



Fizički zasnovano renderovanje u grafici

Tadija Šebez

Matematička gimnazija

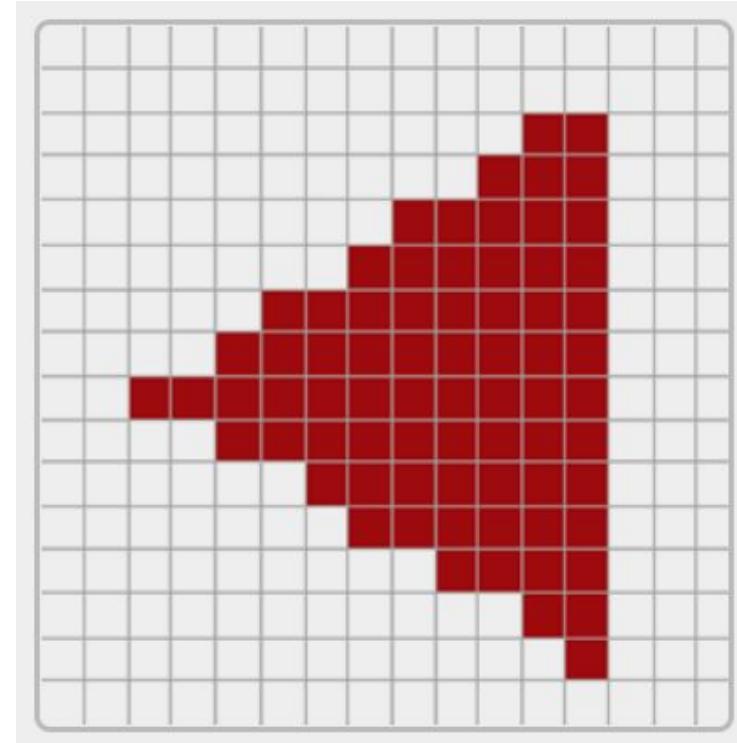
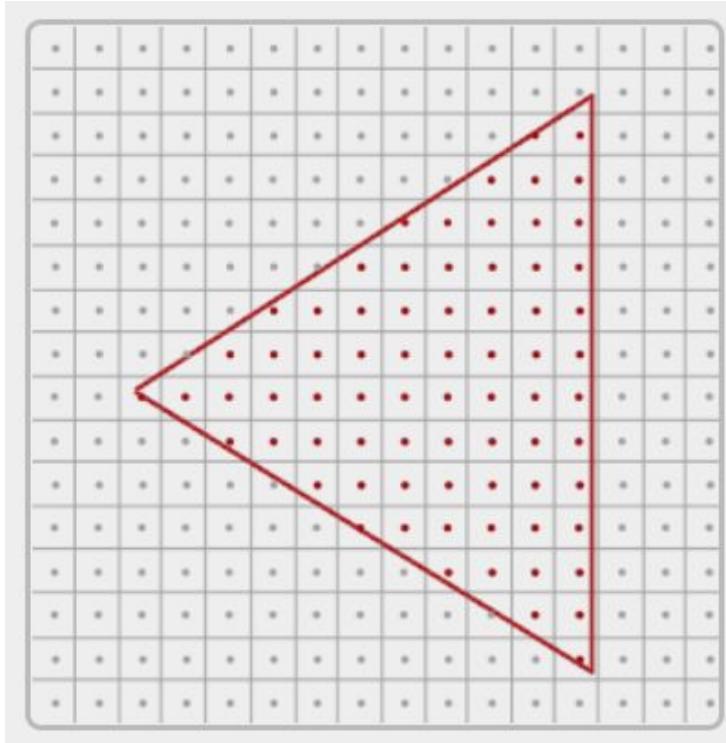
11. 04. 2022.



1. Renderovanje
2. Jednostavniji algoritmi
3. Fizički zasnovano renderovanje

Renderovanje

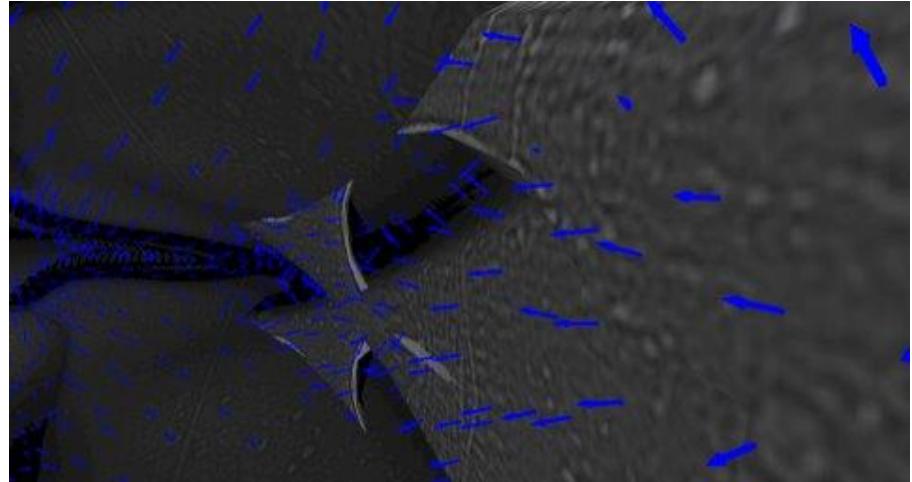
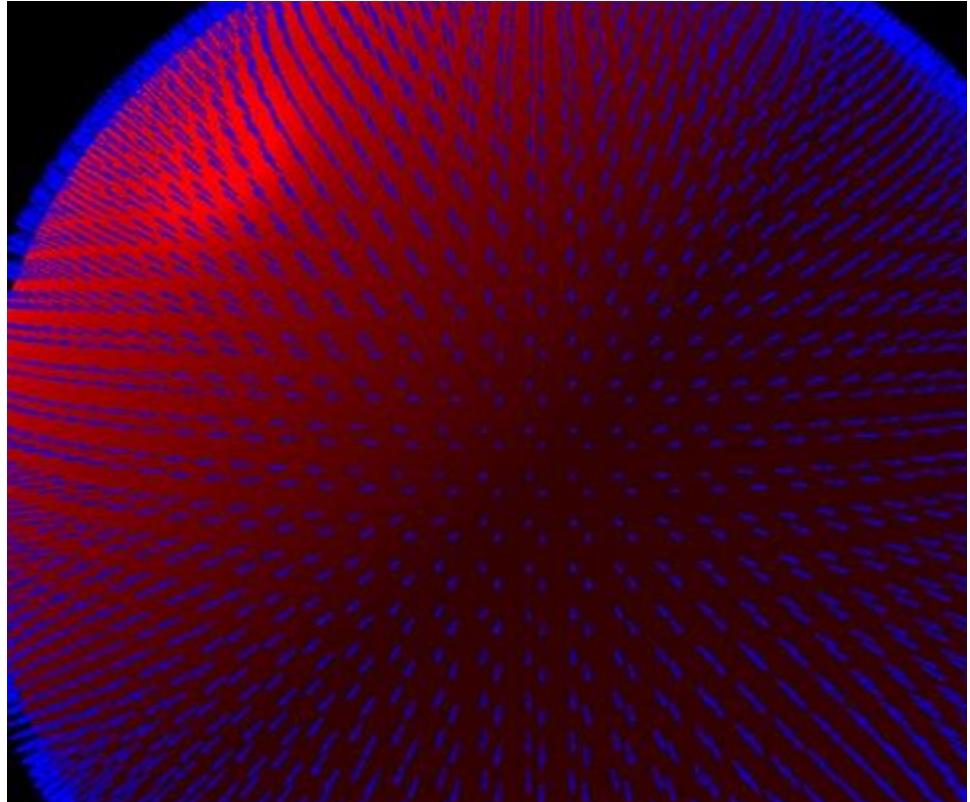
- Dva osnovna pristupa
 - Ray tracing
 - Rasterizacija
- Fokus ove prezentacije biće na renderovanju u realnom vremenu



