

Materiales

Fundamentos de Computación Gráfica

Tabla de contenido

Interacción luz-materia

Dispersión

Reflexión

Difracción

Refracción

Índice de refracción (IOR)

Ley de Snell

Ecuaciones de Fresnel

Modelos de reflexión

BRDF

Modelos Ideales

Modelo Phong

Modelos físicamente correctos

Teoría de las Microfacetas

Materiales

Metales

Dieléctricos

Introducción

Shading

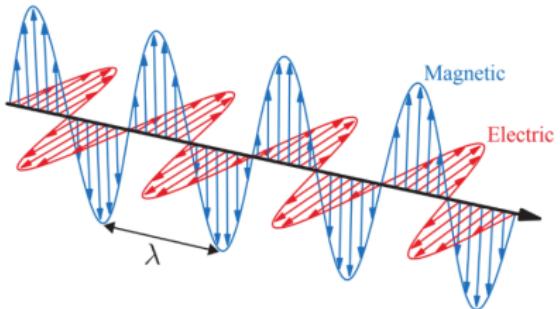
Proceso de asignar color a los objetos, producto de:

- ▶ Punto de vista
- ▶ Geometría
- ▶ Materiales
- ▶ Iluminación

Interacción luz-materia

Luz

- ▶ Radiación electromagnética (EMR)
- ▶ Modelada como una onda transversal
- ▶ Campo eléctrico perpendicular al magnético
- ▶ Caracterizado por su longitud de onda λ

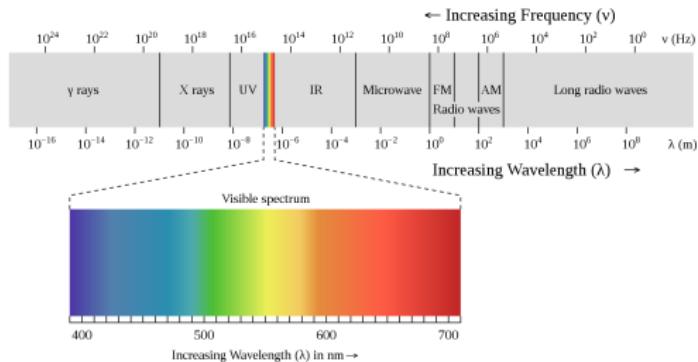


Onda más simple: monocromática (único λ) polarizada.
Tomada de: Real-Time Rendering, Fourth Edition

Interacción luz-materia

Luz

- ▶ Ondas de luz cargan energía
- ▶ Fotones oscilando a cierta frecuencia
- ▶ Luz visible $4 * 10^{14}$ and $8 * 10^{14}$ Hz

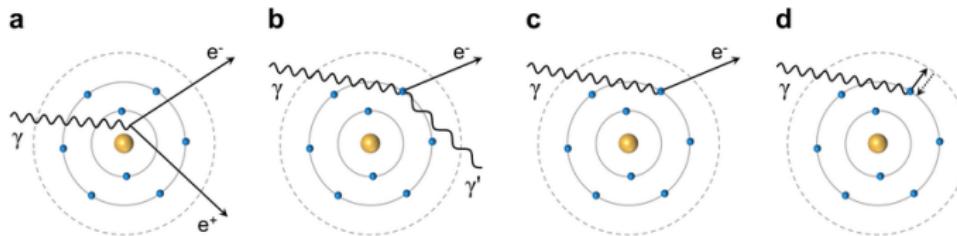


Espectro electromagnético. Tomado de Wikipedia

Interacción luz-materia

En la materia

- ▶ Luz interactúa con el campo de los electrones
- ▶ Cada frecuencia interactúa de forma individual

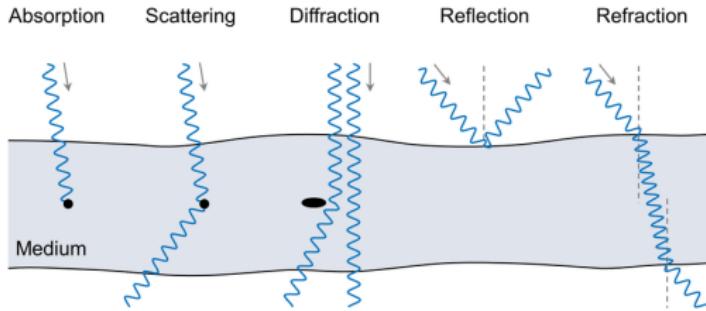


Interacción EMR con átomos por Dominik Soliman

Interacción luz-materia

Interacciones básicas Materia

- ▶ Diferentes fenómenos pueden ocurrir
- ▶ Categorizados por las características de la onda resultante

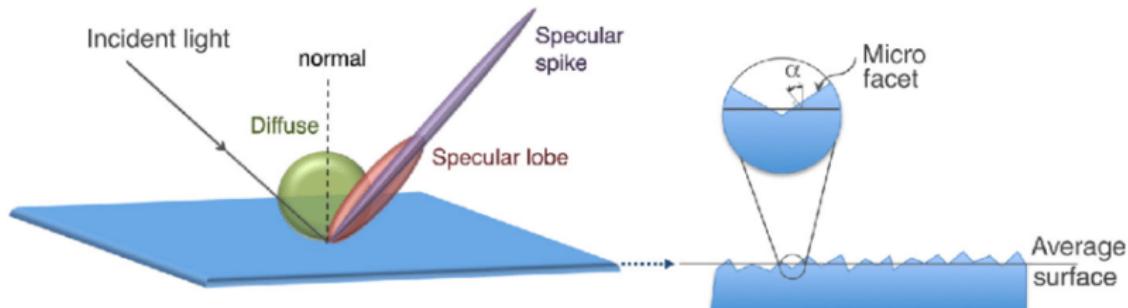


Interacciones básicas luz-materia por Dominik Soliman

Interacción luz-materia

Nota

- ▶ Interacciones fundamentales de los materiales
- ▶ No contempla la rugosidad
- ▶ Pueden ocurrir simultáneamente

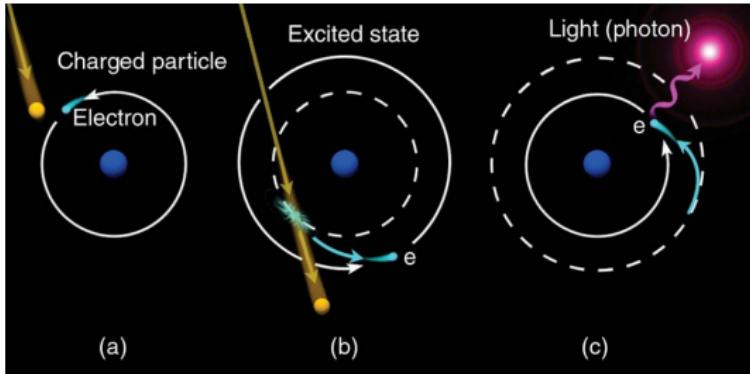


Tomado de Extension of the GATE Monte-Carlo simulation package to model bioluminescence and fluorescence imaging

