

# Programování grafických aplikací osvětlovací modely

Radek Richtr

Institute of Information Theory and Automation  
Academy of Sciences of the Czech Republic  
Prague, Czech Republic

January 8, 2019



# Outline I

- 1 Úvod
- 2 Světlo a materiál
- 3 Phong
- 4 Zobrazovací modely
- 5 Datové struktury
- 6 Rendery

# Intro

- Teoretická přednáška

# Intro

- Teoretická přednáška
- Přehled algoritmických podkladů

# Intro

- Teoretická přednáška
- Přehled algoritmických podkladů
- ... a matematických podkladů pro grafické algoritmy

# Intro

- Teoretická přednáška
- Přehled algoritmických podkladů
- ... a matematických podkladů pro grafické algoritmy
- Matematika je základ, bez kterého to nejde (alespoň její intuitivní pochopení)

# Matemackofyzikální minimum

- Vektory, skalární součin
- Integrály
- Sférické souřadnice
- ...

# Osvětlení

- Virtuální 3D scéna
  - obrazová reprezentace matematickými objekty zadané scény  $\mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{L}^2$
- Reálná scéna
  - odrážení fotonů
  - přejímání barev
  - nerovné povrchy
  - nespojitě *vyplněné* povrchy
  - atd.

## Empirické osvětlovací modely

Realizace fyzikálně přesného výpočtu osvětlení scény je extrémně obtížné (ne-li nemožné) a především výpočetně náročné.

*Empirické* modely se snaží aproximovat a zachovat fyzikální chování a přitom být výpočetně co nejméně náročné.



# Světlo

- Dualistická povaha světla
- Předpoklady pro zjednodušení
  - světlo se šíří přímočaře
  - rychlost šíření světla je nekonečná
  - světlo není ovlivňováno gravitací
  - světlo není ovlivňováno EM polem
  - světlo není ovlivňováno relativistickými jevy

# Světlo

- Často pracujeme se sférickými souřadnicemi
- Se světlem se počítá jako s vektorem procházejícím jednotkovou polokoulí nad bodem
  - lokální souřadnicová soustava vztažená ke každému bodu
- Jednotkový vektor  $\omega$  může být popsán jako bod na povrchu jednotkové koule a vyjádřen pomocí dvou úhlů  $\theta$ ,  $\phi$ .
  - $\theta$   $[0, 2\pi]$  - výška bodu
  - $\phi$   $[0, \frac{\pi}{2}]$  - azimut

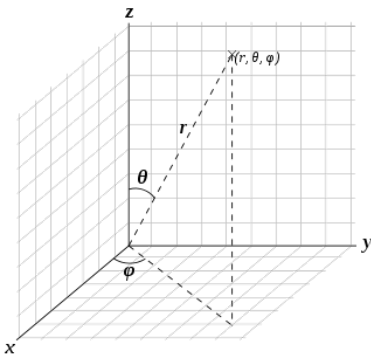
# Světlo

- Uspořádaná trojice sférických souřadnic  $[r, \theta, \phi]$  určuje jednoznačně polohu bodu na kouli o poloměru  $r$

$$x = r \cos \phi \sin \theta$$

$$y = r \sin \phi \sin \theta$$

$$z = r \cos \theta$$



# BRDF

- Většina světla, která vidíme je *odražené*
- Barva objektu je dána spektrální charakteristikou světla, které na něj dopadá, ale *především* vlastnostmi povrchu, zejména tím, jaké vlnové délky v jakém směru odráží
- Obusměrná odrazová funkce BRDF charakterizuje odrazové schopnostmi *materiálu* v určitém jeho bodě ( $x$ )
  - světlo dopadá ve směru  $\omega_i$  a odráží se do směru  $\omega_r$ .
  - BRDF se označuje  $f_r(x, \omega_r, \omega_i)$  a definuje *poměr* odražené radiance v daném bodě  $x$  označení jako  $dL_r(x, \omega_r)$  ke vstupní radianci  $dL_i(x, \omega_i)$  promítnuté na kolmou plochu

$$f_r(x, \omega_r, \omega_i) = \frac{dL_r(x, \omega_r)}{dL_i(x, \omega_i)(\omega_i n) d\omega_i} \quad (1)$$

pokud radiance dopadá kolmo na plochu, je tedy přijatý světelný výkon nejsilnější

