



---

# Modelli di illuminazione e shading

---



- I modelli di illuminazione descrivono i fattori che determinano il colore di una superficie in un determinato punto, tramite
  - le interazioni tra le luci e le superfici
  - e tenendo conto delle proprietà delle superfici e della natura della radiazione luminosa incidente.

L'uso di un modello di illuminazione è necessario per ottenere una rappresentazione realistica delle superfici tridimensionali.



- I modelli di shading determinano **come** viene applicato il modello di illuminazione e quali argomenti prende in input per determinare il colore di un punto sulla superficie.

Alcuni modelli di shading richiamano il modello di illuminazione per ogni pixel nell'immagine, altri invece richiamano il modello di illuminazione solo per alcuni pixel dell'immagine e colorano i rimanenti pixel per interpolazione.



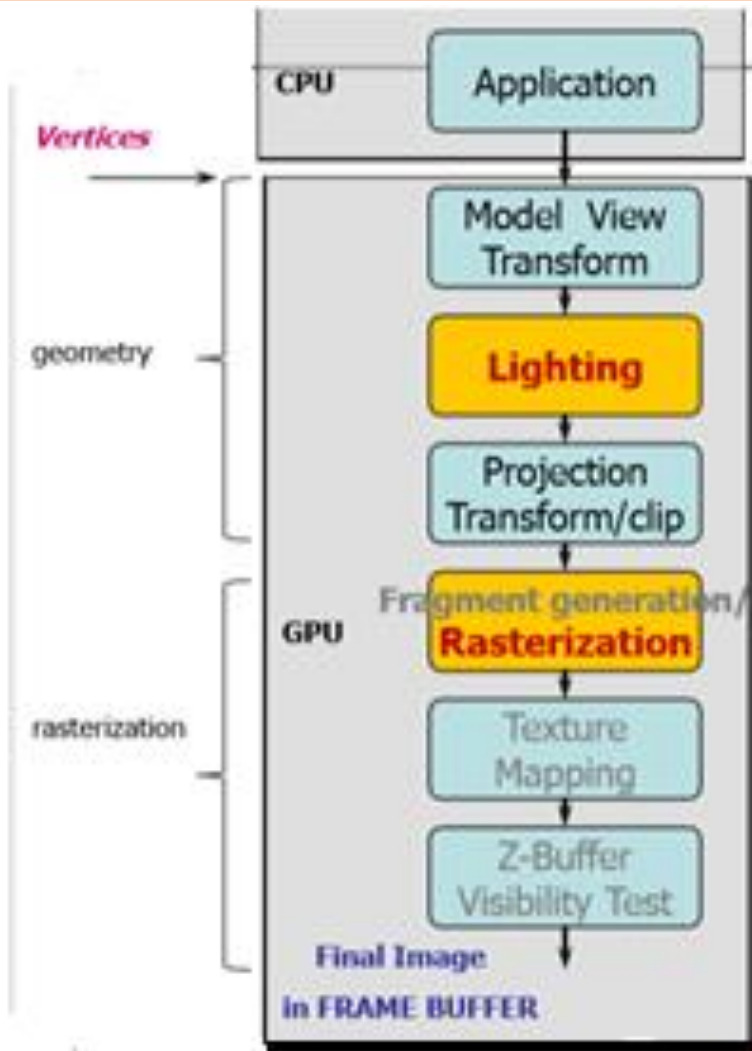
# *Lightening vs Shading*

---

**Lightening** (operazione per vertex) : processo di calcolo dell'intensità luminosa (cioè della luce in uscita) in un particolare punto 3D, solitamente su una superficie., in funzione delle caratteristiche della luce e del materiale

**Shading** (operazione per fragment): assegna il colore al pixel, (specifica come la luce viene usata per colorare il pixel).

---

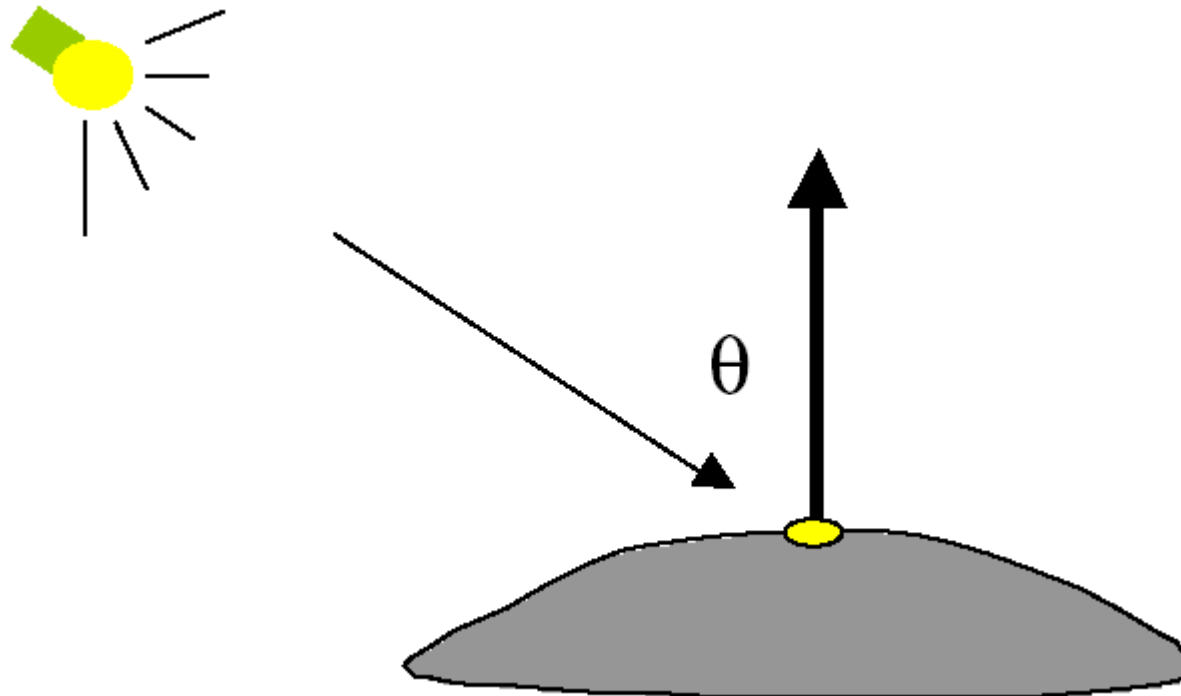


Il calcolo dell'**illuminazione** viene fatto in coordinate di Vista, prima di applicare la trasformazione di Proiezione che porta nelle coordinate di clip e potrebbe alterare le normali

Lo shading avviene nel rasterization stage

- *Modelli di illuminazione locale:*

- Un singolo punto sulla superficie e della sorgente luminosa che lo illumina direttamente.
- Il resto della scena è illuminato da una luce ambientale.
- Non tiene conto delle riflessioni all'interno dell'ambiente.

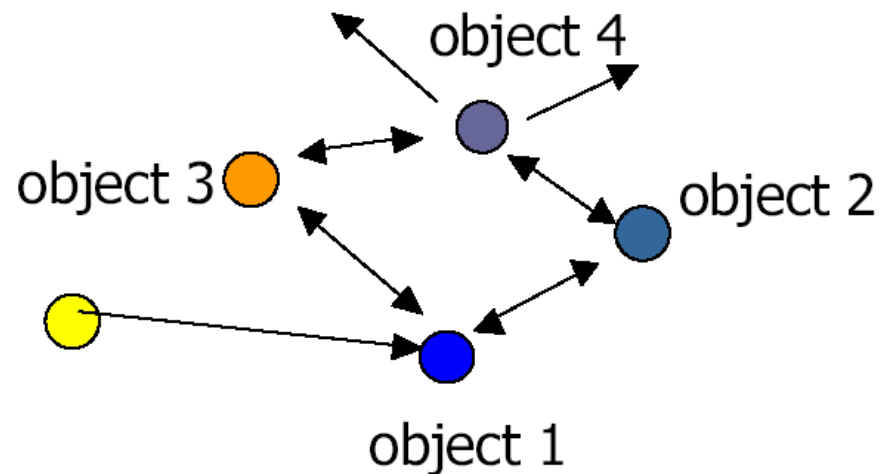




## •Modelli di illuminazione globale:

Calcolano il colore in un punto in termini

- della luce emessa direttamente dalle sorgenti luminose
- della luce che raggiunge il punto dopo la riflessione e la trasmissione della luce dalla propria e dalle altre superfici che si trovano nell'ambiente circostante.





- 
- A livello di **modello fisico esatto**, il modo in cui la radiazione luminosa viene riflessa da una superficie dipende da:
  - **lunghezza d' onda** della radiazione luminosa;
  - **angolo di incidenza** tra superficie e radiazione luminosa;
  - **natura e microstruttura superficiale** del materiale irradiato;
  - altre **proprietà fisiche** del materiale irradiato, quali permeabilità e conduttività.
-





## *Interazione tra luce e materiali*

---

- Quando la luce colpisce la superficie, una parte è **assorbita**, e una parte è **riflessa**.
  - L'**opacità** di una superficie è una misura di **quanta luce penetra attraverso la superficie**. Un valore di opacità pari a 1 ( **$\alpha = 1$** ) corrisponde ad una superficie completamente opaca. Una superficie con opacità 0 ( **$\alpha = 0$** ) è trasparente: tutta la luce passa attraverso ad essa.
-



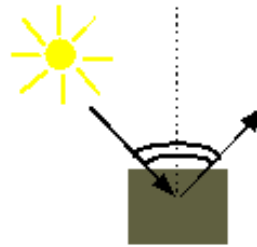
- 
- A seconda della sua opacità, la superficie di un materiale può essere:
  - **Trasparente**: se trasmette la luce e **attraverso di essa è possibile osservare un oggetto**. Il quarzo e la calcite normalmente sono trasparenti. La maggior parte delle gemme ha un'elevata trasparenza e viene valutata dal punto di vista del valore economico proprio in base al loro grado di trasparenza.
  - **Traslucido**: se **trasmette la luce diffondendola ma non è trasparente**. Sebbene una superficie traslucida permetta la trasmissione della luce, non consentirà l'osservazione nitida di un oggetto osservato attraverso di essa.
  - **Opaco**: se è impenetrabile alla luce visibile, anche sui bordi esterni più sottili. La maggior parte dei minerali metallici è opaca.
-



# Superfici speculari

---

1. Le **superfici speculari** appaiono brillanti poiché la maggior parte della luce riflessa è diffusa in un intervallo molto stretto di direzioni attorno alla direzione di riflessione.



(a)

Gli **specchi** sono superfici **perfettamente speculari**, la luce viene riflessa nella direzione di riflessione.

La luce incidente può essere parzialmente assorbita, ma tutta la luce riflessa emerge secondo un singolo angolo di riflessione, in accordo alla regola secondo cui l'angolo di incidenza della radiazione luminosa è uguale all'angolo di riflessione.

