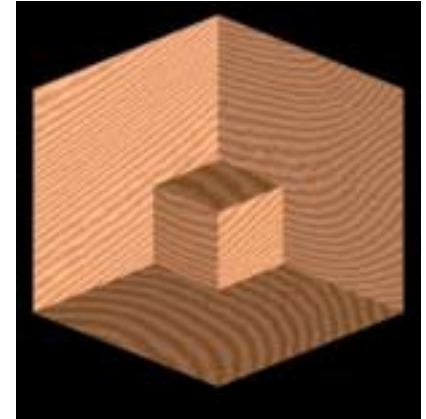


## 2.3a. Modeli i postupci osvjetljavanja, sjenčanje

### PODJELA MODELA OSVJETLJAVANJA I PRIPADNIH POSTUPAKA SJENČANJA



#### EMPIRIJSKI MODELI

- temelje se na iskustvu i estetskim aproksimacijama
- npr. jednostavni model osvjetljavanja (lokalni)
- u postupcima sjenčanja koji ga koriste Gouraud '71 i Phong '75.

#### PRELAZNI MODELI

- uključuju prozirnost, zrcaljenje i sjene, geometrijski egzaktan
- npr. Whittedov model '80.
- koristi se u postupku sjenčanja pretrage zrake (engl. ray tracing)

#### ANALITIČKI MODELI

- temelji se na energetskej ravnoteži

## HIBRIDNI MODELI

- integriraju postupak pretrage zrake i postupak isijavanja
- npr. Wallace ' 87.

Prema modelu osvjetljavanja u pojedinoj točki računa se osvjetljenje

- interakcija svjetla i površine
- složena priroda svjetlosti i površine (različito reflektiranje raznih valnih duljina, ista valna duljina različito reflektirana ovisno o kutu)

Sjenčanje (engl. shading) dio je postupka izrade prikaza (engl. rendering).

Izvori svjetla

- točkasti, linijski, poligonalni, reflektori (usmjereni).

Materijali - površine

- hrapave (mat), glatke (sjajne), prozirne

## 2.3.1. EMPIRIJSKI MODEL OSVIJETLJENJA

( Phongov model)

### TRI KOMPONENTE

- ambijentna
- difuzna
- zrcalna

### AMBIJENTNA KOMPONENTA

$$I = k_a I_a$$

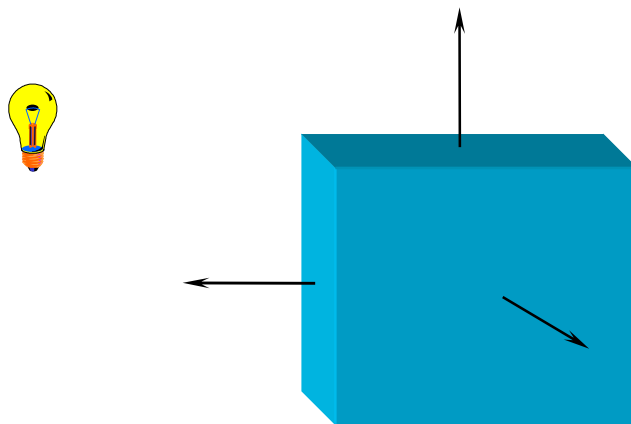
- $k_a$  koeficijent reflektirane ambijentne svjetlosti (ovisi o materijalu)
- $I_a$  intenzitet ambijentne svjetlosti

Reflektiranje svih poligona okolnog prostora. Aproksimacija globalnog osvjetljenja. Ukoliko ova komponenta nije prisutna stražnji poligoni obzirom na izvor svjetla bit će crni.

## DIFUZNA KOMPONENTA (engl. diffuse reflection)

### LAMBERT-OV ZAKON

Djelić površine  $dS$  rasvijetljen je proporcionalno kosinusu kuta pod kojim snop svjetlosti upada na površinu.

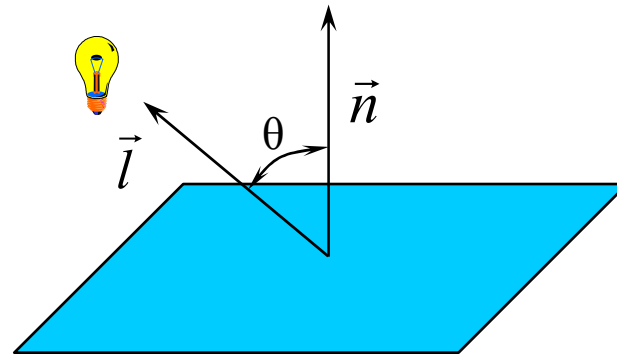


Količina svjetlosti koju vidi promatrač **neovisna** o položaju promatrača i proporcionalna je kosinusu kuta između normale na površinu i vektora prema izvoru.

LIGHTPOSITION

$$I_d = k_d I_p \cos \theta, \quad 0 \leq k_d \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq 90^\circ$$

- $k_d$  koeficijent difuzne refleksije
- $I_p$  intenzitet točkastog izvora
- $\theta$  kut između normale na površinu i vektora prema izvoru



$$I_d = k_d I_p \max(\vec{l} \cdot \vec{n}, 0)$$

- $\vec{l}$  normirani vektor prema izvoru svjetlosti
- $\vec{n}$  normirani vektor normale na površinu
- [http://www.cs.brown.edu/exploratories/freeSoftware/repository/edu/brown/cs/exploratories/applets/dotProduct/dot\\_product\\_java\\_browser.html](http://www.cs.brown.edu/exploratories/freeSoftware/repository/edu/brown/cs/exploratories/applets/dotProduct/dot_product_java_browser.html)

U praksi moramo uzeti u obzir i udaljenost izvora do površine  $d_L$ .

$$I = k_a I_a + k_d I_p \frac{\vec{l} \cdot \vec{n}}{d_L^2}$$

Bolje rezultate dobit ćemo formulom

$$I = k_a I_a + k_d I_p \frac{\vec{l} \cdot \vec{n}}{d_L + k}$$

- $k$  iskustvena konstanta

U slučaju potpunog modela boja, komponente se posebno računaju:

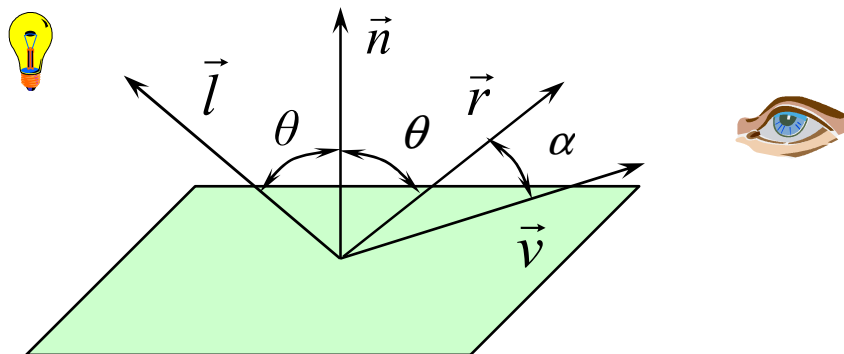
$$I_R = k_a O_{dR} I_{aR} + k_d O_{dR} I_{pR} \frac{\vec{l} \cdot \vec{n}}{d_L + k}$$

- $O_{dR}$  definira komponentu boje objekta

## ZRCALNA KOMPONENTA (engl. specular reflection)

Zrcalna refleksija nastaje na blještavoj površini.

Blještavilo (engl. highlight) obojeno je bojom upadne svjetlosti.



$$I_s = k_s I_p \frac{\cos^n \alpha}{d_L + k} = k_s I_p \frac{(\vec{r} \cdot \vec{v})^n}{d_L + k}$$

- $\vec{r}$  vektor usmjeren u pravcu reflektirane zrake r - reflektirana zraka
- $\vec{v}$  vektor prema očistu
- $\alpha$  kut između reflektirane zrake i zrake prema očistu
- $k_s$  koeficijent zrcalne refleksije
- $n$  određuje prostornu razdiobu i vezan je uz materijal

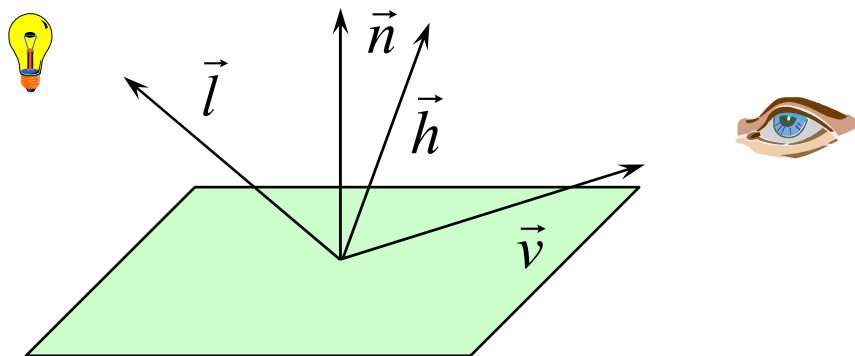
• <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/reflection/reflectionangles/index.html>

u praksi se često koristi vektor  $\vec{h}$ , odnosno produkt  $hn$  umjesto vektora  $r$ , odnosno produkta  $rv$

- jednostavno se računa 
$$\vec{h} = \frac{\vec{l} + \vec{v}}{2}$$

- ukoliko pretpostavimo da su promatrač i izvor vrlo daleko tj. vektore možemo smatrati konstantnima, konačna jednadžba ovisit će samo o normalni na površinu

$$I_s = k_s I_p \frac{(\vec{h} \cdot \vec{n})^n}{d_L + k}$$



<http://www.cs.princeton.edu/~min/cs426/jar/light.html>

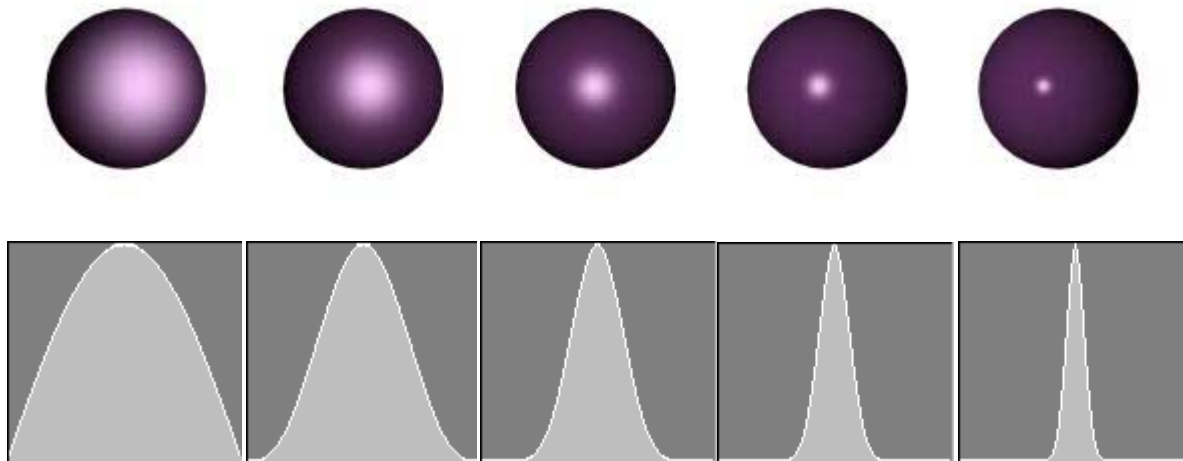


Za realne blještave površine imamo nepotpunu zrcalnu refleksiju.  
 (Phong, 1975)

$$I_s = k_s I_p \frac{\cos^n \alpha}{d_L + k} = k_s I_p \frac{(\vec{r} \cdot \vec{v})^n}{d_L + k}$$

Funkcija  $\cos^n \alpha$ :