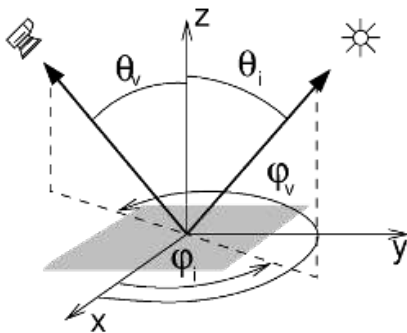
# BRDF

- Místo obtížně zjistitelné funkce se BRDF modeluje pomocí měření a vzorků
- Zjištění chování povrchu sérií měření
- Základní proměnnou je v BRDF úhel osvětlení a pohledu
- Minimální jednoduchá množina pro měření je cca  $81 \times 81$  měření (forát UBO)

$\theta$	15	30	45	60	75
$\Delta\phi$	60	30	20	18	15

Nominální směry  $\theta$  a jejich příslušné přírůstky  $\phi$

## BRDF



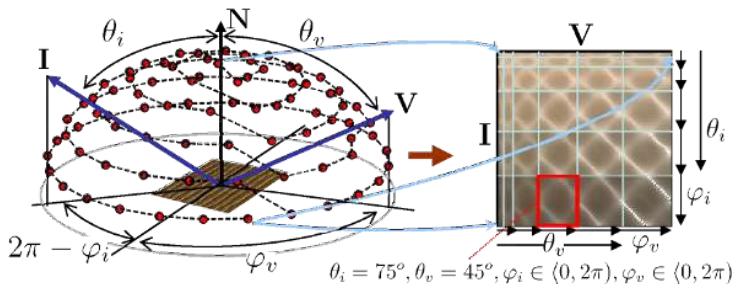
# BRDF



Klasický způsob zobrazení BRDF je zobrazení koule s daným materiálem (Jakou to má nevýhodu?)

## BRDF

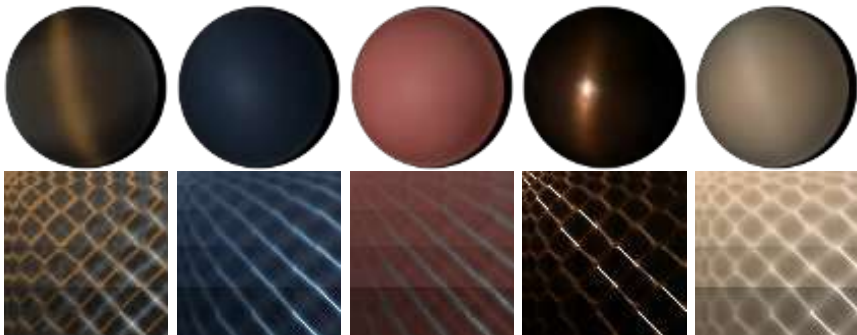
- Měření
- <http://btf.utia.cas.cz/>





# BRDF

- Komplexnější zobrazení
- <http://btf.utia.cas.cz/>



# BRDF

- Komplexnější zobrazení
- <http://btf.utia.cas.cz/>



# BRDF

- Klasické zobrazení
- <http://btf.utia.cas.cz/>



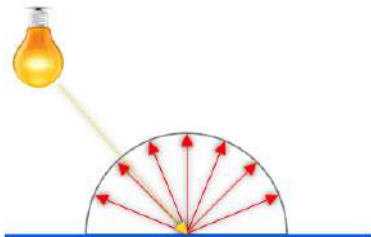
# BRDF

- Měření
- <http://btf.utia.cas.cz/>



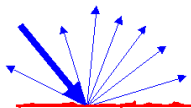
# Difuzní odraz

- Ideálně rozptýlené světlo (diffuse)
  - ideální difuzní povrch - *Lambertovský povrch*
  - pouhá matematická abstrakce
- Plastické povrchy, nevyleštěné, ...



# Zrcadlový odraz

- Ideálně odražené světlo (specular)
  - fresnelova rovnice
  - lom světla, ...



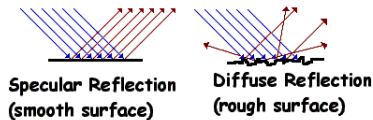
diffuse reflection



specular reflection

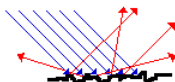
# Zrcadlový odraz

- Ideálně odražené světlo (specular)
  - fresnelova rovnice
  - lom světla, ...

