

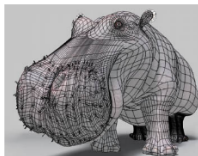
# Računarska grafika

## Osvetljenje i senčenje

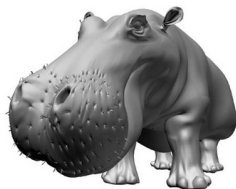
Vesna Marinković

# Utvrđivanje boje objekta

- Za svaki od piksela treba utvrditi koje treba da bude boje
- Najjednostavniji pristup: svakom objektu dodeliti jednu boju



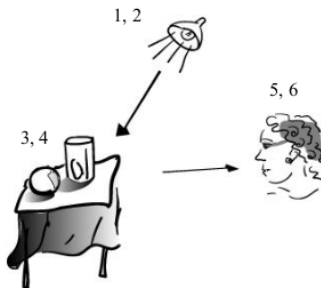
# Utvrđivanje boje objekta



- Različiti delovi objekta su različito osvetljeni
- Danas ćemo proučavati kako izračunati efekte senčenja

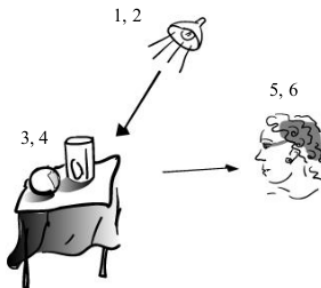
# Faktori koji utiču na simuliranje osvetljene scene

- 1 pozicija i tip izvora svetla
- 2 intenzitet i nijansa svetla
- 3 geometrija objekata na sceni
- 4 materijali od kojih su objekti
- 5 lokacija posmatrača, odnosno kamere
- 6 čovekov vizualni sistem



# Faktori koji utiču na simuliranje osvetljene scene

- 1 pozicija i tip izvora svetla
- 2 intenzitet i nijansa svetla
- 3 geometrija objekata na sceni
- 4 materijali od kojih su objekti
- 5 lokacija posmatrača, odnosno kamere
- 6 čovekov vizualni sistem



# Direktno vs. indirektno osvetljenje

## • Direktno osvetljenje

- Većina svetlosti koja pada na objekat dolazi direktno iz izvora svetla
- Ponekad je svetlost koja dolazi iz izvora svetla do tačke na objektu blokirana drugim objektima – tada kažemo da je tačka u senci tog izvora svetla

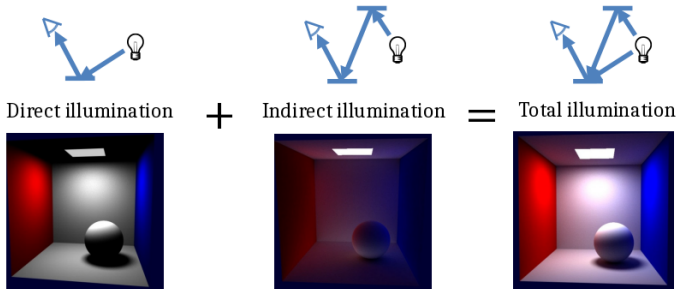
## • Indirektno osvetljenje

- Svetlost se odbija od objekata, a neki objekti propuštaju deo svetlosti
- Podrazumeva svetlost koja dolazi do tačke objekta nakon reflektovanja i prelamanja kroz razne površi



# Globalno osvetljenje

- Kombinovanjem direktnog i indirektnog osvetljenja, dobija se **globalno osvetljenje** koje uzima u obzir interakciju svetlosti sa svim površima na sceni



- Mi ćemo se u okviru kursa baviti modelovanjem direktnog osvetljenja

# Osvetljenje i senčenje

- **Problem osvetljenja** – određuje se boja **pojedinačne tačke** sa date površi simuliranjem atributa svetlosti
- **Problem senčenja** – primenjuje se model osvetljenja na određeni **skup tačaka** i boji se kompletna površ
- Model senčenja predstavlja širi koncept
- Postoji veći broj modela osvetljenja i senčenja – neki od njih nisu fizički zasnovani, ali daju dovoljno dobre rezultate
- Da bismo pojednostavili račun, razmatraćemo monohromatsku svetlost, tj. u jednačinama će biti relevantan samo intenzitet svetla