LIGHTMATERIAL



$n = 1$

$n = 15$

$n = 30$

$n = 45$

$n = 60$

PLASTIKA



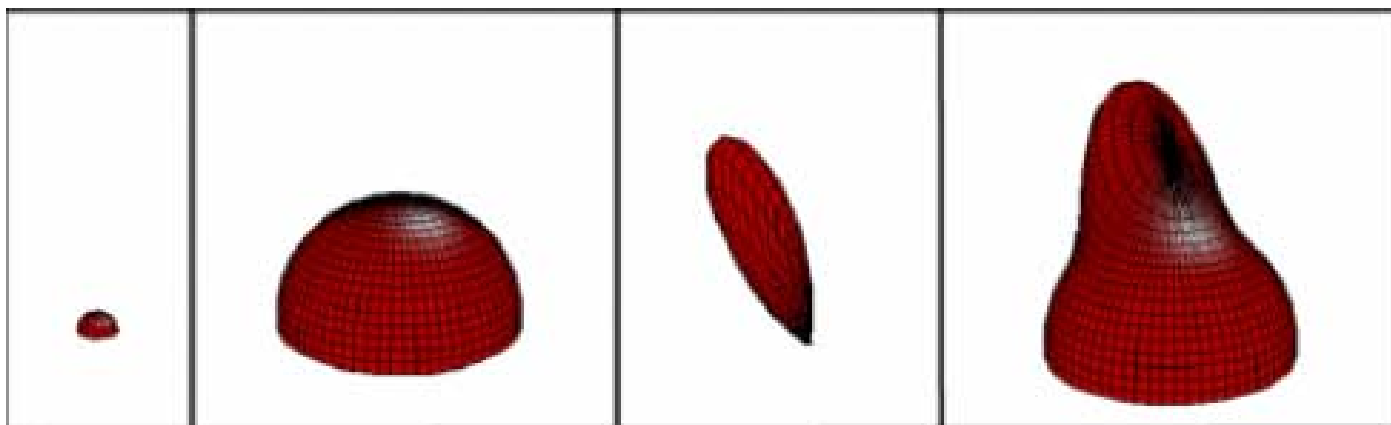
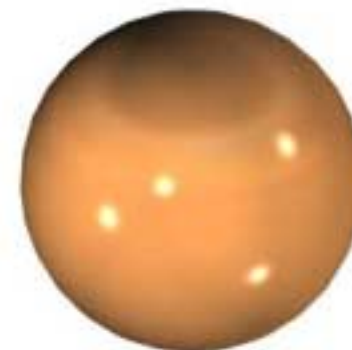
METAL

Opća jednađba sjenčanja za slučaj  $m$  izvora:

$$I = k_a I_a + \left[ k_d \sum_{j=1}^m \frac{(\vec{l}_j \cdot \vec{n}) I_{p,j}}{d_{L,j} + k} + k_s \sum_{j=1}^m \frac{(\vec{r}_j \cdot \vec{v})^n I_{p,j}}{d_{L,j} + k} \right]$$

Sjenčanje u boji (primjer komponente crvene boje):

$$I_R = k_a O_{dR} I_{aR} + \left[ k_d O_{dR} \sum_{j=1}^m \frac{(\vec{l}_j \cdot \vec{n}) I_{p,j}}{d_{L,j} + k} + k_s O_{sR} \sum_{j=1}^m \frac{(\vec{r}_j \cdot \vec{v})^n I_{p,j}}{d_{L,j} + k} \right]$$



ambijentna

difuzna

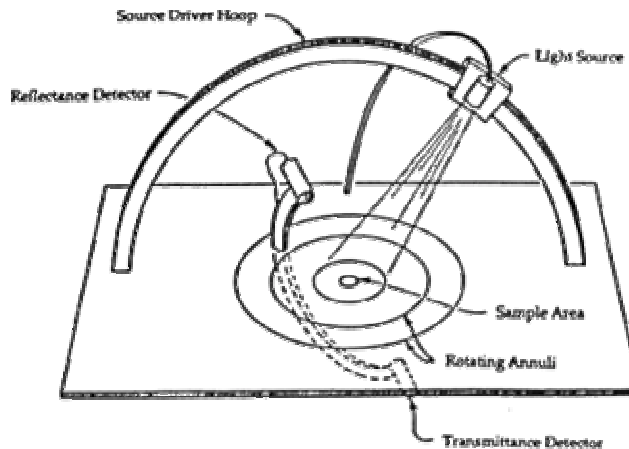
zrcalna

ukupno

<http://www.cs.technion.ac.il/~cs234325/Applets/applets/shadingmodel/html/index.html>

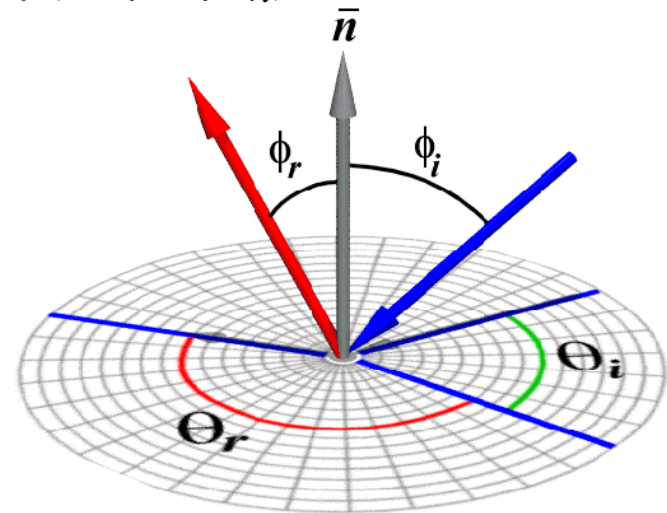
- u pojedinoj točki promatramo raspršenje svjetlosti
- aproksimacija bi-direkciona funkcije BDRF refleksije (bi-directional reflection function)
  - omjer reflektirane i upadne svjetlosti u ovisnosti o kutu upadne i reflektirane svjetlosti i valnoj duljini

(BDSF – scattering kombinira BDRF i BDTF transmittance)



$$f_{BDRF} = dL_r(x, \vec{\omega}_r) / dE_i(x, \vec{\omega}_i) = dL_r(x, \vec{\omega}_r) / L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos(\phi_i) d\vec{\omega}_i$$

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



$\phi_i$   $\theta_i$  polarni i azimutni kutovi upadne  
 ( $\phi_r$   $\theta_r$  reflektirane zrake)  
 $x$  pozicija koju promatramo  
 $L$  sjajnost (radiance)

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\Omega} f_{BDRF}(x, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos(\phi_i) d\omega_i$$

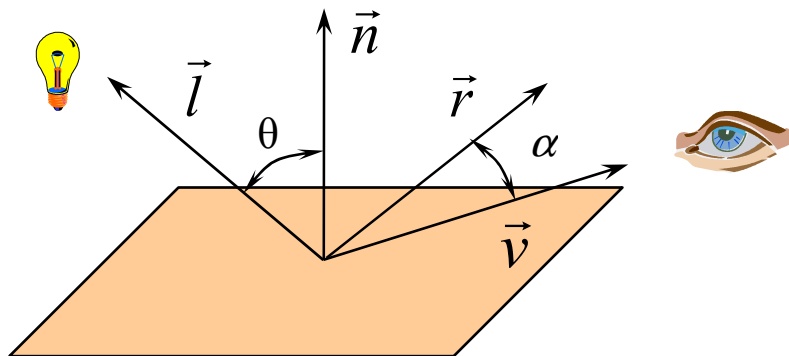
# POSTUPCI SJENČANJA

## Konstantno sjenčanje

Sve točke površine unutar jednog poligona imaju isti intenzitet.