Interacciones básicas luz-materia

Dispersión o *Scattering*

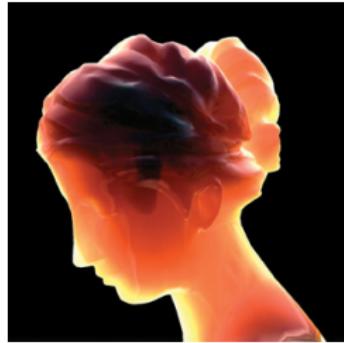
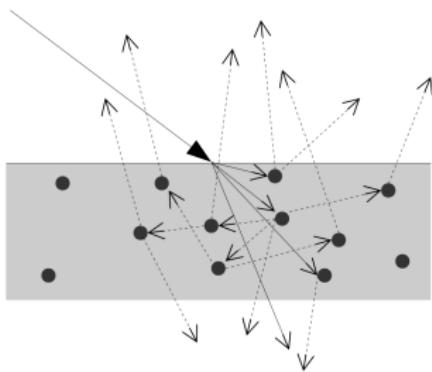
- ▶ Empujan y halan el campo eléctrico de la materia
- ▶ Causando oscilaciones
- ▶ Luz es emitida (Diferente dirección)



Interacciones básicas luz-materia

Dispersión o *Scattering*

- ▶ Onda re-emitida tiene la misma frecuencia
- ▶ Trayectoria aleatoria
- ▶ **Reflexión Difusa**

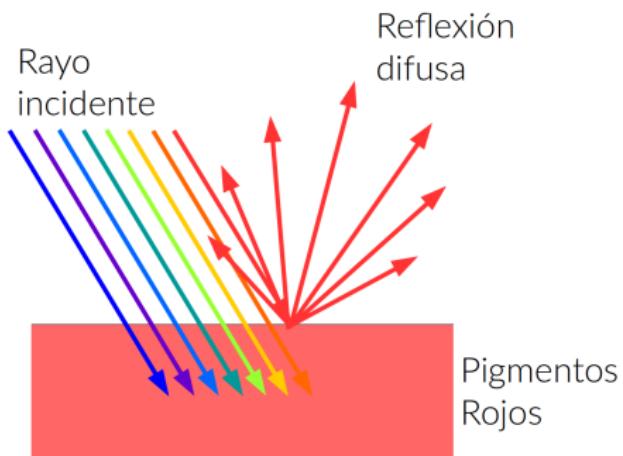


Tomada de gamedev.net

Interacciones básicas luz-materia

Dispersión o *Scattering*

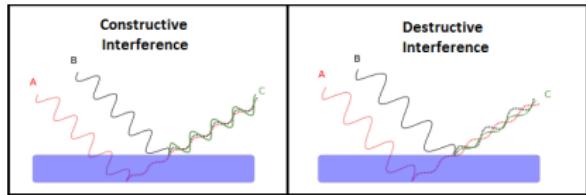
- ▶ Cada frecuencia interactúa de forma independiente
- ▶ Puede ser:
 1. Re-emitiido con la misma frecuencia
 2. Absorbido: manifiesta como calor



Interacciones básicas luz-materia

Reflexión

- ▶ En un *medio homogéneo*
- ▶ Fotones re-emitidos (Como en *scattering*)
- ▶ Fase diferentes → interfieren destrutivamente
- ▶ Ángulo de incidencia determina la dirección interferencia constructiva



Cancelación de ondas por interferencia destructiva.
Tomado de teachengineering.org

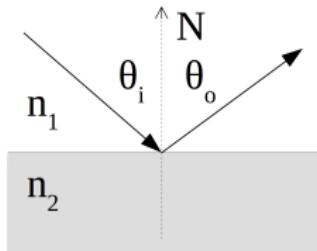
Medio Homogéneo

Volumen de partículas idénticas y uniformemente espaciadas

Interacciones básicas luz-materia

Reflexión a gran escala

- ▶ Cambio de dirección en la interfaz de dos medios n_1, n_2
- ▶ Obedece la ley de la reflexión
- ▶ **Reflexión especular**

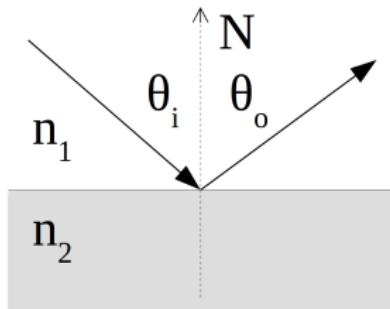


Reflexión de la luz en interfaz de dos medios

Interacciones básicas luz-materia

Ley de la reflexión

- ▶ Los rayos (incidente y reflejado) y la normal están en el mismo plano
- ▶ $\theta_i = \theta_r$
- ▶ Incidente y reflejado opuestos a la normal

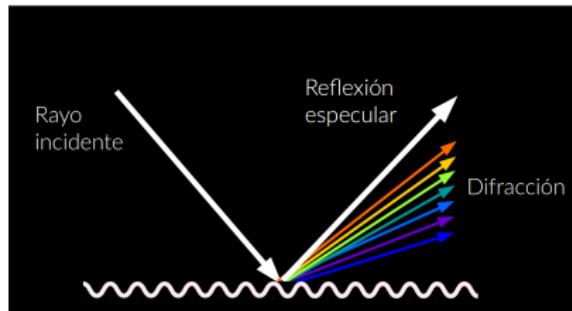


Reflexión de la luz en interfaz de dos medios

Interacciones básicas luz-materia

Difracción

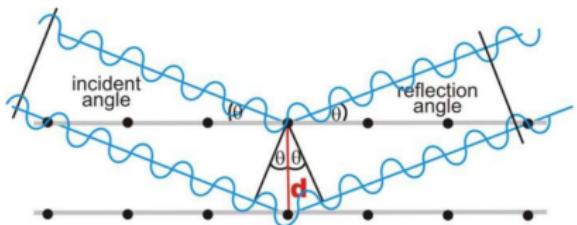
- ▶ Fenómeno normalmente ignorado en CG
- ▶ Ondas se encuentran con un obstáculo
- ▶ Obstáculo del tamaño de la longitud de onda:
 - ▶ Átomos
 - ▶ Ondas de agua
 - ▶ Sonido
 - ▶ Electrones



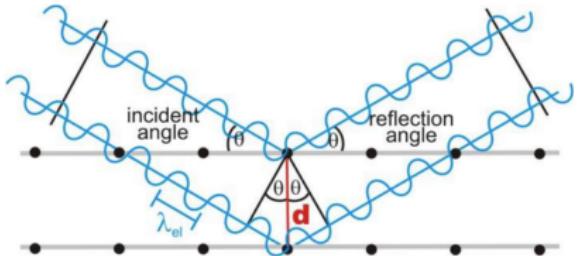
Interacciones básicas luz-materia

Difracción

- ▶ Interferencia constructiva y destructiva de las ondas
- ▶ Dependiendo del ángulo y la posición del obstáculo



Destructive interference of reflected waves (in the two reflected waves, maximum and minimum of the respective wave amplitude are superimposed).



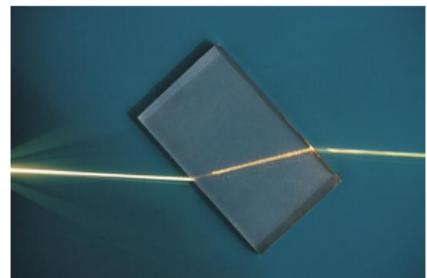
Constructive Interference of reflected waves (reflected waves in phase, i.e., maxima are superimposed).