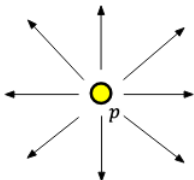


# Virtualni modeli izvora svetla



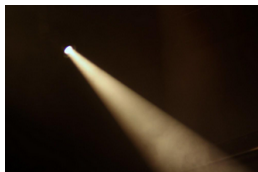
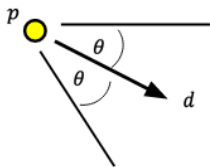
- U **realnosti** svaki izvor svetla je 3D objekat koji ima svoju geometriju
- U **računarskoj grafici** je obično jednostavnije (i računarski efikasnije) koristiti pojednostavljene, idealizovane modele izvora svetla:
  - tačkasti izvor svetla
  - direkcioni izvor svetla
  - spot svetlo

# Tačkasti izvor svetla



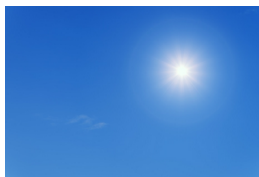
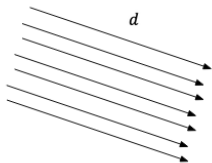
- Infinitesimalna tačka u prostoru koja emituje svetlost ravnomerno u svim smerovima
- Parametrizovan je pozicijom  $p$  na sceni i intenzitetom svetla  $I$  koje emituje
- Razumna aproksimacija male sijalice na velikoj sceni

# Spot svetlo



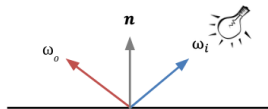
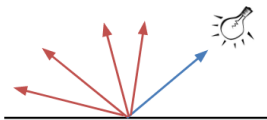
- Tačka u prostoru koja emituje svetlost u smerovima ograničenim kupom
- Parametrizovano je pozicijom  $p$  na sceni, intenzitetom svetla  $I$  koje emituje, smerom  $d$  u kome emituje svetlost i uglom odsecanja  $\theta$
- Razumna aproksimacija reflektorskog svetla

# Direkcionni izvor svetla



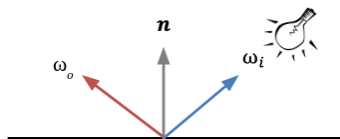
- Svetlo koje sija u određenom smeru  $d$
- Ne postoji pozicija izvora svetla – svetlo dolazi odasvud
- Odgovara tačkastom izvoru svetla koje se nalazi beskonačno daleko
- Razumna aproksimacija sunčeve svetlosti

# Modelovanje materijala objekata



- Šta se dešava kada svetlo pogodi tačku sa površi – na koji način se vrši odbijanje?
- Drugim rečima, za datu normalu površi  $n$ , smer dolazne svetlosti  $\omega_i$  i smer odbojne svetlosti  $\omega_o$ , koliko dolazne svetlosti se odbija u tom odlaznom smeru?

# Funkcija raspodele dvosmerne refleksije (Bi-directional Reflectance Distribution Function - BRDF)

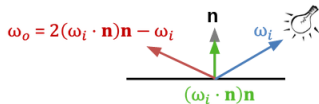
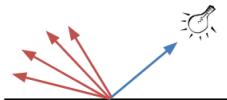
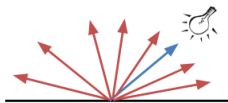


- Za proizvoljni upadni zrak svetlosti **BRDF** funkcijom  $f_r$  se zadaje procenat energije koji se **reflektuje** duž proizvoljnog zraka svetlosti:  
 $f_r(\omega_i, \omega_o) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow [0, 1]$
- Što je površ reflektivnija, to je vrednost veća

