
B4M39RSO

Odraz světla, BRDF

Vlastimil Havran
ČVUT v Praze – CTU Prague
Verze 2022

Interakce světla s povrchem

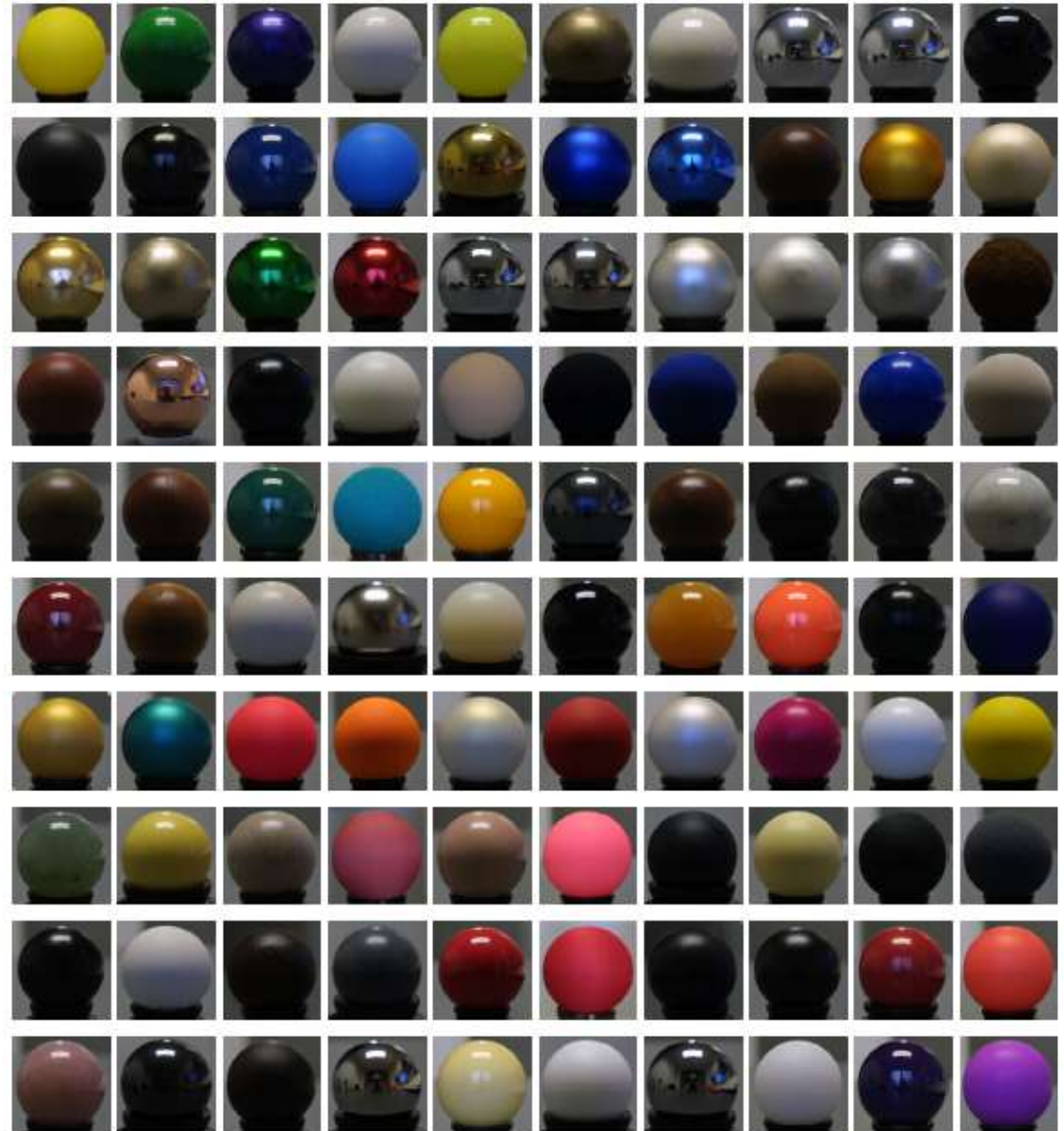
- Odraz
 - Lom
 - Rozptyl pod povrchem

 - Základní optické vlastnosti materiálu určuje vztah odchozí (odražené) záře (radiance) L^o k příchozí záři L^i a tím i vzhled objektu: barva, lesklost atd.