Tomado de microscopy.ethz.ch

Interacciones básicas luz-materia

Refracción

- ▶ Onda ingresa en un medio
- ▶ Re-emisión de la onda (Como en *scattering*)
- ▶ Misma frecuencia pero con desfase
- ▶ La suma de todas las ondas tiene un retraso
- ▶ *Causa reducción de la velocidad*
- ▶ La interferencia define el ángulo de propagación



Tomado de Wikipedia

Reflexión y refracción

Hay una relación entre la luz transmitida vs reflejada



Mountains Reflected In A Clear Water Lake por Marilar Irastorza

Interacciones básicas luz-materia

Índice de Refracción

- ▶ *Index Of Refraction (IOR)*
- ▶ Número sin dimensiones
- ▶ Define que tanto es curvada la luz al entrar en un medio
- ▶ Ratio entre la velocidad de la luz en el vacío c y velocidad en un medio v

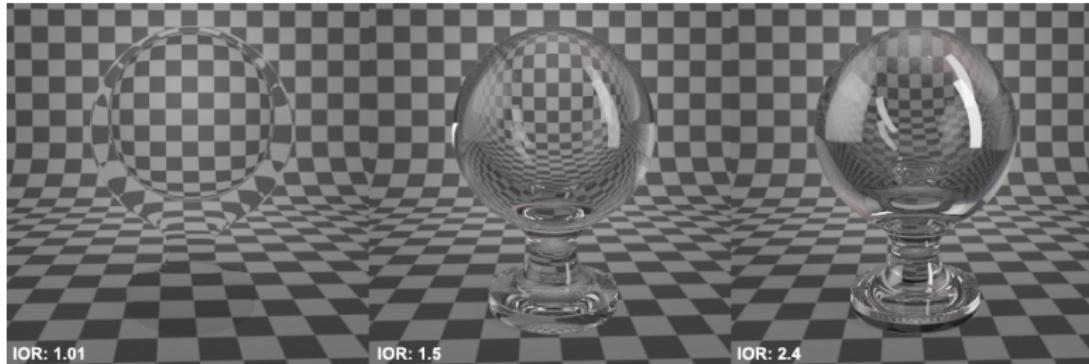
$$n = \frac{c}{v}$$

¿Qué quiere decir esto?

El índice de refracción del agua es 1.3.

Índice de Refracción

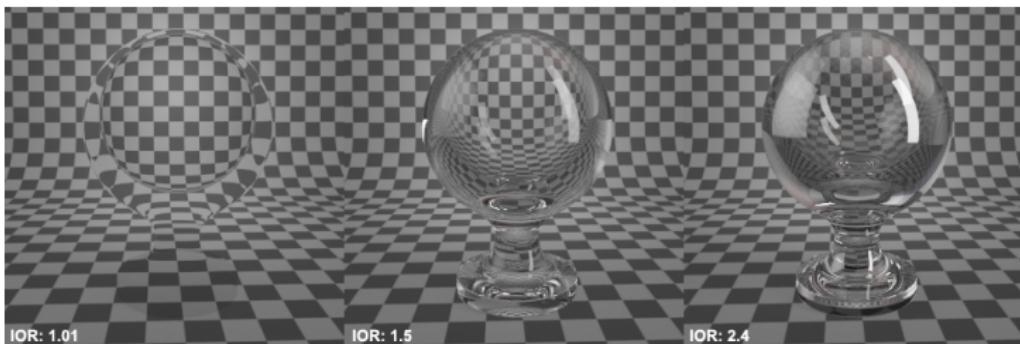
Ejemplo IOR



Variaciones en del índice de refracción. Renderizado con V-ray. Tomado de turbosquid.com

Índice de Refracción

Velocidad de propagación no afecta la apariencia, el cambio de velocidad si

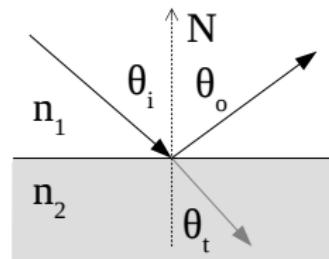


Variaciones en del índice de refracción. Renderizado con V-ray. Tomado de turbosquid.com

Refracción de la luz

Ley de Snell

Formula que describe la relación entre el ángulo de incidencia θ_i y el ángulo de refracción θ_r



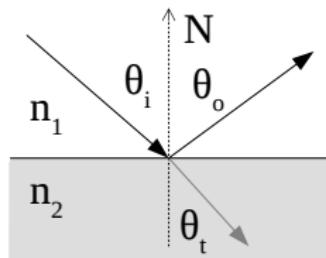
Ley de Snell

Ley de Snell

Describe la refracción de forma global

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_1}{n_2}$$

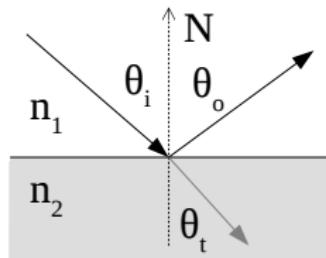
Donde n_1, n_2 son los índices de refracción



Refracción de la luz

Ecuaciones de Fresnel

- ▶ Ya sabemos el ángulo falta la magnitud
- ▶ Expresan el **ratio entre la energía reflejada y la transmitida**
- ▶ Dos parámetros
 1. Ángulo de incidencia
 2. Índice de refracción



Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

Efecto Visual: Luz **Reflejada** al punto de vista es producto de:

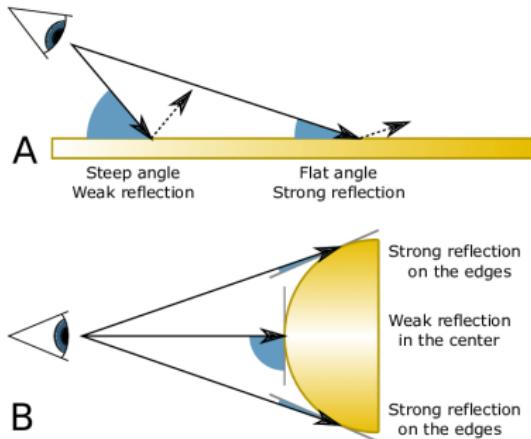
Trasmisión Ángulo del observador **es cerca de la normal**

Reflexión Ángulo del observador **es cerca de la tangente**

Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

Efecto en la apariencia de todos los materiales

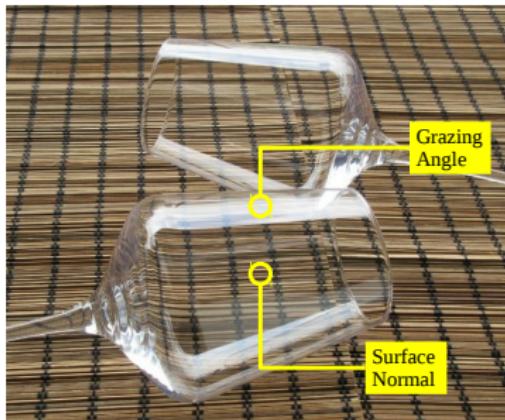


Tomado de *Combining Pseudo Chroma Depth Enhancement and Parameter Mapping for Vascular Surface Models*

Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

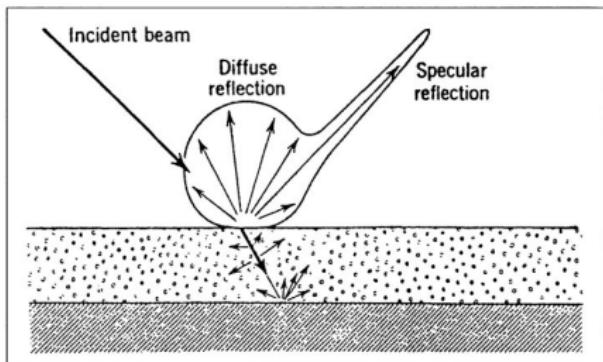
Efecto en la apariencia de **todos los materiales**



Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

- ▶ La refracción ocurre en materiales opacos
- ▶ Luz experimenta dispersión y/o absorción



Reflexión difusa y especular en materiales. Tomado de ceramicartsnetwork.org

Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

Efecto en la apariencia de **todos los materiales**

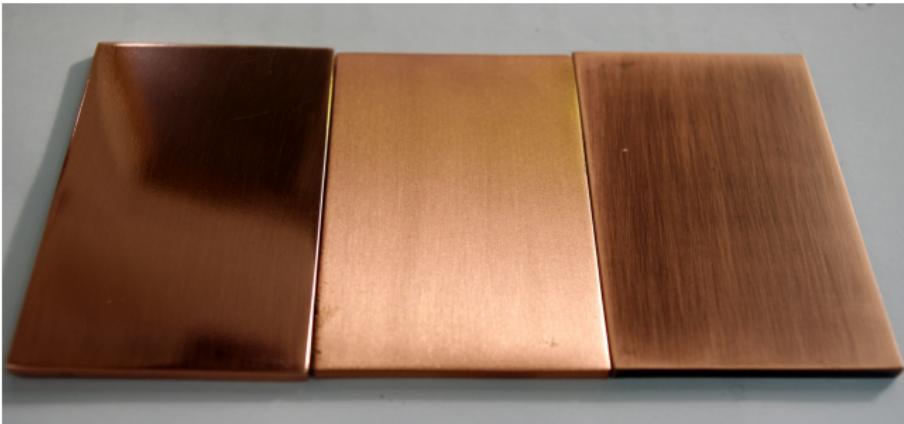


Efecto Fresnel. Tomado de pinehurstmobiledetailing.com

Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

- ▶ Efecto en disminuye con aumento de rugosidad
- ▶ Normales divergen → reflejos borrosos



Efecto Fresnel a diferentes rugosidad. Tomado de sinkadvice.co.uk

Ecuaciones de Fresnel

Efecto Fresnel

Simulación correcta es obligatoria en los motores de renderizado moderno



Materiales PBR. Tomado de marmoset.co

Ecuaciones de Fresnel

Ecuaciones de Fresnel

El ratio $0 \leq Fr \leq 1$ de energía reflectada, está dado por:

$$Fr = \frac{1}{2}(r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2),$$

Donde r_{\parallel} y r_{\perp} son los componentes paralelos y perpendiculares de la luz no polarizada

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

Interacción luz-materia

Dispersión

Reflexión

Difracción

Refracción

Índice de refracción (IOR)

Ley de Snell

Ecuaciones de Fresnel

Modelos de reflexión

BRDF

Modelos Ideales

Modelo Phong

Modelos físicamente correctos

Teoría de las Microfacetas

Materiales

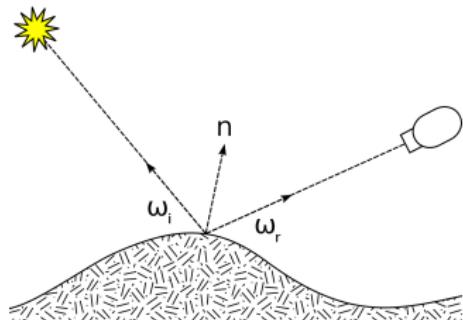
Metales

Dieléctricos

Modelos de reflexión

Modelo de Reflexión

- ▶ Función que describe la energía retornada en un punto
- ▶ Parámetros:
 1. Propiedades del material
 2. Propiedades de la superficie
 3. Energía incidente
 4. Punto de vista

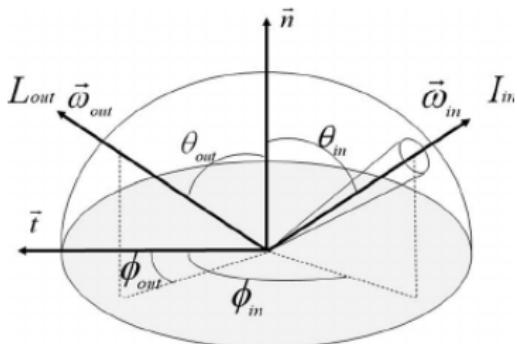


Bidirectional reflectance distribution function.
Tomado de Wikipedia

Modelos de reflexión

Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

- ▶ Función es llamada BRDF
- ▶ Toma dirección de los rayos entrante ω_i y salientes ω_o
- ▶ Retorna la contribución del rayo entrante en la salida final



Tomado de BRDF: Geometry of surface reflection

Modelos de reflexión

BRDF Genérica

Toma los rayos entrante ω_i y salientes ω_o :

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = \frac{dL_r(\omega_o)}{dE_i(\omega_i)} = \frac{dL_r(\omega_o)}{L_i(\omega_i)\cos\theta_i d\omega_i}$$

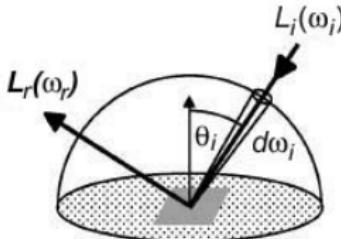
Donde L_r es la radiación de salida. E_i la irradiación entrante, energía que llega de todas las direcciones.

La irradiación puede ser calculada como cada rayo atenuado por su ángulo (ley de *Lambert*)

Modelos de reflexión

¿Qué hace un buen modelo?

1. Retorna valores positivos $f_r(\omega_i, \omega_o) \leq 0$
2. Es recíproca: $f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i)$
3. Conserva la energía $\int_{\Omega} L_i(\omega_i) f_r(\omega_i, \omega_o) \cos \theta_i d\omega_i \leq 1$



Tomado de math.ubc.ca.com

Modelos de reflexión

¿Qué hace un buen modelo?

