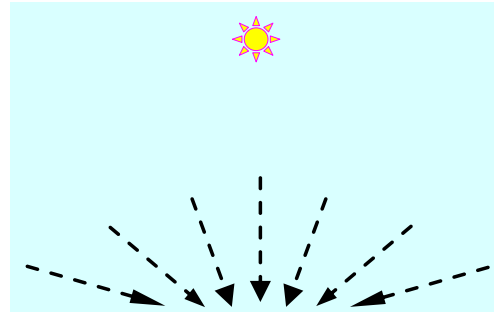
Typy svetelných zdrojov podľa kinematiky:

- Statické
- Dynamické

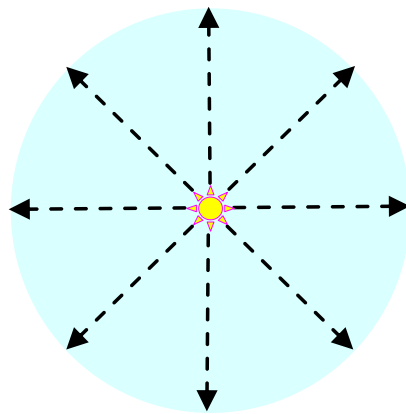




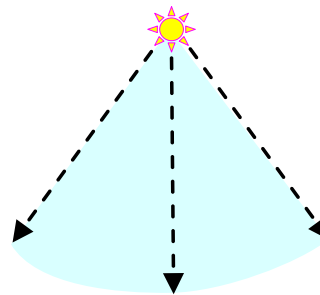
# OSVETĽOVANIE – SVETELNÉ ZDROJE (ZÁKLADNÉ)



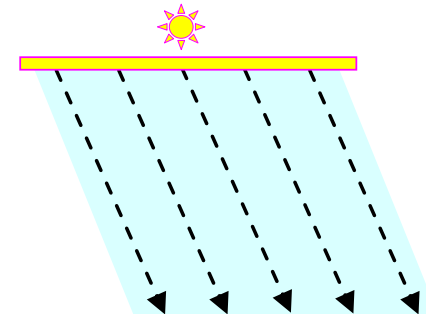
Okolité (ambientné) svetlo  
(ambient light)



Bodové svetlo  
(point light)



Reflektorové svetlo  
(spot light)



Smerové svetlo  
(directional light)

# OSVETĽOVANIE – ZLOŽKY SVETLA (PHONGOV MODEL)

**Ambientná zložka** (*ambient light*) sa využíva hlavne pri empirických vyjadrených odrazových rovníc, táto zložka predstavuje odraz bližšie nešpecifikovaného, zo všetkých smerov prichádzajúceho okolitého svetla.

Okolité rozptýlené svetlo vzniklo mnohonásobnými odrazmi od ostatných telies a rozptylom spôsobených molekulami vzduchu. Je preto väčšinou biele (achromatické).

# OSVETĽOVANIE – ZLOŽKY SVETLA (PHONGOV MODEL)

**Difúzna zložka** (*diffuse*) – jej charakteristika nezáleží na smere pohľadu. Po viacnásobnom odraze a lome bude smer svetelného lúča náhodný s rovnakou pravdepodobnosťou všetkých smerov. Veľkosť zložky bude závisieť iba na uhle dopadu (bude úmerná jeho kosínusu). Difúzne odrazené svetlo prinesie informácie o tom, čo nazývame farba povrchu.

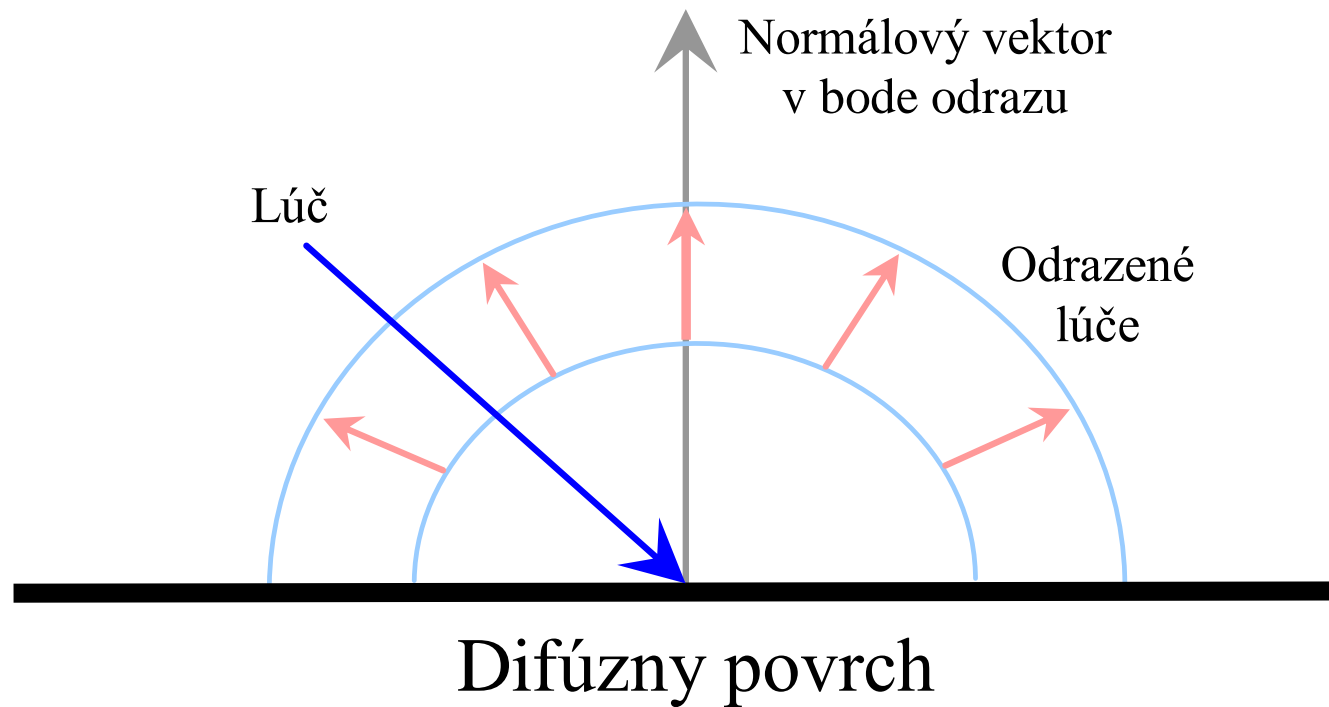
# OSVETĽOVANIE – ZLOŽKY SVETLA (PHONGOV MODEL)

