Introducción Iluminación Global

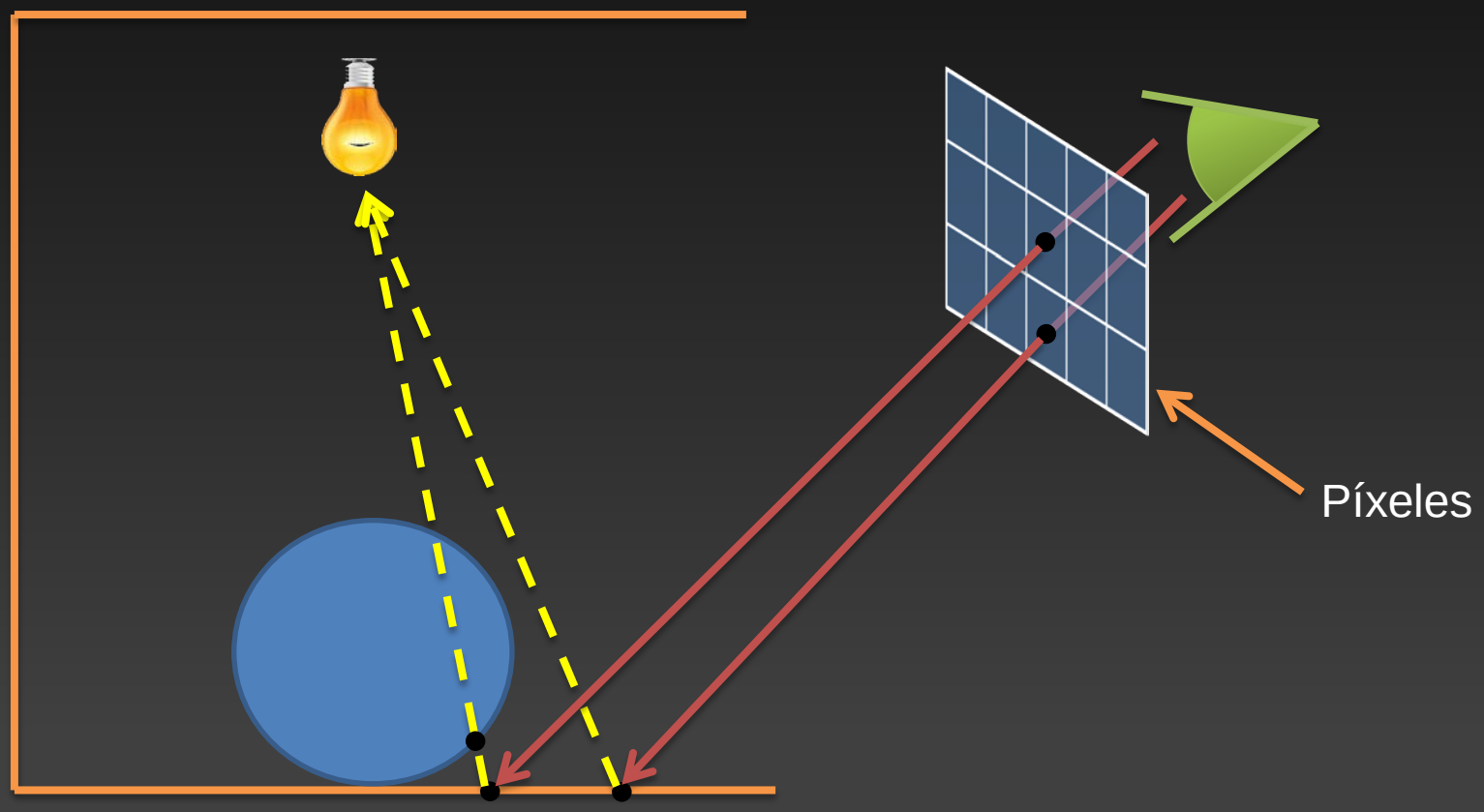
Presentado por Eduardo Roa

Realistic Image Synthesis

Realistic Image Synthesis es el proceso de crear una imagen hecha por computadora que sea indistinguible de una imagen real.

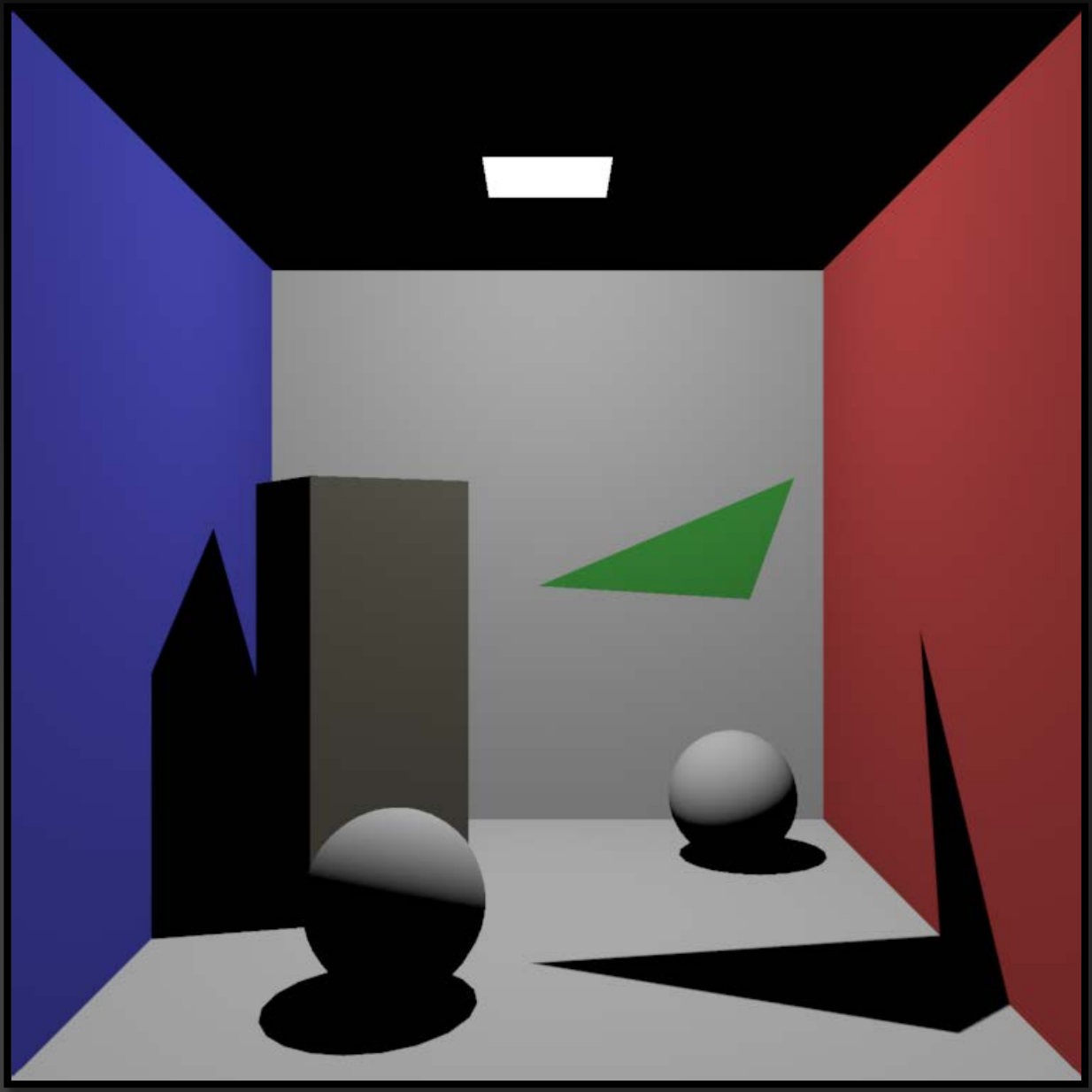
Al inicio de la computación gráfica, los algoritmos no simulaban la física de la luz. Es en 1980 (Raytracing) y en 1984 (Radiosity) cuando es empiezan a crear modelos basados en una simulación física.

Iluminación Directa

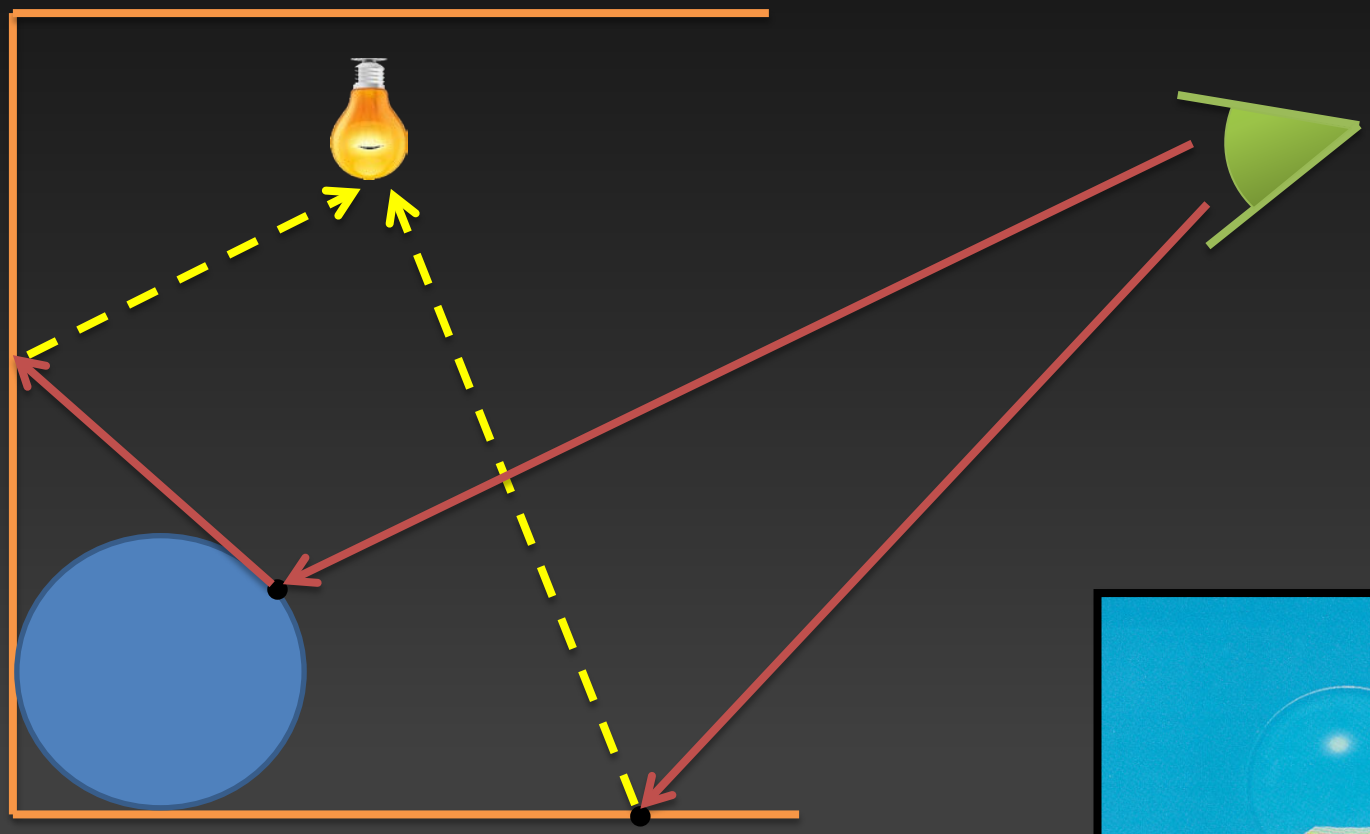


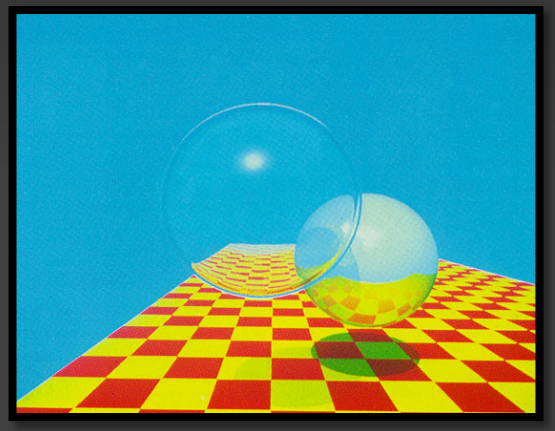
Para obtener el color de un pixel, se dispara un rayo (recta) desde la cámara hasta un punto de la escena (Ray Casting), desde ese punto se traza un rayo de sombra (Shadow Ray) y se procede a iluminar dicho punto.

