

# Iluminación

---

Prof. Fernández et al. (Universidad de la República de Uruguay)  
- <http://www.fing.edu.uy/inco/cursos/compgraf/>

Prof. Möller et al. Universidad Simon Fraser  
<http://www.cs.sfu.ca/~torsten/Teaching/Cmpt361>

Capítulo 6 – Angel Edward

# Motivación



- ❑ La iluminación juega un papel muy importante para lograr renderizar imágenes más realísticas
- ❑ Modelos de iluminación pueden simular el sombreado, reflexión y refracción de la luz, comparable a lo que podemos ver en el mundo real



# Iluminación vs Shading (sombreado)



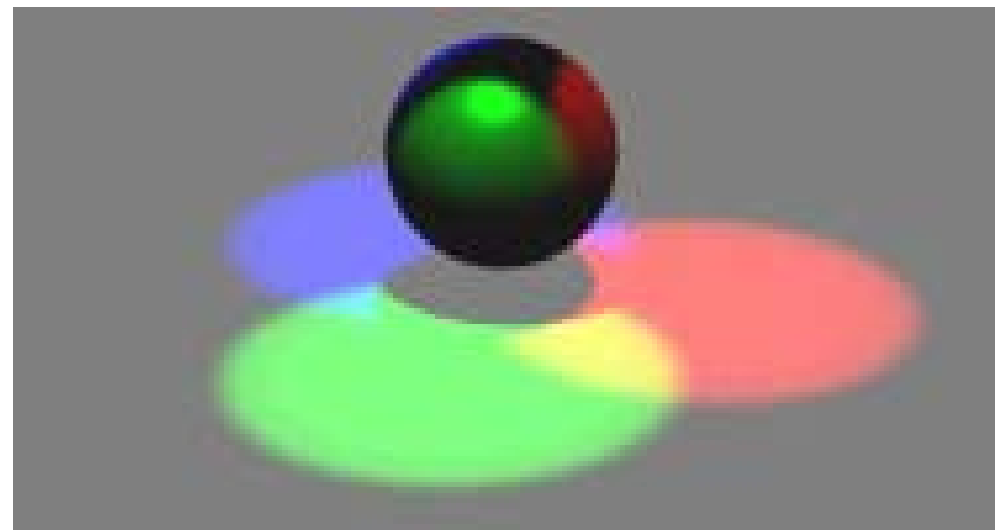
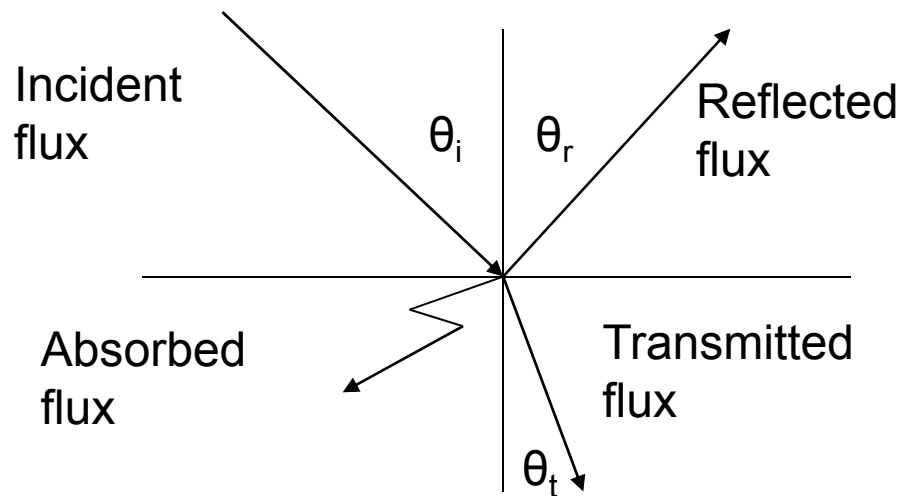
- ❑ **Iluminación:** calcula la intensidad de luz en un punto particular de la superficie
- ❑ **Shading:** usa estos calculos de intensidades para sombrear o matizar toda la superficie o la escena. Se refiere al proceso de asignación de color a los pixels.



# Componentes de la iluminación



- ❑ Cada objeto en la escena es una fuente de luz.
- ❑ La luz puede ser emitida o reflejada.
- ❑ Los emisores son las fuentes de luz y los reflectores son caracterizados por las propiedades del material.



# Modelos de Iluminación



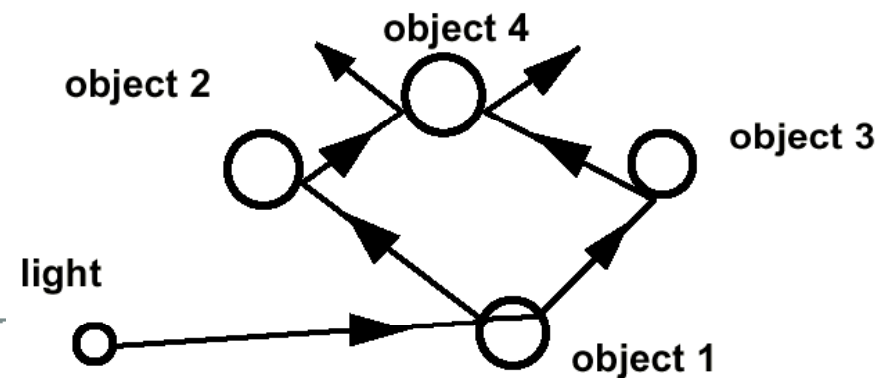
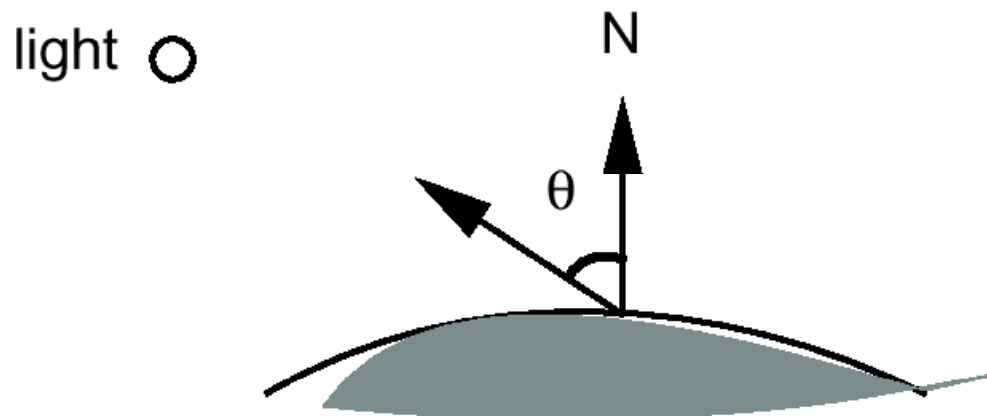
**Iluminación local:** se refiere a la interacción directa entre la fuente de luz y la superficie de un objeto

**Iluminación global:** se refiere a la interacción entre la fuente de luz y todas las superficies en la escena

Responsable del sombreado

Reflexión entre superficies

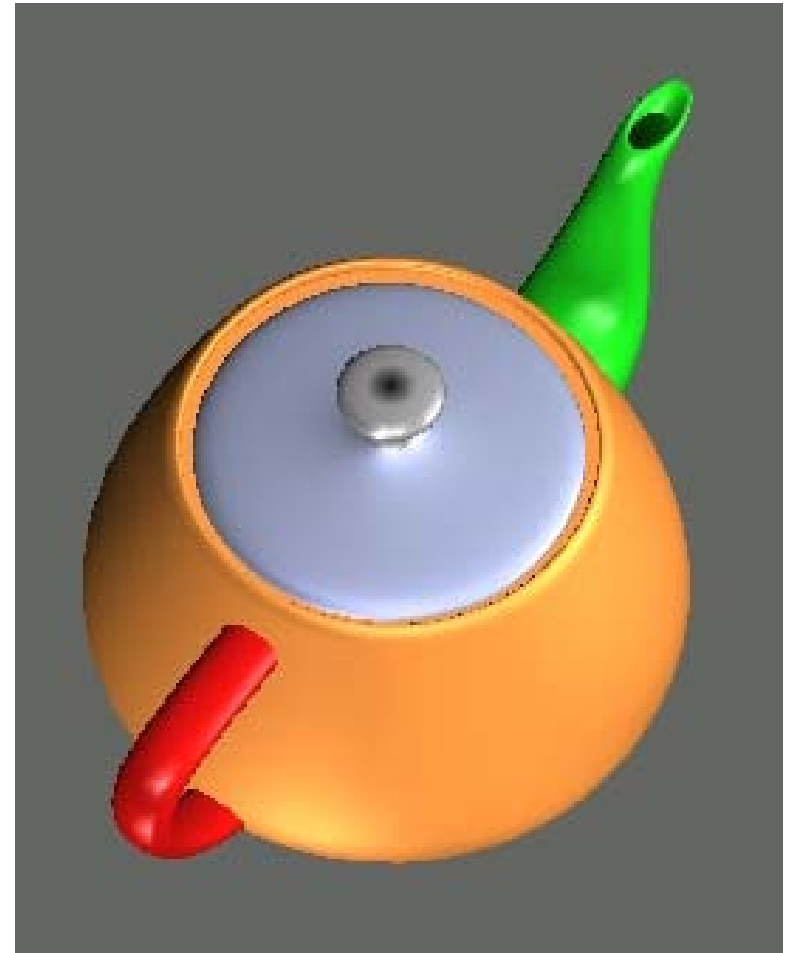
Refracción de superficies



# Modelos de Iluminación: Local



- Se calcula el sombreado de cada polígono por separado y no hay reflexiones de color entre objetos
- Sólo vemos la luz que es directamente reflejada del objeto
- Tiempo Real
- Ejemplo:  
Modelo de iluminación de *Phong*



# Modelos de Iluminación: Global



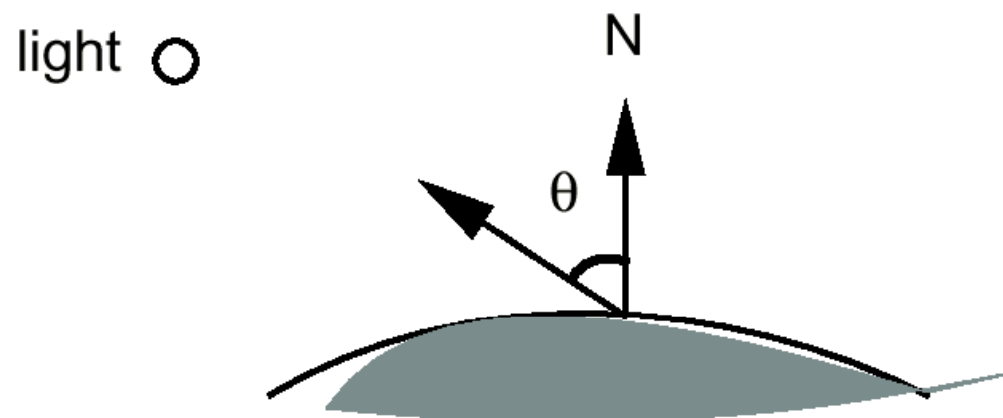
- Se producen imágenes de calidad superior con más precisión en las reflexiones de color y en las sombras suaves
- Múltiples interacciones de luz y objetos
- Aún no es tiempo real
- Ejemplos:  
*Raytracing, radiosity, photon mapping*



# Modelo de iluminación local



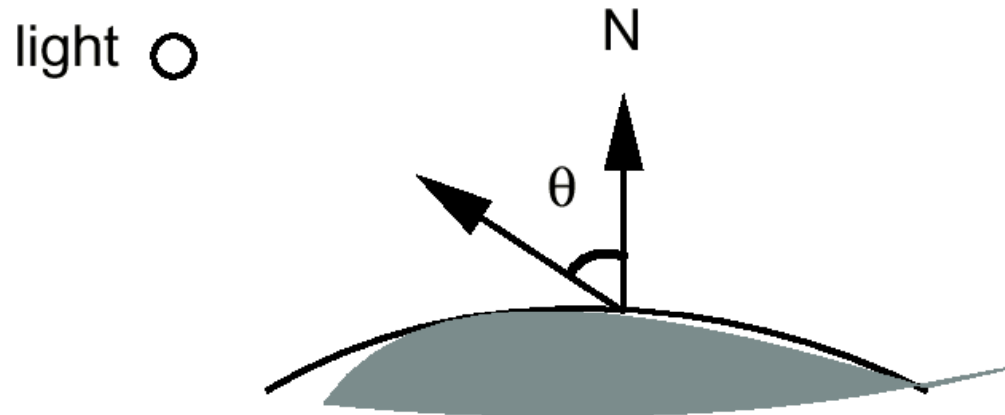
- ❑ Los modelos de iluminación local tratan sobre la luz que refleja un punto de la superficie de un objeto.
- ❑ Es luz que proviene de una fuente de luz, reflejada en el objeto en un punto y va al observador.
  - ❑ En principio no se considera la luz que se refleja de un objeto y va a otro
  - ❑ Tampoco las sombras que proyecta un objeto en otro.



# Modelo de iluminación local



- Dado un punto, a partir de algunos datos básicos como:
  - el color del punto
  - su ubicación en el espacio
  - la normal a la superficie en ese punto
  - la ubicación de la fuente de luz
  - se calcula cuánta luz refleja hacia el observador, lo cual determina el color de ese punto en la imagen a ser generada.

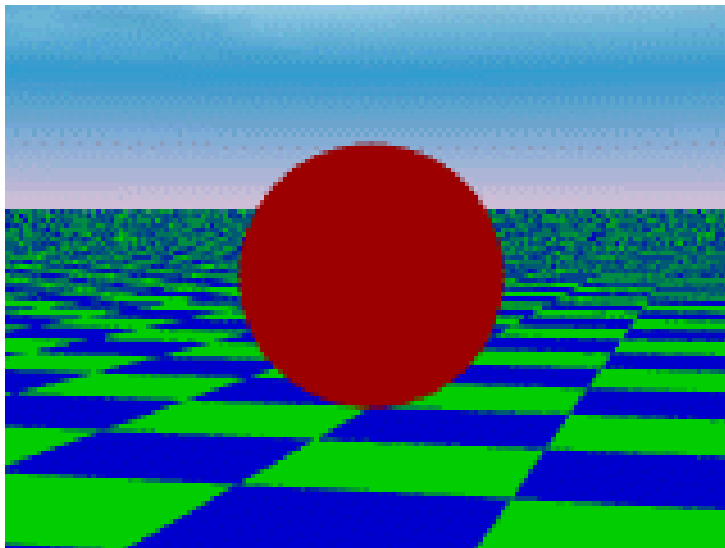
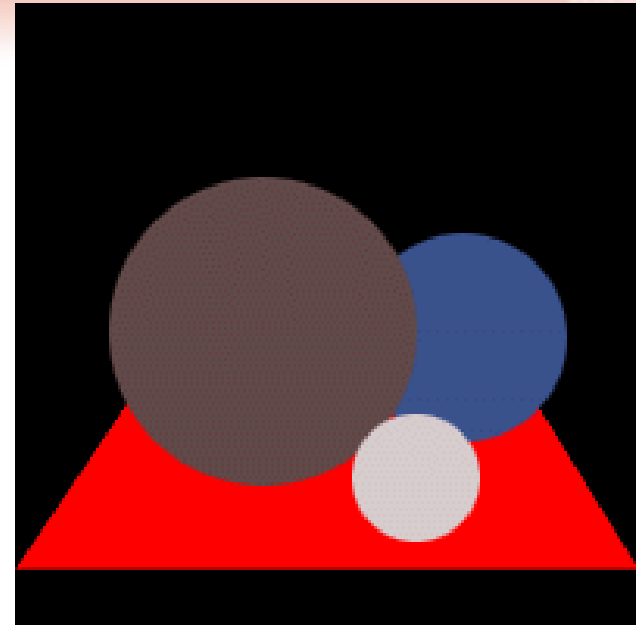
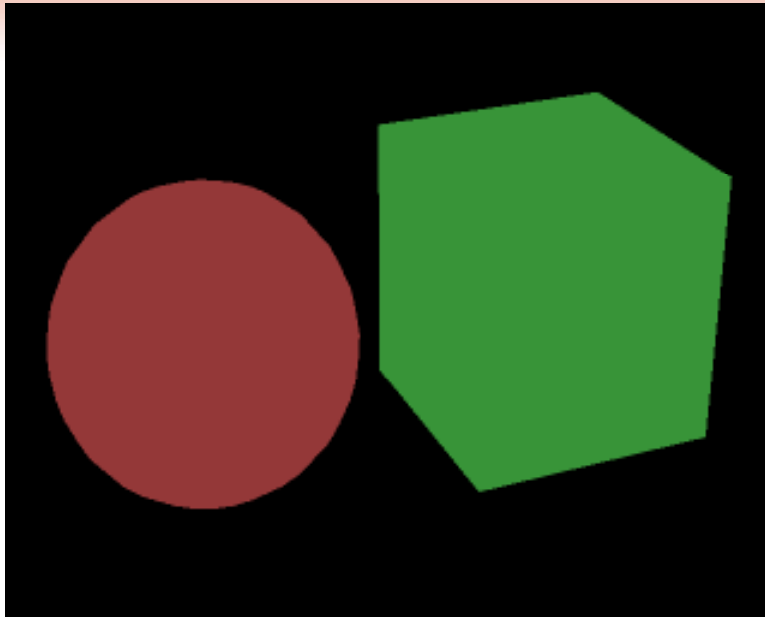


