

## 6.3. ANALITIČKI MODELI OSVJETLJAVANJA



### Postupak isijavanja (engl. Radiosity)

- Cook i Torrance načinili su model osvjetljavanja (drugačija zrcalna komp.)
- ambijentna komponenta zamijenjena je točnijim proračunom globalnog utjecaja
- u Phong-ovom modelu proračun zrcalne komponente nije točan za male kutove (npr. papir)
- ovisnost zrcalno reflektirane svjetlosti o valnim duljinama

## Osnovni pojmovi

- fizikalno zasnovan model osvjetljavanja
- interakcija svjetlosti s površinom

prostorni kut (eng. solid angle) - [sr] steradian

- mjeri dio površine **polukugle** koju obuhvaća konus s vrhom u središtu (površina cijele kugle je  $4\pi r^2$ )  
cijela polukugla je  $2\pi$

$$d\omega = \frac{dA}{r^2}$$

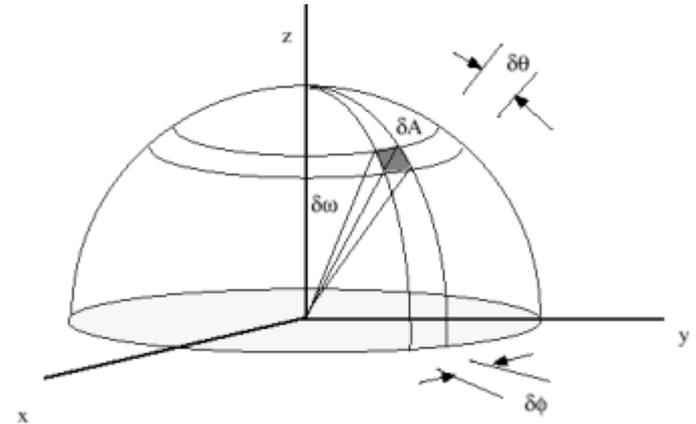
svjetlosni tok (eng. flux)  $\Phi$  - [lm] lumeni

- mjera emitiranja svjetlosne energije u jedinici vremena (količina svjetlosne energije što je promatrani izvor isijava u okolni prostor)

[https://threejs.org/examples/#webgl\\_lights\\_physical](https://threejs.org/examples/#webgl_lights_physical)

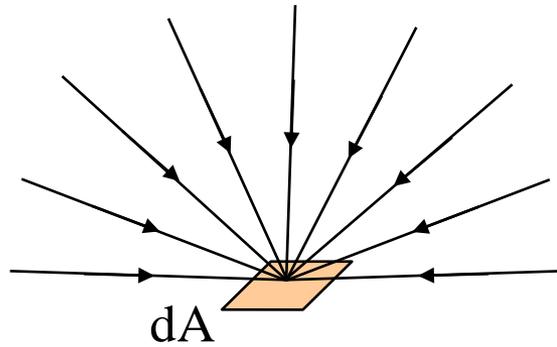
gustoća svjetlosnog toka, rasvjetljenost - [lux] luks

- osvjetljenje plohe kojoj na svaki kvadratni metar površine dolazi jednoliko raspoređen svjetlosni tok jednog lumena [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ]  
(eng. illuminosity)