Iluminación Directa



Iluminación Directa – Ray Tracing

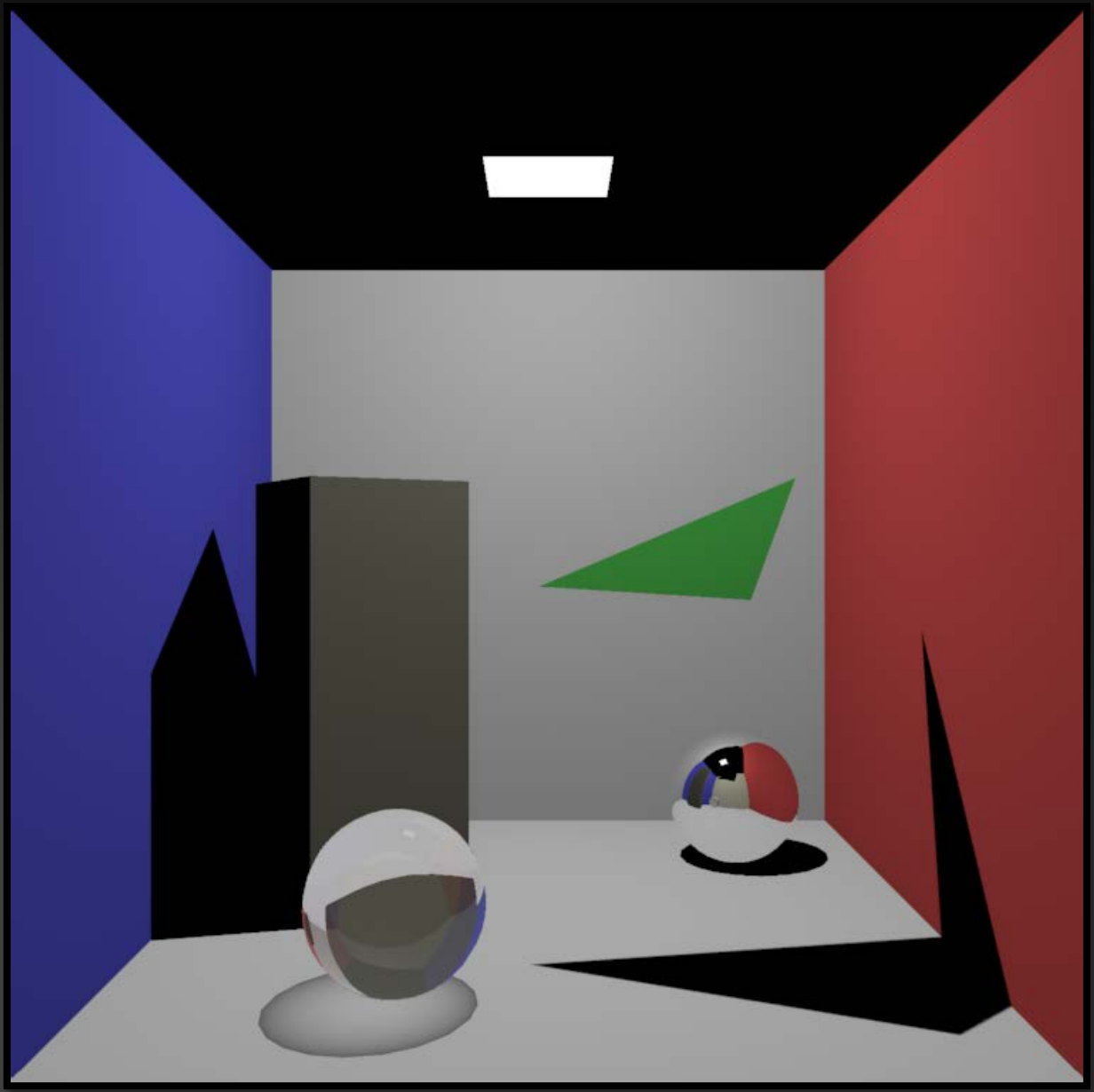




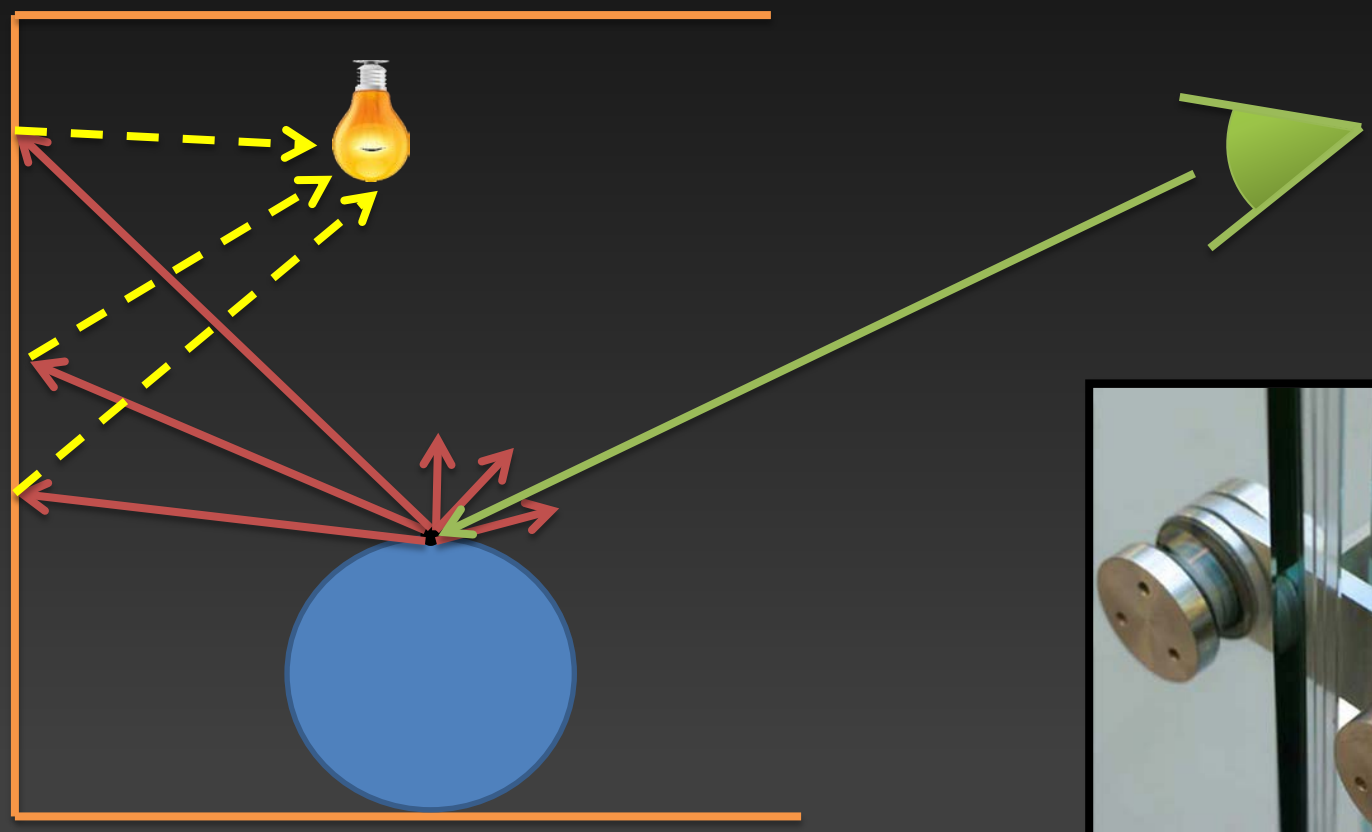
Turner Whitted 1979

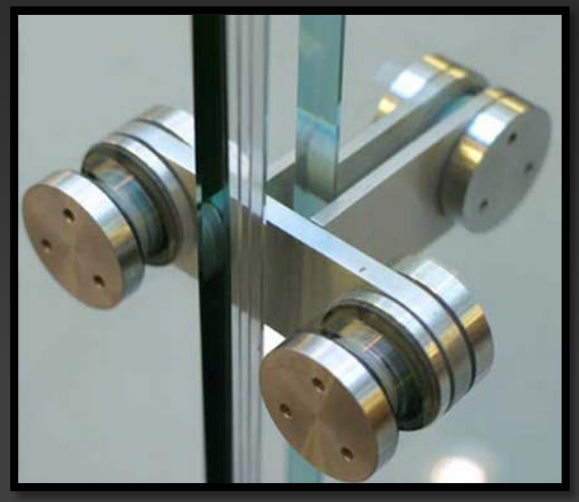
Con esta técnica se logran simular efectos como de reflexión y refracción.

Iluminación Directa – Ray Tracing



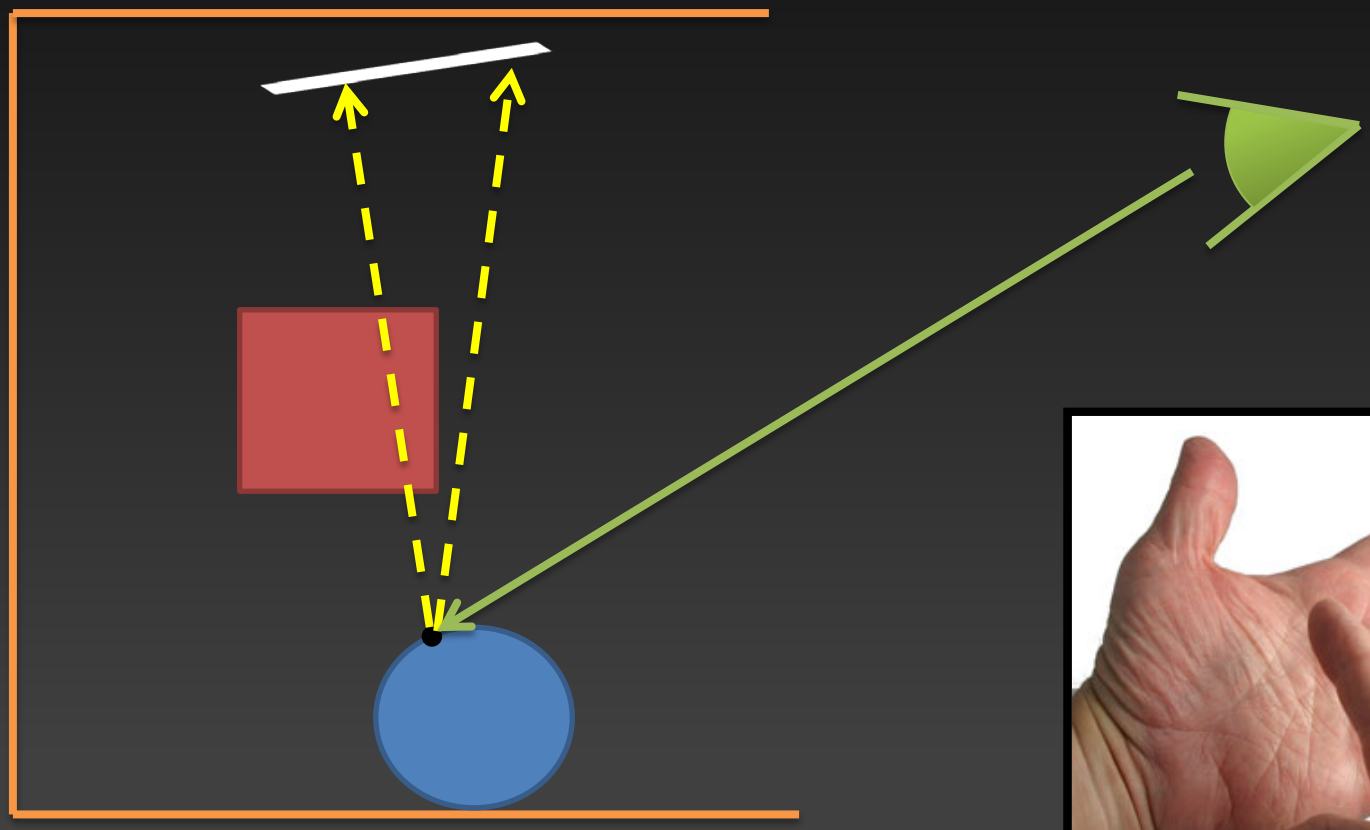
Iluminación Directa – Ray Tracing – Monte Carlo





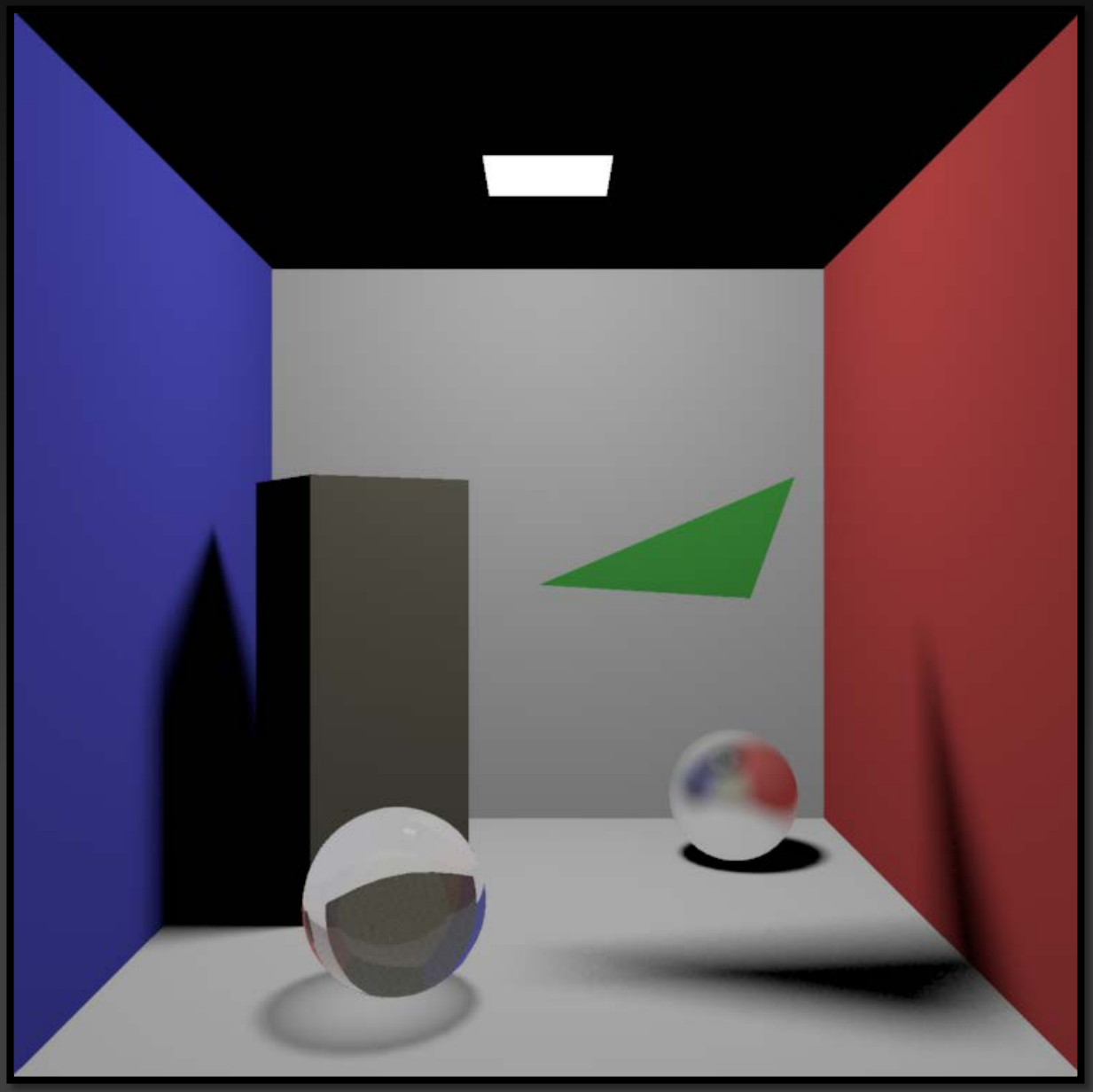
Si el rayo de la cámara intersecta una superficie especular o reflectiva, se generan N muestras o rayos para calcular la reflexión