- Koordinatni sistemi:
 - Koordinatni sistem 3D objekta
 - Koordinatni sistem sveta
 - Koordinatni sistem kamere
 - Koordinatni sistem ekrana
- Matrice transformacija između ovih sistema
 - Model, view i projection matrice
- Objekti koje renderujemo predstavljeni su kao skupovi trouglova
 - Mapiranje na ekran prethodnim transformacijama
 - Rasterizacija

Vektori normale

- Svaki trougao ima svoj vektor normale
- Potrebno kod modelovanja svetlosti





- Grafički API
- GLSL
 - Programski jezik sličan C-u
 - Izvršava se na grafičkoj kartici
- Vertex shader
 - Ulaz: Tačke u koordinatnom sistemu 3D objekta
 - Izlaz: Tačke u koordinatnom sistemu ekrana
- Fragment shader
 - Pokreće se za svaki piksel koji pripada trouglu (rasterizacija)
 - Računa boju svakog piksela
- Depth buffer
 - Za svaki piksel se čuva njegova dubina kako bi samo onaj najbliži posmatraču bio iscrtan

Vertex shader

```
1 #version 330 core
2
3 layout (location = 0) in vec3 a_Pos;
4
5 uniform mat4 u_Model;
6 uniform mat4 u_View;
7 uniform mat4 u_Projection;
8
9 void main() {
10     gl_Position = u_Projection * u_View * u_Model * vec4(a_Pos, 1.0);
11 }
```

Fragment shader

```
1 #version 330 core
2
3 out vec4 o_Colour;
4
5 uniform vec4 u_Colour;
6
7 void main() {
8     o_Colour = u_Colour;
9 }
```

Agenda

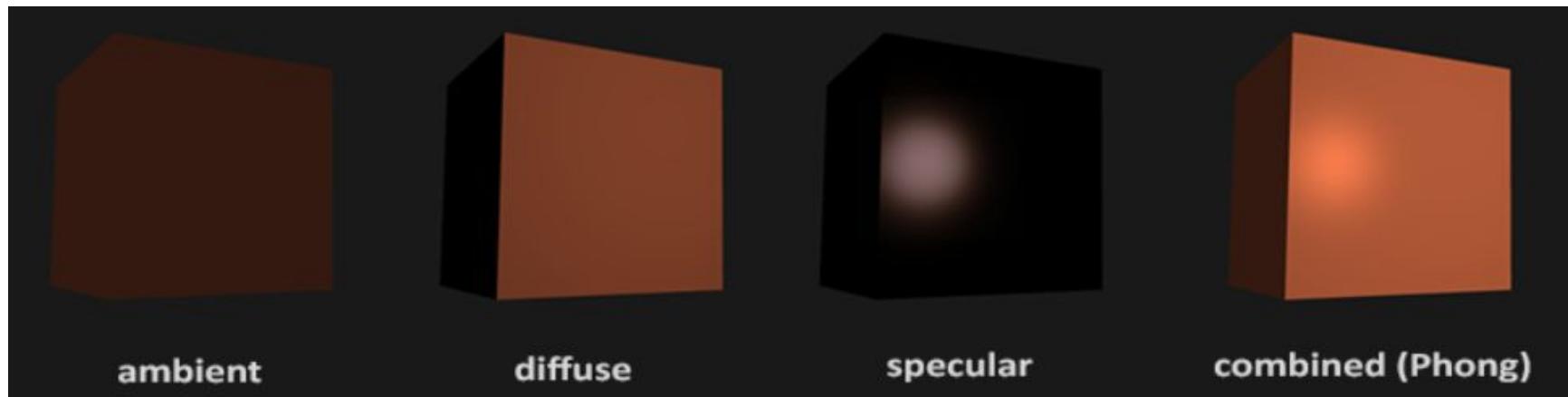
1. Renderovanje

2. Jednostavniji algoritmi

3. Fizički zasnovano renderovanje

Fongov algoritam

- Jednostavan algoritam
- Gruba aproksimacija
- Tri komponente svetlosti:
 - Ambijentalna
 - Difuzna
 - Spekularna
- Blin-Fongov algoritam
 - Malo unapređena verzija