- ▶ Compacto: Número de parámetros
- ▶ Modela gran parte del comportamiento
- ▶ Configurar de forma intuitiva



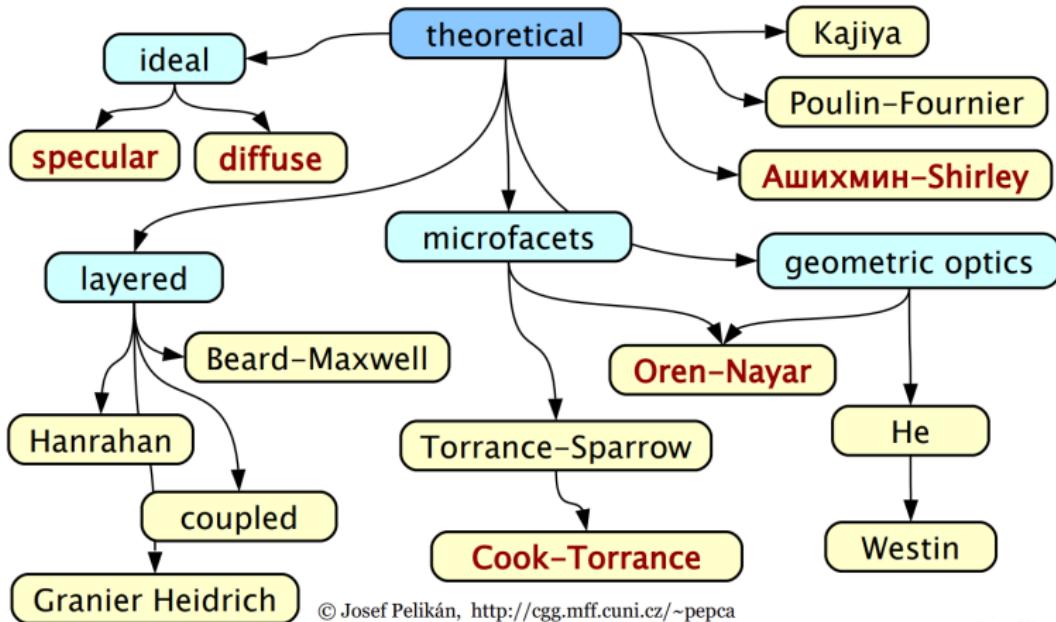
Tomado de turbosquid.com

Modelos de reflexión

Fuentes

1. La apariencia proviene de interacciones complejas
2. Los modelos provienen de varias fuentes:
 - ▶ Teóricas
 - ▶ Empíricas
 - ▶ Experimentales

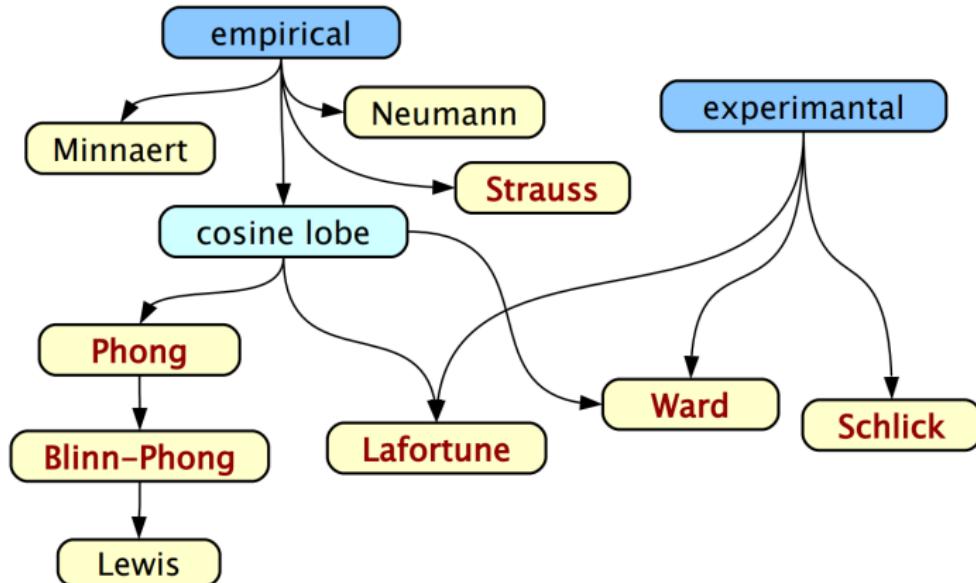
Modelos de reflexión



© Josef Pelikán, <http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca>

Tomado de Reflectance Models (BRDF) por Josef Pelikán

Modelos de reflexión



Tomado de Reflectance Models (BRDF) por Josef Pelikán

Modelos de reflexión

Modelos Ideales

- ▶ Describen las interacciones básicas de la materia
- ▶ No tienen en cuenta imperfecciones
- ▶ Hacen algunas suposiciones

Difusión ideal



Reflexión ideal (espejo)

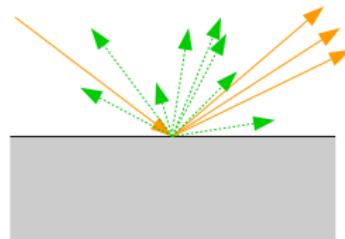
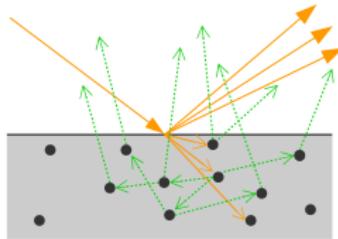


Tomado de blender.org

Modelos Ideales

Suposiciones

- ▶ La distribución de rayos incidentes y resultantes es menor a π pixel
- ▶ La luz es un vector (recto e instantáneo)
- ▶ Interactúa con elementos mayores a su longitud de onda



Modelos Ideales

Suposiciones

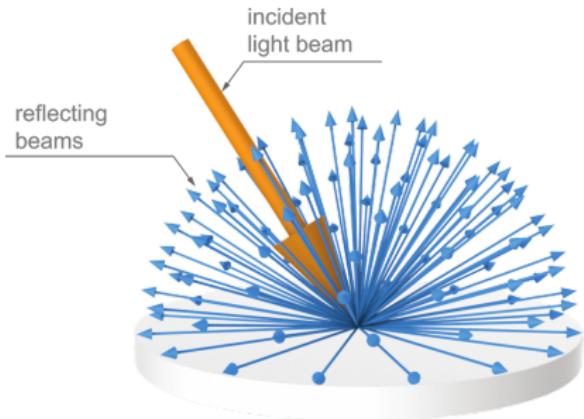
- ▶ Sistema lineal, conserva la energía
- ▶ No hay polarización de las ondas
- ▶ La luz del ambiente está en estado estable
- ▶ La luz solo puede ser: emitida, reflejada o transmitida



Modelos de reflexión

Modelo reflexión difusa ideal

- ▶ *Lambertian reflectance*
- ▶ Describe elementos mate de forma ideal
- ▶ Energía retornada es independiente del punto de vista
- ▶ Probabilidad de reflexión es constante