# Modelo de iluminación local



- ❑ En CG la interacción objeto-fuente de luz es estimada usando el modelo de iluminación local
- ❑ La luz se divide en 3 tipos:
  - ❑ Ambiente
  - ❑ Difusa
  - ❑ Especular
- ❑ Los objetos reflejan estos 3 tipos de forma independiente. Puede reflejar mucho luz difusa y poco especular.
- ❑ Por cada punto, o área de superficie, de un objeto se puede calcular la iluminación dado estos tres componentes

# Fuente de luz ambiental



$$I_{\text{reflected}} = k_{\text{ambient}} I_{\text{ambient}}$$

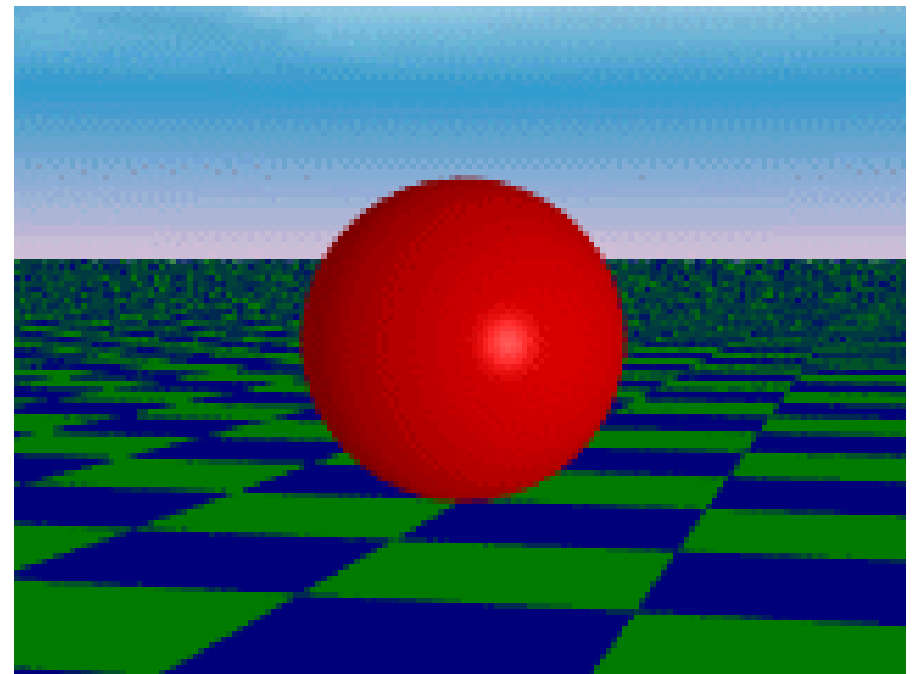
$$k_{\text{ambient}} \approx k_{\text{diffuse}}$$

Todas los objetos reciben la misma intensidad de luz. Cada objeto puede reflejar esa luz de forma distinta (indicado a través de  $k_a$

# Fuente de luz direccional



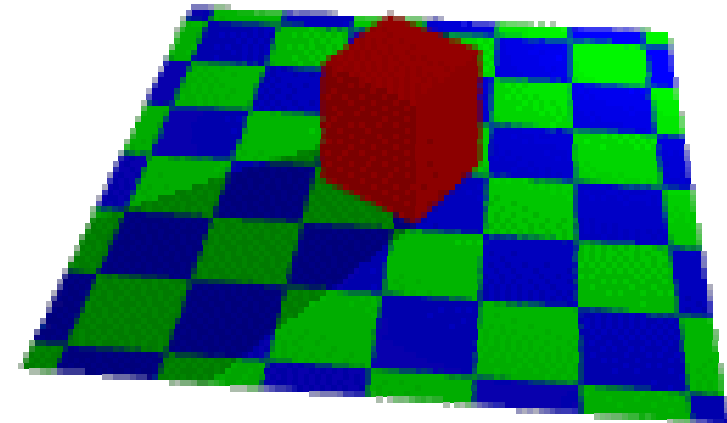
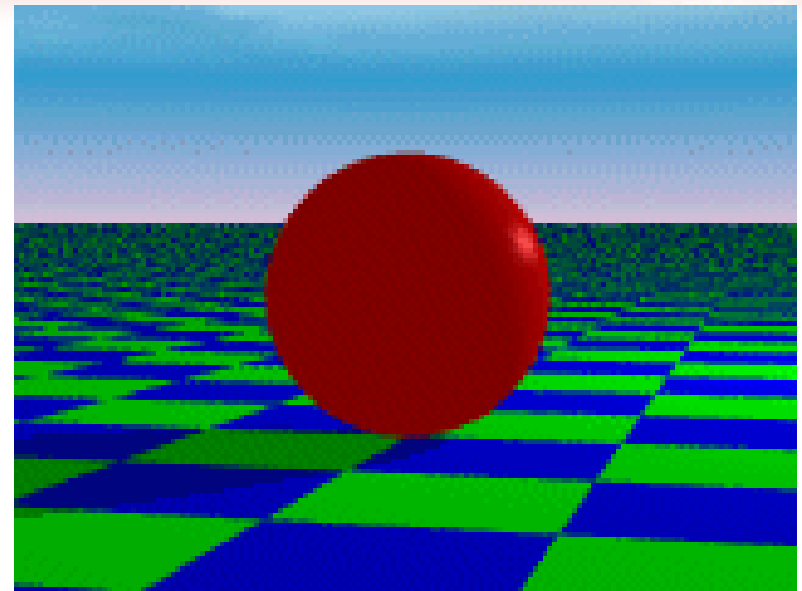
- ❑ Todos los rayos que provienen de una fuente de luz direccional tienen la misma dirección y no tienen punto de origen
- ❑ Es como si la fuente de luz estuviera ubicada infinitamente lejos del objeto.
- ❑ La luz del sol es un ejemplo



# Fuente de Luz Puntual



- ❑ Los rayos de luz emitidos divergen radialmente desde la fuente
- ❑ Es una aproximación a lo que sería la luz de un bombillo
- ❑ La dirección de la luz a cada punto en la superficie cambia. Así que el vector normalizado a la luz emitida debe ser calculada en cada punto que es iluminado



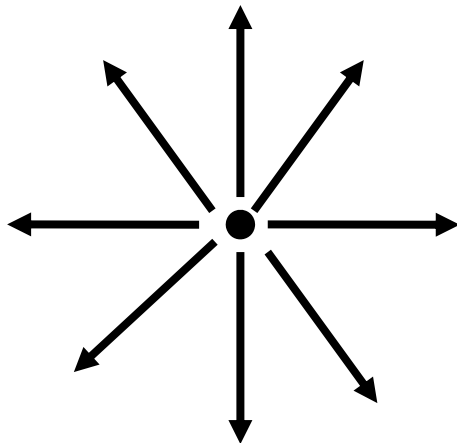
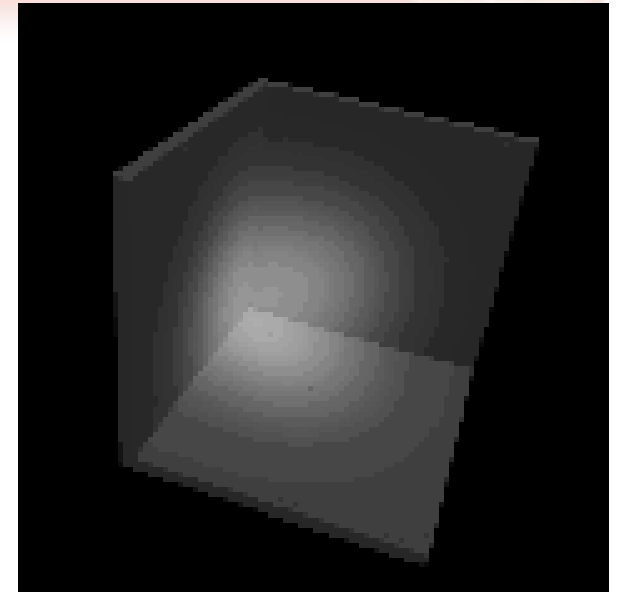
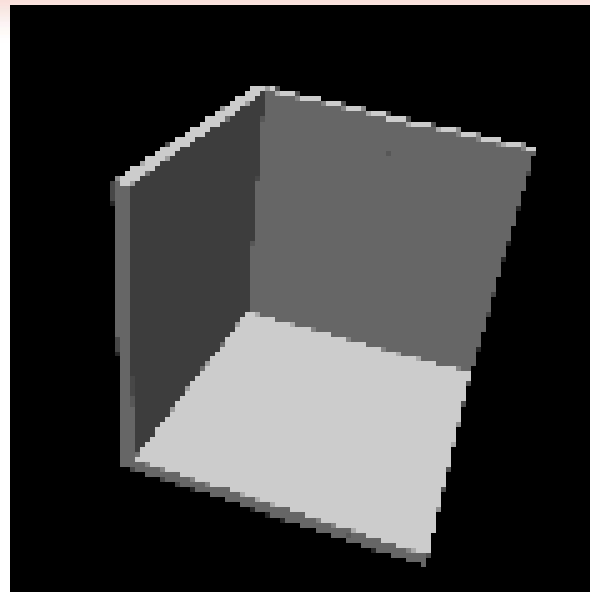
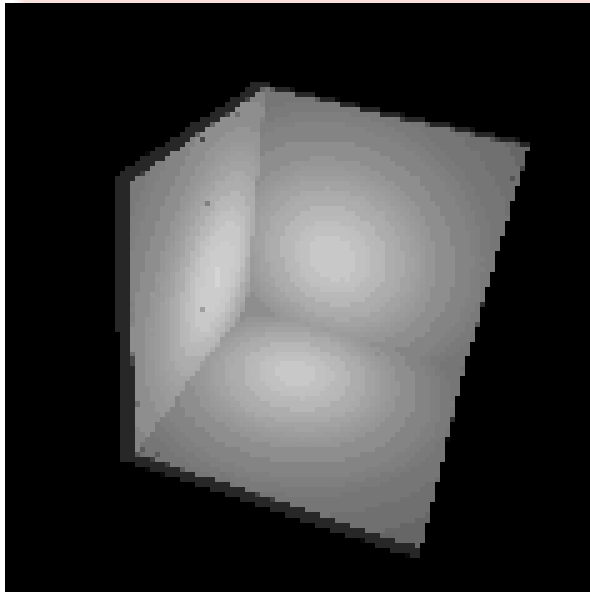
# Otras fuentes de luz



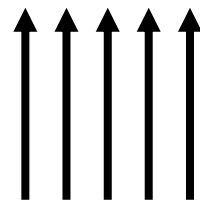
- ❑ Spotlights
  - ❑ Es una luz puntual cuya intensidad disminuye desde una dirección dada
  - ❑ Requiere un color, un punto, una dirección, parametros que controlan la rata de disminución
  - ❑ Luxo de Pixar
- ❑ Fuentes de luz de area
  - ❑ La iluminación ocupa una area 2D (polígono o disco)
  - ❑ Genera sombreado suave
- ❑ Luz extendida
  - ❑ Fuente de luz esférica
  - ❑ Genera sombreado suave