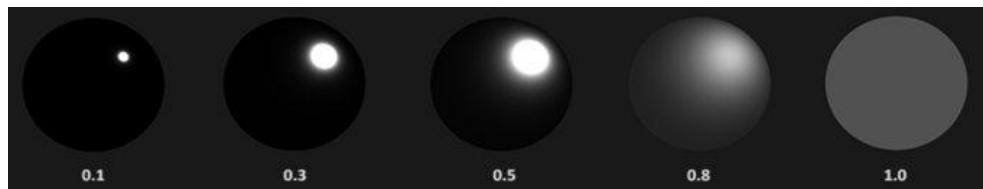
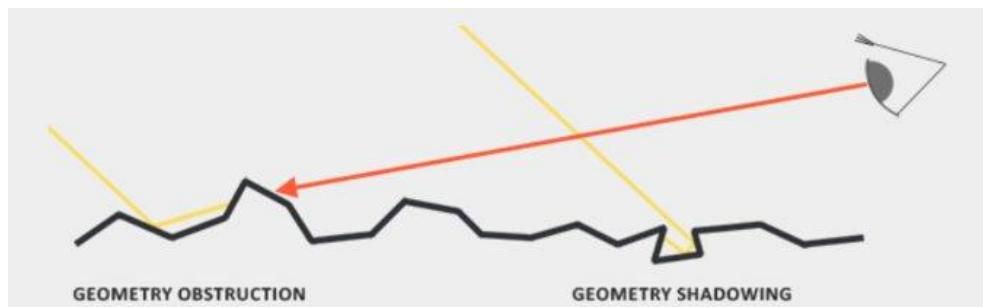
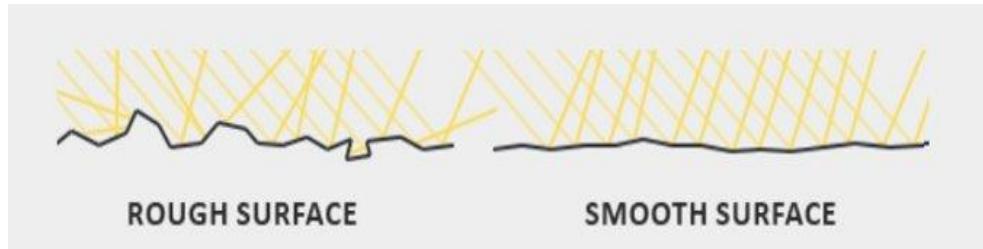




1. Renderovanje
2. Jednostavniji algoritmi
3. Fizički zasnovano renderovanje

Model

- Microfacet model
 - Uvodi parametar hrapavosti
- Funkcija raspodele vektora normale
- Funkcija geometrije
 - Deo površine nije vidljiv zbog njene neravnosti na mikroskopskom nivou
- Zakon održanja energije



Model

- Fresnelova jednačina
 - Refleksivnost zavisi od ugla pod kojim se svetlost odbija



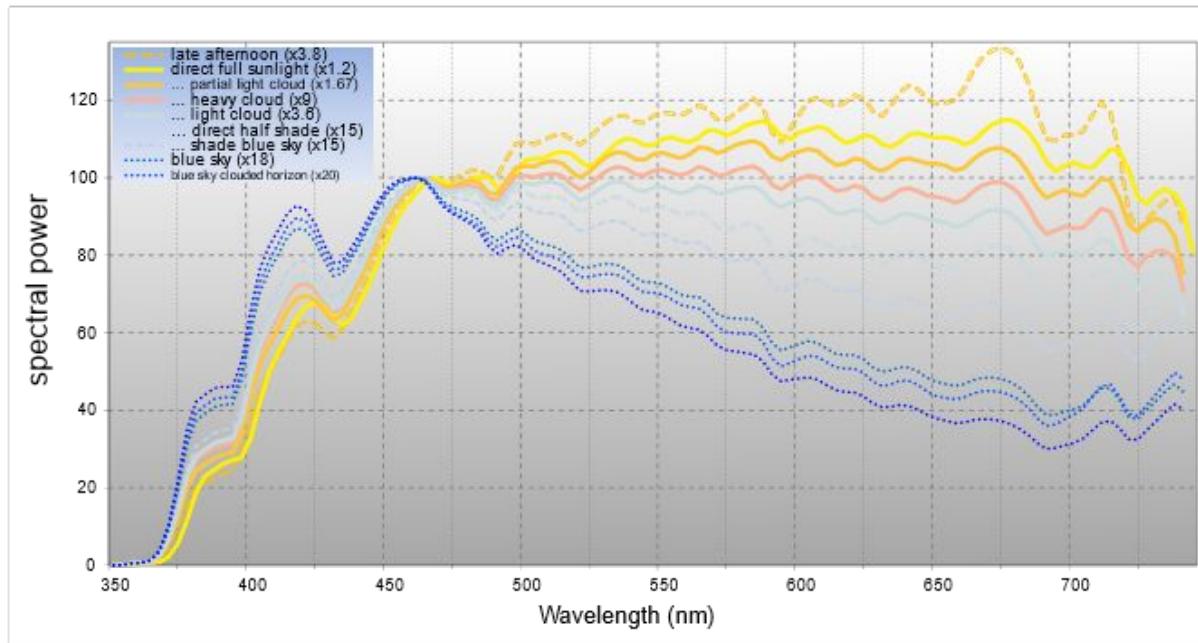
Jednačina renderovanja

$$L_o(x, \omega_o, \lambda) = L_e(x, \omega_o, \lambda) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o, \lambda) L_i(x, \omega_i, \lambda) (\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

- Jednačina po kojoj računamo boju svakog piksela
- Objedinjuje sve prethodne aproksimacije

Radijacijski fluks

- Prenesena energija izvora svetlosti po jedinici vremena
- Furijeove transformacije
 - Rastavljanje svetlosnog signala na komponente
 - Radijacijski fluks je funkcija talasne dužine
- Aproksimacija RGB komponentama



Jednačina refleksije

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

- Izbacujemo Le iz jednačine jer za sada nećemo posmatrati emisione površine
- Parametar talasne dužine smo izbacili RGB aproksimacijom
 - Integral se računa posebno za ove 3 komponente

Funkcija distribucije dvosmerne refleksije



- Cook-Torrance BRDF: $f_r(x, \omega_i, \omega_o) = k_d f_{lambert} + k_s f_{cook-torrance}$
- Difuzna i spekularna komponenta

