



Seminario 5

Render básico: iluminación



Render



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



Render



- 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

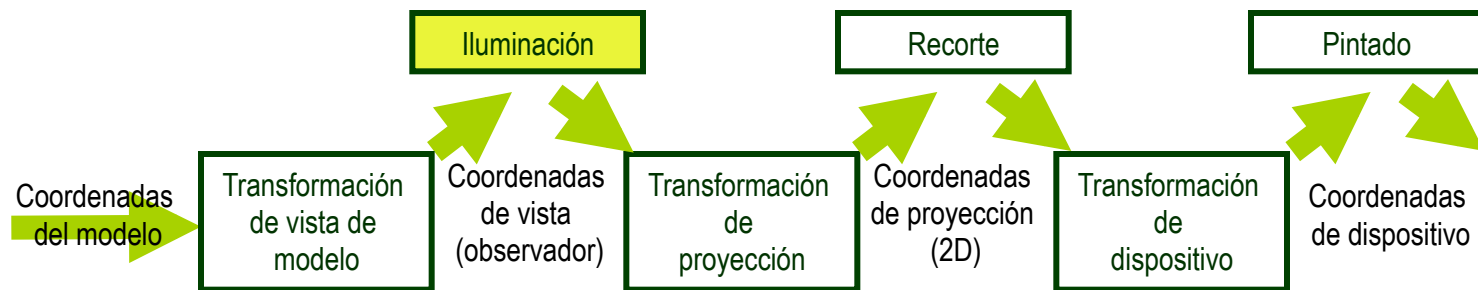
- Vimos la tubería 3D como el camino que siguen los puntos 3D hasta ser representados en la pantalla 2D
- Sólo tuvimos en cuenta los aspectos geométricos \Rightarrow transformaciones





La tubería 3D ampliada

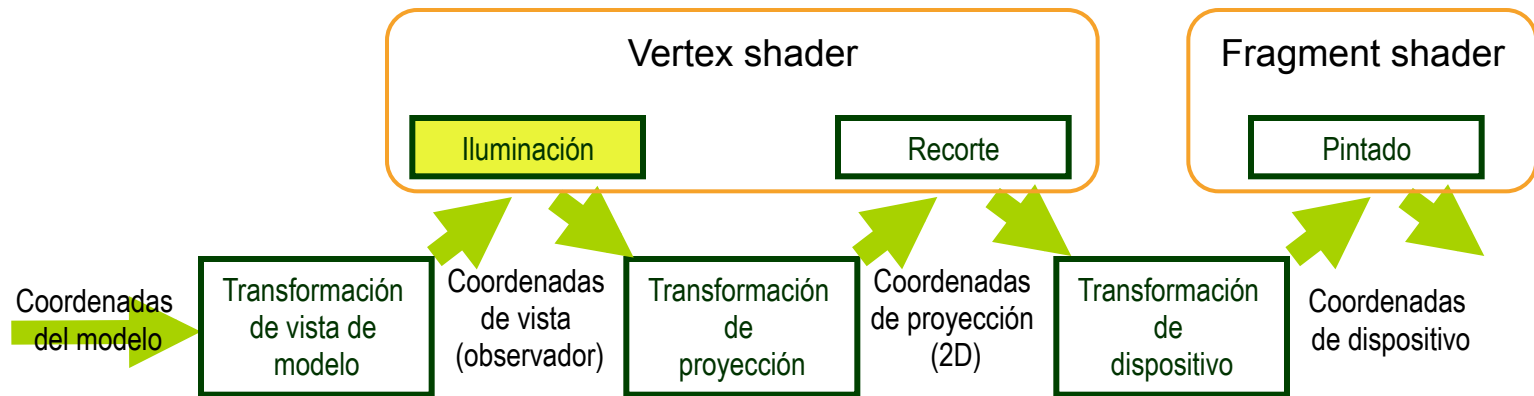
- Vimos la tubería 3D como el camino que siguen los puntos 3D hasta ser representados en la pantalla 2D
- Sólo tuvimos en cuenta los aspectos geométricos \Rightarrow transformaciones
- La tubería 3D se puede ampliar para incorporar el render:
 - Etapa de iluminación o *lighting*
 - Etapa de recorte o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