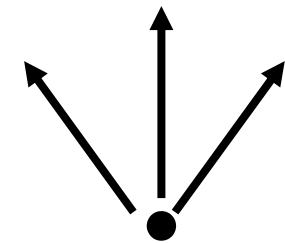
# Fuentes de Luz



Luz puntual



Luz direccional



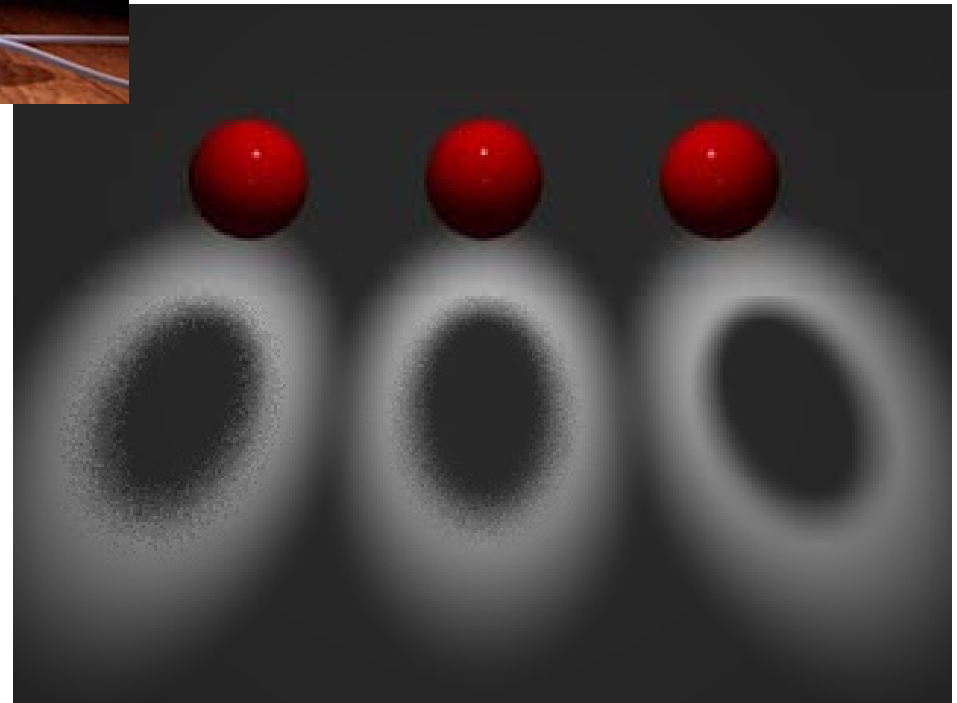
spotlight

# Fuentes de Luz

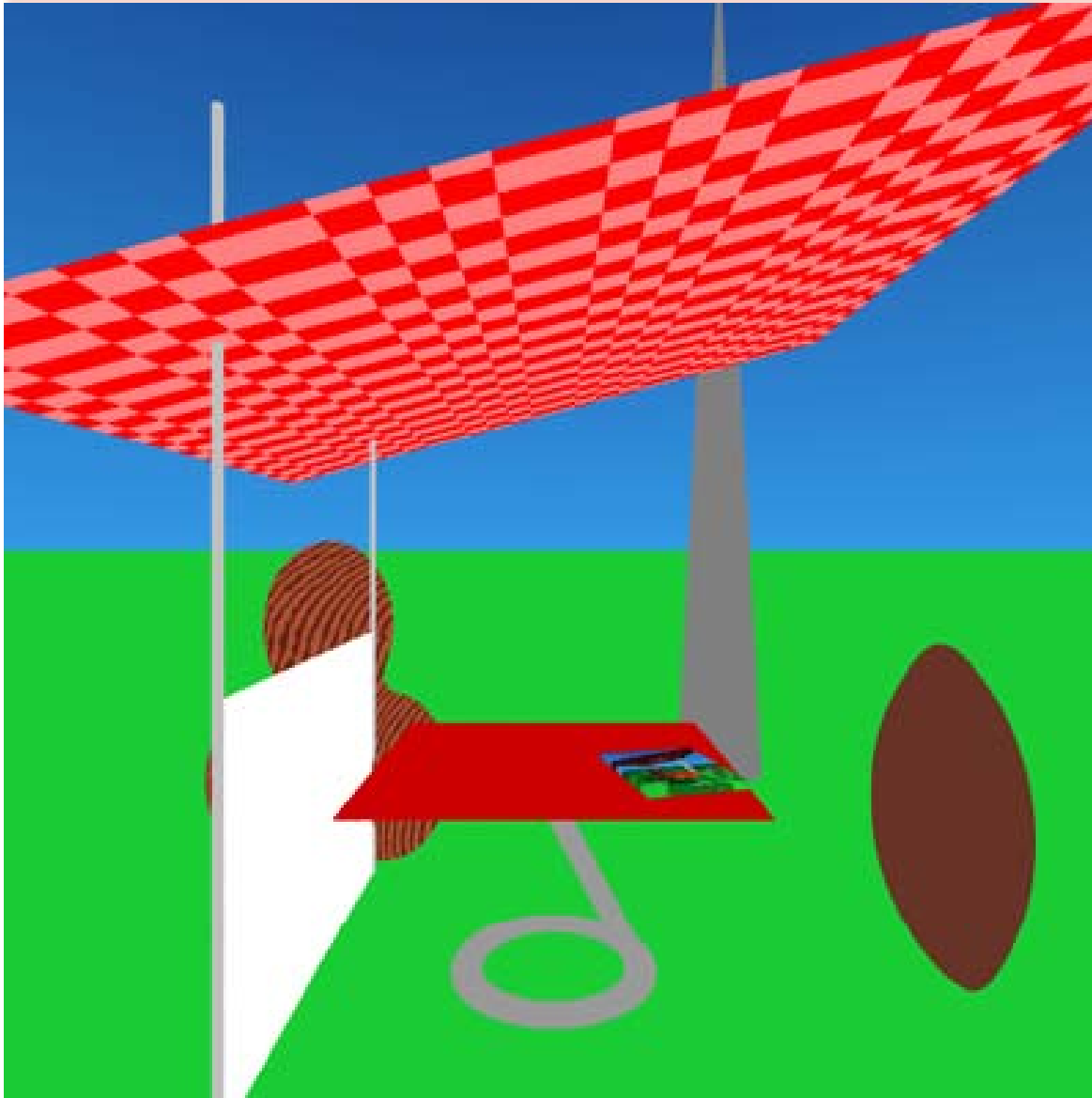


spotlight

Fuente de luz  
de area



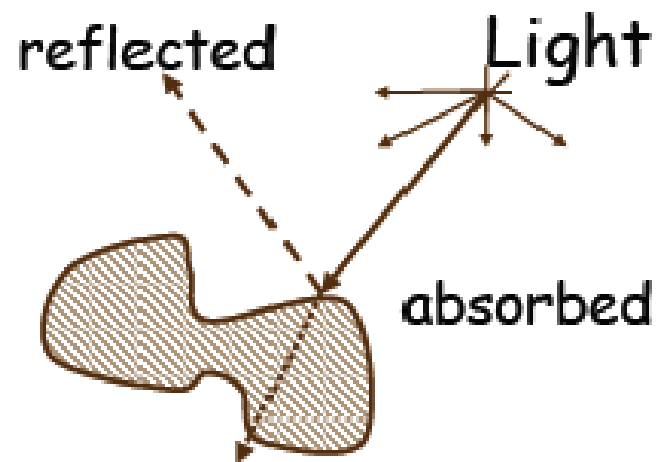
# Luz Ambiental



Aquí vemos otro ejemplo de imagen que solamente tiene luz ambiental.

Podemos apreciar la dificultad para ver volúmenes. La imagen, si bien es generada a partir de un modelo 3D, parece ser 2D. No hay sensación de profundidad.

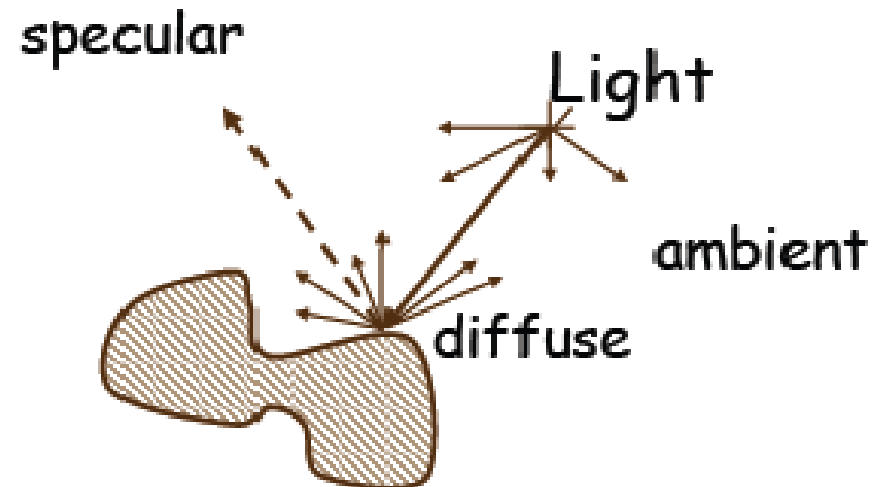
# Efectos de la iluminación



transmitted

$$\text{Light} = \text{refl.} + \text{absorbed} + \text{trans.}$$

- Usually only considering reflected part



$$\text{Light} = \text{ambient} + \text{diffuse} + \text{specular}$$

$$I = k_a I_a + k_d I_d + k_s I_s$$

# Ecuación de Iluminación



- **Luz reflejada por un objeto en un punto de su superficie.** Solamente se considera una única fuente luminosa de luz blanca, los objetos que reflejan luz no tienen color, por lo que la luz reflejada también es blanca (o tonalidades de grises).

$$I_{\text{intensidad}} = \text{Luz}_{\text{ambiental}} + \text{Luz}_{\text{difusa}} + \text{Luz}_{\text{especular}}$$

- **Luz y superficie coloreada.** Hay una luz que tiene color y los objetos que la reflejan también. Esto genera fenómenos a estudiar. Cada tipo de luz puede tener un color distinto, y los objetos pueden también reflejar de forma distinta cada tipo de luz.

$$I_{\text{intensidad},\lambda} = \text{Luz}_{\text{ambiental},\lambda} + \text{Luz}_{\text{difusa},\lambda} + \text{Luz}_{\text{especular},\lambda}$$

- **Múltiples fuentes de luz.** A lo anterior se suma que hay múltiples fuentes de luz.

$$I_{\text{intensidad},\lambda} = \text{Luz}_{\text{ambiental},\lambda} + \sum_L (\text{Luz}_{\text{difusa},\lambda,L} + \text{Luz}_{\text{especular},\lambda,L})$$

# Interacción Material-Luz



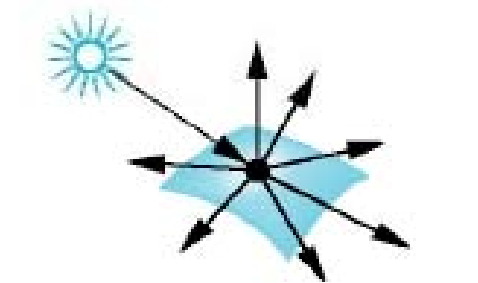
## ☐ Reflexión Especular

- ☐ Mucha luz es reflejada en un angosto rango de angulos
- ☐ Reflexión perfecta: menos absorción toda la luz es reflejada en un ángulo de reflexión



## ☐ Reflexión difusa

- ☐ La luz es reflejada en todas direcciones
- ☐ Difusor perfecto: sigue la ley Lambertiana y la superficie luce la misma en todas las direcciones



## ☐ Refracción de luz traslucida

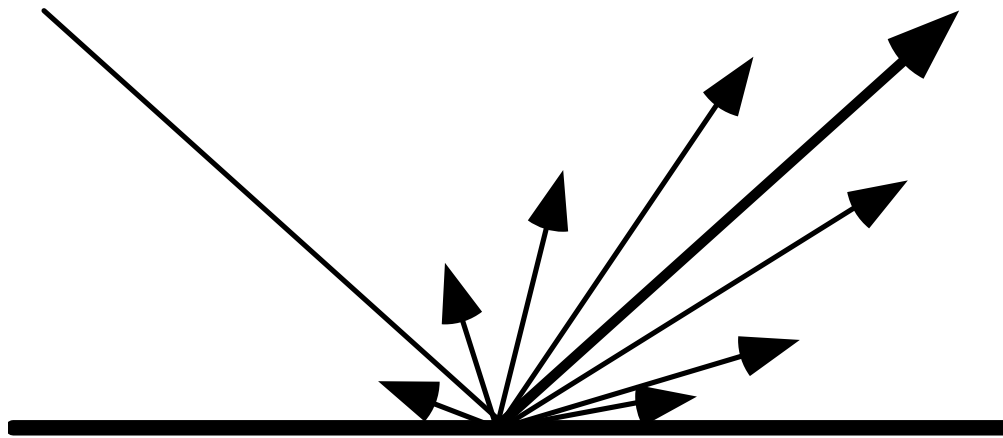
- ☐ La luz es refractada (y reflejada) por ejemplo; vidrio, agua



# Reflexión



- Requerimos saber la cantidad de luz que se refleja hacia el ojo



# Física de la reflexión

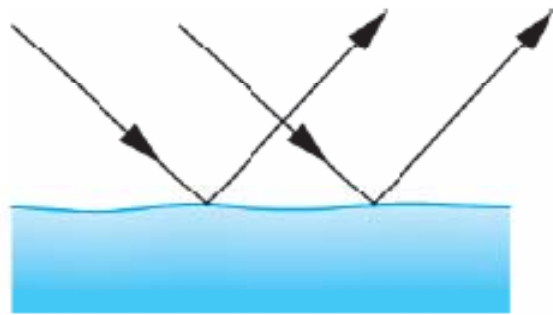


- En el nivel microscópico, la superficie reflejante especular es muy suave, muy poca rugosa
- Por tanto, rayos de luz tienen alta probabilidad de rebotar de la microgeometría como un espejo
- Entre más suave la superficie, más cercana a un espejo perfecto

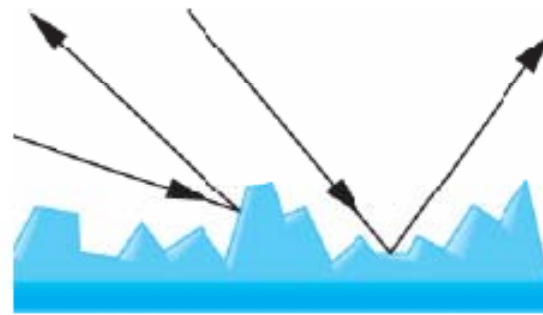
# Tipos de superficies



- En las imágenes se muestran los dos tipos de superficies: lisas y rugosas
- La mayoría de las superficies se encuentran en un punto intermedio



smooth surface

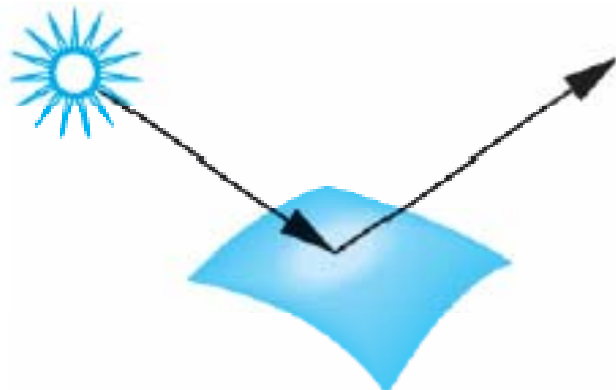


rough surface

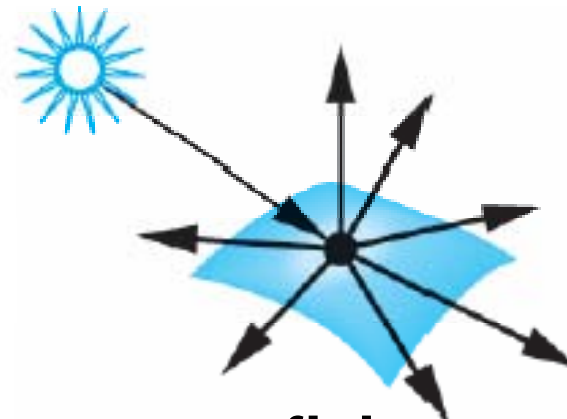
# Tipos de superficies



- Mientras más suave sea una superficie, más luz reflejada se concentrará en la dirección en la que un espejo reflejaría esa luz
- Una superficie rugosa rebotará luz en diferentes direcciones.



**superficie suave**

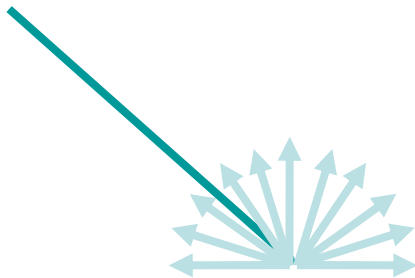


**superficie rugosa**

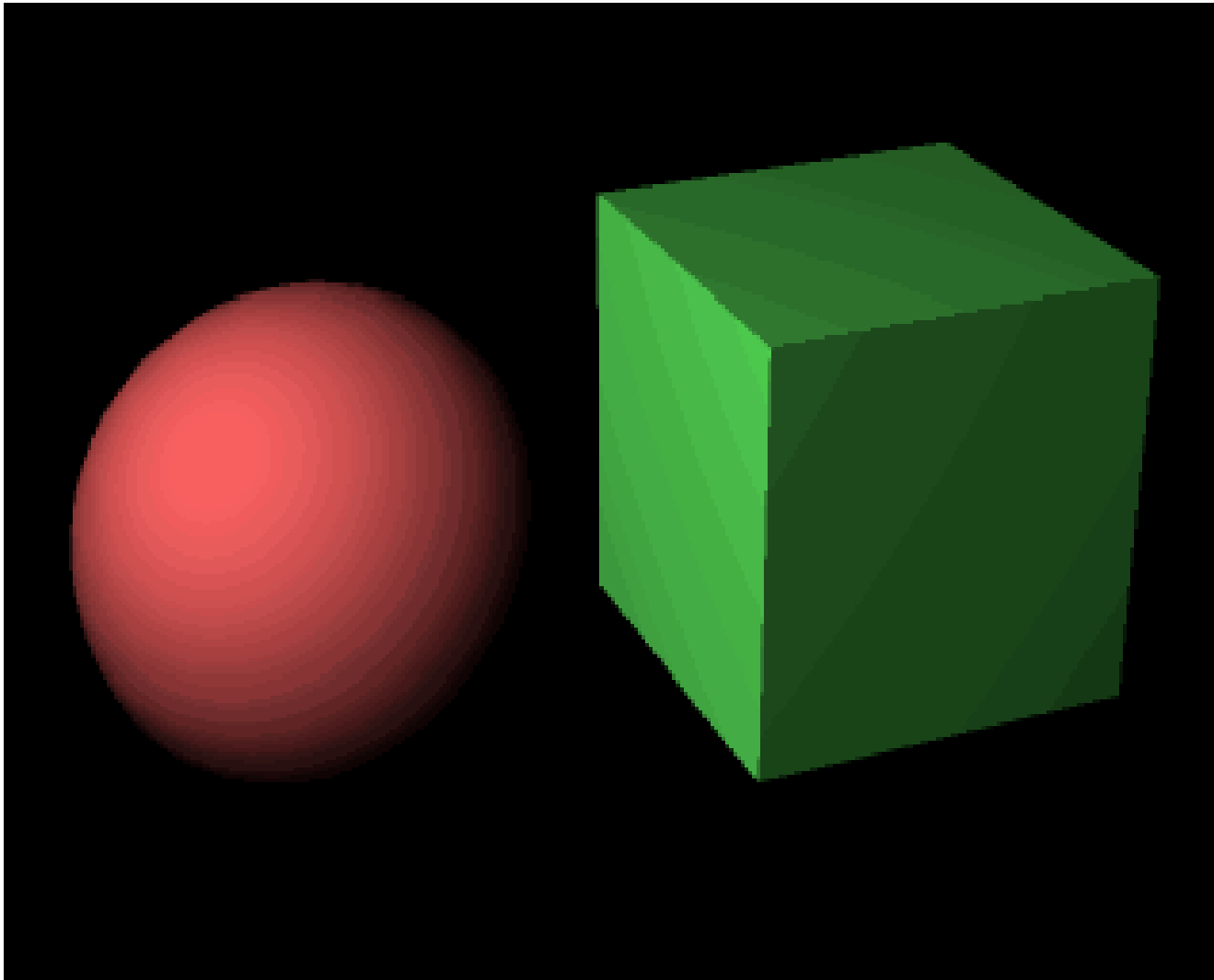
# Física de la reflexión



- Reflexión difusa ideal es una superficie muy rugosa (ejemplo, gis)
  - Debido a las variaciones microscópicas un rayo de luz tiene las mismas probabilidades de ser reflejada en cualquier dirección sobre el hemisferio



