



técnicas avanzadas de gráficos  
ingeniería multimedia

# **Seminario 5**

## ***Render básico: iluminación***



- ¿Qué es el *render* de una escena?
- ¿Qué procesos comprende?
- ¿Qué lugar ocupa en la tubería 3D?



- Conocemos por *render* al proceso de generar una imagen de una escena a partir de los modelos que la forman.
- Puesto que la imagen es una matriz de píxeles, renderizar es calcular el color que debe tener cada uno de los píxeles
- El color con el que un píxel se visualiza en pantalla depende de:
  - El material de la superficie (color, textura...)
  - El modelo de reflexión de la superficie (cómo la superficie refleja la luz)
  - El modelo de iluminación de la escena (cuántas luces y de qué forma iluminan)
  - La posición de la superficie respecto a las luces y a la cámara
  - Las condiciones ambientales de la escena: niebla



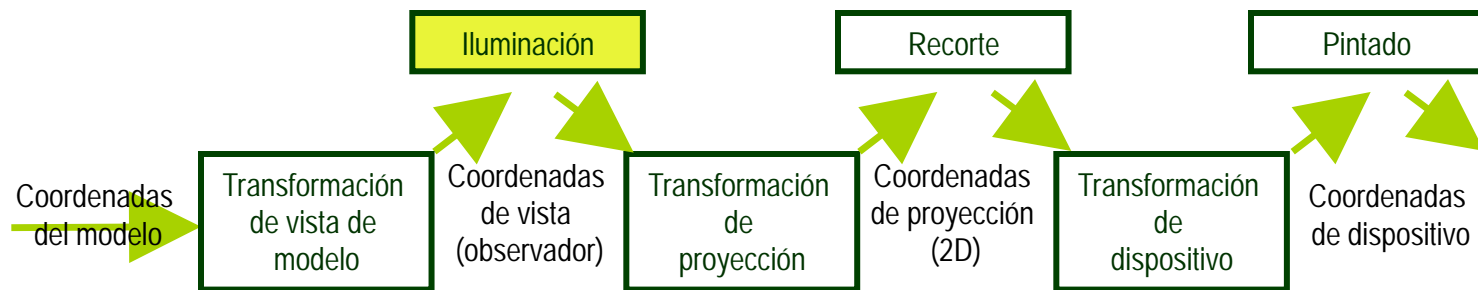
# La tubería 3D ampliada

- Vimos la tubería 3D como el camino que siguen los puntos 3D hasta ser representados en la pantalla 2D
- Sólo tuvimos en cuenta los aspectos geométricos  $\Rightarrow$  transformaciones



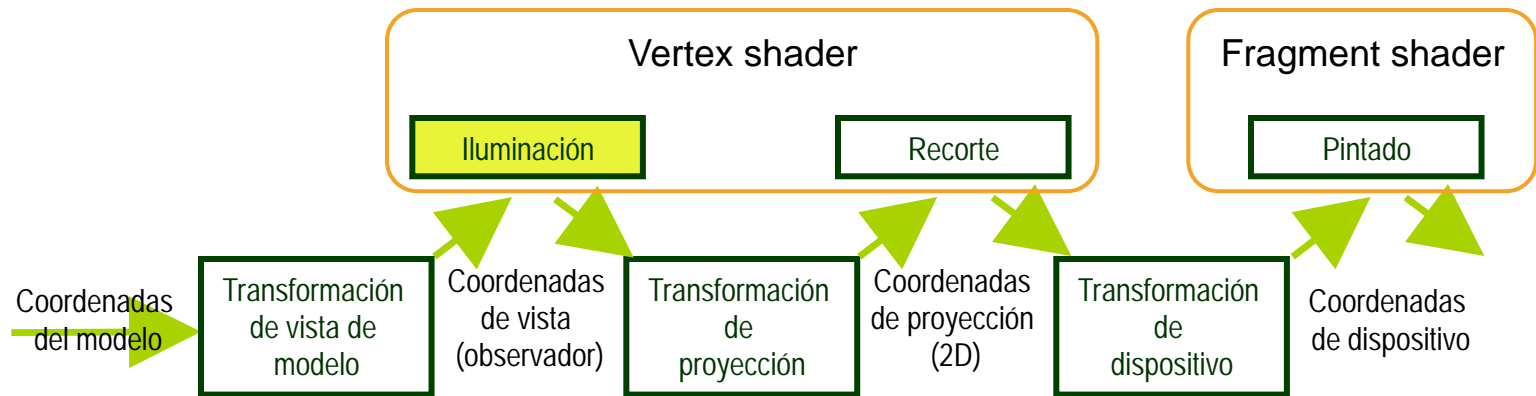
# La tubería 3D ampliada

- Vimos la tubería 3D como el camino que siguen los puntos 3D hasta ser representados en la pantalla 2D
- Sólo tuvimos en cuenta los aspectos geométricos  $\Rightarrow$  transformaciones
- La tubería 3D se puede ampliar para incorporar el render:
  - Etapa de iluminación o *lighting*
  - Etapa de recorte o *clipping*
  - Etapa de pintado o *rasterization*



# La tubería 3D ampliada

- Esta tubería ampliada se corresponde, aproximadamente, con la tubería de OpenGL (y de otras librerías gráficas)
- OpenGL ofrece una librería 3D estándar, pero puede programarse a través de *shaders*
- Cada tipo de *shader* permite actuar sobre unas etapas

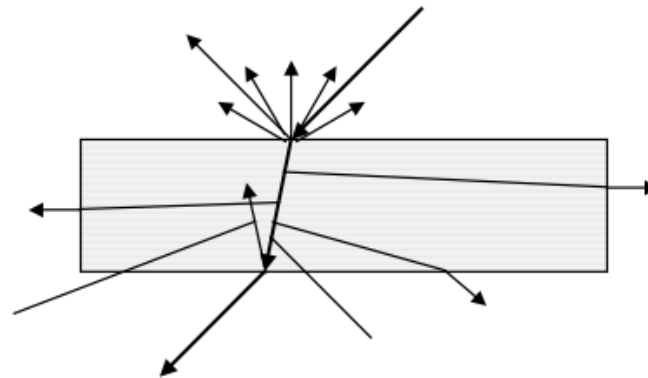


# Etapa de iluminación

- Esta etapa trata cómo afecta la luz a los objetos de la escena y cómo reaccionan los objetos ante la luz
- Afecta a los vértices en coordenadas de vista
- Para modificar la etapa, podemos actuar sobre los *vertex shaders*
- En este tema veremos cómo funciona la iluminación, no cómo programarla con *shaders*