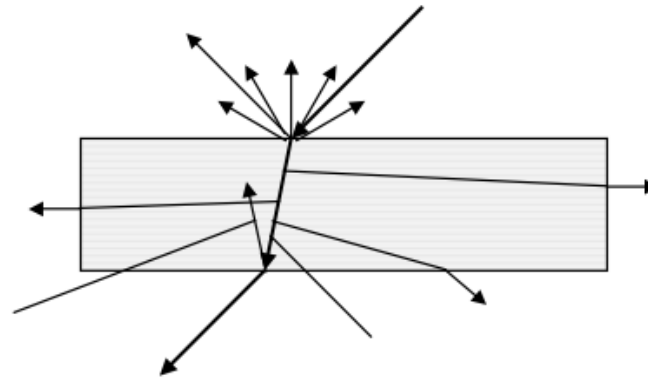
Etapa de iluminación

- 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





Iluminación

- 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

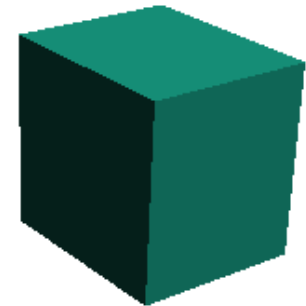
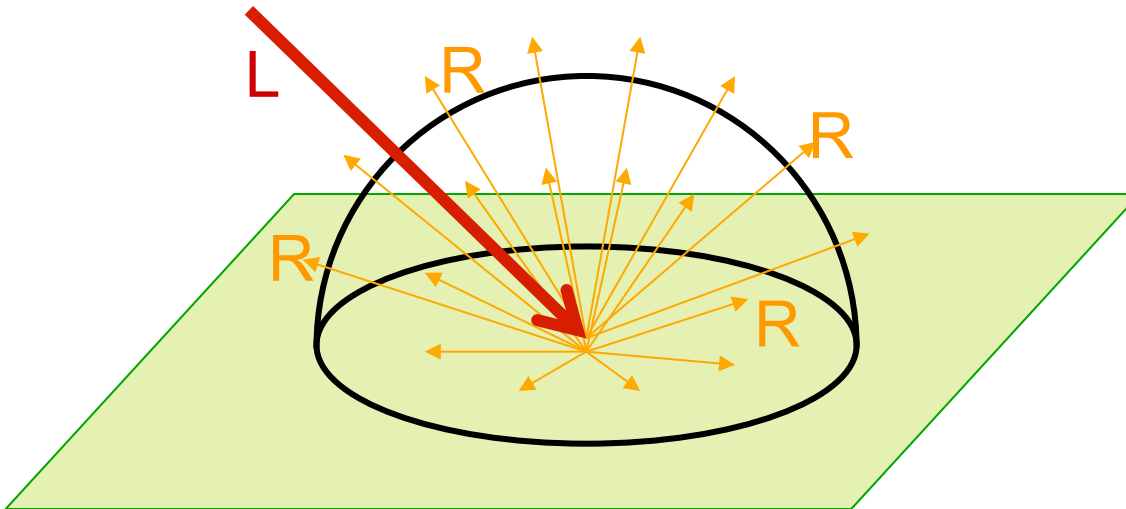
- En Gráficos por Computador suelen clasificarse las superficies en:
 - Superficies Difusas
 - Superficies Especulares
- Toda superficie se considera que es una combinación de estos tipos de superficies



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

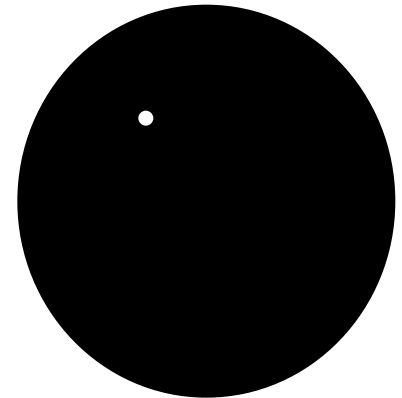
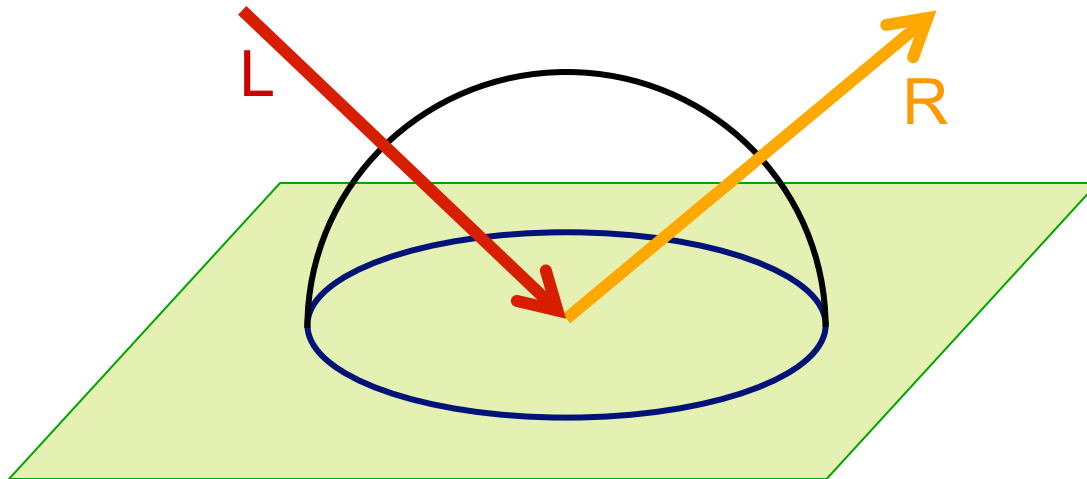