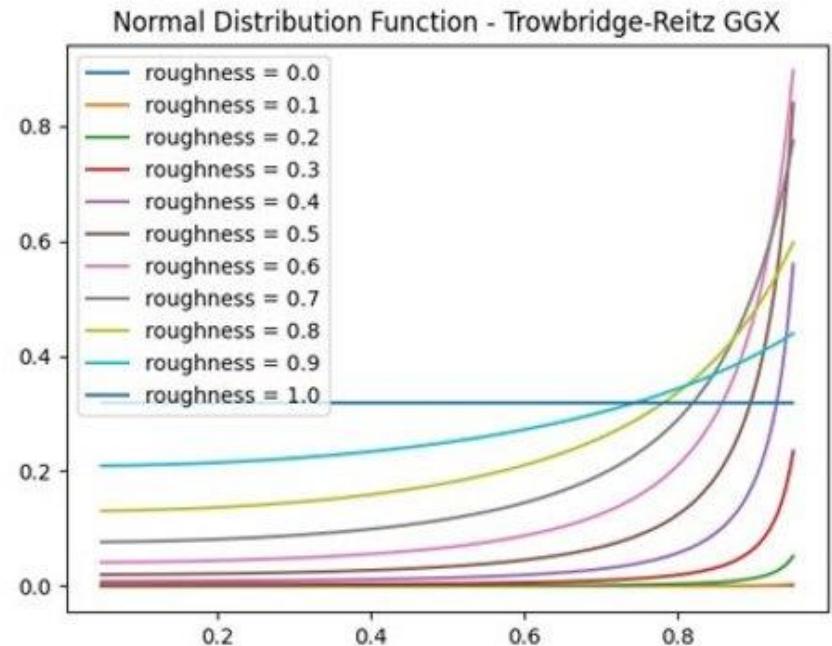
$$f_{lambert} = \frac{c}{\pi} \quad f_{cook-torrance} = \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)}$$

- D - funkcija raspodele vektora normale
- F - Fresnelova jednačina
- G - funkcija geometrije

Funkcija raspodele vektora normale

- Aproksimacija: Trowbridge-Reitz GGX
- Aproksimira procenat microfaceta koji su poravnati sa nekim vektorom normale
- Zavisi od hrapavosti površine
- Deo svetlosne energije koji se reflektuje ka posmatraču proporcionalan je delu microfaceta koji direktno reflektuju svetlost ka posmatraču

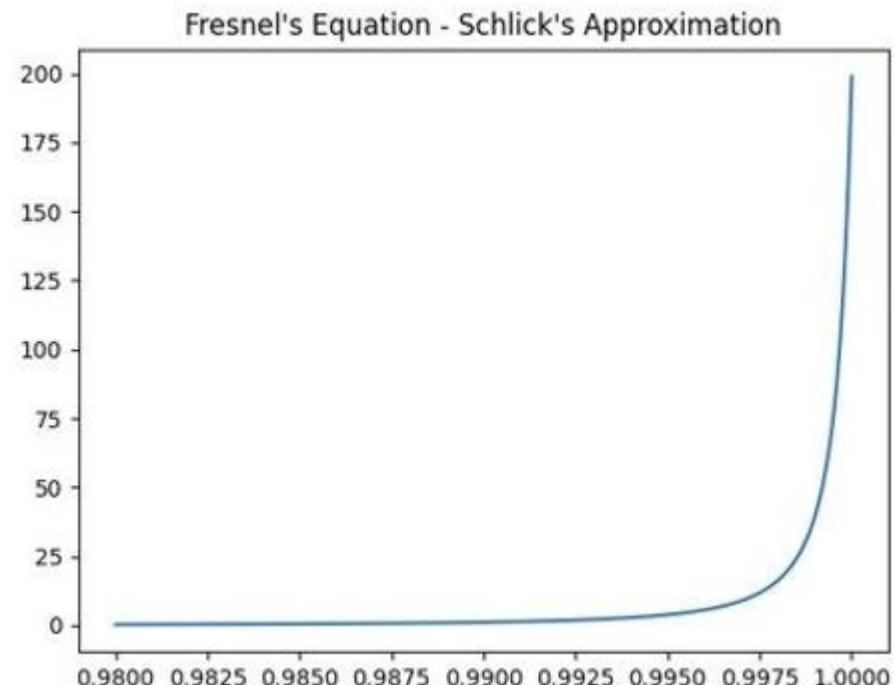
$$N(n, h, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi((n \cdot h)^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2}$$



Fresnelova jednačina

$$F_{Schlick}(h, v, F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (h \cdot v))^5$$

- Fresnel-Schlick aproksimacija
- Metali se posebno ponašaju
 - Uvodi se novi parametar

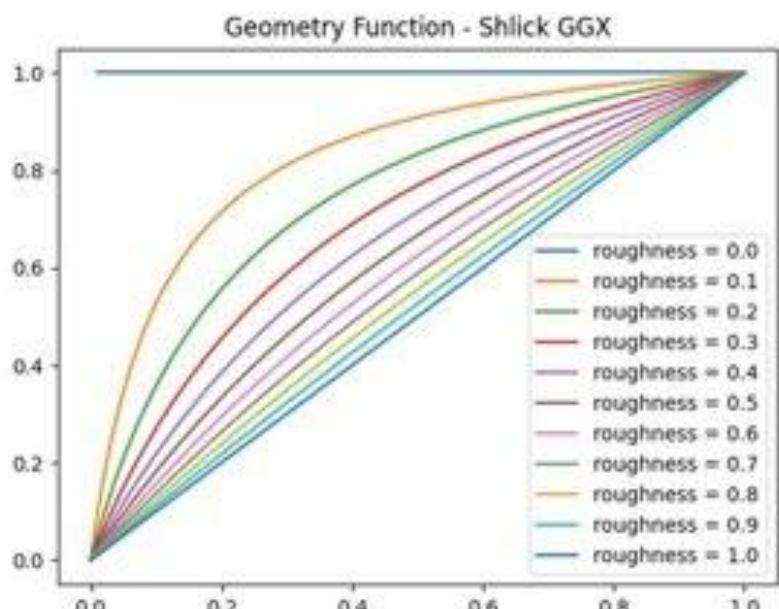


$$G_{Smith}(n, v, l, k) = G_{Schlick}(n, v, k)G_{Schlick}(n, l, k)$$

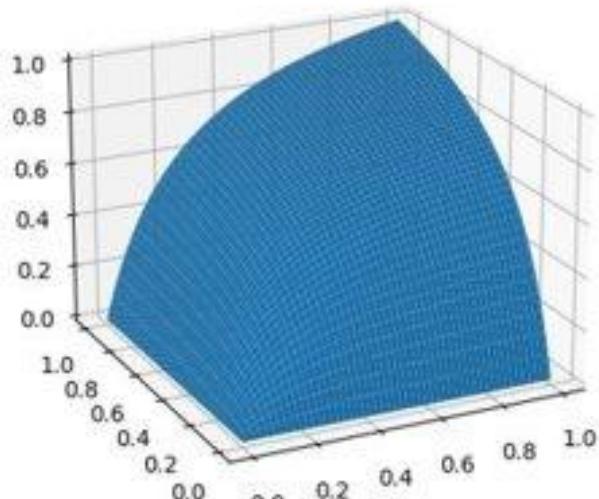
$$G_{Schlick}(n, v, k) = \frac{(n \cdot v)}{(n \cdot v)(1 - k) + k}$$