 - Neboli: materiál určuje odezvu povrchu na osvětlení
-

Interakce světla s povrchem

- Stejné osvětlení
- Různé materiály



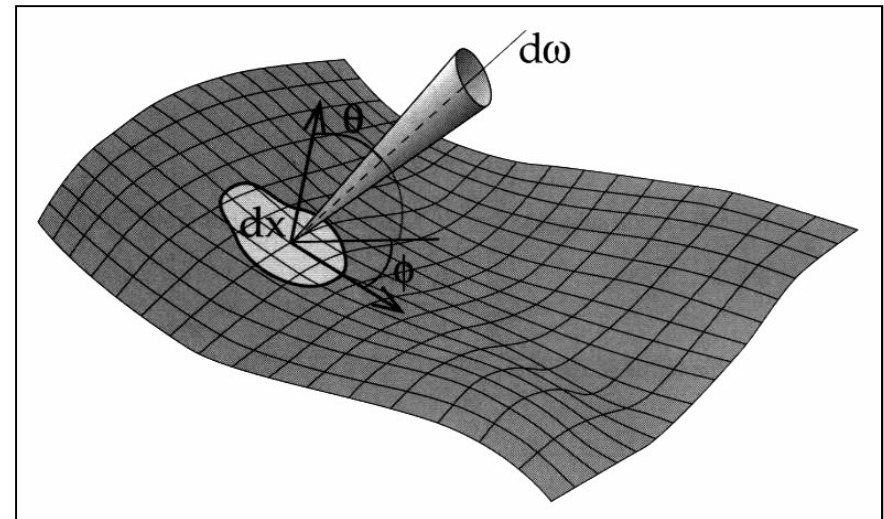
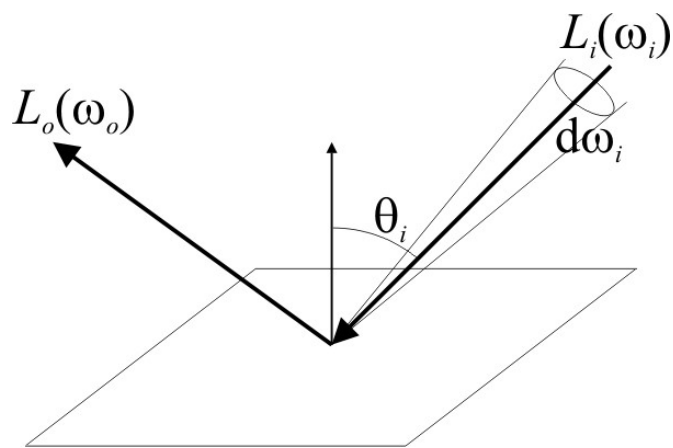
Zdroj: MERL BRDF database

BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function

Definice BRDF:

$$f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_o) = \frac{dL_o(\mathbf{x}, \omega_o)}{dE(\mathbf{x}, \omega_i)} = \frac{dL_o(\mathbf{x}, \omega_o)}{L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$

- Jednotka: [1/sr]