Tipos de superficies

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

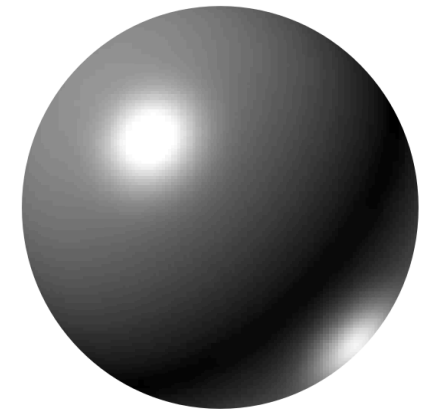
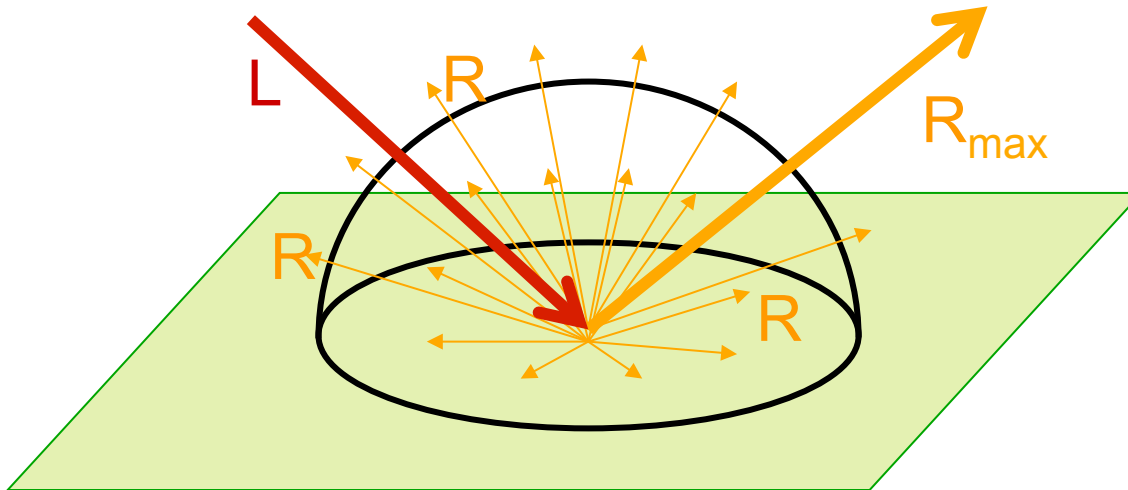




Tipos de superficies

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

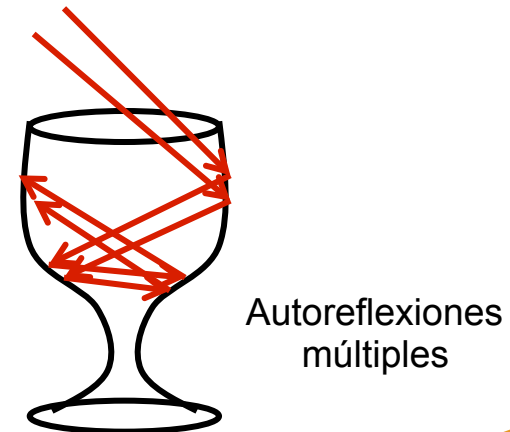
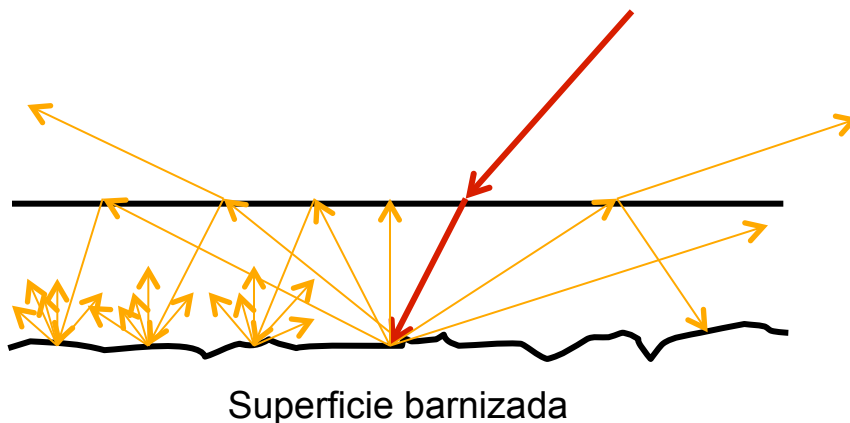
- Las reflexiones múltiples (de orden 2 o superior) son muy importantes en nuestra percepción del entorno
- Se dan fundamentalmente en escenas interiores
- Son muy importantes para dar realismo a las escenas
- Ejemplo: en una escena iluminada por la luz que entra por una ventana, sin reflexiones múltiples 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 λ 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 λ . Es un coeficiente empírico que depende de las propiedades ópticas del material

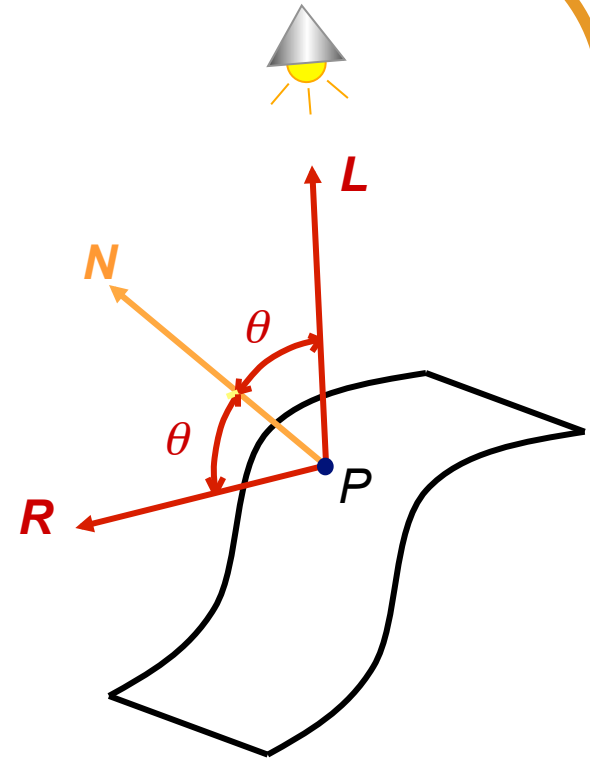
$$I_{\text{ambiental}} = I_a k_a(\lambda)$$