To znači da je za neki poligon

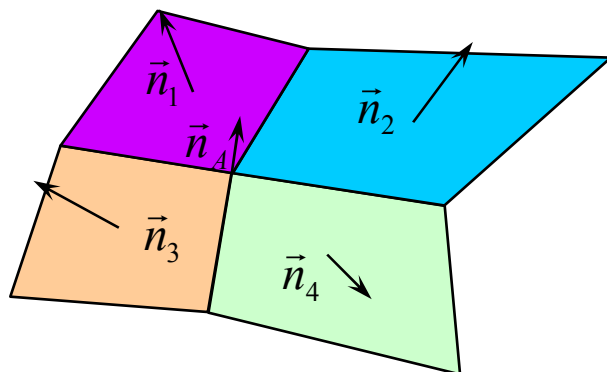
$$\vec{l} \cdot \vec{n} = konst. \quad \vec{r} \cdot \vec{v} = konst.$$



<http://www.neilwallis.com/3d/>

određivanje normala u vrhovima:

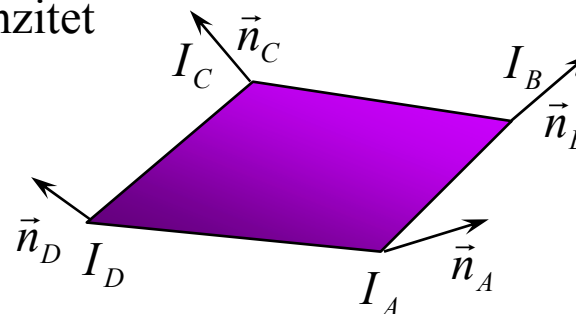
- određivanje normala svih poligonskih površina
- aritmetička sredina normala poligona incidentnih s vrhom



$$\vec{n}_A = \frac{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 + \vec{n}_3 + \vec{n}_4}{4}$$

## Gouraud-ovo sjenčanje (interpolacija intenziteta):

- u svakom vrhu poligona računa se intenzitet



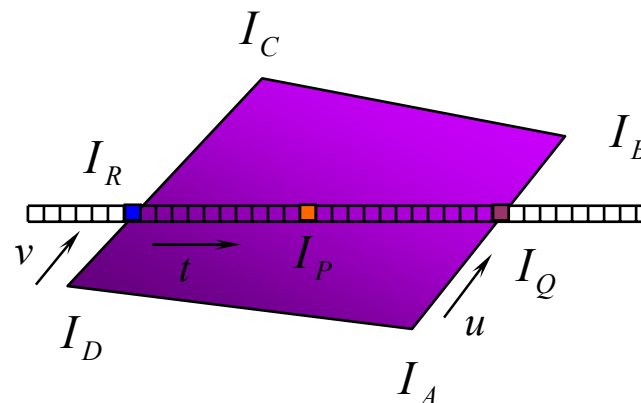
- dobivene intenzitete linearno interpoliramo  
Sjecišta ispitne linije s bridovima neka su  $Q$ ,  $R$   
interpoliranje duž bridova

$$I_Q = (1-u)I_A + uI_B, \quad u = \frac{\overline{AQ}}{\overline{AB}}$$

$$I_R = (1-v)I_D + vI_C, \quad v = \frac{\overline{DR}}{\overline{DC}}$$

interpoliranje unutar poligona

$$I_P = (1-t)I_R + tI_Q, \quad t = \frac{\overline{RP}}{\overline{RQ}}$$



- inkrementalni oblik

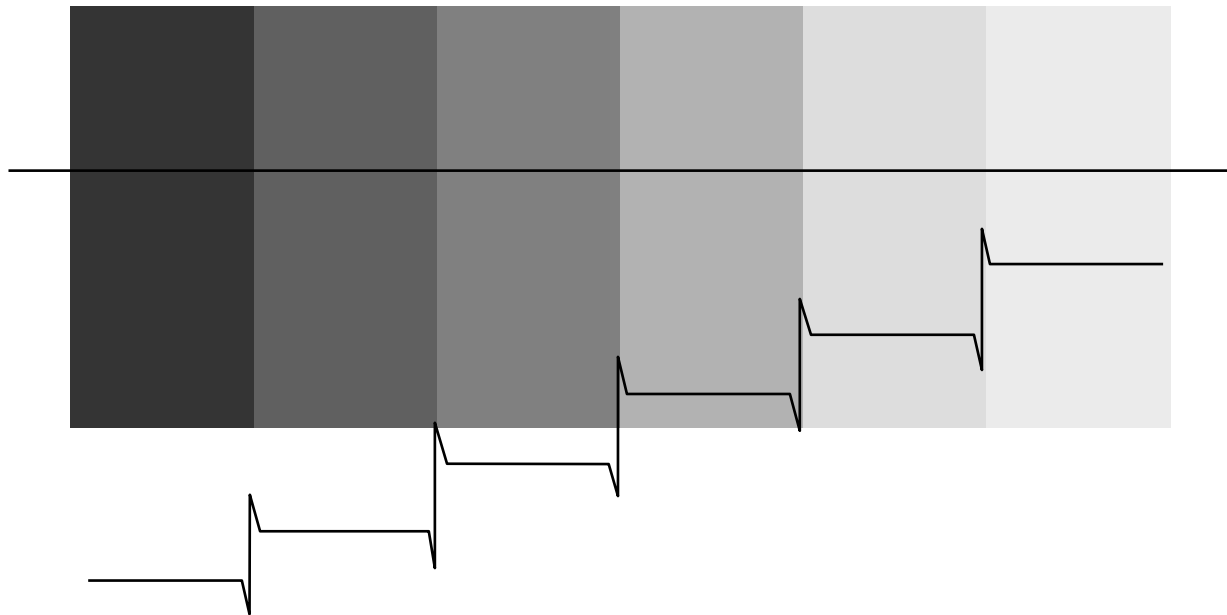
$$I_{P1} = (1 - t_1)I_R + t_1 I_Q,$$

$$I_{P2} = (1 - t_2)I_R + t_2 I_Q,$$

$$I_{P2} = I_{P1} + (I_Q - I_R)(t_2 - t_1) = I_{P1} + \Delta I \Delta t$$

- nedostatak postupka je Machov vizualni učinak (svijetle i tamne pruge)