Iluminación Directa – Ray Tracing – Monte Carlo

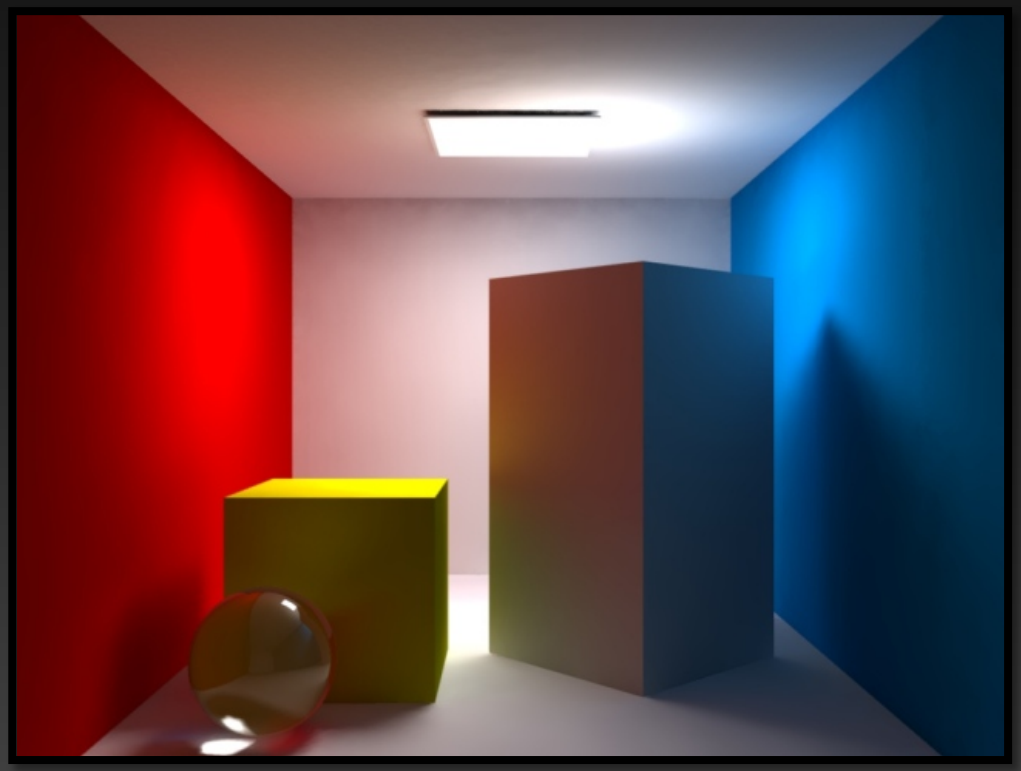


Similar sucede con los rayos de sombra, este permite crear sombras con umbra

Iluminación Directa – Ray Tracing – Monte Carlo



Iluminación Global



El objetivo de la iluminación global (GI) es simular toda la reflexión de la luz en una escena 3D (iluminación indirecta) y predecir en forma precisa la intensidad de la luz en un punto dado.

La entrada de datos que necesita un algoritmo GI es la geometría, los materiales (shaders) y todas las luces de la escena.

Los algoritmos de iluminación global se basan en dos técnicas:

- Muestreo de puntos(Ray Tracing)
- Elemento Finito (Radiosity)

Iluminación Global – Radiometría (Radiometry)

Radiometría

Conjunto de técnicas para medir la luz

- Energía (Photon) : Cantidad de fotones, Q (Joules)

- Poder: Energía por unidad de tiempo, Watts (Joules / sec)

$$\phi = \frac{dQ}{dT}$$

Radiant Flux

- Irradiance: Poder por unidad de área, E (W / m^2)

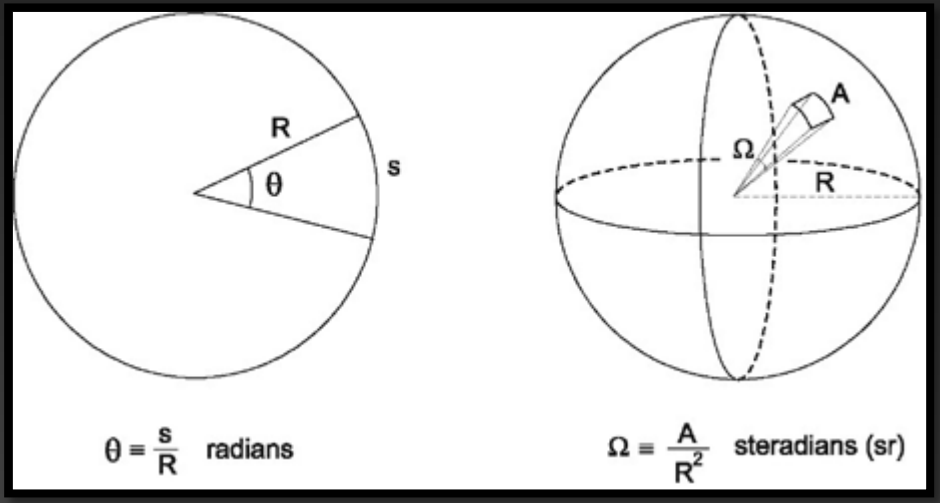
$$E = \frac{dP}{dA}$$

Medida muy importante GI

Iluminación Global – Solid Angle

Angulo Solido (Solid Angle) - MathWorld

The solid angle subtended by a surface is defined as the surface area of a unit sphere covered by the surface's projection onto the sphere.



$$\omega = \frac{A}{r^2}$$

También se le llama steradians

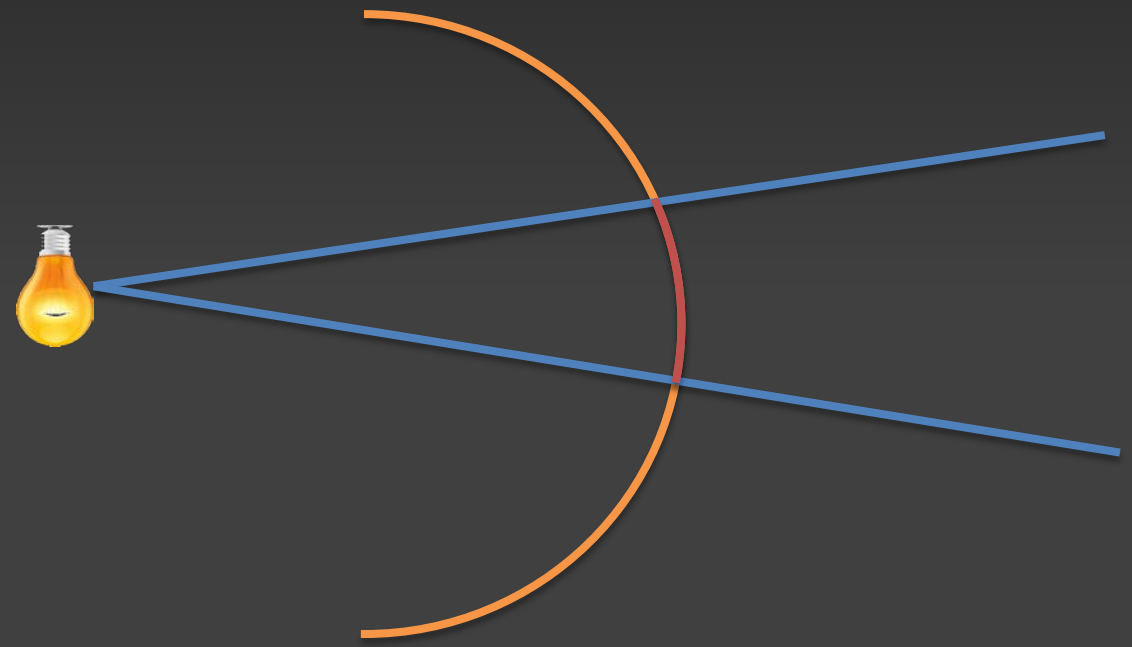
$$d\omega = \frac{dA}{r^2}$$

Iluminación Global – Radiometría (Radiometry)

- Intensidad: Poder por unidad de Angulo Solido (W / sr)

$$I = \frac{d\phi}{dw}$$

Usualmente utilizado en luces puntuales (point lights)

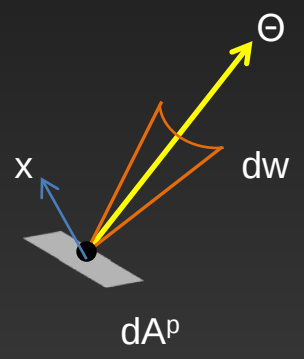


Iluminación Global – Radiance

Radiance: Power per unit solid angle times area

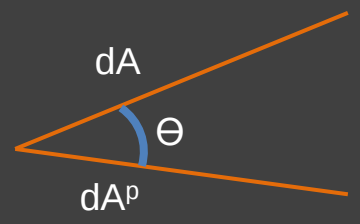
Mide la cantidad de luz que fluye alrededor de un punto x en dirección Θ , una función que depende de 5 parámetros.

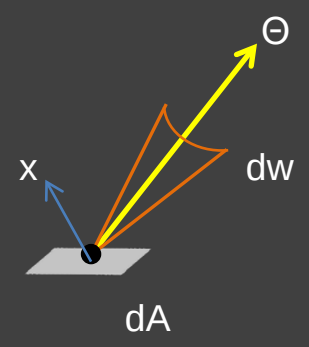
$$L(x \rightarrow \Theta) = \frac{d^2 P}{dA^p d\omega}$$



Sin embargo, es de mayor interés calcular L para superficie que no son perpendiculares, en este caso la ecuación L queda expresada por:

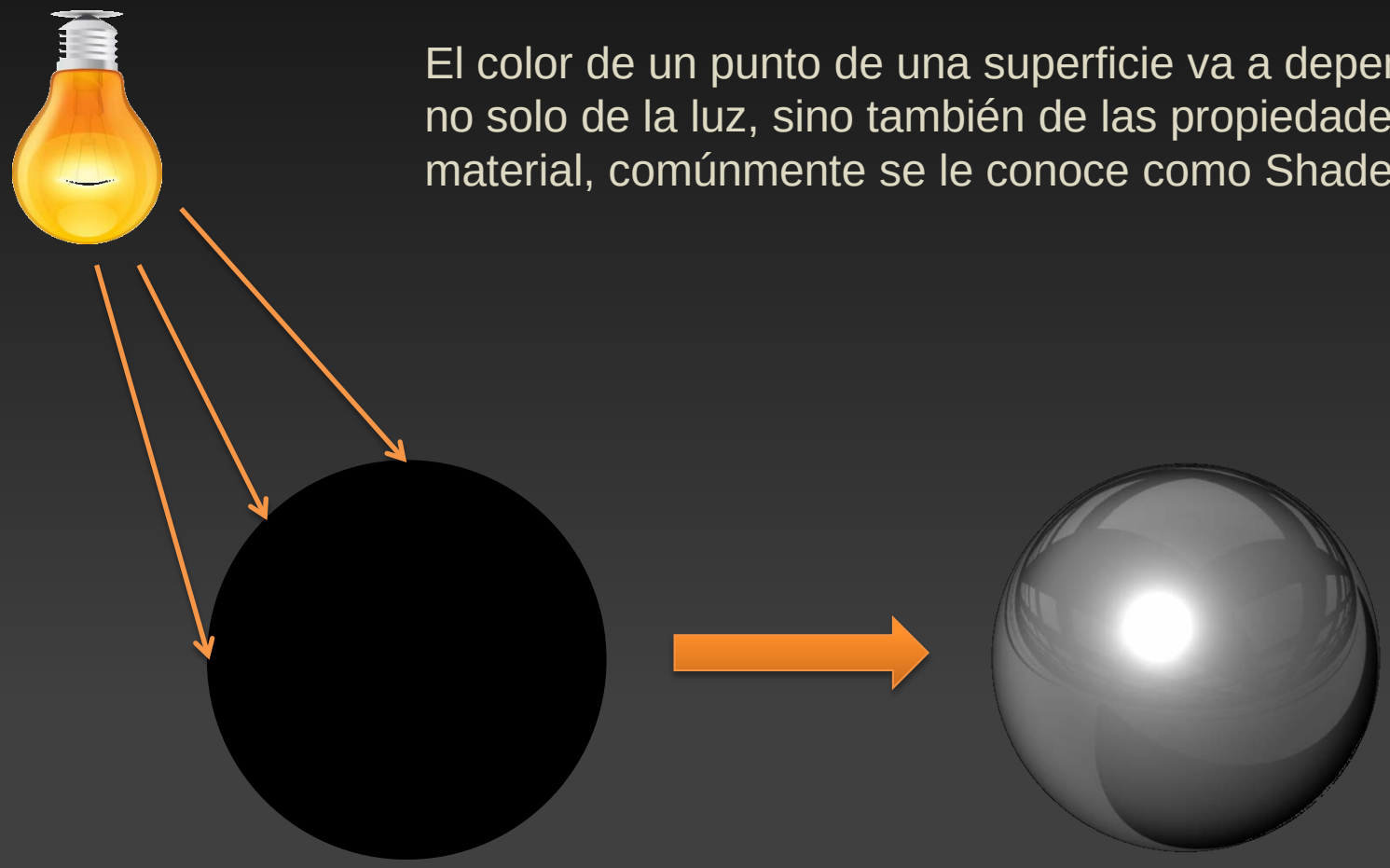
$$L(x \rightarrow \Theta) = \frac{d^2 P}{dA \cos(\theta) d\omega}$$





Iluminación Global – BRDF

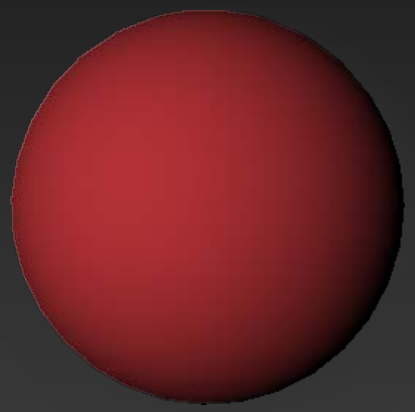
El color de un punto de una superficie va a depender no solo de la luz, sino también de las propiedades del material, comúnmente se le conoce como Shader.

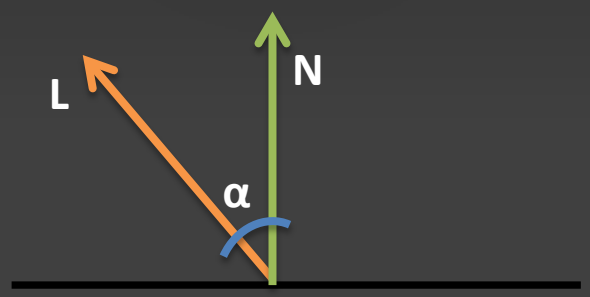


Iluminación Global – BRDF

Un material (shader) básico se forma básicamente por dos componentes, la parte difusa y la especular.