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 λ reflejada de forma difusa ($0 \leq k_d \leq 1$)
 - El vector de reflexión \mathbf{R} forma con la normal \mathbf{N} un ángulo θ equivalente al que forman \mathbf{N} y \mathbf{L}



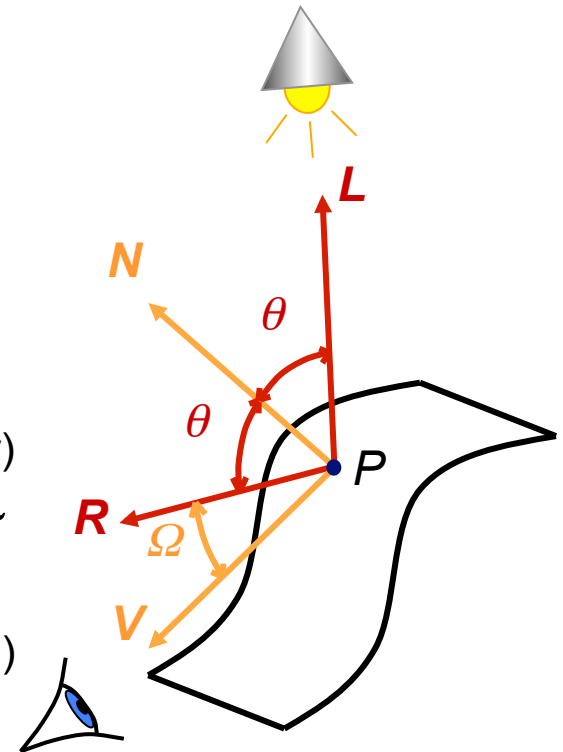
$$I_{\text{difusa}} = I_d k_d(\lambda) \cos\theta = I_d k_d(\lambda) (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$



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:
 - \mathbf{V} : vector de posición del observador
 - \mathbf{L}, \mathbf{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 λ 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, ∞ : espejo)
 - Ω : ángulo entre \mathbf{V} y \mathbf{R}



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



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

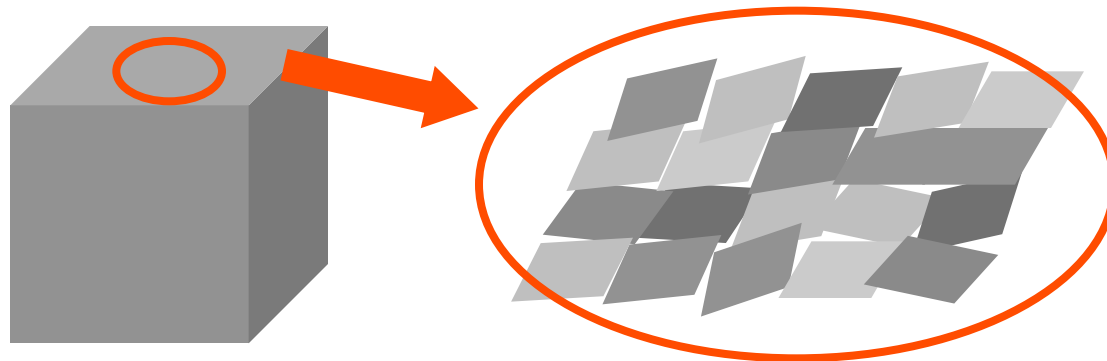
- El modelo de Phong debería evaluarse para cada longitud de onda λ considerada
- En la mayoría de las aplicaciones es suficiente utilizar el modelo RGB y evaluarlo para las longitudes de onda de la luz roja, verde y azul
- En algunos casos podemos necesitar evaluar el modelo para una muestra mayor de 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