- Schlick-Beckmann aproksimacija
- Smith-ov metod
 - Geometry shadowing zavisi od ugla pod kojim pada svetlost
 - Geometry obstruction zavisi od ugla pod kojim se posmatra

Funkcija geometrije

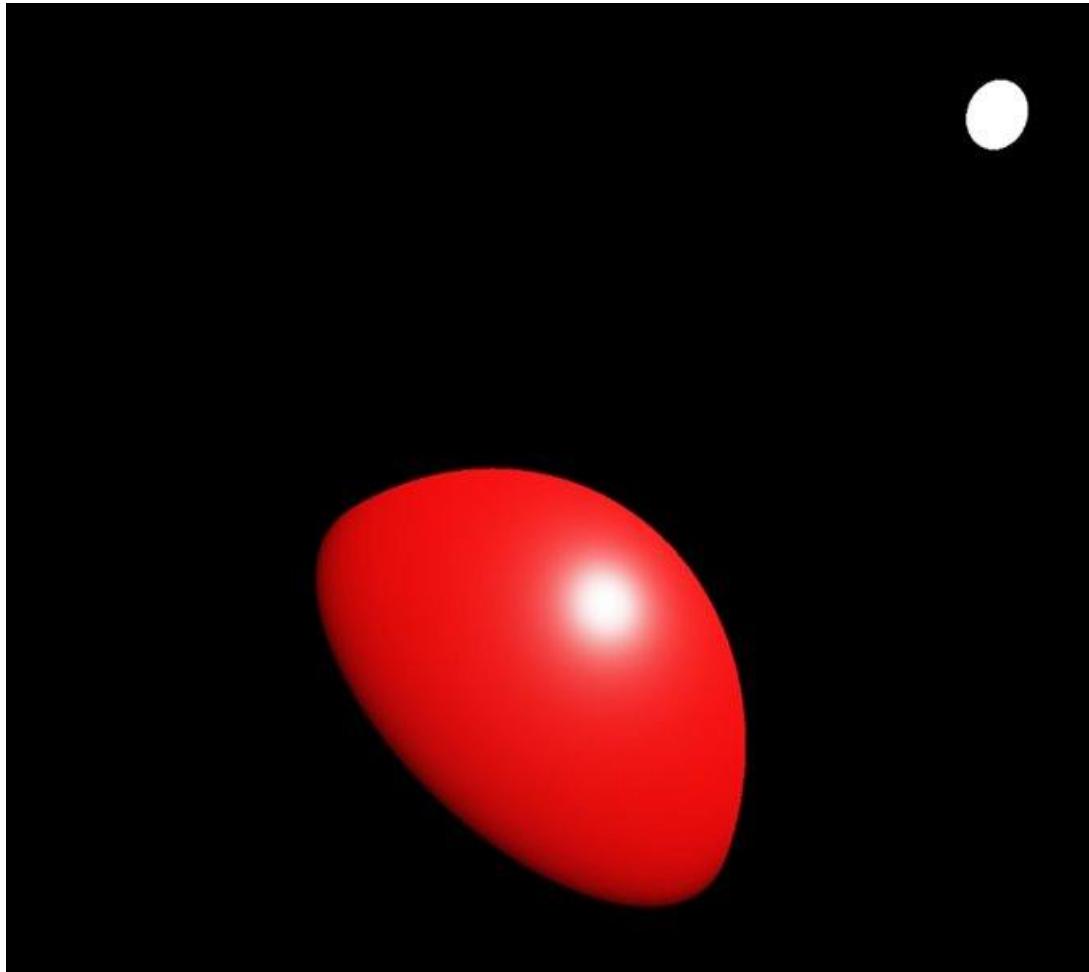


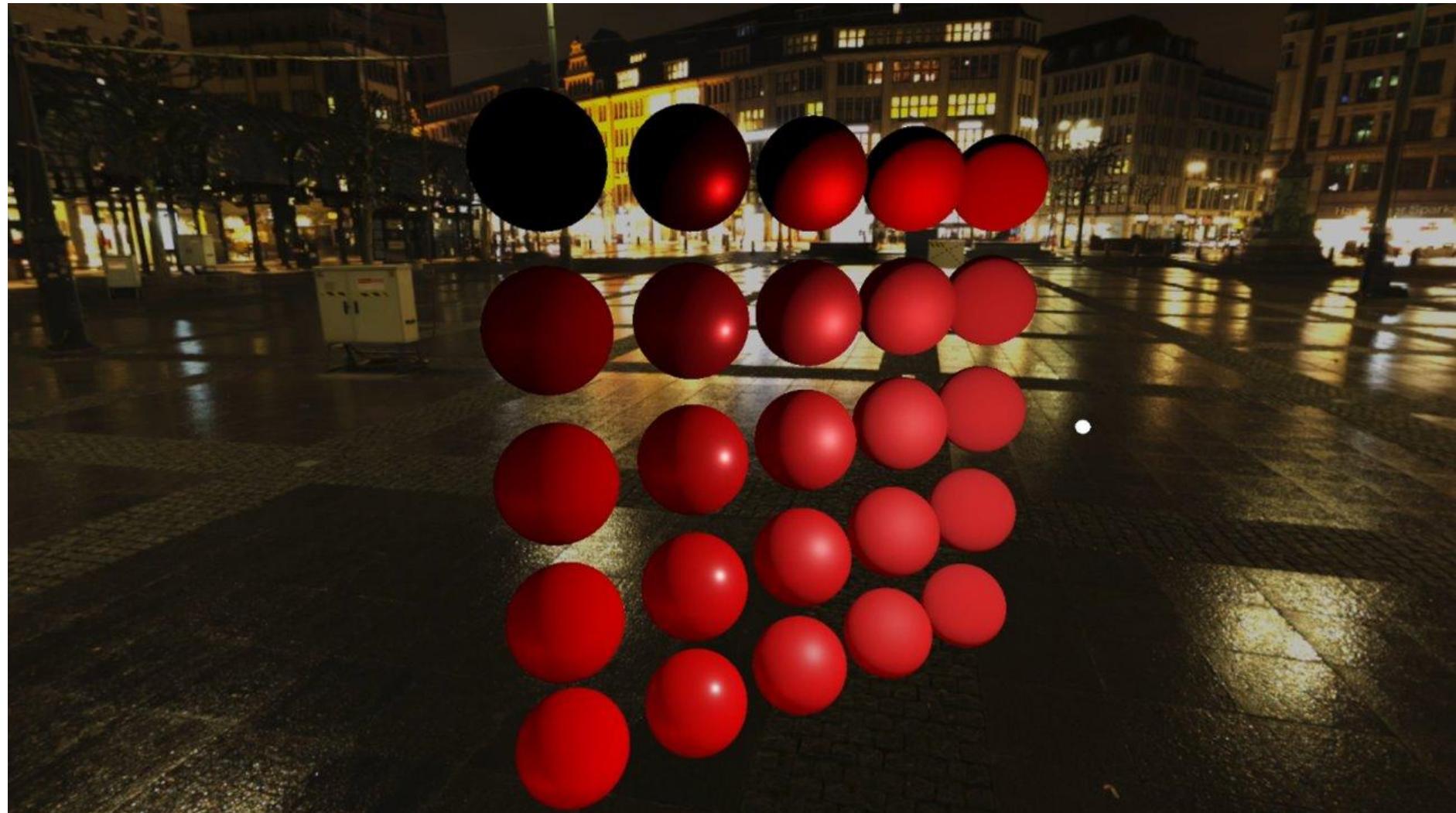
Geometry Function - Smith's Method



Direktno osvetljenje

- Deo svetla koji pada na objekat direktno od izvora
- Svetlosna energija opada sa kvadratom distance
- Konačan broj izvora
 - Integral se svodi na konačnu sumu





HDRI okruženje

- Sferična mapa
- Posmatramo okruženje kao izvor svetlosti
- Objekti se stapaju u okruženje bez potrebe da se parametri podešavaju



Difuzna komponenta

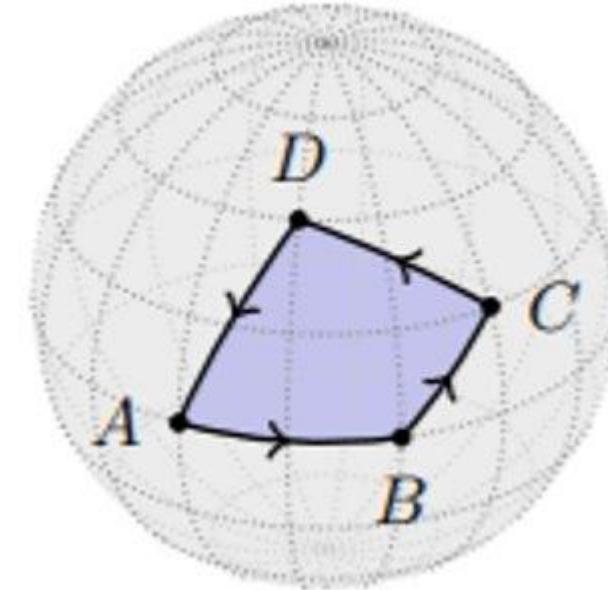
- Posmatrajmo sada samo difuzni deo jednačine
- Kd i c mogu da se izvuku ispred integrala
- Vrednosti iradijanse Li dobijamo iz HDRI mape okruženja
 - Linearna interpolacija
- Integral računamo za diskretne vrednosti odbijenog zraka
 - Kasnije linearnom interpolacijom dobijamo rezultat za određeni zrak

