

Mestrado em
Engenharia Informática

Fundamentos

Visualização e Iluminação

Luís Paulo Peixoto dos Santos

Síntese de Imagens de Alta Fidelidade

Síntese de imagens (*rendering*) é o processo de produção de uma imagem bidimensional a partir de uma descrição tridimensional de uma cena.

Objectivo

“... desenvolver modelos de iluminação e transporte de luz baseados nas leis da física e processos de visualização perceptuais que produzam imagens sintéticas visual e/ou mensuravelmente indistinguíveis de imagens do mundo real...”.

[Greenberg97]

Estas imagens podem ser usadas de forma preditiva, em oposição com imagens que apenas pretendem ter um grande impacto visual.

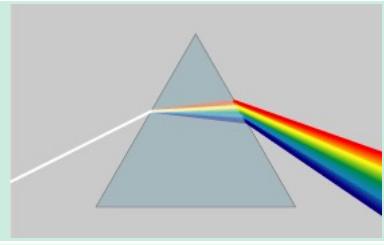
A Natureza da Luz

- Compreender a natureza da luz é fundamental: o objectivo é simular o comportamento desta no mundo
- A luz deve ser representada usando grandezas físicas bem conhecidas
- A simulação da propagação (transporte) da luz no meio deve obedecer às leis físicas que governam estes fenómenos

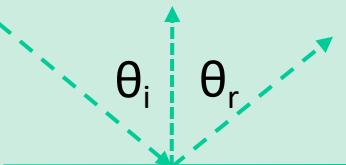
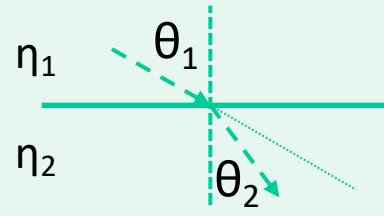
A Natureza da Luz

- **Óptica Quântica** - Modelação dual (Corpuscular e Ondulatória)
Modelo fundamental que explica a natureza dual da luz e fundamenta a interacção entre a luz e a matéria
- **Óptica ElectroMagnética** - Modelação ondulatória
Baseada nas equações de Maxwell descreve a luz como ondas:
dispersão, difracção, polarização, interferência
Interacção da luz com objectos do tamanho do comprimento de onda
- **Óptica Geométrica** - Modelação corpuscular
A propagação da luz é modelada por raios ou partículas que se deslocam em linha recta, discretizando o campo de luz .

Modelos Ondulatórios

Fenómeno	Descrição	
Dispersão	A velocidade de fase de uma onda depende da sua frequência. Num prisma isto resulta na decomposição de uma luz branca em componentes do espectro com diferentes comprimentos de onda.	 A diagram showing a triangular prism made of blue material. A white light ray enters from the left at an angle and refracts towards the normal. As it passes through the prism, it is dispersed into a spectrum of colors: red, orange, yellow, green, blue, and violet. The dispersed light exits the prism at an angle to the right.
Difracção	Curvatura da trajectória das ondas quando interagem com obstáculos no seu trajecto. Especialmente pronunciado quando o tamanho dos obstáculos é da ordem do comprimento de onda.	
Interferência	Adição (ou sobreposição) de 2 ou mais ondas, resultando num novo padrão ondulatório.	
Polarização	Orientação da oscilação da onda no plano perpendicular à sua direcção de propagação.	

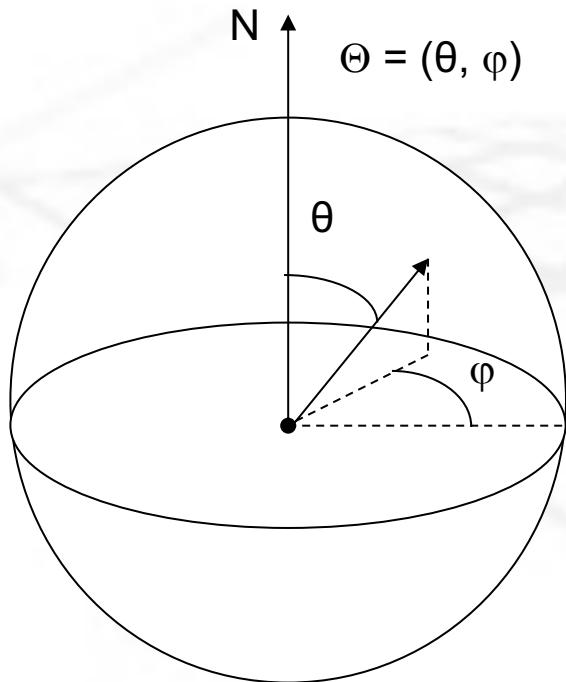
Modelos Corpusculares

Fenómeno	Descrição
Reflexão	 <p>O ângulo do raio incidente com a normal, θ_i, é igual ao ângulo do raio reflectido com a normal, θ_r, e ambos os raios e a normal são coplanares.</p>
Refracção	 <p>Quando a luz passa de um meio com um índice de refracção η_1 para outro com η_2, muda de direcção devido a uma mudança de velocidade de propagação. Lei de Snell: $\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2$</p>

Óptica Geométrica

- A propagação da luz é modelada por raios ou partículas que se deslocam em linha recta num meio com índice de refracção uniforme (Princípio de Fermat):
“the path taken between two points by a ray of light is the path that can be traversed in the least time” (Fermat, 1662)
- Simplificações:
 - A trajectória dos raios não é afectada por campos gravíticos, electromagnéticos ou pela temperatura
 - Propagação instantânea
 - O ponto de incidência coincide com o ponto de reflexão (*subsurface scattering??*)
 - A frequência de incidência é idêntica à frequência de reflexão (fluorescência??)
 - O instante de incidência é idêntico ao instante de reflexão (fosforescência??)
 - Linearidade: o efeito combinado de dois inputs é igual à soma dos efeitos de cada input considerado individualmente.

Coordenadas esféricicas e área projectada



Direcção Θ : ângulos de elevação, θ , e azimute, φ .