# Etapa de iluminación

- Los seis fenómenos que determinan cómo la luz afecta a la visión de una superficie son:
  - reflexión
  - transmisión
  - absorción
  - difracción
  - refracción
  - Interferencia
- La mayoría de los modelos tratan básicamente el fenómeno de la reflexión





- Confusión entre los términos
  - **Modelo de reflexión:** describe la interacción de la luz con una superficie
  - **Modelo de luz:** define la naturaleza de la luz que emana de una fuente
  - **Modelo de sombreado:** describe el método para asignarle una intensidad a cada punto de una superficie
- En este tema veremos los modelos de reflexión y de luz, que conforman lo que se denomina Iluminación o *Lighting*.
- La mayoría de los visualizadores utilizan
  - Modelo de reflexión simplificado
  - Modelo de iluminación extremadamente simplificado (casi siempre, un punto de luz)

# Modelos de reflexión

- Modelos locales de reflexión :
  - Tratan sólo la primera reflexión
  - Los objetos interactúan sólo con las fuentes de luz directas, obviándose la luz que llega reflejada por otros objetos
  - Hay modelos
    - Empíricos – Modelo de Phong
    - Basados en las características físicas de las superficies
    - Basados en la teoría de las ondas
    - Híbridos – Modelos de Blinn y de Cook-Torrance
- Modelos globales de reflexión :
  - Consideran también las interacciones con los demás objetos: tienen en cuenta la luz reflejada por los demás objetos
  - Los principales son:
    - Trazado de Rayos
    - Radiosidad

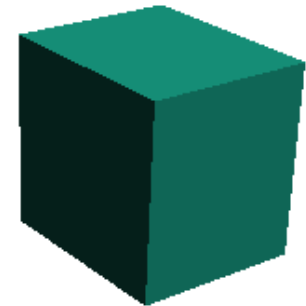
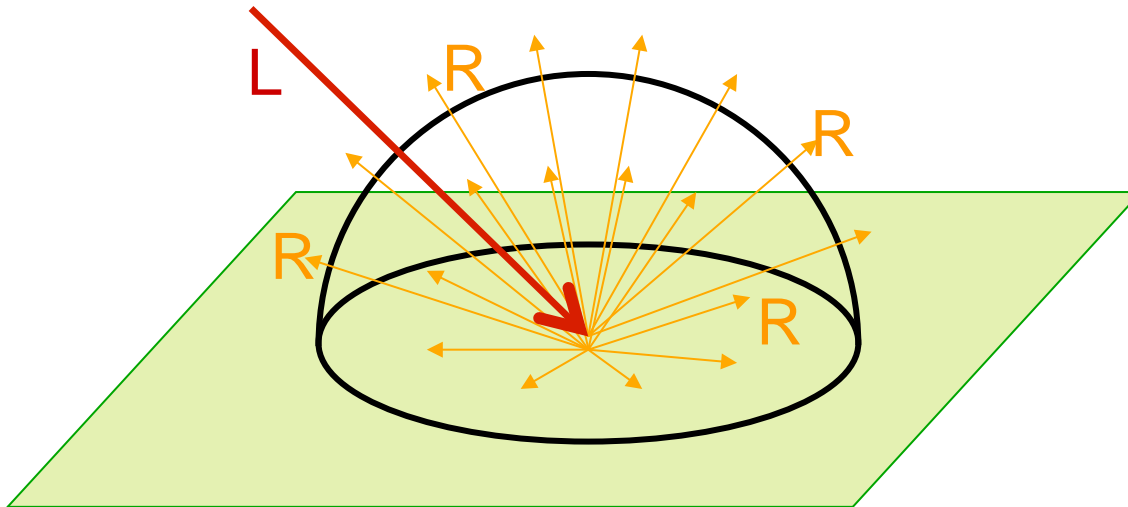
# Tipos de superficies

- En Gráficos por Computador suelen clasificarse las superficies en:
  - Superficies Difusas
  - Superficies Especulares
- Toda superficie se considera que es una combinación de estos tipos de superficies

# Tipos de superficies

## Superficies difusas

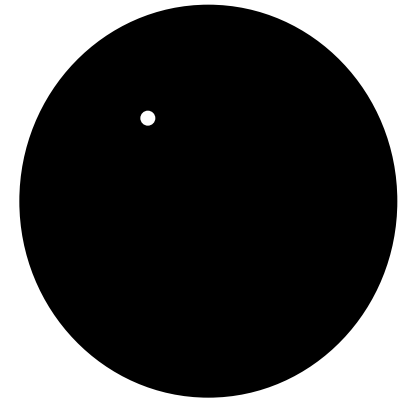
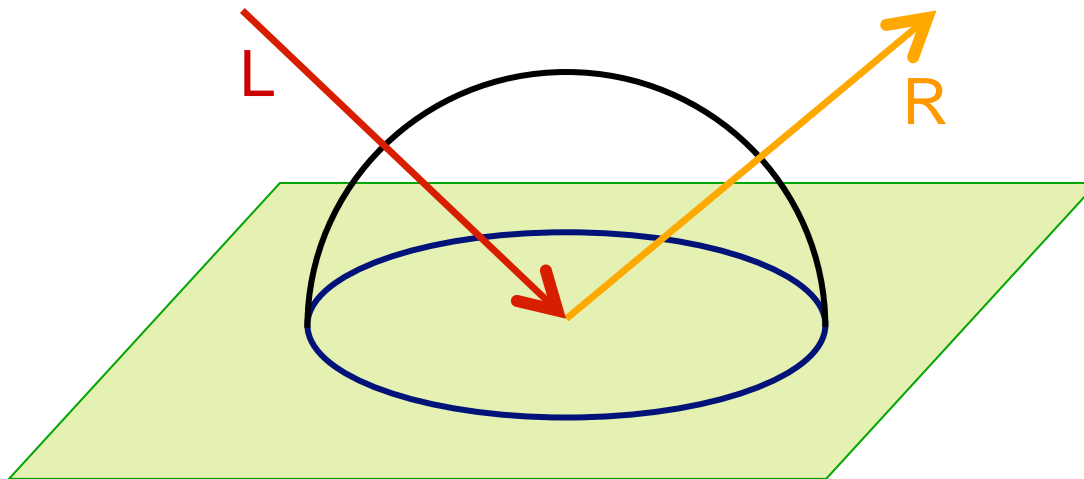
- Una **superficie difusa perfecta (o superficie Lambertiana)** refleja la radiación en todas las direcciones con la misma intensidad: Toda la superficie se ilumina con la misma intensidad
- La función de intensidad es constante para toda dirección de reflexión  $R$ , aunque puede variar con la dirección de incidencia de la luz  $L$