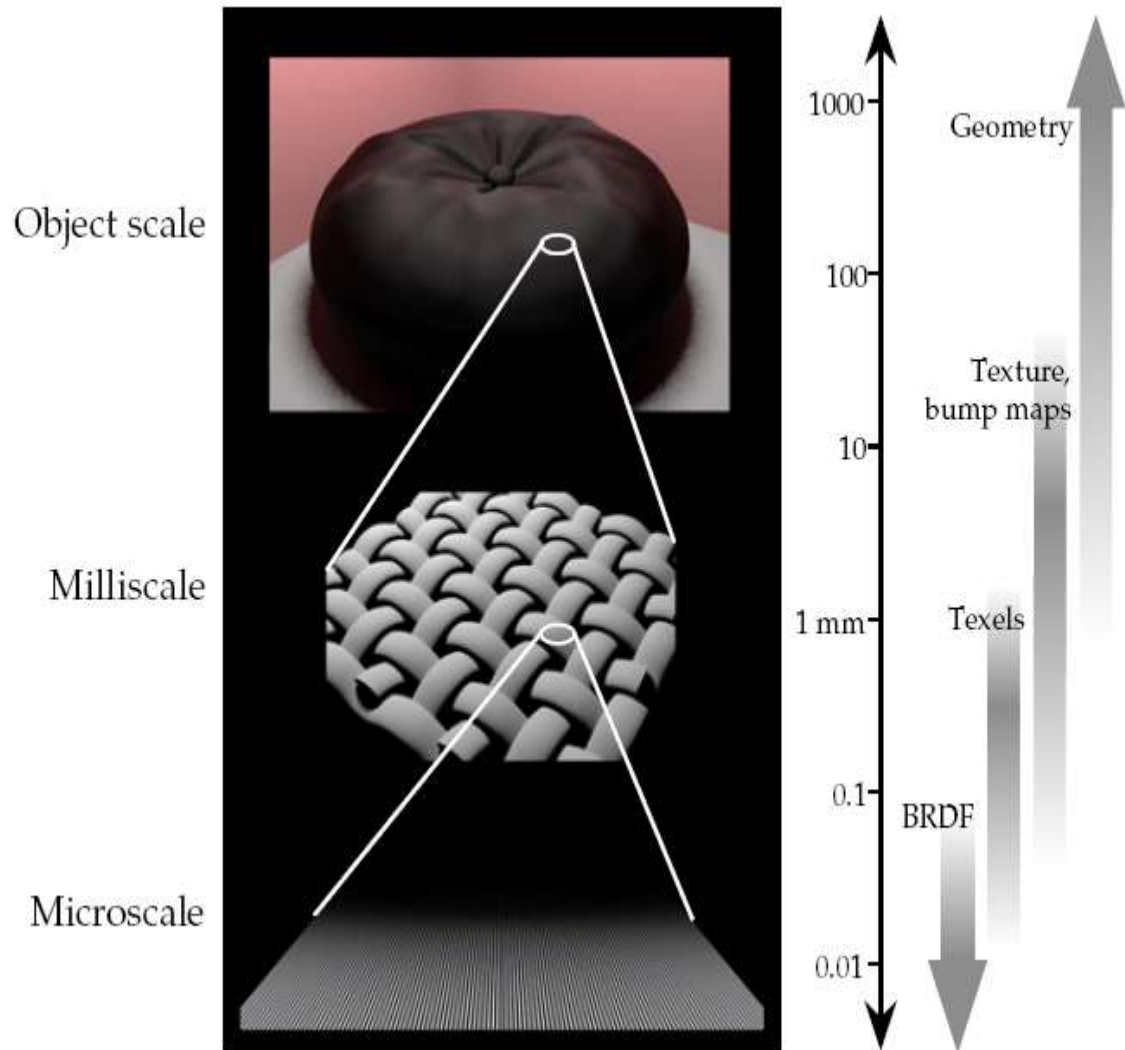


BRDF poznámky

- Abstraktní matematický popis odrazivých vlastností povrchu pro jeho jeden bod, daná radiometricky
 - Funkce závisí na vlnové délce, nejčastěji v modelu RGB, pak prakticky má 5 dimenzí
 - Další fyzikální závislost je například na teplotě či tlaku
 - Definice může, ale nemusí respektovat fyzikální podstatu odrazu světla
 - Pravděpodobnostní interpretace:
 - Jaká je pravděpodobnost, že foton, který dopadne na plochu ze směru ω_i bude odražen ve směru ω_o .
 - Vícerozměrná hustota pravděpodobnosti
 - BRDF
 - Anglicky: Bidirectional reflectance distribution function (také bi-hemispherical reflectance)
 - Česky: Dvousměrová distribuční funkce odrazu, častěji BRDF
-

BRDF

- BRDF je modelem mikrostruktury při pohledu z dálky
- Mezi miliscale a mikroscale se v grafice používá také termín: **meso-scale**



Vlastnosti BRDF

- Nezápornost
- Může jít k nekonečnu
- Helmholtzova reciprocita pro fyzikálně simulované BRDF modely:

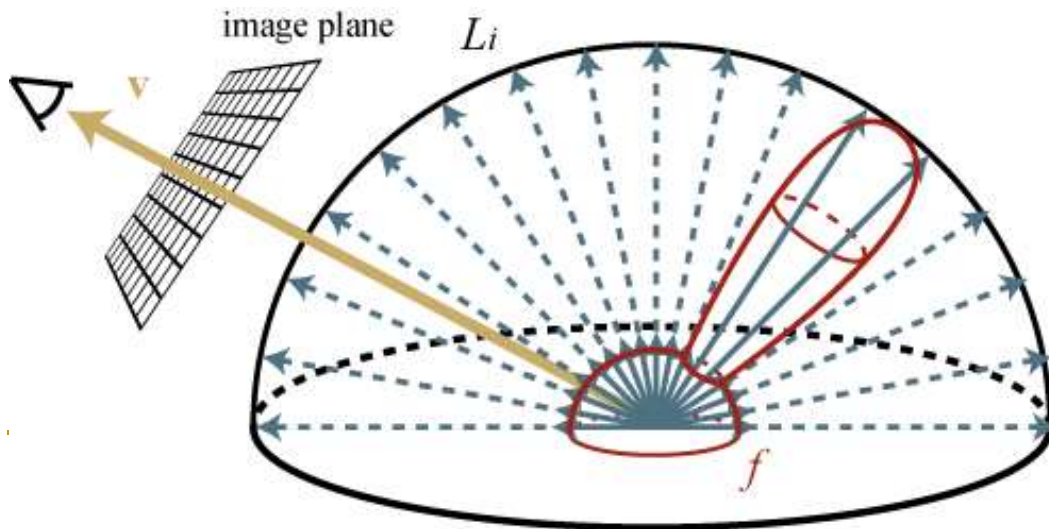
$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i)$$



Rovnice odrazu

- Angl. reflectance equation, illumination integral
- “Kolik světla je odraženo do směru ω_o ?”
(v závislosti na množství dopadajícího světla L_i a materiálu povrchu f)
- Z definice BRDF: $dL_o(\omega_o) = L_i(\omega_i) f_r(\omega_i, \omega_o) \cos \theta_i d\omega_i$
- Integrace přes hemisféru:

$$L_o(\omega_o) = \int_{H(x)} L_i(\omega_i) f_r(\omega_i, \omega_o) \cos \theta_i d\omega_i$$



Odrazivost (reflektance, albedo)

- Poměr příchozího a odchozího toku.
- Směrovo-hemisférická odrazivost, a.k.a.: albedo
 - „Kolik světla se odrazí do směru ω_o při osvětlení uniformní jednotkovou příchozí radiancí.“

$$\rho(\omega_o) = a(\omega_o) = \int_{H(\mathbf{x})} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_o) \cos \theta_i d\omega_i$$

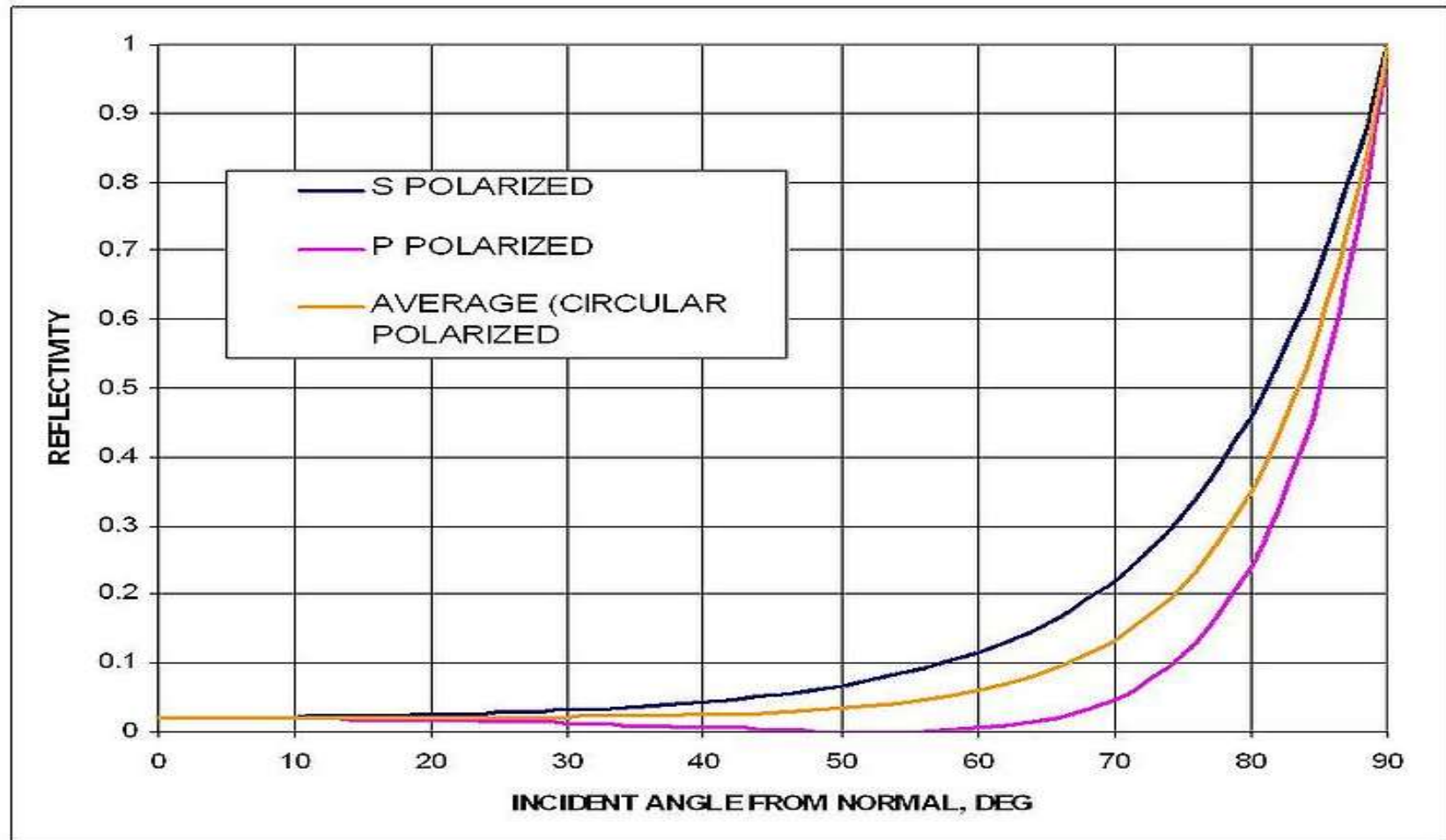
- Vždy je nezáporná a menší nebo rovna 1 = odpovídá zákonu o zachování energie.
- Ekvivalentní se hemisféricko-směrová reflektancí:
 - „Jaké procento světelného toku příchozího ze směru ω_i je odraženo (do libovolného směru).“
 - Ekvivalence vyplývá z Helmholtzovy reciprocity pro BRDF