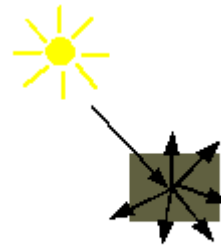
---



# Superfici diffusive

---

- Le **superfici diffusive** sono caratterizzate dal fatto che la luce riflessa è diffusa in tutte le direzioni. In particolare, le superfici perfettamente diffusive emettono luce ugualmente in tutte le direzioni, (terreno, muro dipinto, etc)



(b)

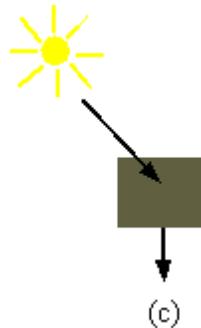
---



# Superfici traslucide

---

- Le **superfici traslucide** lasciano penetrare parte della luce, che poi riemerge da un altro punto dell'oggetto. Questo processo, chiamato rifrazione, caratterizza i materiali quali vetro e acqua. Una parte della luce incidente può anche essere riflessa dalla superficie.

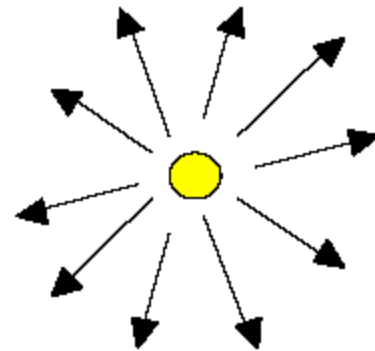




# Sorgenti luminose

---

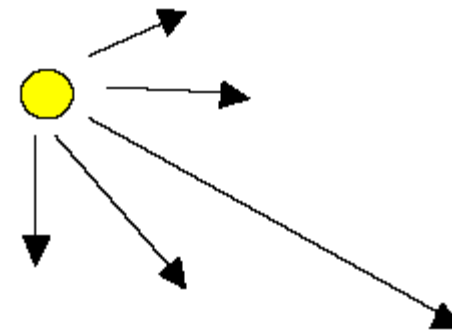
- Una sorgente *point light* ha una posizione nello spazio, ma non ha nè un volume nè un'area. Emette luce ugualmente in ogni direzione.



Point light

---

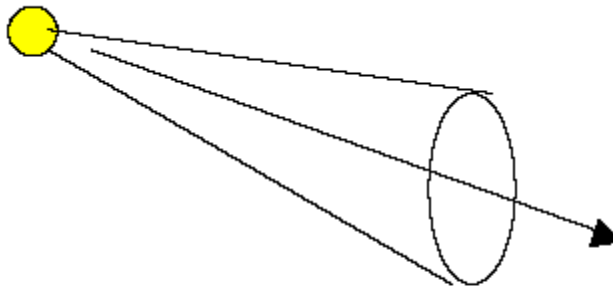
- Una sorgente luminosa di tipo direzionale, *directional light*, non ha una posizione nello spazio, può essere pensata come posizionata all'infinito. La direzione della luce emessa è costante.



Directional light

---

- **Spot light**: è una sorgente luminosa puntuale, che emette luce diversamente in ogni direzione.
- E' definita mediante una direzione ed un angolo: il volume illuminato forma un cono infinito.

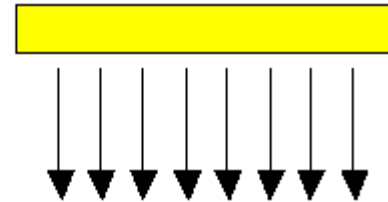


Spot light

---



- **Area light**: è una sorgente puntuale caratterizzata da un'area.



Area light

---



# Modelli di illuminazione

---

- Ci sono tre differenti classi di modelli di illuminazione:
  - Luce ambientale
  - Riflessione diffusa
  - Riflessione speculare

Questi tre modelli messi assieme danno luogo al **modello di illuminazione di Phong**.

L'unico modello fisico modellato dal modello di illuminazione di Phong è la riflessione diretta. Le equazioni che vedremo riescono solo a simulare il comportamento di materiali opachi e non di materiali trasparenti o semitrasparenti.

---



# Luce emissiva

---

- Il modello di illuminazione più semplice, ma anche il meno realistico è il seguente:
- Ogni oggetto è dotato di una **propria intensità luminosa, senza che vi siano fonti esterne di illuminazione.**
- Il risultato è quello di avere un mondo di sagome monocromatiche (a meno che i singoli poligoni di un poliedro non abbiano diversi colori)

In termini matematici un modello di illuminazione può essere espresso mediante una equazione di illuminazione, che descrive come ogni punto dell'oggetto sia illuminato in funzione della sua posizione nello spazio.

---



- Questo modello elementare può essere descritto dall'**equazione**

$$I = k_i$$

dove  $I$  è l'intensità risultante e  $k_i$  è la luminosità intrinseca dell'oggetto.

- Non essendoci termini dipendenti dalla posizione del punto si può calcolare una sola volta per tutto l'oggetto.



- 
- Nella realtà, parte degli oggetti, che non sono illuminati direttamente dalla luce, non appaiono completamente neri.
  - Queste parti sono illuminate dalla illuminazione globale, cioè dalla **luce riflessa dall'ambiente circostante**.
  - Questa luce viene approssimata da una luce costante detta **luce ambientale**.
  - Questo tipo di componente viene simulata supponendo che l'oggetto sia illuminato da una sorgente di luce diffusa e non direzionale, prodotto del riflesso della luce sulle molteplici superfici presenti nell'ambiente.
-



- Se supponiamo che la luce dell'ambiente colpisce ugualmente tutte le superfici da tutte le direzioni, allora l'equazione dell'illuminazione diventa:

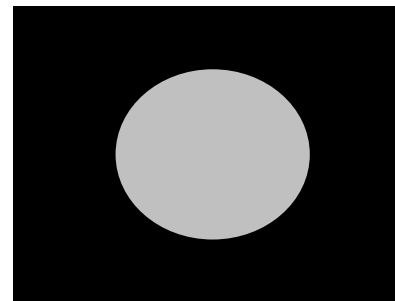
$$I = I_a k_a$$

dove  $I_a$  è l'intensità della luce dell'ambiente, supposta costante per tutti gli oggetti.

La quantità di luce dell'ambiente riflessa dalla superficie dell'oggetto è determinata da  $k_a$ , **coefficiente di riflessione ambientale**, che varia tra 0 ed 1.

Rappresenta una frazione della luce ambientale che viene riflessa dalla superficie.

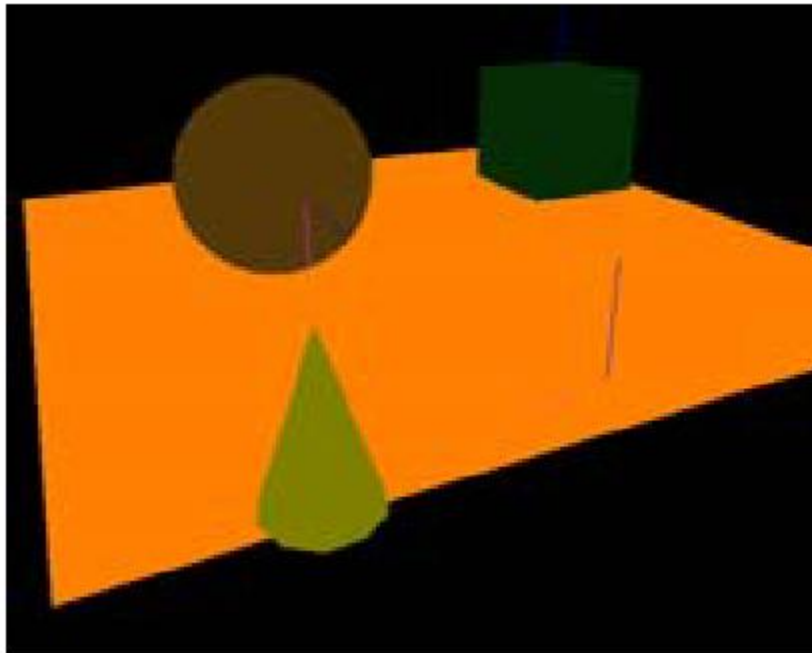
Il coefficiente di riflessione ambientale è una proprietà che caratterizza il materiale di cui la superficie è fatta.





Increasing  $k_a$

- Gli oggetti illuminati da sola luce ambientale sono ancora uniformemente illuminati su tutta la loro superficie.





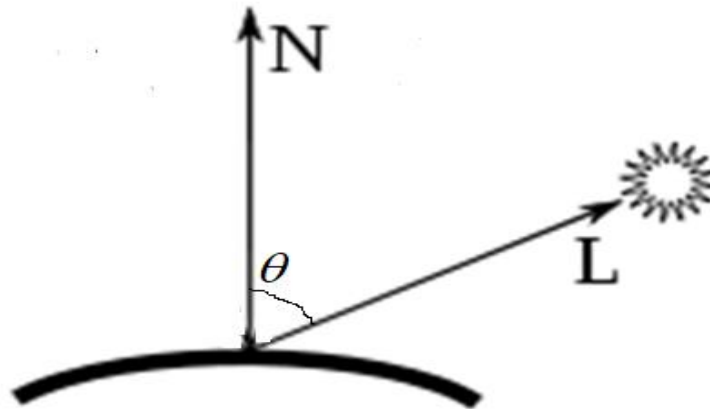


# Riflessione diffusa

---

- Supponiamo di posizionare nella scena una sorgente luminosa puntiforme (point light source) i cui raggi sono emessi uniformemente in tutte le direzioni. In questo caso la luminosità di ogni singolo punto dipenderà dalla sua distanza dalla sorgente luminosa e dalla direzione in cui i raggi incidono rispetto alla superficie.
  - La riflessione diffusa, detta anche riflessione Lambertiana, è caratteristica dei materiali opachi, tipo il gesso.
-

- Queste superfici appaiono ugualmente luminose da qualunque punto di vista vengano osservate: non modificano la loro apparenza al variare del punto di vista poiché riflettono la luce uniformemente in tutte le direzioni.
- La luminosità dipende solo dall'angolo  $\theta$  formato dalla direzione del raggio luminoso (L) e la normale alla superficie nel punto di incidenza (N).





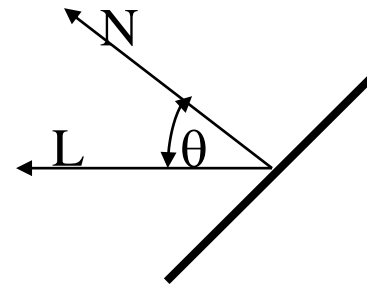
- Per le superfici lambertiane la quantità di luce vista dall'osservatore è indipendente dalla posizione dell'osservatore ed è proporzionale al  $\cos \theta$ , angolo di incidenza della luce.
- L'equazione dell'illuminazione diffusa è:

$$I = I_p k_d \cos(\Theta)$$

Per contribuire all'illuminazione del punto, l'angolo  $\theta$  deve avere un valore compreso tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , in altre parole un punto della superficie non è illuminato da sorgenti luminose che stanno dietro di esso.