Semiesfera φ in $[0 .. 2\pi]$ e θ in $[0 .. \pi/2]$

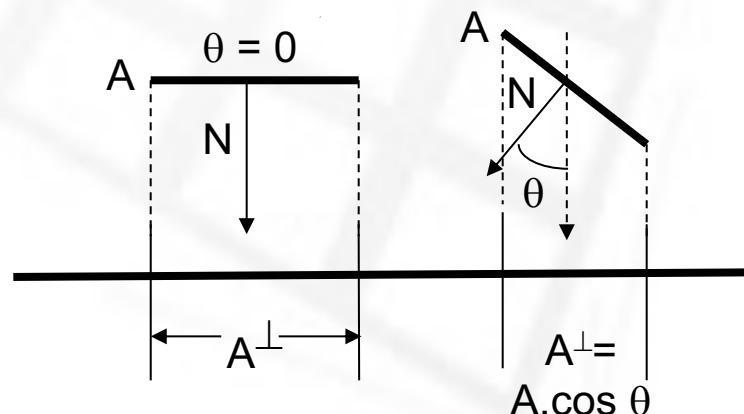
Esfera φ in $[0 .. 2\pi]$ e θ in $[0 .. \pi]$

Um ponto p é definido por uma direcção Θ mais uma distância ao centro, r : $p(r, \theta, \varphi)$

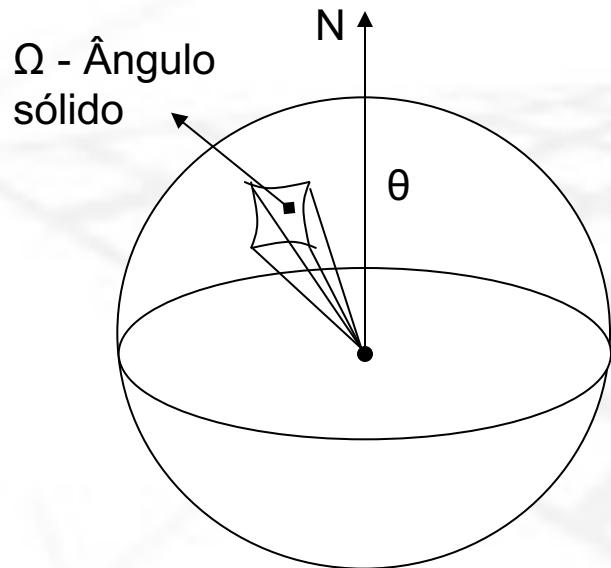
Área Projectada

$$A^\perp = A \cdot \cos \theta \Leftrightarrow A = \frac{A^\perp}{\cos \theta}$$

Visualização e Iluminação



Ângulo sólido



Um ângulo sólido Ω associado a uma área na superfície de uma (semi)esfera é definido pela área A projectada dividida pelo quadrado do raio r . O ângulo sólido não tem dimensões mas é normalmente expresso em stereoradianos (sr).

$$\Omega = \frac{A^\perp}{r^2} = \frac{A \cos \theta}{r^2}$$

Uma vez que a área de uma (semi)esfera é $4\pi r^2$ ($2\pi r^2$) o ângulo sólido Ω coberto por uma (semi)esfera de raio 1 é 4π sr (2π sr).

O ângulo sólido não depende da forma da superfície que o subentende, apenas da respectiva área projectada.

Radiometria: Energia radiante

- **Energia de um fotão** – e_λ :
$$e_\lambda = \frac{\hbar c}{\lambda}$$

onde $\hbar \approx 6.663 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ (constante de Planck) e c é a velocidade da luz (299 792, 458 m/s). A energia mede-se em Joules (J)

- **Energia espectral radiante** em n_λ fotões – Q_λ :
$$Q_\lambda = n_\lambda \frac{\hbar c}{\lambda}$$
- **Energia radiante** – Q :
$$Q = \int_0^\infty Q_\lambda d\lambda$$

Radiometria: Fluxo radiante

- O **fluxo**, ou potência, **radiante** é a quantidade de energia que atravessa uma superfície ou região do espaço por unidade de tempo. Mede-se em J.s^{-1} ou watts (w).

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Diz-se que uma lâmpada emite 60 watts ou que 20 w de potência incidem numa superfície, sem referir as dimensões quer da lâmpada quer do receptor

Uma lâmpada de 100 watts liberta, durante uma hora (3600 s), uma energia radiante de 360.000 J, ou 0.1 Kwh

Radiometria: Densidade de fluxo radiante

- A densidade de fluxo radiante em cada ponto de uma superfície é o fluxo por unidade de área e mede-se em W.m^{-2} .
- Chama-se **exitância radiante** (M), ou **radiosidade** (B), à densidade de fluxo radiante que abandona uma superfície num determinado ponto x :

$$B(x) = \frac{\partial\Phi}{\partial A}$$

- Chama-se **irradiância** (E) à densidade de fluxo radiante incidente num determinado ponto x de uma superfície :

$$E(x) = \frac{\partial\Phi}{\partial A}$$

EXEMPLO:

Se um fluxo radiante de 100 W incide numa superfície com 0.25 m^2 , então a irradiância nessa superfície é de $E = 100 / 0.25 = 400 \text{ W/m}^2$

Radiometria: Radiância

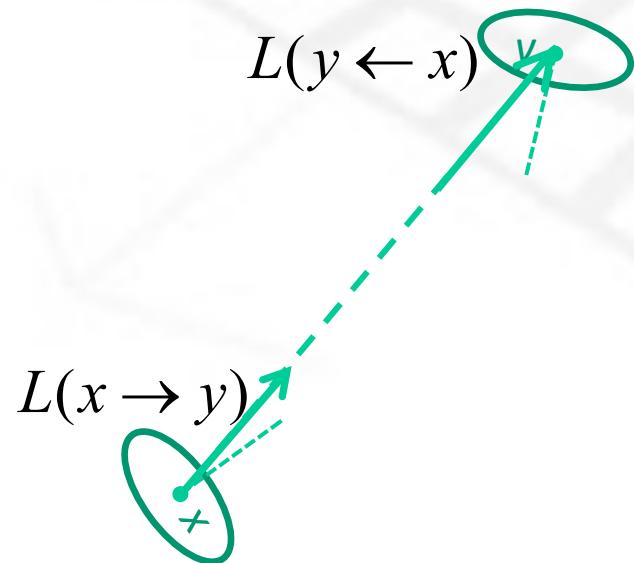
- A **radiância** em cada ponto de uma superfície é o fluxo radiante por unidade de área projectada e por unidade de ângulo sólido (ω); mede-se em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$

$$L(x \leftarrow \Theta) = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA^\perp} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA \cos\theta}$$