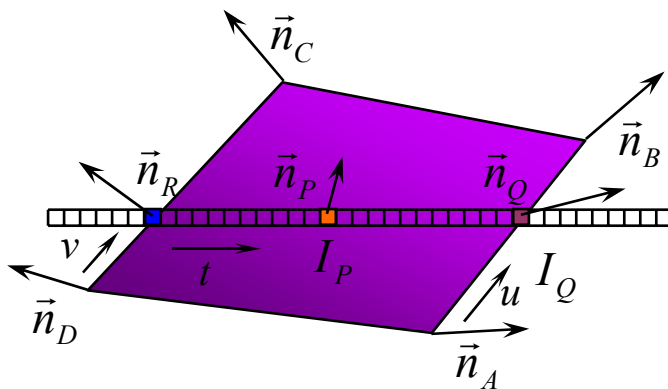
• [http://www.sandlotscience.com/Guided\\_Tours/Tour2/Tour2\\_4.htm](http://www.sandlotscience.com/Guided_Tours/Tour2/Tour2_4.htm)



<http://www.nbb.cornell.edu/neurobio/land/OldStudentProjects/cs490-96to97/anson/MachBandingApplet/>

## Phong-ovo sjenčanje (interpolacija normala):

- izračunamo normale u vrhovima
- interpoliramo normale duž bridova
- interpoliramo dobivene normale duž ispitne linije
- intenzitet izračunamo na kraju



$$\vec{n}_Q = (1-u)\vec{n}_A + u\vec{n}_B, \quad u = \frac{\overline{AQ}}{\overline{AB}}$$

$$\vec{n}_R = (1-v)\vec{n}_D + v\vec{n}_C, \quad v = \frac{\overline{DR}}{\overline{DC}}$$

$$\vec{n}_P = (1-t)\vec{n}_R + t\vec{n}_Q, \quad t = \frac{\overline{RP}}{\overline{RQ}}$$

inkrementalni oblik :

$$\vec{n}_{P2} = \vec{n}_{P1} + (\vec{n}_Q - \vec{n}_R)(t_2 - t_1)$$



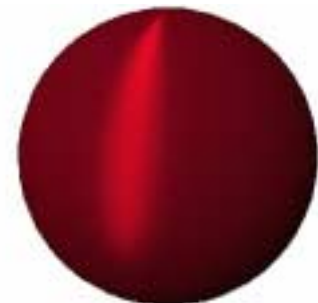
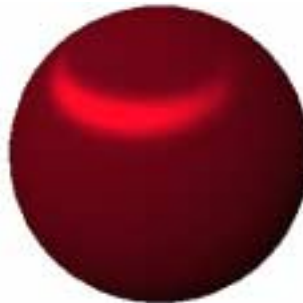
- Phong-ovo sjenčanje je bolje od sjenčanja Gouraud
- sporije je (za svaki slikovni element treba odrediti  $v$ ,  $l$ ,  $r$ ,  $I$ )
- umanjuje Mach-ov vizualni učinak

<http://oli.informatik.uni-oldenburg.de/Grafiti3/grafiti/flow12/page12.html>

<http://www.anlonchen.com/cs/CS263Applet/Renderer.html>



anizotropni učinak



Složeniji modeli:

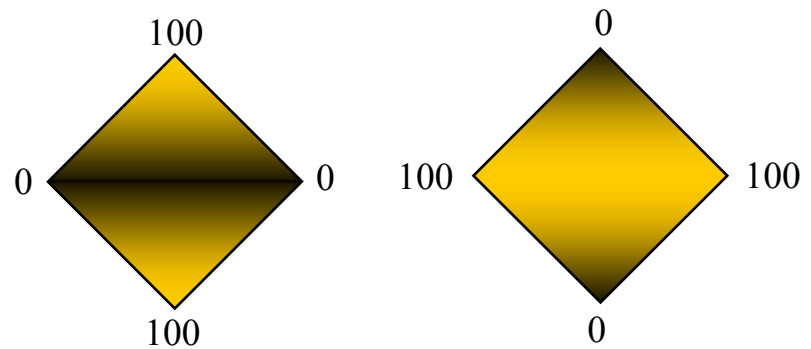
<http://www.graphics.cornell.edu/~westin/multimedia-paper/node9.html#SECTION0006>

## Problemi u postupku sjenčanja

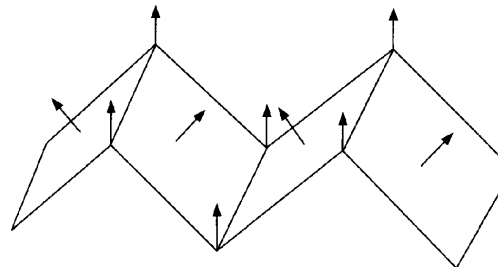
- silueta objekta - broj poligona



- rotaciona ovisnost



- normale u vrhovima



## 2.3.2. PRELAZNI MODELI

### WHITTEDOV MODEL OSVJETLJAVANJA

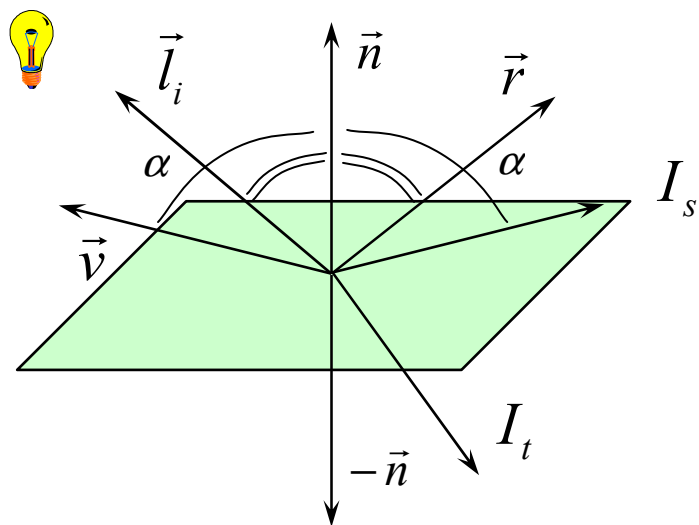
Intenzitet koji dolazi do promatrača iz točke na površini funkcija je intenziteta