- $I_p$  è l'intensità della sorgente luminosa puntiforme.
- $k_d$  è il coefficiente di riflessione diffusiva ed è una costante che varia tra 0 ed 1 e varia da un materiale all'altro.
- Se i vettori  $N$  ed  $L$  sono stati normalizzati, allora l'equazione dell'illuminazione diventa:

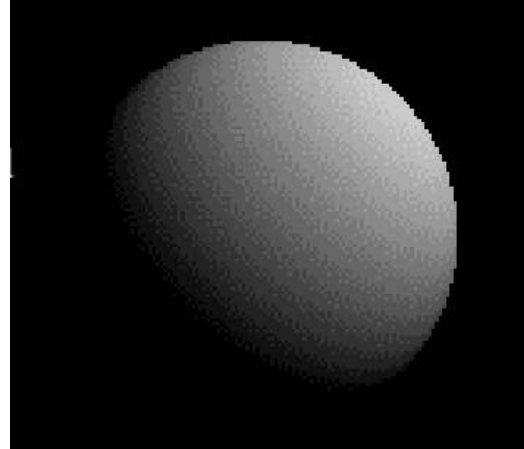
$$I = I_p k_d \overline{N} \bullet \overline{L}$$





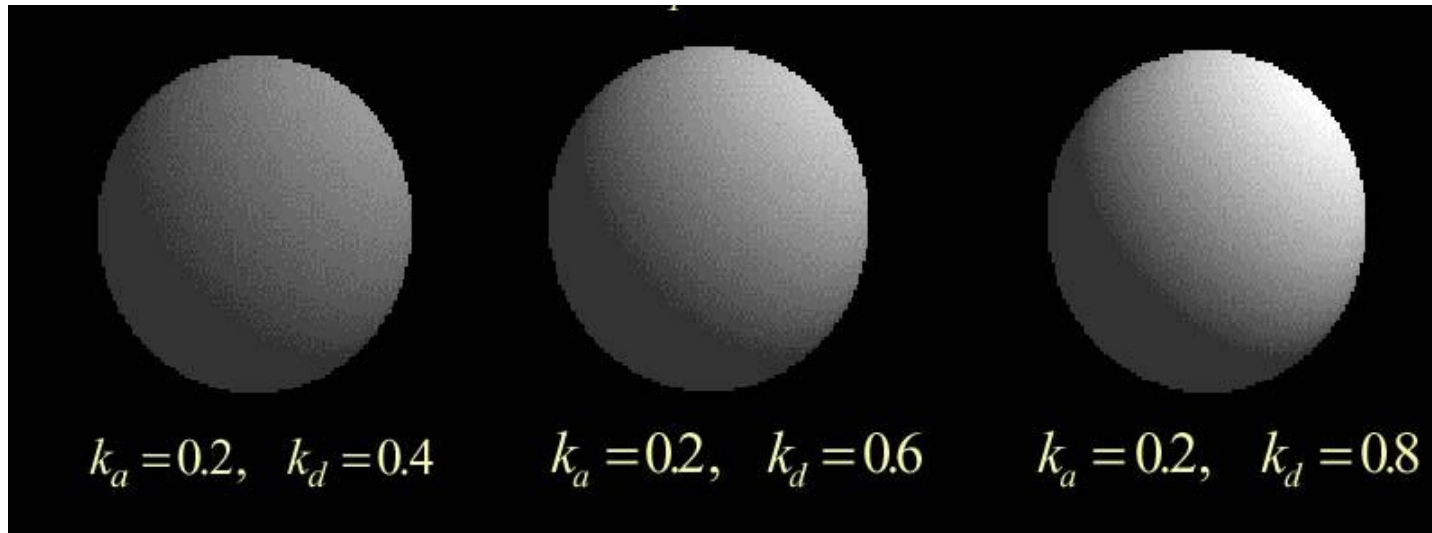
- Se una sorgente di luce puntiforme è sufficientemente distante dagli oggetti, essa forma lo stesso angolo con tutte le superfici che condividono la stessa normale.
- In questo caso la luce è detta *sorgente luminosa direzionale* ed  $L$  è costante per la sorgente luminosa.

- Con la riflessione diffusa, la parte della superficie non illuminata dalla luce è nera.
- E' come se l'oggetto fosse illuminato da una torcia.



- Aggiungendo il termine dell'illuminazione ambientale all'equazione dell'illuminazione della riflessione diffusa abbiamo:

$$I = I_a k_a + I_p k_d (\bar{N} \bullet \bar{L})$$





# Luce diffusa e ambientale







# Attenuazione della sorgente luminosa

---

- Per tener conto dell'attenuazione dell'intensità dell'illuminazione all'aumentare della distanza si introduce anche un **fattore di attenuazione**,  $f_{att}$  *inversamente proporzionale alla distanza della sorgente di luce dalla superficie*

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

Questo fattore può essere essenziale per distinguere nella scena due superfici parallele dello stesso materiale che nella scena si sovrappongono: senza bordo di separazione le due superfici sarebbero indistinguibili.

---



## Scelte di $f_{att}$

---

- $f_{att} = 1/(d_L)^2$
  - *Se la luce è molto lontana  $1/(d_L)^2$  non varia molto.*
  - *Se è molto vicina, varia vistosamente, assegnando colori considerevolmente differenti a superfici caratterizzate da uno stesso angolo tra N ed L.*
  - *Sebbene questo comportamento sia corretto per una sorgente luminosa puntiforme, nella realtà gli oggetti non sono illuminati da una sorgente puntiforme.*
-



# Fattore di attenuazione

---

- Una tipica formulazione abbastanza empirica è

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

- dove le costanti  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  sono definite dall'utente ed associate alla sorgente luminosa.

Il termine fondamentale dipendente dal quadrato della distanza  $d_L^2$  è bilanciato dagli altri, soprattutto da  $c_1$ , che nel caso in cui la luce sia molto vicina, prevengono il denominatore dal divenire molto piccolo.

L'espressione è comunque limitata ad 1 per evitare che diventi un fattore di amplificazione.

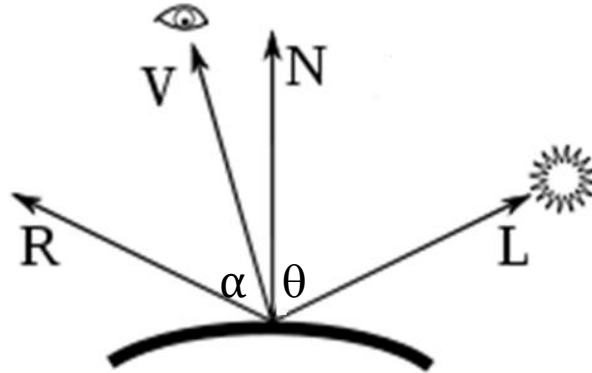
---



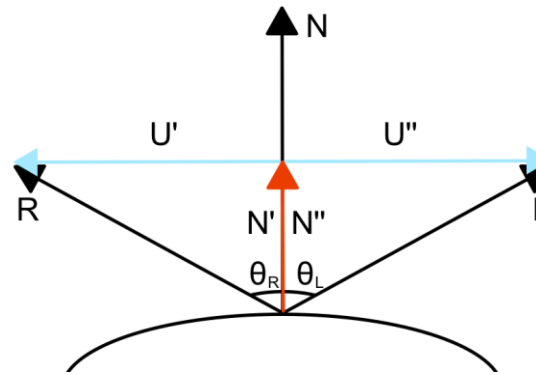
# Riflessione speculare

---

- Se la superficie di un oggetto **non è completamente opaca**, la luce non viene riflessa ugualmente in tutte le direzioni.
  - Data una superficie totalmente lucida, come uno specchio, **la luce viene riflessa nella direzione di riflessione R che, geometricamente, non è altro che L (direzione di incidenza della luce) riflessa rispetto ad N (normale alla superficie)**
-



- L'osservatore può vederla solo se la direzione di vista è allineata con la riflessione, cioè solo se l'angolo  $\alpha$  formato tra la direzione di vista  $V$  e la direzione di riflessione  $R$  è nullo.



Il raggio di luce incidente **L**, il raggio riflesso **R** e la **N** normale sulla superficie dello specchio giacciono tutti sullo stesso piano.

**L'angolo di riflessione  $\theta_R$  è uguale all'angolo di incidenza della luce  $\theta_L$ .** Entrambi gli angoli sono misurati rispetto al normale allo specchio. Il raggio riflesso e il raggio incidente si trovano sui lati opposti della normale.

Dalla legge di rifrazione sappiamo che:

$$\theta_R = \theta_L$$

che si può scrivere come:

$$R \cdot N = N \cdot L$$

Dalla figura si può notare che:

$$U' = -U''$$

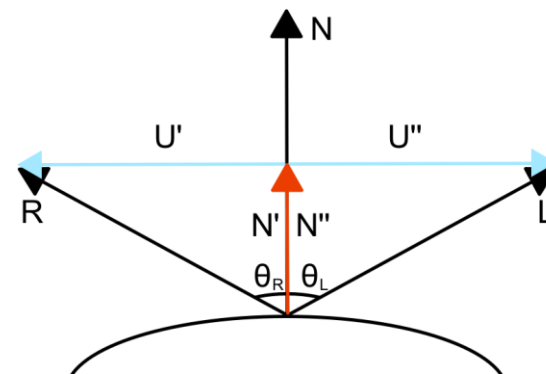


$U'$  è la differenza tra il vettore di riflessione  $R$  e la sua proiezione sulla normale.

$U''$  è la differenza tra il vettore incidente luminoso  $L$  e la sua proiezione sulla normale.

$$U' = R - (R \cdot N)N$$

$$U'' = L - (L \cdot N)N$$



Per la relazione  $U' = -U''$ , si può scrivere che

$$R - (R \cdot N)N = -(L - (L \cdot N)N)$$

Ma  $(R \cdot N)N = (L \cdot N)N$ , quindi si ha:

$$R - (L \cdot N)N = -(L - (L \cdot N)N)$$

$$\mathbf{R} = 2(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N} - \mathbf{L}$$

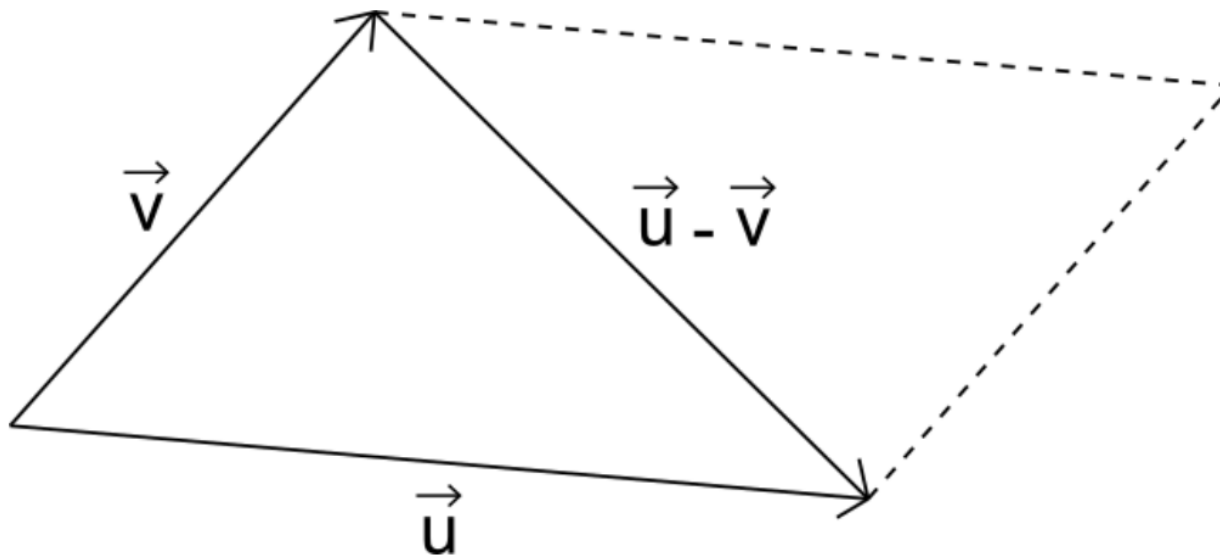


Ricordiamo che

### Differenza tra due vettori

Dati due vettori  $u$  e  $v$ , calcoliamone la loro differenza con il metodo del parallelogramma,