# Reflexión difusa

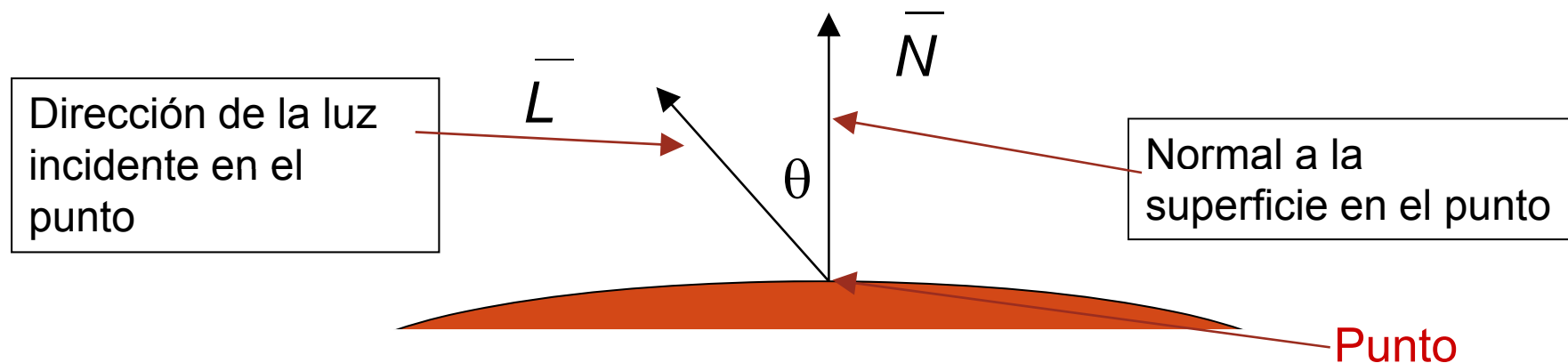


En reflexión difusa, la luz refleja distinto según la ubicación de la fuente de luz.

# Reflexión difusa



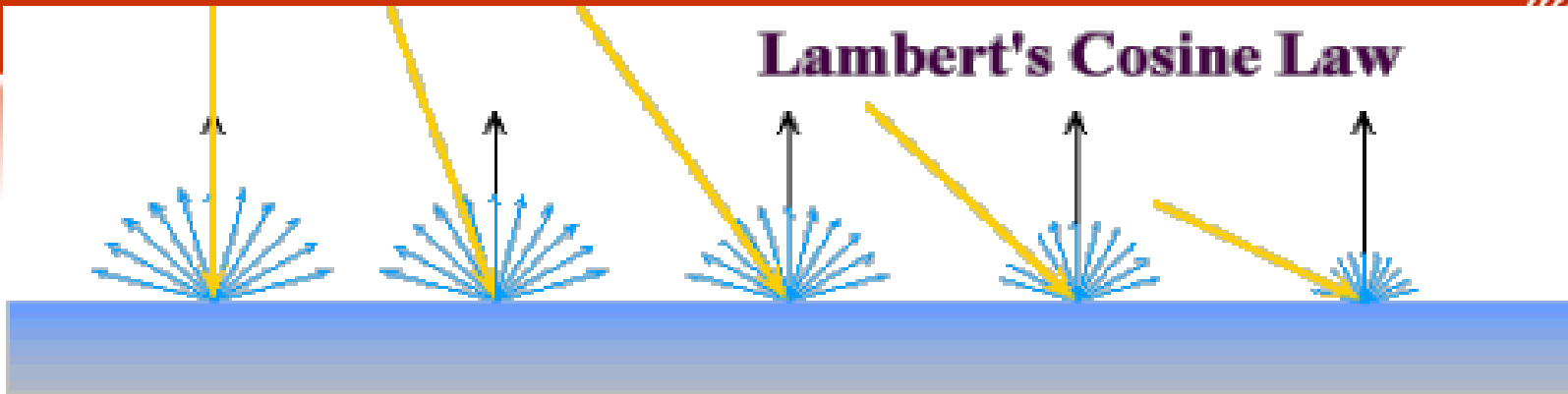
- ❑ Fuente luminosa puntual: la luz surge de una fuente puntual (un único punto emite luz) y emana en todas direcciones.
- ❑ Objetos de brillantez variable: la misma depende de la dirección y la distancia respecto a la fuente luminosa.



$$I = I_p k_d (N \cdot L) = \text{intensidad en el punto}$$

$I_p$  es intensidad de luz difusa.  $k_d$  es cantidad de luz difusa del objeto.

## Lambert's Cosine Law



- Lambert dice que la energía que se refleja de una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia,  $i$ , entre la luz y la normal a la superficie

$$- I_{out} \propto \cos(i) \quad \text{or} \quad I_{out} \propto \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$$

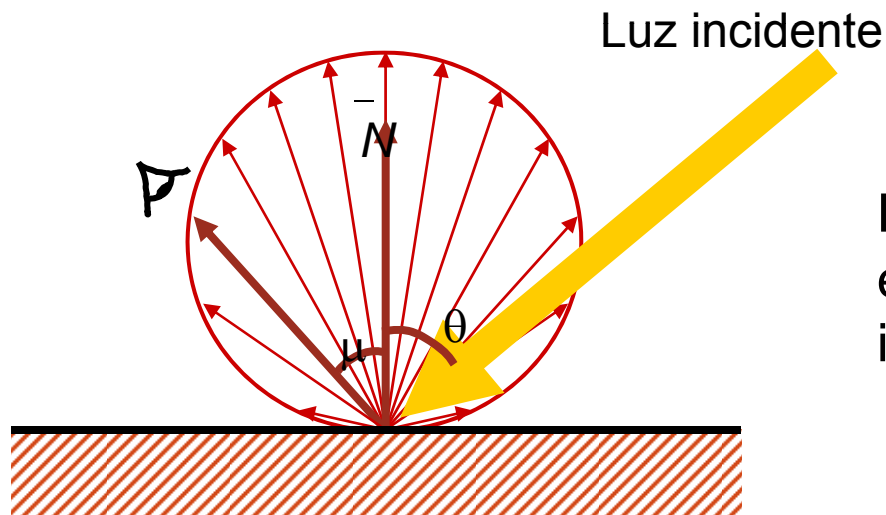
- Así que:

$$- I_{out} = k_{ambient} \cdot I_{ambient} + k_{diffuse} \cdot I_{light} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$$

# Reflexión difusa (reflexión lambertiana)



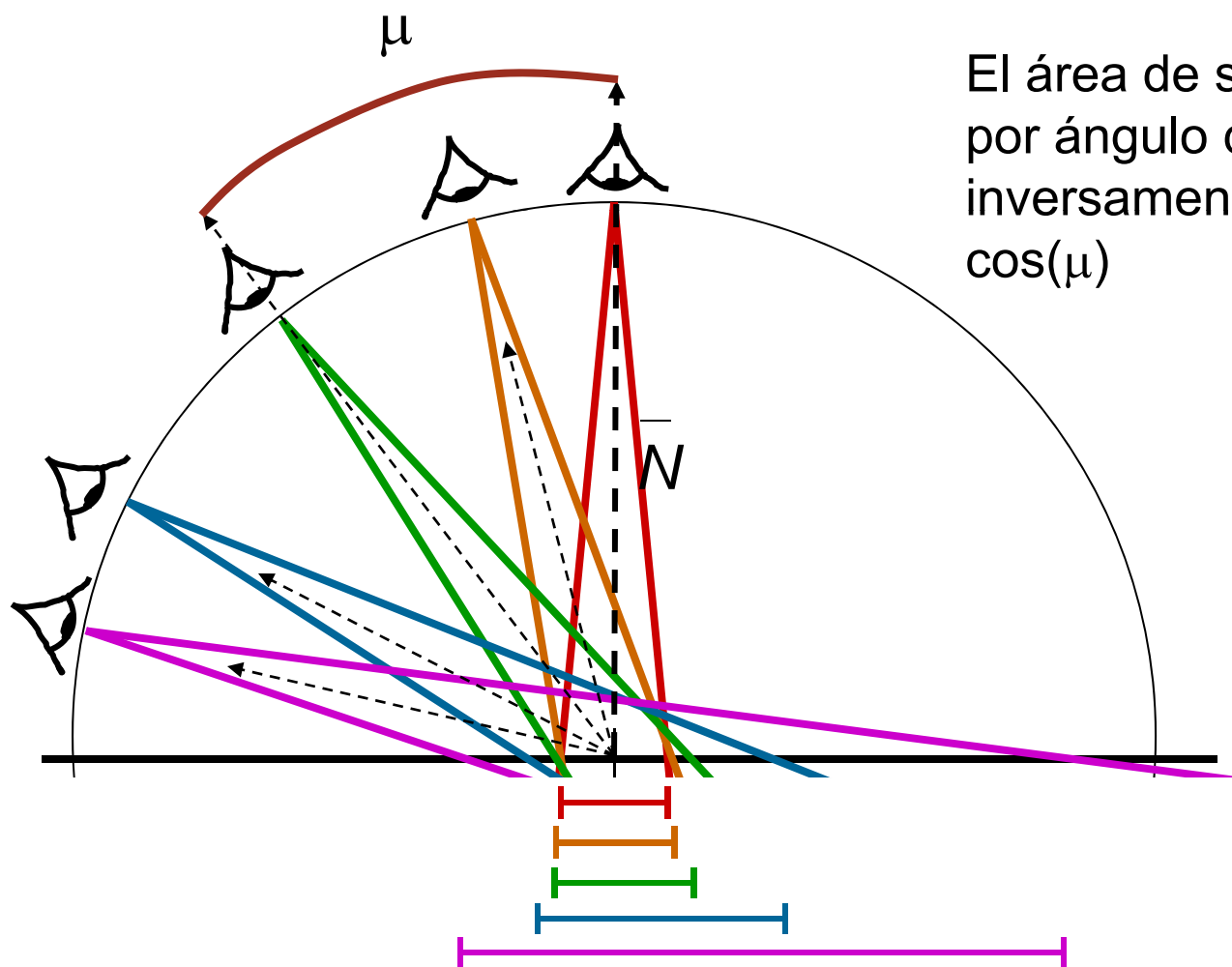
La intensidad de luz emitida por un punto hacia el observador es proporcional a  $\cos(\mu)$ . Esta forma “esférica” de distribución es independiente del ángulo  $\theta$  de la luz incidente.



El ángulo  $\theta$  de la luz incidente no influye en la forma de la distribución, sí en la intensidad.

La intensidad que le llega al observador es **directamente** proporcional a  $\cos(\theta)$ . Esto es particular de las superficies Lambertianas

# Reflexión difusa (reflexión lambertiana)



El área de superficie observada por ángulo de visión es inversamente proporcional a  $\cos(\mu)$

# Reflexión difusa (reflexión lambertiana)



Tenemos 2 efectos contrapuestos:

1) La intensidad de luz observada por cada punto de la superficie es directamente proporcional a  $\cos(\mu)$  .

2) La cantidad de área de superficie observada por unidad de ángulo es inversamente proporcional a  $\cos(\mu)$  .

=>Ambas cantidades se compensan.

Por tanto, **para las superficies lambertianas, la cantidad de luz que ve el observador es independiente de la dirección de éste** y sólo es proporcional a  $\cos(\theta)$ , donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la luz.



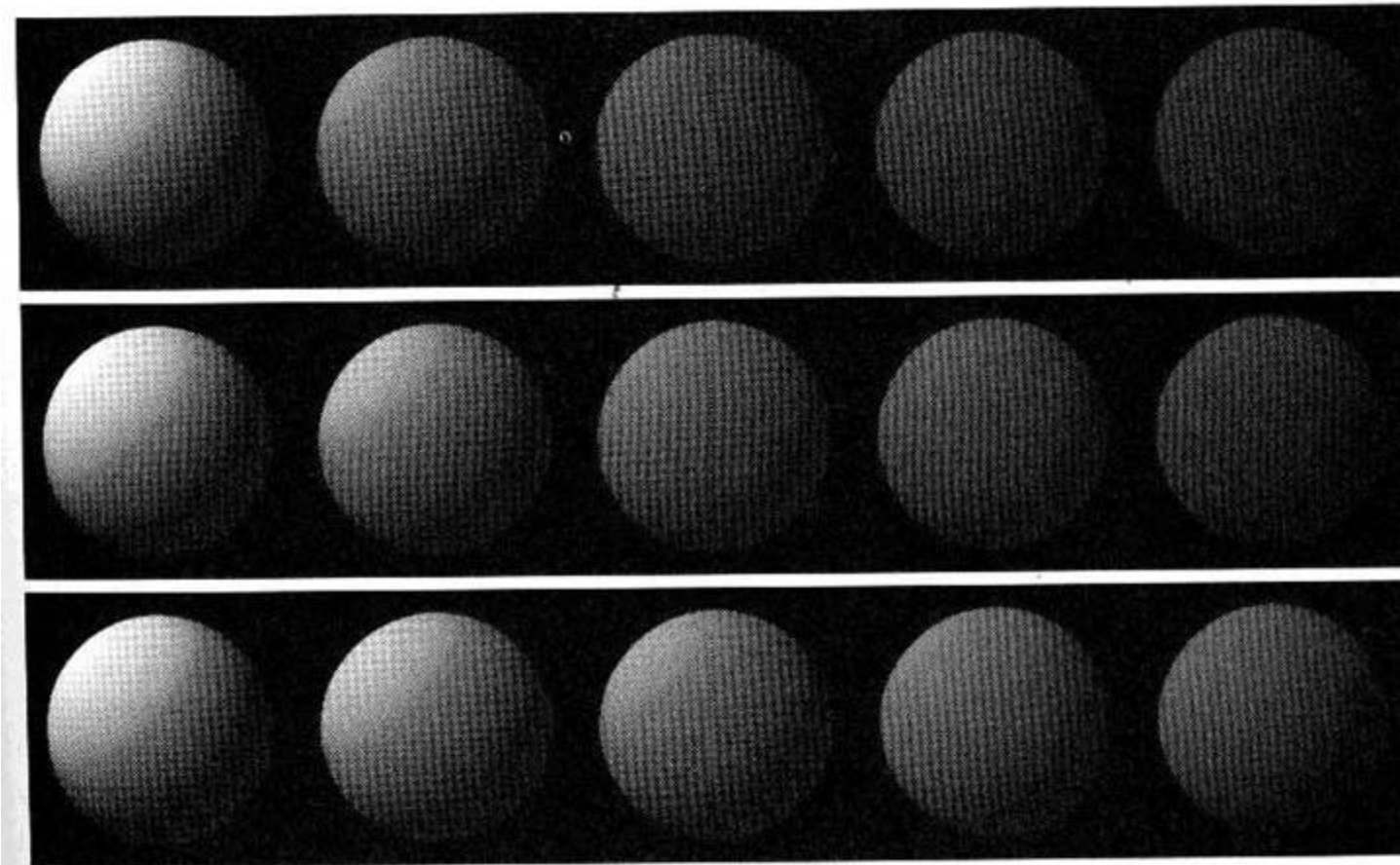
$$I = I_{aka} + I_{pkd} (N \cdot L)$$

Para dar más realismo a la imagen generada, se suma el componente especular y el componente difuso. Según como dosifique ambos componentes es el grado de realismo que lograré. Una imagen con un componente ambiental muy grande y un componente difuso muy pequeño  $k_a \gg k_d$ , no logra el realismo adecuado.