- A **radiância** é a grandeza radiométrica mais importante em termos de síntese de imagem, pois :
 - A resposta de sensores, tais como câmaras ou o olho humano, é proporcional à radiância. É portanto a grandeza que captura a aparência de um objecto e pode ser usada para descrever a intensidade da luz num determinado ponto numa determinada direcção;
 - Conhecida a radiância podem-se calcular outras grandezas radiométricas integrando sobre áreas e/ou direcções

Radiância

- A radiância é constante ao longo de linhas rectas no vazio



$$L(x \rightarrow y) = L(y \leftarrow x)$$

A radiância emitida de x para y não varia ao longo do seu percurso no vazio, logo pode ser medida em qualquer ponto do mesmo

Não confundir com $L(x \rightarrow y) \neq L(y \rightarrow x)$
A radiância emitida de x para y não é igual à radiância emitida de y para x

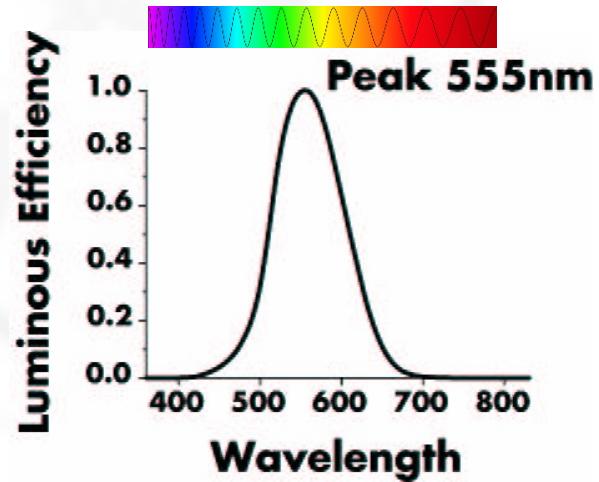
Radiometria

- Estuda a medição da radiância electromagnética, incluindo a luz visível
- Define as quantidades físicas usadas para representar a energia da luz:

Grandeza	Unidade	Descrição
e_λ - Energia do fotão	J (joules)	Energia de um fotão com velocidade c, e comprimento de onda λ
Q – Energia radiante	J (joules)	Energia de um conjunto de fotões
Φ - Fluxo radiante	W (watts)	Potência: energia por unidade de tempo
B – radiosidade	$W\ m^{-2}$	Fluxo diferencial (área diferencial) abandonando cada ponto de uma superfície
E – irradiância	$W\ m^{-2}$	Fluxo diferencial (área diferencial) incidente em cada ponto de uma superfície
L - radiância	$W\ sr^{-1}m^{-2}$	Fluxo por unidade de área projectada e unidade de ângulo sólido

Fotometria

- As grandezas fotométricas são diferentes das radiométricas porque são moduladas pela resposta visual de um observador padrão.
- Referem-se portanto à forma como a luz é percepcionada por um humano e não aos seus valores físicos absolutos.
Por exemplo, a luminância (equivalente fotométrico da radiância) tem em consideração que uma quantidade de energia radiante na zona do verde será percepcionada por um humano como mais brilhante do que a mesma quantidade de energia na zona do azul.
- A resposta visual, ou eficiência luminosa, de um observador humano padrão foi medida e catalogada, sendo referida como $V(\lambda)$, onde λ varia entre 380 e 780 nm



Fotometria

- O fluxo luminoso, Φ_v , é o equivalente ao fluxo radiante e mede-se em *lumens*

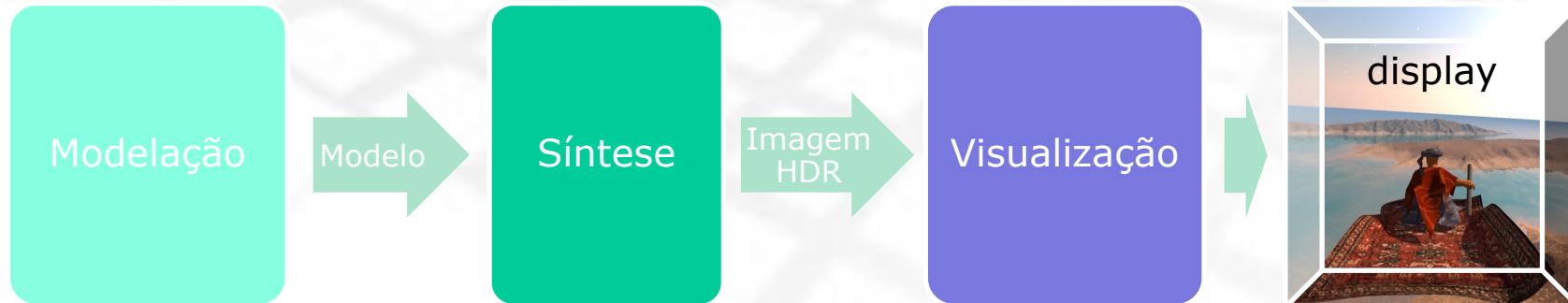
$$\Phi_v = \int_{380}^{780} \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda$$

- A luminância, L_v , é o equivalente à radiância e mede-se em *candelas.m⁻²*

$$L_v(x \leftarrow \Theta) = \frac{d^2 \Phi_v}{d\omega dA \cos \theta} = \int_{380}^{780} L_\lambda(x \leftarrow \Theta) V(\lambda) d\lambda$$

- Os estágios do processo de síntese de imagem que lidam com questões perceptuais trabalham frequentemente com grandezas fotométricas. O mapeamento de tons na fase de visualização da imagem é o exemplo mais comum.

