

Informática Gráfica.

Sesión 7: Modelos de iluminación.

Carlos Ureña, Sept 2025.
Dept. Lenguajes y Sistemas Informáticos.
Universidad de Granada.

Índice

Radiación: percepción, emisión y reflexión	3
El modelo de <i>sombreado de Phong</i>	20
Modelos realistas de iluminación. La BRDF	49
Modelos de fuentes de luz	86
Problemas	99

Sección 1.

Radiación: percepción, emisión y reflexión.

-
1. Radiación y su percepción: el color.
 2. Emisión y reflexión de la radiación.

Subsección 1.1.

Radiación y su percepción: el color.

La luz como radiación electromagnética

La luz que observamos es radiación electromagnética (variaciones periódicas del campo eléctrico y magnético) de naturaleza similar a las ondas que se usan para los móviles, wifi, radio y televisión:

- El sistema visual humano ha evolucionado para percibir esa radiación solo cuando su longitud de onda λ está aprox. entre 390 y 750 nanómetros (\equiv *espectro visible*).
- La emisión e interacción de las ondas en los átomos nos permite percibir el entorno.
- Físicamente, la radiación se describen como algo que tiene características de onda y de corpúsculo a la vez (modelos complementarios).
- En Informática Gráfica se usa más frecuentemente el *modelo de partículas* (óptica geométrica) en lugar del *modelo de ondas* (óptica física).

Brillo y color de la radiancia

Desde un punto p en una dirección v pueden emitirse o reflejarse una gran cantidad de fotones con longitudes de onda distintas.

- La intensidad o brillo de la luz depende de la cantidad de fotones (es decir, de la radiancia total sumada en todas las longitudes de onda)
- El color con el que percibimos la luz depende de las distribución de las longitudes de onda de los fotones en el espectro visible.

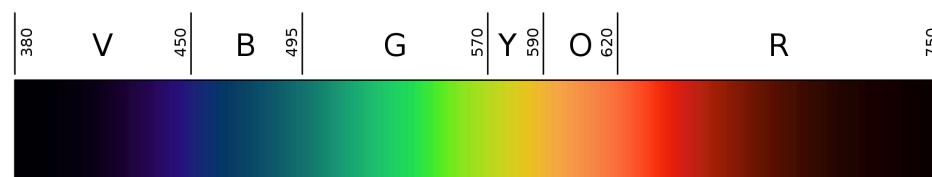


Figura de Wikipedia (Visible Spectrum): en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum

El modelo de partículas. La radiancia.

Bajo este modelo, la radiación se puede describir de forma idealizada como un flujo en el espacio de partículas puntuales llamadas **fotones**, con trayectorias rectilíneas.

- Cada uno tiene una *energía radiante* que depende únicamente de su longitud de onda (es inv. prop.)
- En un entorno de punto p del espacio (típicamente en la superficie de un objeto) podemos medir la densidad de energía radiante por unid. de tiempo de los fotones de una longitud de onda λ que pasan por p en una determinada dirección v (un vector libre).

Esa energía se denomina **radiancia** y se nota como $L(\lambda, p, v)$.

La radiancia determina el tono de color y el brillo con el que observamos el punto p cuando lo vemos desde la dirección v .

Percepción de radiación visible

El ojo es la parte del *sistema visual humano* (SVH) capaz de enviar señales eléctricas al cerebro que dependen de las características de la luz que incide sobre las neuronas de su cara interna (la retina)

- En cada neurona de la retina, y para cada longitud de onda λ , se recibe una radiancia $L(\lambda)$ distinta.
- El ojo funciona de forma tal que *simplifica* esa gran cantidad de información y la reduce (en cada neurona) a tres valores reales positivos que forman una tupla (s, m, l) que depende de L , es decir, el ojo tiene asociada una función f tal que:

$$f(L) = (s, m, l)$$

- Esta simplificación es aprox. lineal, es decir si $f(L) = (s, m, l)$ y $f(L') = (s', m', l')$, entonces:

$$f(aL + bL') = a(s, m, l) + b(s', m', l')$$

donde a, b son valores reales arbitrarios, no negativos.

Los primarios RGB.

Si x es un valor real ($x > 0$), entonces:

- la señal $(x, 0, 0)$ enviada desde el ojo se interpreta o percibe en el cerebro (SVH) como de color rojo.
- la señal $(0, x, 0)$ se percibe de color verde.
- la señal $(0, 0, x)$ se percibe de color azul.

Como consecuencia, supongamos que tenemos tres distribuciones de radiancia

L_r, L_g y L_b tales que:

$$f(L_r) \approx (1, 0, 0) \quad f(L_g) \approx (0, 1, 0) \quad f(L_b) \approx (0, 0, 1)$$

A una terna de distribuciones L_r, L_g y L_b que cumplen lo anterior se le denomina una terna de **primarios RGB**, ya que son percibidos como rojo, verde y azul, respectivamente.

Mezcla aditiva de primarios

Podemos usar una *mezcla aditiva* (suma ponderada) de tres primarios RGB para producir una señal arbitraria (r, g, b) en el ojo, ya que se cumple:

$$f(rL_r + gL_g + bL_b) \approx (r, g, b)$$

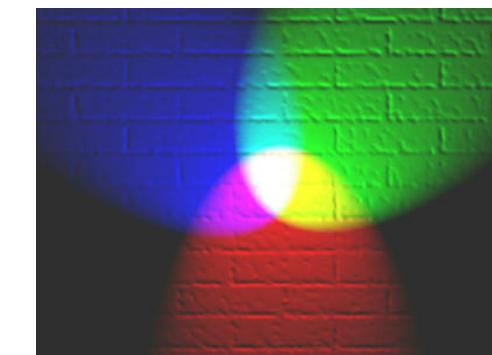


Imagen obtenida de: en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model

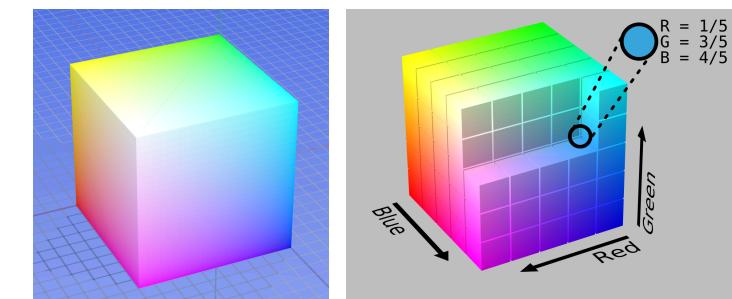
Reproducción de ternas RGB

Un dispositivo de salida de color (monitor, impresora, proyector) tiene asociados tres primarios RGB (las distribuciones obtenidas cuando se muestra el rojo, verde y azul a máxima potencia en el dispositivo)

- Como consecuencia, cualquier color reproducible en un dispositivo se puede representar por una terna (r, g, b) , con $0 \leq r, g, b \leq 1$.
- El valor 0 indica que el correspondiente primario no aparece.
- El valor 1 representa la máxima potencia del dispositivo para cada primario.
- Una misma terna (r, g, b) produce tonos de color ligeramente distintos en dispositivos distintos.
- Una misma terna (r, g, b) niveles de brillo que pueden variar mucho entre dispositivos.

El espacio RGB

Al conjunto de todas las ternas RGB con componentes entre 0 y 1 se le llama **espacio de color RGB**, y se puede visualizar como un cubo 3D con colores asociados a cada punto del mismo.



Imágenes de Wikipedia: *RGB color model* en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model

El espacio RGB no es el único esquema para representar computacionalmente los colores, pero sí el más usado hoy en día.

Dependencia del dispositivo de salida

El color que se obtiene con una terna RGB en un dispositivo de salida depende de los primarios RGB que se usen en dicho dispositivo y del brillo máximo que pueda alcanzar:



Imagen de: [sitio web de CBC News, Canadá](#)

1. Radiación: percepción, emisión y reflexión..
1.2. Emisión y reflexión de la radiación..

Fuentes de luz y reflectores:

La radiación electromagnética visible se genera en las **fuentes de luz**, por procesos físicos diversos que convierten otras formas de energía en energía radiante. Hay de dos tipos:

- **Fuentes naturales:** Sol o estrellas, fuego, objetos incandescentes, órganos de algunos animales, etc...
- **Fuentes artificiales (luminarias):** filamentos incandescentes, tubos fluorescentes, LEDs, etc...

Los fotones creados en las luminarias interactúan con los átomos de la materia, que absorben su energía y después pueden radiar de nuevo una parte de ella, proceso conocido como **reflexión**:

- parte de la energía recibida se **convierte en calor**
- parte de la energía recibida se **convierte en radiación reflejada**
- la radiación reflejada puede reflejarse de nuevo varias veces

Subsección 1.2. Emisión y reflexión de la radiación.