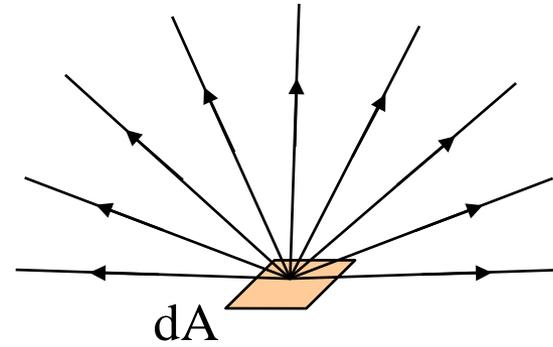


# Radiometrijske i fotometrijske veličine

Naziv	Definicija	Oznaka radi/foto	Jedinice	Radiometrijski	Jedinice	Fotometrijski
energija		$Q_e, Q_v$	[J = Ws] Joule	energija isijavanja <b>radiant energy</b>	[talbot]	energija svjetlosti <b>luminous energy</b>
tok Flux	$dQ/dt$	$\Phi_e, \Phi_v$	[W = J/s]	tok isijavanja <b>radiant flux</b>	[lm = talbot/s] lumen	svjetlosni tok <b>luminous flux</b>
gustoća toka Flux density	$dQ/(dt dA)$	$E_e, E_v$	[E = W/ m <sup>2</sup> ]	obasjanost <b>irradiance</b>	[lux = lm/m <sup>2</sup> ]	rasvijetljenost <b>iluminance</b>
		$B_e=M_e,$ $B_v=M_v$	[W/ m <sup>2</sup> ]	isijavanje <b>radiosity</b>	[lux]	<b>iluminosity</b>
	$dQ/(dA^{\phi}d\omega dt)$	$L_e, L_v$	[W/ m <sup>2</sup> sr]	sjajnost <b>radiance</b>	[lm/ m <sup>2</sup> sr]	<b>luminance</b>
intenzitet Intensity	$dQ/d\omega dt$	$I_e, I_v$	[W/ sr]	intenzitet <b>intensity</b>	[cd = lm/sr] kandela	intenzitet svj. <b>intensity</b>

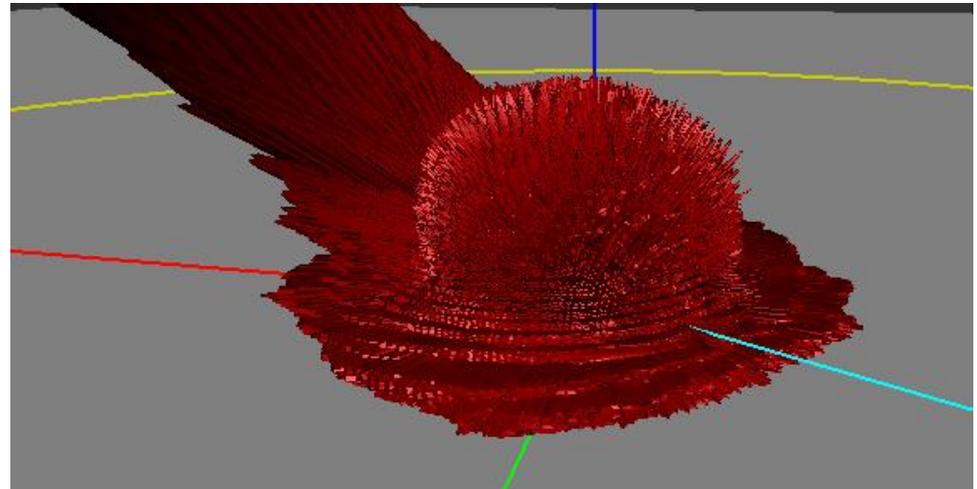


obasjanost (irradiance)



isijavanja (radiosity)

Za neki upadni kut (tirkizni pravac) dolazi do prostorne distribucije reflektirane svjetlosti ovisno o upadnom kutu (npr. najlon)



## Model osvjetljavanja s ravnotežom energije u sceni

energija koja osvjetljava površinu = energija koja se odbija od površine  
+ energija koja se lomi

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t$$

Goralov model – 1984. adaptirao je postupak isijavanja iz termalnog inženjerstva

$$I_v = I_l + r_d \int_0^{2\pi} I_i(\theta, \varphi) (\vec{l}_i \cdot \vec{n}) d\omega$$

$I_v$  intenzitet promatrane površine

$I_l$  emisivnost površine (ukoliko je površina izvor svjetlosti)

$I_i$  intenzitet isijavanja pojedinih ostalih površina

$d\omega$  prostorni kut

$r_d$  koeficijent difuzne refleksije

Monte Carlo integracija - integral se zamijeni sumom za proizvoljan broj slučajnih zraka

# Koraci postupka isijavanja:

## Opis scene

### geometrijski opis scene

- omeđenost tijela površinama koja imaju položaj i orijentaciju
- omeđenost scene (zbog ravnoteže energije) tj. ako je vanjski prostor omeđimo ga