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} \left(k_d \frac{c}{\pi} + k_s \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} \right) L_i(x, \omega_i)(n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

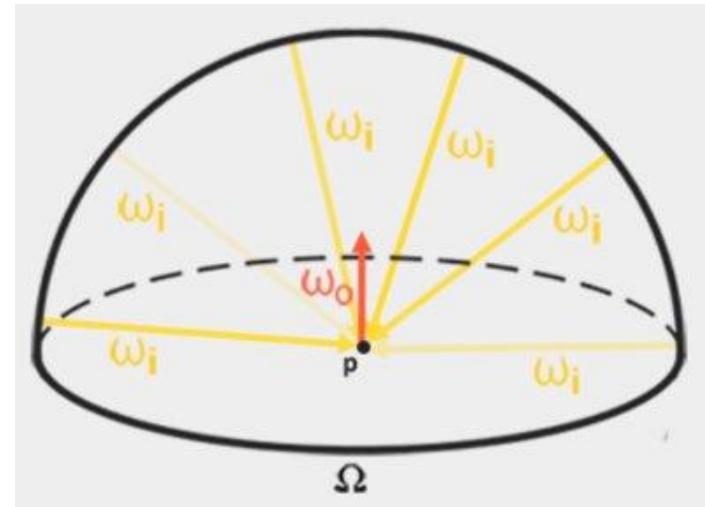
$$L_o(x, \omega_o) = k_d \frac{c}{\pi} \int_{\Omega} L_i(x, \omega_i)(n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

Rimanova suma na polusferi

- Omotač polusfere delimo na četvorouglove
- Površina četvorougla na sferi
 - Rastavljanje na dva trougla
 - Površina trougla na sferi
- Uzimamo Li u centru četvorougla
 - Množimo sa površinom



$$R^2(\alpha + \beta + \gamma - \pi)$$



Difuzna komponenta

- Rezultat integracije - mapa iradijanse



Spekularna komponenta

- Aproksimacija rastavljanjem integrala
- Potrebno za real-time renderovanje

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} k_s \frac{NDF}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} L_i(x, \omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L_i(x, \omega_i) d\omega_i * \int_{\Omega} k_s \frac{NDF}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

- Deo koji zavisi od okruženja i od parametra hrapavosti
- Deo koji ne zavisi od okruženja