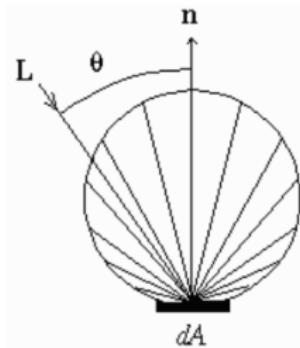
Tomado de lake-photonics.com

Modelo de lambert

Ley del coseno de Lambert

La cantidad de luz observada de una superficie difusa ideal es **proporcional al ángulo entre la normal y el rayo incidente**

$$L_r(\omega_o) \approx \cos \theta \approx N \cdot L$$



Tomado de tralvex.com

Modelo de lambert

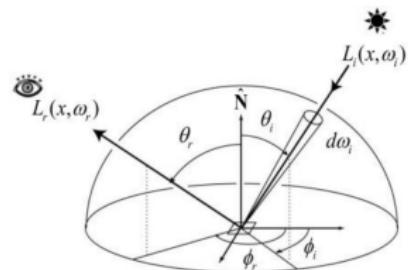
Reflexión de Lambert

Albedo ρ es la proporción de la luz reflejada

$$\frac{L_r}{L_i}$$

Es la energía distribuida por el hemisferio atenuada por la ley del coseno por la función lambertiana f_l

$$\rho = \int_{\Omega} f_l N \cdot L d\omega$$



Tomado de CSCE 641 Computer Graphics:
Reflection Models

Modelo de lambert

Reflexión de Lambert

Despejando, la función lambertiana es:

$$f_l = \frac{\rho}{\int_{\Omega} N \cdot L d\omega}$$

Donde:

$$\int_{\Omega} N \cdot L d\omega = \pi$$

Entonces:

$$\mathbf{f}_l = \frac{\rho}{\pi}$$

Modelo de lambert

Reflexión de Lambert

El color de un punto en una superficie *lambertiana*:

$$\frac{\rho}{\pi} * L_i * C * N \cdot L$$

Donde:

L_i Intensidad de la luz

C Color

N Normal de la superficie

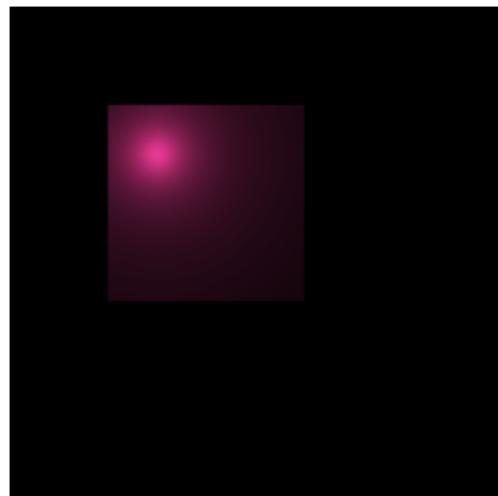
L Dirección de la luz

Modelo de lambert

Ejercicio

Programar una escena en el espacio de la cámara donde:

- ▶ Se defina un punto de luz y un plano
- ▶ Se dibuje con material difuso



Modelo de Phong

Modelo Phong

- ▶ Desarrollado por Bui Tuong Phong en su PhD (1975)
- ▶ Modelo empírico: basado en sus observaciones
- ▶ Brillos especular en objetos con reflexión difusa

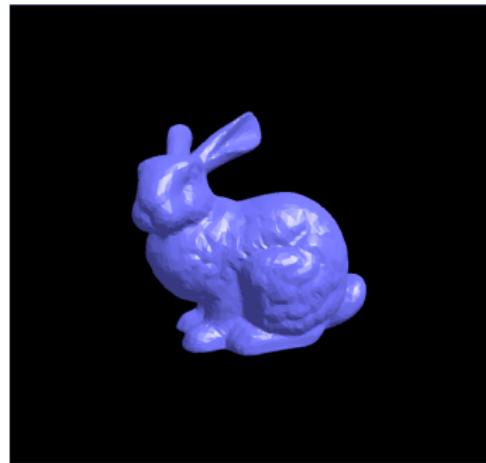


Componentes especulares y reflexión difusa.
Por Salao Cobo en Behance

Modelo de Phong

Modelo Phong

- ▶ Uno de los modelos más usados
- ▶ No conserva la energía
- ▶ Actualmente en desuso
- ▶ Reemplazado por modelos *PBR*

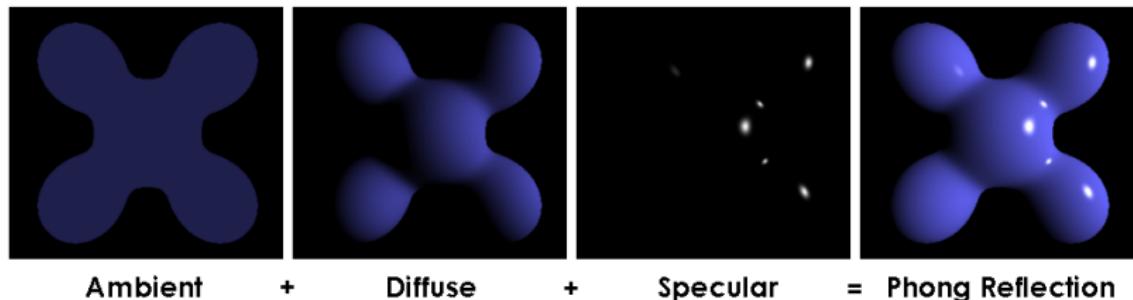


Render con modelo Phong Tomado de
vclw17.github.io

Modelo de Phong

Modelo Phong

Los materiales se pueden recrear como una suma ponderada de reflexión difusa y especular



Componentes del modelo Phong Tomado de Wikipedia

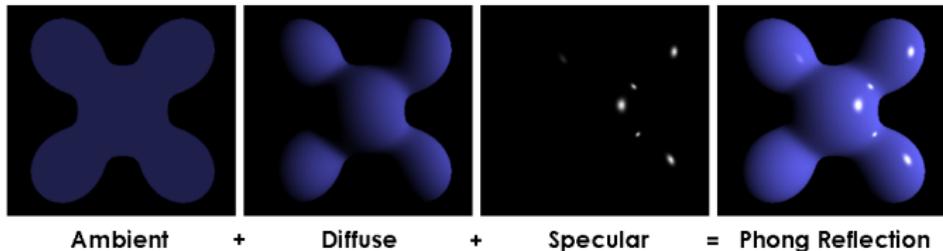
Modelo de Phong

Componentes

Energía resultante en dirección ω_o es:

$$L_r(\omega_o) = K_d * \mathbf{L}_d + K_s * \mathbf{L}_s$$

Donde K son factores de control de los componentes difuso L_d (visto anteriormente) y especular L_s

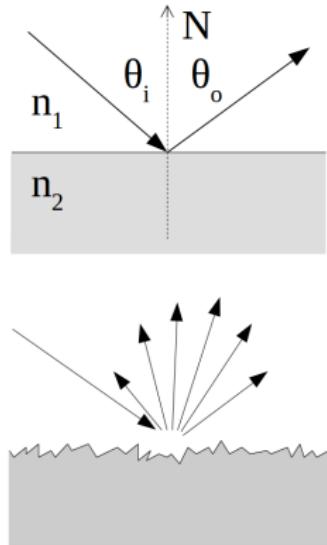


Componentes del modelo Phong Tomado de Wikipedia

Modelo de Phong

Componente especular

- ▶ Brillos especulares
- ▶ Similar al comportamiento tipo espejo
- ▶ Superficie con imperfecciones (*Microfacetas*)
- ▶ Difuminan la reflexión