Lambert

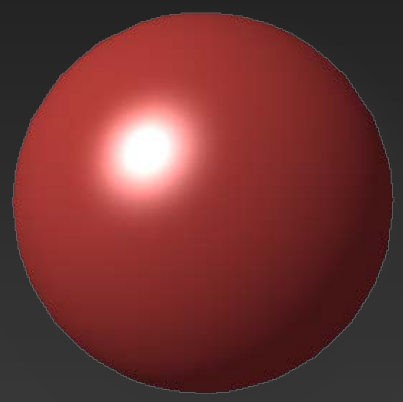


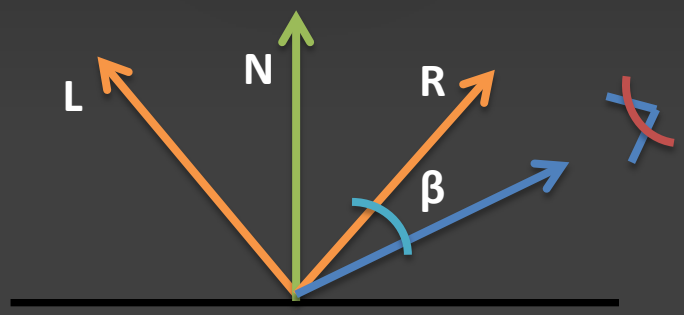


L = dirección de la luz

N = Vector normal del punto

Phong





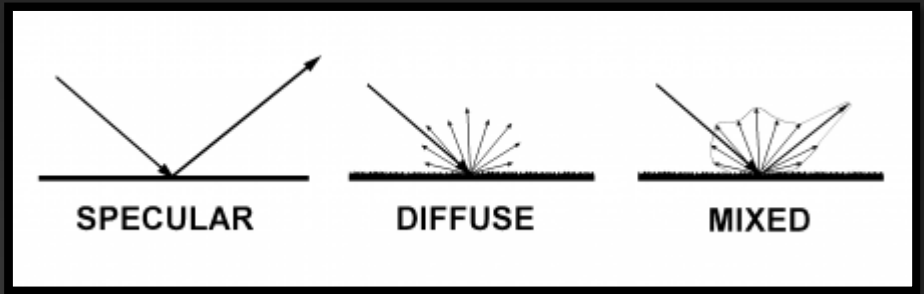
V = dirección de la cámara

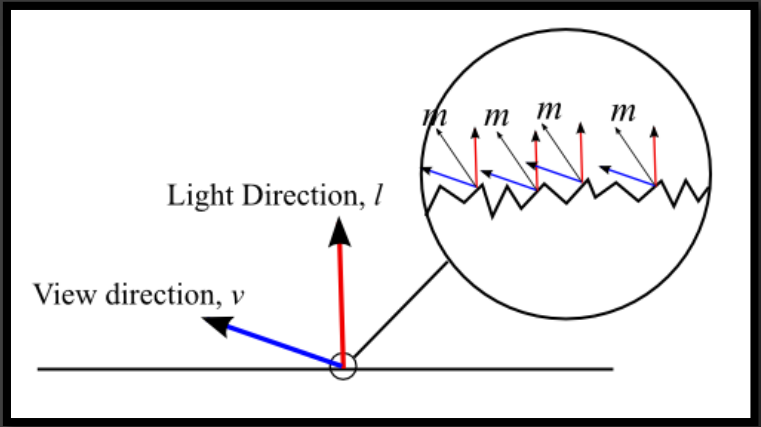
R = vector reflexión de la luz

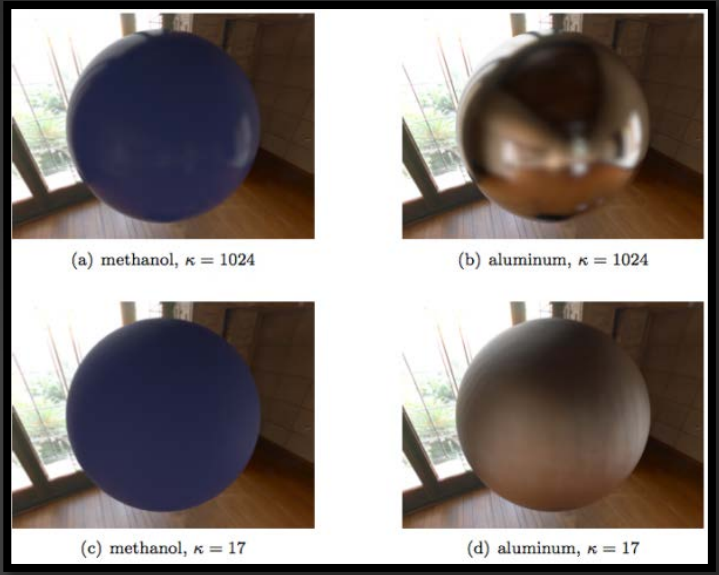
Iluminación Global – BRDF

Bidirectional reflectance distribution function – BRDF

Es una función que define como la luz se refleja en una superficie opaca. Esta función se divide en dos familias, los modelos empíricos que pueden proveer imágenes realistas pero no respetan la física de la luz. Y los modelos basados en la teoría física.

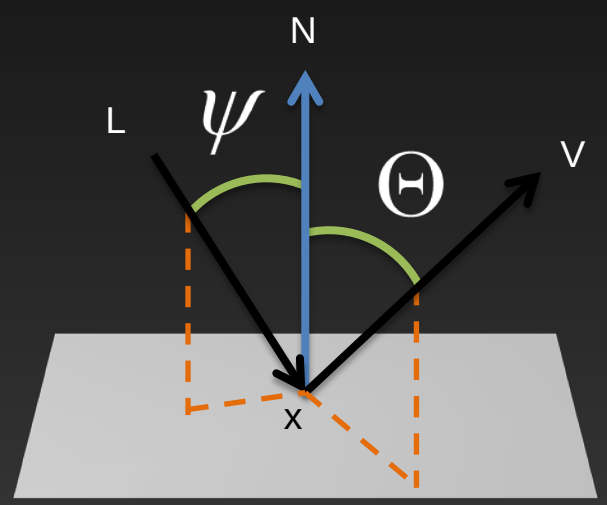






Iluminación Global – BRDF

Bidirectional reflectance distribution function – BRDF



$$f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) = \frac{dL(x \rightarrow \Theta)}{dE(x \leftarrow \psi)} = \frac{dL(x \rightarrow \Theta)}{L(x \leftarrow \psi)\cos(N_x,\psi)dw_\psi}$$

Pure Lambert

$$f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) = \frac{\rho_d}{\pi}$$

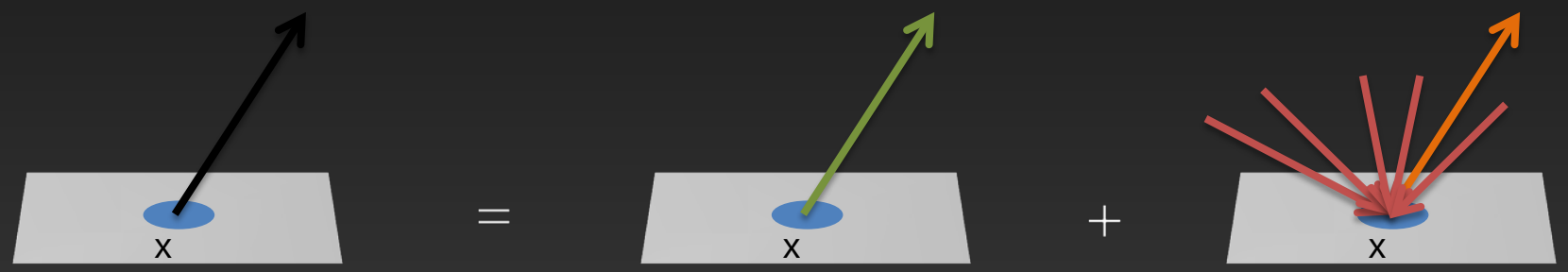
$$0 \leq \rho_d \leq 1$$

Ley de reciprocidad

$$f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) = f_r(x,\psi \leftarrow \Theta)$$

Iluminación Global – Ecuación del Render

Ecuación del Render – Render Equation



$$L(x \rightarrow \Theta) = L_e(x \rightarrow \Theta) + \int_{semiesfera} L(x \leftarrow \psi)\ldots$$

Luz Reflejada

Luz Emitida

Toda la luz que llega en diferentes direcciones de la semiesfera

Iluminación Global – Ecuación del Render

Ecuación del Render – Render Equation

$$f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) = \frac{dL(x \rightarrow \Theta)}{dE(x \leftarrow \psi)}$$

$$dL(x \rightarrow \Theta) = f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) dE(x \leftarrow \psi)$$

$$dL(x \rightarrow \Theta) = f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) L(x \leftarrow \psi) \cos(N_x,\psi) dw_\psi$$

$$L(x \rightarrow \Theta) = \int_{semiesfera} f_r(x,\psi \rightarrow \Theta) L(x \leftarrow \psi) \cos(N_x,\psi) dw_\psi$$

ECUACION DEL RENDER

James Kajiya

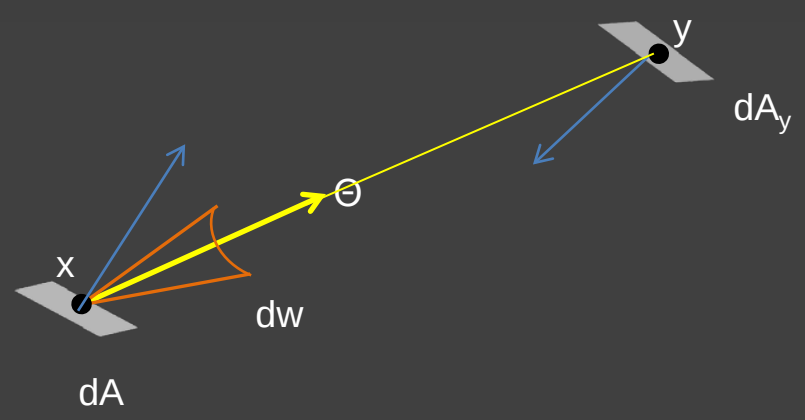
Iluminación Global – Ecuación del Render

Ecuación del Render – Render Equation

$$L(x \rightarrow \Theta) = \int_{semiesfera} f_r(...) L(x \leftarrow \psi) \cos(...) dw_\psi$$

$$L(x \rightarrow \Theta) = \int_{semiesfera} f_r(...) L(y \rightarrow x) \cos(...) dw_\psi$$

$$L(x \rightarrow \Theta) = \int_{AreaOrigen} f_r(...) L(x \leftarrow \psi) \cos(...) V(x, y) \left(\frac{\cos(...) dA_y}{r_{xy}^2}\right)$$



$$dw_\psi = \frac{dA_y \cos(\theta_y)}{r^2}$$

Iluminación Global – Ecuación del Render

Ecuación del Render – Render Equation

Se tiene una ecuación que describe como se transporta la energía en una escena

Entrada:

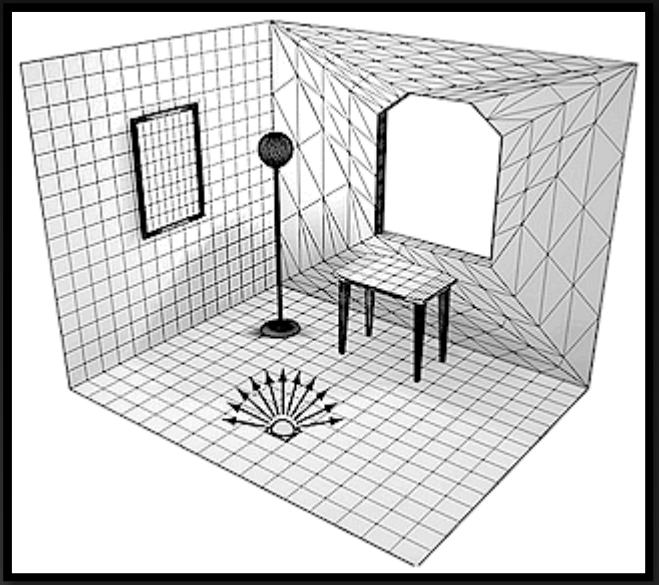
- Luces
- Superficies Geométricas
- Propiedades Reflectivas (BRDF)

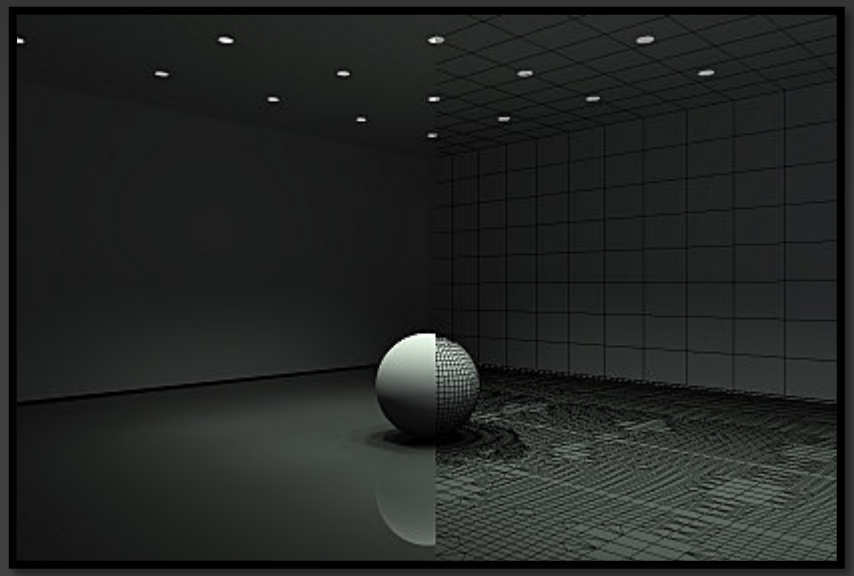
Salida

- Valor que radia cada punto de la superficie en toda las direcciones.

Iluminación Global – Radiosity

Fue el primer algoritmo de Iluminación Global que resolvía la ecuación del render (caso particular - difuso), fue presentado en 1984 por Goral, Torrance, Greenberg y Battaile. “Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surface”.