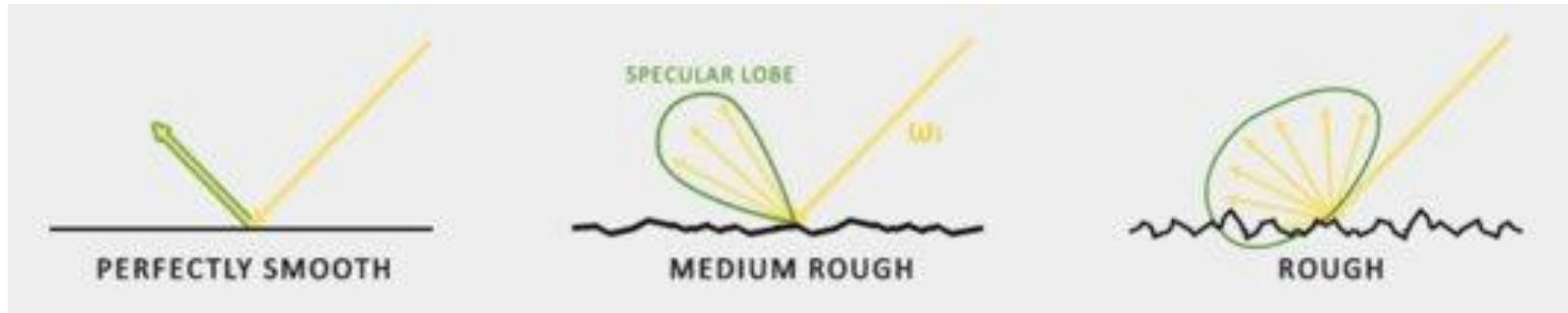
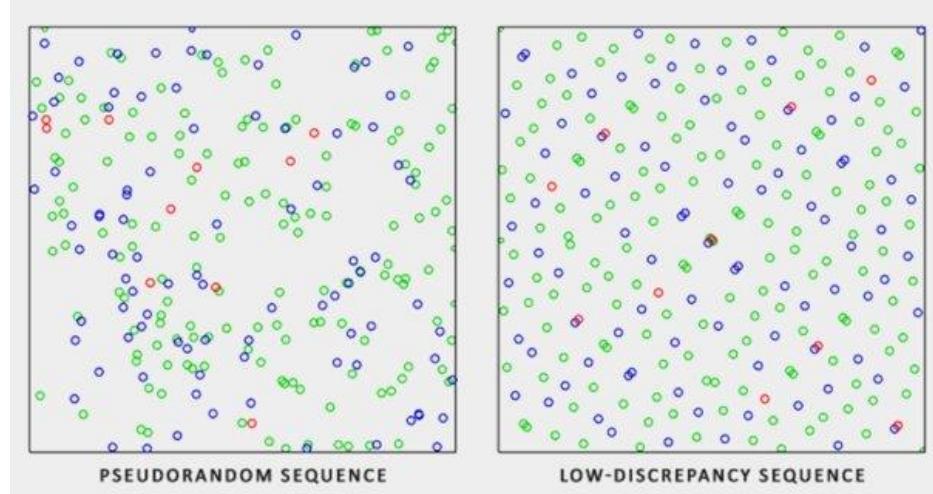
$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L_i(x, \omega_i) d\omega_i$$

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} k_s \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

Monte-Carlo integracija

- Hamerslijev niz tačaka na sferi
- Monte-Carlo:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{pdf(x_i)}$$



Prefiltrirane mape

- Prefiltrirana mapa se računa za nekoliko vrednosti parametra hraptavosti
- Za ostale vrednosti rešenje se dobija linearnom interpolacijom



Spekularna komponenta

- BRDF deo spekularne komponente
- F zavisi od metalness parametra i boje materijala
- Rastavljanje tako da se F0 izvuče ispred integrala
- Crvena i zelena komponenta ne zavise od okruženja i materijala ako se parametar hrapavosti fiksira

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} k_s \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

$$L_o(x, \omega_o) = \int_{\Omega} \frac{DG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} (F_0 + (1 - F_0)(1 - \omega_o \cdot h)^5)(n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

$$L_o(x, \omega_o) = F_0 R + G$$

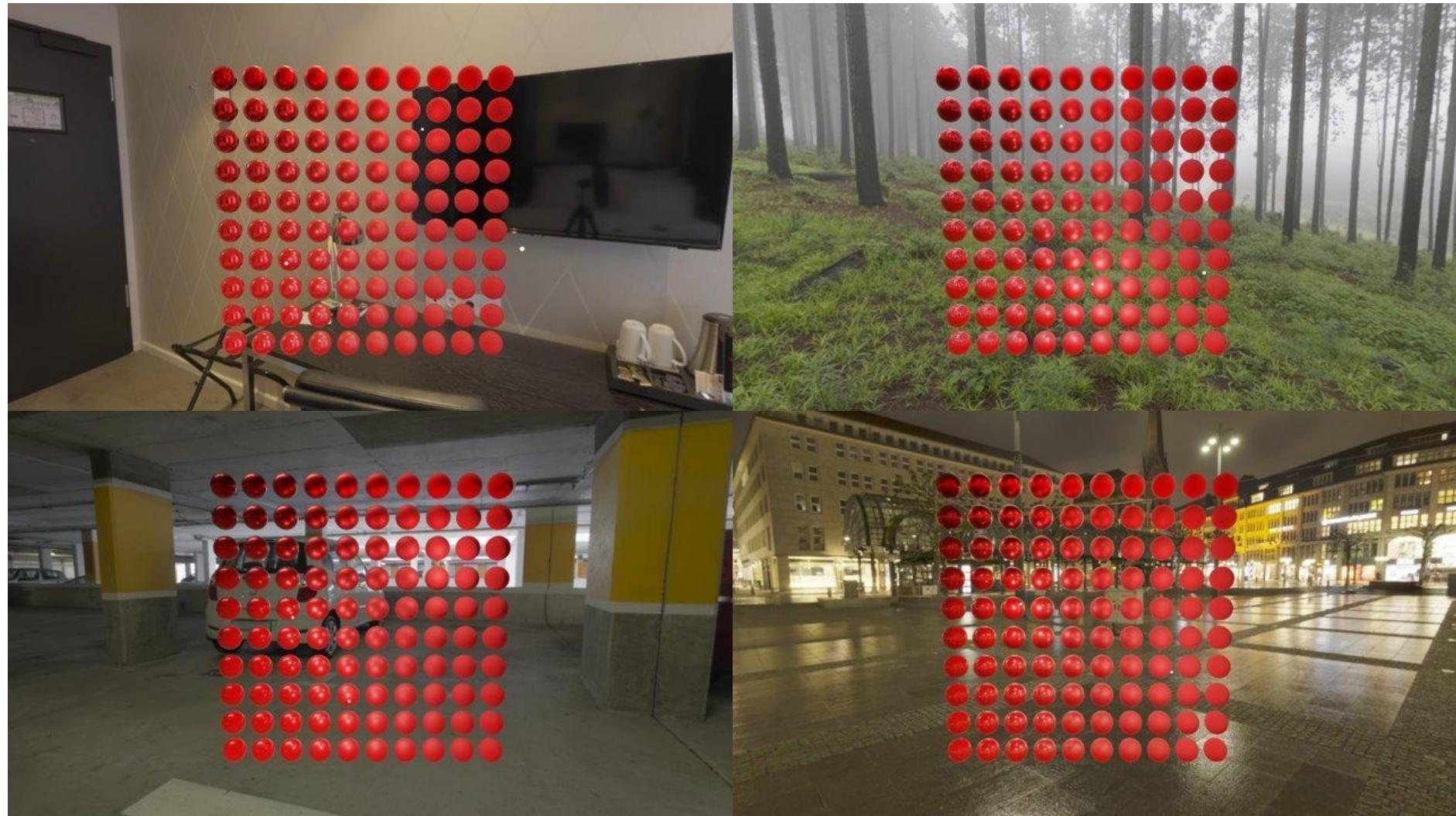
$$F_0 \int_{\Omega} \frac{DG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} (1 - (1 - \omega_o \cdot h)^5)(n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