# Tipos de superficies

## Superficies especulares

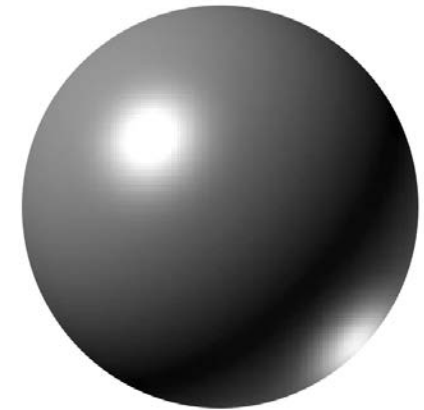
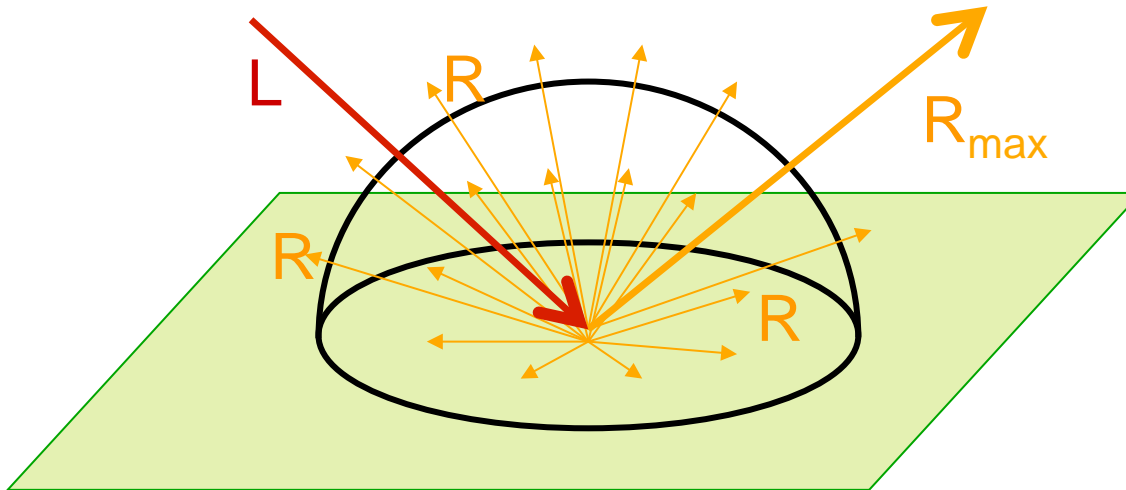
- Una **superficie especular perfecta** refleja la radiación que proviene de una dirección en una única dirección de reflexión: Sólo si el observador se encuentra sobre esa dirección de reflexión verá la superficie iluminada
- La función de intensidad depende tanto de la dirección de incidencia de la luz  $L$  como de la dirección de reflexión  $R$



# Tipos de superficies

## Superficies mixtas

- Es el caso más habitual: Combinación de superficie difusa y especular
- Refleja la radiación en todas las direcciones pero con mayor intensidad en una de ellas  $R_{max}$ : La iluminación es prácticamente la misma desde cualquier posición del observador pero aparecen brillos
- La función de intensidad depende tanto de la dirección de incidencia de la luz  $L$  como de la dirección de reflexión  $R$





# Aspectos de la reflexión

- Hay una serie de aspectos que afectan a la reflexión:
  - Rugosidad
  - Angulo de incidencia
  - Reflexiones múltiples



# Aspectos de la reflexión

## Rugosidad

- Las superficies pulidas tienden a reflejar las radiaciones en una única dirección → Superficies especulares
- Las superficies rugosas tienden a reflejar las radiaciones en todas direcciones → Superficies difusas
- Este comportamiento también depende de la longitud de onda de la radiación → El metal oxidado es difuso para la luz visible, pero es especular para las ondas de radio
- Las características de reflexión dependen de:
  - Propiedades del material
  - Propiedades de la superficie





# Aspectos de la reflexión

## Angulo de incidencia

- La reflexión también puede depender del ángulo de incidencia y de la posición del observador (ángulo de visión)
- En algunas superficies:
  - $\downarrow\downarrow$  Angulo de incidencia o de visión  $\rightarrow$  Difusa
  - $\uparrow\uparrow$  Angulo de incidencia o de visión  $\rightarrow$  Especular
- Por ejemplo, el asfalto al mediodía refleja el sol de forma difusa; al atardecer, lo refleja de forma especular



# Aspectos de la reflexión

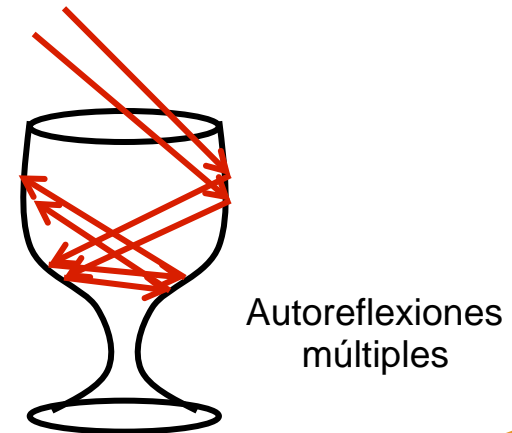
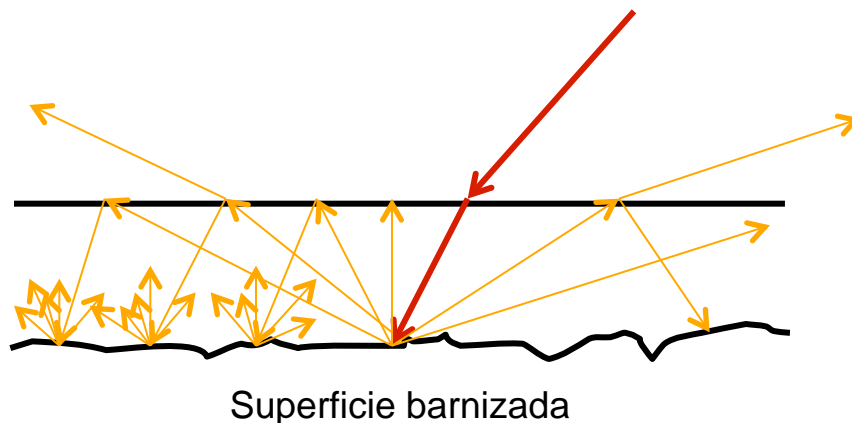
## Reflexiones múltiples