Este algoritmo es independiente de la cámara, lo que implicaba que la información recabada por el algoritmo podía ser preprocesada antes del render, y además guardada en ligh maps.

Radiosity

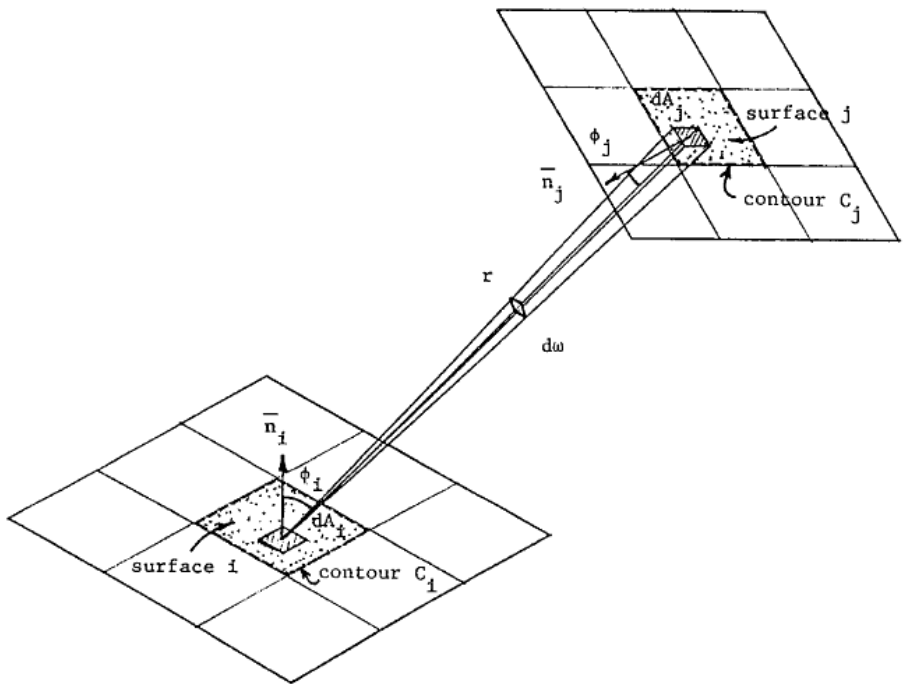
Hay dos puntos importantes a tomar en cuenta:

1. Solo contempla el cálculo del componente difuso de una superficie.
2. El radiance es constante en todas las direcciones

$$B(x) = B_e(x) + \int_s f_{r,d}(x) B(x') V(x,x') G(x,x') dA'$$

$$B(x) = B_e(x) + \frac{\rho_d(x)}{\pi} \int_S B(x') V(x,x') G(x,x') dA'$$

Iluminación Global – Radiosity



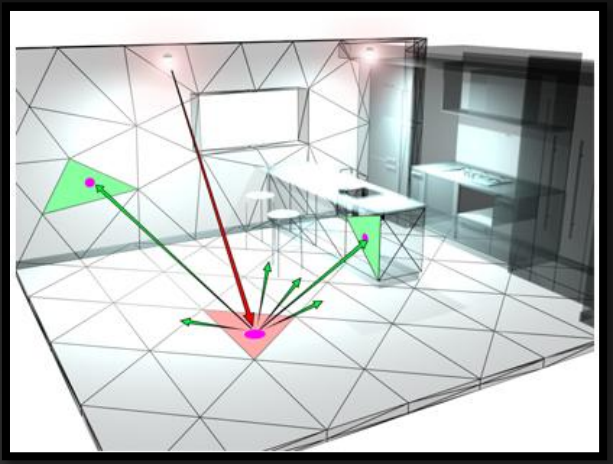
dA(i) = elemental area on surface i
A(i) = area of surface i
C(i) = contour of surface i
r = distance between dA(i) and dA(j)
dω = solid angle subtended by dA(j) as seen from dA(i)
$\phi(i)$ = angle between surface normal of i, $\bar{n}(i)$, and the line r
$\phi(j)$ = angle between surface normal of j, $\bar{n}(j)$, and the line r

dA(j) = elemental area on surface j
A(j) = area of surface j
C(j) = contour of surface j

Es una solución netamente geométrica, es decir, se toma cada parche o polígono de la superficie y se piensa como si ese parche fuera una luz de área.

Radiosity

Todo se resume a la siguiente ecuación:



$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^{N} B_j F_{ij}$$

B_j = Radiosity de la superficie j (esta es la incógnita)

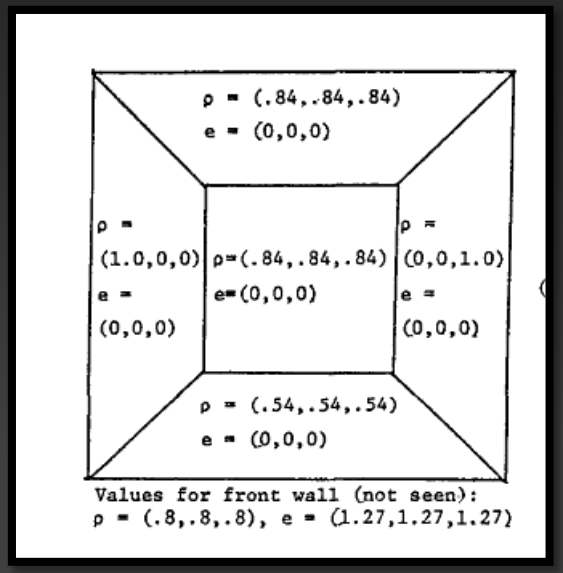
F_{ij} = Representa la fracción de energía que deja la superficie i y llega a la superficie j

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{V(x,x')G(x,x')}{\pi} dA_j dA_i$$

Radiosity

El fuerte del algoritmo consiste en resolver el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} 1-\rho_1 F_{1,1} & -\rho_1 F_{1,2} & \cdots & -\rho_1 F_{1,N} \\ -\rho_2 F_{2,1} & 1-\rho_2 F_{2,2} & \cdots & -\rho_2 F_{2,N} \\ \vdots & & & \vdots \\ -\rho_N F_{N,1} & -\rho_N F_{N,2} & \cdots & 1-\rho_N F_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix}$$

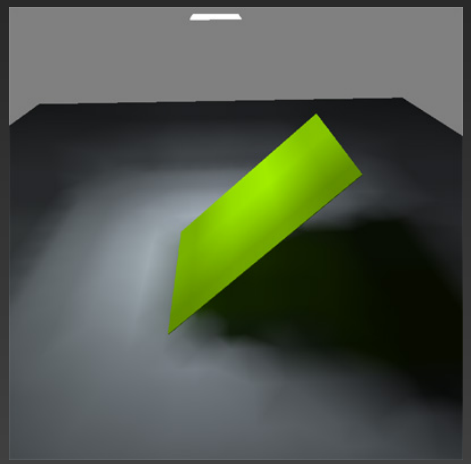


Iluminación Global – Radiosity

Radiosity

Radiosity provee un mecanismo finito para crear imágenes de alta calidad que simula la física de la luz para un caso particular.

Tiene como desventaja:



1. Computacionalmente costoso, y problemas con la memoria.
2. PreProcesamiento (Subdivisión)
3. Solo contempla la parte difusa, no simula ningún otro efecto especular como la caustica.

Sin embargo, esta técnica ha sido optimizada con el tiempo es muy utilizada en el mundo de los video juegos.

Iluminación Global – Monte Carlo

Monte Carlo

Es un método de simulación estadística utilizado para el cálculo de integrales, básicamente consiste en generar números aleatorios uniformemente distribuidos en un dominio.

$$I = \int f(x)dx = \int \left[\frac{f(x)}{p(x)} \right] p(x)dx$$

Donde p(x) es una función de densidad (pdf)

$$= \langle g(X) \rangle$$

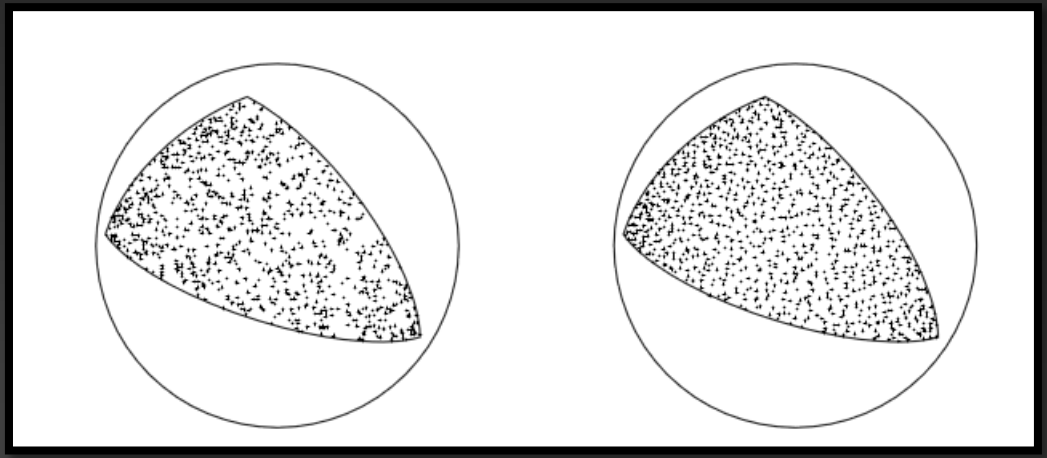
X una variable aleatoria de la función p(x)

$$I = \langle g(X) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} g(x_i)$$

Iluminación Global – Monte Carlo

Monte Carlo

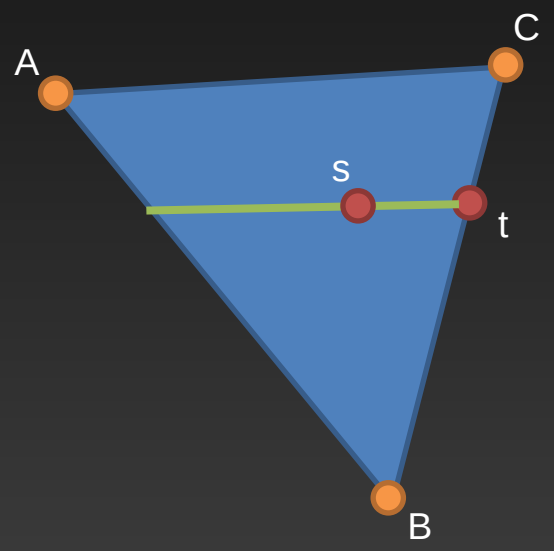
El reto del método, es de proporcionar una distribución aceptable de los puntos para así lograr una mejor aproximación.



State of the Art in Monte Carlo Global Illumination
Siggraph 2004 Course

Iluminación Global – Monte Carlo

Monte Carlo - **State of the Art in Monte Carlo Global Illumination**



$$\phi(s,t) = (1-s)A + s(1-t)B + stC$$

Usando esta fórmula los puntos creados tendrían una tendencia hacia uno de los puntos.