# Atenuación de la fuente luminosa



Factor de Atenuación debido a la distancia entre la fuente puntual y la superficie. Hasta ahora no se había considerado la distancia, solamente se había considerado el ángulo.



# Atenuación de la fuente luminosa



Factor de Atenuación debido a la distancia entre la fuente puntual y la superficie

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

Fórmulas de  $f_{att}$

$$f_{att} = 1/d_L^2$$

El Factor de Atenuación, solo afecta al componente difuso.

La ley física en la que se basa el Factor de Atenuación, no es muy útil en la práctica.

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

Ha tenido más éxito esta fórmula, en la que los parámetros  $c_i$  se ajustan para cada caso.

# Luces y superficies coloreadas



Hasta ahora consideramos solamente ecuaciones de luz y superficies blancas o grises. Ahora consideremos que la luz y los objetos tienen color. El color se puede considerar de forma simple a través de 3 componentes (rojo, azul, verde).

La intensidad de la luz puntual se descompone (de forma simple) en 3 valores:  $I_{pR}$ ,  $I_{pG}$ ,

$I_{pB}$

Ídem con la luz ambiente:  $I_{aR}$ ,  $I_{aG}$ ,  $I_{aB}$

Ídem con el color del objeto:  $O_{pR}$ ,  $O_{pG}$ ,  $O_{pB}$

$\Rightarrow$

$$I_R = I_{aR} k_a O_{dR} + f_{att} I_{pR} k_d O_{dR} (N \cdot L)$$

$$I_G = I_{aG} k_a O_{dG} + f_{att} I_{pG} k_d O_{dG} (N \cdot L)$$

$$I_B = I_{aB} k_a O_{dB} + f_{att} I_{pB} k_d O_{dB} (N \cdot L)$$

# Atenuación Atmosférica

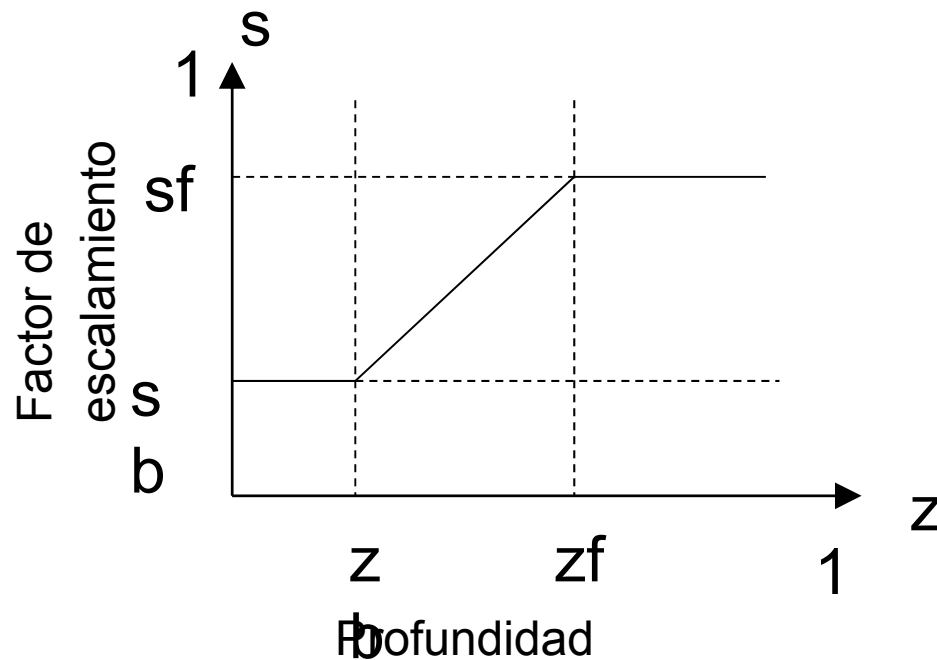


Los objetos más lejanos al observador se generan con menor intensidad que los más cercanos.

$s_o$  = factor de escalamiento del objeto.

$I_\lambda$  = intensidad inicial del objeto.

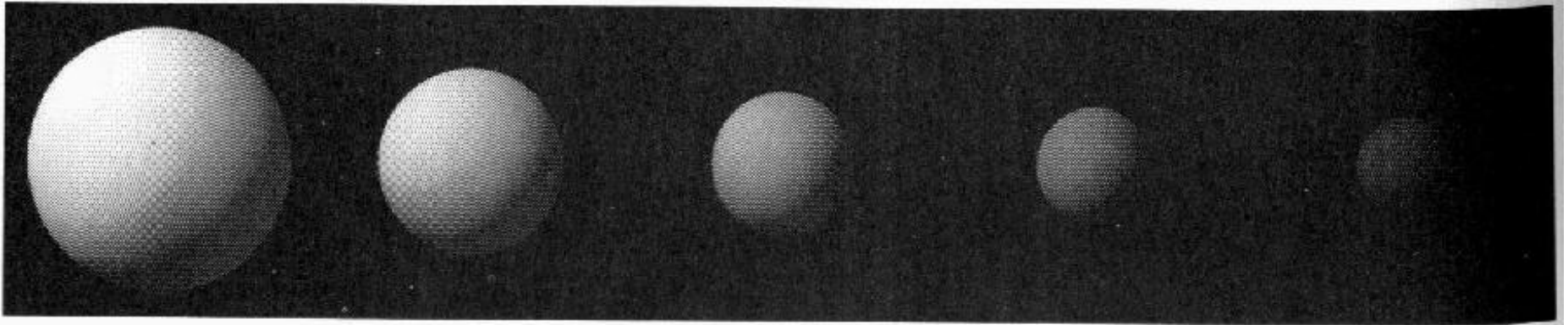
$I_{dc\lambda}$  = intensidad indicadora de profundidad.



La atmósfera hace de filtro, disminuyendo la intensidad de luz debido a la distancia y coloreando a los objetos con su propio color.

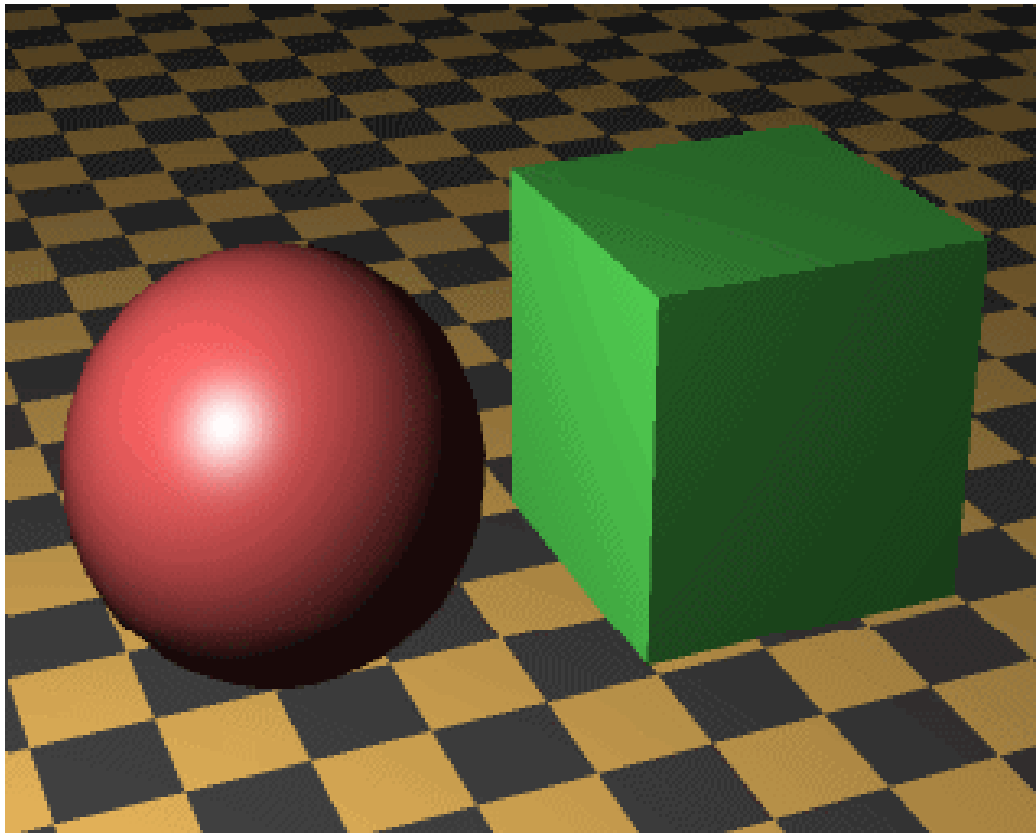
Este modelo implementado no es físicamente correcto (por ej.: luego de determinada profundidad la atenuación se mantiene constante).

# Atenuación Atmosférica



Aquí, la disminución de la intensidad, no se debe a la mayor distancia de la fuente de luz al objeto (la fuente de luz puede estar en el infinito, como el sol), sino a la atmósfera existente entre el objeto y el observador. En este caso, el color de la atmósfera es negro, pero podría ser otro.

# Reflexión Especular



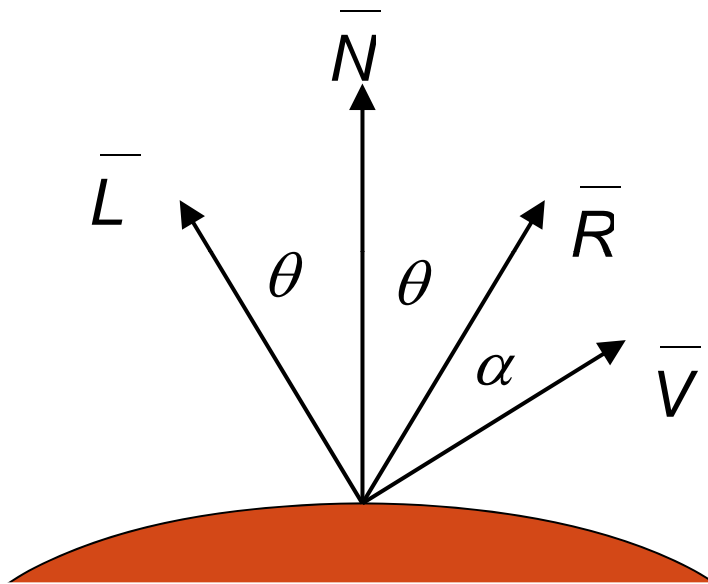
Además de la luz ambiente y la reflexión difusa, tenemos la reflexión especular.

No se nota mucho en el cubo pero sí en la esfera.

La zona más brillante en la esfera se debe al componente especular de esta. En el resto de la esfera dicho componente influye poco.

**NOTA IMPORTANTE:** la reflexión especular sólo considera la reflexión de la luz proveniente de la fuente puntual. No se consideran por ejemplo los espejos, que reflejan además otros objetos.

# Reflexión Especular



Aquí, se ven los principales vectores que influyen en el color final de un punto del objeto.

A diferencia de la reflexión difusa, aquí sí es importante la posición del observador.

L = dirección de la luz incidente.

N = normal a la superficie en el punto.

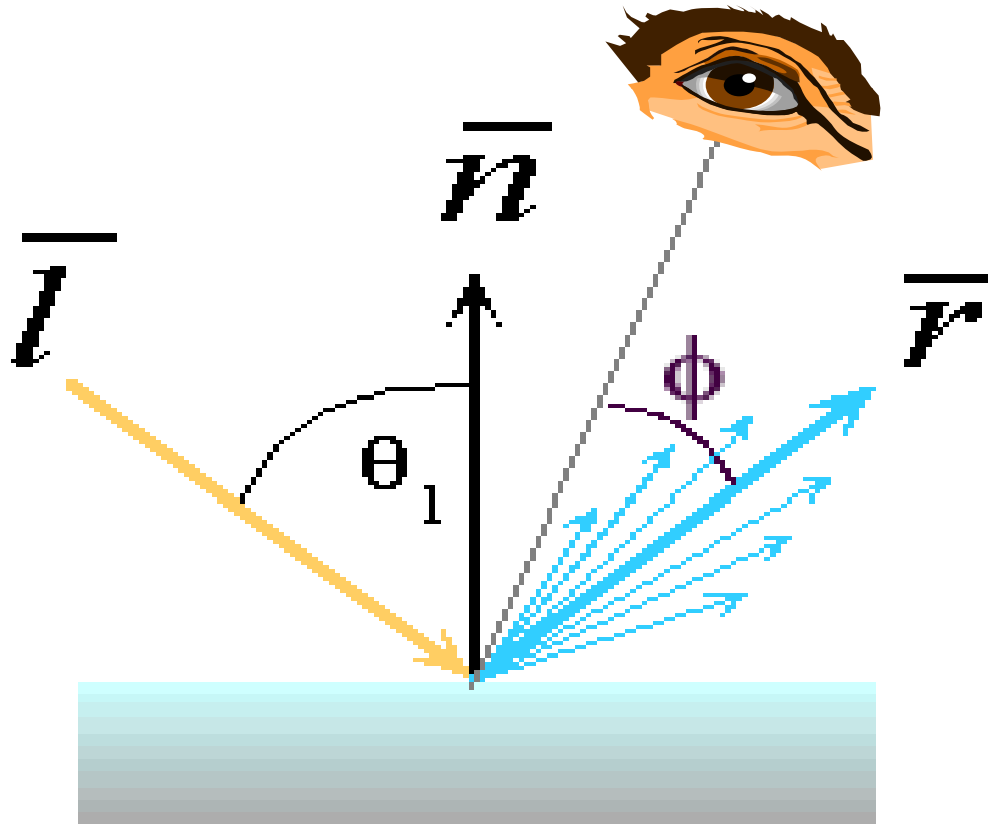
R = simétrico a L según N.

V = dirección desde la cual el observador ve al objeto.

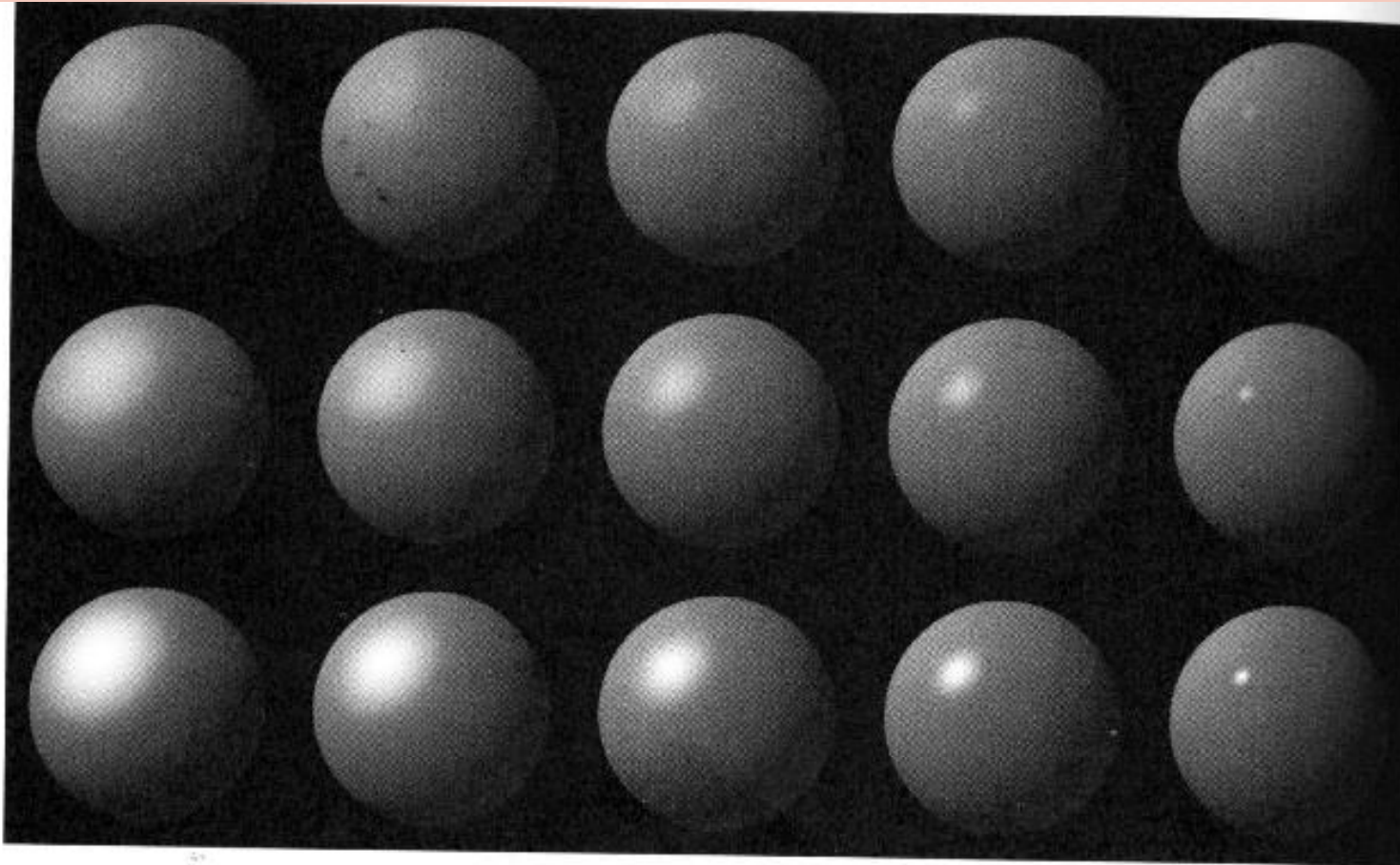
# Reflexión Especular



- ❑ Superficies no perfectas, hay una variación de los rayos reflejados.