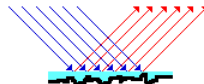


# Zrcadlový odraz

- Ideálně odražené světlo (specular)
  - fresnelova rovnice
  - lom světla, ...



A dry asphalt roadway  
diffuses incident light.



When wet, water fills in the  
crevices, resulting in specular  
reflection and a glare.

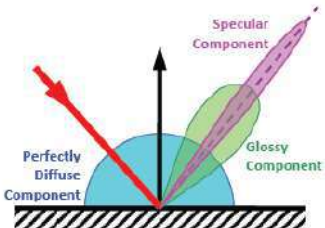


# Lesklý odraz

- Lesklý, ale ne dokonale zrcadlový (glossy)
  - fresnelova rovnice
  - mikroplošky

# Odrazy

- Součet všech složek odražených paprsků



# Osvětlovací model

- Osvětlovací model
  - udává, jak na základě vlastnosti scény, objektu a pozorovatele zjistit vlastnosti o barvě objektu
  - tj. i udává i to, *jak scénu popisovat*
  - modelů je celá řada
    - Phong
      - rychlý, jednoduchý. Především na plastové povrchy.
    - Blinn-Phong (úprava phonga, odlesky)
    - Lambert (jednoduchý, předpoklad ideálně difuzního materiálu)
    - Torrance-Sparrow (mikrofacety, realistický)
    - Cook-Torrance (mikrofacety, vlnová délka)
    - Ward
    - Oren-Nayar, ...

# Phongovo stínování

- Osvětlovací model
  - udává, jak na základě vlastnosti scény, objektu a pozorovatele zjistit vlastnosti o barvě objektu
  - Phongův osvětlovací model
- Stínování
  - Říká, jak a kde model a výpočet aplikovat
  - Phongovo stínování

!

Phongův osvětlovací model  $\neq$  Phongovo stínování

# Stínování

- Ploškové (flat)
  - pro každou plochu se spočte jedna barva
- Goraudovo
  - barva pro každý vrchol
  - normála je konstantní
  - uvnitř plochy se interpoluje
- Phong
  - pro každý bod
  - normála se interpoluje



# Stínování

- Ploškové (flat)
  - pro každou plochu se spočte jedna barva
- Goraudovo
  - barva pro každý vrchol
  - normála je konstantní
  - barva uvnitř plochy se interpoluje
- Phong
  - pro každý bod
  - normála se interpoluje



# Stínování

(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)(a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)(c<sub>3</sub>)

# Phongův osvětlovací model

- Silně empirický
  - rychlý
  - vizuálně často dostačující
  - nedostatečné osvětlení (např. v rozích) vyvažuje zavedené ambientní osvětlení

$$I_V = I_s + I_d + I_a$$

- Ambientní složka
- Difuzní složka
- Zrcadlová složka



# Phongův osvětlovací model

$$I_V = I_s + I_d + I_a \quad (2)$$

- Ambientní složka
- Difuzní složka
- Zrcadlová složka

$$I_s = I_L r_s (\vec{v}\vec{r})^h \quad (3)$$

$I_L$	barevné složení dopadajícího paprsku
$\vec{v}$	jednotkový vektor pohledu
$\vec{r}$	směr ideálního zrcadlového odrazu (symetrický k vektoru pohledy podle normály) $\vec{r} = 2(\vec{l}\vec{n})\vec{n} - \vec{l}$ (skalární součin)
$r_s[0, 1]$	trojsložkový koeficient odrazu
$h$	skalární koeficient ostrosti odrazu

# Phongův osvětlovací model

$$I_V = I_s + I_d + I_a \quad (4)$$

- Ambientní složka
- Difuzní složka
- Zrcadlová složka

$$I_s = I_L r_s (\vec{h}\vec{n})_{h_B} \quad (5)$$

Blinnovo zjednodušení

$\vec{h}$  půlvektor,  $\vec{h} = \frac{\vec{l} + \vec{v}}{\|\vec{l} + \vec{v}\|}$

$n$  normála v bodě dopadu vektoru pohledu

$l$  vektor ke světlu

# Phongův osvětlovací model

$$I_V = I_s + I_d + I_a \quad (6)$$

- Ambientní složka
- Difuzní složka

$$I_d = I_L r_d (\vec{l} \vec{n}) \quad (7)$$

$r_d$  trojsložkový koeficient odrazu, udává zastoupení barvy  
odraženého světla a udává to, co vnímáme jako barvu tělesa