### fizikalni opis scene

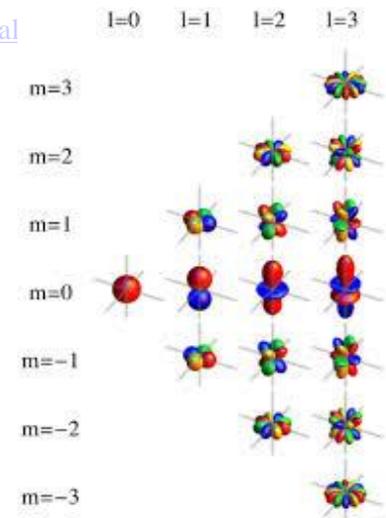
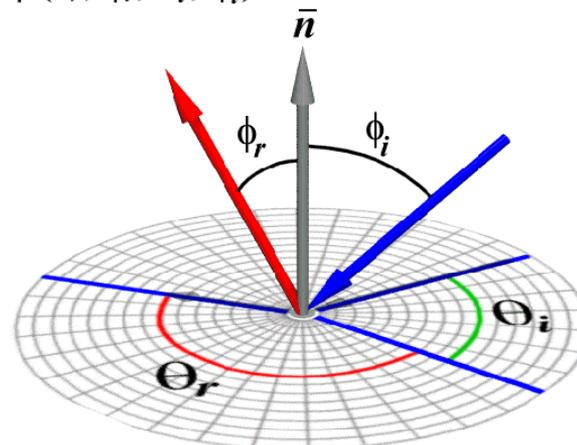
- podaci o reflektivnosti, boji, uzorku površine <http://patapom.com/topics/WebGL/BRDF>
- funkcija **BRDF** funkcija dvosmjerne distribucije refleksije (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) određuje koliko je svjetla koje dolazi iz smjera  $i$  do točke  $k$  na površini reflektirano u smjeru  $r$  tj.  $f(i \rightarrow k \rightarrow r, \lambda)$  (funkcija može biti različita za valne duljinu  $\lambda$  svjetla RGB)
- korištenje sfernih harmonika za pohranu BRDF <https://rreusser.github.io/spherical>

<http://haptic-data.com/toxiclibsjs/examples/spherical-harmonics-three>

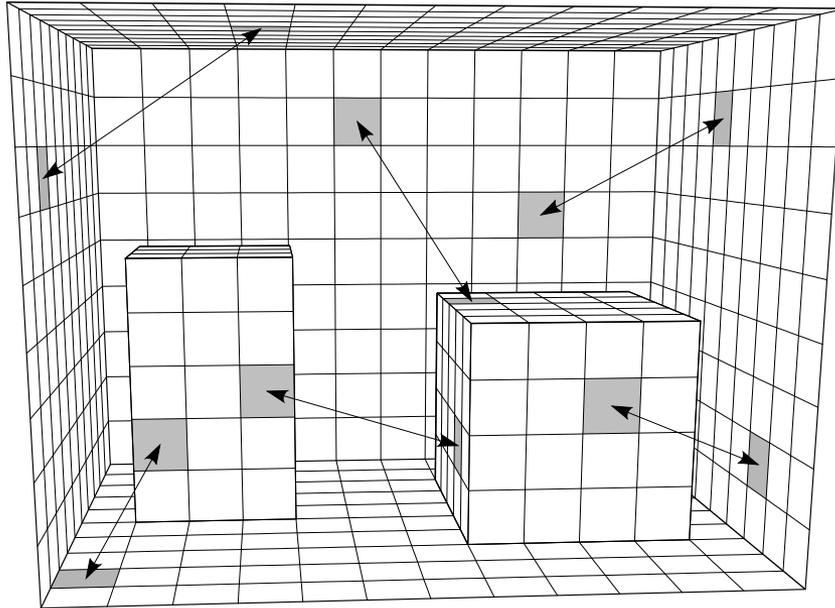
[https://threejs.org/examples/#misc\\_controls\\_arcball](https://threejs.org/examples/#misc_controls_arcball)

1. Umrežavanje scene
2. Izračunavanje faktora utjecaja
3. Rješavanje sustava jednačbi
4. Prikaz rezultata

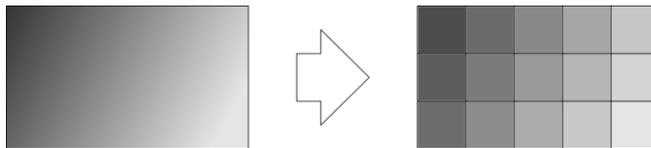
$$\rho(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$$