$$\int_{\Omega} \frac{DG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} (1 - \omega_o \cdot h)^5 (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

BRDF integraciona mapa

- Uvek ista
- Monte-Carlo integracija





Problem sa Monte-Carlo algoritmom

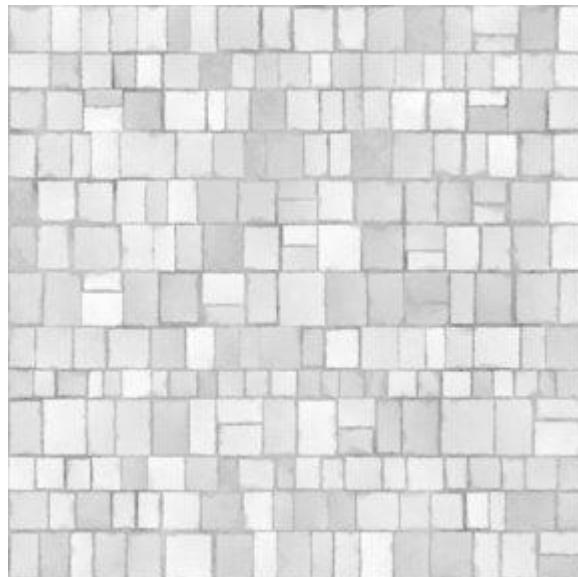
- Dešava se kod nekih okruženja na otvorenom
- Previše svetle tačke na HDRI mapi (npr. sunce)
 - Javlja se šum



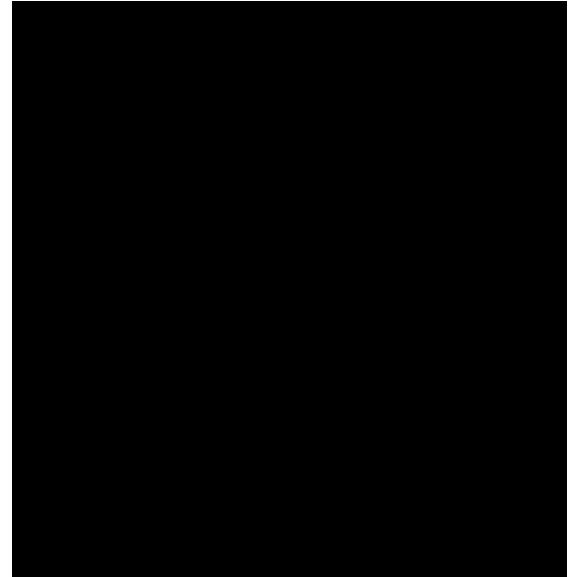
Materijali



- Albedo map



- Roughness map

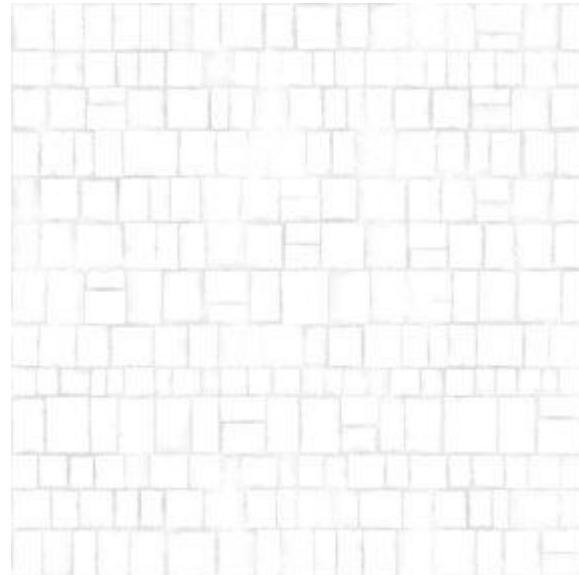


- Metallic map

Materijali



- Normal map



- Ambient occlusion map

Materijali



Emisione površine



- Albedo map



- Roughness map



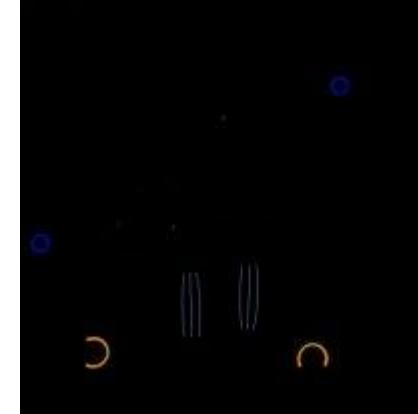
- Metallic map



- Normal map

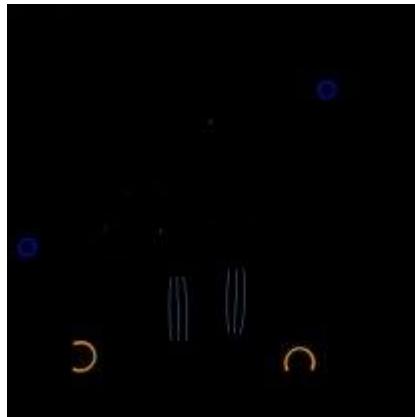


- Ambient occlusion map



- Emission map

Emisione površine



- Emission map



- Render
- Gaussian blur



- Emission render

Rezultat



Hvala na pažnji!

Pitanja?