Hodnoty odrazivosti (albeda)

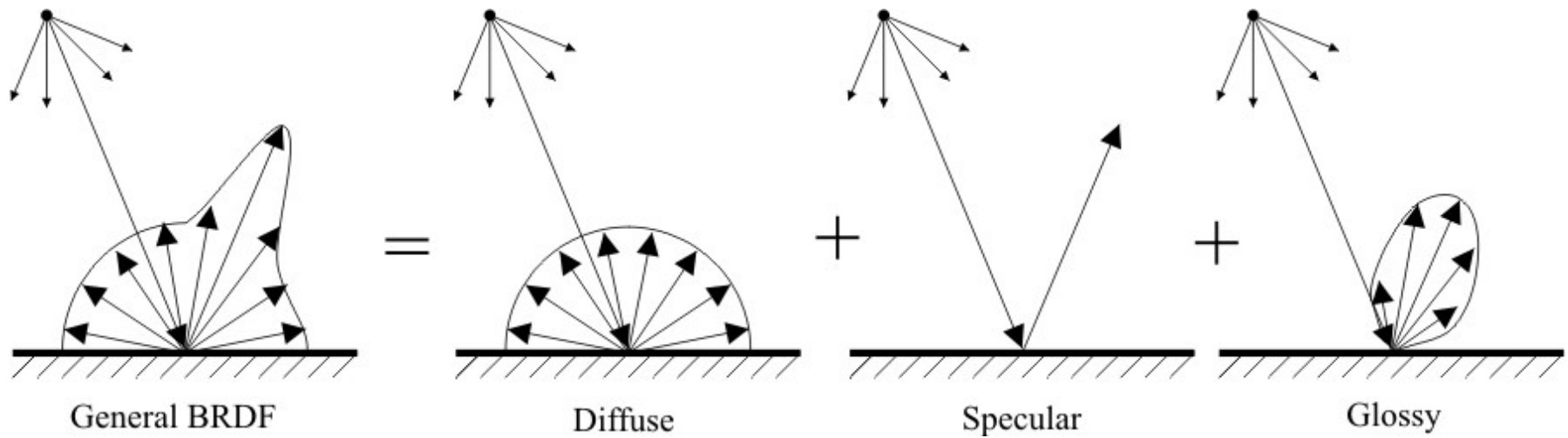
Udává se normálně pro viditelné spektrum:

- 0,005 nanouhlík
 - 0,01 černý samet
 - 0,06 čiré sklo
 - 0,12 Měsíc (původní definice albeda)
 - 0,25 zelená tráva
 - 0,3-0,71 bílý mramor
 - 0,55 bílý silon
 - 0,8-0,9 čerstvý sníh
 - 0.98 speciální referenční materiály
-

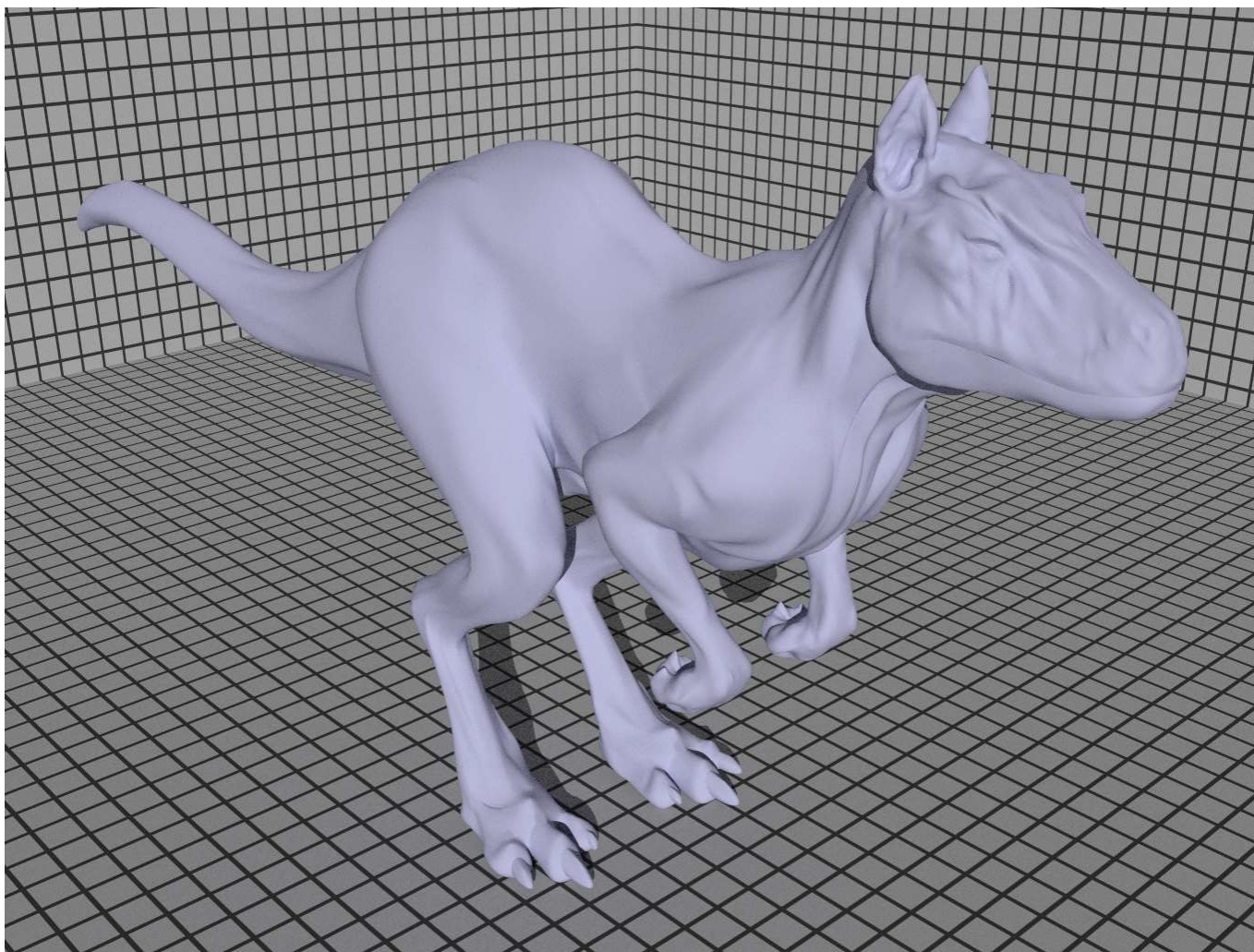
Odrazivost (albedo) pro vodu, závislost na úhlu dopadajícího světla, 20°C