# Uobičajeni tipovi materijala (i BRDF) u grafici



# Uobičajeni tipovi materijala u grafici



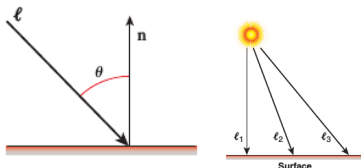
- **Difuzni (Lambertovski)** – svetlost se rasipa jednako po svim smerovima
- **Spekularni (sjajni)** – svetlost se rasipa tešnje oko jednog smera
- **Savršeno reflektujući (ogledalo)** – svetlo se odbija u tačno jednom smeru:  

$$\vec{\omega}_o = 2(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})\vec{n} - \vec{\omega}_i,$$
 jer je  $(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})\vec{n}$  projekcija vektora  $\vec{\omega}_i$  na vektor  $\vec{n}$



# Difuzni (Lambertovski) materijali

- **Difuzna (Lambertovska) refleksija** – refleksija od matiranih, hrapavih površina
- Površi izgledaju jednako osvetljene iz svih uglova posmatranja
- Osvetljenost površi ne zavisi od pozicije posmatrača – BRDF je konstantna za svaki izlazni vektor
- Osvetljenost jedino zavisi od toga koliko direktno svetlost pada na površinu
- Naziv potiče od **Lambertovog kosinusnog pravila** po kome je intenzitet svetla direktno proporcionalan kosinusu ugla između upadnog zraka svetlosti i normale površi
- $f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(L, \omega_o) = k_d \cos \theta = k_d (\vec{L} \cdot \vec{N})$   
 $k_d \in [0, 1]$  je **koeficijent difuzne refleksije** materijala objekta



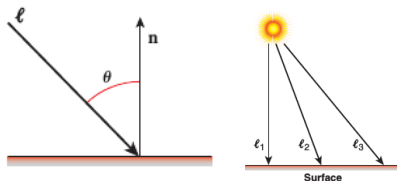
# Intenzitet svetla za difuzne materijale

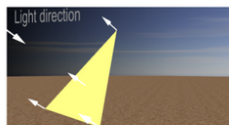
- $I = I_p k_d \cos \theta = I_p k_d (\vec{L} \cdot \vec{N})$

$I_p$  je intenzitet tačkastog izvora svetla

$k_d$  je koeficijent difuzne refleksije materijala

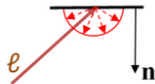
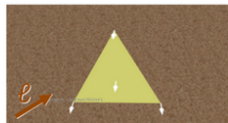
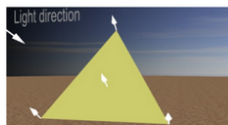
$\theta$  je ugao između pravca svetla  $\vec{L}$  i normale površi  $\vec{N}$



Lambertovo kosinusno pravilo za različite vrednosti ugla  $\theta$ 

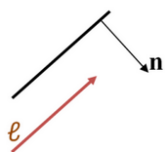
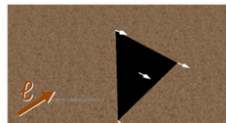
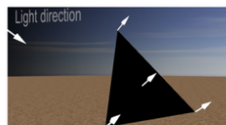
$$\theta = 0^\circ$$

$$\cos \theta = 1$$



$$\theta = 45^\circ$$

$$\cos \theta \approx 0.707$$

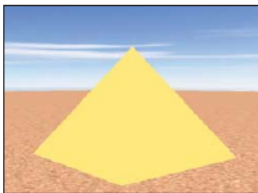


$$\theta = 90^\circ$$

$$\cos \theta = 0$$

# Ambijentalno svetlo

- **Ambijentalno svetlo** – izvor svetla koji je difuzan, bez usmerenog izvora
- Svetlost se rasprostire jednako u svim smerovima i po svim objektima
- $I = I_a \cdot k_a$   
 $I_a$  je konstantni intenzitet ambijentalnog svetla  
 $k_a$  je koeficijent ambijentalne refleksije objekta
- Svakoј tački sa jednog objekta pridružen je isti intenzitet svetlosti
- Svaka površ na sceni je osvetljena do nekog stepena



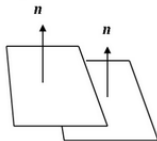
# Dodavanje ambijentalne komponente osvetljenja