**Zrkadlová zložka** (*specular*) – jej charakteristika závisí na smere pohľadu. Po viacnásobnom odraze a lome môže byť svetelný lúč utlmený. Pri odraze sa poväčšinou riadi štatistickým rozdelením. Veľkosť zložky bude závisieť na uhle dopadu a optických (zrkadlových) vlastnostiach povrchu.

# OSVETĽOVANIE – ZLOŽKY SVETLA (LAMBERTOV MODEL)



J.H. Lambert  
(1760)



# OSVETĽOVANIE – LAMBERTOV OSVETĽOVACÍ MODEL

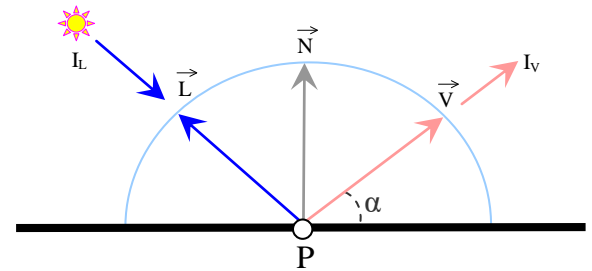
- Difúzna zložka  $I_d = L_L r_d (\vec{L} \cdot \vec{N})$

- Ambientná zložka  $I_a = I_A \cdot r_a$

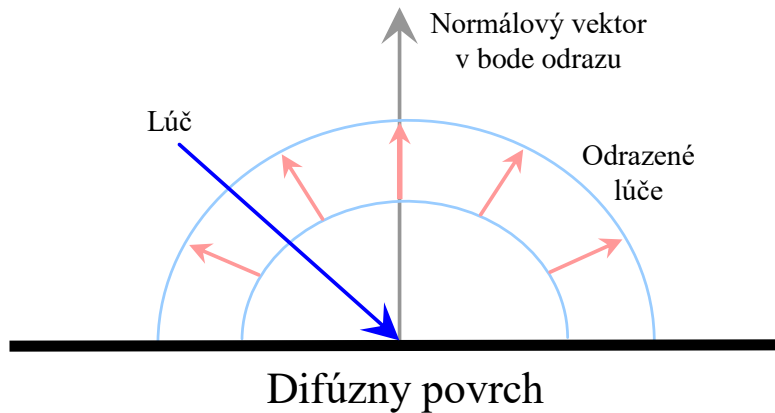
- Výsledok:

$$I_V = I_d + I_a$$

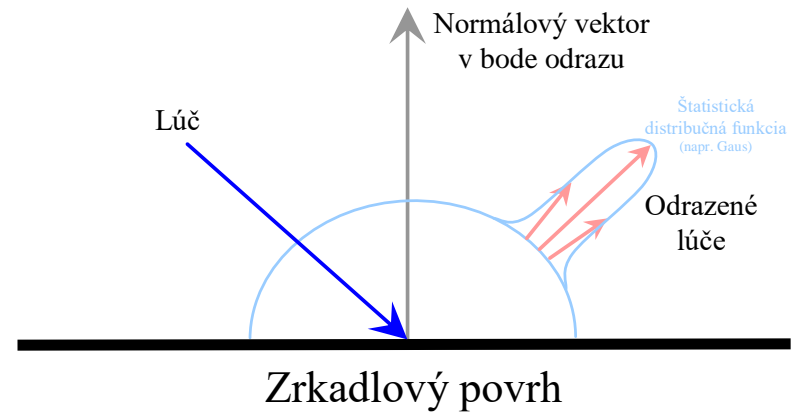
$$I_V = I_A r_a + \sum_{k=1}^M I_{L_k} \left[ r_d (\vec{L}_k \cdot \vec{N}) \right]$$



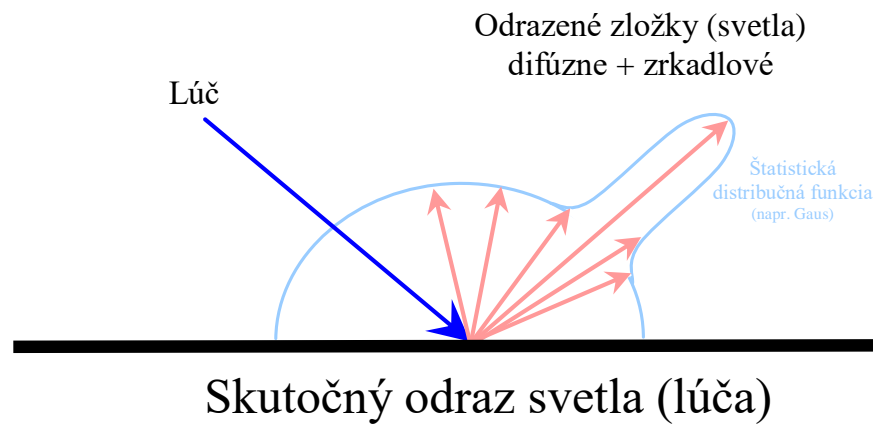
# OSVETĽOVANIE – ZLOŽKY SVETLA (PHONGOV MODEL)