Il vettore  $u-v$  è la diagonale del parallelogramma che ha la coda nella punta di  $v$  e la punta nella punta di  $u$

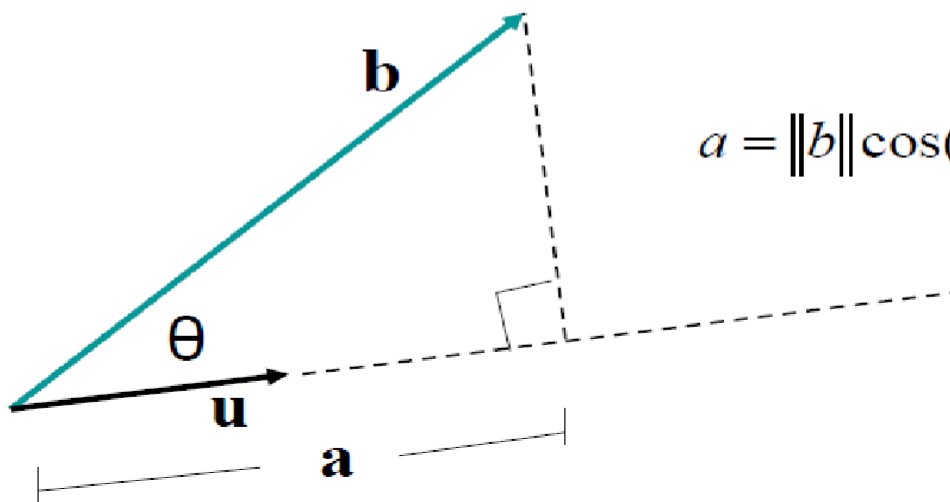






# Proiezione di un vettore su un vettore ortogonale

Se  $\|u\| = 1$ , la lunghezza della proiezione di un vettore  $b$  su  $u$  è data da :



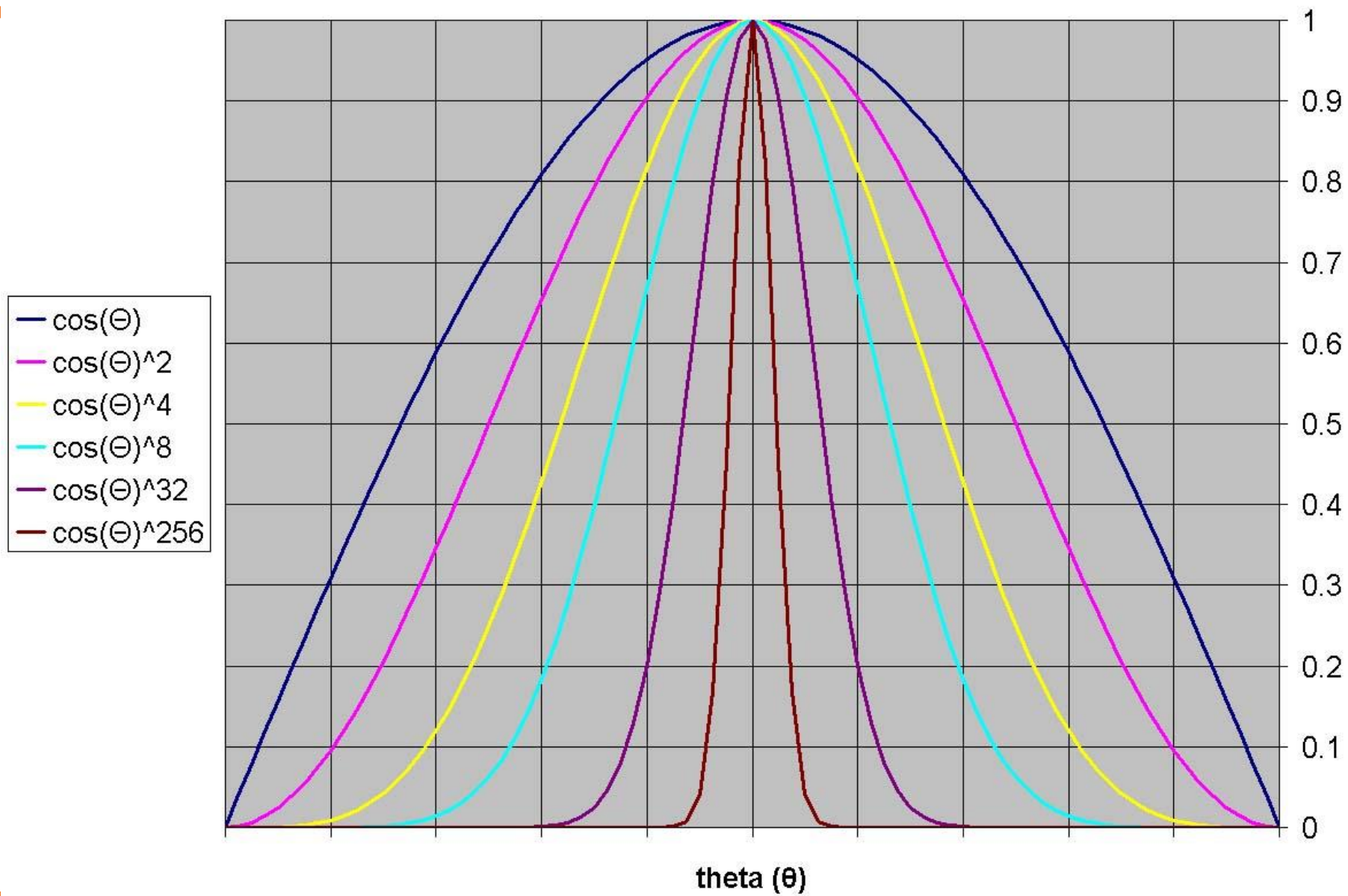
$$a = \|b\| \cos(\theta) \frac{u}{\|u\|} = \langle u, b \rangle u$$



- 
- Phong ha anche sviluppato un modello di illuminazione per riflettori non perfetti, come per esempio un oggetto di plastica o di cera.
  - Il modello assume che si abbia riflessione massima per  $\alpha=0$  e che essa decada rapidamente all'aumentare di  $\alpha$ .
-



- 
- Un tale decadimento viene approssimato da  $\cos^n \alpha$
  - dove  $n$  viene detto coefficiente di riflessione speculare del materiale.
  - Il valore di  $n$  può variare tra 1 e valori molto alti (anche superiori al 100), secondo il tipo di materiale che si vuole simulare.
  - Una superficie a specchio sarebbe teoricamente rappresentata da  $n=\infty$
-





- 
- All' aumentare di  $n$  la luce riflessa si concentra in una regione sempre più stretta centrata sull'angolo di riflessione.
  - Al limite, quando  $n$  tende all'infinito, il comportamento simulato è esattamente quello di uno specchio.
  - I valori di  $n$  compresi nell'intervallo  $[100, 500]$  corrispondono approssimativamente alle superfici metalliche.
  - I valori inferiori a 100 corrispondono ai materiali che mostrano un'ampia zona di massima lucentezza.
-



- L'equazione dell'illuminazione diventa:

$$I = I_a k_a + f_{att} I_p (k_d \cos \theta + k_s (\cos \alpha)^n)$$

$k_s$  coefficiente di riflessione speculare, che varia tra 0 ed 1  
e dipende dal particolare materiale



# Modello di Illuminazione di Phong

---

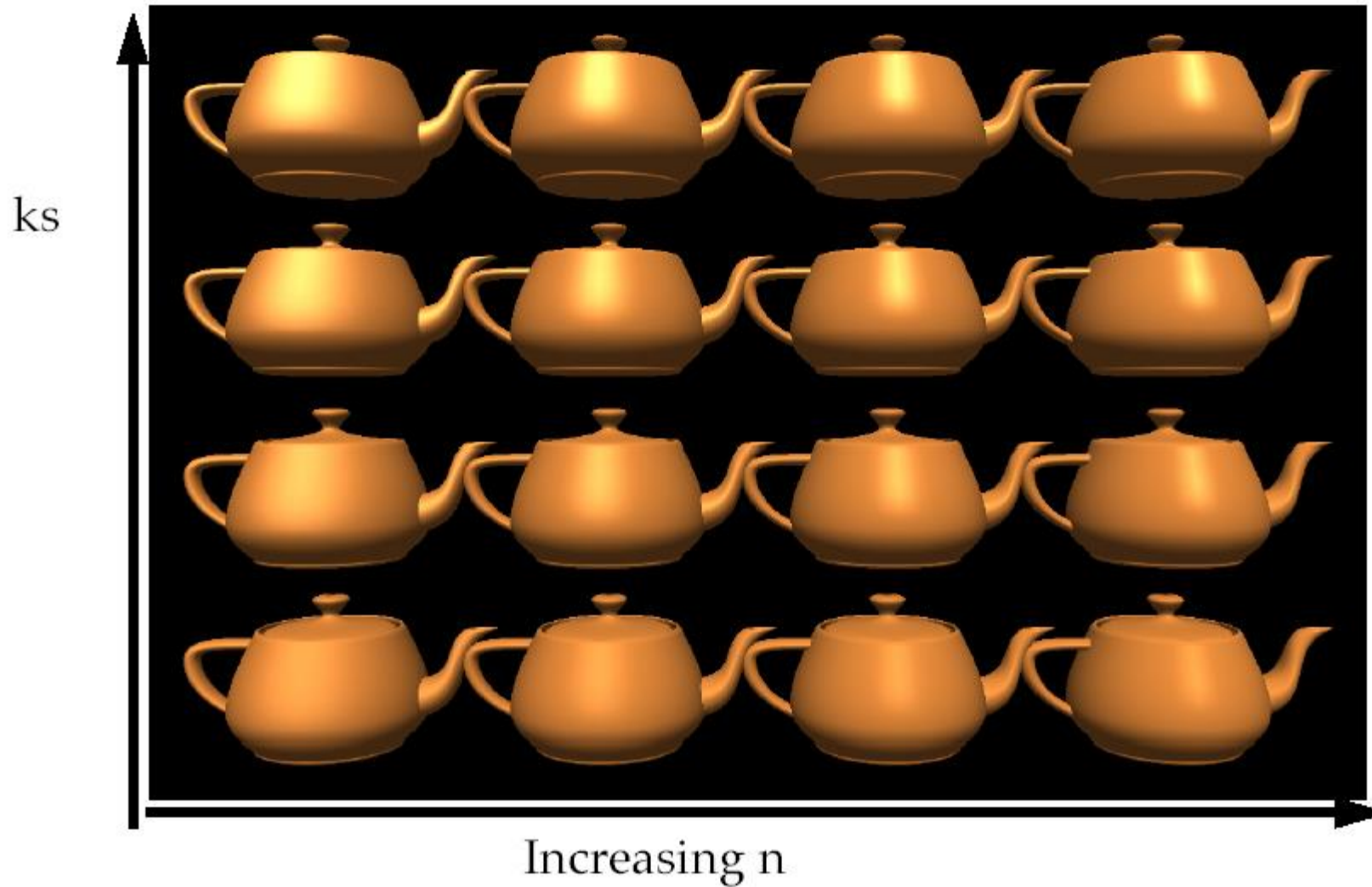
- Se i vettori  $R$  e  $V$  sono normalizzati, l'equazione si può scrivere come:

$$I = I_a k_a + I_p k_d (\bar{N} \bullet \bar{L}) + I_p k_s (\bar{R} \bullet \bar{V})^n$$

Questo è il modello completo dell'equazione dell'illuminazione diretta.