# 1. Umrežavanje scene, aproksimacija sa sumom $i$ krpica



- $k$  - promatrana krpica,
- $I_{vk}$  - ukupni intenzitet promatrane krpice
- $I_{lk}$  - emisivnost promatrane krpice
- $I_i$  - intenzitet drugih krpica



$$I_{vk} = I_{lk} + r_{dk} \sum_{i=1}^n I_i F_{i,j}$$

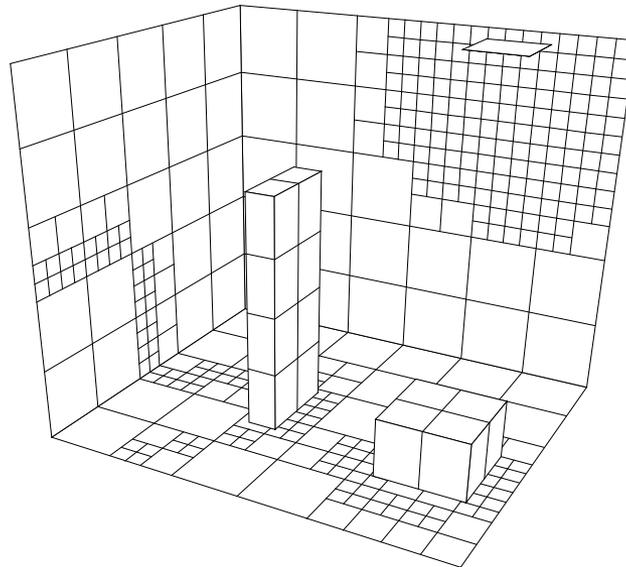
$n$  broj krpica

$F_{ij}$  faktori utjecaja

(engl. *Form factor*)

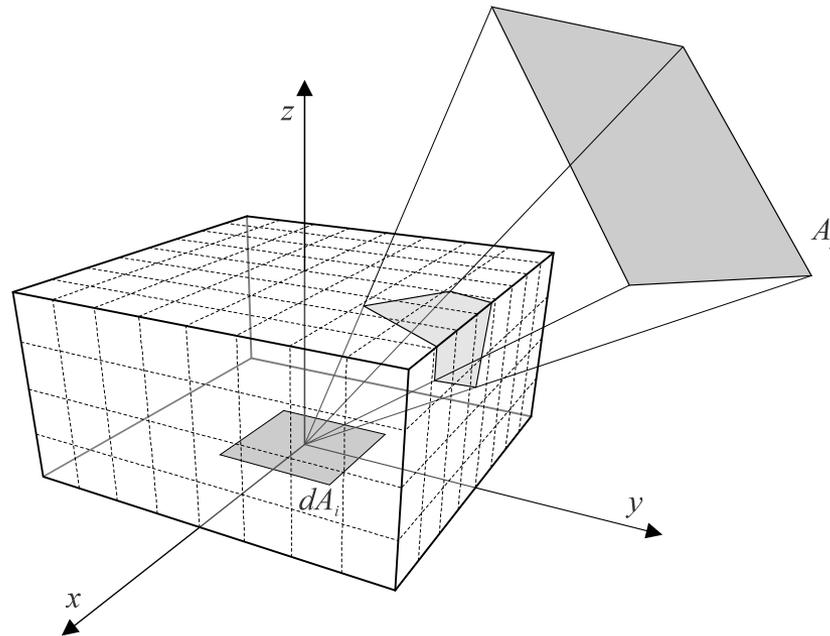
## Podjela na elemente

- približno jednaki poligoni (ili hijerarhijski, adaptivno) koji zadržavaju svojstva površine kojoj pripadaju
- površine izvora sadržavaju početnu energiju
- što je podjela finija rezultat je točniji



## 2. Proračun faktora utjecaja (proračun geometrijskih odnosa između elemenata)

**faktor utjecaja** između dva elementa određuje koliki dio energije koju isijava prvi element dolazi do drugog.



## Razmjena svjetlosne energije među elementima u sceni

- energija se prenosi među elementima u sceni tako da se više energije predaje elementima koji se vide pod većim prostornim kutom
- ukoliko su zaklonjeni energija se uopće ne predaje
- svaki element je idealni difuzni element