+



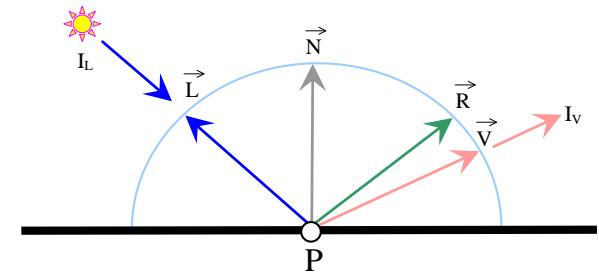
=



# OSVETĽOVANIE – PHONGOV OSVETĽOVACÍ MODEL

- Difúzna zložka  $I_d = I_L r_d (\vec{L} \cdot \vec{N})$

- Zrkadlová zložka  $I_s = I_L r_s (\vec{V} \cdot \vec{R})^h$



- Ambientná zložka  $I_a = I_A \cdot r_a$

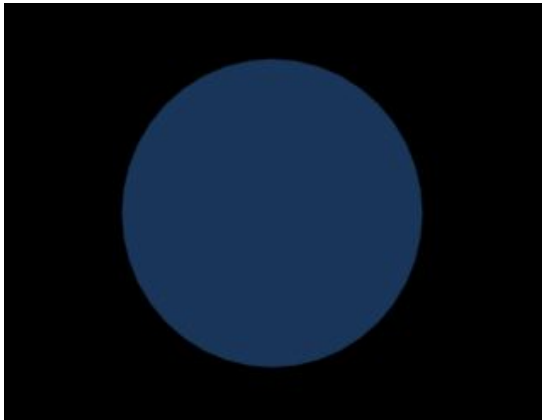
- Výsledok:  $I_V = I_s + I_d + I_a$

$$I_V = I_A r_a + \sum_{k=1}^M I_{L_k} \left[ r_s (\vec{V} \cdot \vec{R}_k)^h + r_d (\vec{L}_k \cdot \vec{N}) \right]$$