1. Radiación: percepción, emisión y reflexión..
1.2. Emisión y reflexión de la radiación..

Modelo de la reflexión local en un punto

La radiancia $L(\lambda, p, v)$ se puede escribir como suma de:

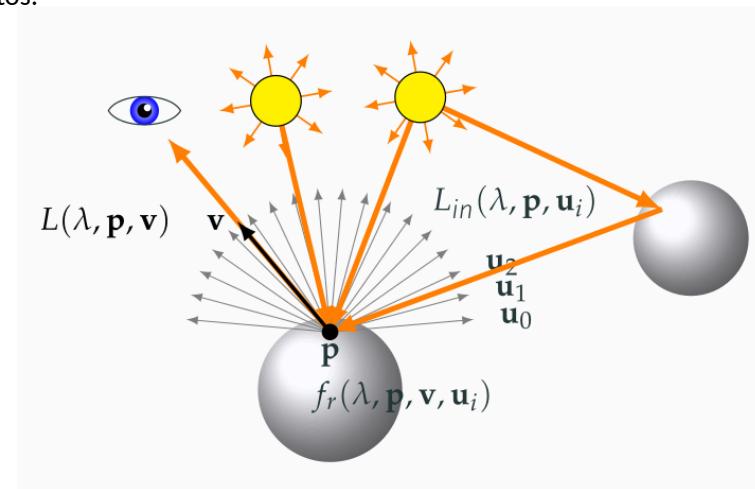
- la **radiancia emitida** desde p en la dirección v (0 si p no está en una fuente de luz), que llamamos $L_{em}(\lambda, p, v)$
- la **radiancia reflejada**, suma, para cada dirección u_i del producto de:
 - ▶ $L_{in}(\lambda, p, u_i) \equiv$ radiancia incidente sobre p desde u_i
 - ▶ $f_r(\lambda, p, v, u_i) \equiv$ fracción de radiancia que se refleja desde p en la dirección v , respecto del total incidente sobre p proveniente de la dirección u_i (con longitud de onda λ)

es decir, la radiancia es sume de emitida más reflejada, y la reflejada es una suma ponderada de la incidente desde cada dirección multiplicada por la fracción reflejada:

$$L(\lambda, p, v) = L_{em}(\lambda, p, v) + \sum_i f_r(\lambda, p, v, u_i) L_{in}(\lambda, p, u_i)$$

Reflexión local en un punto

Hay muchas trayectorias de fotones que no acaban siendo detectadas por el observador (la mayoría), además las que sí llegan pueden hacerlo por muchos caminos distintos:



Características de la ecuación de rendering

La ecuación de rendering tiene las siguientes características:

- La función L aparece a la izquierda y a la derecha (dentro de una integral).
- Por tanto, es una **ecuación integral**.
- Si conocemos las funciones L_{em} y f_r , podemos interpretar la función L como la **incógnita** de la ecuación, ya que L **está determinada** por f_r y L_{em} .
- No hay una expresión analítica cerrada general para escribir L en función de f_r y L_{em} .

Por tanto, **su resolución analítica** es imposible, así que hay dos estrategias para calcular L :

- Usar **modelos simplificados** de reflexión y emisión que permitan calcular L analíticamente a partir de f_r y L_{em} (a costa de realismo reducido).
- Usar **métodos numéricos** para calcular una aproximación a L .

La Ecuación de Rendering

La sumatoria anterior es incorrecta, ya que el espacio de posibles direcciones de entrada \mathbf{u} es continua (es la semiesfera de radio unidad, Ω), por tanto, si queremos ser rigurosos no se puede usar una sumatoria sino una integral, en la cual el diferencial es $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})d\sigma(\mathbf{u})$

$$L(\lambda, p, v) = L_{em}(\lambda, p, v) + \int_{\Omega} L_{in}(\lambda, p, \mathbf{u}) f_r(\lambda, p, v, \mathbf{u}) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})d\sigma(\mathbf{u})$$

En esta ecuación, el valor de L_{in} en realidad es la radiancia saliente desde otro punto q en la dirección contraria $-\mathbf{u}$. Sustituimos $L_{in}(\lambda, p, \mathbf{u})$ por $L(\lambda, q, -\mathbf{u})$:

La ecuación resultante se denomina **ecuación de rendering (rendering equation)**, tiene esta forma:

$$L(\lambda, p, v) = L_{em}(\lambda, p, v) + \int_{\Omega} L(\lambda, q, -\mathbf{u}) f_r(\lambda, p, v, \mathbf{u}) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})d\sigma(\mathbf{u}) \quad (1)$$

El modelo de sombreado de Phong.

1. Componente ambiental.
2. Componente difusa.
3. Componente pseudo-especular.

Simplificaciones para modelos básicos

La ecuación de rendering es muy compleja de aproximar en corto tiempo de cálculo. Por tanto, se hacen varias simplificaciones:

1. No se considera la radiancia emitida.
2. No se considera la luz incidente que no provenga directamente de las fuentes de luz.
3. Las fuentes de luz son puntuales o unidireccionales, no extensas, y hay un número finito de ellas.
4. Los objetos o polígonos son totalmente opacos (no hay transparencias ni mat. translúcidos).
5. No se consideran sombras arrojadas (las fuentes son visibles desde cualquier cara delantera respecto de ellas).
6. El espacio entre los objetos no dispersa la luz (la radiancia se conserva en el espacio entre los objetos).
7. En lugar de considerar todas las longitudes de onda λ posibles, usamos el modelo RGB.

Modelo simplificado

El modelo que hemos visto antes en la ecuación (1) se simplifica:

- La iluminación indirecta se reduce a un término ambiente (no depende de v).
- De todas las direcciones u_i , solo es necesario considerar las que apuntan hacia cada una de las fuentes de luz l_i
- Todas las fuentes de luz son visibles desde un punto (no hay sombras arrojadas).
- Los valores de radiancia son tuplas (r, g, b) (no acotadas)
- Los valores de reflectividad (f_r) son tuplas (r, g, b) (entre 0 y 1)

Por tanto ahora la radiancia saliente L se obtiene así:

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \sum_{i=0}^{n-1} L_{in}(\mathbf{p}, \mathbf{l}_i) f_r(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i) \quad (2)$$

donde: $n \equiv$ número de fuentes de luz, $\mathbf{l}_i \equiv$ vector que apunta desde \mathbf{p} en la dirección de la i -ésima fuente de luz.

Efecto de las simplificaciones.

Aquí se observa una escena con iluminación compleja (izquierda) y simplificada (derecha)

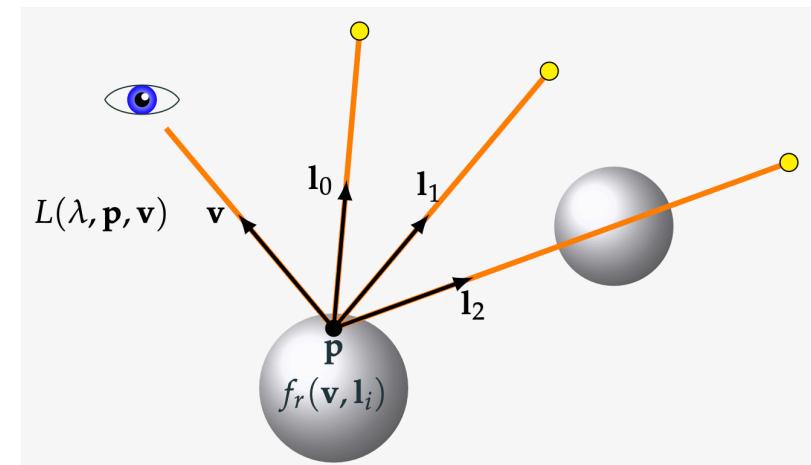


Imágenes de:

[Foley, van Dam, Feiner, Hughes Computer Graphics: Principles and Practice in C \(2nd ed.\)](#)

Modelo simplificado (figura)

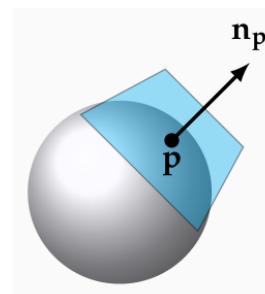
Ahora solo consideraremos trayectorias desde las luminarias hacia \mathbf{p} , las luminarias se cuentan aunque la trayectoria esté bloqueada (no hay sombras arrojadas)



El vector normal

La iluminación (la función f_r en la ecuación 2) depende la orientación de la superficie en el punto p . Esta orientación esta caracterizada por el **vector normal** n_p asociado a dicho punto:

- El vector normal n_p (en azul en la fig.) indica la orientación de la superficie en el punto p .
- Es de longitud unidad y depende de p .
- Idealmente es perpendicular al plano tangente a la superficie en el punto p (en azul en la fig.)
- En modelos de fronteras, puede calcularse de varias formas (depende del *método de sombreado*, que veremos más adelante).
- Constituye un parámetro de f_r



Tipos y atributos de las fuentes de luz

En el modelo de escena se puede incluir un conjunto de n fuentes de luz (numeradas de 0 a $n - 1$), cada una de ellas puede ser de **dos tipos**:

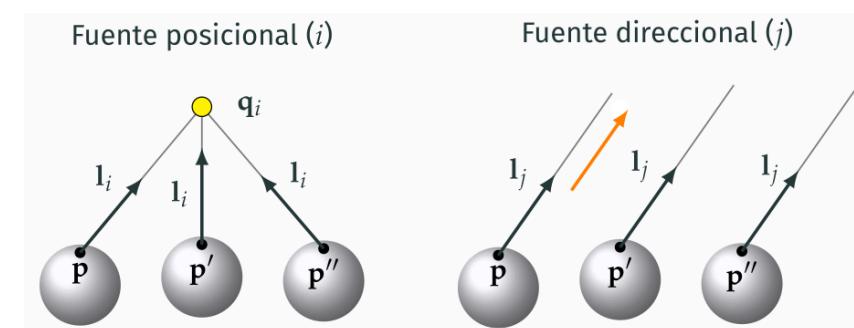
Fuentes de luz posicionales: ocupan un punto del espacio q_i . Dado un punto p , el vector unitario que apunta hacia la fuente de luz desde p se calcula como:

$$\mathbf{l}_i = \frac{\mathbf{q}_i - \mathbf{p}}{\|\mathbf{q}_i - \mathbf{p}\|}$$

Fuentes de luz direccionales: están en un punto a distancia infinita, por tanto hay un vector \mathbf{l}_j que apunta a la fuente y que es el mismo para cualquier punto p donde se quiera evaluar el MIL

Además de esto, **cada fuente de luz emite una radiancia** $S_i = (r, g, b)$ (en general no acotada).

Posición o dirección de las luminarias



Posicional: la dirección \mathbf{l}_i es distinta para cada punto p considerado. Es necesario recalcularla cada vez que se evalua el MIL.

Direccional: La dirección \mathbf{l}_j es igual para todos los puntos p considerados. Es una constante.

Radiancia incidente y tipos de reflexión. Componentes del MIL.

En la ecuación (2) los términos que aparecen pueden reescribirse en términos de los atributos de las fuentes de luz y el material

- El término $L_{in}(\mathbf{p}, \mathbf{l}_i)$ se hace igual a S_i (no tenemos en cuenta la distancia a la que está la fuente de luz)
- El término $f_r(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i)$ se descompone en tres sumandos o **componentes**
 - ▶ Luz indirecta reflejada, o término **ambiental**: $f_{am}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i)$.
 - ▶ Luz reflejada de forma **difusa**: $f_{dl}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i)$.
 - ▶ Luz reflejada de forma **pseudo-especular**: $f_{ph}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i)$.