O processo de síntese de imagem

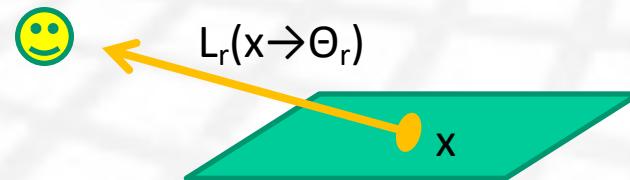


O processo de síntese de imagem: modelação

- Modelo geométrico
 - Descrição da geometria recorrendo a primitivas: triângulos, curvas, pontos, ...
- Materiais: modelo de aparência (*shading model*)
 - Descreve a forma como a luz incidente num objecto interage com o mesmo: proporções da radiância absorvida, reflectida e/ou transmitida (função do comprimento de onda)
 - No caso geral, $L(P_i \leftarrow \Theta_i)$ no instante t_i e comprimento de onda λ_i , pode ser reflectida, ou transmitida, no instante t_r , ponto P_r , direcção Θ_r e comprimento de onda λ_r . Restrições comuns:
 - $t_r = t_i$, impossibilita a modelação da fosforescência
 - $\lambda_r = \lambda_i$, impossibilita a modelação da fluorescência
 - $P_r = P_i$, impossibilita a modelação da dispersão da luz numa superfície
 - *Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)*

A BRDF

- A aparência dos objectos visíveis numa imagem depende da radiância que incide no sensor oriunda de cada ponto visível desse objecto

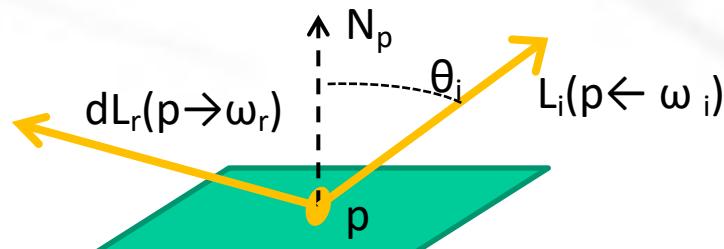


- Na perspectiva da óptica geométrica os objectos podem emitir, reflectir, transmitir ou absorver radiância
- Excluindo a emissão (própria das fontes de luz) a radiância reflectida, transmitida e/ou absorvida depende, entre outros, da radiância incidente nesse objecto
- Para calcular a radiância reflectida numa determinada direcção é necessário, portanto, poder relacioná-la com a radiância incidente

A BRDF

- **Bidirectional Reflectance Distribution Function** (BRDF) – fração da radiância reflectida pelo ponto p na direcção do ângulo sólido diferencial ω_r , devido à radiância incidente ao longo do ângulo sólido diferencial projectado ω_i no mesmo ponto p (para um determinado comprimento de onda λ)

$$dL_r(p \rightarrow \omega_r) = f_r(p, \omega_r \leftrightarrow \omega_i) L_i(p \leftarrow \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$



- **NOTA:** por convenção ambas as direcções, ω_r e ω_i , apontam para “fora” da superfície

A BRDF

- A BRDF - $f_r(p, \omega_r, \omega_i)$ - é uma função hexa-dimensional:
 - 2 dimensões para a posição na superfície de um objecto
 - 2 dimensões para a direcção de incidência
 - 2 dimensões para a direcção de reflexão
- A BRDF depende também do comprimento de onda, λ
 - O espectro é normalmente projectado num espaço tridimensional, sendo o mais comum o RGB.
 - Os sistemas de *rendering* mais comuns usam portanto 3 BRDFs, uma para cada um dos canais R, G e B.
- A BRDF descreve as características dos materiais presentes na cena, modelando a forma como reflectem a iluminação incidente.

BRDF - Propriedades

- RECIPROCIDADE DE HELMOLTZ

O valor da BRDF permanece o mesmo se as direcções de incidência e reflexão foram trocadas entre si:

$$f_r(p, \omega_r \leftrightarrow \omega_i) = f_r(p, \omega_i \leftrightarrow \omega_r)$$

Esta é uma propriedade importante que permite algoritmos que propagam potência a partir das fontes de luz e algoritmos que recolhem radiância a partir da posição do observador

- CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A energia reflectida por uma superfície é menor ou igual à energia incidente nessa superfície:

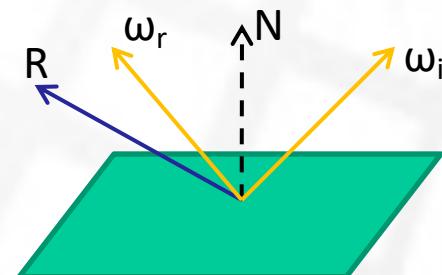
$$\forall \omega_i : \int_{\Omega} f_r(p, \omega_i \leftrightarrow \omega_r) \cos \theta' d\omega_r \leq 1$$

BRDF - Representações

- REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA – MODELOS FENOMENOLÓGICOS
Expressões analíticas que descrevem propriedades qualitativas dos materiais;
Calculam o valor da BRDF dadas as direcções de incidência, ω_i , e reflexão, ω_r ,
e os parâmetros apropriados

- EXEMPLO: Modelo de Phong $f_r(\omega_r, \omega_i) = k_d \cos \theta_i + k_s \langle R, \omega_r \rangle^\alpha$

onde k_d é o coeficiente de reflexão difuso,
 k_s é o coeficiente de reflexão especular
 R é a direcção de reflexão especular
 α é o coeficiente de *glossiness*



BRDF - Representações

- **REPRESENTAÇÕES TABULARES**

As BRDF de materiais reais podem ser medidas em laboratório, sendo depois representadas sob a forma de tabelas para cada par de direcções e comprimento de onda (ex., RGB)

- **BRDF VARIÁVEL**

Quando os parâmetros da BRDF variam ao longo da superfície do objecto, estes são, frequentemente, representados como um mapa (textura) e mapeados na superfície do objecto.

O mapeamento de texturas permite representar detalhes do modelo ao nível dos parâmetros da BRDF, em alternativa a representá-los na geometria.