- ambijentne svjetlosti
- difuzno odbijene svjetlosti
- zrcalno odbijene svjetlosti (intenzitet sa susjednih površina kao posebnih izvora)
- lomljena svjetlost

$$I = k_a I_a + k_d \sum_{i=1}^m I_{pi} (\vec{l}_i \cdot \vec{n}) + k_s I_s + k_t I_t$$

- $I_{pi}$  intenzitet i-tog točkastog izvora
- $k_s$  koeficijent zrcalnog odbijanja
- $I_s$  intenzitet zrcalno odbijene svjetlosti
- $k_t$  koeficijent lomljene svjetlosti
- $I_t$  intenzitet lomljene svjetlosti
- <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/polarizedlight/brewster/index.html>

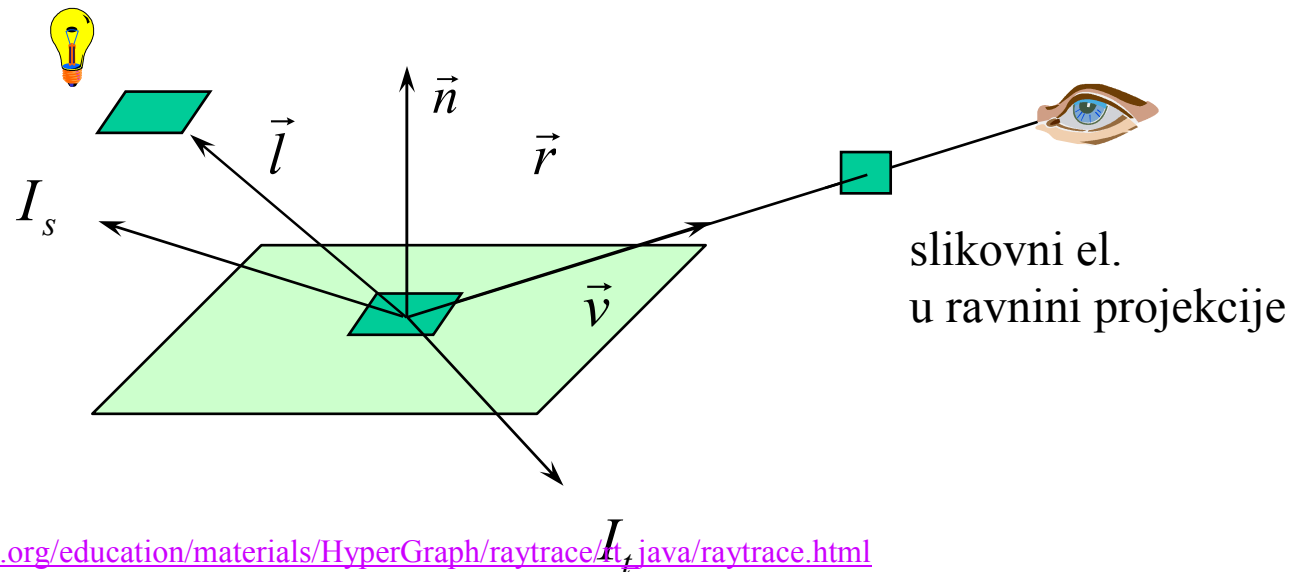
## doprinosi zrcaljenja i loma svjetlosti



$$I = k_a I_a + k_d \sum_{i=1}^m I_{pi} (\vec{l}_i \cdot \vec{n}) + k_s I_s + k_t I_t$$

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=66>

- postupak se sastoji od određivanja slikovnog elementa pogodnog zrakom od promatrača (kroz ravninu projekcije) i praćenja zrake dalje u scenu
- kod svakog pogotka objekta u sceni postupak se rekurzivno nastavlja za reflektiranu  $I_s$  (primarnu zraku) i lomljenu  $I_t$  (sekundarnu) zraku
- postupak se završava kada zraka izađe iz scene bez pogotka ili na unaprijed zadanoj dubini rekurzije (3-10)
- ukoliko postoji prepreka između izvora i točke u kojoj računamo osvjetljenje tada neki drugi objekt baca sjenu na promatranu točku



## Određivanje reflektirane i lomljene zrake

- određivanje reflektirane zrake – slično kao kod zrcalne komponente normiramo vektore (duljina je jedan)  
projekcija vektora  $l$  na  $n$  je vektor  $p$

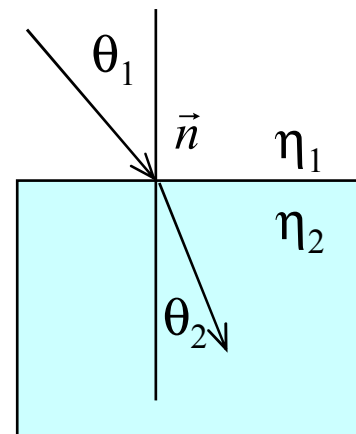
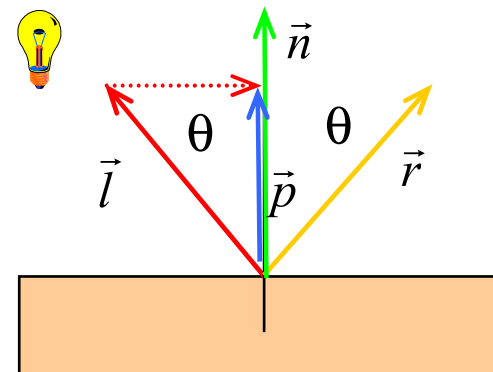
$$\vec{p} = (\vec{l} \cdot \vec{n}) \vec{n}$$