La ecuación (2) queda como sigue:

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \sum_{i=0}^{n-1} S_i [f_{am}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i) + f_{dl}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i) + f_{ph}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i)] \quad (3)$$

Color base del objeto en un punto

En cada punto p de la superficie de un objeto hay una terna RGB, que llamamos $C(p)$, con valores entre 0 y 1, que es el **color base** en el punto p .

- Para cada componente RGB, expresa la famcción de luz reflejada, y por tanto determina el color con el que apreciamos el objeto.
- Puede ser el mismo (constante) en todos los puntos p de la superficie de un objeto.
- Puede variar de un punto a otro dentro del mismo objeto. En rasterización, esto puede ocurrir de dos formas:
 - ▶ Por el uso de *texturas* (las veremos más adelante).
 - ▶ Por el uso de una tabla de colores como atributos de vértice (para cada punto p , su color $C(p)$ es el color RGB interpolado).
- El color del objeto afecta únicamente a las componentes ambiental y difusa (no a la componente especular).

Subsección 2.1.
Componente ambiental.

Componente ambiental.

Cada objeto puede reflejar más o menos cantidad de iluminación indirecta proveniente de la i -ésima fuente de luz.

- Esa iluminación indirecta es complicada de calcular y se ignora en este modelo.
- Por tanto, los objetos aparecerían negros donde no haya iluminación directa.
- Para suplir esto, se usa la **componente ambiental** f_{am} .

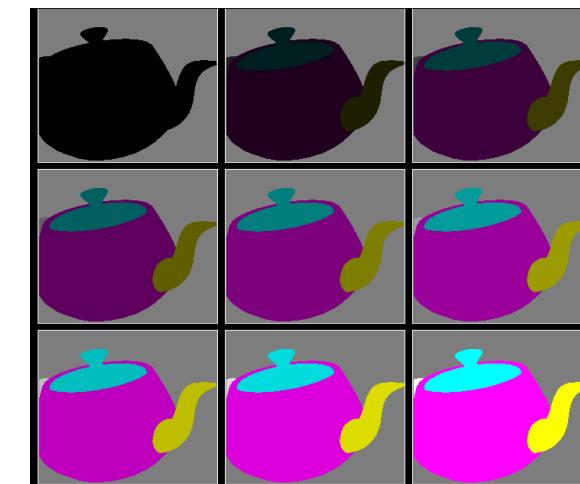
La componente ambiental, por tanto, no depende de v ni l_i , y se hace igual a:

$$f_{\text{am}}(p, v, l_i) = k_{\text{am}}(p) \cdot C(p), \quad (4)$$

donde $k_{\text{am}}(p)$ es un valor real entre 0 y 1 que determina la famcción de luz reflejada de esta forma

Reflectividad ambiental del objeto:

En este ejemplo, el color $C(p)$ depende de la parte de la tetera donde está p , mientras que k_a es constante en toda la tetera (aunque crece en sucesivas imágenes).



Componente difusa: expresión.

La **componente difusa o lambertiana (lambertian)** modela como se refleja la luz en los objetos mate o difusos *ideales*. El nombre *lambertiano* proviene de J.H. Lambert, científico francés del siglo XVIII, que fue el primero en describir este tipo de reflexión.

- La componente **sí depende** de la posición u orientación de la fuente de luz (es distinta según como esté orientada la fuente respecto de la superficie en p , es decir, depende de n_p y l_i),
- **no depende** de la dirección v en la que miramos p (el punto p se ve de un color igual desde cualquier dirección que lo veamos).

La expresión concreta de f_{dl} es esta:

$$f_{dl}(p, v, l_i) = k_{dl}(p) \cdot C(p) \cdot \max(0, n_p \cdot l_i), \quad (5)$$

donde $k_{dl}(p)$ es un valor entre 0 y 1 que indica la **famcción de luz reflejada de forma difusa**.

Subsección 2.2.

Componente difusa.

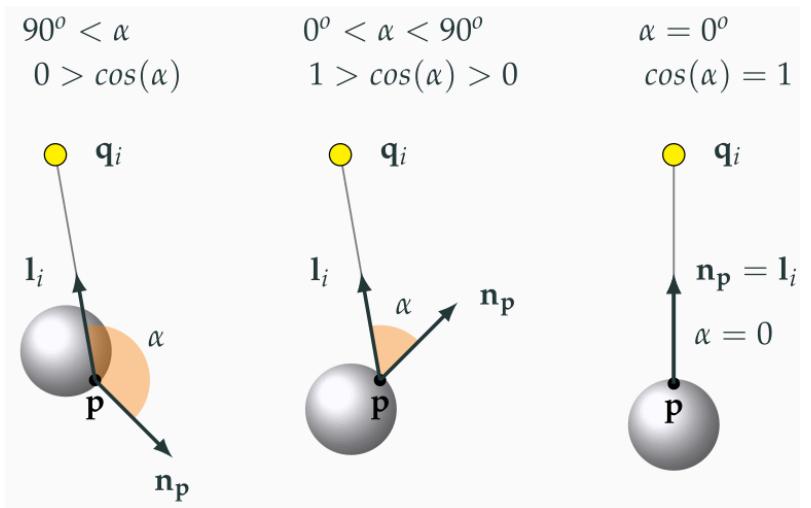
Orientación de la superficie

La orientación de la superficie respecto de la fuente de luz viene determinada por el valor α , que es el ángulo que hay entre los vectores n_p y l_i (el valor $n_p \cdot l_i$ es igual al coseno de α). Se pueden distinguir dos casos:

- Si $\alpha > 90^\circ$, entonces:
 - ▶ $\cos(\alpha)$ es negativo.
 - ▶ la superficie, en p , está orientada de espaldas a la fuente de luz.
 - ▶ la contribución de esa fuente debe ser 0.
- Si $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, entonces:
 - ▶ la superficie, en p , está orientada de cara a la fuente de luz.
 - ▶ $\cos(\alpha)$ estará entre 0 y 1 (entre $\cos(90^\circ)$ y $\cos(0^\circ)$).
 - ▶ se puede demostrar que el valor $\cos(\alpha)$ es proporcional a la densidad de fotones por unidad de área que inciden en el entorno de p , provenientes de la i -ésima fuente de luz.

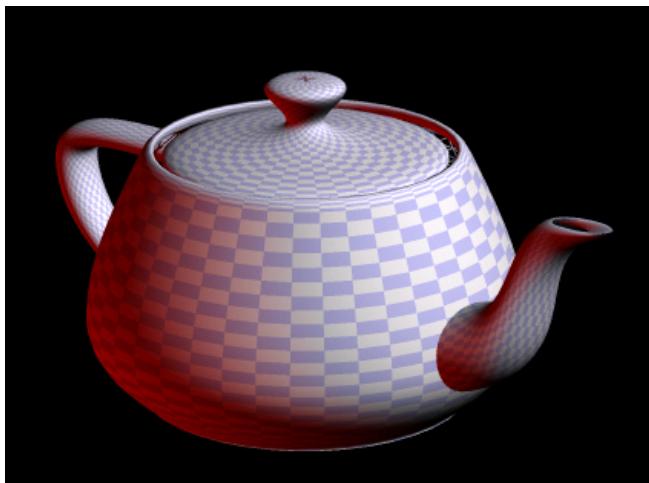
Orientación de la superficie (2)

Aquí se ilustran tres posibles casos:



Material difuso

Ejemplo con dos fuentes de luz direccional, $k_{\text{am}}(\mathbf{p}) = 0$ y $k_{\text{dl}}(\mathbf{p}) = 1$ (solo hay componente difusa). Además, $C(\mathbf{p})$ varía de unos polígonos a otros:

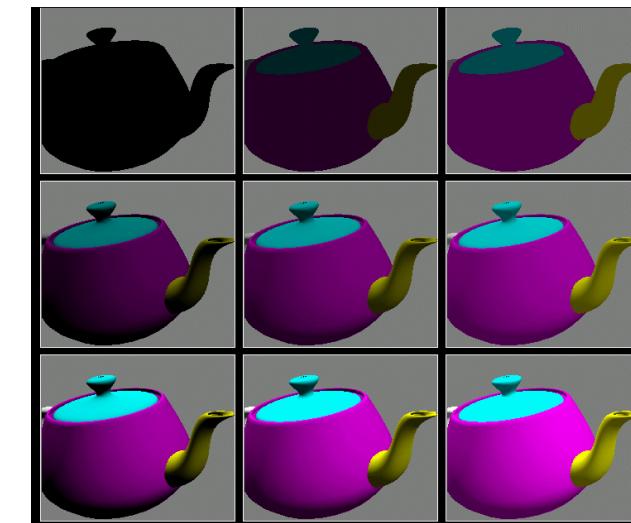


Subsección 2.3.

Componente pseudo-especular.

Material difuso + ambiental

Aquí k_{am} crece de izquierda a derecha, y k_{dl} de arriba abajo:



Componente pseudo-especular. Modelo de Phong

La componente **pseudo-especular** o componente de **Phong** modela como se refleja la luz en los objetos brillantes, en los cuales dichas zonas brillantes dependen de la posición del observador:

- La componente **sí depende** de la posición u orientación de la fuente de luz (es distinta según como esté orientada la fuente respecto de la superficie en \mathbf{p}),
- **también depende** de la dirección en la que miramos \mathbf{p} (el punto \mathbf{p} se ve de un color diferente según la dirección en la que lo veamos).

La expresión ideada en 1973 por *Bui Tuong Phong* (*Bùi Tường Phong*), y conocida como **modelo de Phong** es esta:

$$f_{\text{ph}}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{l}_i) = k_{\text{ph}}(\mathbf{p}) d_i [\max(0, \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{v})]^e , \quad (6)$$

donde $k_{\text{ph}}(\mathbf{p})$ es un valor real entre 0 y 1, representa la fracción de luz reflejada de forma pseudo-especular.

Parámetros y valor del modelo de Phong

En la expresión anterior:

$r_i \equiv$ vector reflejado:

depende tanto de l_i como de n_p , y está en el plano formado por ambos, con n_p como bisectriz de ellos, se obtiene como:

$$r_i = 2(l_i \cdot n_p)n_p - l_i$$

el vector r_i indica la dirección desde p en la cual la i -ésima fuente de luz produce el máximo brillo.