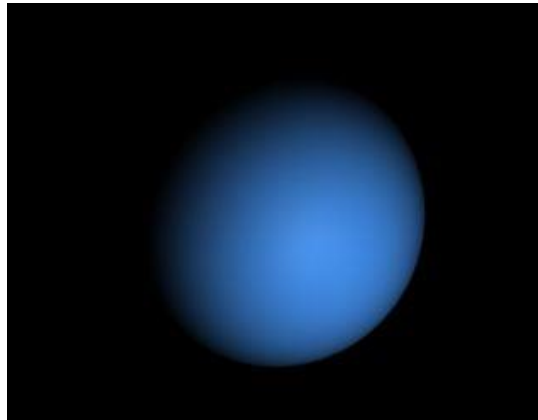


# OSVETĽOVANIE – ZLOŽKY SVETLA

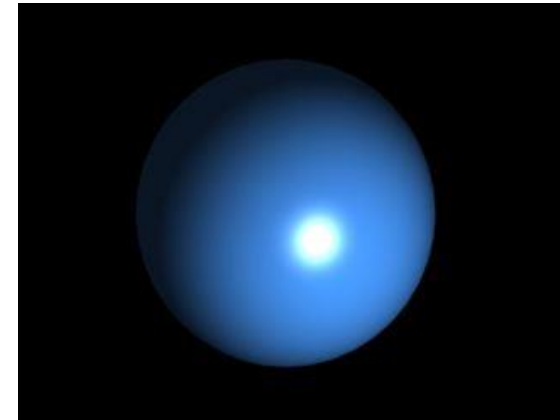
## POROVNANIE APLIKÁCIÍ ZLOŽIEK SVETLA



Ambientná  
zložka



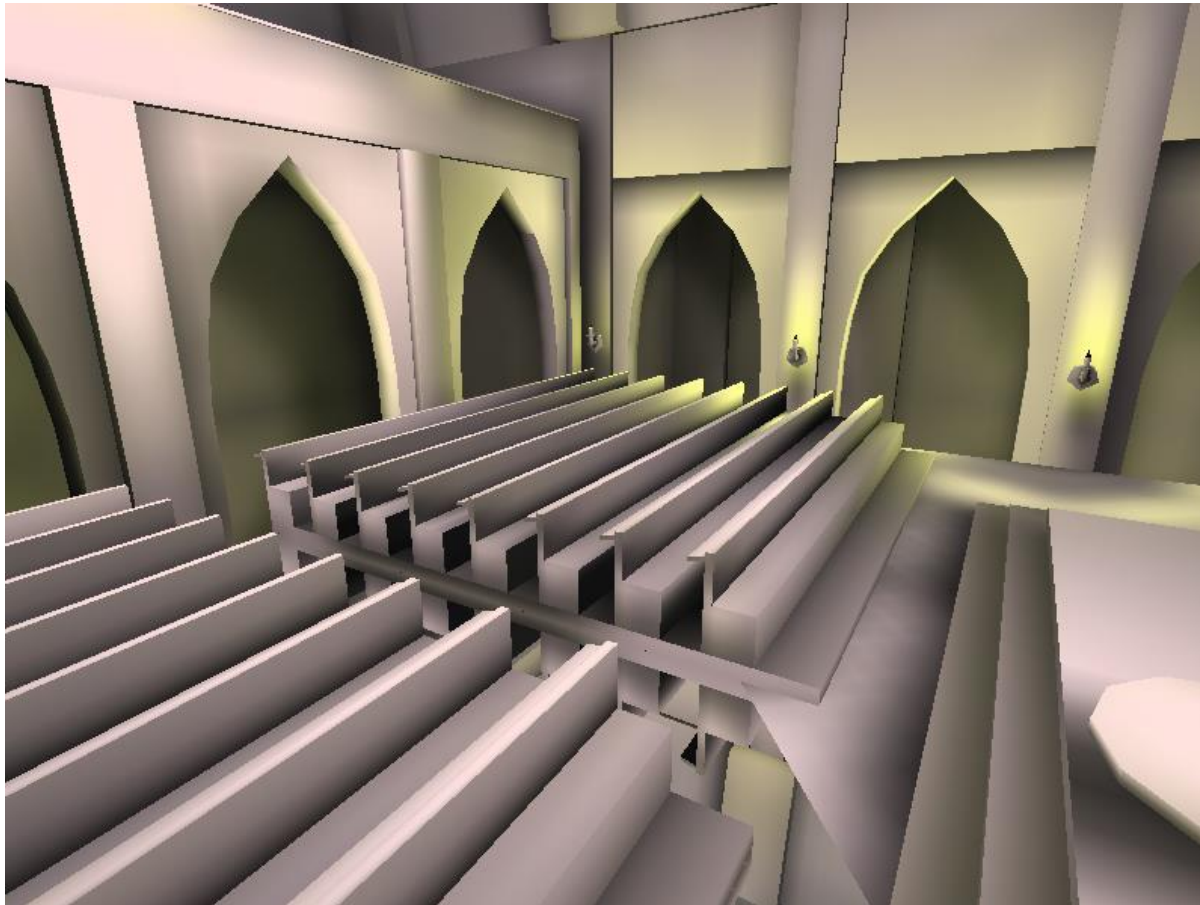
Ambientna zložka  
+  
Difúzna zložka



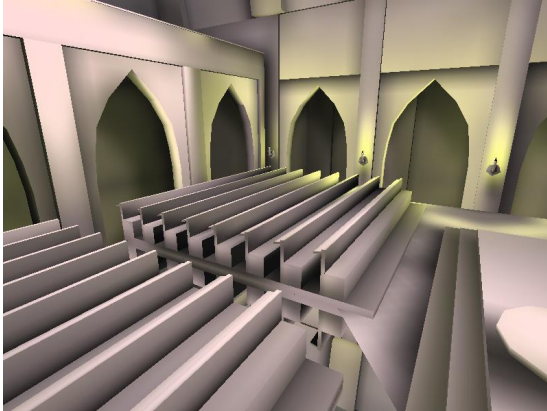
Ambientná zložka  
+  
Difúzna zložka  
+  
Zrkadlové zložka

# OSVETĽOVACIE MAPY (LIGHTMAPS)

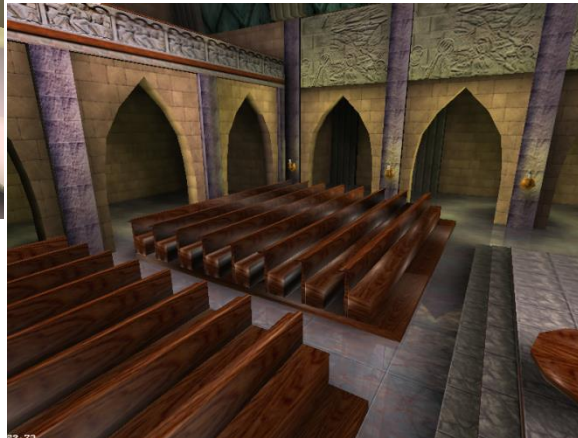
Osvetľovacia mapa je celkový výpočet vplyvov svetelných zdrojov na scénu