- Las reflexiones múltiples (de orden 2 o superior) son muy importantes en nuestra percepción del entorno
- Se dan fundamentalmente en escenas interiores
- Son muy importantes para dar realismo a las escenas
- Ejemplo: en una escena iluminada por la luz que entra por una ventana, sin reflexiones múltiples sólo veríamos los objetos directamente iluminados por el sol
- Los modelos globales de reflexión solucionan en parte este problema

# Aspectos de la reflexión

## Reflexiones múltiples

- Las reflexiones múltiples afectan a:
  - Sombras con contornos difuminados: si no se consideran reflexiones múltiples las sombras tienen un contorno excesivamente definido
  - Los objetos no iluminados directamente aparecen menos saturados, y la luz que les llega puede cambiar de color
  - Objetos barnizados en los que la capa de barniz multiplica la incidencia de la luz
  - Objetos en los que se producen autoreflexiones múltiples → Ejemplo: un cáliz de oro, en el que en su interior la luz es cada vez más rojiza



# Modelos de reflexión

- Describen cómo interacciona la luz con las superficies
- Estos modelos tratan de imitar la realidad hasta cierto punto. A mayor fidelidad, mayor tiempo de proceso → Dependiendo de la aplicación, elegiremos mayor o menor calidad
- Son simplificaciones que modelan sólo parte de la interacción de los objetos con la luz, normalmente la primera reflexión
- Se han desarrollado técnicas ad hoc que permiten contemplar otros aspectos: sombras, texturas ...
- Veremos:
  - Modelo de Phong
  - Modelos de microfacetas
    - Modelo de Blinn
    - Modelo de Cook y Torrance

# Modelos de reflexión

## Modelo de Phong

- Es un modelo empírico simplificado para iluminar puntos de una escena
- Los objetos no emiten luz, sólo la reflejan
- Es un modelo local, es decir, sólo tiene en cuenta la iluminación directa desde las fuentes de luz, y no las reflexiones de segundo orden
- Los puntos de luz se suponen puntuales
- Según este modelo, la reflexión para cada longitud de onda  $\lambda$  tiene tres componentes:
  - Ambiental
  - Difusa
  - Especular

$$I_{Phong}(\lambda) = I_{amb}(\lambda) + I_{dif}(\lambda) + I_{esp}(\lambda)$$

# Modelos de reflexión

## Modelo de Phong

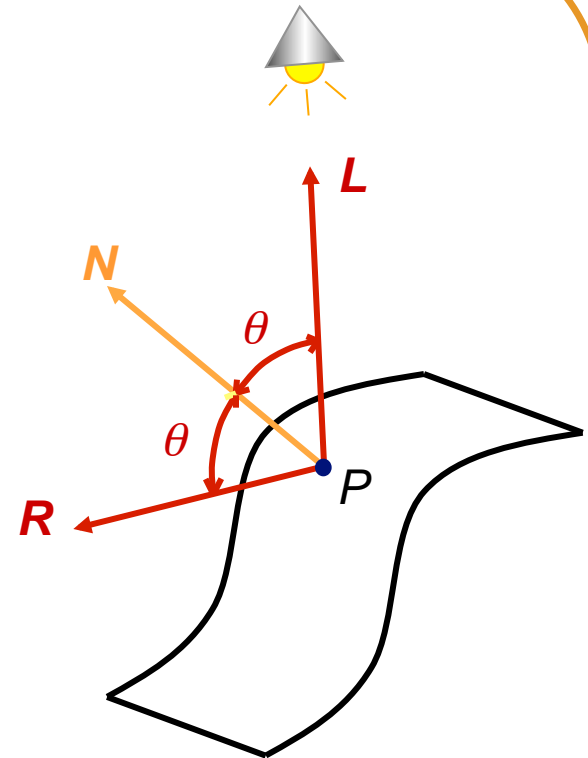
- Componente ambiental
  - Simula las reflexiones múltiples de la luz sobre los demás objetos de la escena
  - No proviene de una dirección concreta → incide sobre todas las partes del objeto
  - Se suele modelar como una constante → evita que las zonas sin luz directa se visualicen totalmente en negro.
  - La componente ambiental depende de
    - $I_a$ : constante de intensidad de la iluminación ambiental
    - $k_a(\lambda)$ : fracción de la intensidad reflejada de forma ambiental ( $0 \leq k_a \leq 1$ ) para la longitud de onda  $\lambda$ . Es un coeficiente empírico que depende de las propiedades ópticas del material

$$I_{\text{ambiental}} = I_a k_a(\lambda)$$

# Modelos de reflexión

## Modelo de Phong

- Componente difusa (o Lambertiana)
  - Modela las propiedades difusas del material
  - La reflexión depende del ángulo entre la superficie y la dirección de incidencia de la luz  
→ iluminación máxima cuando la superficie y la fuente de luz son perpendiculares
  - La componente difusa depende de:
    - $\mathbf{N}$ : normal de la superficie en el punto  $P$
    - $\mathbf{L}$ : vector de incidencia de la luz
    - $I_d$ : intensidad de la fuente de luz (difusa)
    - $k_d(\lambda)$ : fracción de luz de longitud de onda  $\lambda$  reflejada de forma difusa ( $0 \leq k_d \leq 1$ )
  - El vector de reflexión  $\mathbf{R}$  forma con la normal  $\mathbf{N}$  un ángulo  $\theta$  equivalente al que forman  $\mathbf{N}$  y  $\mathbf{L}$

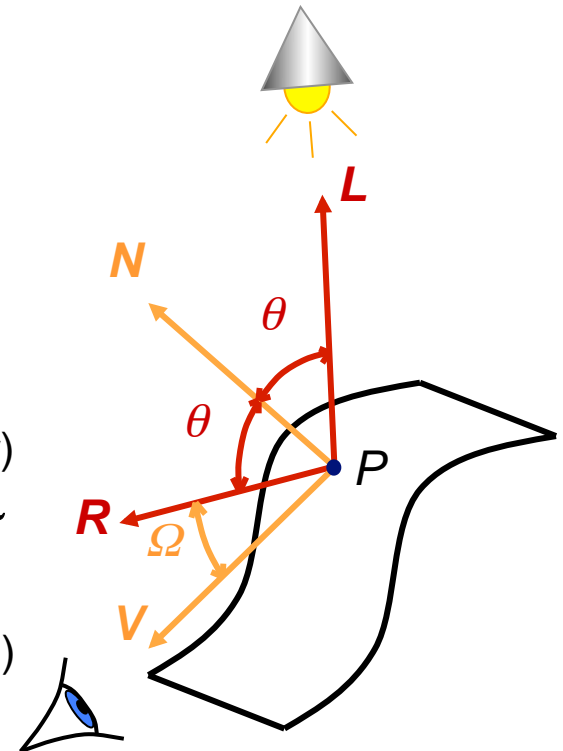


$$I_{difusa} = I_d k_d(\lambda) \cos\theta = I_d k_d(\lambda) (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