# Reflexión Especular (modelo de Phong)



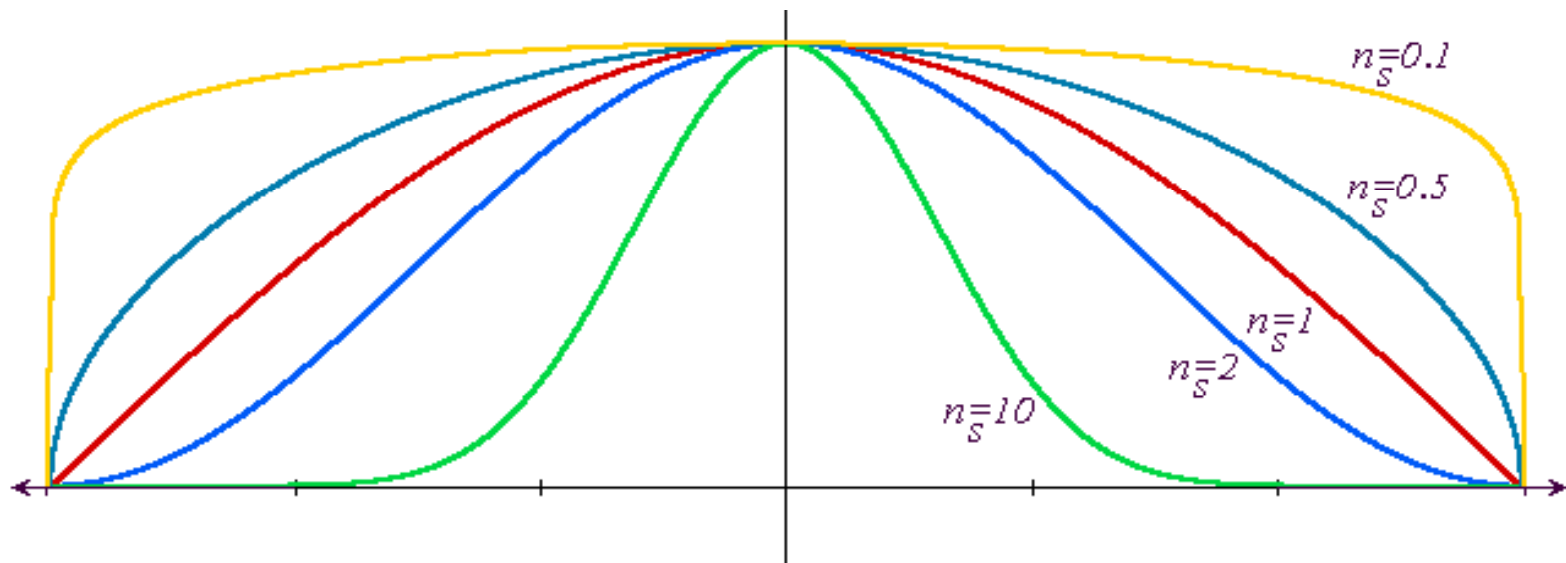
Aquí se aprecian los efectos para distintos componentes especulares.

De izquierda a derecha, el  $n$  es mayor ( y por tanto se concentra el rayo más en  $R$ ). De arriba abajo, el componente especular influye más en la luz total.

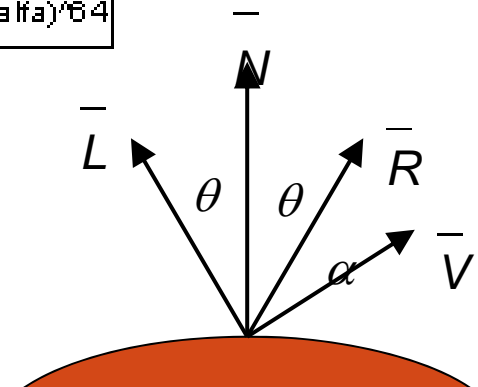
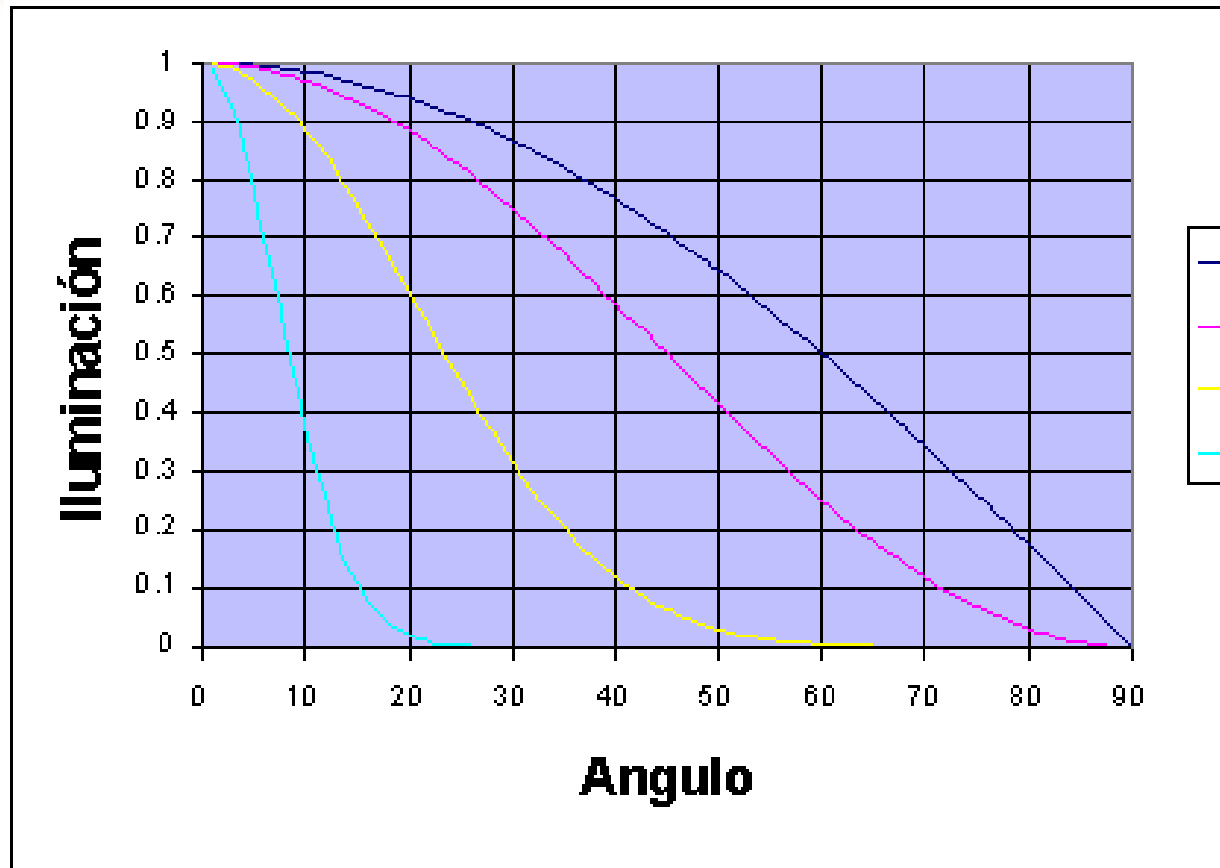
# Reflexión Especular (modelo de Phong)



- ❑ El modelo especular Phong permite modelar las variaciones
- ❑ Tenemos:  $I_{out} = k_{specular} \cdot I_{light} \cdot \cos^s(\theta)$
- ❑  $s$  es el factor brillo de la superficie



# Reflexión Especular (modelo de Phong)



A la ecuación de intensidad hallada actualmente se le suma el término

$$(\cos \alpha)^n = (\vec{R} \cdot \vec{V})^n$$

# Modelo de Iluminación Phong



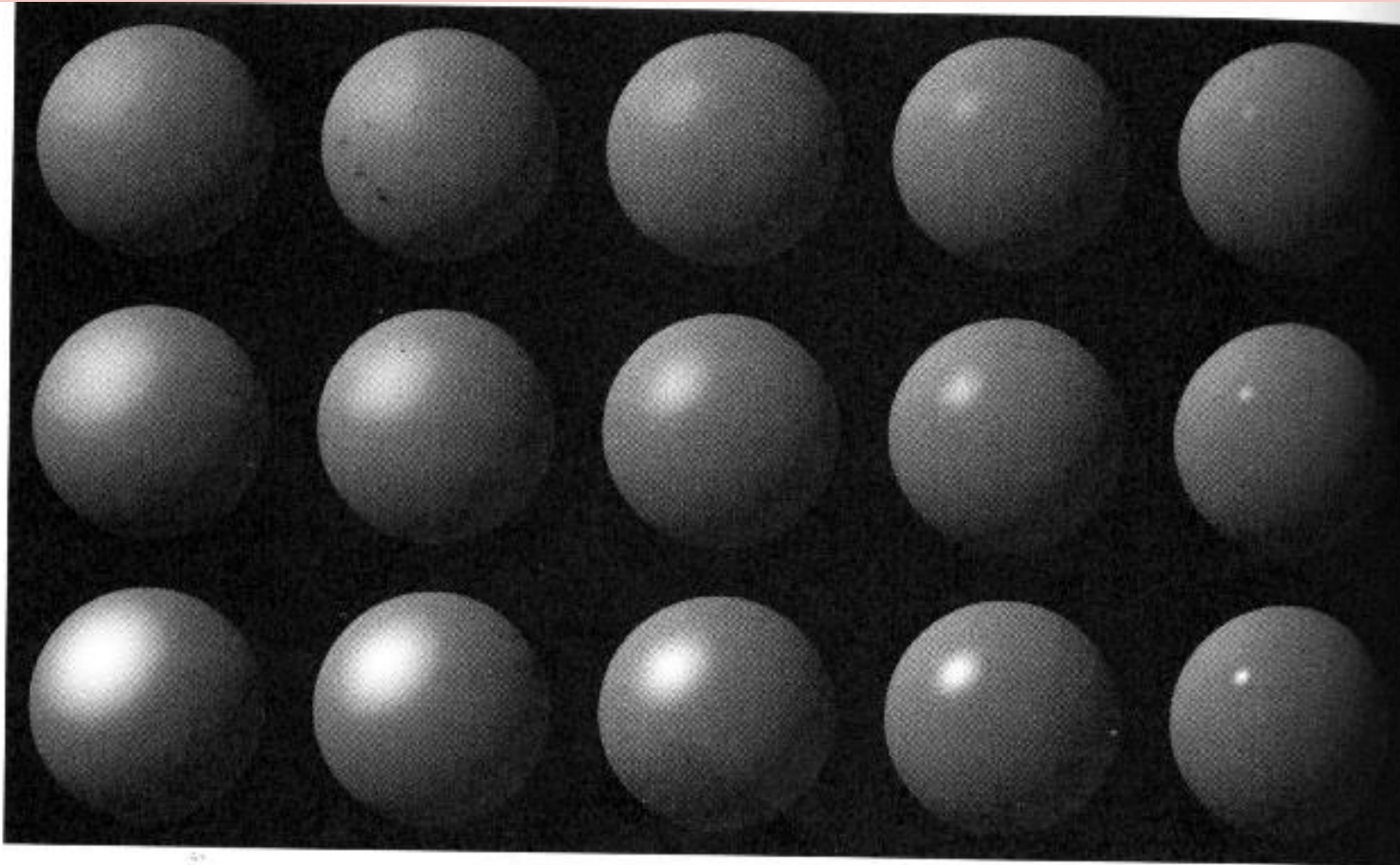
- Juntando todas las propiedades de la luz y del material:

$$I_{out} = k_{ambient} \cdot I_{ambient} + k_{diffuse} \cdot I_{light} \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \\ + k_{specular} \cdot I_{light} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^s$$

- Si tenemos más de una fuente de luz:

$$I_{out} = k_{ambient} \cdot I_{ambient} \\ + \sum I_{light} \cdot (k_{diffuse} \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) + k_{specular} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^s)$$

# Reflexión Especular (modelo de Phong)



Todas las esferas tienen  $I_a = I_p = 1$ ,  $k_a = 0.1$ ,  $k_d = 0.45$ .

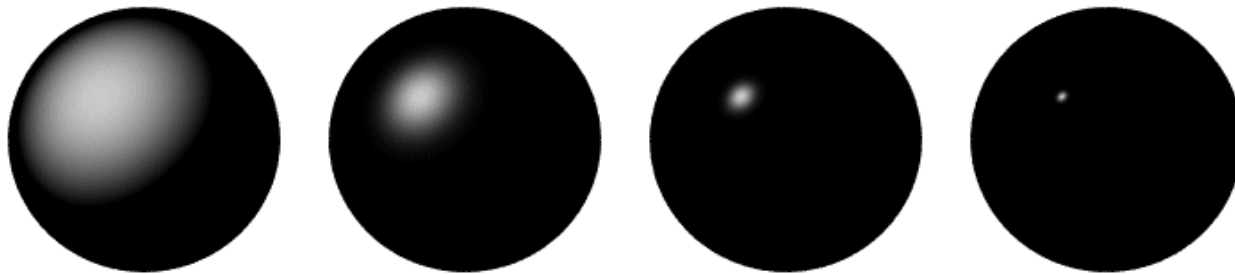
De izquierda a derecha,  $n = 3.0, 5.0, 10.0, 27.0, 200.0$

De arriba a abajo,  $k_s = 0.1, 0.25, 0.5$

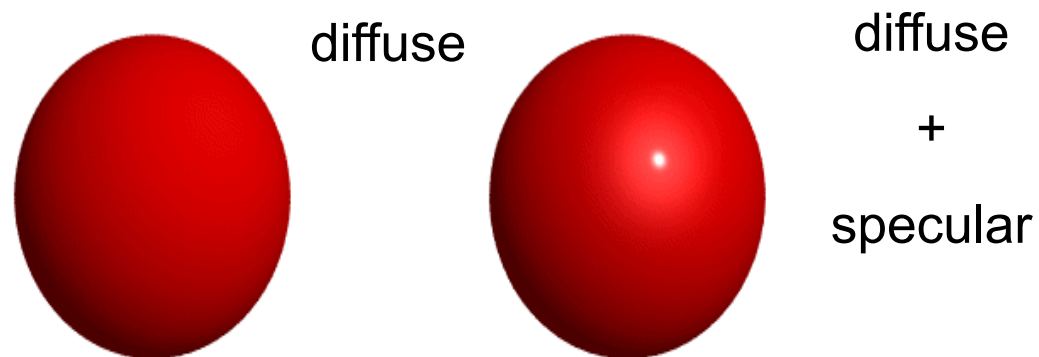
# Reflexión Especular (modelo de Phong)