---

# Phong Model







- 
- Le caratteristiche fondamentali del modello di Illuminazione di Phong sono:
  - Le sorgenti luminose sono puntiformi;
  - Le componenti speculari e diffusiva sono modellate solo in modo locale;
  - La componente dell'ambiente viene modellata come costante, senza tener conto delle inter-riflessioni tra gli oggetti della scena della radiazione luminosa.
-



# Sorgenti di luce multiple

---

- Nel caso nella scena vi sia più di una luce, basta sommare i termini per ogni sorgente luminosa. Così se abbiamo  $m$  sorgenti luminose l'equazione dell'illuminazione diventa:

$$I = I_a k_a + \sum_{1 \leq i \leq m} I_{pi} [k_d (\bar{N} \cdot \bar{L}_i) + k_s (\bar{R}_i \cdot \bar{V})^n]$$

E' possibile che il valore di  $I$  superi il valore di pixel massimo visualizzabile. Ciò può essere evitato con una scelta appropriata di  $f_{att}$  e con una selezione appropriata del materiale.

Dividere il valore di ogni pixel per il valore massimo di  $I$ .

---



# Oggetti colorati

---

- Il colore degli oggetti viene definito definendo opportunamente i coefficienti di riflessione diffusa e ambientale.
- Bisogna considerare tre equazioni dell'illuminazione, una per ogni componente del modello del colore considerato:

$$I_r = I_a k_{ar} + I_p [k_{dr} (\overline{N} \bullet \overline{L}) + k_s (\overline{R} \bullet \overline{V})^n]$$

$$I_g = I_a k_{ag} + I_p [k_{dg} (\overline{N} \bullet \overline{L}) + k_s (\overline{R} \bullet \overline{V})^n]$$

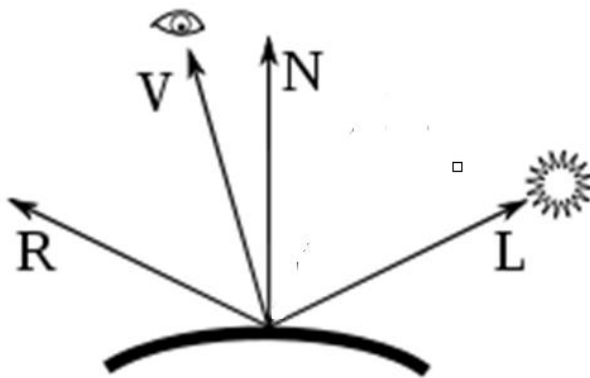
$$I_b = I_a k_{ab} + I_p [k_{db} (\overline{N} \bullet \overline{L}) + k_s (\overline{R} \bullet \overline{V})^n]$$

---



# Modello di Illuminazione di Blinn-Phong

Nel modello di illuminazione di Phong, è necessario ricalcolare continuamente il **prodotto scalare** tra **la direzione di vista (  $V$  )** e **il raggio di una sorgente luminosa (  $L$  ) riflessa (  $R$  )** su una **superficie**.

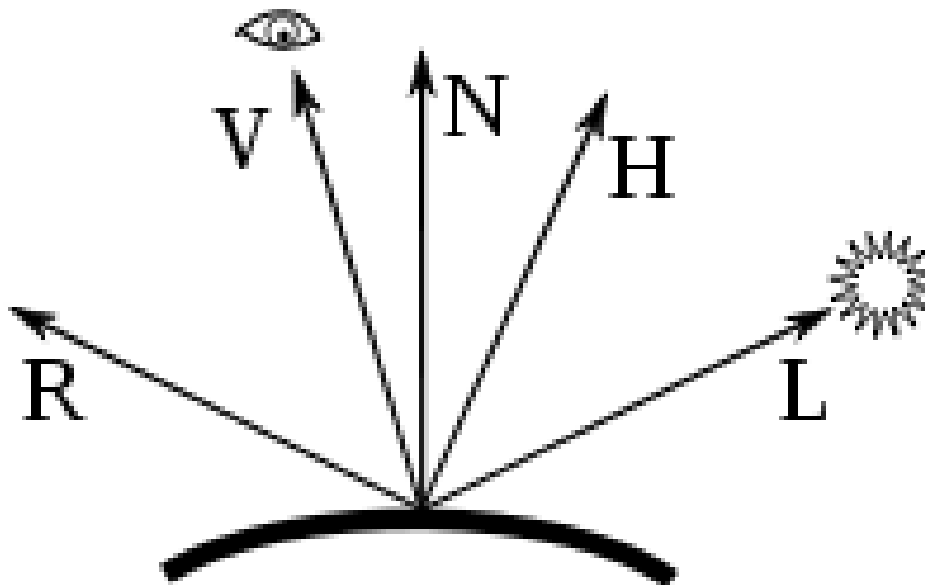


ed abbiamo visto il calcolo della direzione di riflessione  $R$  è oneroso dal punto di vista computazionale.



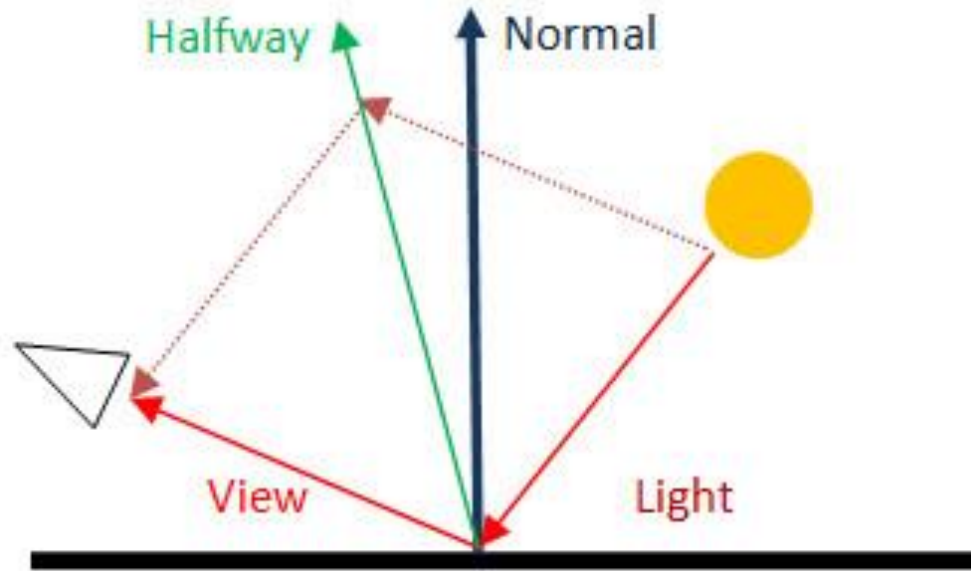
Blinn ha proposto una variante del modello di illuminazione di Phong, solo per quanto riguarda l'aspetto della riflessione speculare della luce.

**Halfway vector:** un vettore unitario esattamente a metà strada tra la direzione della vista e la direzione della luce



Quando la direzione di vista **V** è perfettamente allineata con il vettore direzione di riflessione, il vettore **H** (**halfway vector**) si allinea perfettamente con il vettore normale. Più la direzione di vista **V** è vicina alla direzione di riflessione, maggiore è il contributo speculare.

$$H = \frac{L + V}{\|L + V\|}$$



Il contributo della componente speculare della luce viene espresso in termini del prodotto scalare tra la direzione del vettore normale  $N$  (normalizzato) alla superficie nel punto di incidenza della luce e il vettore Halfway normalizzato. Se indichiamo con  $\beta$  l'angolo formato tra  $N$  ed  $H$ , il contributo della luce speculare diventa:

$$I_p k_s (N \cdot H)^n = I_p k_s \cos(\beta)^n$$



## Il modello di illuminazione di Phong-Blinn completo diventa:

---

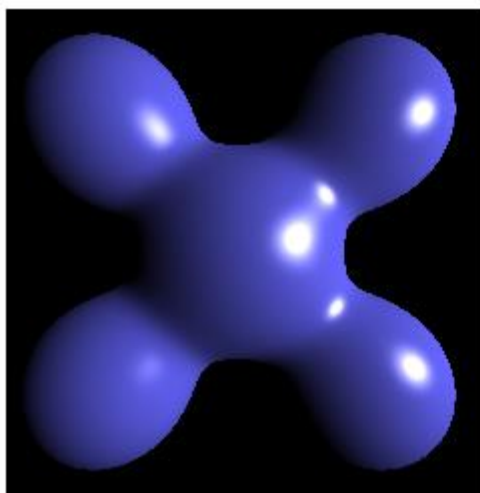
$$I = I_a k_a + f_{att} I_p (k_d (L \cdot N) + k_s (N \cdot H)^{n_\beta})$$

Considerando che l'angolo tra il vettore  $H$  e la normale  $N$  alla superficie è probabilmente **più piccolo dell'angolo tra  $R$  e  $V$**  usato nel modello di Phong (a meno che la superficie non sia vista da un angolo molto ripido per il quale è probabile che sia più grande), poiché Phong usa  $(R \cdot V)^n$ , se scegliamo  $n_\beta > n$ , allora  $(N \cdot H)^{n_\beta}$  si avvicina al valore di Phong.