# Modelos de reflexión

## Modelo de Phong

- Componente especular
  - Modela las propiedades especulares
  - Depende del ángulo entre la dirección de incidencia de la luz y la posición del observador
  - La componente especular depende de:
    - $V$ : vector de posición del observador
    - $L, R$ : vectores de incidencia y reflexión
    - $I_e$ : intensidad de la fuente de luz (especular)
    - $k_e(\lambda)$ : fracción de luz de longitud de onda  $\lambda$  reflejada de forma especular ( $0 \leq k_e \leq 1$ )
    - $n$ : índice que simula lo comprimidos que están los brillos ( $1 \leq n < \infty$ , 1: mate,  $\infty$ : espejo)
    - $\Omega$ : ángulo entre  $V$  y  $R$



$$I_{\text{especular}} = I_e k_e(\lambda) \cos^n \Omega = I_e k_e(\lambda) (R \cdot V)^n$$



# Modelos de reflexión

## Modelo de Phong

- El modelo de Phong completo queda

$$I_{Phong} = I_{ambiental} + I_{difusa} + I_{especular}$$

$$I_{Phong} = I_a k_a(\lambda) + I_d k_d(\lambda)(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + I_e k_e(\lambda)(\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n$$

- Se suele utilizar una aproximación que simplifica los cálculos: Si suponemos las luces y el observador lejos del objeto (en el infinito)
  - $\mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \approx \mathbf{N} \cdot \mathbf{H}$ , donde  $\mathbf{H} = (\mathbf{L} + \mathbf{V})/2$  y sería constante en esas condiciones
  - Se puede utilizar el parámetro  $n$  para mejorar la aproximación

$$I_{Phong} = I_a k_a(\lambda) + I_d k_d(\lambda)(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + I_e k_e(\lambda)(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n$$

- Cuando hay más de una fuente de luz

$$I_{Phong} = I_a k_a(\lambda) + \sum_i (I_{di} k_d(\lambda)(\mathbf{L}_i \cdot \mathbf{N}) + I_{ei} k_e(\lambda)(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n)$$

- También hay mejoras que permiten simular la atenuación de la intensidad con la distancia, objetos transparentes, luces dirigidas...

# Modelos de reflexión

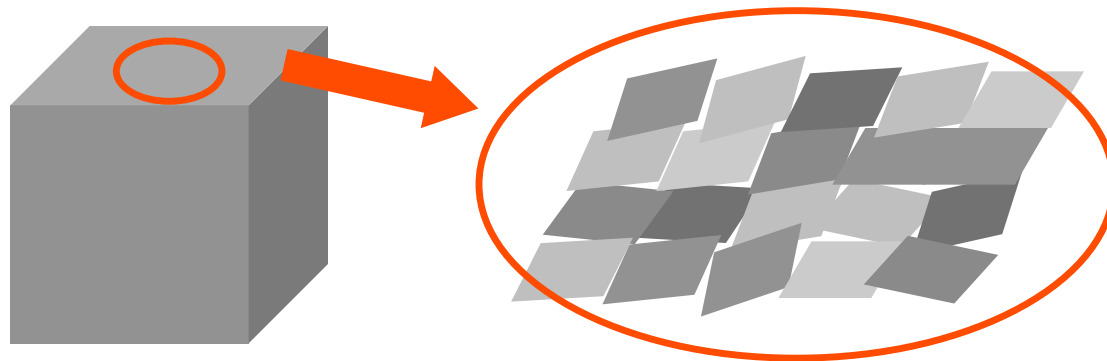
## Modelo de Phong

- El modelo de Phong debería evaluarse para cada longitud de onda  $\lambda$  considerada
- En la mayoría de las aplicaciones es suficiente utilizar el modelo RGB y evaluarlo para las longitudes de onda de la luz roja, verde y azul
- En algunos casos podemos necesitar evaluar el modelo para una muestra mayor de longitudes de onda
- Normalmente las componentes difusa y especular de los focos de luz son la misma:  $I_d = I_e$
- Ventajas del modelo de Phong:
  - Muy sencillo de calcular
  - Calidad suficiente para aplicaciones poco exigentes
- Inconvenientes del modelo de Phong:
  - La reflexión de la luz no depende del ángulo de vista
  - No representa bien materiales metálicos (aspecto plástico)
  - Calidad insuficiente para gráficos realistas

# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

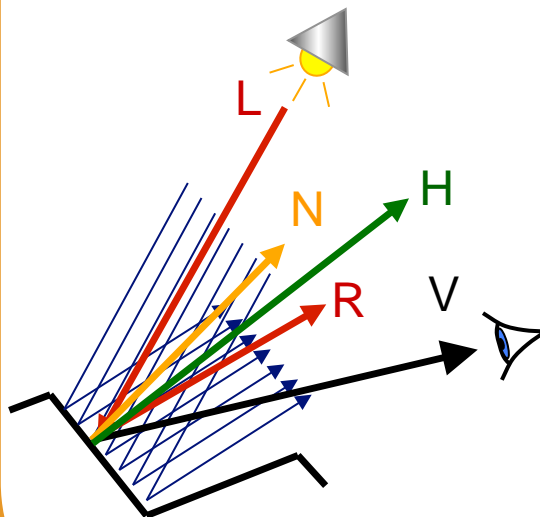
- Considera la superficie formada por *microfacetas*
- Las microfacetas no se ven a simple vista
- Cada microfaceta es un espejo perfecto
- La rugosidad de la superficie se simula mediante pequeños planos (microfacetas) con orientaciones aleatorias
- A mayor variabilidad en las orientaciones, superficie más rugosa y más mate