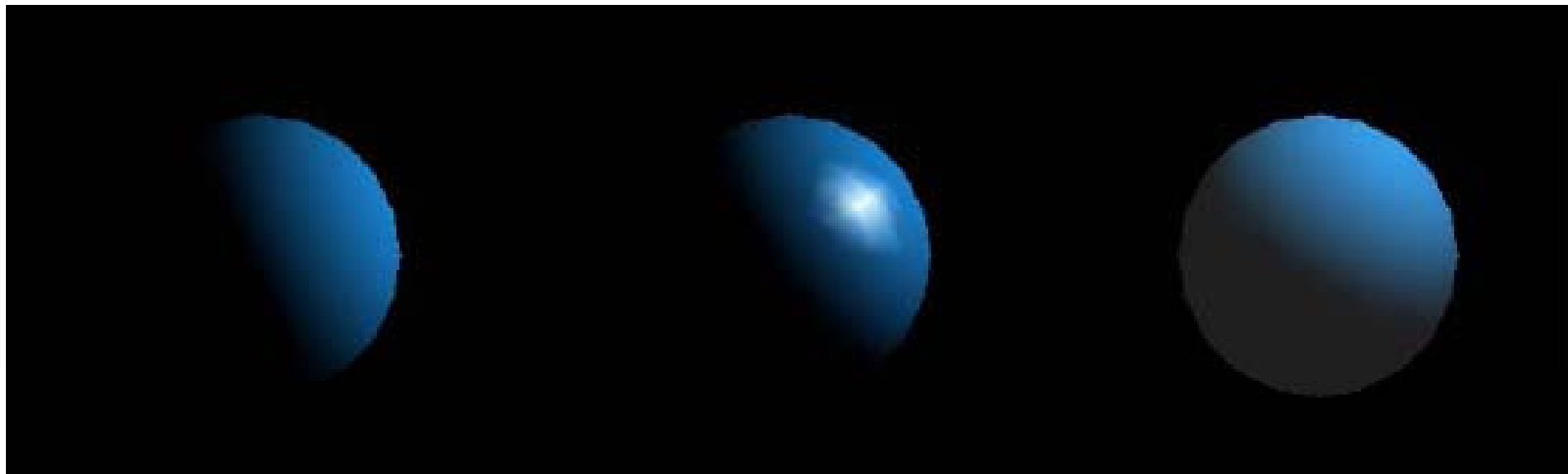
- Variando el brillo del componente especular