### **faktor utjecaja**

- geometrijski odnos između dva elementa
- specificira koji dio ukupne energije jedan element predaje nekom drugom elementu
- za svaki par elemenata u sceni treba odrediti  $F_{i,j}$
- odrede se jednom na početku (zahtjevno računanje) za ravnotežno stanje
- promjena pogleda, gašenje izvora nije potrebno ponovo računati

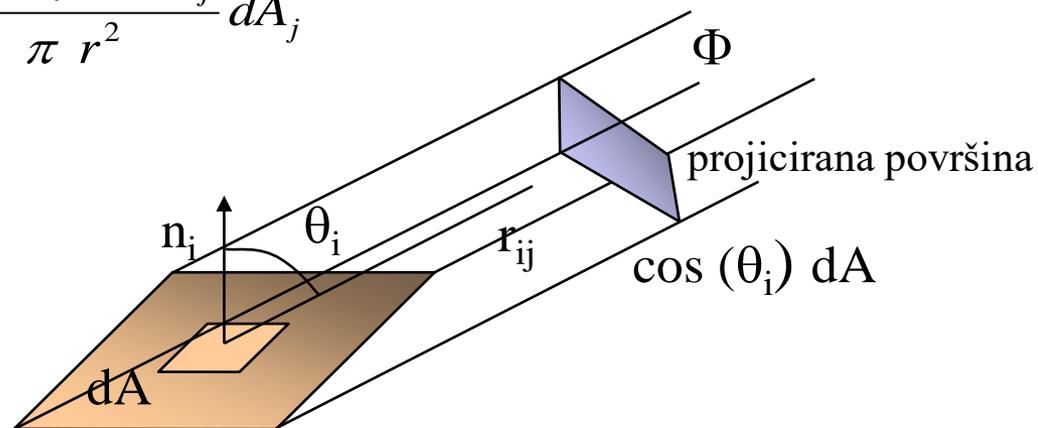
[https://zalo.github.io/three.js/examples/webgl\\_shadowmap\\_progressive.html](https://zalo.github.io/three.js/examples/webgl_shadowmap_progressive.html)

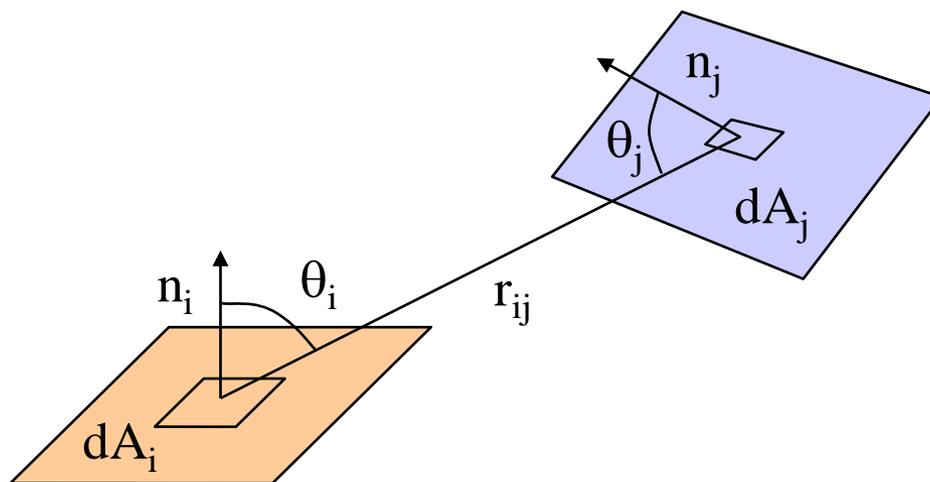
<https://www.youtube.com/watch?v=IVMREtrXtdI>

## Faktori utjecaja (eng. form factor)

- veliki dio proračuna
- potrebno odrediti za svaki par krpica u sceni
- $d\omega_j$                       diferencijalni prostorni kut
- $dF_{dA_i dA_j}$                 dio svjetlosne energije koji napušta  $dA_i$  i dolazi do  $dA_j$

$$dF_{dA_i dA_j} = \frac{\cos \Theta_i}{\pi} d\omega_j = \frac{\cos \Theta_i \cos \Theta_j}{\pi r^2} dA_j$$