Druhý BRDF



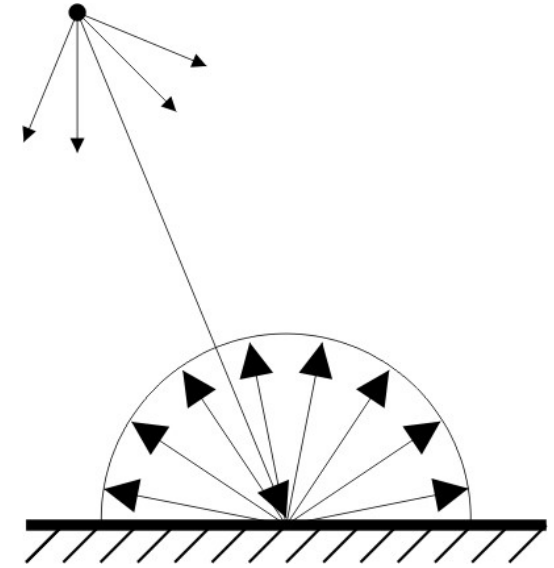
Ideální difúzní odraz



Ideální difúzní odraz

- A.k.a. Lambertovský odraz

- Johann Heinrich Lambert, „Photometria“, 1760.



- Konstantní BRDF (nezávislá na ω_i , ω_o)

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r$$

- Odraz na Lambertovském povrchu:

- L_o nezávisí na ω_o
pohledově nezávislý odraz

$$\begin{aligned} L_o(\omega_o) &= f_r \int_{H(\mathbf{x})} L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \\ &= f_r E \end{aligned}$$

- Odrazivost Lambertovském povrchu:

- Lambertovská BRDF je $\leq 1/\pi$ $\rho = \pi f_r$ (odvod'te)

“White-out Condition” – zatažená obloha



Nemožnost rozeznat tvar z pohledu na krajinu („boule“)



Při osvětlení lampou je možné tvar rozeznat.

PROČ?

Difúzní odrazivost z oblohy s konstantní září

$$L^{surface}(\theta_o, \phi_o) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i(\theta_i, \phi_i) f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$$