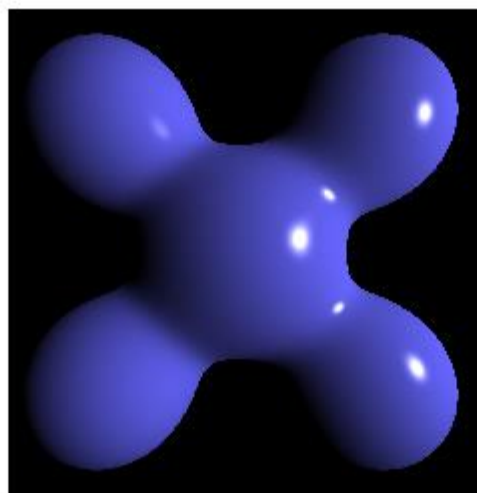
Per superfici illuminate frontalmente (riflessi speculari su superfici rivolte verso lo spettatore), la scelta  $n_\beta = 4n$ , si tradurrà in punti salienti speculari che corrispondono molto da vicino ai corrispondenti riflessi Phong.

---

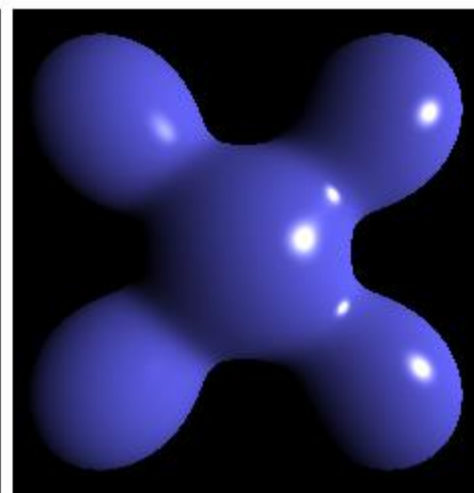
Tuttavia, mentre i riflessi di Phong sono sempre rotondi per una superficie piana, i **riflessi di Blinn – Phong diventano ellittici** quando la superficie viene **vista da un angolo ripido**. Questo può essere paragonato al caso in cui il sole si riflette nel mare vicino all'orizzonte o in cui una luce di strada lontana si riflette nel pavimento bagnato, dove il riflesso sarà sempre molto più esteso in verticale che in orizzontale.



**Blinn – Phong**

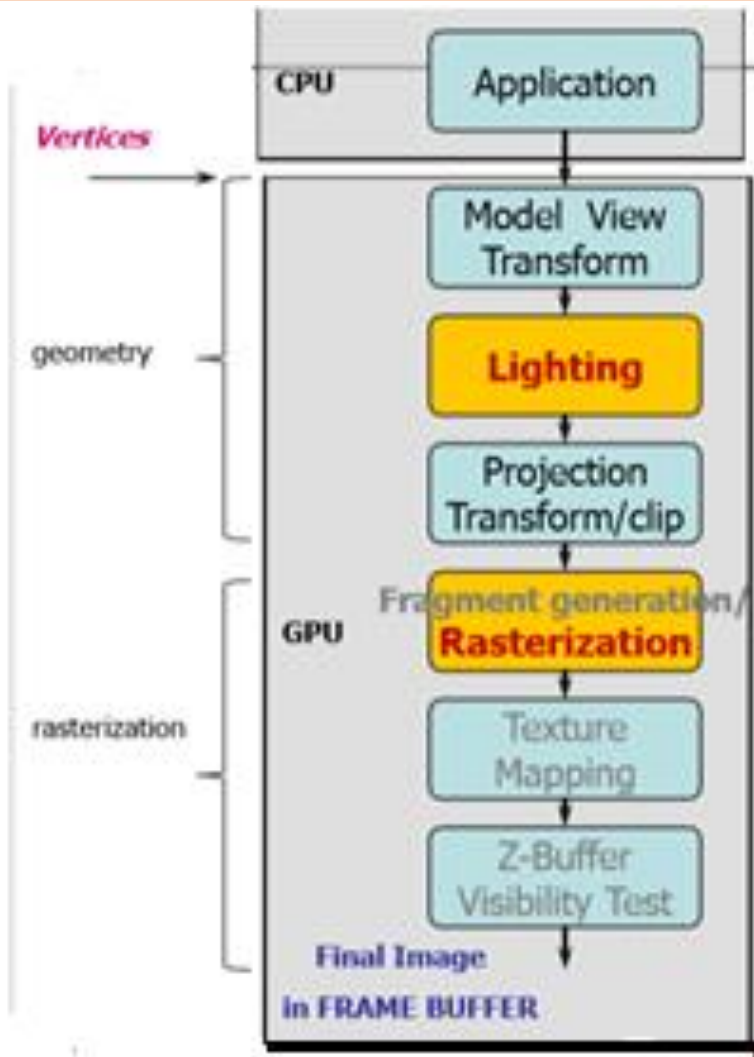


**Phong**



**Blinn – Phong**  
(higher exponent)





Il calcolo dell'**illuminazione** viene fatto in coordinate di Vista, prima di applicare la trasformazione di Proiezione che porta nelle coordinate di clip e potrebbe alterare le normali

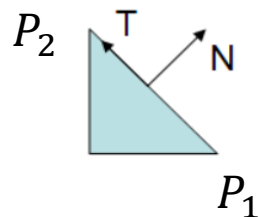
Lo shading avviene nel rasterization stage



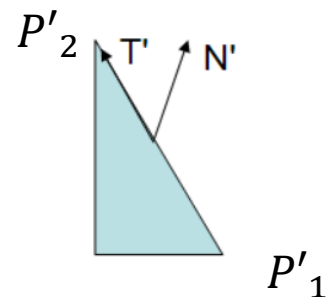
# Osservazione sulla trasformazione delle Normali:

- Le posizioni dei vertici in coordinate dell'oggetto vengono trasformate in coordinate di vista tramite la premoltiplicazione per la matrice

- $\mathcal{M} = ModelView = View * Model$



Se la matrice  $\mathcal{M}$  contiene una scala non uniforme



Il vettore normale  $N$  in un punto è perpendicolare alla direzione della tangente  $T$  in quel punto.

$$T = P_2 - P_1$$

$$\mathcal{M}T = \mathcal{M}(P_2 - P_1) = \mathcal{M}P_2 - \mathcal{M}P_1$$

$$T' = P'_2 - P'_1$$

La matrice  $\mathcal{M}$  preserva le tangenti, ma la normale trasformata non è più perpendicolare alla superficie



Vogliamo individuare una matrice  $G$  da applicare al vettore normale, in maniera tale che dopo la trasformazione in coordinate di vista continui ad essere perpendicolare alla superficie, cioè tale che  $N' \cdot T' = 0$

$$N' \cdot T' = (GN) \cdot (\mathcal{M}T) = 0$$

$$(GN)^T (\mathcal{M}T) = N^T G^T \mathcal{M}T = 0 \text{ Se } G^T \mathcal{M} = I \text{ allora } \longrightarrow N^T T = N \cdot T = 0$$

La matrice  $G$  è tale che  $G^T \mathcal{M} = I$ , da cui segue che

$$G = (\mathcal{M}^{-1})^T$$



# Shading

---

- Con il termine di shading si intende il processo di determinare il colore di tutti i pixel che ricoprono una superficie usando un modello di illuminazione.
-



# Metodi

---

- Il metodo più semplice consiste nel
  - Determinare per ogni pixel la superficie visibile
  - Calcolare la normale alla superficie in quel punto.
  - Valutare l'intensità della luce ed il colore usando un modello di illuminazione.

Questo modello di shading è molto costoso

---



# Modelli di shading

---

- Adesso descriveremo i modelli di shading più efficienti per superfici definite da poligoni o da mesh di poligoni.
  - I modelli di shading forniscono una tecnica per determinare i colori di tutti i pixel che ricoprono una superficie usando un appropriato modello di illuminazione.
  - In generale gli oggetti più complessi sono rappresentati mediante mesh poligonali.
-



# Constant shading

---

- Il modello di shading più semplice per un poligono è il constant shading noto anche come flat shading.
  - Questo approccio applica un modello di illuminazione per determinare un singolo valore di intensità dell'equazione dell'illuminazione una volta per ogni poligono.
-



- 
- Si determina il valore dell'equazione dell'illuminazione una volta sola per ogni poligono e poi questo valore si assegna a tutto il poligono.
  - Questo approccio è valido se sono vere diverse ipotesi:
    - La sorgente luminosa è posta all'infinito, così  $N \cdot L$  è costante per ogni faccia del poligono.
    - L'osservatore è posto all'infinito così  $L \cdot V$  è costante per ogni faccia del poligono.
    - Il poligono rappresenta la superficie da modellare e non è un'approssimazione di una superficie curva.

Se una delle prime due ipotesi non è verificata, allora se vogliamo utilizzare lo shading costante, è necessario un metodo per determinare un valore singolo per ognuno degli  $L$  e  $V$ . Per esempio, i valori possono essere calcolati per il centro del poligono, o per il primo vertice del poligono.

---





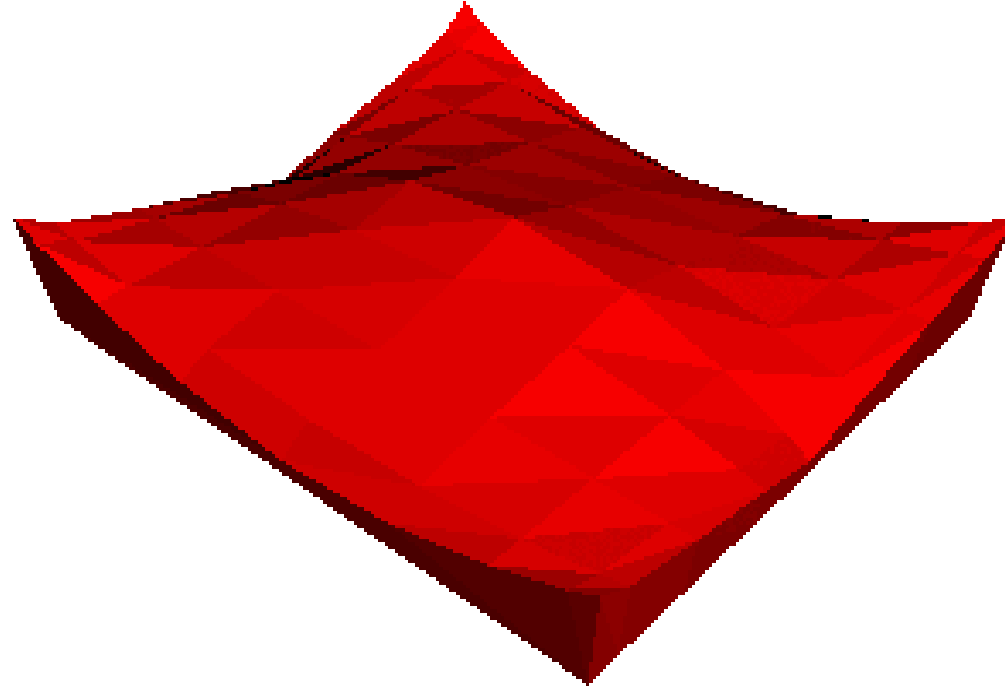
- E' una tecnica di shading veloce perché richiede pochi calcoli.
- Se i poligoni sono molto piccoli (larghi quanto un pixel) quando vengono proiettati sullo schermo, allora il risultato è buono come quello di qualsiasi altra tecnica.
- Buono per una vista grossolana della scena.