Exemplo: Mapear o coeficiente de reflexão difusa como uma textura, variando a cor de uma malha de polígonos

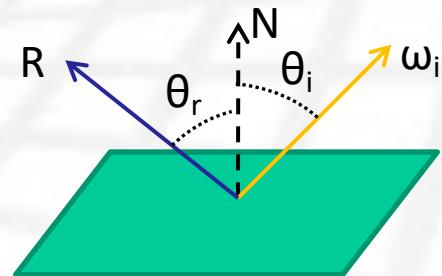
BRDF-Exemplos

- REFLEXÃO ESPECULAR IDEAL

Reflexão apenas ao longo da direcção R

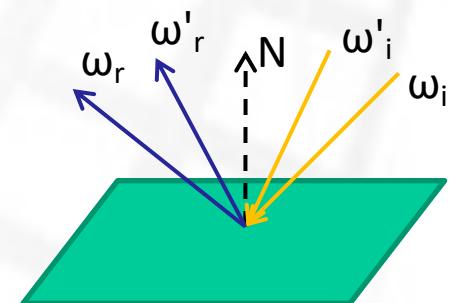
$\theta_r = \theta_i$; R e ω_i situam-se no mesmo plano

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



Do ponto de vista do observador este modelo de reflexão implica que este apenas vê radiância reflectida de uma *única* direcção, ω_i .

Se o observador se move, passa a receber radiância de outra direcção de incidência, ω'_i .



Este é o modelo de reflexão de espelhos ideais.

BRDF-Exemplos

- TRANSMISSÃO ESPECULAR IDEAL
Transmissão apenas ao longo da direcção T
Devido à refracção T e ω_i não são colineares

$$\eta = \frac{\eta_t}{\eta_i} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t}$$

Lei de Snell

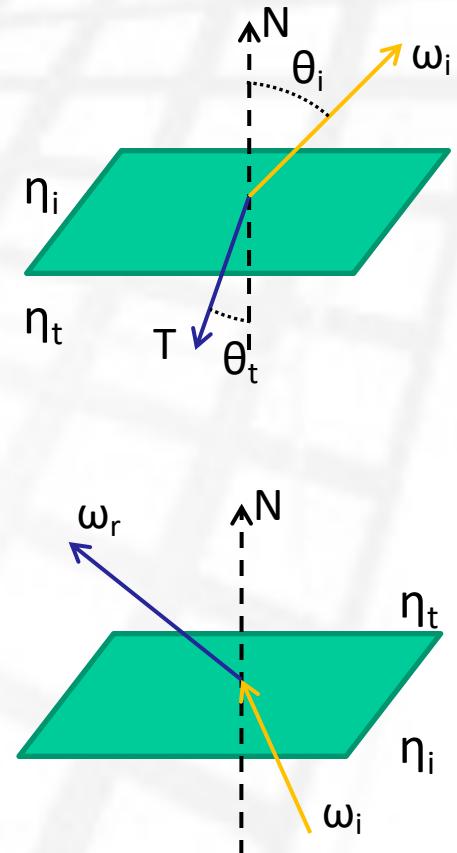
$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} = \sqrt{1 - \eta^{-2}(1 - (\omega_r \cdot N)^2)}$$

$$T = \frac{\omega_r}{\eta} - \left(\cos \theta_t - \frac{(\omega_r \cdot N)}{\eta} \right) N$$

O observador vê radiância transmitida de uma *única* direcção, ω_i , sendo esta refractada de acordo com os índices de refracção dos 2 meios em que a luz se propaga.

Este é o modelo de reflexão de vidros ideais.

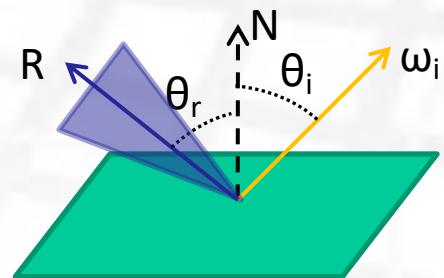
Visualização e Iluminação



BRDF - Exemplos

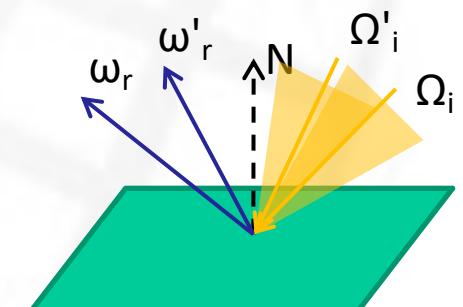
- *GLOSSINESS*

Reflexão ao longo da direcção de reflexão R e, com intensidade decrescente, num cone de direcções em redor de R



Do ponto de vista do observador este modelo de reflexão implica que este vê radiância reflectida de um cone de direcções, Ω .

A clareza com que os objectos reflectidos numa superfície *glossy* são percepcionados depende do índice de *glossiness* ou *roughness*.



BRDF - Exemplos

- REFLEXÃO DIFUSA (*LAMBERT*)

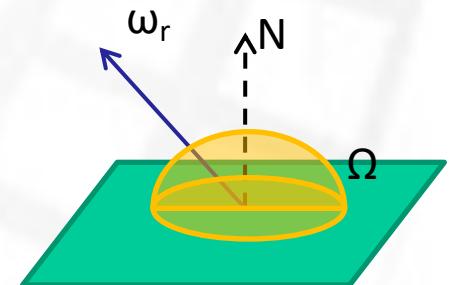
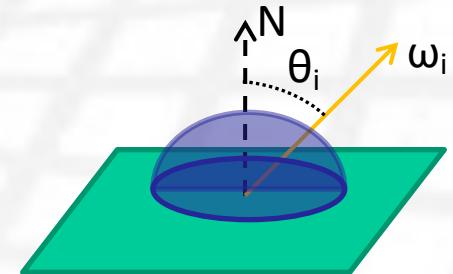
A radiância incidente é reflectida com a mesma intensidade em **TODAS** as direcções

Do ponto de vista do observador este modelo de reflexão implica que este vê radiância reflectida de **todas** as direcções de incidência situadas na semiesfera, Ω .