Reflexión ideal vs Superficie con rugosidad

Modelo de Phong

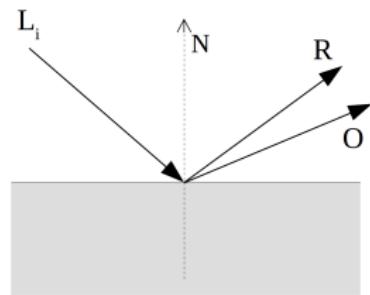
Componente especular

- ▶ El brillo disminuye cuando se aleja del ángulo de reflexión ideal R

$$L_s \approx O \cdot R$$

- ▶ Dirección de la reflexión espejo es:

$$R = 2(N \cdot L_i)N - L_i$$

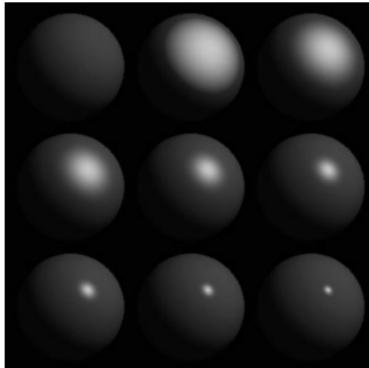
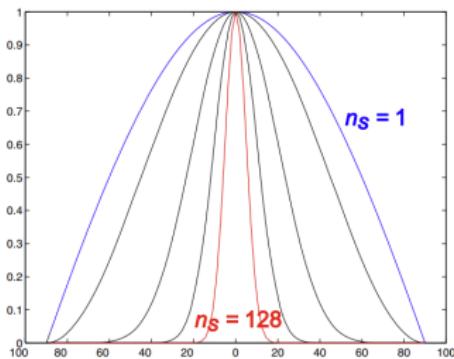


Modelo de Phong

Componente especular

- Agregar un parámetro n para controlar el tamaño de la reflexión

$$L_s \approx (O \cdot R)^n$$



Modelo de Phong

En resumen

- ▶ Modelo empírico
- ▶ Los parámetros K_s , K_d y n no tienen significado físico
- ▶ Ajustar hasta obtener el resultado deseado



Render con modelo Phong. Tomado de blog.playcanvas.com

Modelos físicamente correctos

Modelos basados en comportamiento físico

- ▶ Interacción materia-luz basado en principios físicos
- ▶ Estándar de la industria
- ▶ *Disney* pioneros con *Principled material*
- ▶ Ventajas de coherencia en cualquier ambiente



Tomado de Disney

Modelos físicamente correctos

Modelos basados en comportamiento físico

- ▶ Modelo que cumple:
 1. Recíproco
 2. Positivo
 3. Conservación de la energía
- ▶ Comportamientos de la naturaleza:
 - ▶ Efecto *Fresnel*
 - ▶ Efecto de la rugosidad



Tomado de marmoset.co

Modelos físicamente correctos

Comportamiento realista

- ▶ Efecto Fresnel
- ▶ Coherencia con la rugosidad
- ▶ Reflexión difusa direccional

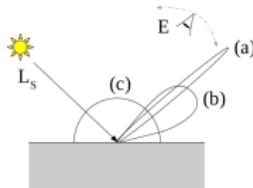
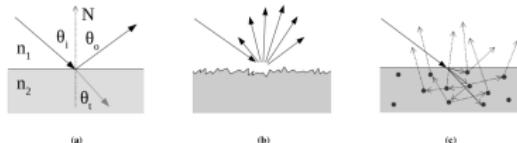


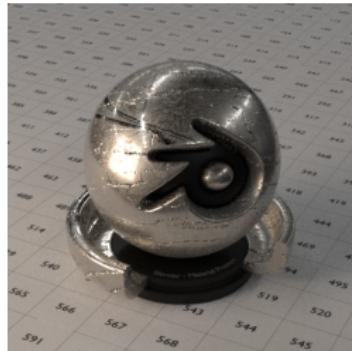
Figure 4.2: Commonly found reflectance lobes of light from surface. (a) spike from smooth surfaces, (b) specular reflection from rough surfaces. (c) Diffuse lobe from subsurface scattering. Adapted from [244]



Teoría de las Microfacetas

Microfacetas

- ▶ Efecto de las imperfecciones microscópicas en la reflexión
- ▶ Inspira la mayoría de modelos actuales
- ▶ Introducido por Cook & Torrance (1982)
- ▶ Tenido constantes mejoras

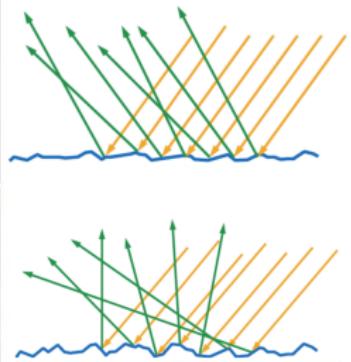


Variaciones de la rugosidad en material PBR

Teoría de las Microfacetas

Modelo de Cook & Torrance

- ▶ Nuevas ideas:
 1. **Microfacetas**
 2. Diferenciación entre metales y no metales
(Más luego)



Tomado de Real-Time Rendering, 3rd Edition", A K Peters 2008

Modelo de Cook & Torrance

Microfacetas

La reflexión resultante f_r resultado de dos componentes:

$$f_r = s f_s + d f_d, \quad s + d = 1$$

Donde s y d son propiedades del material

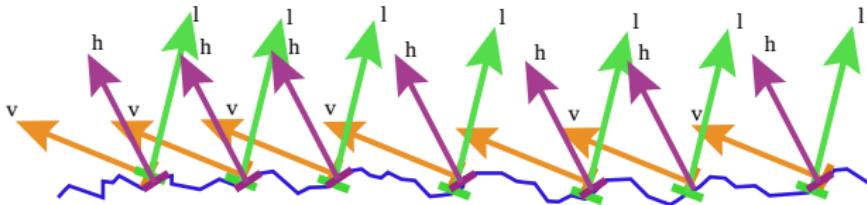
f_s Reflexión especular

f_d Reflexión difusa

Modelo de Cook & Torrance

Modelo de Cook & Torrance

- ▶ Todas las microfacetas tiene una normal m
- ▶ Tienen en común: Dirección de luz incidente v y resultante l
- ▶ Sólo contribuyen Las caras que su normal está entre v y l



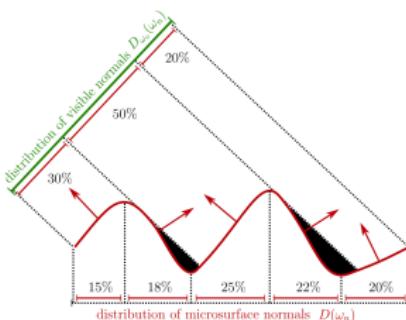
Modelo de Cook & Torrance

Shadowing

Oclusión de la luz incidente

Masking

Oclusión de la luz resultante en dirección del punto de vista



Understanding the Masking-Shading Function in Microfacet-Based BRDFs Eric Heitz

Modelo de Cook & Torrance

Componente especular con microfacetas

- ▶ Parametrizada por dos funciones estadísticas
- ▶ **NDF** *Normal Distribution Function* $D(h)$ distribución de normales que aportan
- ▶ **Shadowing-Masking Function** $G(l, v, h)$ proporción de facetas no ocluidas
- ▶ Componente especular está definido por: $f_r = \frac{F}{\pi} \frac{D(h)}{(n \cdot l)} \frac{G(l, v, h)}{(n \cdot v)}$

Ejercicio

Ejercicio Modelo Phong

- ▶ Agregar el componente especular basado el modelo Phong

Materiales

Materiales

- ▶ Apariencia está relacionada con sus propiedades eléctricas
- ▶ Materiales pueden ser agrupados:
 1. **Metales (conductores)**
 2. **Dieléctricos (aislantes)**
 3. Semi-conductores