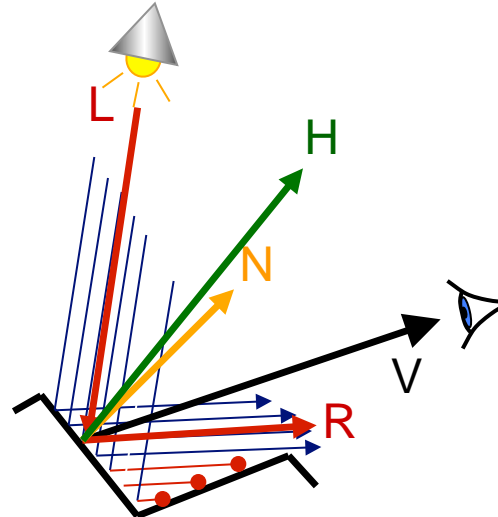
# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

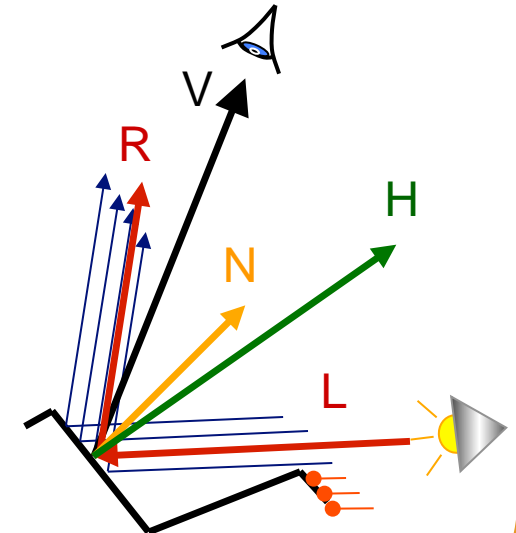
- Sea una superficie formada por microfacetas, con los parámetros:
  - V: vector de vista (posición del observador)
  - L, R: vectores de incidencia y reflexión de la luz
  - $H = (L+V)/2$
  - N: normal a la superficie en la microfaceta considerada
- Pueden darse tres casos:



No hay interferencia



Parte de la luz reflejada es interceptada



Parte de la luz incidente es interceptada

# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

- La componente especular proviene de las facetas orientadas en la dirección  $\mathbf{H}$  y viene dada por la expresión

$$I_{\text{especular}} = \frac{DGF(\lambda)}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}}$$

$D$ : función de distribución de las direcciones de las facetas  
 $G$ : factor geométrico de atenuación  
 $F(\lambda)$ : ley de reflexión de Fresnel

- La componente difusa proviene de las reflexiones múltiples entre facetas
- El modelo puede escribirse como:

$$I_{\text{Microfacetas}} = I_a k_a(\lambda) + I_d k_d(\lambda)(\mathbf{L}_i \cdot \mathbf{N}) + I_e k_e \frac{DGF(\lambda)}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}}$$



# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

$$I_{\text{especular}} = \frac{DGF(\lambda)}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}}$$

- D: Función de distribución de las direcciones de las facetas
- Es la proporción de facetas orientadas en la dirección H
- Cada modelo utiliza su propia expresión

Modelo  
de Blinn

$$D = \left( \frac{c^2}{(c^2 - 1) \cdot \cos^2 \alpha + 1} \right)^2$$

$$0 \leq c \leq 1$$

c=0 → superficie muy pulida

c=1 → superficie muy mate

Modelo de  
Cook y Torrance

$$D = \frac{1}{4m^2 \cos^4 \alpha} e^{-\frac{\tan^2 \alpha}{m^2}}$$

$$0 \leq m \leq 1$$

m=0 → superficie muy pulida

m=1 → superficie muy mate

En ambos modelos  $\cos \alpha = \mathbf{N} \cdot \mathbf{H}$ , luego  $\alpha = \arccos \mathbf{N} \cdot \mathbf{H}$

# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

$$I_{\text{especular}} = \frac{D \cancel{G} F(\lambda)}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}}$$

- G: Factor geométrico de atenuación.  $0 \leq G \leq 1$
- Proporción de luz que permanece tras la reflexión (parte de la luz puede ser interceptada por las facetas):

- Si no hay interferencia:

$$G_a = 1$$

- Si parte de la luz reflejada es interferida:

$$G_b = \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{H})}$$

- Si parte de la luz incidente es interferida:

$$G_c = \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})}{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{H})}$$

$$G = \min(G_a, G_b, G_c)$$

# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

$$I_{\text{especular}} = \frac{DGF(\lambda)}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}}$$

- $F(\lambda)$ : Ley de reflexión de Fresnel (Depende de  $\lambda$  en el modelo de Cook y Torrance, pero no en el de Blinn)
- Fracción de luz incidente que es reflejada y no absorbida

$$F(\lambda) = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(\phi(\lambda) - \theta(\lambda))}{\sin^2(\phi(\lambda) + \theta(\lambda))} \left( 1 + \frac{\cos^2(\phi(\lambda) + \theta(\lambda))}{\cos^2(\phi(\lambda) - \theta(\lambda))} \right)$$

$$\phi(\lambda) = \arccos(\mathbf{L} \cdot \mathbf{H})$$

$$\sin \theta(\lambda) = \frac{\eta_1 \sin \phi(\lambda)}{\eta_2}$$

En C&T dependen de la longitud de onda  $\lambda$ :

- $\phi$  = Angulo de reflexión de la luz.
- $\theta$  = Angulo de refracción de la luz.
- $\eta_1$  = Indice de refracción del medio 1 (aire  $\eta_1 = 1$ )
- $\eta_2$  = Indice de refracción del medio 2  
(metales  $\eta_2 \rightarrow \infty$ , no metales  $\eta_2 \rightarrow 1$ )

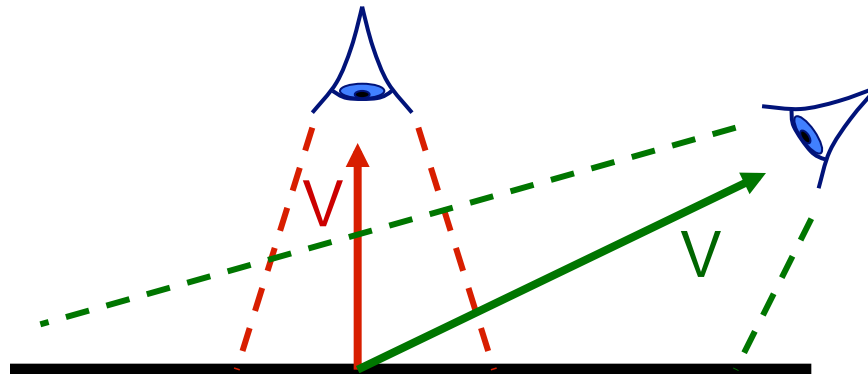


# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

$$I_{\text{especular}} = \frac{DGF(\lambda)}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}}$$