$$\vec{r} = 2(\vec{p} - \vec{l}) + \vec{l} = 2\vec{p} - \vec{l}$$

- određivanje lomljene zrake  
– Snell-ov zakon loma

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

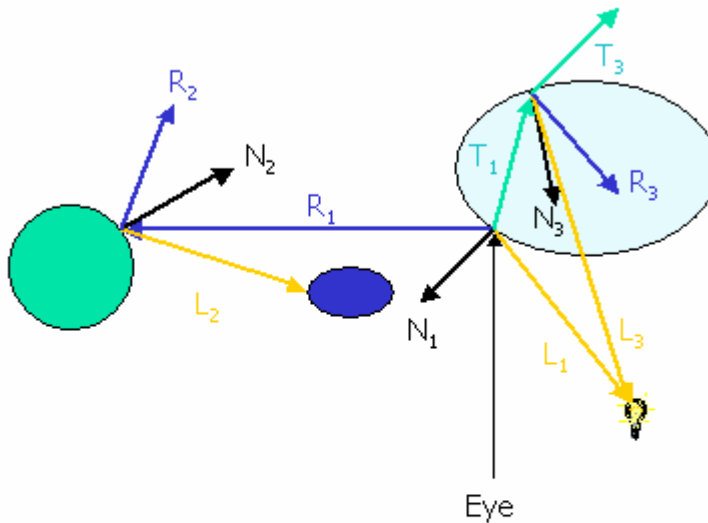
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/refraction/criticalangle/index.html>  
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=218>



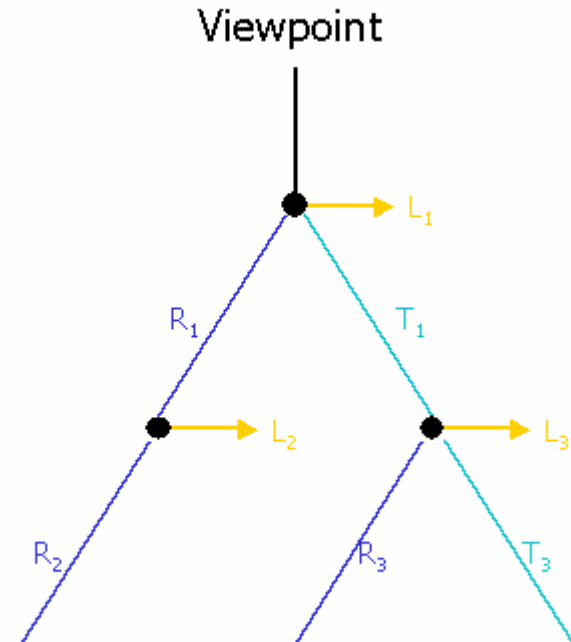
- primjer scene prikazane postupkom praćenja zrake (PovRay)



- STABLO ZRAKE



N normala na površinu  
 R reflektirana zraka  
 L zraka sjene  
 T lomljena zraka



- <http://www.cs.technion.ac.il/~cs234325/Applets/doc/html/etc/AppletIndex.html> (<http://www.cs.technion.ac.il/~cs234325/>)
- <http://www.gris.uni-tuebingen.de/grisalt/projects/grdev/doc/html/Overview.html>
- <http://www.cs.technion.ac.il/~cs234325/Applets/NewApplets/experiments/raycasting.html>



## rekurzivna formula za računanje intenziteta

- koeficijenti s oznakom  $k+1$  koeficijenti su konkretne površine na dubini  $k+1$

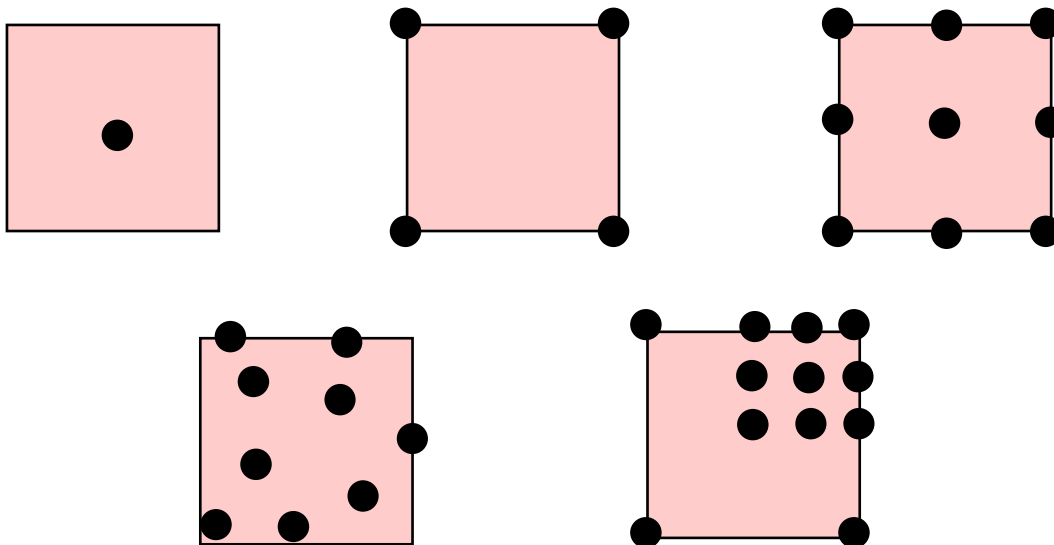
$$I^{(k)} = k_a^{(k+1)} I_a^{(k+1)} + k_d^{(k+1)} \sum_{i=1}^m I_{pi} \left( \vec{l}_i^{(k+1)} \cdot \vec{n}^{(k+1)} \right) + k_s^{(k+1)} I_s^{(k+1)} + k_t^{(k+1)} I_t^{(k+1)}$$

## nedostaci postupka

- 75-95 % vremena troši se na određivanje sjecišta zrake i poligona  
⇒ koriste se minimaks provjere s kvadrima ili kuglama, oktalna stabla, BSP stabla kako bi se smanjio utrošak vremena na računanje sjecišta
- postupak svejedno ostaje vremenski zahtjevan