# Constant shading

---



Il risultato visivo non è del tutto soddisfacente, in quanto **lascia visibile la suddivisione tra i poligoni**, senza rendere nell'immagine l'andamento della superficie approssimata geometricamente dalla mesh di poligoni.

---



# Interpolated shading

---

- Come alternativa a quella di valutare l'equazione dell'illuminazione in ogni punto del poligono, è stato introdotto l'uso dell'interpolated shading:
- Si applica l'equazione dell'illuminazione ad ogni vertice del triangolo e questi valori vengono interpolati linearmente lungo i lati del triangolo.

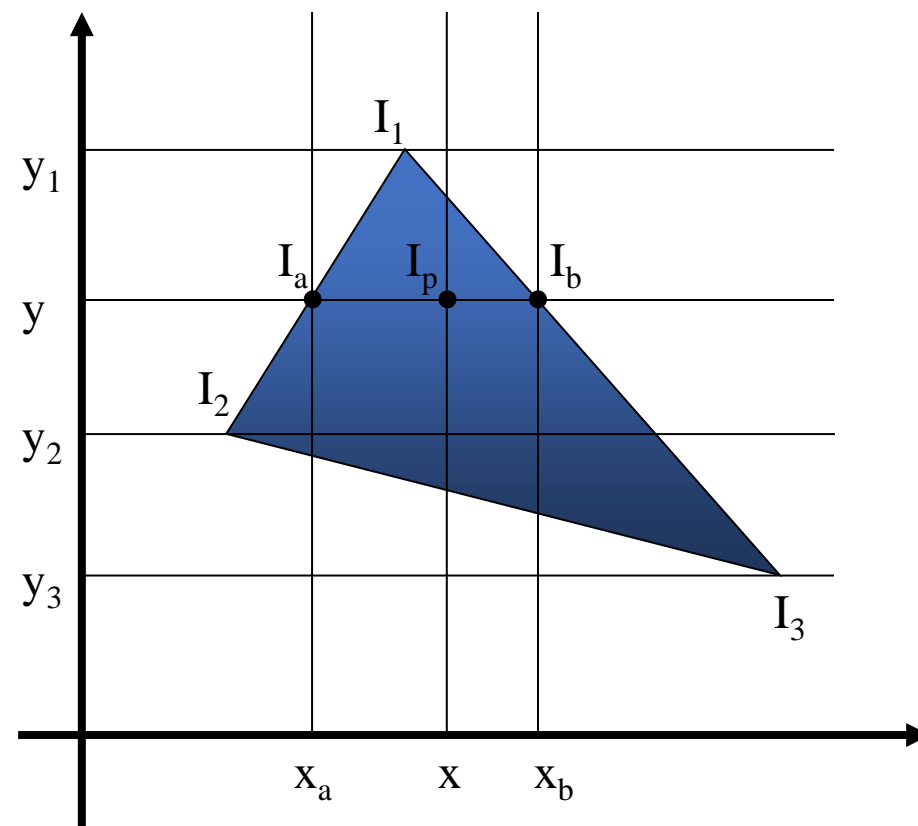


L'intensità  $I_p$  in un punto viene calcolata come:

$$I_a = I_1 + (I_2 - I_1) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

$$I_b = I_1 + (I_3 - I_1) \frac{y - y_1}{y_3 - y_1}$$

$$I_p = I_a + (I_b - I_a) \frac{x - x_a}{x_b - x_a}$$





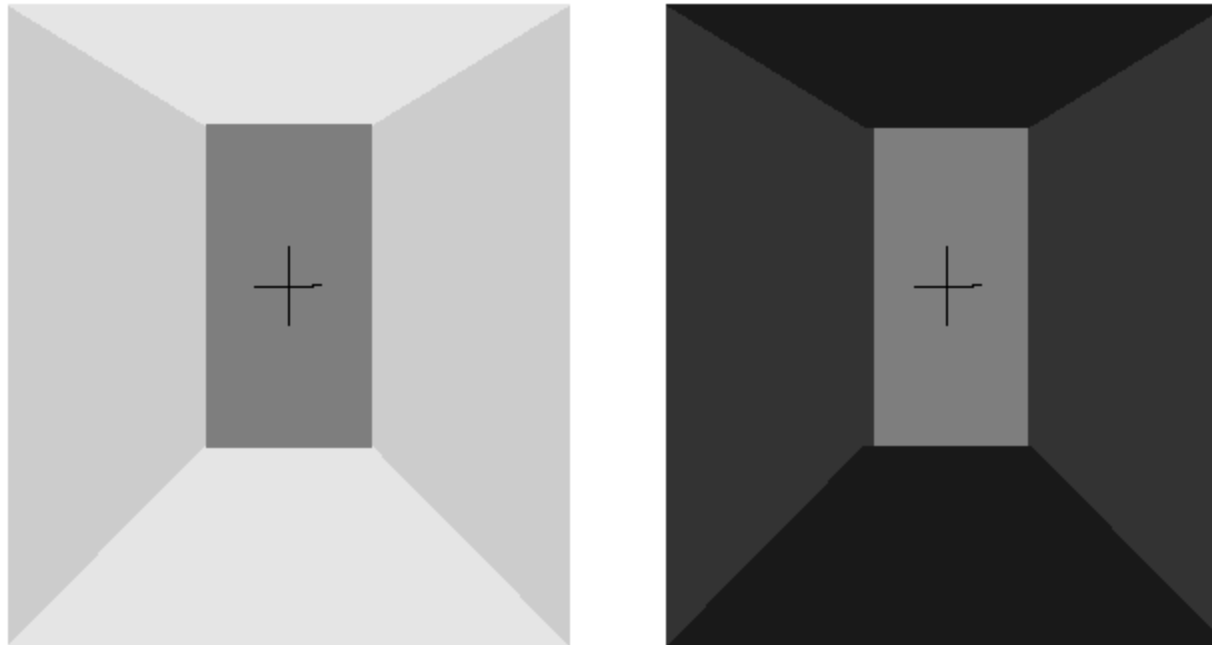
# Effetto Mach banding

---

- Se lo shading viene fatto indipendente su ogni poligono (sia esso costante o interpolato) si ha comunque una netta visibilità, non voluta, dei bordi tra due poligoni adiacenti, causati dalla brusca variazione della normale alla superficie.
  - A causa del cosiddetto effetto Mach banding anche una maggiore finezza della griglia dei poligoni non riduce la discontinuità di shading tra poligoni adiacenti.
-

- Questo effetto è quello per cui un oggetto messo vicino ad uno più chiaro risulta più scuro e messo vicino ad uno più scuro risulta più chiaro.

## Effetto Mach banding





# Gouraud Shading

---

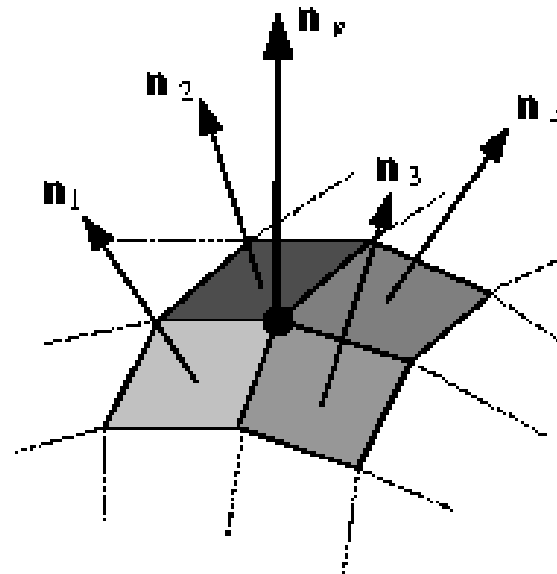
- Per ovviare a questo inconveniente si sono sviluppati dei metodi di shading che tengono conto delle informazioni date da poligoni adiacenti.
  - Il modello di Gouraud è l'evoluzione diretta del metodo con interpolazione del colore su poligoni singoli.
-



- 
- Nel Gourad shading si tiene conto della geometria effettiva che si sta visualizzando: **se la griglia di poligoni rappresenta una superficie curva, per ogni vertice della griglia non si utilizza la normale al poligono, ma la normale alla superficie.**
  - In questa maniera il calcolo dello shading produce lo stesso valore su entrambi i lati di poligoni che hanno bordi in comune rendendo lo shading complessivo privo di salti.
-



- Il metodo richiede che **sia nota la normale alla superficie che si approssima in ogni vertice.**
- Se non è disponibile, **la si approssima con la media delle normali ai poligoni che condividono il vertice.**



$$\mathbf{n}_v = \frac{\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + \mathbf{n}_3 + \mathbf{n}_4}{|\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + \mathbf{n}_3 + \mathbf{n}_4|}$$



- 
- Se uno spigolo deve essere effettivamente visibile (ad esempio lo spigolo di raccordo tra la superficie dell'ala e della fusoliera di un aereo) si generano due insiemi di normali su ciascuno dei due lati dello spigolo.
  - Una volta calcolate le normali in ogni spigolo, si applica il modello di illuminazione per calcolare il valore del colore nel vertice e si interpola linearmente, all'interno dei poligoni, con lo stesso procedimento descritto in precedenza.
-



# Efficienza del metodo di Gourad

---

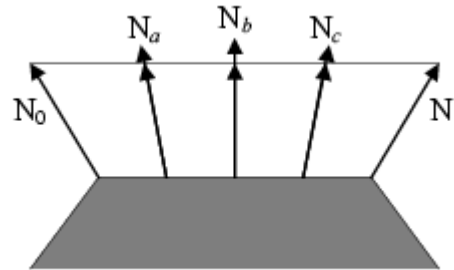
- Dal punto di vista implementativo il Gourad shading è mediamente efficiente, poiché l'equazione di illuminazione va calcolata una volta sola per vertice.
  - Per poter individuare i vettori normali, necessari per poter calcolare la normale nei vertici, occorre una struttura dati che rappresenti l'intera mesh di poligoni.
  - Il risultato visivo prodotto dal Gouraud shading è perlopiù quello desiderato: **non è visibile la suddivisione in mesh dei poligoni**, e si ottiene una rappresentazione liscia e senza discontinuità della superficie approssimata.
-