- $\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}$  = ángulo entre la normal y el vector de vista
- Simula el aumento de brillos al aumentar el ángulo de visión
- Conforme  $\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}$  aumenta, se ve más porción de la superficie desde la posición del observador → se verá mayor proporción de microfacetas orientadas en dirección  $\mathbf{H}$  → la relación inversa hace que se vea más brillante



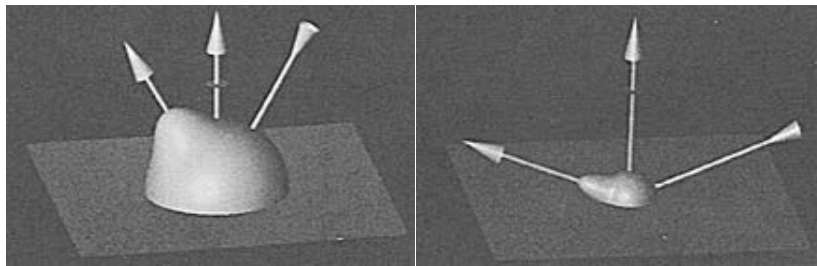
# Modelos de reflexión

## Modelos de microfacetas

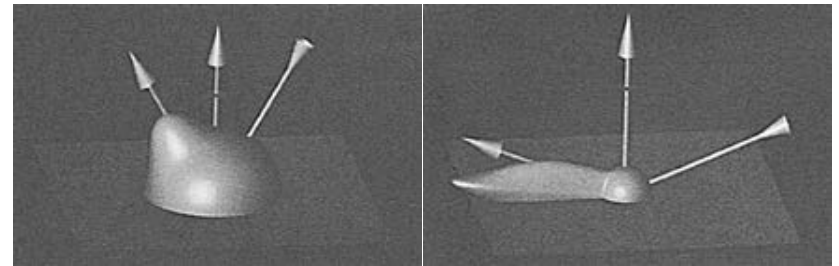
- Ventajas

- Se visualizan mejor los objetos metálicos
- La intensidad del brillo depende del ángulo de visión

# Phong



# Blinn



- Inconvenientes

- Mezcla diferentes modelos para la iluminación ambiental, difusa y especular
- Aumenta el tiempo de cálculo

# Modelos de reflexión

## Modelo de Ward

- Permite representar materiales anisotrópicos: diferente comportamiento especular, en función de la dirección de incidencia de la luz
- La componente especular se calcula:

$$k_{\text{spec}} = \frac{1}{\sqrt{(N \cdot L)(N \cdot R)}} \frac{N \cdot L}{4\pi\alpha_x\alpha_y} \exp \left[ -2 \frac{\left( \frac{H \cdot X}{\alpha_x} \right)^2 + \left( \frac{H \cdot Y}{\alpha_y} \right)^2}{1 + (H \cdot N)} \right]$$

- N, L, R y H tienen los valores ya conocidos
- X e Y son dos vectores ortogonales sobre el plano normal que especifican las direcciones anisotrópicas
- $\alpha_x$  y  $\alpha_y$  son los parámetros que permiten controlar la anisotropía en esas dos direcciones



# Modelos de reflexión





# Modelos de reflexión





# Modelos de reflexión



# Modelos de luz

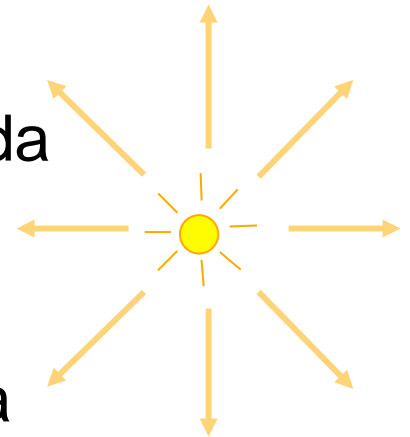
- Los objetos en una escena pueden ser:
  - Emisores de luz: emiten su propia luz
  - Reflectores de luz: reflejan la luz de los demás
  - Emisores y reflectores de luz: emiten su propia luz y reflejan la de los demás
- Trataremos los emisores o fuentes de luz
- Las fuentes de luz pueden ser:
  - Puntuales
  - Distribuidas

# Modelos de iluminación

## Fuentes de luz puntuales

- No tienen dimensión
- No tienen dirección (emiten de forma radial)
- Consideramos que una luz es puntual si su dimensión es muy pequeña comparada con la de los objetos de la escena
- Ejemplos: sol, bombillas...
- Si hay más de una fuente puntual en una escena:

iluminación de un pixel =  $\sum$  contribución de cada fuente

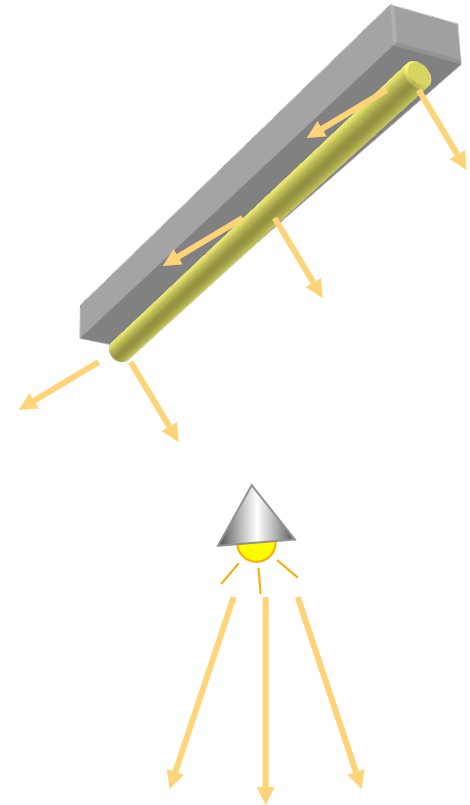




# Modelos de luz

## Fuentes de luz distribuidas

- Tienen dimensión
- Tienen dirección
- Ejemplos: focos, tubos de luz...
- Para fuentes de luz con dimensión:
  - Considerar que está formada por un conjunto de puntos de luz distribuidos sobre la superficie de la fuente de luz
- Para fuentes de luz con dirección:
  - Modelo de Warn
  - Diagramas goniométricos (en desuso)