O coeficiente de reflexão difusa, ρ_d , modula com igual peso a contribuição de cada direcção:

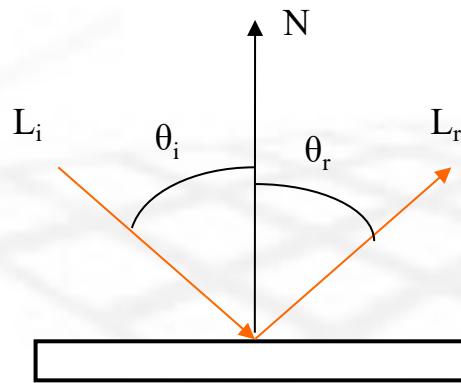
$$L(p \rightarrow \omega_r) = \int_{\Omega} \rho_d \cos \theta_i L(p \leftarrow \omega_i) d\omega_i$$

A radiância reflectida na direcção do observador é independente da sua posição.

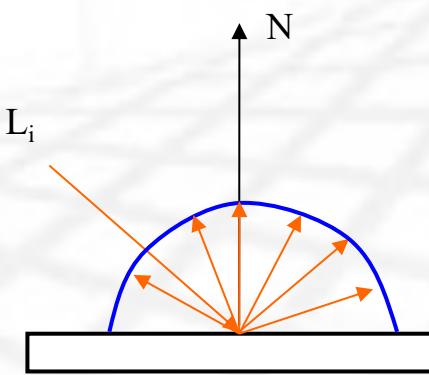


O processo de síntese de imagem: modelação

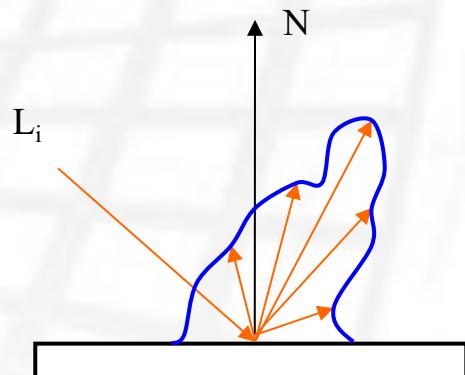
Reflexão



Especular

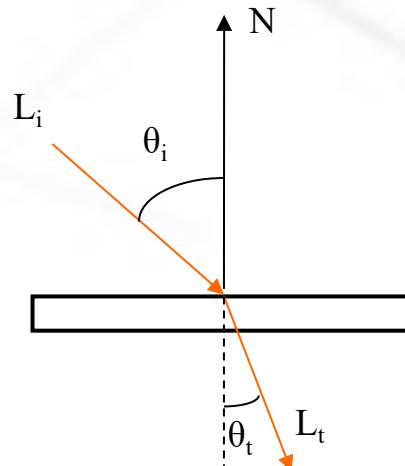


Difusa

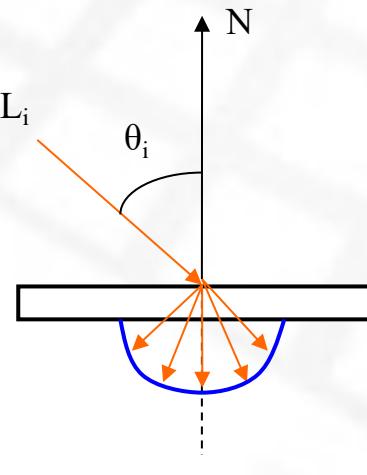


Glossy

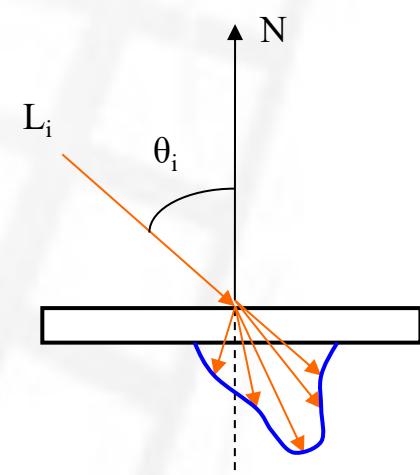
Transmissão



Especular



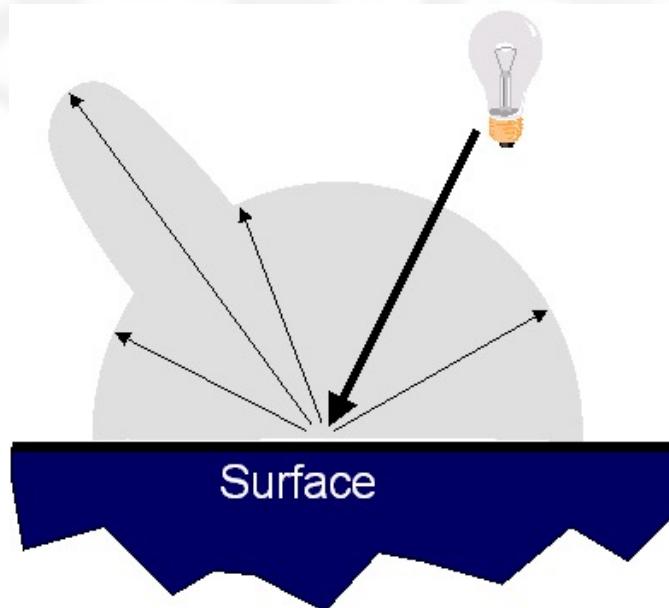
Difusa



Translúcida

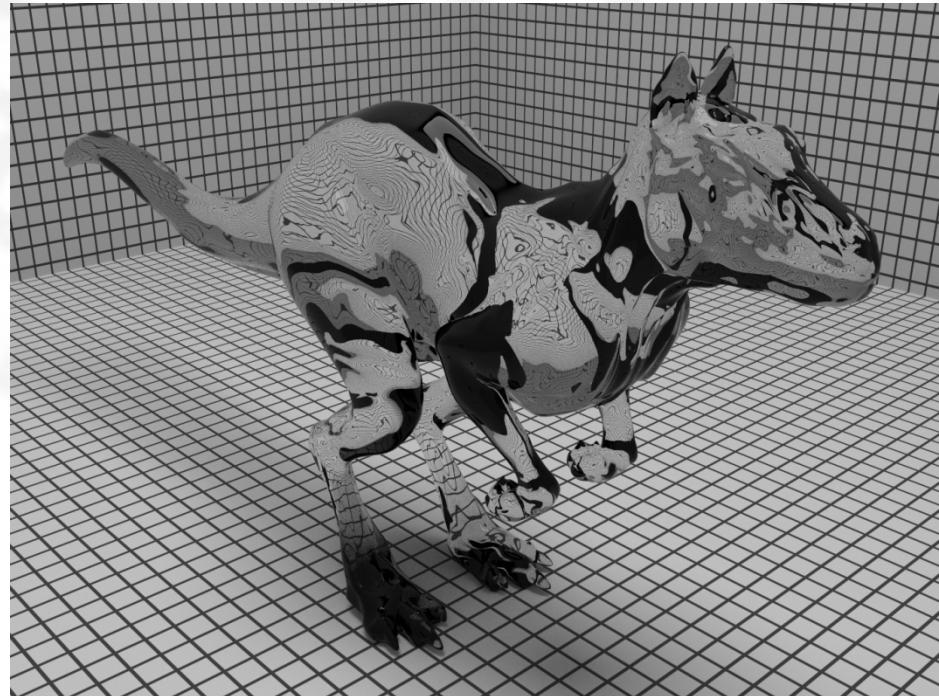
BRDF - exemplos

- As superfícies reais exibem BRDFs que são combinações dos modelos de reflexão difuso, especular e *glossy*
- Exemplo: o modelo de Phong (empírico) inclui as componentes difusa e *glossy*



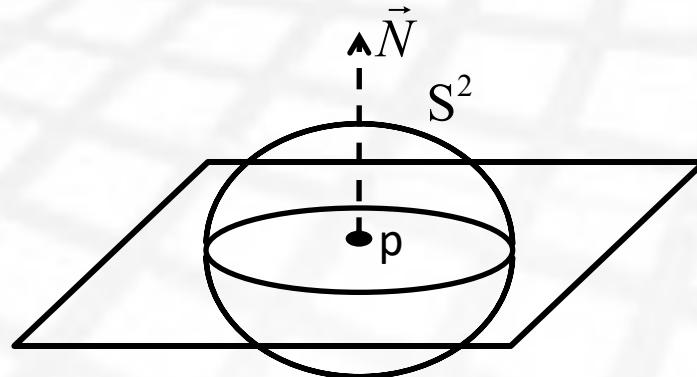
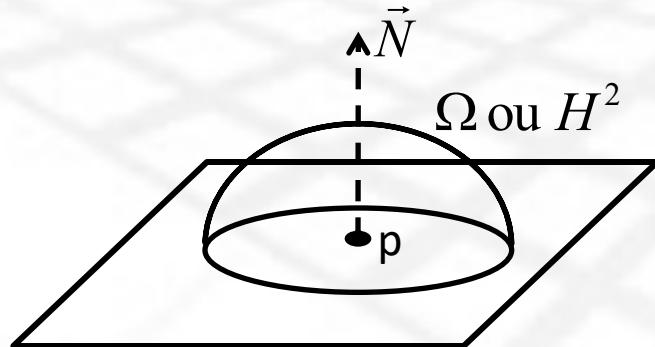
BRDF - Exemplos

- O modelo de Phong é empírico, não baseado nas leis da física, mas é utilizado frequentemente devido à sua simplicidade.