$$s' = \sqrt{s}$$

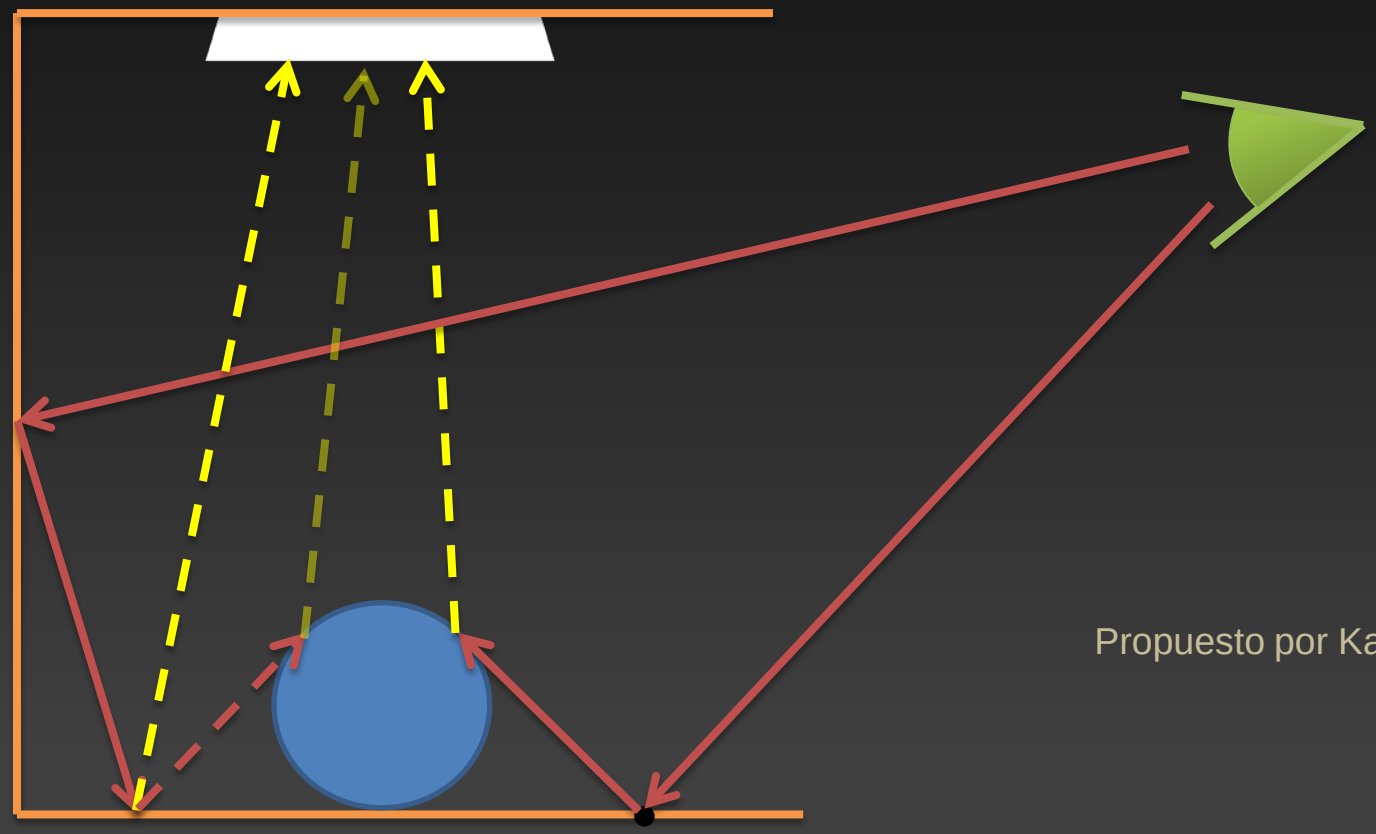
$$t' = t$$

$$\phi(s',t') = (1-s')A + s'(1-t')B + s't'C$$

Con este ajuste los puntos creados estarían mejor distribuido en el triangulo

Iluminación Global – Path Tracing

Path Tracing

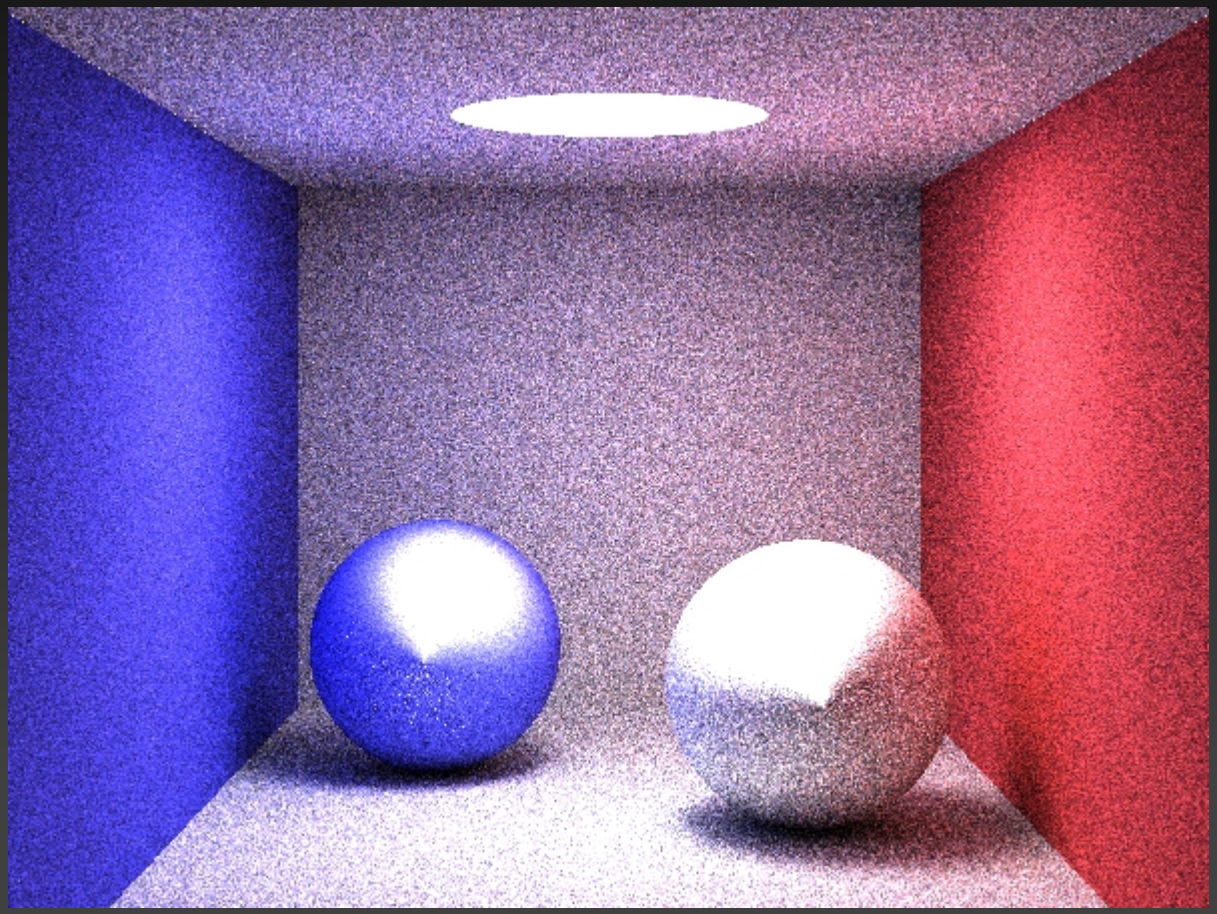


Propuesto por Kajiya 1986

El método mas simple para simular la iluminación global, este consiste en disparar un rayo de la cámara a la escena y luego en el punto de intersección, se generan N rayos (difuso) aleatoriamente (semiesfera) . En el ejemplo de arriba se muestra una longitud de camino = 2 (Path Length = 2) y una de 3.

Iluminación Global – Path Tracing

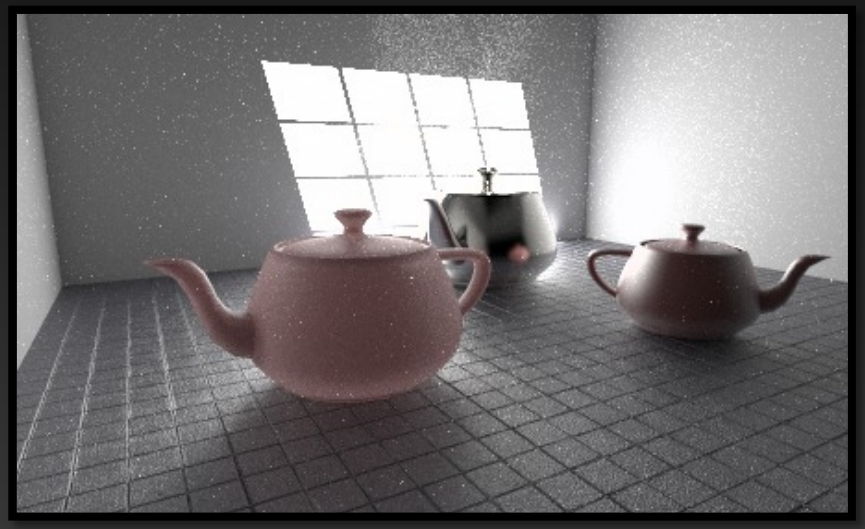
Path Tracing



Una de las preguntas importante, es saber cuando terminar la recursión, básicamente uno puede fijar la longitud del camino, sin embargo existen técnicas que se pueden utilizar para detener el camino de un rayo.

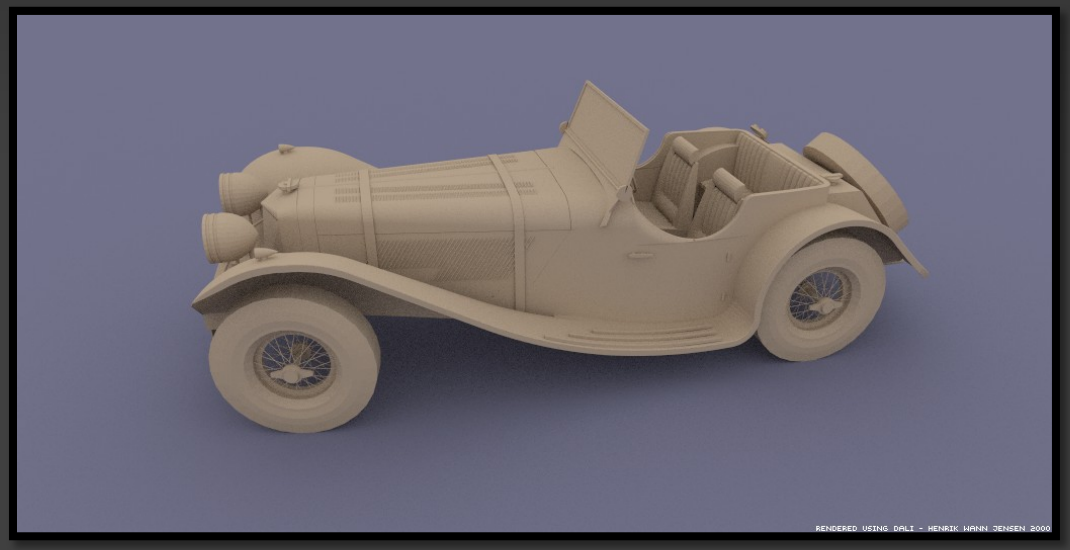
Iluminación Global – Path Tracing

Path Tracing



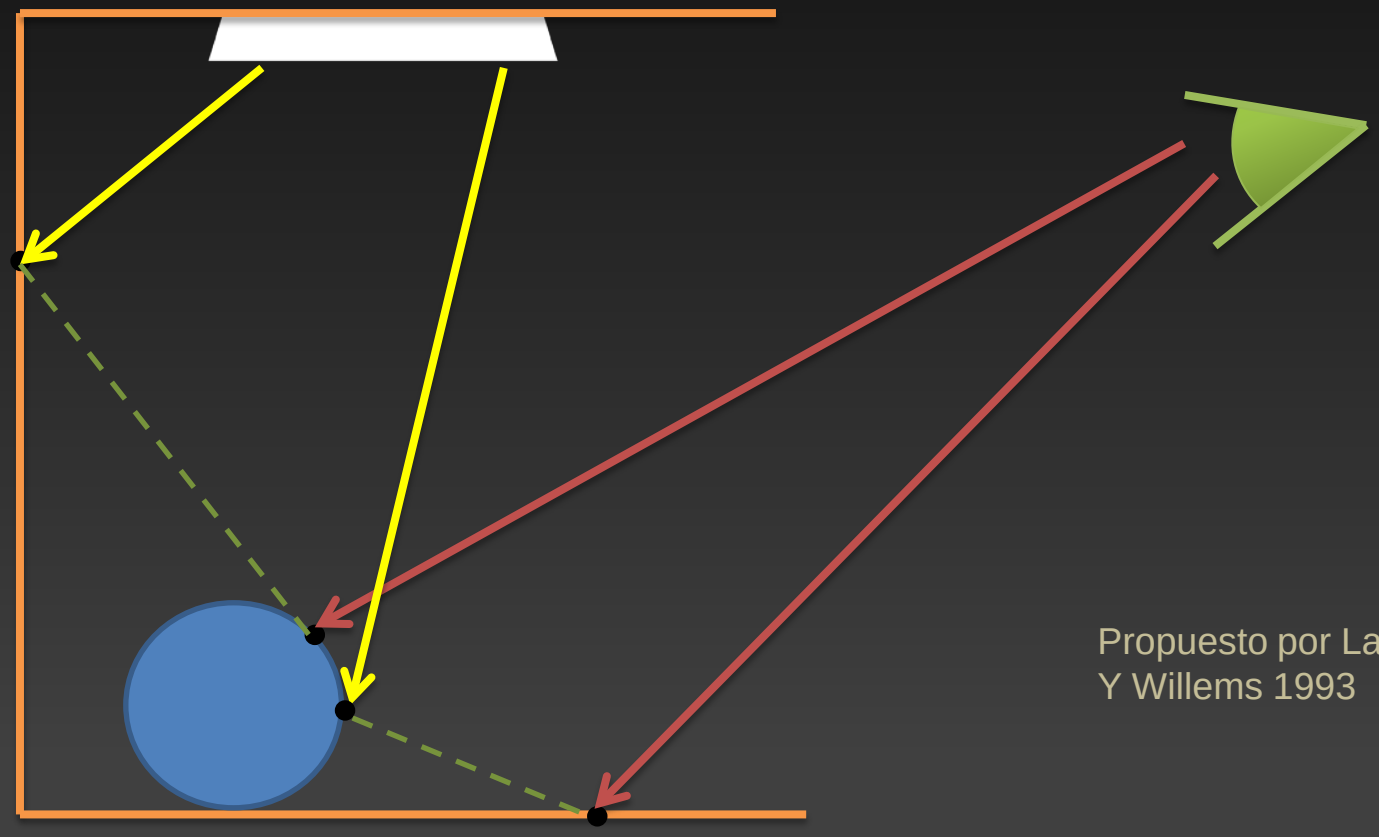
Este algoritmo empieza a simular efectos que no se podía con radiosity como por ejemplo la caustica y los brillos especulares, sin embargo, estos añadían mas ruido a las imágenes

Sin embargo, si se tomaba la semiesfera como un valor constante como fuente de luz el resultado era aceptable con pocos rayos.



Iluminación Global – Bidirectional Path Tracing

Bidirectional Path Tracing

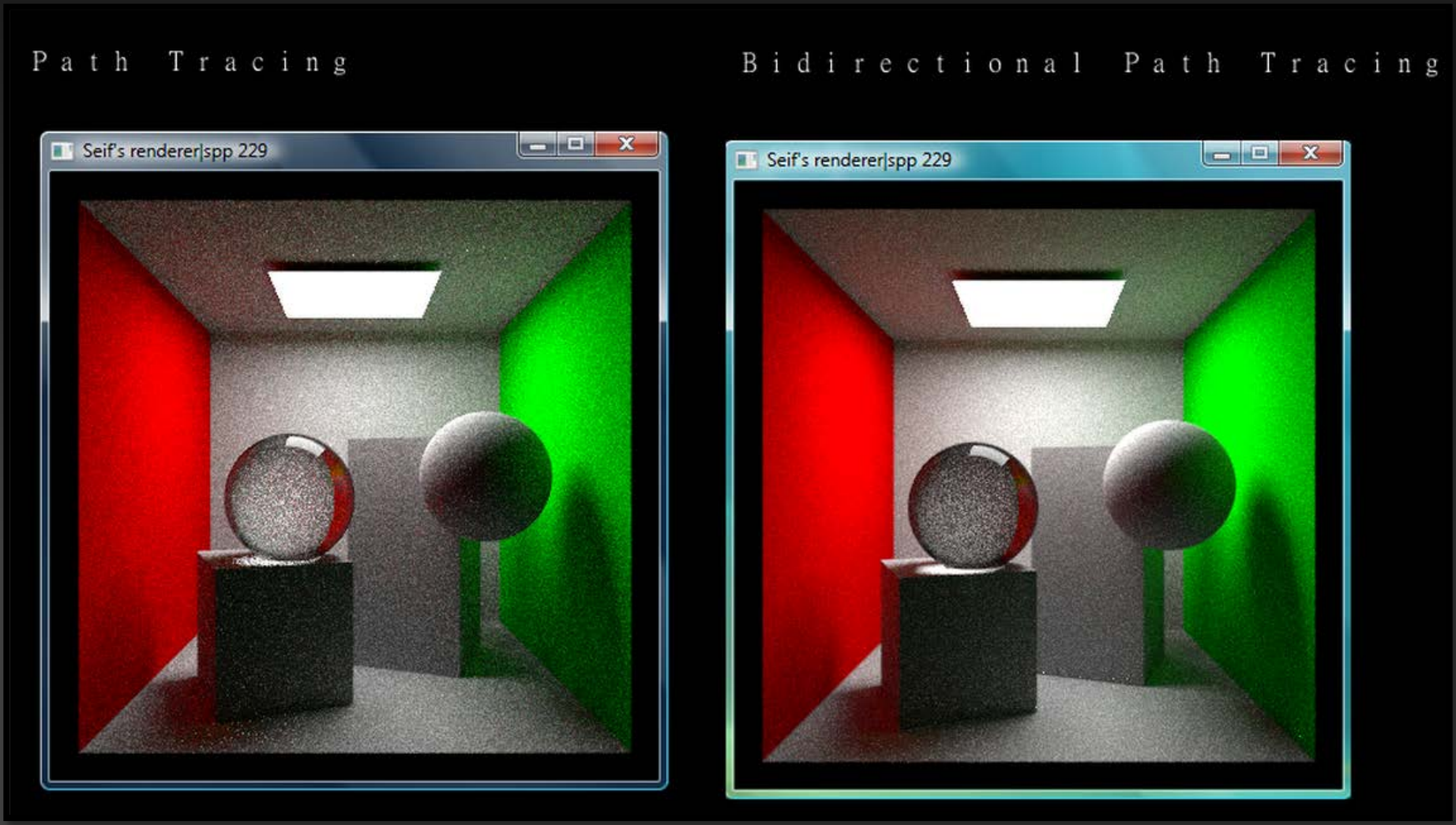


Propuesto por Lafortune
Y Willems 1993

El método consiste que por cada rayo de la cámara (este puede rebotar) se traza un rayo de luz (también puede rebotar), luego se conectan los vértices o puntos de intersección.