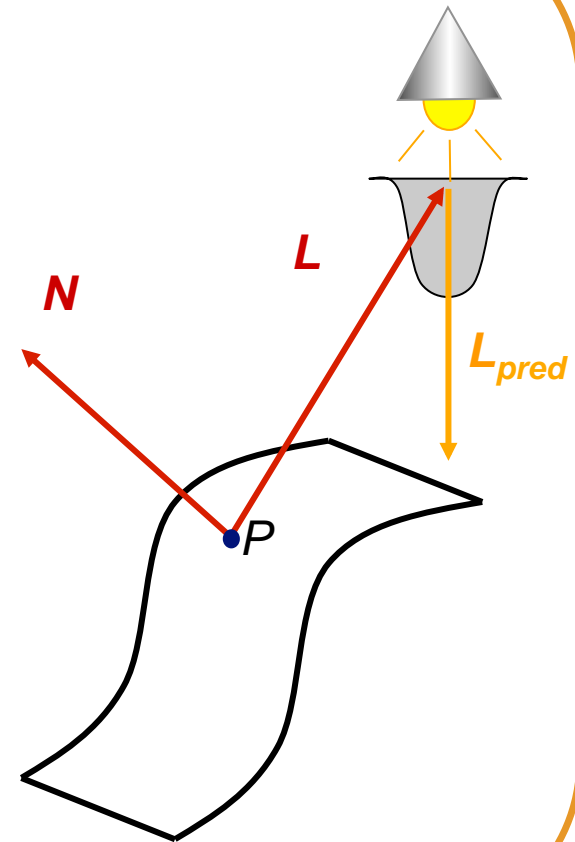
# Modelos de luz

## Modelo de Warn

- Técnica para simular fuentes de luz dirigidas. Proporciona control sobre la dirección y la concentración de la luz
- Cada fuente de luz emite en una dirección predominante  $L_{pred}$ . Al separarnos de esa dirección, la luz se debilita
- Definimos la iluminación según el modelo de Warn en función de:
  - $I_i$ : intensidad del punto de luz
  - $L$ : vector de posición de la luz
  - $L_{pred}$ : dirección predominante de iluminación
  - $s$ : coeficiente de concentración de la luz (valores altos indican luz más concentrada)

$$I_w = I_l (L_{pred} \cdot L)^s$$

- En el modelo de reflexión, se sustituye  $I_d$  y  $I_e$  por  $I_{wd}$  y  $I_{we}$



# Modelos de luz

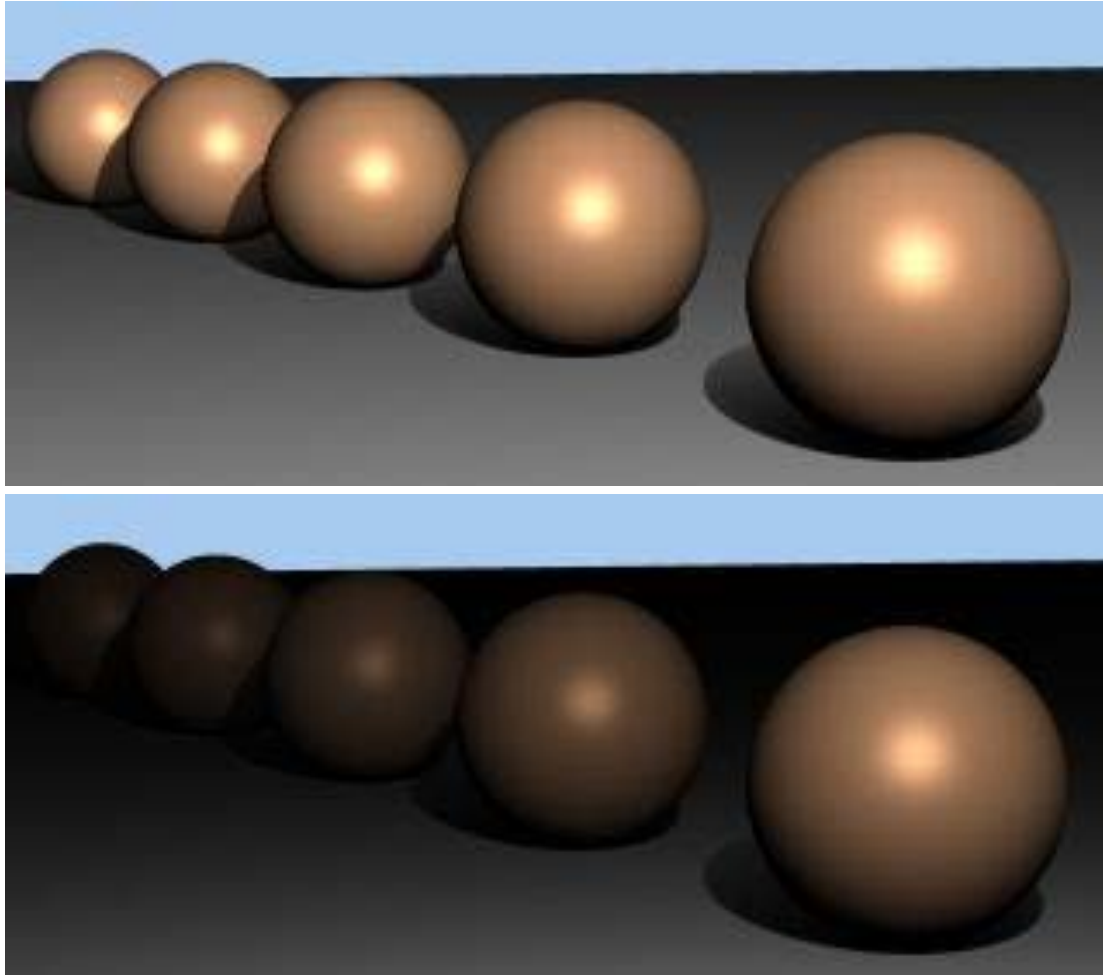
## Atenuación de la luz

- La luz se atenúa con la distancia, según un factor de  $1/d^2$  (d: distancia de la superficie a la fuente de luz)
- Este factor da resultados poco realistas, sobre todo si d es pequeña
- Se suele utilizar la siguiente ecuación, en la que  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  permiten controlar la atenuación.

$$atten(d) = \frac{1}{a_0 + a_1 d + a_2 d^2}$$

# Modelos de luz

## Atenuación de la luz



# Modelos de luz

## Atenuación de la luz