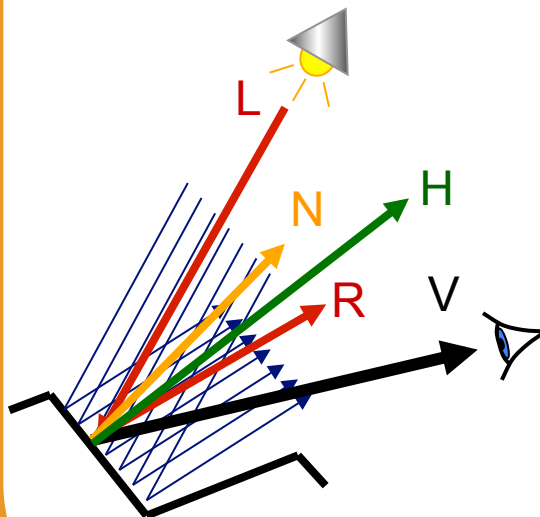




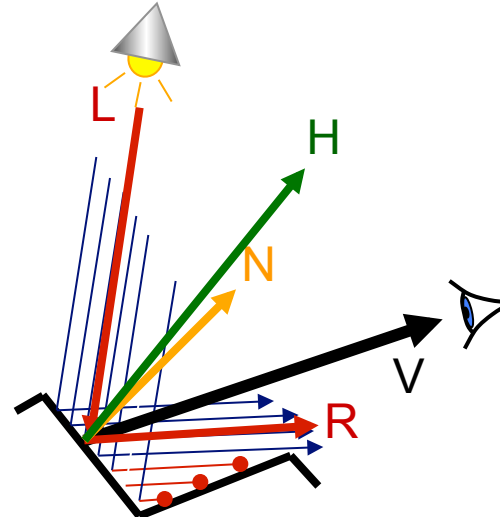
Modelos de reflexión

Modelos de microfacetas

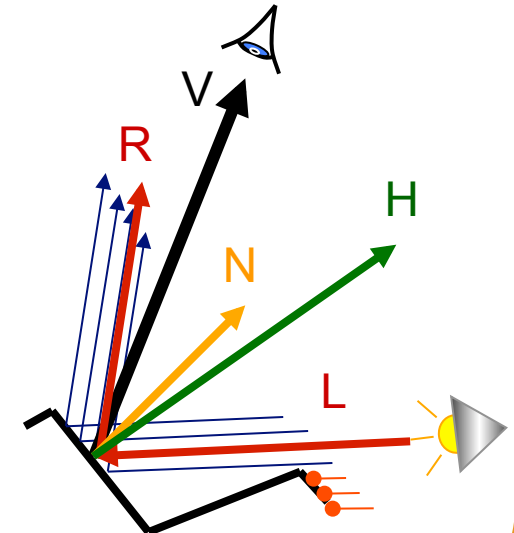
- Sea una superficie formada por microfacetas, con los parámetros:
 - V: vector de vista (posición del observador)
 - L, R: vectores de incidencia y reflexión de la luz
 - $H = (L+V)/2$
 - N: normal a la superficie en la microfaceta considerada
- Pueden darse tres casos:



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

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

- 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 λ 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 λ :

- ϕ = Angulo de reflexión de la luz.
- θ = Angulo de refracción de la luz.
- η_1 = Indice de refracción del medio 1 (aire $\eta_1 = 1$)
- η_2 = Indice de refracción del medio 2
(metales $\eta_2 \rightarrow \infty$, no metales $\eta_2 \rightarrow 1$)

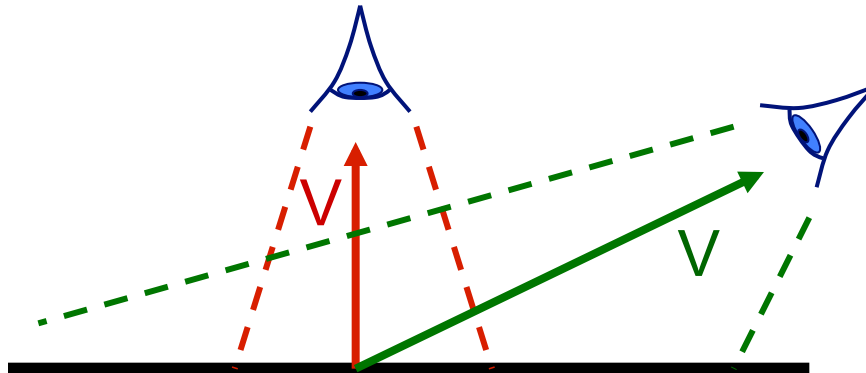


Modelos de reflexión

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



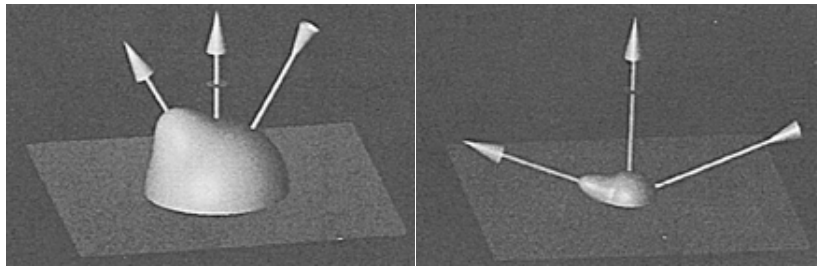


Modelos de reflexión

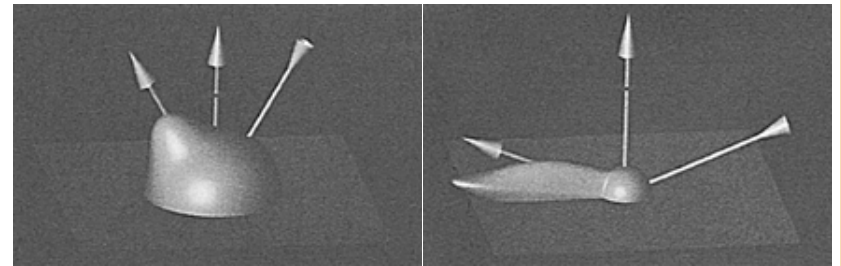
Modelos de microfacetas

- 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:

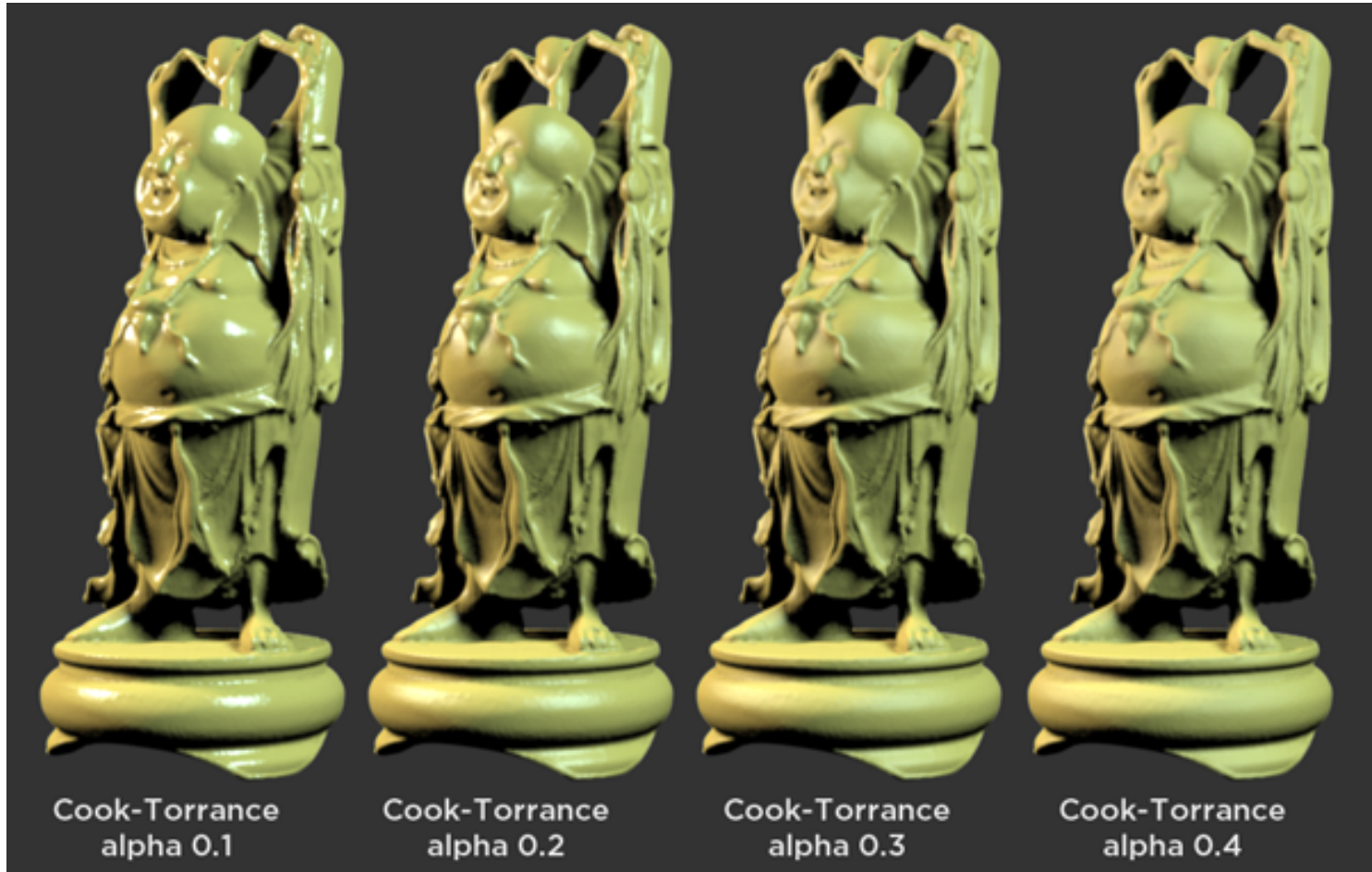
$$k_{\text{spec}} = \frac{1}{\sqrt{(N \cdot L)(N \cdot R)}} \frac{N \cdot L}{4\pi\alpha_x\alpha_y} \exp \left[-2 \frac{\left(\frac{H \cdot X}{\alpha_x} \right)^2 + \left(\frac{H \cdot Y}{\alpha_y} \right)^2}{1 + (H \cdot N)} \right]$$

- 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
- α_x y α_y son los parámetros que permiten controlar la anisotropía en esas dos direcciones