$I_L$  barevné složení dopadajícího paprsku

$n$  normála v bodě dopadu vektoru pohledu

$l$  vektor ke světlu

- Zrcadlová složka

# Phongův osvětlovací model

$$I_V = I_s + I_d + I_a \quad (8)$$

- Ambientní složka

$$I_a = I_A r_a \quad (9)$$

$I_A$  množství okolního světla, empirická veličina, konstantní pro celou scénu

$r_a$  koeficient schopnosti povrchu odrážet barvy, obvykle totožný s  $r_d$

- nenulové  $I_A$  zajišťuje, aby i plochy odvrácené od světla byly lehce osvětleny
- Difuzní složka
- Zrcadlová složka

# Phongův osvětlovací model

A když je světelných zdrojů více?

$$I_V = I_s + I_d + I_a \quad (10)$$

$$I_V = I_A r_s + \sum_{k=1}^M I_{L_k} (r_s (\vec{v} \vec{r}_k)^h + r_d (\vec{l}_k \vec{n})) \quad (11)$$

Tato rovnice se nazývá Phongův osvětlovací model [MPG] 15.9.1

# Řešení viditelnosti

- Paměť hloubky
- Malířův algoritmus
- Malířův algoritmus + BSP
- Dělení obrazovky
- Plovoucí horizont
- Liniové algoritmy
- Metody založená na vrhání paprsku
- Metody založená na agregaci fotonů

# Stíny

- Samotná viditelnost objektů k vytvoření stínů nestačí
- Projekční metody
- Stínová tělesa
- Stínová paměť hloubky  
(viz PGR)

# Globální zobrazovací metody

- Metody vycházející od pozorovatele (gathering methods)
  - sledování paprsku (ray tracing)
  - sledování cesty (Monte Carlo path tracing)
- Metody vycházející od světelného zdroje
  - sledování fotonů
- Dvousměrné metody
  - dvousměrné sledování cesty
  - fotonové mapy
- Radiozita



# Jednoduché algoritmy řešení viditelnosti

- Vždy svázány s konkrétní reprezentací prostorových dat
- základní dělení
  - vektorové algoritmy (vytvoří množinu viditelných objektů)
  - rastrové algoritmy (vytvoří obraz)
- dělení dle prostorů výpočtu
  - v prostoru objektů (Pro každý objekt zjistí, která jeho část je vidět)
  - v prostoru obrazu (pro každý pixel zjistí, který objekt je v něm vidět)

# Raytracing (ray casting)

*SledujPaprasek(paprsek, hloubkarekurze)*

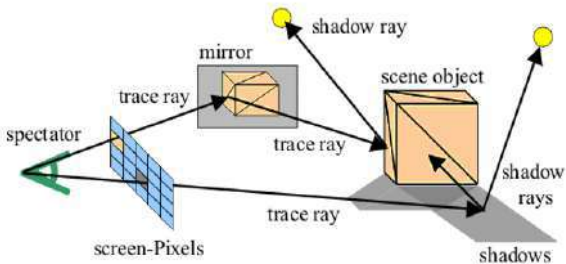
- ① Nalezni průsečík  $P$  mezi  $R$  a objekty
- ② Pokud  $P$  není, přiřaď barvu scény
- ③ Ke každému světelnému zdroji vyšli z bodu  $P$  *stínový paprsek* - pokud paprsek dorazí, označ zdroj jako nezakrytý
- ④ Vyhodnot' příspěvky osvětlení v bodě  $P$  od nezakrytých zdrojů
- ⑤ Pokud hloubky  $H$  nepřekročila maximální hloubku rekurze, vyšli:
  - odražený paprsek  $R_R$  voláním *SledujPaprasek*( $R_T, H + 1$ )
  - lomený paprsek  $R_T$  voláním *SledujPaprasek*( $R_T, H + 1$ )
- ⑥ Paprsku přiřaď výslednou barvu jako součet příspěvků osvětlení barvy odraženého paprsku  $R_R$  a barvy lomeného paprsku  $R_T$