$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \Theta_i \cos \Theta_j}{\pi r_{i,j}^2} V_{ij} dA_i dA_j$$

$$V_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{površina je zaklonjena} \\ 1 & \text{površina je vidljiva} \end{cases}$$

### 3. Rješavanje sustava jednačbi

$$I_{vk} = I_{lk} + r_{dk} \sum_{i=1}^n I_i F_{i,j}, \quad k - \text{krpica}$$

$$I_{vk} - r_{dk} \sum_{i=1}^n I_i F_{i,j} = I_{lk}$$

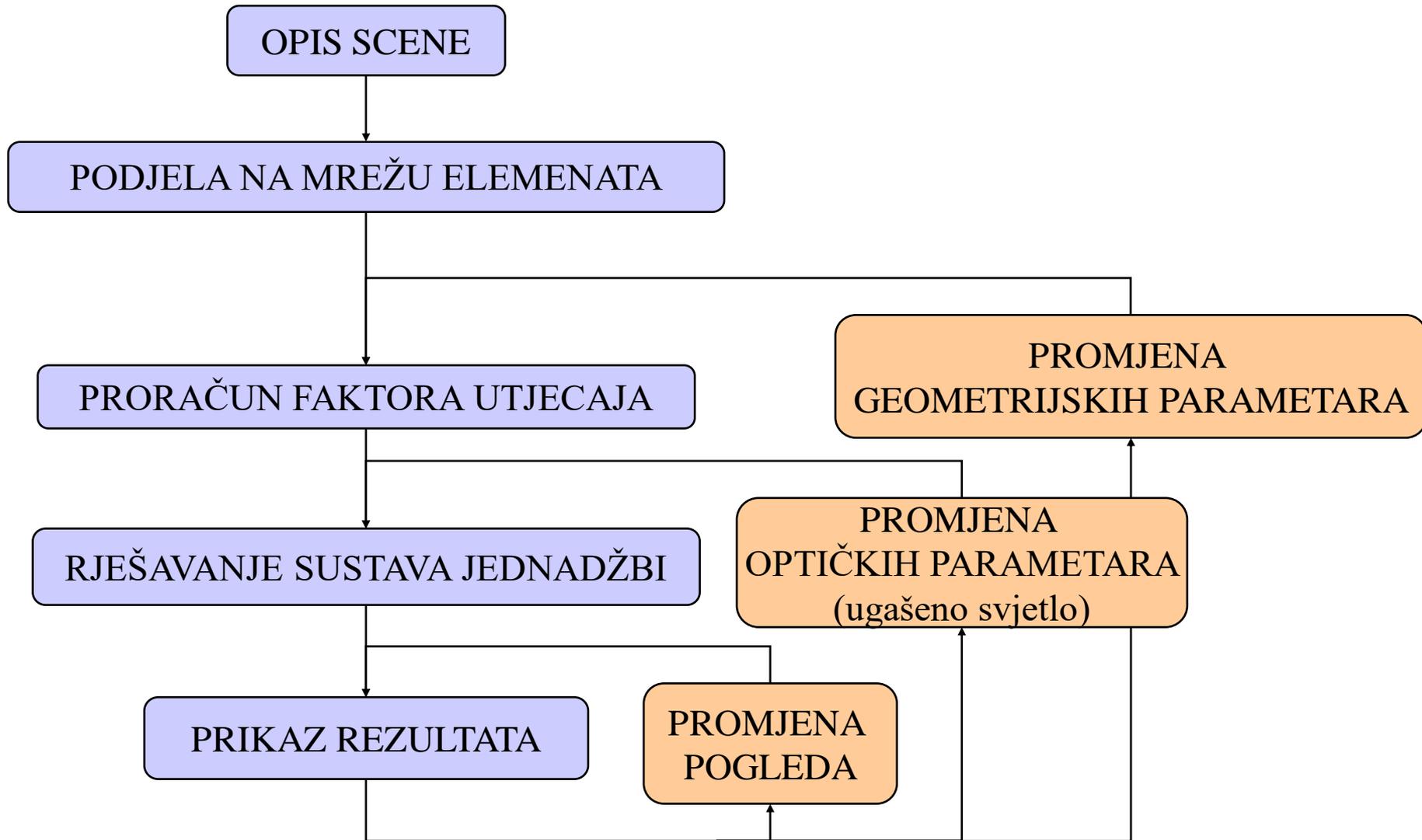
$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{1,1} & -\rho_1 F_{1,2} & \cdot & \cdot & -\rho_1 F_{1,n} \\ -\rho_2 F_{2,1} & 1 - \rho_2 F_{2,2} & \cdot & \cdot & -\rho_2 F_{2,n} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ -\rho_{n-1} F_{n-1,1} & -\rho_{n-1} F_{n-1,2} & \cdot & \cdot & -\rho_{n-1} F_{n-1,n} \\ -\rho_n F_{n,1} & -\rho_n F_{n,2} & \cdot & \cdot & 1 - \rho_n F_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_{n-1} \\ E_n \end{bmatrix}$$