Materiales

Metales

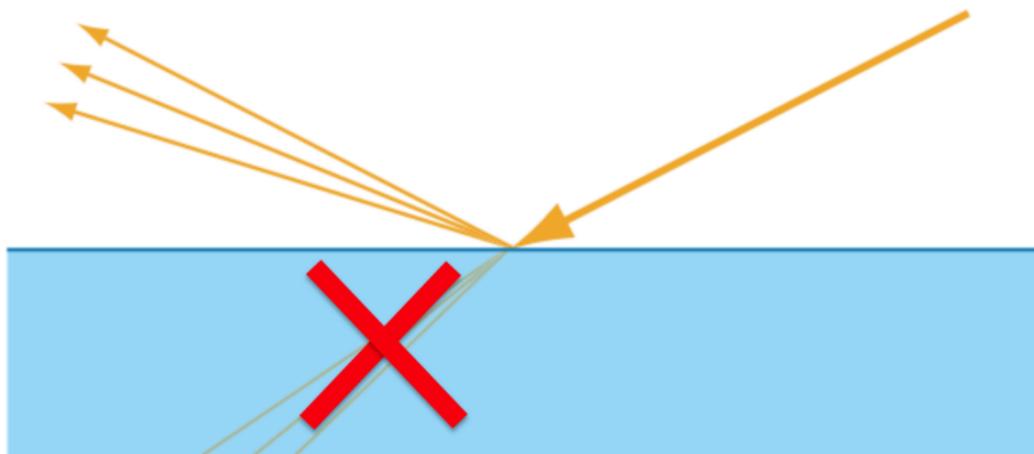
- ▶ Buena conductividad térmica y eléctrica
- ▶ Metales absorben y reflejan inmediatamente la luz
- ▶ Luz dispersada internamente es atenuada por la conductividad eléctrica
- ▶ Diferente absorción dependiendo de la longitud de onda



Metáles

Consecuencias

No hay reflexión difusa



Metales

Consecuencias

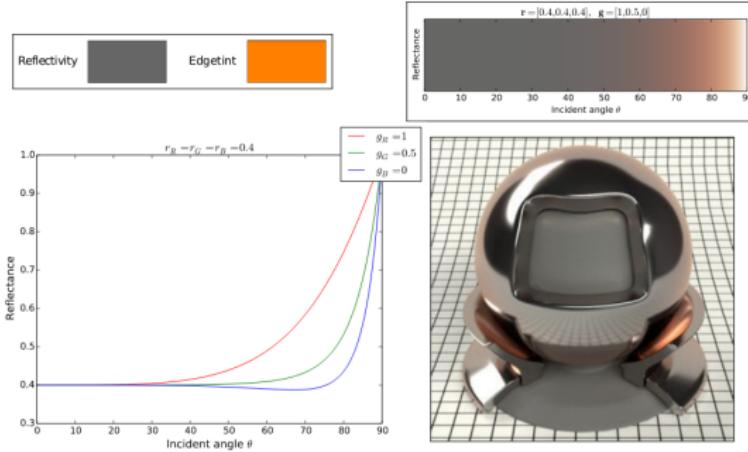
Efecto Fresnel no es tan visible



Metales

Consecuencias

Reflexiones con un ligero tinte (*Edgetint*)

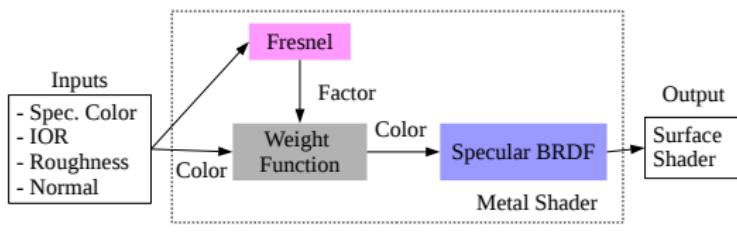


Metáles

Simular Metáles

Color (entre blanco y un color base) de la BRDF especular es definido por la *Función de suma ponderada* con factor c definido por la función *Fresnel*.

Función de suma con pesos: $\vec{v}_w = (\vec{v}_1 c) + \vec{v}_2 |c - 1|$



Materiales

Dieléctricos

- ▶ Son buenos aislantes térmicos y eléctricos
- ▶ Luz es reflejada en la superficie
- ▶ Trasmitida y refractada
- ▶ Absorbida en cierto grado

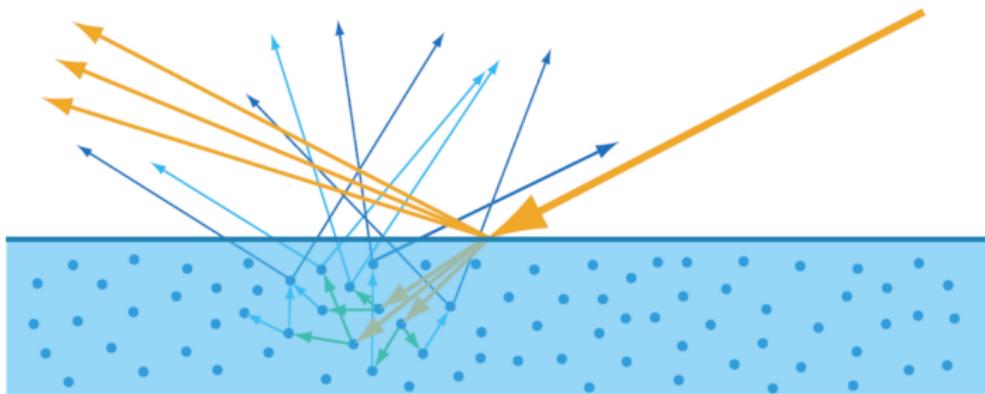


Tomado de jpidgeon en flickr

Dieléctricos

Consecuencias

Presentan reflexión difusa y especular



Dieléctricos

Consecuencias

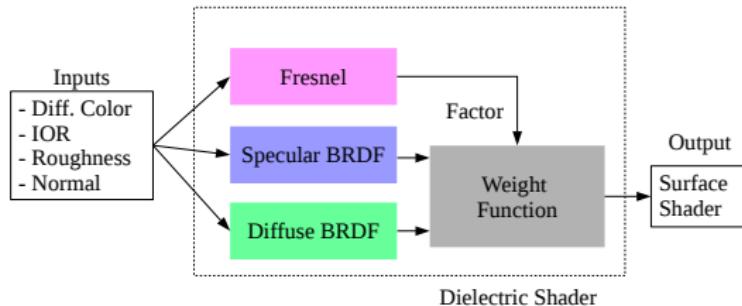
Tiene “color” y es visible el efecto *Fresnel* atenuado por la rugosidad de la superficie



Metáles

Simular Dieléctricos

Mezcla entre BRDFs difuso y especular controlada por la *Función de suma ponderada* con factor definido por la función *Fresnel*



Bibliografía

Referencias

- ▶ Computer Graphics Using OpenGL por F S. Hill Jr
- ▶ Real-Time Rendering, Fourth Edition By Tomas Akenine-Moller, Eric Haines, Naty Hoffman
- ▶ On Object Recognition for Industrial Augmented Reality Por Juan Carlos Arbelaez