# Raytracing (ray casting)

- Primární paprsky
  - paprsek vyslaný z místa pozorovatele bodem obrazu (pixelem)
- Sekundární paprsky
  - vytvoře po dopadu primárního, nebo sekundárního paprsku na těleso
  - reprezentuje stav, kdy se předchozí paprsek na povrchu tělesa odrazil zpět do prostoru scény (nebo pronikl do poloprůhledného tělesa)
  - počet je vysoký, každá sekundární paprsek může vyslat další dva sekundární lomený a odražený)
- Stínový paprsek
  - testy viditelnosti zdroje světla
  - vysílán z bodu kam dopadl primární, nebo sekundární paprsek

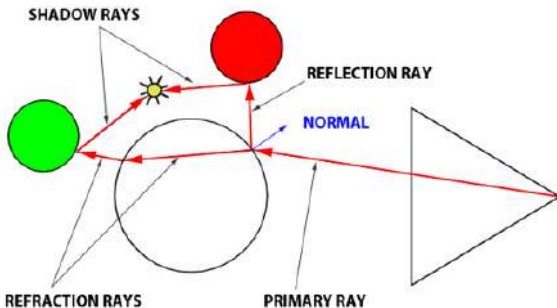
# Raytracing (ray casting)

- Primární paprsky
- Sekundární paprsky
- Stínový paprsek



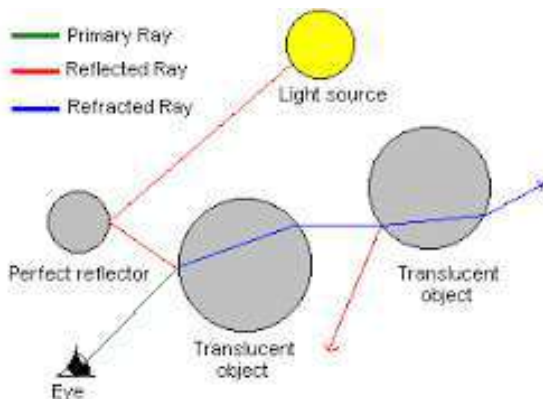
# Raytracing (ray casting)

- Primární paprsky
- Sekundární paprsky
- Stínový paprsek



# Raytracing (ray casting)

- Primární paprsky
- Sekundární paprsky
- Stínový paprsek



# Raytracing (ray casting)

- Phongův osvětlovací model
  - jak se vypořádat se 'součet příspěvků osvětlení barvy odraženého paprsku  $R_R$  a barvy lomeného paprsku  $R_T$ '?
- Rozšíření Phongova osvětlovacího modelu

$$I_V = I_s + I_d + I_a + I_r + I_t \quad (12)$$

$I_s, I_d, I_a$  - příspěvky ze světelných zdrojů

$I_r = r_s I_R$  - paprsek ze směru odrazu ( $r_s$  už známe z původního vzorce)

$I_t = r_t I_T$  - paprsek ze směru lomu ( $r_t$  koeficient útlumu, závisí na vzdálenosti, tělese))

# Raytracing (ray casting), omezení

- Vržené stíny jsou ostré
- Předpoklad jen bodových zdrojů světla
- Zrcadla ve scéně odrazejí odraz těles, ale už ne světlo!
- Při změně polohy pozorovatele nebo tělesa se provádí výpočet kompletně od začátku
- I na nelesknoucí se plochy se používají odrazové paprsky

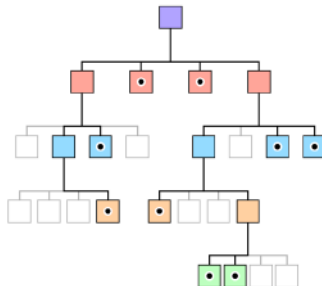
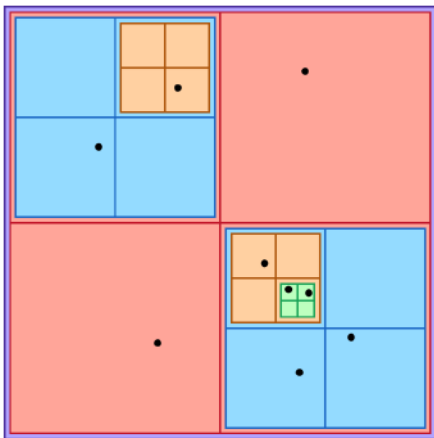