- Da objekti ne bi delovali kao da se nalaze u mračnoj prostoriji dodaje se ambijentalna komponenta osvetljenja:

$$I = I_a k_a + I_p k_d (\vec{L} \cdot \vec{N})$$

# Slabljenje izvora svetla

- Projekcije dve paralelne površine od istog materijala koje se preklapaju nisu razlučive

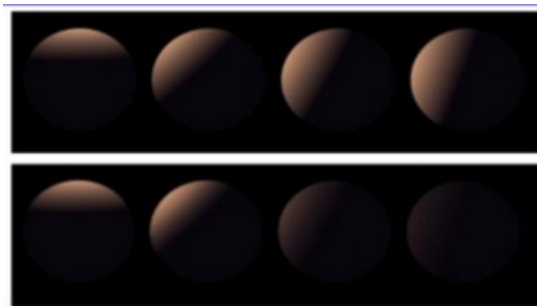


- Uzećemo u obzir **faktor slabljenja izvora svetla**  $f_{att}$

$$I = I_a k_a + f_{att} I_p k_d (\vec{L} \cdot \vec{N})$$

## Slabljenje izvora svetla (2)

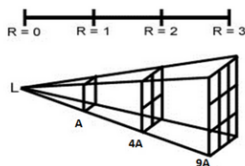
- Objekti udaljeniji od izvora svetla biće prikazani kao tamniji



## Slabljenje izvora svetla (3)

- Količina svetlosti koja osvetljava objekat opada kao inverz kvadrata rastojanja između njih

$$f_{att} = \frac{1}{d_L^2}, \quad d_L \text{ rastojanje objekta od izvora svetla}$$



- Ako slabljenje izvora svetla modelujemo prethodnom formulom, objekti jako brzo postaju tamni

- Kao bolji izbor nameće se korišćenje naredne heuristike:

$$f_{att} = \min\left\{\frac{1}{c_1 + c_2 d_L + c_3 d_L^2}, 1\right\}$$

gde su  $c_1$ ,  $c_2$  i  $c_3$  eksperimentalno određene konstante

- Slabljenje izvora svetla se ne primenjuje na direkciono svetlo ( $f_{att} = 1$ )



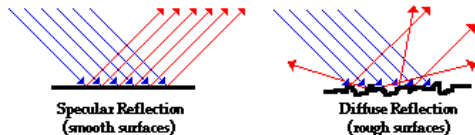
# Spekularni materijali

- Mnogi materijali nisu savršeno difuzni – u većini slučajeva BRDF nije konstantna, već zavisi od pozicije posmatrača
- U tom slučaju pričamo o spekularnom svojstvu materijala



# Spekularna refleksija

- **Spekularna refleksija** se javlja kod glatkih i sjajnih objekata, za razliku od difuzne refleksije koja se javlja kod hrapavih objekata
- Efekat joj je najveći u pravcu  $\vec{R}$  koji je simetričan pravcu svetlosti  $\vec{L}$  u odnosu na normalu površi  $\vec{N}$
- Vrednost BRDF funkcije je najveća kada je vektor  $\vec{\omega}_o$  simetričan vektoru  $-\vec{\omega}_i$  u odnosu na normalu površi



# Spekularna komponenta osvetljenja

- Jedan način da se modeluje raspodela odbojnog zraka svetlosti je da se ona grupiše oko zraka simetričnog pravcu svetlosti

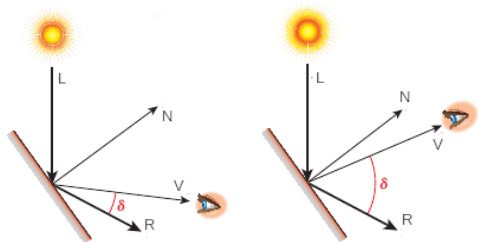
$$f_r(w_i, w_o) = k_s \cos^s \delta = k_s (\vec{R} \cdot \vec{V})^s$$

- $I_{spec} = I_p k_s \cos^s \delta$

$\delta$  je ugao između vektora  $\vec{R}$  i  $\vec{V}$  (pravca posmatranja)