$e \equiv$ exponente de brillo:

un valor real positivo que permite variar el tamaño de las zonas brillantes (a mayor valor, menor tamaño y más pulida o especular).

$d_i \equiv$ indicador de orientación:

vale 1 si $n_p \cdot l_i > 0$ (fuente de cara a la superficie), y 0 en otro caso (de espaldas).

Comp. pseudo-especular: modelo de Blinn-Phong

Una alternativa al modelo anterior consiste en usar el vector *halfway* h_i (bisectriz de l_i y v , normalizado).

- El modelo resultante se llama **modelo de Blinn-Phong** ya que esta modificación fue propuesta en 1977 por James F. Blinn.
- Ahora el brillo es proporcional al coseno del ángulo γ entre h_i y n_p (máximo cuando coinciden).

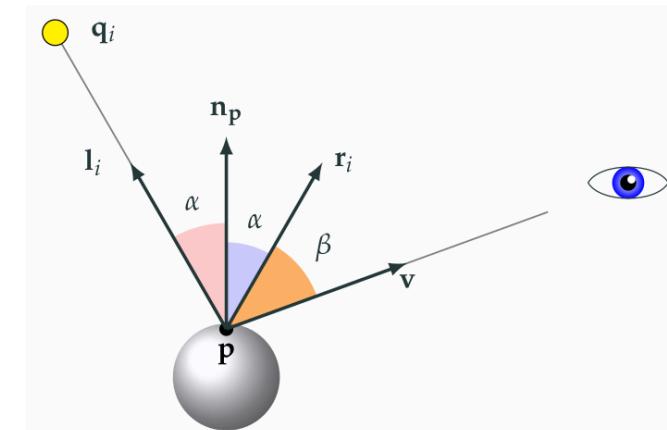
La expresión del Modelo de Blinn-Phong es la siguiente:

$$f_{bp}(p, v, l_i) = k_{bp}(p) d_i [n_p \cdot h_i]^e \quad (7)$$

Esta variante es más comúnmente usada que el modelo de Phong anterior. El vector h además, se usa en otros modelo de iluminación más avanzados.

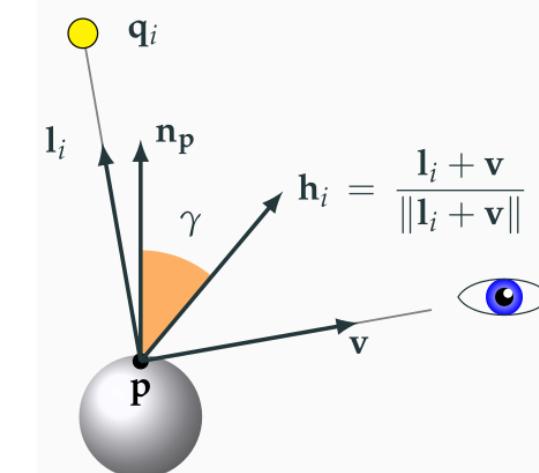
Vectores del modelo de Phong

El valor $r_i \cdot v$ es el coseno del ángulo β que hay entre la dirección de máximo brillo r_i y la dirección v hacia el observador. Cuando $r_i = v$ entonces $\beta = 0^\circ$, $\cos(\beta) = 1$, y el brillo es máximo:



Vectores de la componente de Blinn-Phong

El vector h_i es la bisectriz entre l_i y v , es decir, es el vector $l_i + v$, normalizado:



Ejemplo de material pseudo-especular

Aquí $k_a(\mathbf{p}) = 0$, $k_d(\mathbf{p}) = 0$, $k_s(\mathbf{p}) = 1$ y $e = 5.0$:



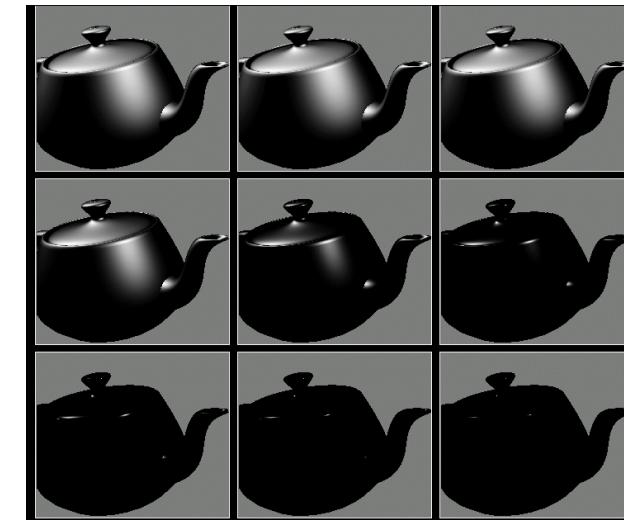
Ejemplo de material combinado

Combinación ambiental, más difusa, más pseudo especular:



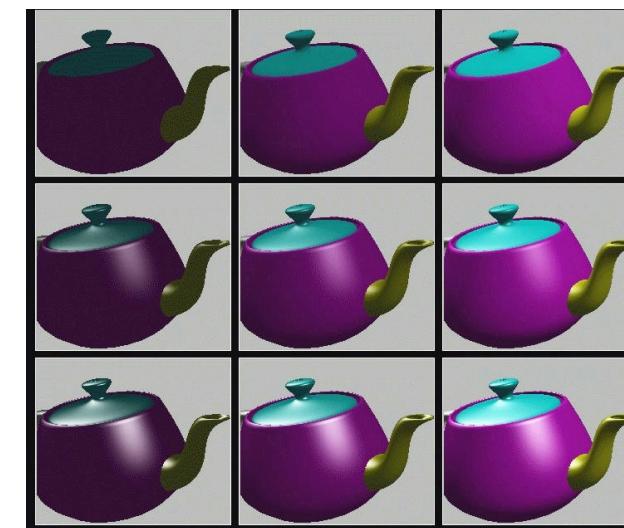
Efecto del exponente de brillo

Aquí el exponente e crece de izquierda a derecha y de arriba abajo:



Combinaciones material difuso + pseudo especular

Aquí k_d crece de izquierda a derecha y k_s de arriba abajo:



Modelos realistas

Aquí se describen otros modelos iluminación local, más realistas pero algo más costosos en tiempo. Se han diseñado teniendo en cuenta varios factores:

- Las **leyes físicas** que determinan como se produce la **reflexión y la refacción**.
- El comportamiento reflectivo de un **catálogo de materiales reales**, medido con dispositivos específicos y hecho público (MERL database)
- El uso de **parámetros intuitivos** adaptados a las necesidades expresivas de los diseñadores gráficos.

Destacamos estos modelos:

- Modelo de reflexión especular y refacción basado en las **Leyes de Fresnel**, para materiales dieléctricos.
- Modelo de reflexión difusa de **Burley**, como alternativa al modelo sencillo de Lambert.
- Modelo de reflexión en superficies de microfacetas, (modelo **GGX**), con la simplificación de **Schlick**, como alternativa al modelo de Phong o Blinn-Phong.

Sección 3.

Modelos realistas de iluminación. La BRDF.

1. Reflexión especular perfecta.
2. Reflexión especular y refracción simultáneas. Leyes de Fresnel.
3. Reflexión difusa. Modelos Lambertianos y de Burley.
4. Reflexión pseudo-especular. Modelos de microfacetas. GGX.
5. Combinaciones de BRDFs: suma ponderada y capas.

La Función Bidireccional de Distribución de la Reflectancia (BRDF)

En los modelos avanzados de iluminación local, la función de reflectividad f_r se define como una **BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)**.

- La BRDF es una función que relaciona la luz reflejada en un punto \dot{x} hacia una dirección de salida \mathbf{w}_o con la luz incidente desde una dirección \mathbf{w}_i .
- Por tanto, la BRDF depende únicamente de dos direcciones (y del punto \dot{x}).
- La BRDF se define como el cociente entre la radiancia reflejada L_r en la dirección \mathbf{w}_o y la irradiancia E incidente desde la dirección \mathbf{w}_i :

$$f_r(\dot{x}, \mathbf{w}_o, \mathbf{w}_i) = \frac{dL_r(\dot{x}, \mathbf{w}_o)}{dE(\dot{x}, \mathbf{w}_i)}$$

- La unidad de la BRDF es sr^{-1} (estereoradianes a la menos uno).
- La BRDF cumple el principio de conservación de la energía: **no puede haber más energía reflejada que la energía incidente**.

El marco de referencia local

Las expresiones de las BRDFs se suelen simplificar cuando se usan las coordenadas de los diversos vectores en el llamado **marco de referencia local** (ortonormal) asociado al punto \dot{x} , dicho marco:

- Está alineado con la normal $\mathbf{n}_{\dot{x}}$ a la superficie en \dot{x} , en concreto, el eje Z es paralelo a $\mathbf{n}_{\dot{x}}$.
- Los ejes X e Y son perpendiculares entre sí y perpendiculares a $\mathbf{n}_{\dot{x}}$. Es decir, son dos versores $\hat{\mathbf{t}}_x$ y $\hat{\mathbf{t}}_y$ **tangentes** a la superficie en \dot{x} . En principio es indiferente cuales sean esos dos ejes (siempre que sean perpendiculares entre ellos y a \mathbf{n}), pero en el caso de materiales **anisotrópicos** la orientación es relevante.
- Por tanto, consideraremos que \mathbf{w}_i , \mathbf{w}_o (y otros vectores que aparecerán), son en realidad tuplas de coordenadas relativas a este marco.

Reflexión especular perfecta

La reflexión especular perfecta es la que ocurre en los espejos o superficies metálicas pulidas perfectamente.



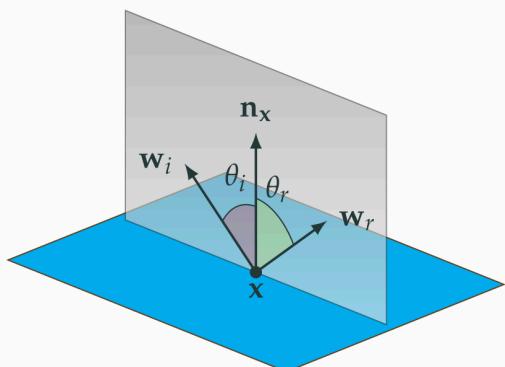
Imagen de la izquierda obtenida de: www.sphere-ball.com (Perfect mirror sphere)

Subsección 3.1.