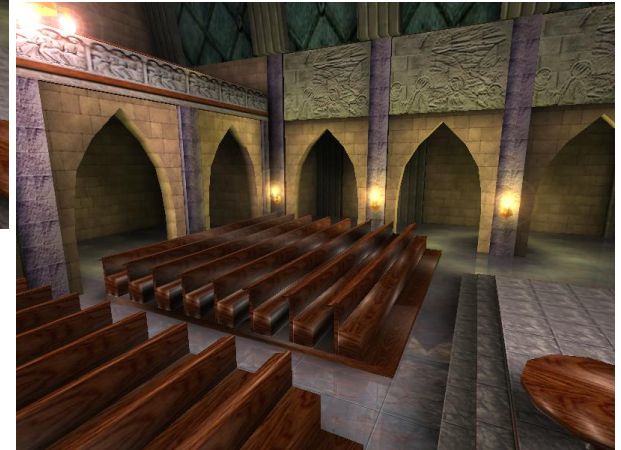
# OSVETĽOVANIE - PROCES



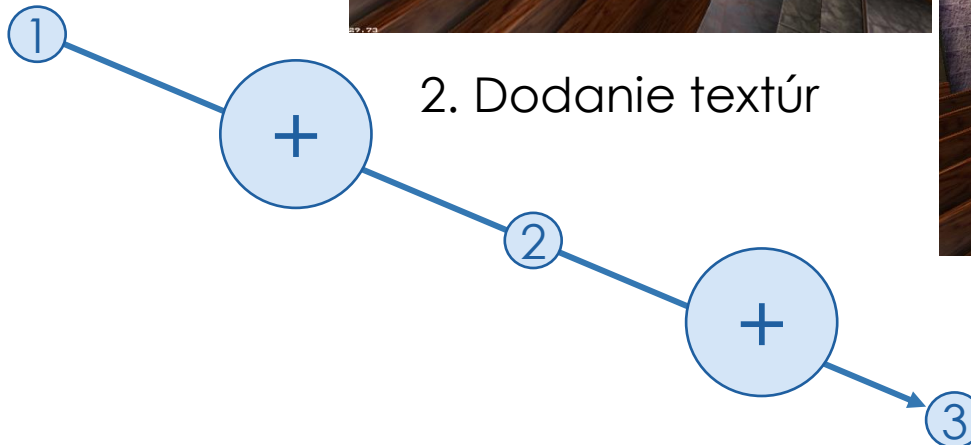
1. Osvetľovacia mapa



2. Dodanie textúr



3. Dodanie svetelných zdrojov



# IMPLEMENTÁCIA ZRKADIEL

Odrazy okolitých objektov a svetelných zdrojov na objekte

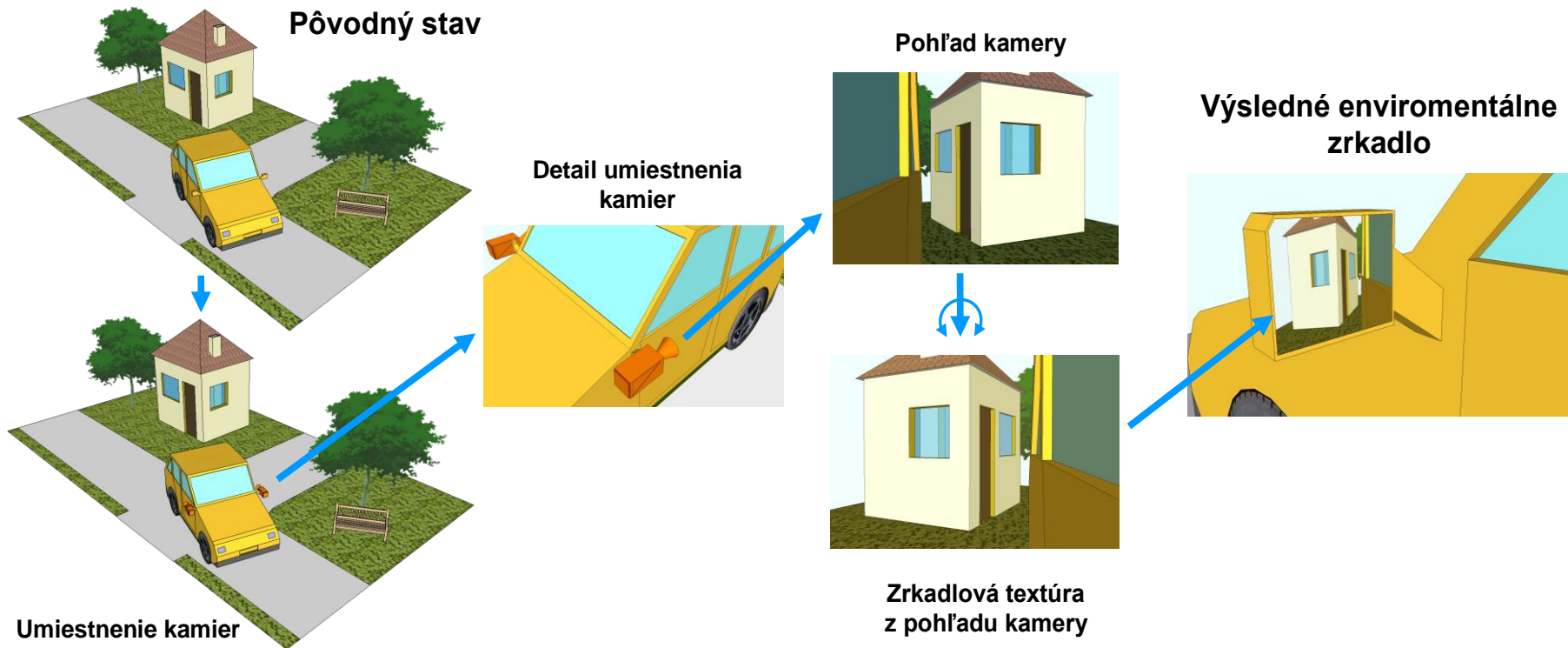
Typy zrkadiel:

- Enviromentálne zrkadlá
- Geometrické zrkadlá



# IMPLEMENTÁCIA ZRKADIEL

## ENVIROMENTÁLNE ZRKADLÁ (PRÍKLAD)





# IMPLEMENTÁCIA ZRKADIEL

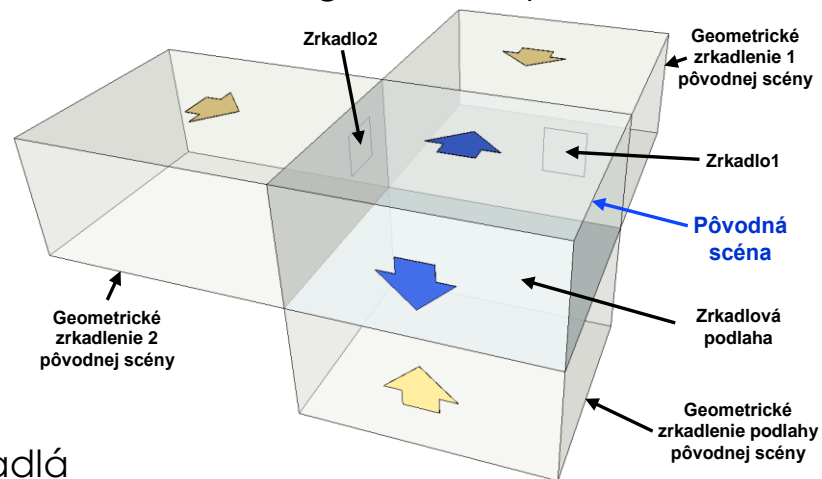
## GEOMETRICKÉ ZRKADLÁ (PRÍKLAD)

Pôvodná scéna



Počet polygónov:  $N$

Schéma geometrických zrkadiel



Výsledné geometrické zrkadlá



Počet polygónov:  $4 \times N$



Pripravená scéna geometrických zrkadiel

# **GLOBÁLNE OSVETĽOVACIE TECHNIKY (FOTOREALISTIKA)**

Globálne osvetľovacie techniky slúžia na riešenie zobrazovacej rovnice (vrátane riešenia viditeľnosti). Ich riešením je:

- Výpočet osvetlenia všetkých plôch v scéne – *pohľadovo nezávislé*.
- Výpočet osvetlenia pre určitý smer – *pohľadovo závislé*.