Iluminación Global – Bidirectional Path Tracing

Bidirectional Path Tracing



Iluminación Global – Bidirectional Path Tracing

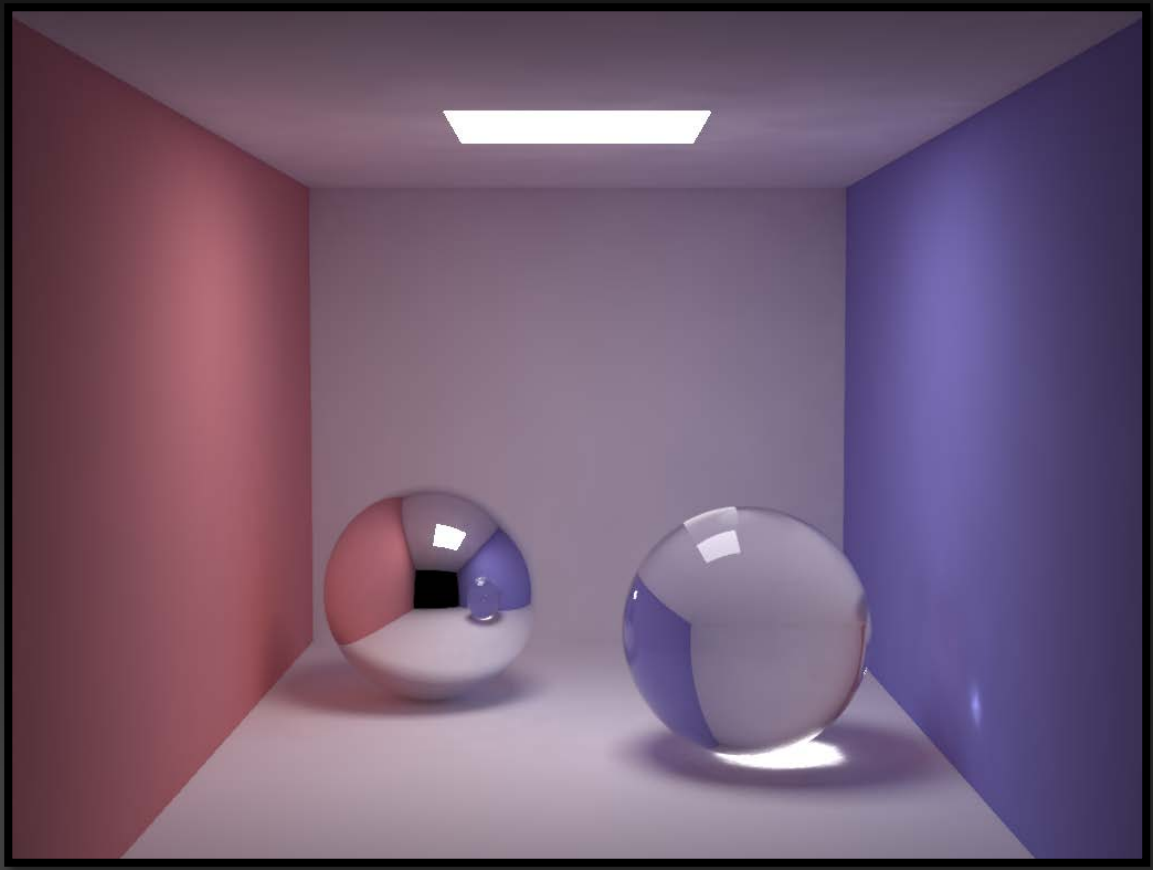
Ventajas de las técnicas de Ray Tracing con Montecarlo

- **Se podían simular todos los efectos de la iluminación global.**
- **La geometría podía ser arbitraria**
- **Consumo de memoria es bajo.**
- **El resultado en si es correcto, sin embargo, el ruido es el problema.**

Una solución ha sido crear algoritmos híbridos, este consiste en usar radiosity en la primera pasada para obtener una solución básica y luego se usa algún algoritmo de Path Tracing para terminar la imagen, a estos algoritmos se les conoce como “multi-pass”.

Iluminación Global – Photon Mapping

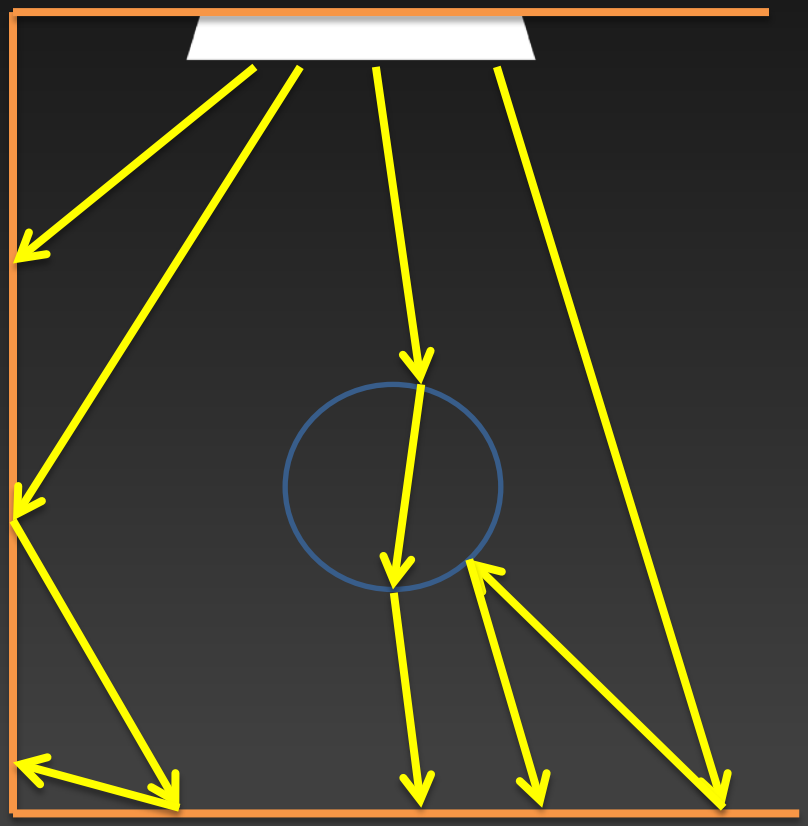
Photon Mapping

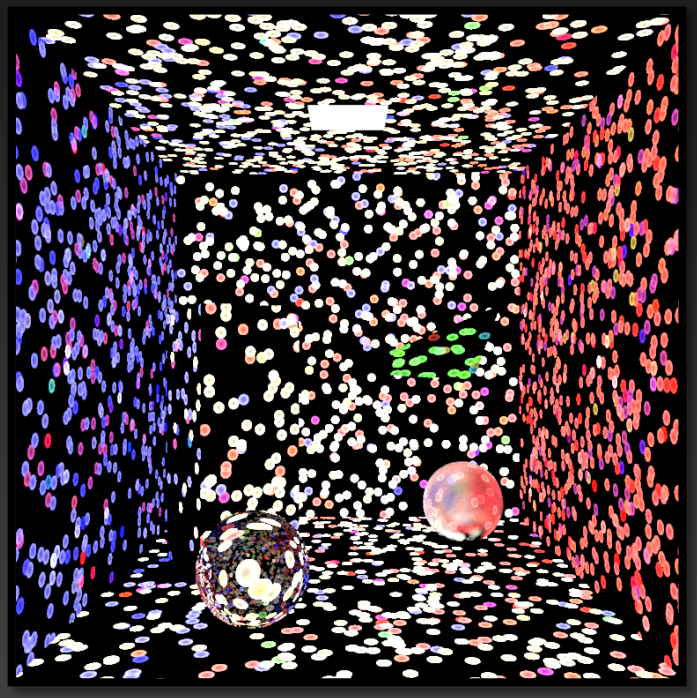


El Photon Mapping presenta una solución mucho mas óptima que los algoritmos antes expuestos, no solamente en los tiempos de render sino también en la calidad de la imagen, esta técnica se base enteramente en Monte Carlo RayTracing. Y presenta una idea similar al comportamiento de una luz normal, es decir, puntos (fotones) salen de la luz y rebotan en la escena lo que se conoce como Photon Tracing.

Iluminación Global – Photon Mapping

Photon Tracing





El Photon Tracing es la técnica en trazar un fotón desde la luz y seguirlo en su camino por toda la escena.

Sin embargo, esta técnica no es tan simple como se muestra, ya que presenta ciertos métodos que optimizan bastante el proceso.

Iluminación Global – Photon Mapping

Photon Tracing

- Emitir los fotones (Photon Emission)
- Mapa de proyecciones (Projection Maps)
- Como se propaga (Photon Scattering)
- Ruleta Rusa (Russian Roulette)
- Guardar en una estructura de datos
- Balancear la estructura de datos.

Photon

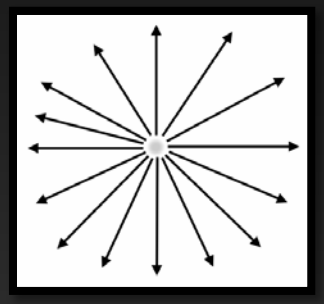
Cabe acotar que un fotón no es “radiance”, sino una fuente de poder (radiant flux).

Luz de poder Watts ϕ

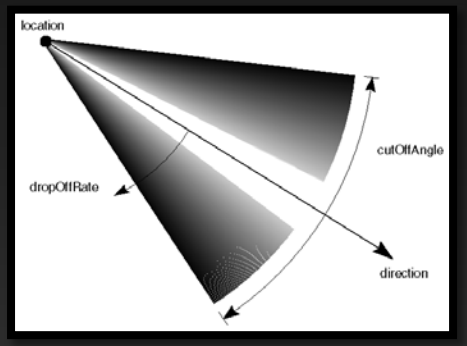
Poder o energia de cada foton $\frac{\phi}{N}$

Iluminación Global – Photon Mapping

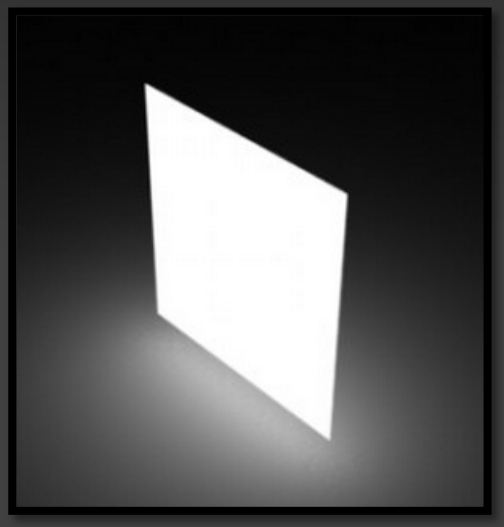
- Emitir los fotones (Photon Emission)



Luz puntual



Luz SpotLight



Luz de Area

En esta etapa se generan aleatoriamente fotones (rayos) que saldrán de las fuentes de luz, esto se hace en forma aleatoria, la técnica usada para generar los rayos aleatoriamente dependerá de la fuente de luz.

Iluminación Global – Photon Mapping

- Mapa de proyecciones

Con el mapa de proyecciones se busca focalizar la mayor cantidad de fotones en el área que tenga mayor geometría o mayor interés.

Iluminación Global – Photon Mapping

- Como se propaga (Photon Scattering)

Un fotón al golpear una superficie difusa es almacenada y además:

1. Puede ser absorbido (A)
2. Puede ser reflejado (R) (Specular o Lambert)
3. Puede ser transmitido (T)

```
struct photon {
  float x,y,z;       // position
  char p[4];         // power packed as 4 bytes
  char phi,theta;    // incident direction
  short flag;        // flag used for kd-tree
}
```

En caso de que una superficie presente toda esas propiedades por ejemplo, una superficie semi-transparente, que refleje y tenga componente difuso no implica que se generan 4 fotones adicionales para cumplir la tarea.

También no es interés del algoritmo considerar fotones que tengan un poder bajo.