- Outros modelos de reflexão incluem:
 - Oren-Nayar (difuso)
 - Torrance-Sparrow (*glossy*)
 - LaFortune(difuso)
 - Fresnel term(especular)



BRDF, BTDF, BSDF

- Dependendo dos autores a BRDF pode estar definida apenas na semiesfera ou na esfera definidas pelo ponto p e normal \vec{N}



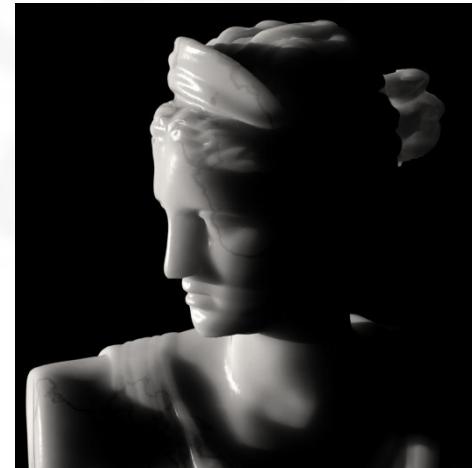
- Alguns autores designam por BTDF (*BIDIRECTIONAL TRANSMISSION DISTRIBUTION FUNCTION*) a função referente à semiesfera do lado oposto à direcção de incidência e que caracteriza as transmissões de radiância. Neste caso a função que caracteriza a totalidade da semiesfera, constituída por uma BRDF e uma BTDF é a BSDF (*BIDIRECTIONAL SCATTERING DISTRIBUTION FUNCTION*)

BSSRDF

- BSSRDF (*BIDIRECTIONAL SURFACE SCATTERING DISTRIBUTION FUNCTION*) : a radiância incidente num ponto p com uma direcção ω_i abandona a superfície num outro ponto q com direcção ω_r

$$L_r(q \rightarrow \omega_r) = \int \int_A S(p, \omega_i, q, \omega_r) L_i(p \leftarrow \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i dA$$

Alguns materiais (ex. pele, mármore, neve) devem ser modelados usando a BSSRDF e modelos de iluminação designados por *subsurface scattering*.