$F_{i,j}$  faktori utjecaja (između elemenata i, j)

$B_i$  nepoznanice – vrijednosti isijavanja koje svaki element ima u stanju ravnoteže

$E_i$  početna isijavanja (izvori)

$\rho_i$  refleksivnost elemenata



<https://experiments.withgoogle.com/webgl-deferred-irradiance-volumes>

Light probes, SSAO+CubeMap; spherical harm.+ Deferred Rendering

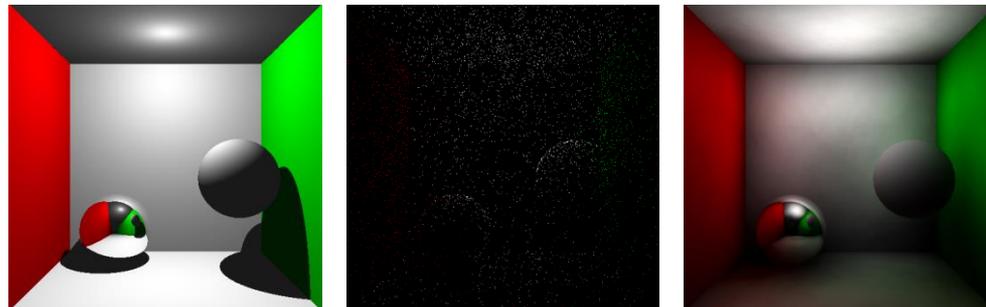
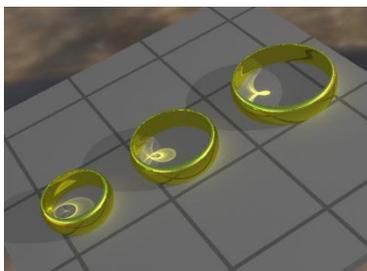
<https://webglstudio.org/demos/global/>

Fer vs FER

Ž. Mihajlović, ZEMRIS, FER

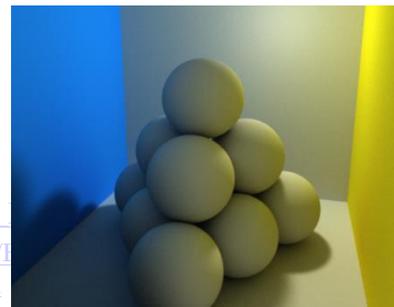
# Hibridni postupci – problem neizravnog osvjetljenja

- kombinacija postupka praćenja zrake iz očišta i emitiranih [fotona](#) iz izvora
- (engl. *photon mapping*)



- kombinacija s praćenjem puta (engl. *Path Tracing*) integrira gustoću svjetlosnog toka na točki površine

<http://madebyevan.com/webgl-path-tracing/> Chrome <http://wulinjiansheng.github.io/WebGL-Path-Tracing-Renderer/>  
<https://www.shadertoy.com/view/MsySzd> <https://erichlof.github.io/THREE.js-PathTracing-Renderer/>  
[https://erichlof.github.io/THREE.js-PathTracing-Renderer/Classic\\_Scene\\_Whitted\\_TheCompleatAngler.html](https://erichlof.github.io/THREE.js-PathTracing-Renderer/Classic_Scene_Whitted_TheCompleatAngler.html)  
[https://erichlof.github.io/THREE.js-PathTracing-Renderer/Geometry\\_Showcase.html](https://erichlof.github.io/THREE.js-PathTracing-Renderer/Geometry_Showcase.html)