# GLOBALNE OSVETĽOVACIE METÓDY (FOTOREALISTIKA)

Rozdelenie globálnych osvetľovacích techník:

- Metódy vychádzajúce od pozorovateľa
  - Sledovanie lúča
  - Sledovanie cesty
- Metódy vychádzajúce od svetelného zdroja
  - Sledovanie fotónov
  - Monte Carlo sledovanie svetla
- Obojsmerné metódy
  - Obojsmerné sledovanie cesty
  - Fotónové mapy
- Vyžarovacia metóda (Radiosity)





# METÓDY VYCHÁDZAJÚCE OD POZOROVATEĽA (FOTOREALISTIKA)

Jedná sa o pohľadovo závislé metódy, ktoré zhromažďujú svetelnú informáciu (energiu), ktorú lúč akumuluje (gathering methods) po svojej trajektórii. Tieto metódy môžeme tiež označiť ako spätné sledovanie trajektórie svetla.

- **Sledovanie lúča** (Ray tracing) - základný algoritmus pracuje s bodovými svetlami, poskytuje len ostré tieňe a transport svetla je obmedzený na zrkadlové odrazy. Je schopný popisovať ľubovoľný počet zrkadlových odrazov a lokálny osvetľovací model s difúznou zložkou. Nepočíta sa kompletne riešenie zobrazovacej rovnice (napr. efekty ako kaustika, plošné svetelné zdroje, difúzne odrazy a pod.).
- **Distribúované sledovania lúča** (Distributed ray-tracing) - ide o rozšírenie Raytracingu o odraz lúča, aj do difúzných smerov, v závislosti od osvetľovacieho modelu.

# METÓDY VYCHÁDZAJÚCE OD SVETELNÉHO ZDROJA (FOTOREALISTIKA)

Tieto metódy sú označované aj ako *energiu vystreľujúce metódy* (*shooting methods*) a riešia problémy predchádzajúcich metód, ako sú kaustika, skryté svetelné zdroje a pod., avšak za cenu zaťaženia šumom. Tieto algoritmy hľadajú riešenie osvetľovacej rovnice náhodným sledovaním dráh lúča zo svetelného zdroja.

- **Photon tracing** - ide o duálnu metódu k metóde sledovania lúča. Používa rovnaké druhy odrazov no v opačnom smere a trajektória sa dá popísať ako  $LS \times DE$ . Teda nastáva ľubovoľný počet zrkadlových odrazov zo svetla, ktoré ústia do difúzneho odrazu (závislého napr. od hĺbky rekurzie).
- **Light tracing** - Metóda sledovanie svetla je duálna k metóde sledovania cesty (path tracing). Náhodným spôsobom sa určujú odrazy lúčov v scéne, ktoré začínajú zo svetelného zdroja. Pokiaľ je bod odrazu lúča viditeľný pozorovateľom, určí sa jeho príspevok pre daný pixel (všetky príspevky pre daný pixel sa spriemerujú). Trajektória sa ukončí, pokiaľ bude príspevok svetla dostatočne malý.

# ALGORITMY FOTO-REALISTICKÝCH METÓD

## Algoritmy zobrazujúce povrchy (surface based techniques)

Algoritmy zobrazujúce povrchy vytvárajú pomocnú geometrickú reprezentáciu povrchu. V trojrozmerných dátach sa hľadajú hrany a body povrchu. Z nich sa interpretuje povrch dvojrozmernými záplatami. Ide o nepriamu metódu. Medzi najznámejšie algoritmy patria:

- sledovania obrysov (*contour tracking*)
- marching cubes (*pochodujúce kocky*)
- marching tetrahedra
- dividing cubes
- opaque cubes

Tieto metódy sa snažia z objemových dát aproximovať povrch pomocou geometrických primitív a tie zobrazovať pomocou dobre známych metód počítačovej grafiky. Informácie o vnútrajšku objektu sa však strácajú.

# ALGORITMY FOTO-REALISTICKÝCH METÓD

## Objemové algoritmy

Využívajú plnú priestorovú informáciu na vykreslenie výsledného obrazu a sú nezávislé od zložitosti scény. Na výpočet používajú celú trojrozmernú mriežku údajov, preto sú veľmi náročné na pamäť a procesor. Pri každom výslednom obraze je vyžadované *traverzovanie údajov*. Je možné zobraziť ľubovoľný detail objektu. Tieto algoritmy poskytujú viac informácií ako algoritmy, ktoré používajú pomocnú reprezentáciu povrchu. Podľa klasifikácie údajov sa delia na:

- **Binárne** - pokrývajú každý voxel buď úplne alebo vôbec. Sú to povrchovo orientované algoritmy
- **Pravdepodobnostné** - priradujú voxelom percentuálny podiel nejakého objektu. Sú založené na nahradzovaní príspevkov od všetkých vzoriek pozdĺž lúča do jedného obrazového pixela.

Ďalšie rozdelenie je podľa poradia, v akom sú voxely postupne spracované pri tvorbe obrazu, čiže ide o delenie podľa domény algoritmu.

# ALGORITMY FOTOREALISTICKÝCH METÓD

## Algoritmy pracujúce v obrazovom priestore

Pre každý pixel výsledného obrazu sa hľadajú voxely v objektovom priestore, ktoré prispievajú do výslednej farby bodu.

Nakoľko pozície týchto voxelov obyčajne padnú mimo vrcholu mriežky, ich hodnotu musíme zisťovať interpoláciou. Do tejto skupiny môžeme zaradiť nasledujúce algoritmy:

- Trasovanie lúčov (raytracing, raycasting)
- Sábellova metóda

# ALGORITMY FOTOREALISTICKÝCH METÓD

## Algoritmy pracujúce v objektovom priestore

Pre každý voxel objektového priestoru sa hľadajú pixely výsledného obrazu, ktoré daný voxel ovplyvnia. Splatting je technika traverzujúca objektový priestor. Na každý voxel je aplikovaná konvolúcia s 3D rekonštrukčným filtrom. Príspevok filtrovaných bodov sa nahromaďuje do obrazového priestoru.