O processo de síntese de imagem: *rendering*

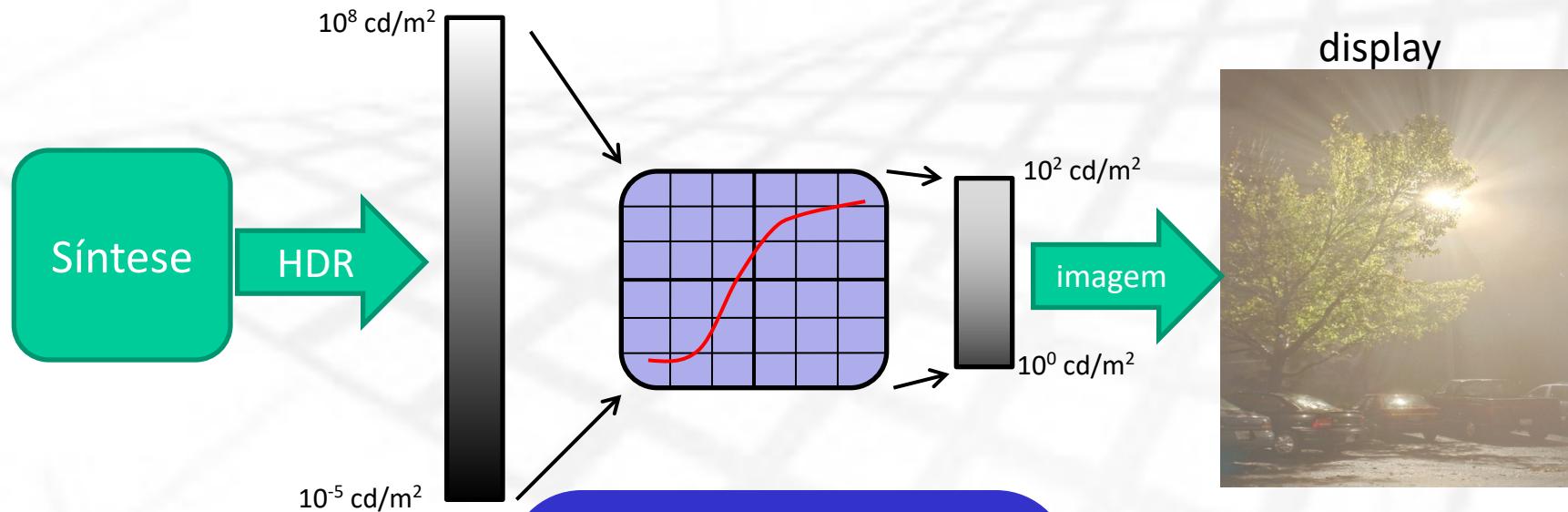
- A síntese da imagem (*rendering*) corresponde ao **cálculo da distribuição da potência radiante na cena**, i. e., à resolução da **Equação de Transporte de Luz** (*rendering equation*)
- A Equação de Transporte de Luz é um integral sem resolução analítica, pelo que os algoritmos de síntese de imagem são **integradores numéricos** que calculam **soluções aproximadas**
- Estes integradores calculam o transporte de luz na cena – os fenómenos de iluminação simulados dependem do subconjunto efectivamente amostrado do domínio de integração

O processo de síntese de imagem: *rendering*

- No contexto da **óptica geométrica** o processo de **síntese de imagem** consiste em:
 - entre o número infinito de **trajectos que a luz pode percorrer** desde as fontes até ao sensor
 - **seleccionar** qual o número finito de trajectos a considerar: N
 - **seleccionar** N trajectos: ω_i , $i = 0 .. N-1$
 - **atribuir um peso** a cada trajecto seleccionado: α_i , $i = 0 .. N-1$
 - calcular a **contribuição** (radiância) de cada trajecto: $L(\omega_i)$
 - **combinar linearmente** as várias contribuições, considerando a BRDF: $f_r(\omega_i)$

$$L = \sum_{i=0}^{N-1} (\alpha_i * f_r(\omega_i) * L(\omega_i))$$

O processo de síntese de imagem: visualização



Renderers baseados na física produzem imagens com alta gama dinâmica (HDR), cujas luminâncias cobrem tipicamente um intervalo de 14 ordens de magnitude:
 $[10^{-5} .. 10^8] \text{ cd/m}^2$

Visualização

Estes algoritmos mapeiam os tons do mapa HDR nos tons do monitor usando um operador designado por *tone mapping*

Os monitores convencionais cobrem tipicamente um intervalo de luminância de 2 ordens de magnitude:
 $[10^0 .. 10^2] \text{ cd/m}^2$

O processo de síntese de imagem: visualização



Sub-Exposição

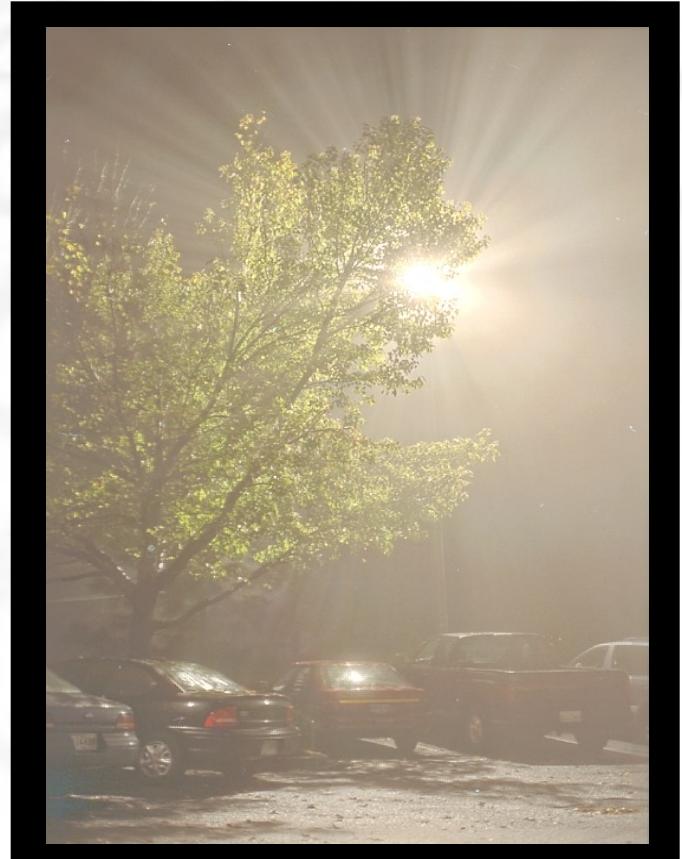
Visualização e Iluminação



Sobre-Exposição

O processo de síntese de imagem: visualização

Os algoritmos de *tone mapping* tentam preservar contraste, visibilidade e brilho aparente, num equilíbrio entre estes objectivos contraditórios.



HDR capture

Original images



-4 stops



-2 stops



+2 stops



+4 stops

Results after processing



Simple contrast reduction



Local tone mapping