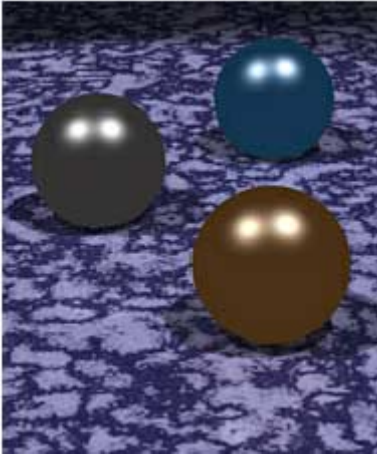
## nedostaci

- pojava aliasa  
⇒ povećano uzorkovanje – 4, 9, po razdiobi, adaptivno)

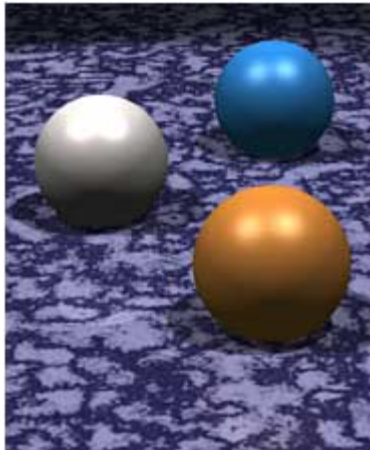


<http://www.povray.org/>

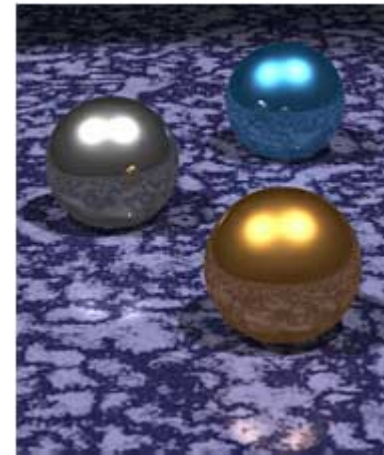
<http://www.cs.berkeley.edu/~efros/java/tracer/tracer.html>



nema difuzne komp.



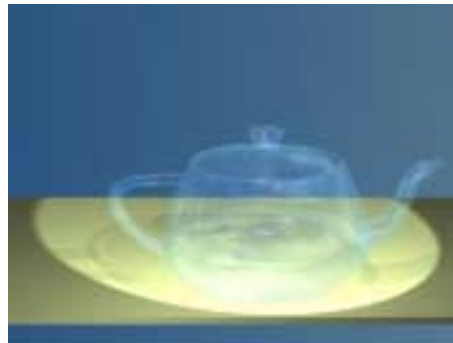
difuzna komponenta



zrcaljenje okoliša

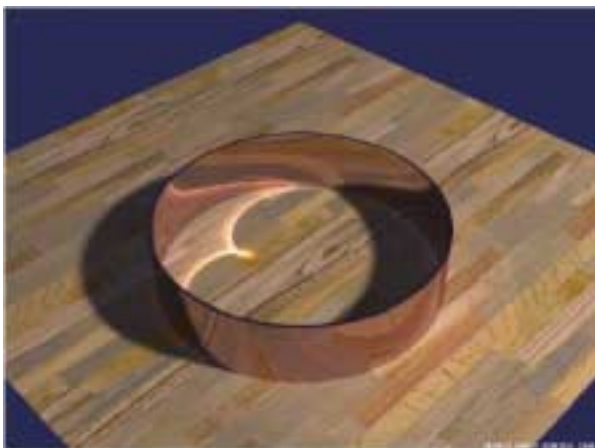
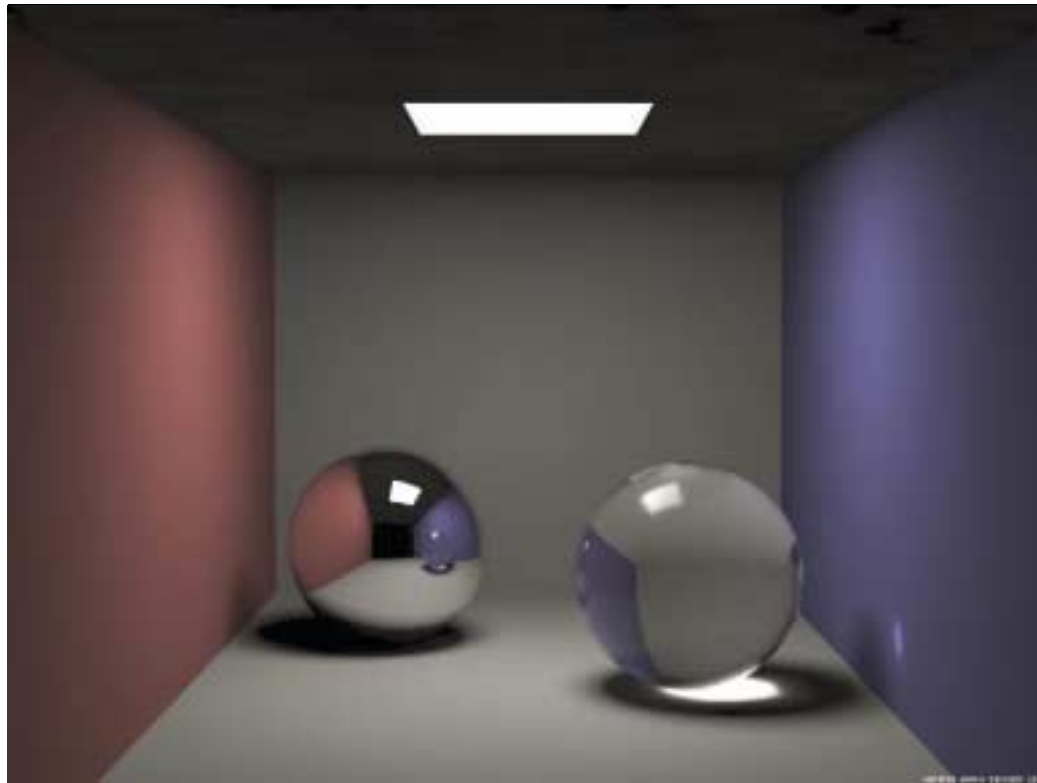


proziran objekt



bačene sjene, reflektor

<http://www.stefan-baur.de/cs.lang.tinyray.0.html#content285>



**Kaustika** <http://graphics.ucsd.edu/~henrik/images/cbox.html>  
[http://www.math.harvard.edu/archive/21a\\_spring\\_06/exhibits/coffeecup/index.html](http://www.math.harvard.edu/archive/21a_spring_06/exhibits/coffeecup/index.html)