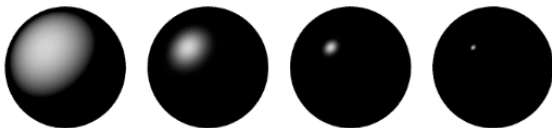
$s$  je **eksponent spekularne refleksije** za dati materijal

$k_s$  je **koeficijent spekularne refleksije**

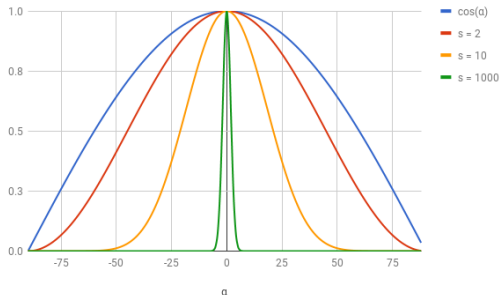


## Različite vrednosti eksponenta spekularne refleksije

- Razlika u veličini površine zahvaćene spekularnim efektom i u tome koliko je prelaz oštar



- Pad vrednosti  $\cos^s \delta$  za  $s = 1, 2, 10, 1000$



## Cilj: dovoljno dobra aproksimacija

“In trying to improve the quality of the synthetic images, we do not expect to be able to display the object exactly as it would appear in reality, with texture, overcast shadows, etc. We hope only to display an image that approximates the real object closely enough to provide a certain degree of realism.”

– Bui Tuong Phong, 1975.

# Fongov model osvetljenja

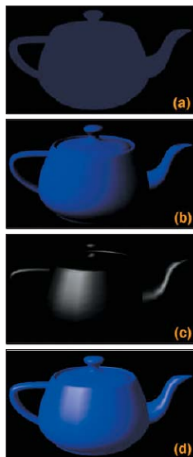
- Kombinuje se ono što znamo o modelovanju izvora svetla i modelovanju materijala da bi se dobio jednostavan, aproksimativan način za osvetljavanje objekata
- Ukupna osvetljenost je kombinacija ambijentalne, lambertovske i spekularne komponente (za sve izvore svetla)

$$I = I_{amb} + I_{diff} + I_{spec} = I_a k_a + f_{att} I_p (k_d \cos \theta + k_s \cos^s \delta)$$

$$I = I_a k_a + f_{att} I_p (k_d (\vec{L} \cdot \vec{N}) + k_s (\vec{R} \cdot \vec{V})^s)$$

- Ne modeluje globalno osvetljenje – nema međuobjektnih refleksija, nije fizički zasnovan

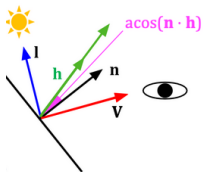
# Primer doprinosa osvetljenosti svake od komponenti



(a) Ambijentalna komponenta (b) Difuzna komponenta (c) Spekularna komponenta (d) Suma sve tri komponente

# Blin-Fongov model osvetljenja

- Varijanta Fongovog modela sa izmenjenom spekularnom komponentom
- Koristi vektor  $\vec{H}$  koji polovi ugao između vektora  $\vec{V}$  i  $\vec{L}$
- $I_{spec} = I_p k_s (\vec{N} \cdot \vec{H})^s$
- $$\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{|\vec{L} + \vec{V}|}$$
- Što je  $\vec{V}$  bliskije  $\vec{R}$ , to je  $\vec{H}$  bliskije  $\vec{N}$

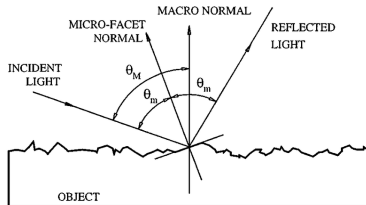


- Proizvodi vizualni efekat sličan Fongovom modelu osvetljenja
- Efikasniji od Fongovog modela kada su posmatrač i izvor svetla dovoljno daleko, jer je vektor  $\vec{H}$  konstantan



## Drugi modeli osvetljenja

- Postoje i drugi modeli osvetljenja



- **Fizički zasnovani modeli osvetljenja**

- zasnivaju se na mikropovršima – svaka površ na mikroskopskom nivou može se opisati putem malih, savršeno reflektujućih ogledala koja su poređana na pogodan način
  - čuvaju energiju: izlazna energija svetlosti ne može da prevaziđe ulaznu svetlosnu energiju
  - koriste fizički zasnovanu funkciju BRDF
- Kuk-Torensov, Oren-Najarov, Torrens-Speruov, ...