Reflexión especular perfecta.

Vectores en la reflexión especular perfecta

En las superficies **especulares perfectas** (como un espejo) radiancia reflejada en un punto \dot{x} hacia una dirección cualquiera \mathbf{w}_r , se debe únicamente a la radiancia indicante sobre \dot{x} desde la dirección simétrica \mathbf{w}_i :



$$\frac{\mathbf{w}_i + \mathbf{w}_r}{\|\mathbf{w}_i + \mathbf{w}_r\|} = \mathbf{n}_{\dot{x}}$$

$$\cos \theta_i = \mathbf{w}_i \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}}$$

$$\cos \theta_r = \mathbf{w}_r \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}}$$

El ángulo de reflexión (θ_r), coincide con el de incidencia (θ_i) y el vector \mathbf{w}_i se encuentra en el plano definido por \mathbf{w}_r y $\mathbf{n}_{\dot{x}}$

Reflexión especular perfecta

La radiancia reflejada de forma especular perfecta no puede expresarse en términos de una expresión para la BRDF (tendría valores de densidad infinitos), así que se expresa directamente L_r en una dirección de salida \mathbf{w}_r en términos de L_{in} en la dirección simétrica \mathbf{w}_i , es decir:

$$L_r(\dot{x}, \mathbf{w}_r) = k_{ps}(\dot{x}) L_i(\mathbf{w}_i, \dot{x})$$

- El vector \mathbf{w}_i se calcula a partir de $\mathbf{n}_{\dot{x}}$ y \mathbf{w}_r :

$$\mathbf{w}_i = 2(\mathbf{w}_r \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}})\mathbf{n}_{\dot{x}} - \mathbf{w}_r$$

- El valor $k_{ps}(\dot{x})$ estará entre 0 y 1, es la fracción de luz reflejada de esta forma. Si vale 0 no hay este tipo de reflexión, si vale 1 toda la reflexión es de esta forma.

Reflexión y refracción en medios dieléctricos

En el interfaz entre un medio dieléctrico (líquidos o cristales, por ejemplo) y otro (p.ej. el vacío) se produce a la vez **reflexión especular perfecta** y **refracción**. Aquí vemos la refracción en una bola de cristal sólida.



Subsección 3.2.

Reflexión especular y refracción simultáneas. Leyes de Fresnel.

3. Modelos realistas de iluminación. La BRDF.
3.2. Reflexión especular y refracción simultáneas. Leyes de Fresnel..

Reflexión y refracción en función del ángulo

En muchos casos, la reflexión y la refracción se presentan simultáneamente.

Cuando el **ángulo de incidencia** es grande (casi paralelo a la superficie) **predomina la reflexión**.

Si el ángulo es pequeño (perpendicularmente a la superficie), **predomina la refracción**:

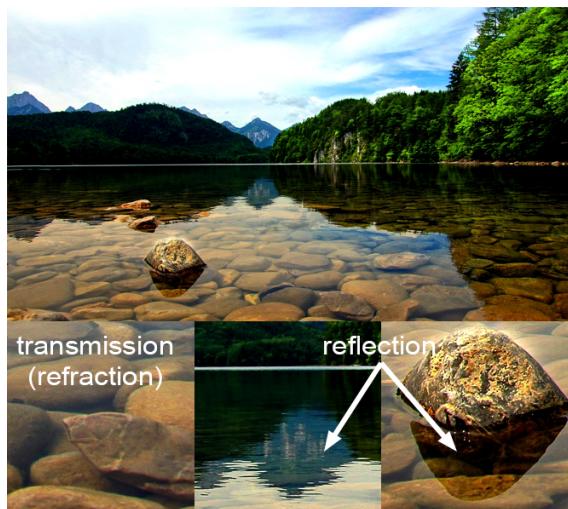


Imagen de: www.scratchapixel.com (Shading: Fresnel reflection and refraction.)

Imágenes: www.scratchapixel.com : reflection and refraction

Sesión 7: Modelos de iluminación

Created 2025-12-01

Page 58 / 103.

3. Modelos realistas de iluminación. La BRDF.
3.2. Reflexión especular y refracción simultáneas. Leyes de Fresnel..

Refracción y ancho del haz

La refracción se debe a la distinta velocidad de propagación (*velocidad de fase*) de la luz en los distintos medios.

- Los **índices de refracción** n_i y n_t son valores inversamente proporcionales a dicha velocidad en el medio de incidencia y en el medio de refracción.
- La sección del haz de luz cambia al refractarse (y por tanto cambia la radiancia).

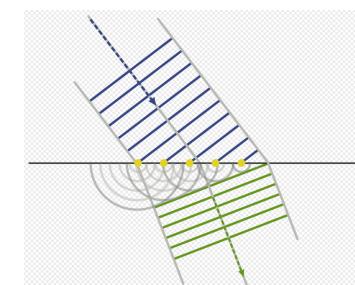


Imagen: [Anne Nordman \(wikipedia: Huygens-Fresnel principle\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Huygens-Fresnel_principle)

Haz reflejado y haz refractado

La energía total del haz reflejado más el refractado coincide con la del haz incidente (se conserva la energía). Aquí vemos un haz que sufre refracción y reflexión dos veces en el interfaz entre un cristal y el aire:

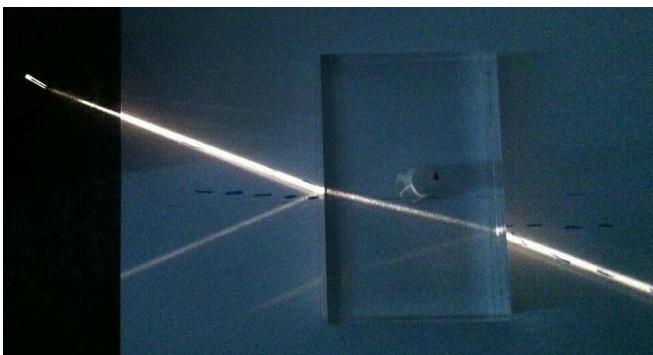


Imagen de [Physics Stack exchange](#)

Radiancia reflejada y refractada

La radiancia del haz reflejado (L_r) y la del haz refractado (L_t) son proporcionales a la radiancia incidente (L_i):

$$L_r(\dot{x}, \mathbf{w}_r) = F_R(\theta_i) L_i(\mathbf{w}_i, \dot{x})$$

$$L_t(\dot{x}, \mathbf{w}_t) = \left(\frac{n_t}{n_i}\right)^2 F_T(\theta_i) L_i(\mathbf{w}_i, \dot{x})$$

donde:

- La función F_R representa la fracción de luz reflejada, y F_T la refractada. Ambas funciones **suman la unidad**, y dependen de θ_i según las **Leyes de Fresnel**

$$F_R(\theta_i) + F_T(\theta_i) = 1$$

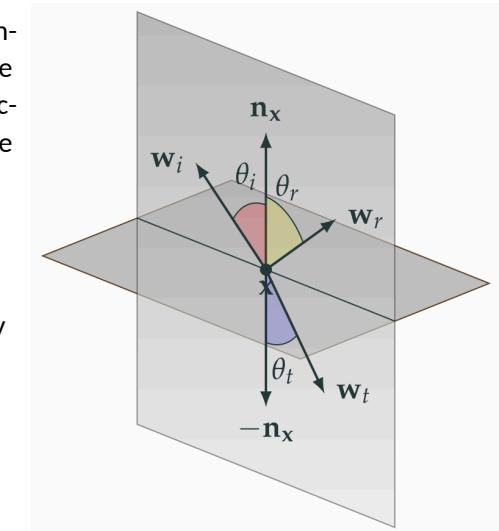
- El factor $(n_t/n_i)^2$ aparece por el cambio de ancho del haz.
- Los vectores \mathbf{w}_r y \mathbf{w}_t se calculan a partir de \mathbf{w}_i , $\mathbf{n}_{\dot{x}}$, n_i y n_t

Parámetros relevantes.

Por cada unidad de radiancia incidente desde \mathbf{w}_i (incidente en \dot{x}), parte se refleja de forma especular perfecta hacia la dirección \mathbf{w}_r y parte se refracta hacia \mathbf{w}_t :

- Se cumple $\theta_i = \theta_r$
- Sin embargo $\theta_i \neq \theta_t$
- El ángulo θ_t depende de θ_i , n_i y n_t .
- Definimos:

$$\begin{aligned} c_i &= \cos \theta_i = \mathbf{n}_{\dot{x}} \cdot \mathbf{w}_i \\ c_t &= \cos \theta_t = -\mathbf{n}_{\dot{x}} \cdot \mathbf{w}_t \end{aligned}$$



Cálculo de los vectores reflejado y refractado. Ley de Snell.

El vector \mathbf{w}_r se calcula a partir de \mathbf{w}_i y $\mathbf{n}_{\dot{x}}$ (como en reflex. especular perfecta):

$$\mathbf{w}_r = 2(\mathbf{n}_{\dot{x}} \cdot \mathbf{w}_i)\mathbf{n}_{\dot{x}} - \mathbf{w}_i$$

El vector refractado \mathbf{w}_t tiene longitud unidad, y

- se determina por la **Ley de Snell**: $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$,
- la cual permite calcular \mathbf{w}_t así:

$$\mathbf{w}_t = (rc_i - c_t)\mathbf{n}_{\dot{x}} - r\mathbf{w}_i \quad \begin{cases} c_i = \mathbf{n}_{\dot{x}} \cdot \mathbf{w}_i \quad (= \cos \theta_i) \\ c_t = \sqrt{1 - r^2(1 - c_i^2)} \quad (= \cos \theta_t) \\ r = n_i/n_t \end{cases}$$

- si $1 - r^2(1 - c_i^2) < 0$, entonces el valor c_t no está definido y ocurre **reflexión interna total** (no hay refracción, toda la radiancia se refleja).

Ver: [Univ. Stanford Course CS-148 notes](#)

Coefficientes de reflexión y refracción. La leyes de Fresnel

El **coeficiente de reflexión** F_R (fracción de energía reflejada) depende del ángulo de incidencia θ_i , según las **leyes de Fresnel**.