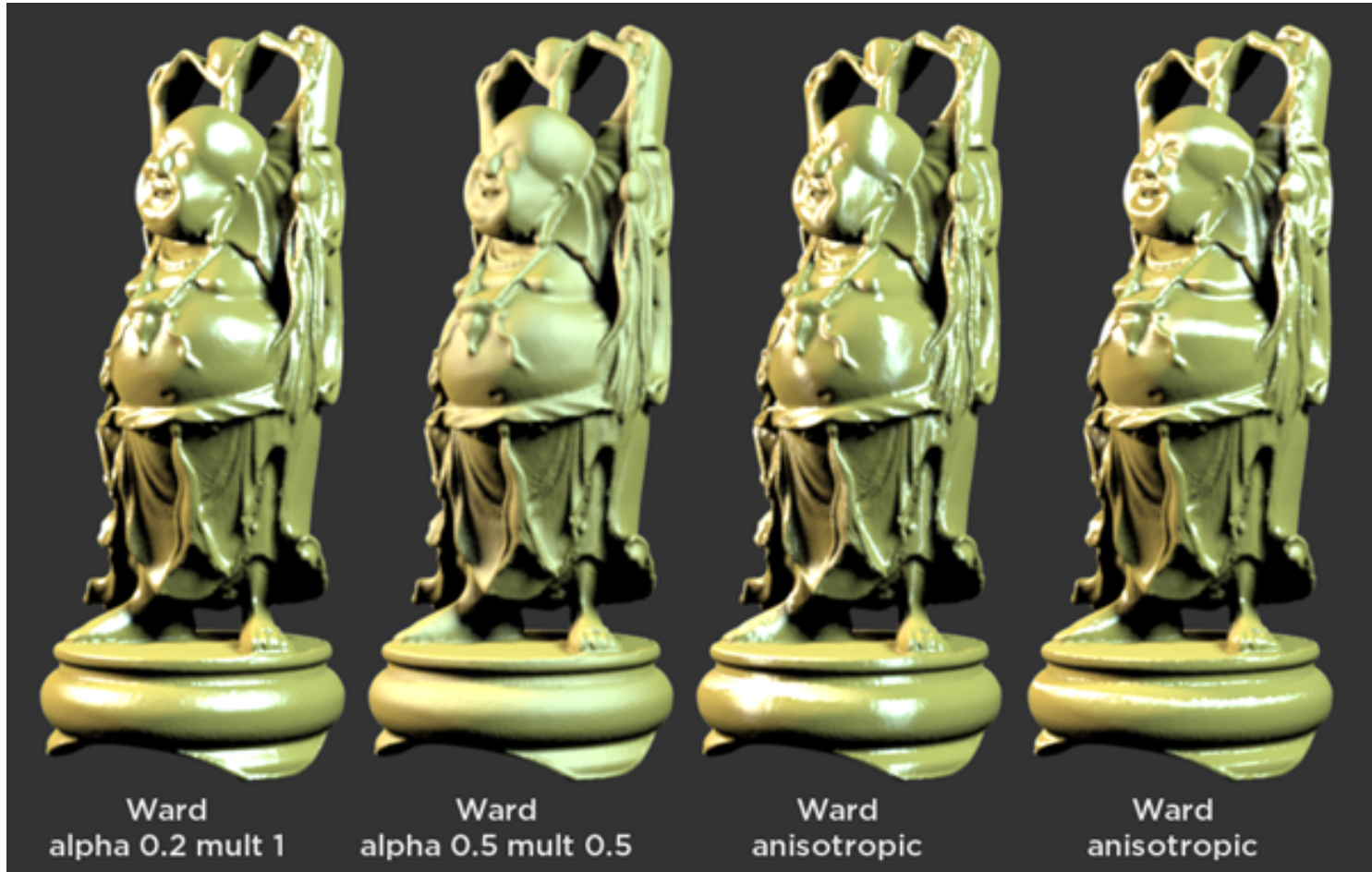


Modelos de reflexión





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

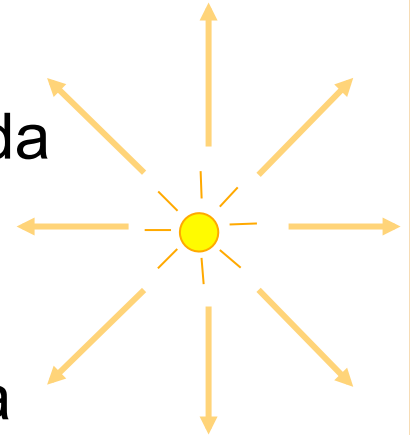


Modelos de iluminación

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

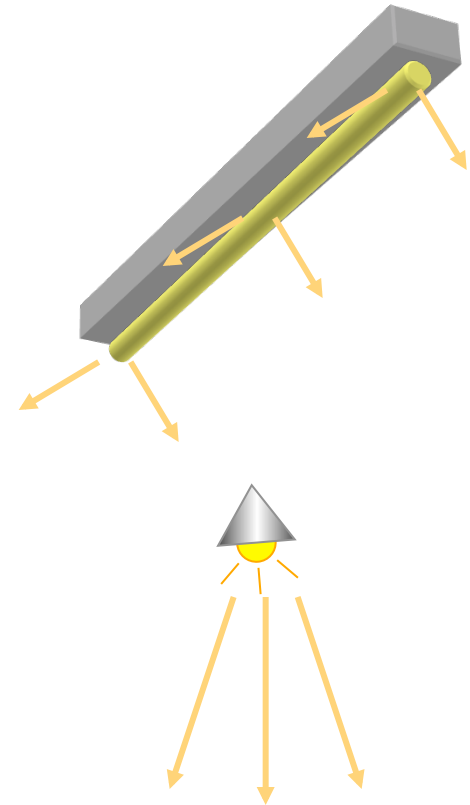




Modelos de luz

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)