# Modeli senčenja

- **Problem:** primeniti model osvetljenja na svaku pojedinačnu tačku koja je vidljiva je skupo!
- **Rešenje:** primeniti model osvetljenja samo na neke tačke, a za preostale koristiti neki vid interpolacije
- Tri popularna metoda senčenja:
  - Ravansko senčenje (najbrži, ali daje najlošiji kvalitet)
  - Guroovo senčenje (balans brzine i kvaliteta)
  - Fongovo senčenje (najsporiji, ali daje najkvalitetniji prikaz)

## Ravansko (konstantno) senčenje

- Vrednost intenziteta svetlosti izračunata za jednu tačku poligona (najčešće centar poligona) koristi se za senčenje kompletnog poligona
- Ovaj model daje prihvatljiv prikaz ako je:
  - izvor svetla beskonačno daleka tačka (vrednost  $\vec{L} \cdot \vec{N}$  je konstantna za sve tačke poligona)
  - tačka posmatranja beskonačno daleka tačka (vrednost  $\vec{V} \cdot \vec{N}$  je konstantna za sve tačke poligona)
  - poligoni odgovaraju stvarnom objektu



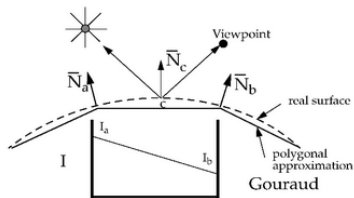
## Interpolirano (Guroovo) senčenje

- U svakom od temena definiše se vektor normale i izračunava vrednost intenziteta svetlosti
- Za svaku tačku poligona vrednost intenziteta svetlosti dobija se linearnom interpolacijom vrednosti u temenima
- Dobijena slika je realističnija od one dobijene konstantnim senčenjem



## Interpolirano (Guroovo) senčenje (2)

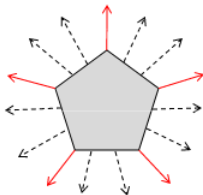
- Guroovim senčenjem mogu se **propustiti oblasti istaknute spekularne refleksije** jer se vrši interpolacija vrednosti u temenima
- U tački  $c$  bi spekularna komponenta osvetljenja trebalo da bude velika jer se pravac posmatranja poklapa sa odbojnim zrakom svetlosti, međtuim pošto je u temenima  $a$  i  $b$  spekularna komponenta mala, interpolacijom će se dobiti mala vrednost



- Kada objekat rotira, oblast istaknute spekularne refleksije može da “skače” (<https://math.hws.edu/graphicsbook/demos/c4/smooth-vs-flat.html>)
- Problem se može delimično popraviti (ali ne i u potpunosti ukloniti) povećanjem broja poligona

# Fongovo senčenje

- Za svako teme definišu se vektori normala
- Za svaku tačku poligona **vektor normale se računa interpolacijom vrednosti u temenu**, a vrednost intenziteta svetlosti dobija se na osnovu Fongovog modela osvetljenja za tako dobijen vektor normale



- Daje veoma dobre rezultate za oble i glatke objekte
- Računski je zahtevnija od prethodne dve metode

# Poređenje metoda senčenja

- Ravansko senčenje
  - 1 računanje normale po trouglu
  - 1 računanje boje po trouglu (Fongova jednačina)
- Guroovo senčenje
  - 1 računanje normale po temenu
  - 1 računanje boje po temenu (Fongova jednačina)
  - 1 interpolacija vrednosti boje po pikselu
- Fongovo senčenje
  - 1 računanje normale po temenu
  - 1 interpolacija vektora normale po pikselu
  - 1 računanje boje po pikselu (Fongova jednačina)