Para luz *no polarizada* es:

$$F_R(\theta_i) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_i c_i - n_t c_t}{n_i c_i + n_t c_t} \right)^2 + \left(\frac{n_i c_t - n_t c_i}{n_i c_t + n_t c_i} \right)^2 \right]$$

La **aproximación de Schlick** para F_R es más sencilla de calcular:

$$F_R(\theta_i) \approx f_0 + (1 - f_0)(1 - c_i)^5 \quad \text{donde: } f_0 = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2$$

El **coeficiente de transmisión** F_T (fracción de energía refractada) se obtiene teniendo en cuenta el principio de conservación de energía:

$$F_T(\theta_i) = 1 - F_R(\theta_i)$$

La BRDF difusa

La BRDF difusa produce un aspecto mate, ya que la radiancia se refleja con igual intensidad en todas las direcciones desde cada punto:



[Unreal Engine: update lighting in templates](#) (izq.) [The Citizenry: Terracotta clay vases](#) (dcha.).

Subsección 3.3.

Reflexión difusa. Modelos Lambertianos y de Burley.

Expresión de la BRDF difusa Lambertiana

La expresión que define a BRDF difusa de *Lambert* es la siguiente:

$$f_{dl}(\dot{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o) = \frac{1}{\pi} k_d(\dot{x}) \quad (8)$$

- Similar al ya visto, pero normalizado para la conservación de la energía.
- $k_{dl}(x)$ es un valor cualquiera entre 0 y 1, que indica la fracción de radiancia reflejada de forma difusa en \dot{x} (es el *albedo*).
- f_{dl} es **independiente de \mathbf{w}_o** : un punto se ve igual de brillante desde cualquier dirección

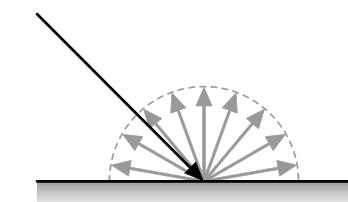


Imagen de Von Haarbeg [Illustration of a diffuse BRDF \(wikipedia, CCO\)](#)

La componente difusa del modelo de Burley

El modelo de Lambert no se ajusta bien al comportamiento reflectivo real de los materiales difusos. Otros modelos intentan ser más realistas, se usa mucho el modelo propuesto por **Burley**, empleado de Disney, en 2012. La expresión es:

$$f_{bu}(\dot{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o) = \frac{k_{bu}(\dot{x})}{\pi} [1 + (f_{90} - 1)(1 - \mathbf{n}_{\dot{x}} \cdot \mathbf{w}_i)^5] [1 + (f_{90} - 1)(1 - \mathbf{n}_{\dot{x}} \cdot \mathbf{w}_o)^5]^9$$

Donde:

- El valor f_{90} se define como sigue:

$$f_{90} \equiv \frac{1}{2} + 2\alpha(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{h})^2 \quad \text{donde: } \mathbf{h} = \frac{\mathbf{w}_i + \mathbf{w}_o}{\|\mathbf{w}_i + \mathbf{w}_o\|}$$

- El valor k_{bu} está entre 0 y 1, como es habitual.
- El parámetro α es un real entre 0 y 1 que determina la **rugosidad (roughness)** del material. A mayores valores, más difuso es el material.

Voir: [Physically-Based Shading at Disney](#)

Sesión 7: Modelos de iluminación

Created 2025-12-01

Page 69 / 103.

3. Modelos realistas de iluminación. La BRDF..

3.4. Reflexión pseudo-especular. Modelos de microfacetas. GGX..

Modelos de BRDF basados en microfacetas

Los modelos más realistas y usados en la actualidad se basan en suponer que la superficie está formada (a pequeña escala) por **microfacetas (microfacets)** orientadas aleatoriamente, formando una *microsuperficie* \mathcal{M} , rugosa, cercana a la superficie \mathcal{G} (no rugosa):

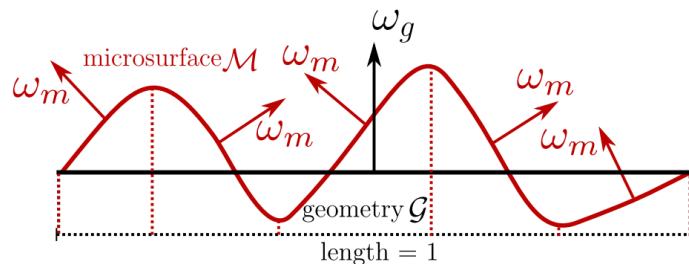


Imagen de: Eric Heitz JCGT (2014): *Understanding the Masking-Shading Function in Microfacet-Based BRDFs* <http://jcgtrg.org/published/0003/02/03/>

Subsección 3.4.

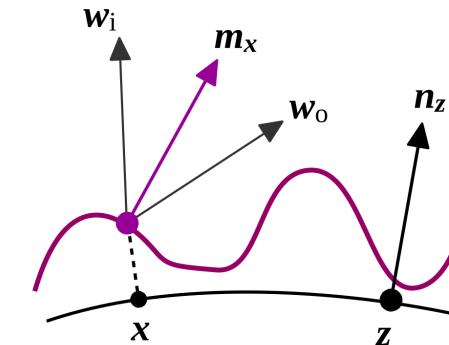
Reflexión pseudo-especular. Modelos de microfacetas. GGX..

3. Modelos realistas de iluminación. La BRDF..

3.4. Reflexión pseudo-especular. Modelos de microfacetas. GGX..

Reflexión especular en microfacetas. Normales.

Se asume que la reflexión en cada microfaceta ocurre de forma especular perfecta según las Leyes de Fresnel que hemos visto antes:



Para cada punto \dot{x} de la superficie, la normal a la superficie es $\mathbf{n}_{\dot{x}}$ (igual que antes), pero la normal de la microsuperficie es $\mathbf{m}_{\dot{x}}$. La reflexión especular entre \mathbf{w}_i y \mathbf{w}_o en \dot{x} solo ocurre si $\mathbf{m}_{\dot{x}}$ es la bisectriz de \mathbf{w}_i y \mathbf{w}_o (el caso de la figura).

Microfacetas: la distribución de normales D

La reflexión depende de las frecuencias relativas de las posibles orientaciones de la microsuperficie, es decir, de como se distribuyan sus normales:

- Las normales de la microsuperficie se distribuyen aleatoriamente según una función de distribución D (definida para cualquier versor normal \mathbf{m} en la semiesfera Ω^+).
- La función D depende de dos parámetros reales α_x y α_y , (ambos reales, > 0) que expresan la **rugosidad** de la superficie en las dos direcciones tangentes \mathbf{t}_x y \mathbf{t}_y , perpendiculares a la **normal a la macrosuperficie**, que es la normal en \dot{x} , es decir $\mathbf{n}_{\dot{x}}$.
- Para cualquier vector \mathbf{m} , la evaluación de $D(\mathbf{m})$ se hace teniendo en cuenta que el marco definido por \mathbf{t}_x , \mathbf{t}_y y $\mathbf{n}_{\dot{x}}$ es ortonormal (son tres vectores de longitud unidad y perpendiculares entre si)

La expresión de D

Para una normal a la microsuperficie \mathbf{m} cualquiera en un punto \dot{x} , podemos calcular $D(\mathbf{m})$:

- El vector \mathbf{m} es cualquier vector unitario, tal que $\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}} \geq 0$ (está en la semiesfera superior definida por $\mathbf{n}_{\dot{x}}$, si no es el caso $D(\mathbf{m}) = 0$).
- La expresión de D para la **GGX anisotrópica** es:

$$D(\mathbf{m}) = \frac{1}{\pi \alpha_x \alpha_y \left(\left(\frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{t}_x}{\alpha_x} \right)^2 + \left(\frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{t}_y}{\alpha_y} \right)^2 + (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}})^2 \right)^2}$$

- En el caso de la **GGX isotrópica**, se particulariza para $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$, simplificando la anterior expresión, obtenemos esta:

$$D(\mathbf{m}) = \frac{\alpha^2}{\pi \left((\mathbf{m} \cdot \mathbf{t}_x)^2 + (\mathbf{m} \cdot \mathbf{t}_y)^2 + (\alpha \mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}})^2 \right)^2}$$

La distribución de normales D

Para un dirección de entrada \mathbf{w}_i y otra de salida \mathbf{w}_o , la BRDF

- Es proporcional a la densidad de facetas orientadas en la dirección \mathbf{w}_h , que es la bisectriz entre \mathbf{w}_i y \mathbf{w}_o , es decir, es proporcional al valor $D(\mathbf{w}_h)$, donde:

$$\mathbf{w}_h = \frac{\mathbf{w}_i + \mathbf{w}_o}{\|\mathbf{w}_i + \mathbf{w}_o\|}$$

- Depende de las rugosidades α_x e α_y , que son las rugosidades en las direcciones tangenciales \mathbf{t}_x y \mathbf{t}_y , y hay dos tipos de distribuciones:
 - ▶ **GGX anisotrópica:** cuando $\alpha_x \neq \alpha_y$, la apariencia de la superficie depende de su orientación, es decir depende como se rote la superficie alrededor de la normal a la macrosuperficie $\mathbf{n}_{\dot{x}}$)
 - ▶ **GGX isotrópica:** cuando $\alpha_x = \alpha_y$, la apariencia de la superficie no depende de su orientación (rotación alrededor de \mathbf{n}).