# Datové struktury a reprezentace scény

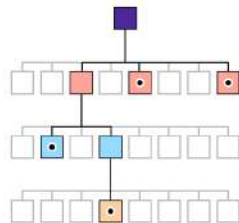
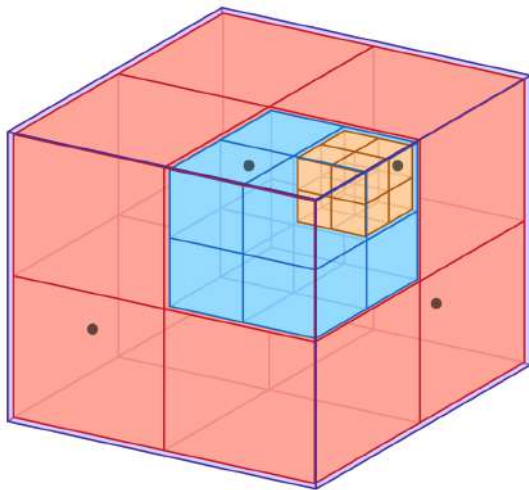
Pro metody postavená na simulaci paprsků/fotonu je využití celé scény najednou nepoužitelné - noročnost stoupá s počty objektů ve scéně.

- Grafem scény s hierarchií obálek
- Grafem scény s dělením prostoru  
Kd tree, Octree, R-Tree, BSP tree, ...

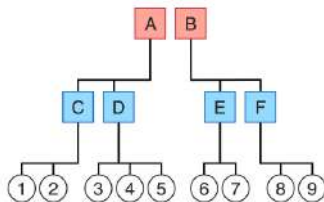
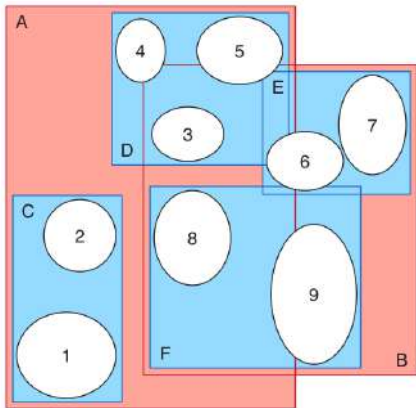
# Octree (2D) = Quadtree



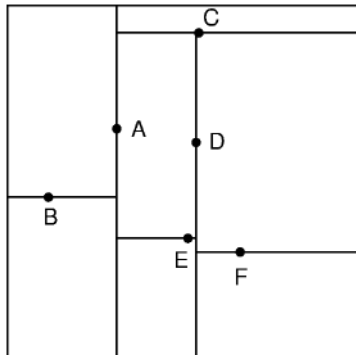
# Octree (3D)



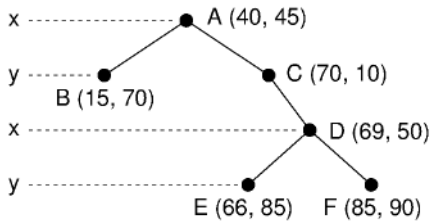
# R-tree



# KD-tree



(a)



(b)

# Datové struktury

- Jedotlivých datových struktur je obrovské množství a vydají na celý jeden předmět
- Použití vhodných datových struktur je nezbytné pro rendering
- Tyto datové struktury je možné (v vhodné!) použít například v data science (KNN, approx KNN, shlukování, ...)