Algoritmy:

- V-buffer
- Splatting

# ALGORITMY FOTOREALISTICKÝCH METÓD

## Algoritmy pracujúce na hybridnom princípe

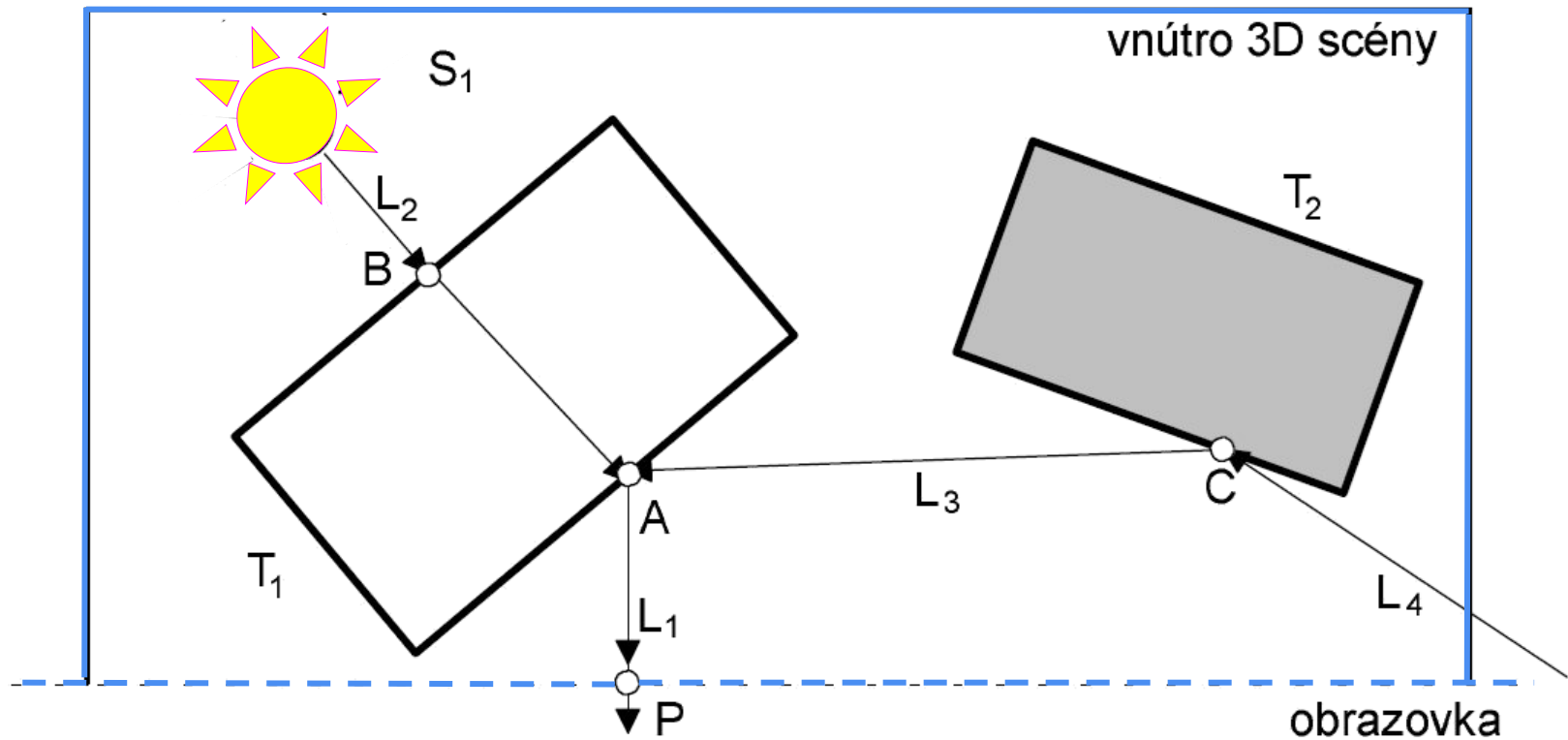
Kombinujú výhody oboch predchádzajúcich prístupov. Napríklad sa môže použiť algoritmus *Shear-warp* (posun a pokriv), ktorý je považovaný za najrýchlejší. Myšlienka spočíva v posunutí jednotlivých rezov v objektovom priestore tak, aby ich namapovanie na 2D zobrazovací priestor bolo jednoduché a rýchle – vzorky pozdĺž lúčov budú ležať presne v rovinách rezov.

Traverzovanie údajmi vyžaduje jednoduché adresovanie a 2D prevzorkovací filter. Po projekcii sa zdeformovaný obraz pokriví naspäť. Algoritmus je veľmi rýchly aj na bežne dostupných počítačoch. Na druhej strane však produkuje artefakty, je pohľadovo-závislý a kvalita výsledného obrazu je nízka. Nižšia kvalita obrazu je spôsobená tým, že:

- algoritmus obsahuje až dva kroky prevzorkovania, čo môže spôsobiť rozmazanie a stratu detailných informácií,
- rekonštrukčný filter je iba dvojrozmerný. V rezoch sa používa iba bilineárna interpolácia, medzi rezmi iba interpolácia najbližším susedom. Tento bod je hlavnou nevýhodou algoritmu *shear-warp*,
- počet lúčov je rovný počtu voxelov jedného rezu, algoritmus produkuje alias kvôli podvzorkovaniu.