Sombras y enmascaramiento

Parte de las microfacetas no son visibles desde \mathbf{w}_o (**enmascaramiento, masking**) o no lo son desde \mathbf{w}_i (**sombras arrojadas, shadowing**). Esto reduce la cantidad de luz reflejada desde \mathbf{w}_i hacia \mathbf{w}_o en una microfase perpendicular a \mathbf{m} :

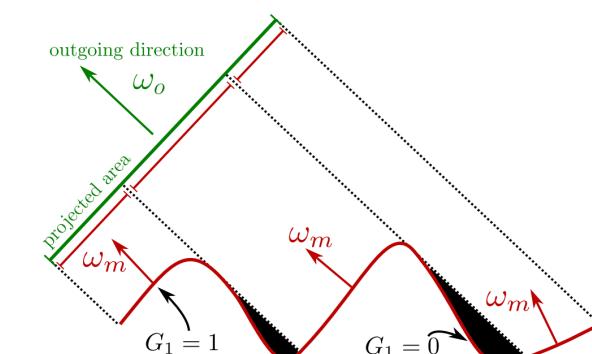


Imagen de: Eric Heitz JCGT (2014): Understanding the Masking-Shading Function in Microfacet-Based BRDFs <http://jcg.org/published/0003/02/03/>

Sombras arrojadas y enmascaramiento

Para modelar las sombras/enmascaramiento se pueden usar diversas variantes, una realista y rápida de evaluar es la función G_2 llamada *height correlated masking and shadowing*, propuesta por E. Heitz en 2014, y definida así:

$$G_2(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o, \mathbf{m}) = \frac{\chi^+(\mathbf{w}_o \cdot \mathbf{m}) \chi^+(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{m})}{1 + \Lambda(\mathbf{w}_i) + \Lambda(\mathbf{w}_o)}$$

donde la función Λ se define, para cualquier versor \mathbf{w} , como:

$$\Lambda(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{\alpha_x^2 x^2 + \alpha_y^2 y^2}{z^2}} \right)$$

donde (x, y, z) son las coordenadas de \mathbf{w} , y donde

$$\chi^+(a) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq a \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La BRDF GGX

Teniendo en cuenta todos los factores, la BRDF f_r en un punto \dot{x} con normal (a la macrosuperficie) $\mathbf{n}_{\dot{x}}$ se puede expresar como aparece aquí:

$$f_{\text{ggx}}(\dot{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o) = \frac{F_R(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_h) D(\mathbf{w}_h) G_2(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o, \mathbf{w}_h)}{4(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}})(\mathbf{w}_o \cdot \mathbf{n}_{\dot{x}})} \quad (10)$$

- Una variante de esta expresión fue introducida por primera vez por K.E. Torrance y E.M. Sparrow en 1967.
- Esta expresión es la que aparece en el artículo de B.Walter y otros (2007)
- Existen varias opciones para las funciones D y G , en la actualidad se usan las funciones D y $G = G_2$ que ya se han explicado, con estas funciones la BRDF se denomina **BRDF GGX**.

Artículos en PDF:

[Torrance y Sparrow, 1967, Theory for off-specular reflection from roughened surfaces](#)
[Walter et al., 2007, Microfacet Models for Refraction](#)

Factor de Fresnel con la aproximación de Schlick

Puesto que esta BRDF consiste en reflexión especular en las microfacetas (ignorando la componente de transmisión), es necesario tener en cuenta el factor de reflexión Fresnel que ya se ha descrito (F_R)

- El ángulo de incidencia de la reflexión (θ_i) es el ángulo entre los vectores \mathbf{w}_i y \mathbf{w}_h . Así que el término $F_R(\theta_i)$ se puede expresar como $F_R(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_h)$.
- Hay que tener en cuenta los índices de refracción del medio de incidencia (usualmente el aire), y el medio de refracción (el material de la superficie), son n_i y n_t , respectivamente.
- Se suele usar la aproximación de Schlick, es decir, se suele usar este factor:

$$F_R(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_h) \approx f_0 + (1 - f_0)(1 - (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{w}_h))^5 \quad \text{donde: } f_0 = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2$$

Los parámetros de rugosidad

Los parámetros α_x y α_y expresan la rugosidad de la superficie:

- Cuando los valores son distintos, la BRDF es una BRDF **anisotrópica**. Se corresponde con materiales que están pulidos en una dirección.
- Lo más frecuente es que ambos valores coincidan (hablamos del valor α simplemente), entonces la BRDF es **isotrópica** (no hay una dirección preferida)
- Los valores de rugosidad α_x , α_y (o simplemente α) no pueden ser nulos, pero cuando decrecen hacia cero, la BRDF GGX se aproxima la BRDF de la reflexión especular perfecta.
- Cuando los valores de rugosidad crecen, la superficie es cada vez más rugosa (no es un espejo perfecto).

Ejemplo de rugosidad decreciente

En esta figura la rugosidad decrece de izquierda a derecha hasta llegar a casi el valor nulo. Menores valores de rugosidad significan menos variación en la dispersión de la luz reflejada (para una dirección indicente fija).

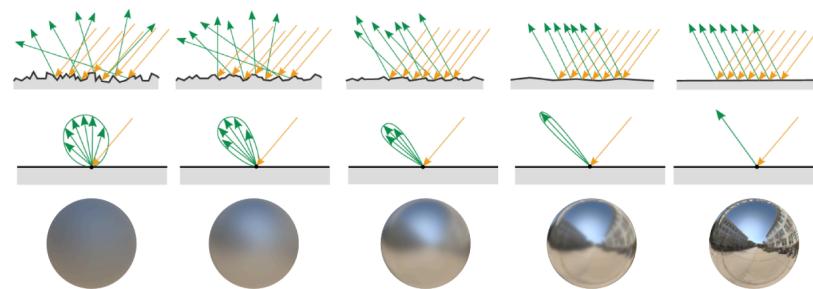


Imagen de: [S. Lagarde y C. de Rusiers, SIGGRAPH 2014 Course Notes](#)

Ejemplo de imagen con materiales anisotrópicos

En estas imágenes sintetizadas vemos el efecto de usar diversos pares de valores de α_x y α_y en los cuales $\alpha_x \neq \alpha_y$ (son materiales *anisotrópicos*)



Imagen de: [Physically Based Rendering in Filament](#)

Combinaciones de BRDFs

En una misma superficie se pueden combinar dos o más BRDFs, básicamente de dos formas:

- Mediante una suma ponderada de dos o más BRDFs, por ejemplo, se puede combinar una BRDF difusa lambertiana con peso a y una BRDF especular GGX, con peso $1 - a$ (con $a \in [0, 1]$)

$$f_r(\dot{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o) = a f_{\text{bu}}(\dot{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o) + (1 - a) f_{\text{ggx}}(\dot{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_o)$$

donde f_{bu} es la BRDF difusa de Burley de la expresión (9), en la transparencia 69), y f_{ggx} es la BRDF GGX definida por la expresión (10) en la transparencia 79).

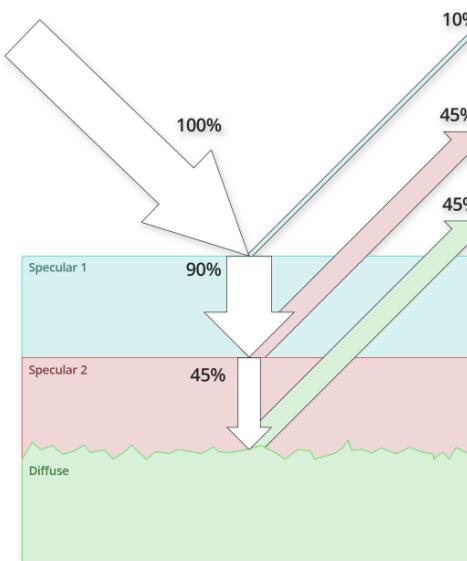
- Mediante capas: una capa superior con una BRDF (p.ej. GGX) y una capa inferior con otra BRDF (p.ej. difusa). La luz incidente atraviesa la capa superior, llega a la capa inferior, se refleja allí y vuelve a atravesar la capa superior. Este modelo es más costoso de evaluar, pero puede ser más realista.

Modelos multi-capas

La luz incidente sobre las capas transparentes superiores en parte se refleja hacia el medio de incidencia, y en parte se refracta (transmite) hacia la capa inmediatamente inferior.

En el sustrato difuso (blanco) se refleja el 100% de la luz incidente.

Imagen de Anders Langland, en:
[Physically Based Shading in Arnold](#)



Sección 4. Modelos de fuentes de luz.

Fuentes de luz realistas

En este documento ya se han descrito dos modelos sencillos de fuentes de luz (**fuentes puntuales** y **fuentes direccionales**), sin embargo en la actualidad los *engines* de render contemplan, además de esos, otros tipos de fuentes más realistas.

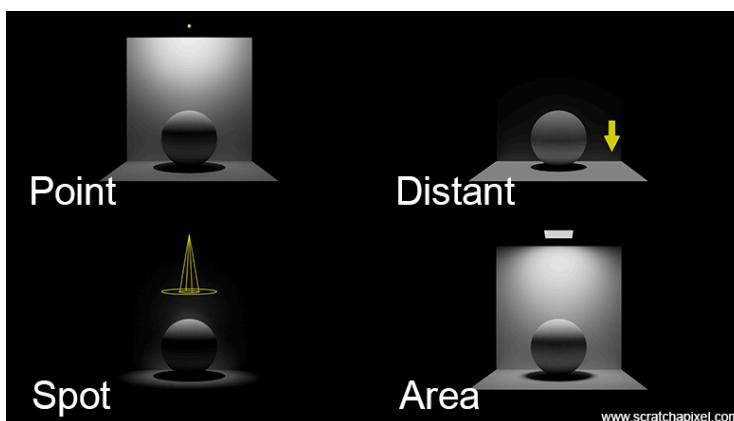


Imagen de Jean Colas Prunier en la web [Scratchapixel](#), página [introduction to lighting](#)

Tipos de fuentes de luz (1/2)

Aunque en la realidad hay muchísimos tipos de luminarias, los modelos más frecuentemente usado en los *engines* y aplicaciones gráficas interactivas son de alguno de estos tipos.

Los dos tipos que hemos visto ya son:

Fuente puntual (*point light*):

La radiancia se emite con la misma intensidad de luz en todas las direcciones desde un punto del espacio conocido. Si bien antes no se contempló, en la realidad esa intensidad decrece con el cuadrado de la distancia entre la fuente y el punto a iluminar.

Fuente direccional (*directional light* o *distant light*):

Se emite luz desde un punto muy lejano, con lo cual la iluminación solo depende de un vector de dirección fijo y conocido, el mismo para todos los puntos a iluminar.

Ejemplo de fuente puntual

Una fuente de luz puntual situada sobre la tetera.