# Poređenje metoda senčenja





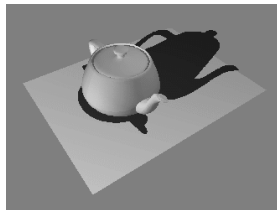
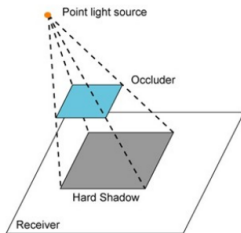
# Senke



- Senke čine slike realističnijim
- Za razliku od algoritama za utvrđivanje vidljivosti koji određuju koji se delovi površi mogu videti iz tačke posmatranja, algoritmi za senke određuju koji se delovi površi **mogu/ne mogu videti iz izvora svetla**
- Oni delovi površi koji se ne vide iz izvora svetla su **u senci**
- Postoje različite metoda za računanje senki

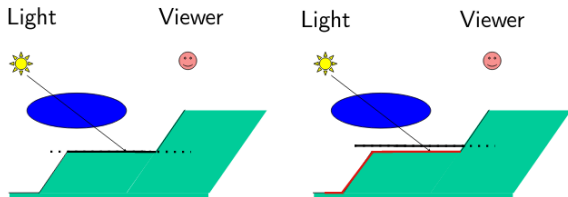
# Projektivne senke

- Senka tačkastog izvora svetla odgovara perspektivnoj projekciji poligona na površ osnove sa centrom projekcije u izvoru svetla
- Ovu vrstu senki nazivamo **projektivnim senkama**
- Projektivne senke crtamo kao nezavisne, ravne i tamne objekte
- Pogodne su za složene objekte koji bacaju senke na jednostavne površi
- Svaki objekat renderuje se dva puta:
  - u prvom prolazu renderuju se objekat sa uključenim bojama/teksturama
  - u drugom prolazu objekat se projektuje iz izvora svetla na ravan osnove i renderuje u potpunosti crnom bojom



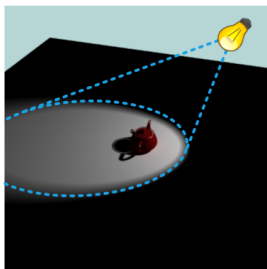
# Projektivne senke

- Ako je površ na koju se vrši projekcija složena, projekciju je potrebno odseći u odnosu na površ osnove
- To je moguće uraditi korišćenjem **stencil bafera**, kojim se maskiraju pozicije na kojima treba iscrtati senku
- Potencijalni problem: **z-konflikt** – projekcije objekata imaju istu vrednost dubine kao i ravan na koju se vrši projektovanje
- z-konflikt se može rešiti tako što se poligoni koji čine senku neznatno izdignu po z-koordinati, odnosno približe izvoru svetla



## Bafer senki (mapa senki)

- **Bafer senki** je z-bafer renderovan iz pozicije izvora svetla
- Svaki piksel bafera senki sadrži neku meru rastojanja zraka sa početkom u izvoru svetla do prvog preseka sa nekim objektom
- Utvrđivanje da li je tačka  $P$  osvetljena nekim izvorom svetla svodi se na:
  - transformisanje koordinate tačke  $P$  u prostor izvora svetla
  - proveru da li je ona dalja od izvora svetla nego što je odgovarajuća vrednost u mapi senki



## Bafer senki (mapa senki)

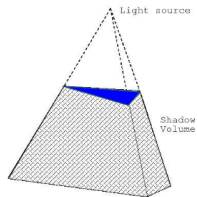
- Mapa senki može se popuniti u jednom prolazu kroz geometriju scene pre razmatranja vidljivosti iz oka kamere
- Prilikom renderovanja scene, tačka se renderuje da nije u senci ako je vidljiva i iz oka kamere i iz izvora svetla – **dvoprolazni z-bafer algoritam**
- Ako je kamera bliža sceni nego izvor svetla, onda mnogi pikseli ekrana mogu odgovarati tačno jednom pikselu mape senki što može dovesti do aliasinga



- Ako testiramo rastojanje objekta u odnosu na tačno jednu vrednost bafera senki, dobijamo binarnu vrednost (0 ili 1) što daje senke sa oštrim ivicama
- Moguće je rastojanje objekta testirati i u odnosu na susedne piksele i izračunati prosek dobijenih vrednosti (iz  $[0, 1]$ ), što daje meke senke