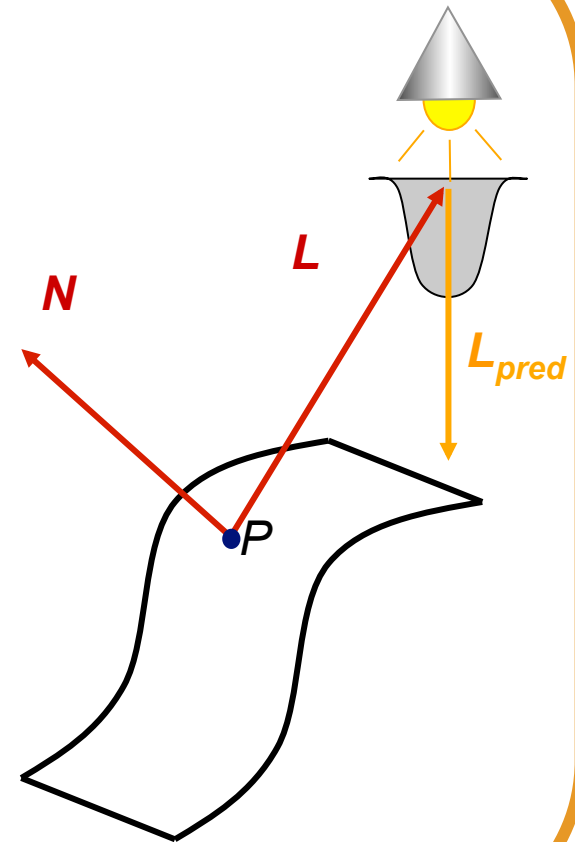
Modelos de luz

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_l : 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

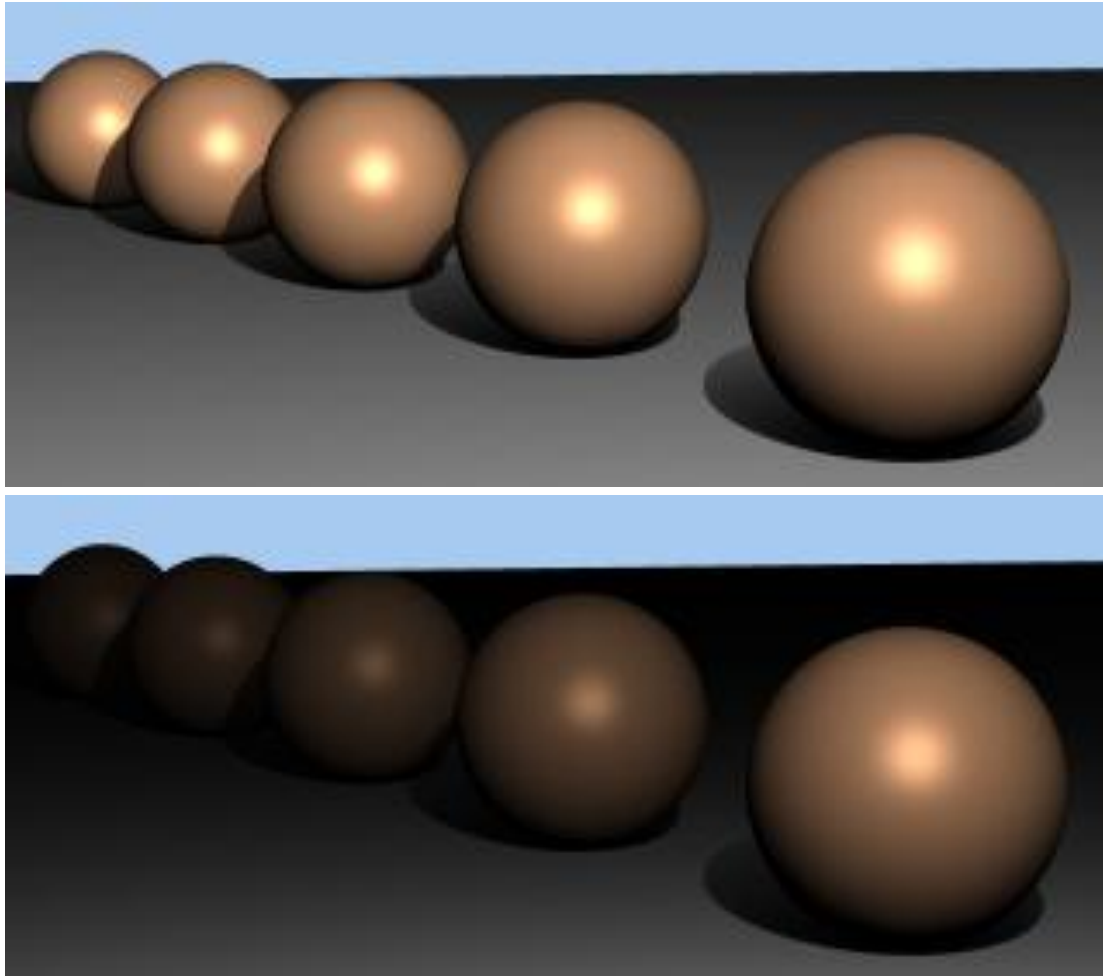
- La luz se atenúa con la distancia, según un factor de $1/d^2$ (d: distancia de la superficie a la fuente de luz)
- Este factor da resultados poco realistas, sobre todo si d es pequeña
- Se suele utilizar la siguiente ecuación, en la que a_0 , a_1 y a_2 permiten controlar la atenuación.

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



Modelos de luz

Atenuación de la luz



Modelos de luz

Atenuación de la luz