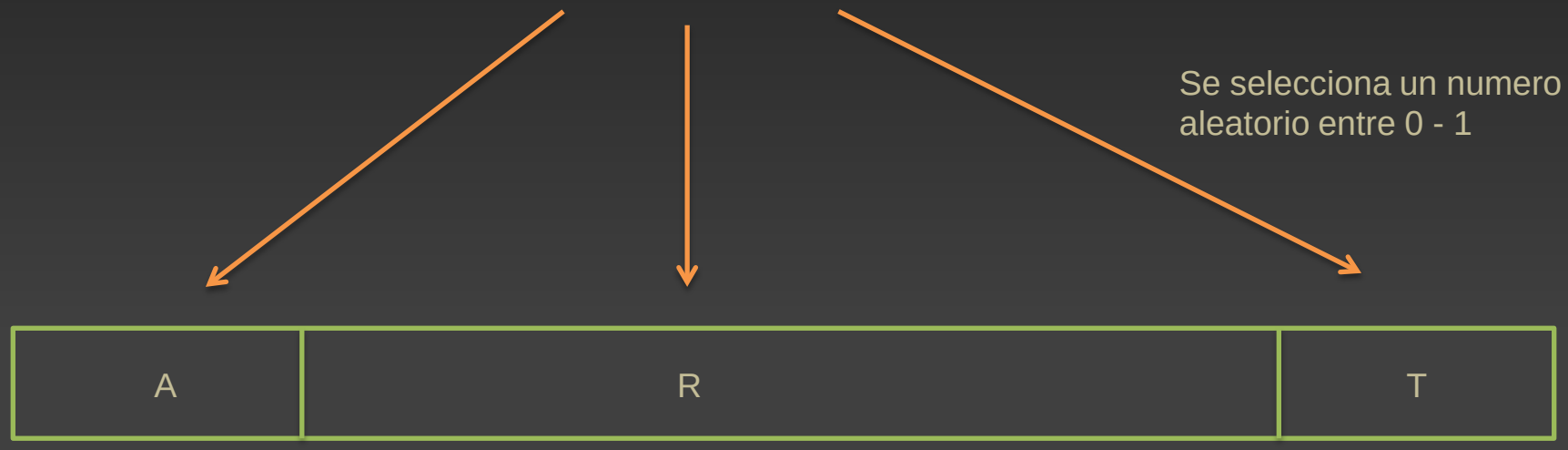
Iluminación Global – Photon Mapping

- Ruleta Rusa

Esta es una técnica estocástica que consiste en eliminar fotones innecesarios y solo concentrarse en los mas importantes. Además es usada también para asegurar que los fotones almacenados tengan aproximadamente la misma energía.

$$A + R + T = 1.0$$

0.2 + 0.6 + 0.2

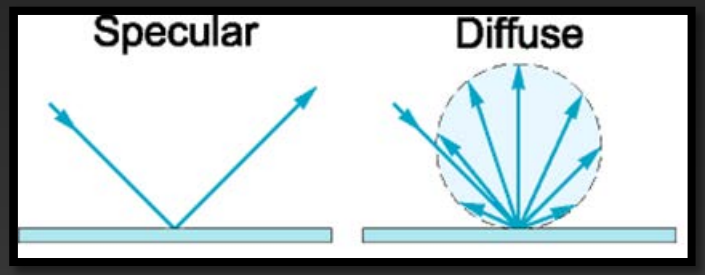


En este ejemplo, la mayoría de los fotones serian reflejados, sin embargo, cuando se refleja un fotón, este se puede hacer de dos maneras.

Iluminación Global – Photon Mapping

- Ruleta Rusa

Si un fotón es reflejado, este se puede hacer de dos maneras: Difusa o Especular. Se le puede asignar un peso a cada reflejo y luego tomar un numero aleatorio entre 0 y 1, para decidir como se refleja.



Otro ejemplo, de esta técnica es el siguiente, se consideran 1000 fotones que impactan en una superficie con reflectividad 0.5. Se pueden tomar 2 decisiones en este caso, o se reflejan 1000 fotones con la mitad energía, o se refleja 500 fotones con la energía completa.

La ruleta rusa busca la segunda opción, cabe mencionar que esta técnica no afecta el resultado final al aproximar la ecuación del render, pero si ayuda a reducir el cómputo en el algoritmo.

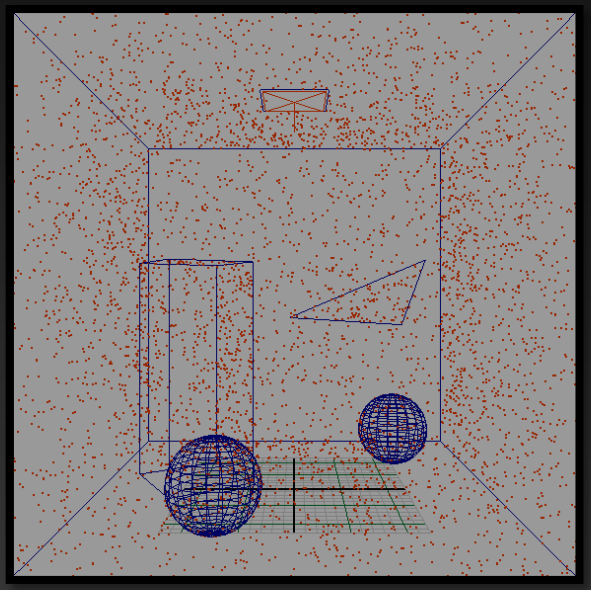
Iluminación Global – Photon Mapping

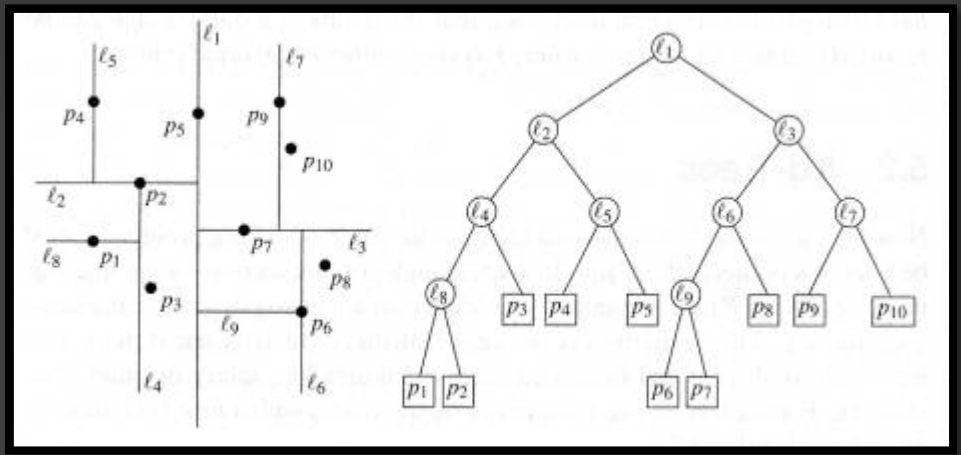
- Estructura de datos

Cada fotón es almacenado cuando este golpea una superficie difusa (no-especular).

Esta estructura se le conoce como photon map, y puede ser almacenada en el disco duro.

Un fotón puede almacenar su información varias veces en el transcurso de su camino.





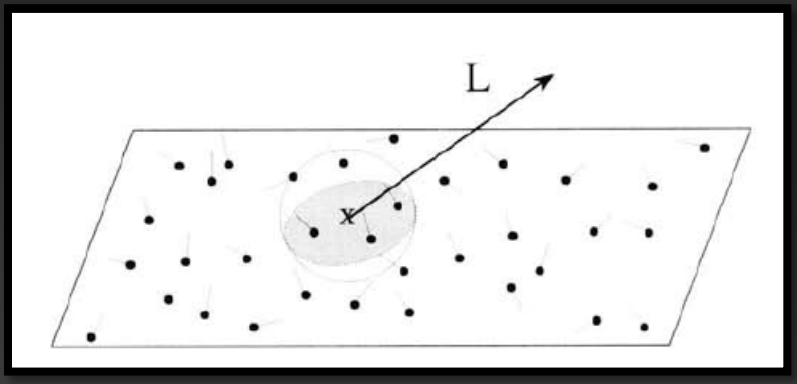
La estructura de datos preferida para esta tarea es el Kd-Tree. Esto se debe a que en un Kd-Tree balanceado, localizar un fotón es O(log N).

También se puede usar los diagramas de Voronoi, pero tienen la desventaja que requiere $O(n^2)$ para almacenar en 3 dimensiones.

Iluminación Global – Photon Mapping

- Rendering

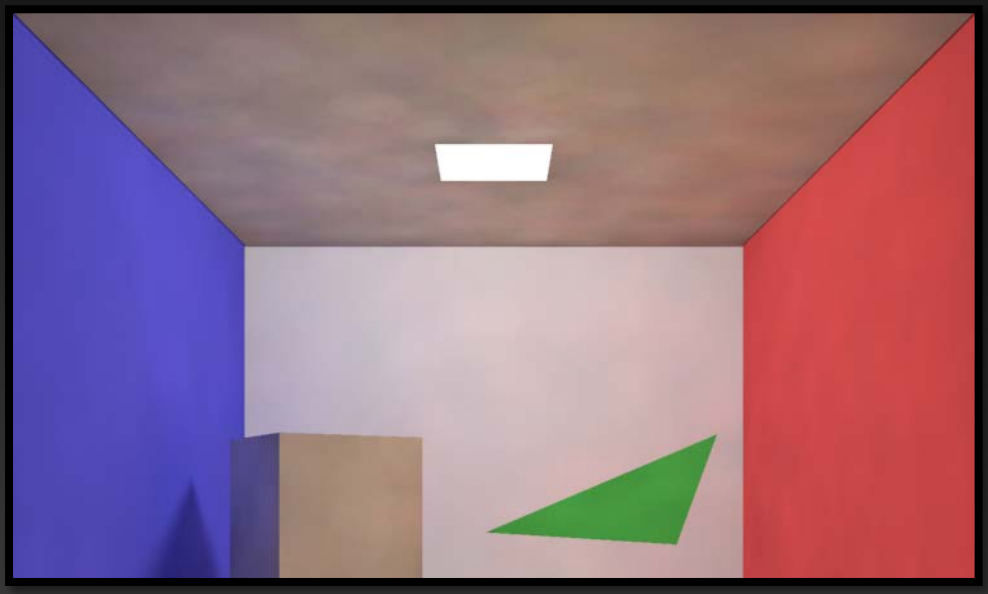
En esta fase se procede a calcular el “radiance” de un punto para así calcular su color, básicamente esto consiste en buscar los fotones cercanos al punto, aplicar la ecuación del rendering, y finalmente se suelen usar filtros para suavizar los ruidos.



El uso de filtro, permite disminuir el ruido con un precio de cómputo muy bajo, razón por la cual esta técnica es una de las atractiva en la computación gráfica.

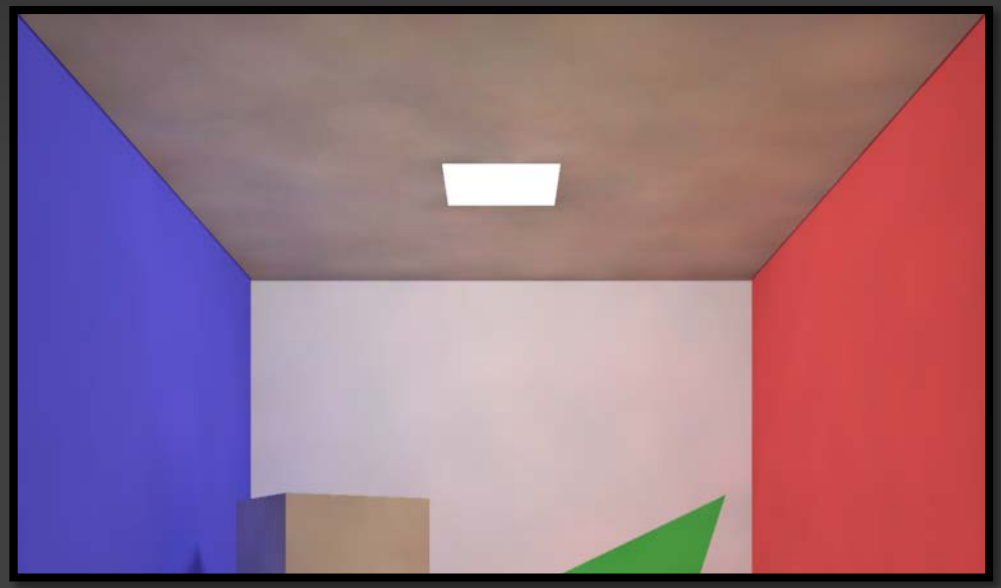
Iluminación Global – Photon Mapping

- Rendering



Ambas imágenes se tomaron usando 300.000 fotones y duraron ambas 14 seg en revelarse.

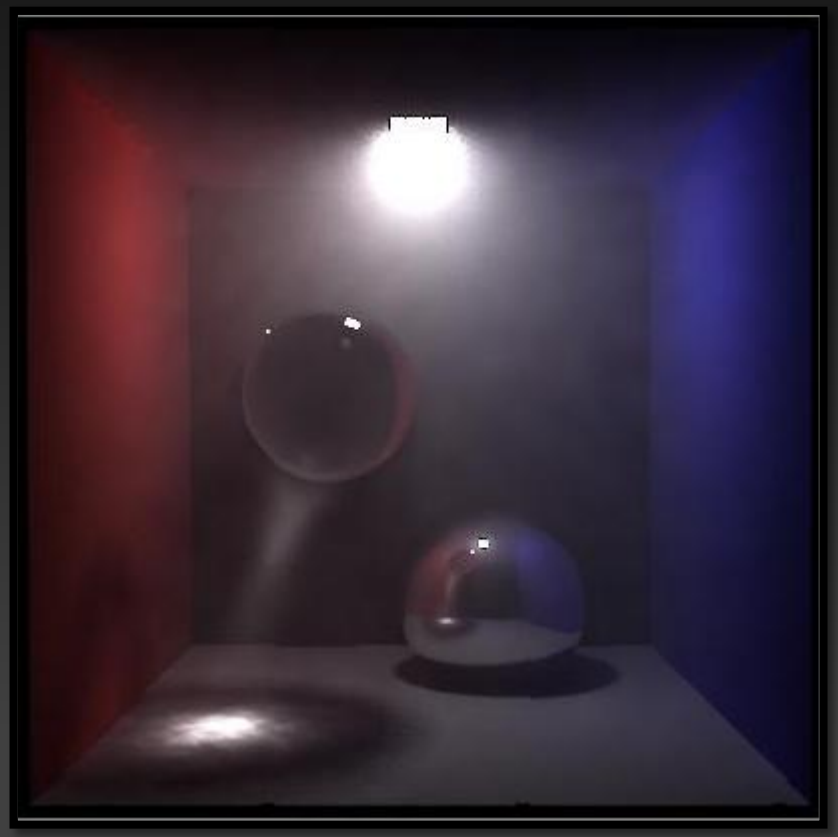
La imagen inferior luce mejor gracias al proceso de filtrado, sin prácticamente incrementar el tiempo de render



Iluminación Global – Photon Mapping

Ventajas del Photon Mapping

1. Se integra fácilmente al algoritmo de RayTracing
2. Se pueden manejar geometrías complejas inclusive de gran cantidad de polígonos
3. Se pueden emplear materiales complejos a las superficies (BRDF)
4. Maneja el efecto caustica y sub-surface scattering.
5. Funciona para render volumétricos.



Gracias…