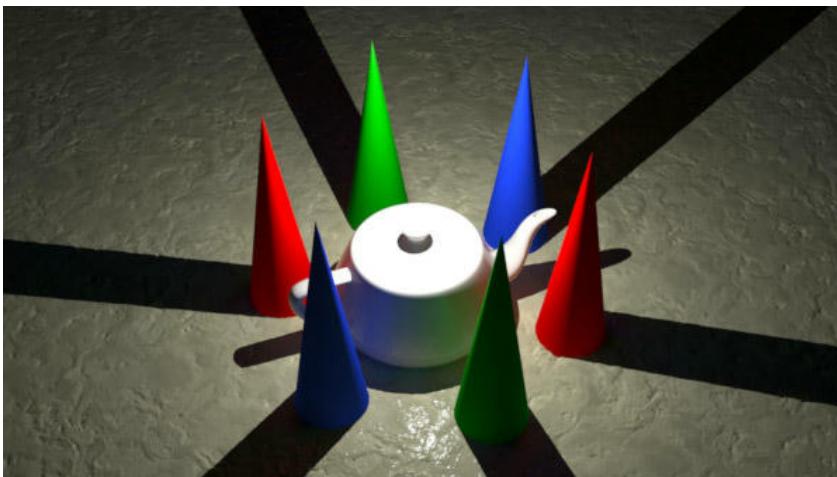


Imagen de [Manual de la aplicación Modo: Point Lights](#)

Tipos de fuentes de luz (2/2)

A los tipos anterior se le añaden otros tipos de luminarias:

Foco direccional (*spot light*):

Son un tipo de fuentes de luz puntuales, pero que no emiten la misma intensidad en todas las direcciones posibles.

Luz de área (*area light*):

En la realidad las luminarias siempre tienen cierto área, nunca emiten desde un punto, así que hay modelos que contemplan la emisión desde todos los puntos de una superficie (un rectángulo, un disco, una esfera, o en general una malla de polígonos).

Este tipo de luminarias son **mucho más realistas pero más complejas de simular que las anteriores**, y en principio no las vamos a tener en cuenta, aunque se usan mucho el los sistemas de rendering realista que simulan la *iluminación global*, y menos en los programas interactivos.

Ejemplo de fuente direccional

Una fuente de luz direccional, con la fuente en la dirección hacia arriba a la izquierda de la imagen. Estas fuentes se usan para simular la luz del sol.



Imagen de [Manual de la aplicación Modo: Directional light](#)

Imagen de [Manual de la aplicación Modo: Spot Lights](#)

Ejemplo de fuente de área

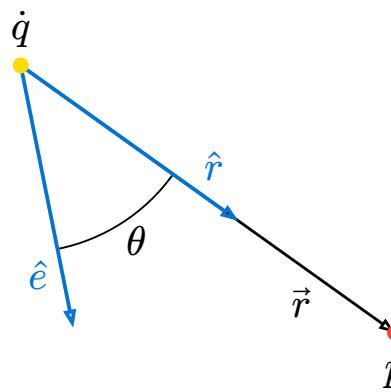
Una fuente de luz de área, en concreto un disco.



Imagen: *Physically Based Rendering: From Theory To Implementation* (3rd Ed.), Matt Pharr, Wenzel Jakob y Greg Humphreys. [Sección 12.5: Area Lights](#)

Parámetros de las fuentes puntuales y spot

En esta figura se aprecian los distintos vectores, distancias y ángulos.



$$\begin{aligned}\theta &= \arccos(\hat{r} \cdot \hat{e}) \\ \vec{r} &= \vec{p} - \vec{q} \\ r &= \|\vec{r}\| \\ \hat{r} &= \frac{\vec{r}}{r}\end{aligned}$$

Parámetros relacionados con las fuentes de luz puntuales

Si queremos calcular la iluminación en un punto \vec{p} iluminado por una fuente de luz puntual, en un punto \vec{q}

- El punto \vec{q} es la posición de la fuente de luz puntual.
- El vector que va desde \vec{q} hasta \vec{p} lo llamamos $\vec{r} \equiv \vec{p} - \vec{q}$.
- La distancia entre ambos puntos es $r \equiv \|\vec{r}\|$ (suponemos que $r > 0$).
- El vector normalizado desde la fuente hasta el punto \vec{p} es $\hat{r} \equiv \vec{r}/r$

En estas condiciones la intensidad de la luz reflejada en \vec{p} (debida la luz proveniente de \vec{q} e incidente sobre \vec{p}) será proporcional a:

- Una función $f(r)$ que indica como se atenúa la intensidad con la distancia, se cumple $f(r) \in [0...1]$.
- Una función $g(\hat{r})$ que depende de la dirección de salida \hat{r} .

Atenuación con la distancia

En la naturaleza la función f de la distancia es simplemente la inversa del cuadrado de la distancia $f(r) = 1/r^2$. Sin embargo, para aplicaciones interactivas a veces es conveniente usar otras expresiones:

- Usar tres constantes a , b y c y definir:

$$f(r) = \frac{1}{a + br + cr^2}$$

- Usar dos constantes d_0 y d_1 , con $d_0 < d_1$, y definir f de forma que vale 1 pero a partir de d_0 desciende suavemente hasta anularse a partir de d_1 , por ejemplo:

$$f(r) = \begin{cases} 1 & \text{si } r \leq d_0 \\ \left(1 - \frac{r - d_0}{d_1 - d_0}\right)^2 & \text{si } d_0 < r < d_1 \\ 0 & \text{si } d_1 \leq r \end{cases}$$

Luces de tipo Spot (dependencia de la dirección)

En una luz puntual por defecto la radiancia emitida es la misma para todas las direcciones de salida \hat{r} posibles, sin embargo, en una luz de tipo spot esa radiancia sí depende de la dirección \hat{r} .

- Las luces spot vienen caracterizadas por un vedor \hat{e} que es la dirección de máxima intensidad.
- Para una dirección de salida cualquiera \hat{r} , la radiancia, en general, será una función g decreciente con el ángulo θ entre \hat{r} y \hat{e} (donde $\theta = \arccos(\hat{r} \cdot \hat{e})$).
- Algunas opciones comunes:
 - ▶ Lóbulo coseno: $g(\theta) \equiv (\cos \theta)^n$, con $n \geq 1$.
 - ▶ Elegir dos ángulos θ_0 y θ_1 , con $0 < \theta_0 < \theta_1 < \pi/2$, y definir:

$$g(\theta) \equiv \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < \theta \leq \theta_0 \\ \left(1 - \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}\right)^2 & \text{si } \theta_0 < \theta < \theta_1 \\ 0 & \text{si } \theta_1 \leq \theta \end{cases}$$

Luces fotométricas

A veces se usan **luces fotométricas (photometric lights)**. Son un tipo de spot lights donde las funciones f y g se implementan de forma tabulada. Se usan para representar con fidelidad el comportamiento de **luminarias reales**.

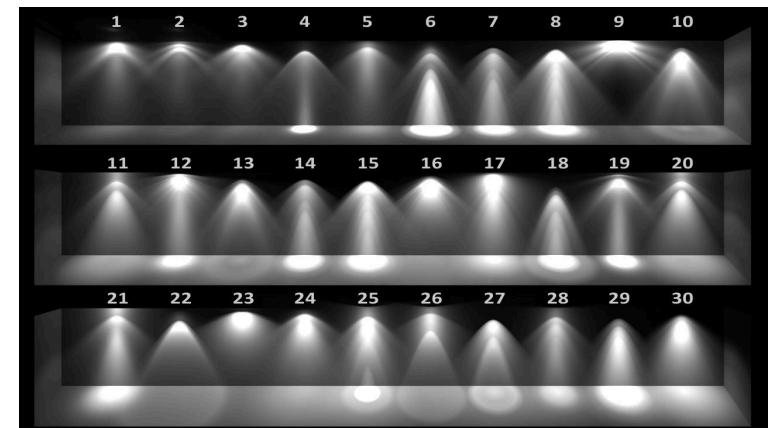


Imagen de [Manual de la aplicación Arnold de Autodesk: Photometric Lights](#)

Problemas: evaluación de la componente pseudo-especular del modelo de Phong

Problema 7.1:

Escribe el código GDScript de una función para calcular la reflectividad debida a la componente pseudo-especular del modelo de iluminación local de Phong, es decir, el valor real resultado de evaluar la expresión de f_{ph} que aparece en la ecuación (6) de la transparencia 40.

La función recibirá como parámetros los vectores unitarios \mathbf{n}_p , \mathbf{v} y \mathbf{l}_i , (todos de tipo **Vec3**), el exponente e y el valor escalar k_{ph} (ambos de tipo **float**). La función devolverá un valor de tipo **float**.

Escribe otra versión de la función, con los mismos parámetros, pero ahora para la componente pseudo-especular del modelo de Blinn-Phong, es decir, para evaluar la expresión de f_{bp} que aparece en la ecuación (7) de la transparencia 43.

Problemas: modelos de iluminación

Problema 7.2:

Suponemos que visualizamos una esfera de radio unidad centrada en el origen. Se ilumina con una fuente de luz puntual situada en el punto $p = (0, 2, 0)$. Consideramos únicamente la componente difusa del modelo de iluminación sencillo (es decir, usando únicamente la ecuación (5) de la transparencia 34). El observador está situado en $o = (2, 0, 0)$.

1. Describe razonadamente en qué punto de la superficie de la esfera el brillo será máximo ¿ es ese punto visible para el observador ?
2. Repite el razonamiento anterior asumiendo ahora que el material es puramente pseudo-especular, es decir, consideramos únicamente la ecuación (6) de la transparencia 40. Indica si dicho punto es visible para el observador.
3. Haz lo mismo para un material pseudo-especular, pero con el modelo de Blinn-Phong (ecuación (7) de la transparencia 43).

Problema: evaluación de la BRDF GGX

Problema 7.3:

Escribe el código GDScript de una función para calcular la reflectividad debida a la BRDF de microfacetas GGX, es decir, el color resultado de evaluar la expresión de f_{ggx} que aparece en la ecuación (10) de la transparencia 79.

La función recibirá como parámetros los vectores unitarios w_i, w_o, t_x, t_y y n_x , (todos de tipo **Vec3**), y los valores α_x y α_y (ambos de tipo **float**). La función devolverá un valor de tipo **float**.

Fin de transparencias.