# Ukázky RT

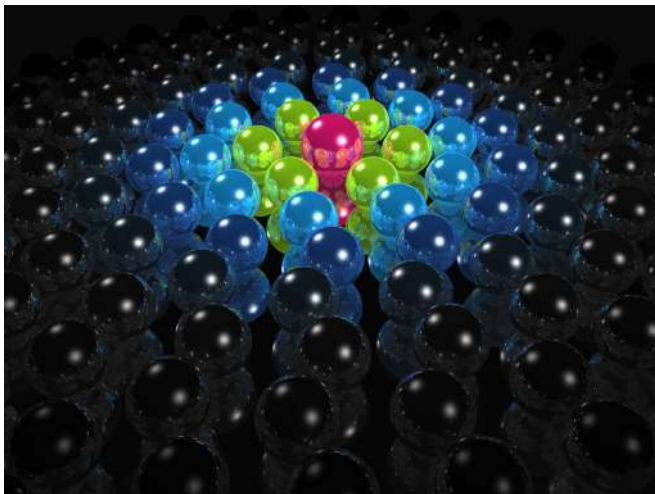


# Ukázky RT

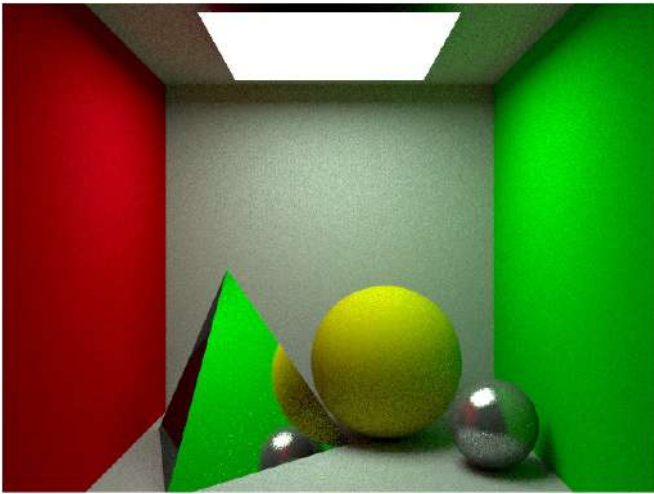




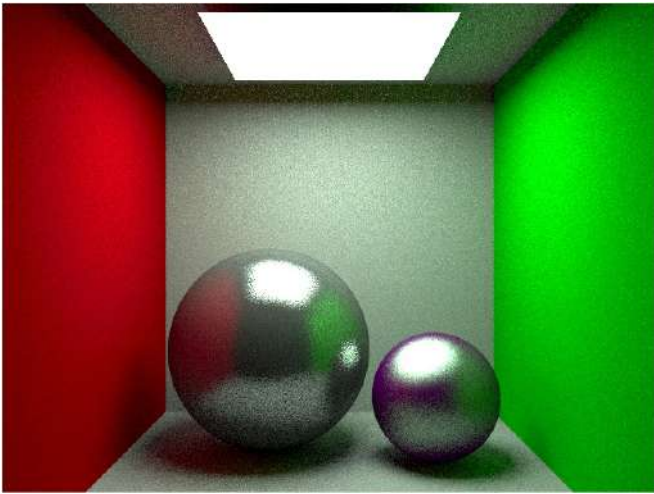
# Ukázky RT



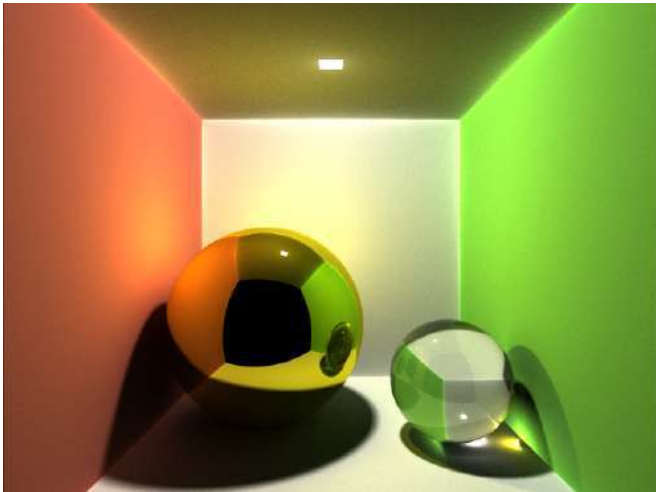
# Ukázky RT, bidirectional



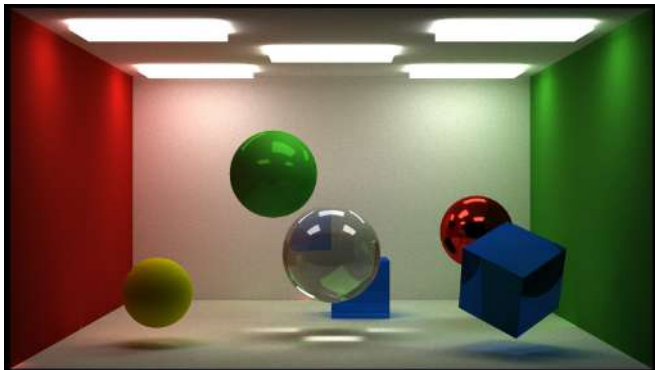
# Ukázky RT, bidirectional



# Ukázky RT, photon



# Ukázky RT, photon



# Ukázky RT, GI