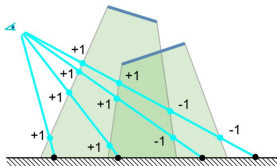
# Zapremine senki

- U realnosti, senka koju objekat baca čini **3D zapreminu**, a ne 2D oblast
- Za svaki par izvora svetla i objekta računa se 3D oblast u kojoj objekat zaklanja svetlost i ona se naziva **zapreminom senke**
  - najpre se računa silueta objekta iz perspektive izvora svetla: ona razdvaja deo objekta koji je vidljiv iz izvora svetla od onog koji nije
  - nakon toga se dobijena silueta projektuje duž zraka svetlosti i generišu se poligoni koji povezuju siluetu sa njenom projekcijom
- Poligoni senke se ne renderuju, već koriste za utvrđivanje da li su objekti u senci – tačka  $P$  je u senci u odnosu na izvor svetla  $L$  ako neka od zapremina senki  $V$  izračunata za izvor svetla  $L$  sadrži  $P$



# Zapremine senki

- Algoritam za određivanje senki:
  - za svaki objekat na sceni određuje se njegova zapremina senke
  - u prvom prolazu scena se renderuje korišćenjem ambijentalnog svetla
  - u drugom prolazu vrši se renderovanje zapremine senki tako da pikseli trouglova sa prednje strane inkrementiraju, a pikseli trouglova sa zadnje strane dekrementiraju vrednosti u stensil baferu – konačna vrednost u stensil baferu je veća od 0 ako je tačka unutar zapremine senke
  - u trećem prolazu scena se renderuje korišćenjem punog modela osvetljenja tako što vrednosti u stensil baferu maskiraju piksele u senci



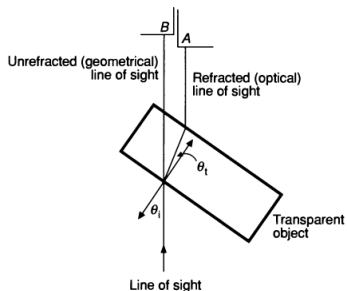
- Algoritam zasnovan na zapreminama senki ne pati od aliasing problema
- Nedostatak je taj što većina zapremina senki pokriva veliki broj piksela

# Transparentnost

- Neki objekti/materijali propuštaju deo svetlosti
- Obično se ta svetlost **prelama**, ali se zbog pojednostavljivanja računa to zanemaruje
- **Snelov zakon**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$$

gde su  $\theta_1$  i  $\theta_2$  upadni ugao i ugao prelamanja svetlosti, a  $\nu_1$  i  $\nu_2$  **indeksi prelamanja materijala** kroz koje svetlost prolazi





## Modeli transparentnosti koji ne razmatraju prelamanje

- **Interpolirana transparentnost** – neka je poligon  $P_1$  transparentan i neka se nalazi ispred neprozirnog poligona  $P_2$

$$I_\lambda = (1 - k_{t_1})I'_\lambda + k_{t_1}I''_\lambda$$

- $I'_\lambda$  je intenzitet svetlosti za poligon  $P_1$ , a  $I''_\lambda$  za poligon  $P_2$
- $k_{t_1}$  je **koeficijent transmisije** za poligon  $P_1$  (mera transparentnosti)
- **Filtrirana transparentnost** – poligon se tretira kao filter koji selektivno propušta različite talasne dužine

$$I_\lambda = I'_\lambda + k_{t_1} O_{t\lambda} I''_\lambda$$

- $O_{t\lambda}$  je **boja transparentnije** poligona  $P_1$  (može biti posebno zadavana za svaku vrednost  $\lambda$ )
- Nije isti rezultat ako se  $P_1$  nalazi ispred  $P_2$  kao kada se  $P_2$  nalazi ispred  $P_1$ !
- Ako se još neki transparentni poligoni nalaze ispred ovih poligona, onda se izračunavanje rekursivno poziva za poligone u redosledu od najudaljenijeg ka najbližem