# RAYTRACING

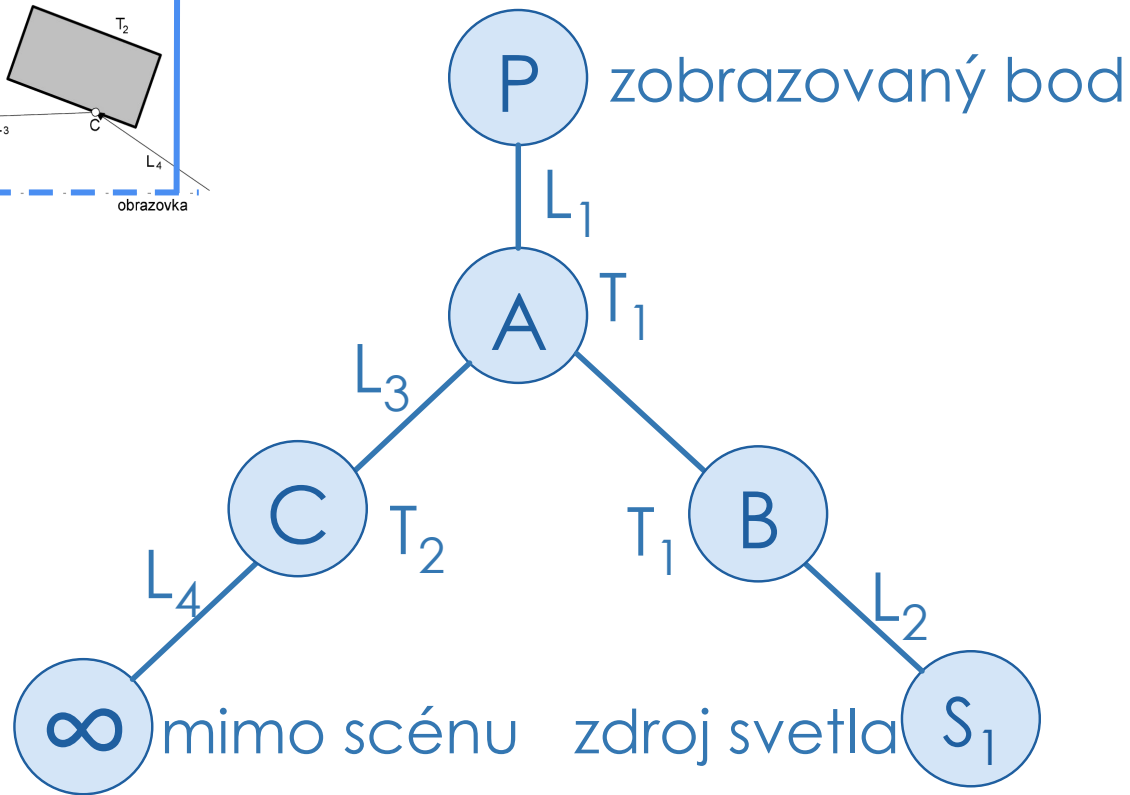
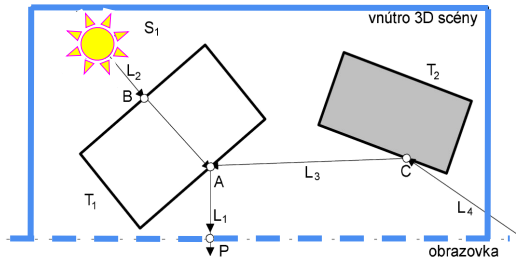
## SPÔSOB SLEDOVANIA LÚČA PRI RAYTRACING-U





# RAYTRACING

## PRÍKLAD STROMU SCÉNY PRI RAYTRACING-U



# RAYTRACING

## PRÍKLAD VÝPOČTU INTENZITY PRI RAYTRACING-U

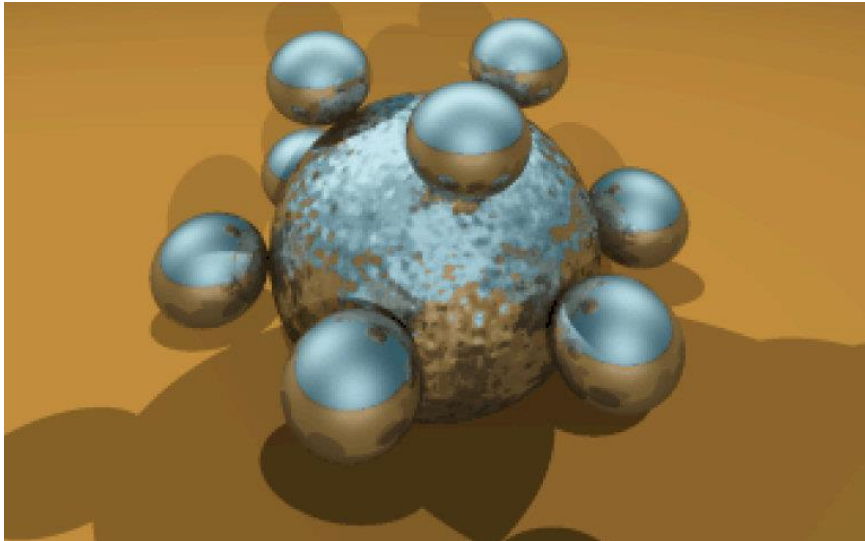
$$I_V = I_a + I_d + I_s + I_r + I_L$$

kde:

- $I_V$  je výsledná intenzita
- 
- $I_a$  je zložka okolitého svetla
  - $I_d$  je difúzna zložka
  - $I_s$  je zrkadlová zložka (týka sa zdroja svetla)
  - $I_r$  je zložka z odrazeného lúča (týka sa telesa)
  - $I_L$  je zložka z lomeného lúča

# PRÍKLADY SCÉN (FOTOREALISTIKA)

## PRÍKLAD VÝSTUPOV Z RAYTRACINGU A VYŽAROVACEJ METÓDY



# PRÍKLADY SCÉN (FOTOREALISTIKA)

## PRÍKLAD VÝSTUPOV Z ROZSIAHLEHO RAYTRACINGU



Priestory KPI (30Kx20K)



Tepláreň Košice (TEKO)





# Q & A

[branislav.sobota@tuke.sk](mailto:branislav.sobota@tuke.sk)

Katedra počítačov a informatiky, FEI TU v Košiciach

© 2024