- kvalitetniji izračun ambijentne komponente ambijentnim zasjenjenjem SSAO (engl. *Screen space ambient occlusion*) <https://threejs.org/examples/#mipmap-ssao>
- <https://doc.x3dom.org/tutorials/lighting/ssao/example.html>



# PBR – Fizikalno temeljeno sjenčanje (Physically Based Rendering)

- model Cook Torrance

$$f_{microfacet}(l, v) = \frac{F(l, h)G(l, v, h)D(h)}{4(n, l)(n, v)}$$

$f$  je BRDF mikro površine

$F$  Fresnelova refleksija

$G$  član koji opisuje geometriju – koliko je mikropovršina zasjenjeno

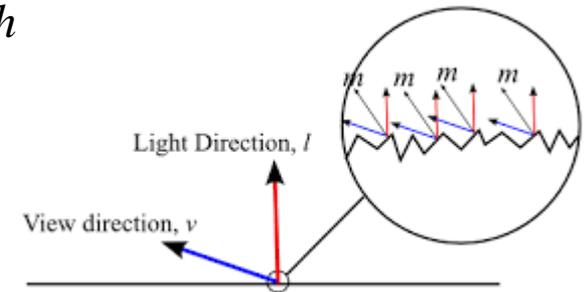
$D$  distribucija normala mikropovršine u smjeru poluvektora  $h$

$l$  jedinični vektor prema izvoru

$v$  jedinični vektor prema promatraču

$n$  jedinični vektor normale

$h$  poluvektor  $(l+v)/2$



$F(l, h)$  - (Schlick's approximation). Svjetlost se promatra kao val koji se reflektira od površine između dva medija (npr. zrak-voda). Prilikom refleksije promatra se promjena amplitude i faznog pomaka svjetlosnog vala. Fresnelova refleksija određuje omjer dolazne i reflektirane svjetlosti i ovisi o kutu upada svjetlosti.  $F_0$  je bazna refleksivnost za kut  $0^0$ .

$$F(l, h) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (l \cdot h)^5), F_0 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, n_i - \text{indeks loma svjetla}$$

$G(l, v, h)$  geometrijski član – vjerojatnost da mikropovršine nisu zaklonjene drugim mikropovršinama.

$$G(l, v, h) = \min \left( 1, \frac{2(nh)(nv)}{vh}, \frac{2(nh)(nl)}{vh} \right)$$

Implementacija ovog člana može biti i Smith-ovim modelom – razdvaja ovu komponentu na komponentu prema izvoru i komponentu prema promatraču.

$$G(l, v, h) = G_1(l)G_1(v)$$

Za  $G_1$  često se koristi GGX aproksimacija.

$D(h)$  distribucijski član (NDF – Normal distribution function). Određuje postotak površina orijentiranih u smjeru  $h$ . Zbog očuvanja energije treba vrijediti:

$$\int_{\Omega} D(h) (nh) d\omega = 1$$

Koriste se dodatni parametri, najčešće mape teksture (u RGB $\alpha$  komponentama) s informacijom o materijalu (uz mapu normala) npr.:

- osnovna boja baseColor (odgovara difuznoj komp.)
- reflektivni faktor (albedo)
- metalnost površine
- ambijentno zasjenjenje (ambient occlusion) - kaviteti
- hrapavost
- zrcalna komponenta (specular)
- sjajnost (gloss)
- emisivnost <http://johann.langhofer.net/PBRComposer/>

Izvor svjetlosti za objekt je obično kupolasta slika cijele scene (Environment Maps - image-based lighting) također se može ukomponirati u mape teksture

<https://doc.babylonjs.com/features/featuresDeepDive/materials/using/masterPBR>

<https://www.iamnop.com/play/#helmet>

<http://simonstechblog.blogspot.hr/2011/12/microfacet-brdf.html>



ostvarivanje PBR – fizikalno temeljenog modela prikaza - usporedba s modelom Phong

<https://victorlopez.github.io/editor/>

<https://hoverinc.github.io/ray-tracing-renderer/scenes/webgl-comparison/>