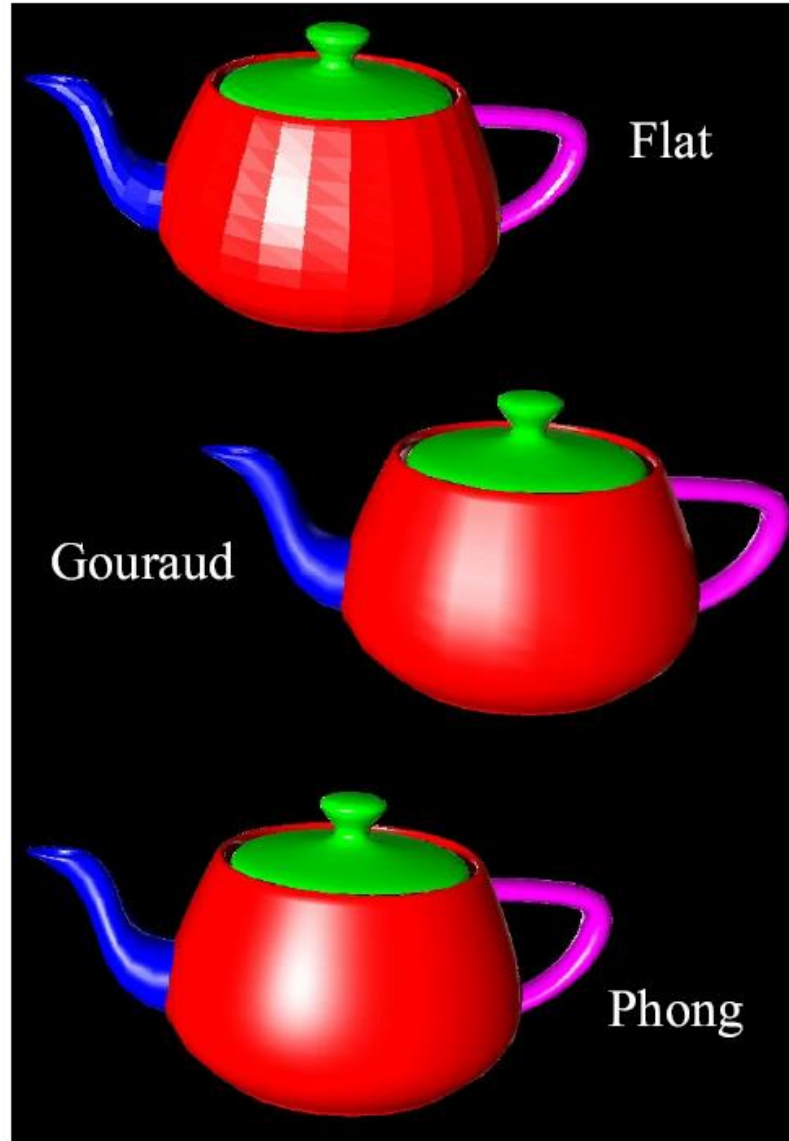
# Phong shading

---

- Sebbene il Gouraud shading sia più che sufficiente per la maggior parte delle applicazioni, non risulta particolarmente realistico quando si vogliano rappresentare superfici dotate di un alto coefficiente di riflessione speculare.
  - In questo caso il modello più sofisticato e più costoso computazionalmente è il modello di Phong (Phong shading) o di interpolazione delle normali.
  - In questo modello le normali nei vertici vengono calcolate nella stessa maniera con cui si calcolavano nel Gouraud Shading, ma il calcolo dello shading dei pixel del poligono viene effettuato usando normali calcolate interpolando linearmente ( e poi rinormalizzando) all'interno dello spazio delle normali.
-



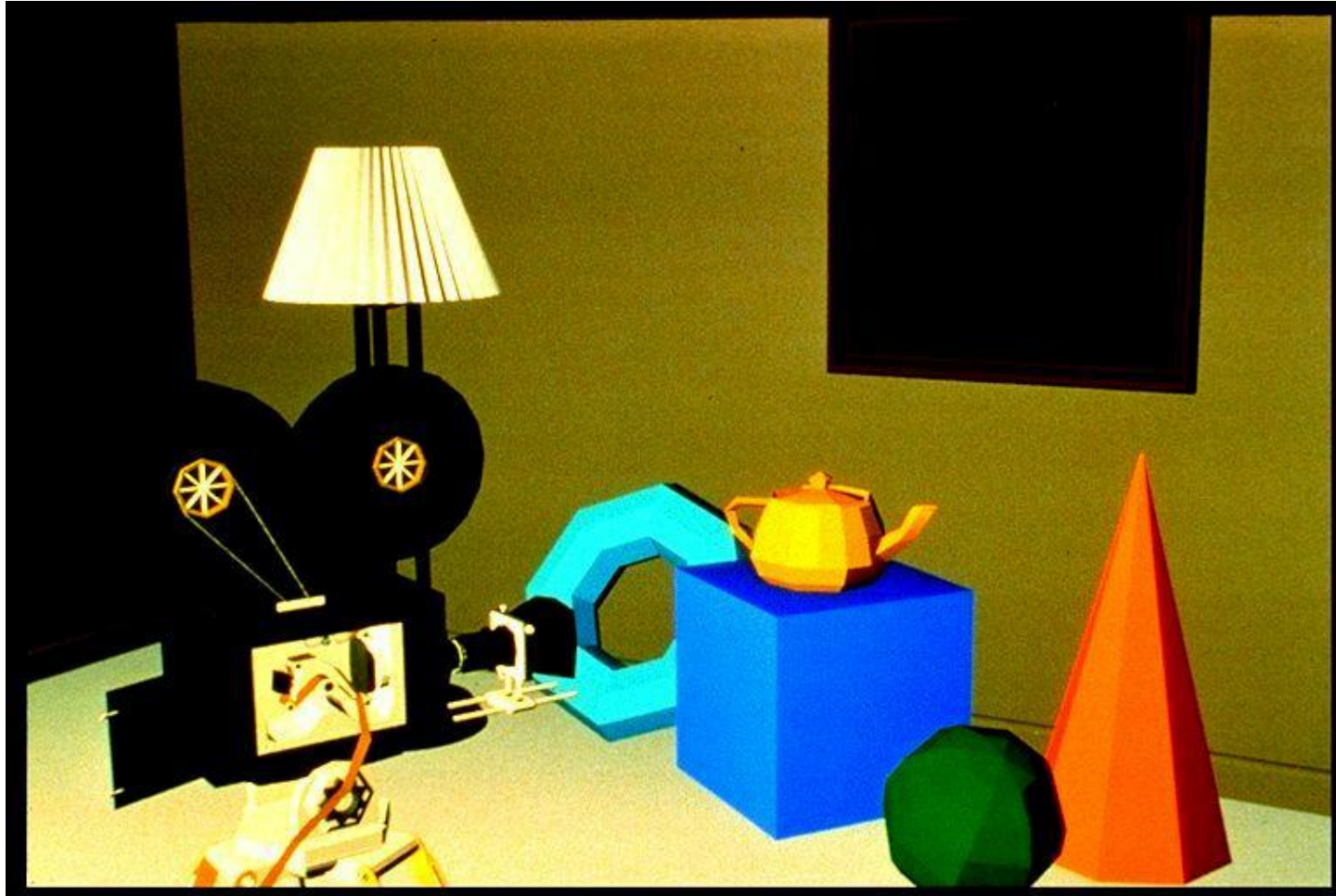
- Il Phong shading risulta più costoso in termini computazionali rispetto al Gourad shading: si interpolano vettori e non valori interi e l'equazione di illuminazione viene calcolata per ogni pixel.
-





# Flat Shading

---

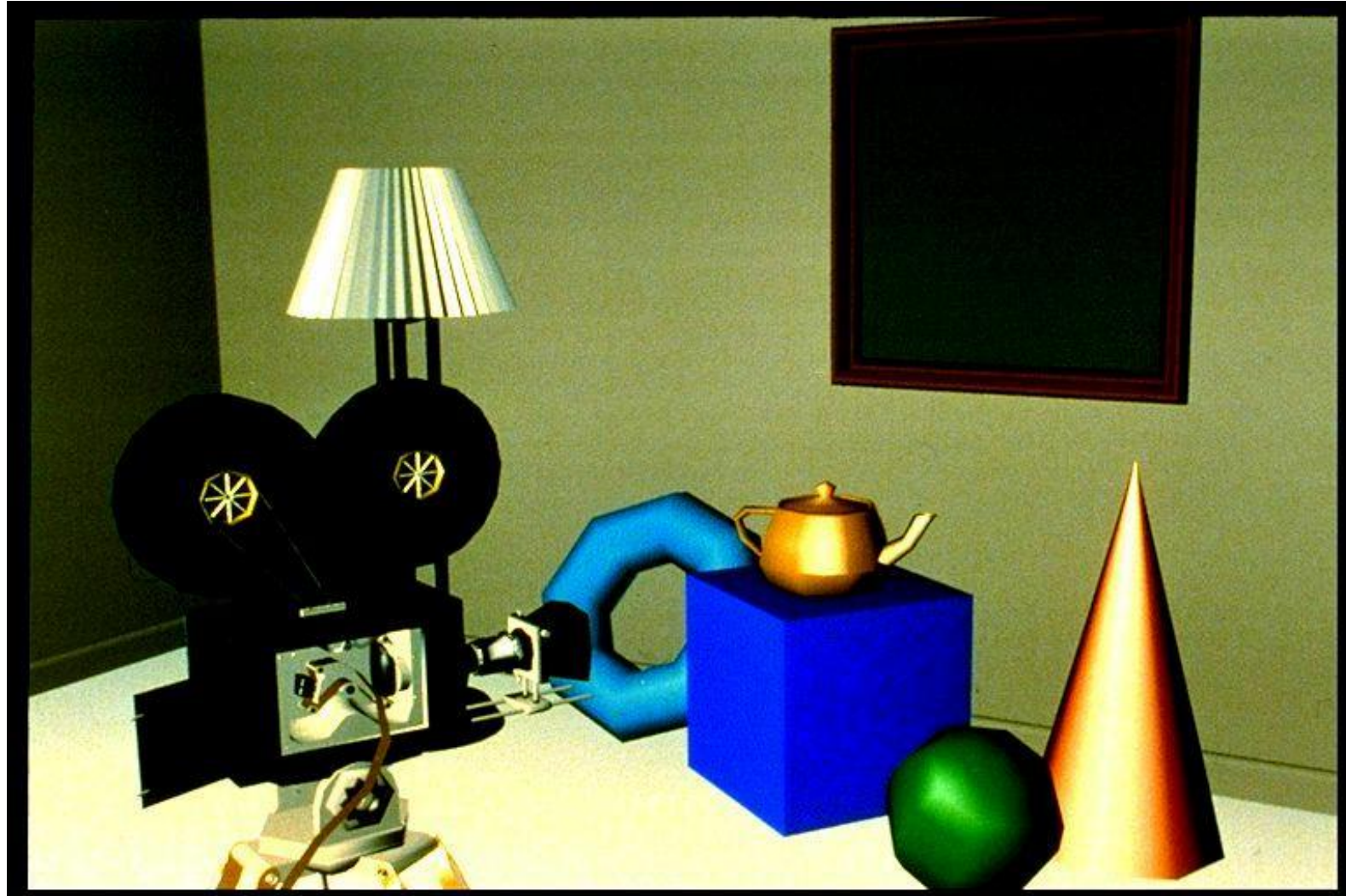






# Gourad Shading

---







# Phong Shading

---





# Phong Shading (per-fragment illumination)

---

- Per l'implementazione del Phong-Shading,
  - applicheremo alla normale di ogni vertice in coordinate dell'oggetto la trasposta dell'inversa della matrice model view  $(\mathcal{M}^{-1})^T$  (dove  $\mathcal{M}$ =View Model). La normale trasformata sarà data in output e rappresenterà quindi l'input del fragment shader.
  - Quindi le normali saranno interpolate sui lati della primitiva prima di arrivare nel fragment shader e sarà nel fragment shader che si calcolerà l'equazione dell'illuminazione e quindi il colore per ogni frammento della scena.
-