- Combinando difusa con especular



# Suma de Términos

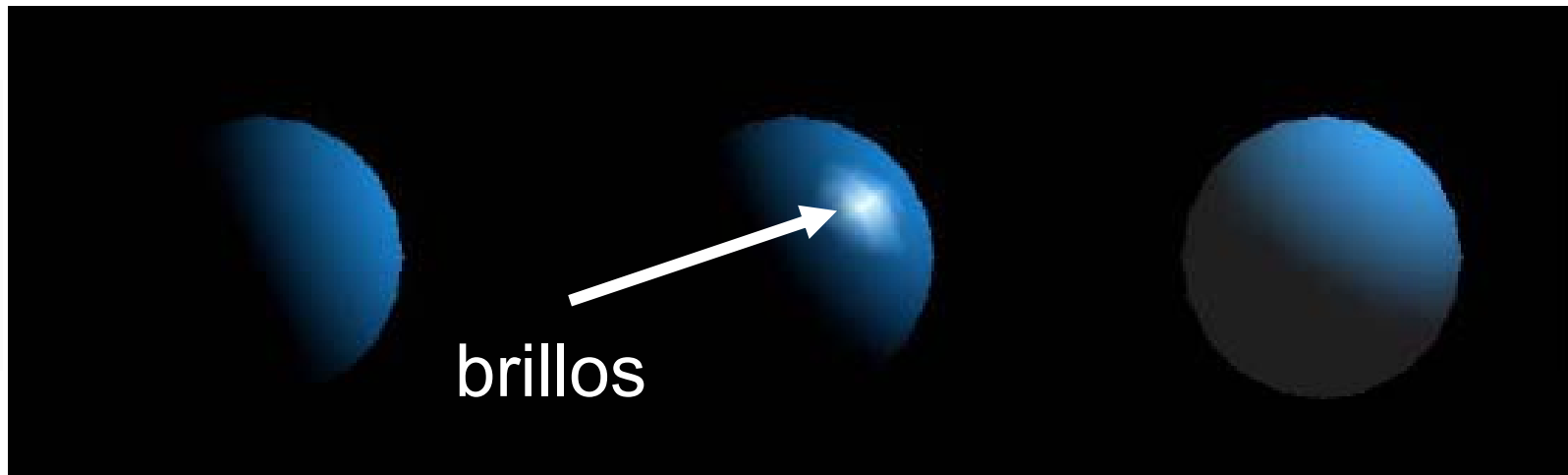


difuso

difuso  
+  
especular

difuso  
+  
ambiental

# Suma de Términos



difuso

difuso  
+  
especular

difuso  
+  
ambiental

# Suma de Términos

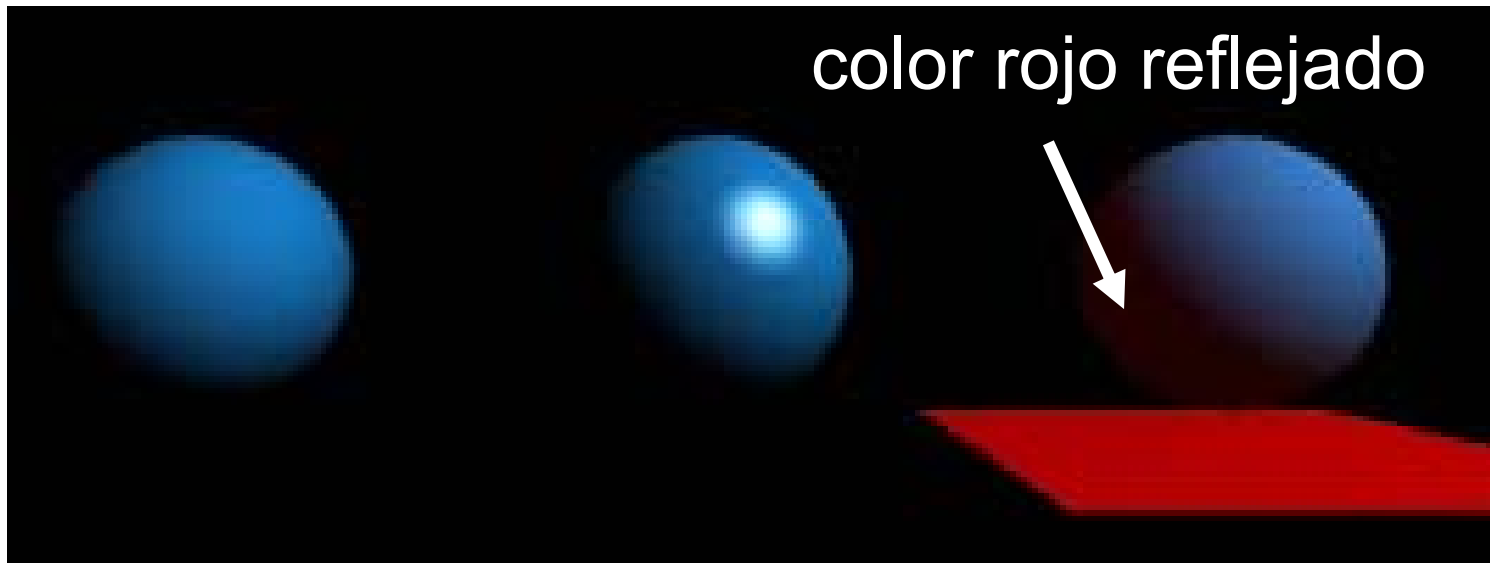


difuso

difuso  
+  
especular

difuso  
+  
ambiental

# Suma de Términos

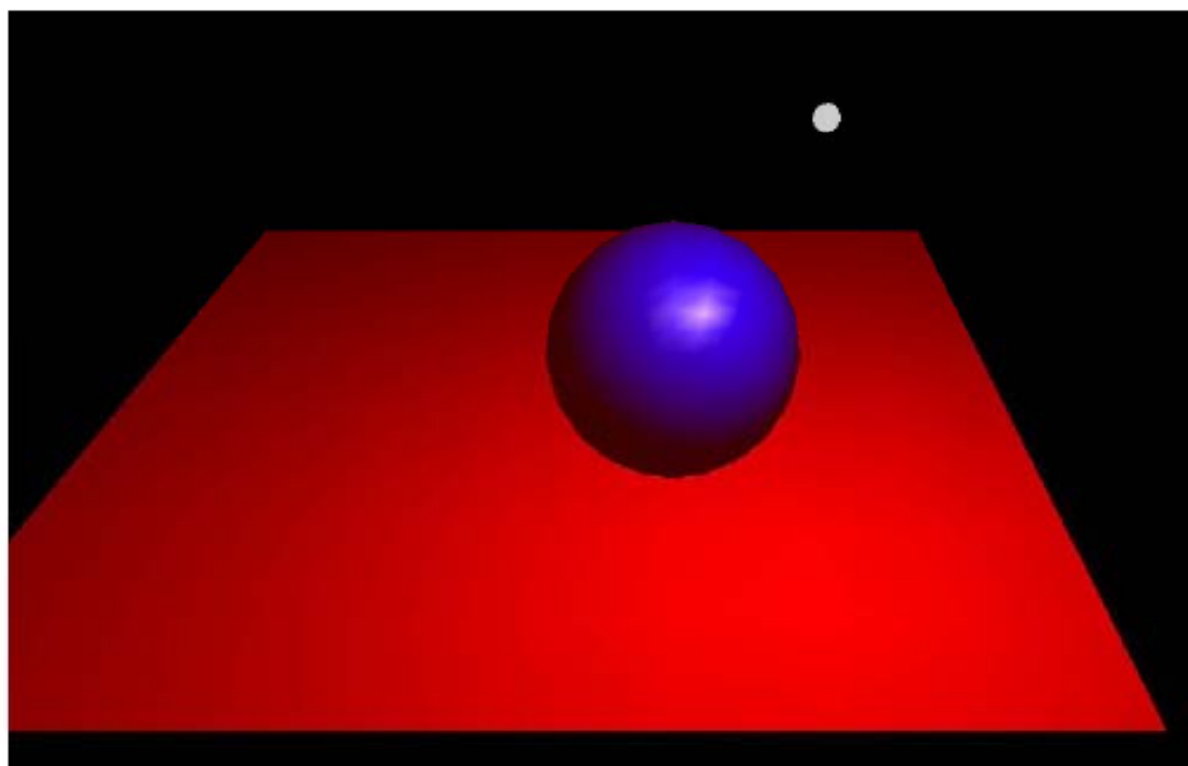


difuso

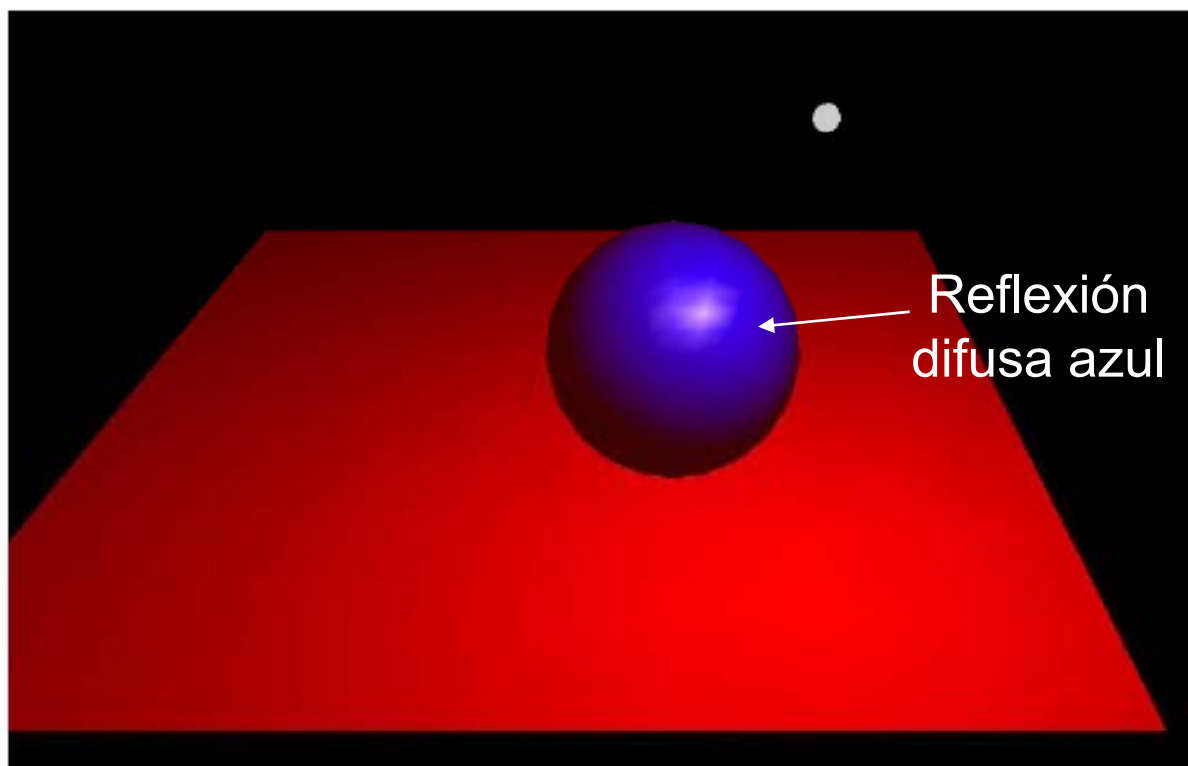
difuso  
+  
especular

difuso  
+  
ambiental

# Ejemplo del Modelo de Phong

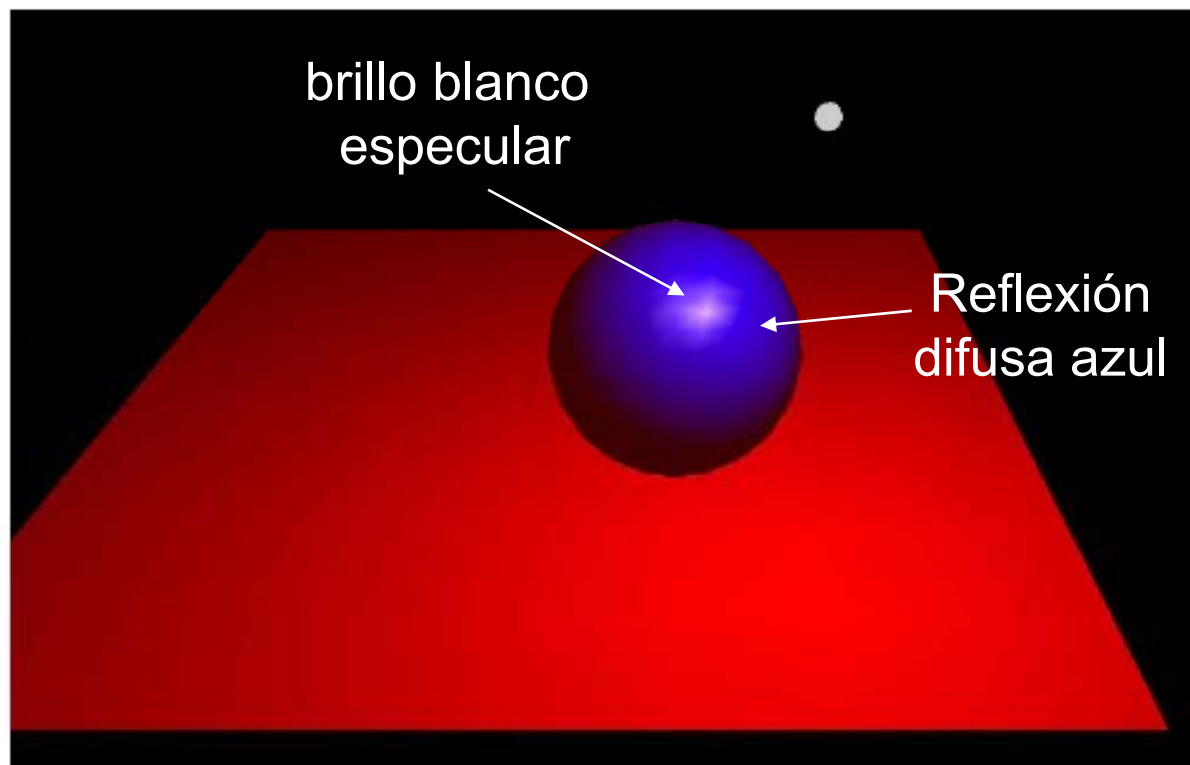


# Ejemplo del Modelo de Phong

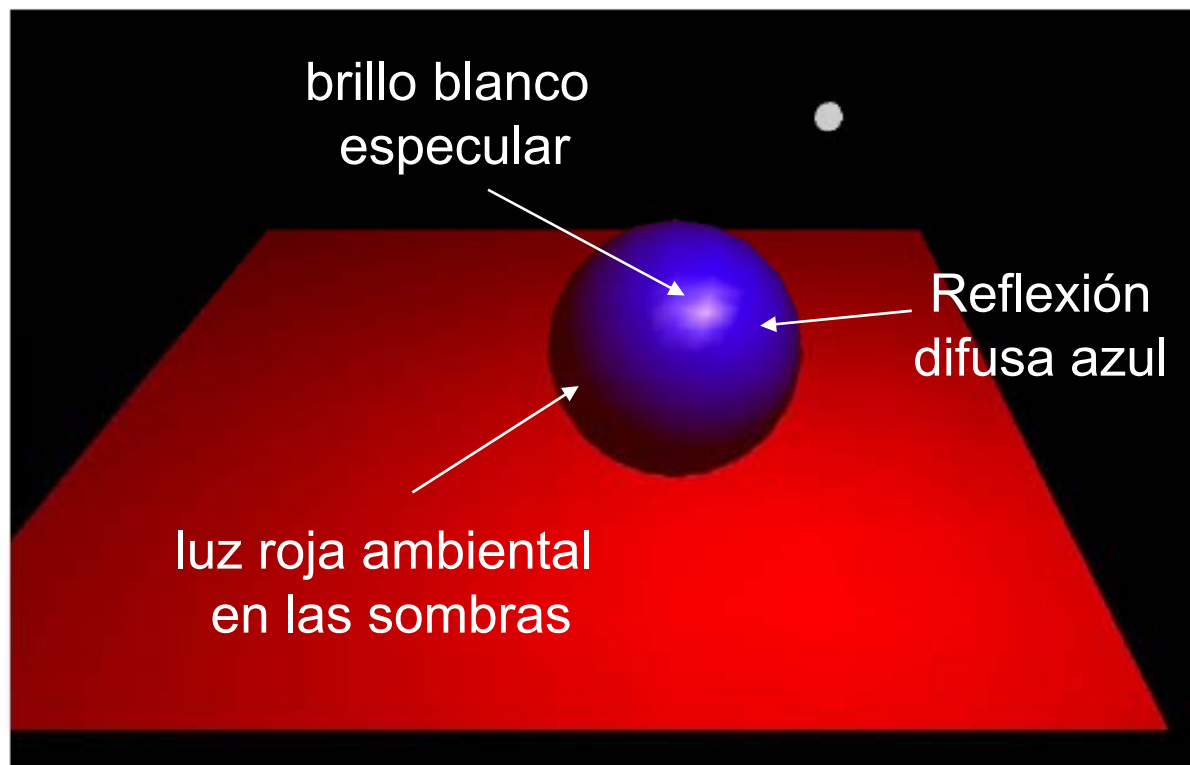


Reflexión  
difusa azul

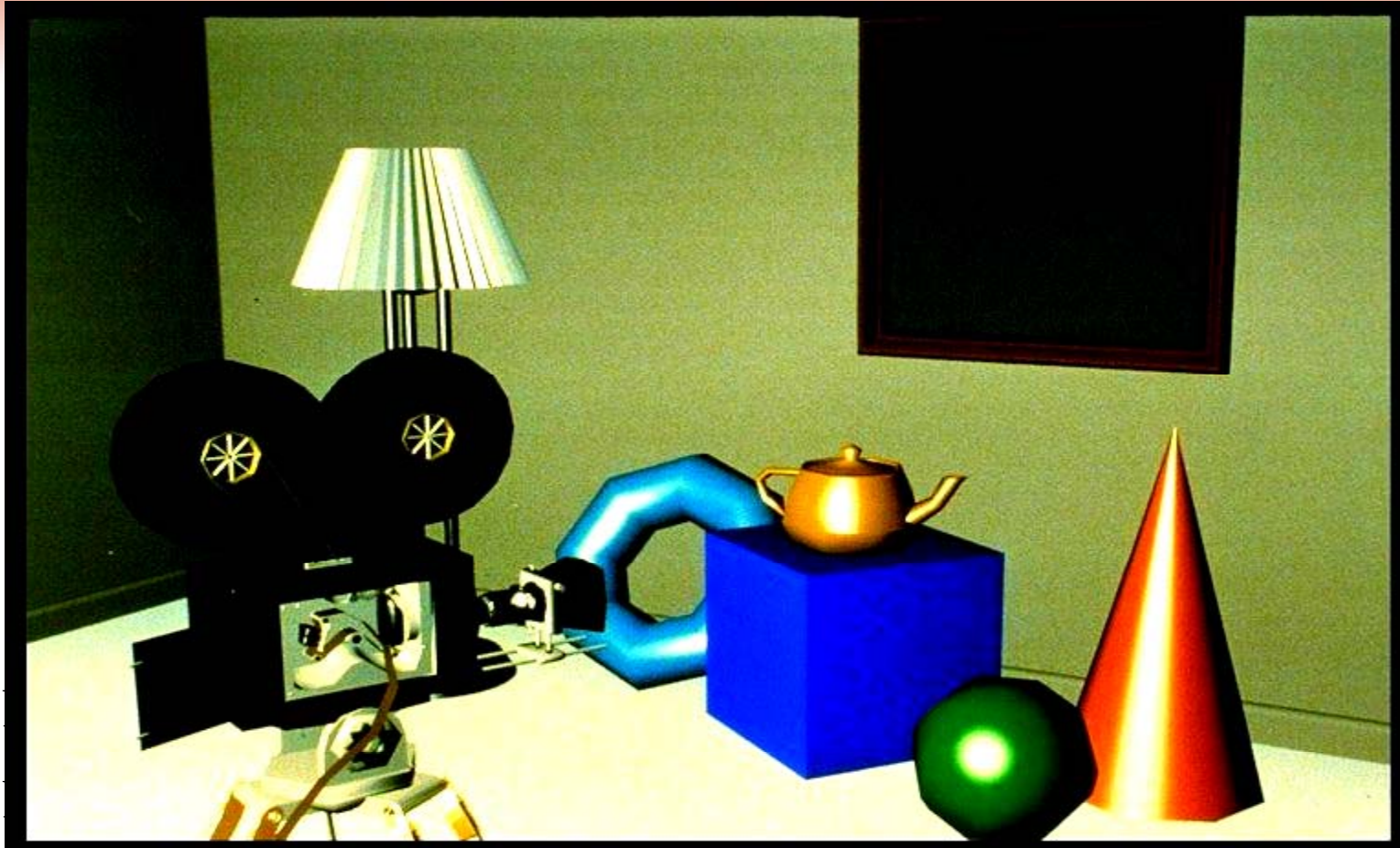
# Ejemplo del Modelo de Phong



# Ejemplo del Modelo de Phong



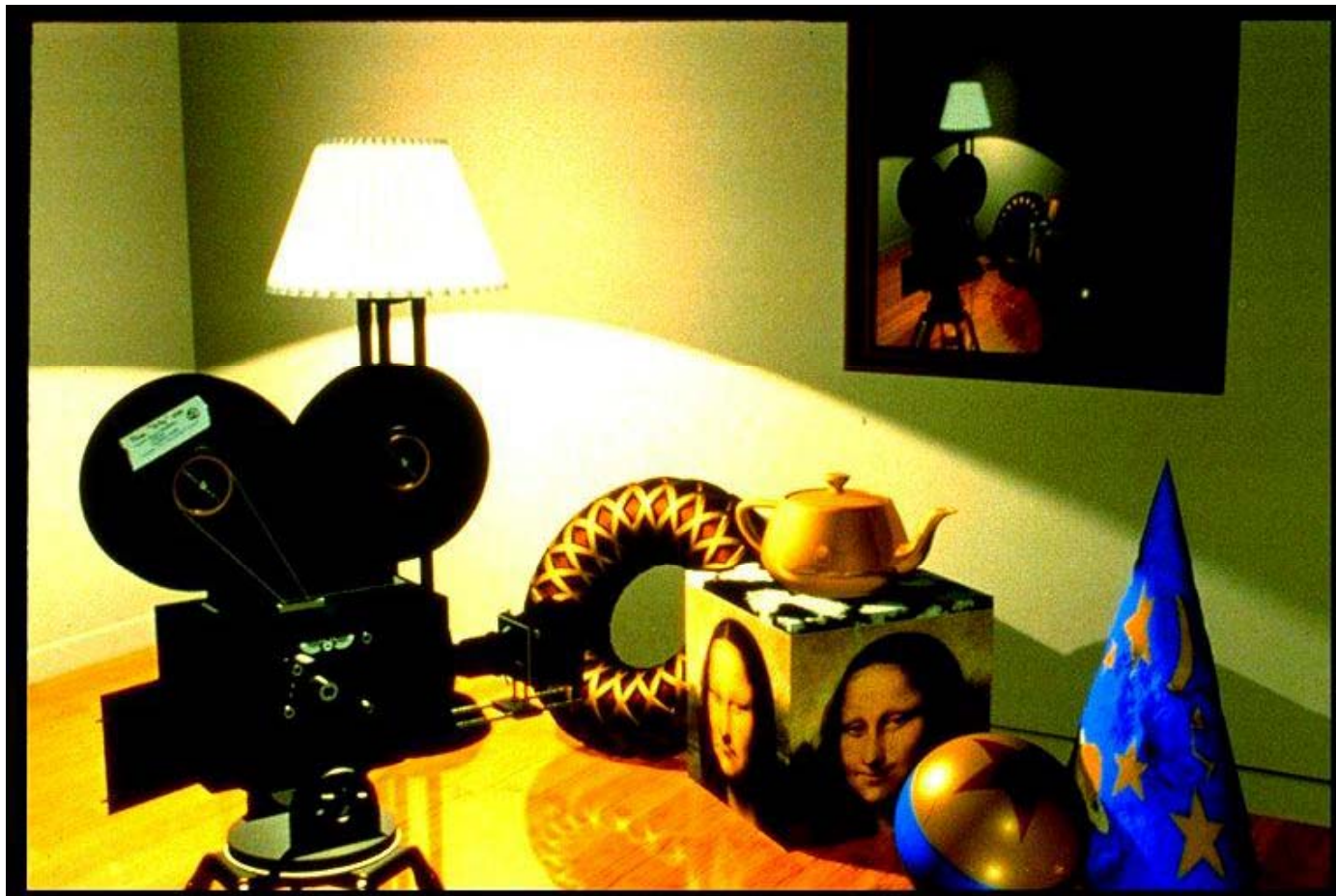
# Example



# Ray Tracing!

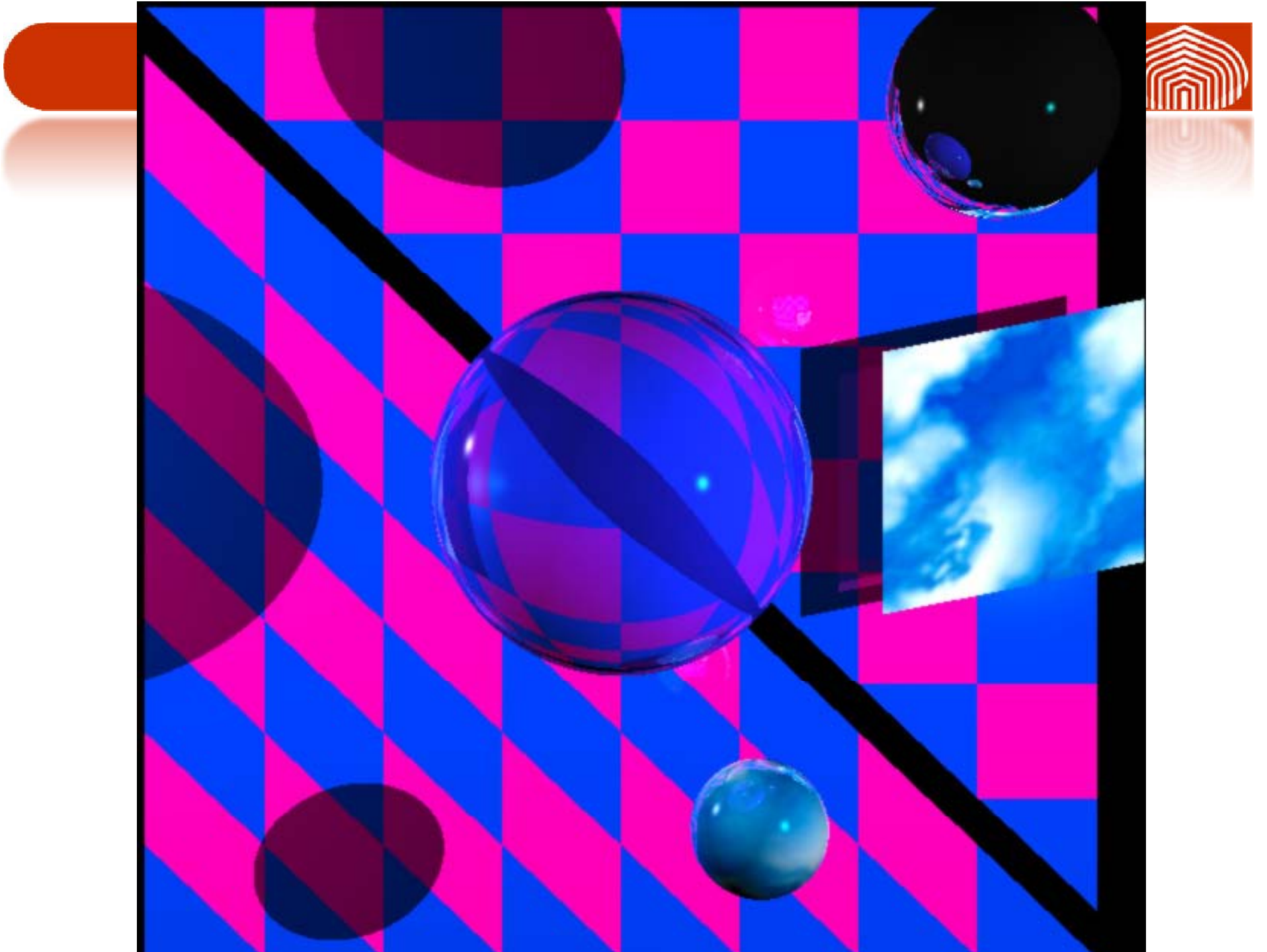


- mejor



# Ray Traced





Ray Tracing



# OpenGL Materials



```
GLfloat white8[] = {.8, .8, .8, 1.}, white2 = {.2,.2,.2,1.},black={0.,0.,0.};  
GLfloat mat_shininess[] = {50.};          /* Phong exponent */
```

```
glMaterialfv( GL_FRONT_AND_BACK,  
             GL_AMBIENT, black);
```

```
glMaterialfv( GL_FRONT_AND_BACK,  
             GL_DIFFUSE, white8);
```

```
glMaterialfv( GL_FRONT_AND_BACK,  
             GL_SPECULAR, white2);
```

```
glMaterialfv( GL_FRONT_AND_BACK,  
             GL_SHININESS, mat_shininess);
```

# OpenGL Lighting



```
GLfloat white[] = {1., 1., 1., 1.};
GLfloat light0_position[] = {1., 1., 5., 0.}; /* directional light (w=0) */

glLightfv(GL_LIGHT0, GL_POSITION, light0_position);
glLightfv(GL_LIGHT0, GL_DIFFUSE, white);
glLightfv(GL_LIGHT0, GL_SPECULAR, white);
glEnable(GL_LIGHT0);

glEnable(GL_NORMALIZE); /* normalize normal vectors */
glLightModeli(GL_LIGHT_MODEL_TWO_SIDE, GL_TRUE); /* two-sided lighting*/

glEnable(GL_LIGHTING);
```