- Předpokládej ideálně difúzní (lambertovský povrch) albedo = 1

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{1}{\pi}$$

- Předpokládej konstantní zář ze zatažené oblohy

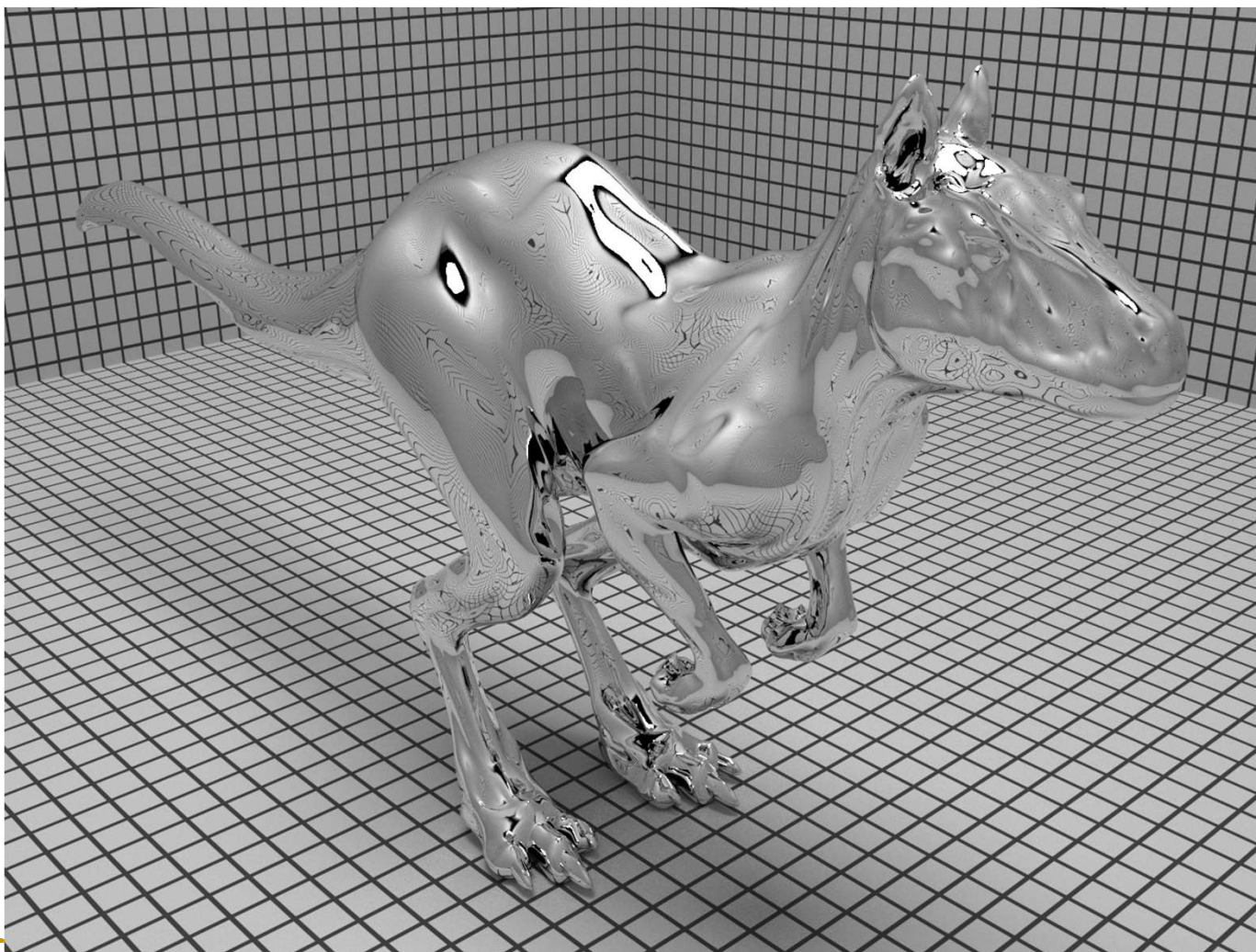
$$L_i(\theta_i, \phi_i) = L^{sky}$$

- Výsledek rovnice po substituci:

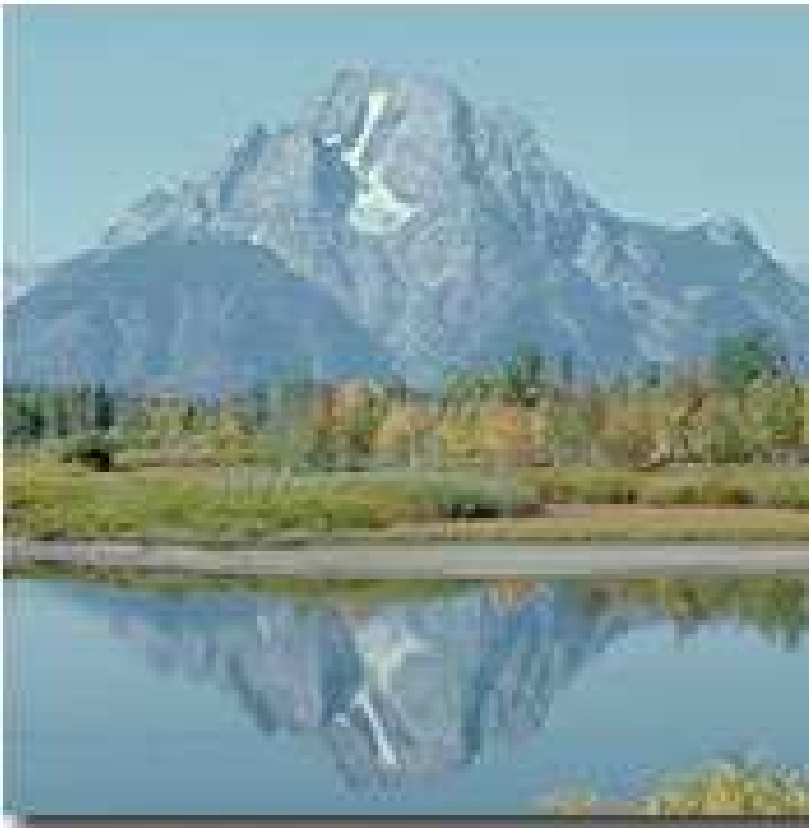
$$L^{surface}(\theta_o, \phi_o) = L^{sky}$$

Zář pro kteroukoliv plošku bez ohledu na její normálu je stejná !! (white-out condition)

Ideální zrcadlový odraz



Reflections From the Surface of Water



Smooth Water Surface



Wavy Water Surface

Figure 1



Nishino, Nayar: Eyes for Relighting, SIGGRAPH 2004

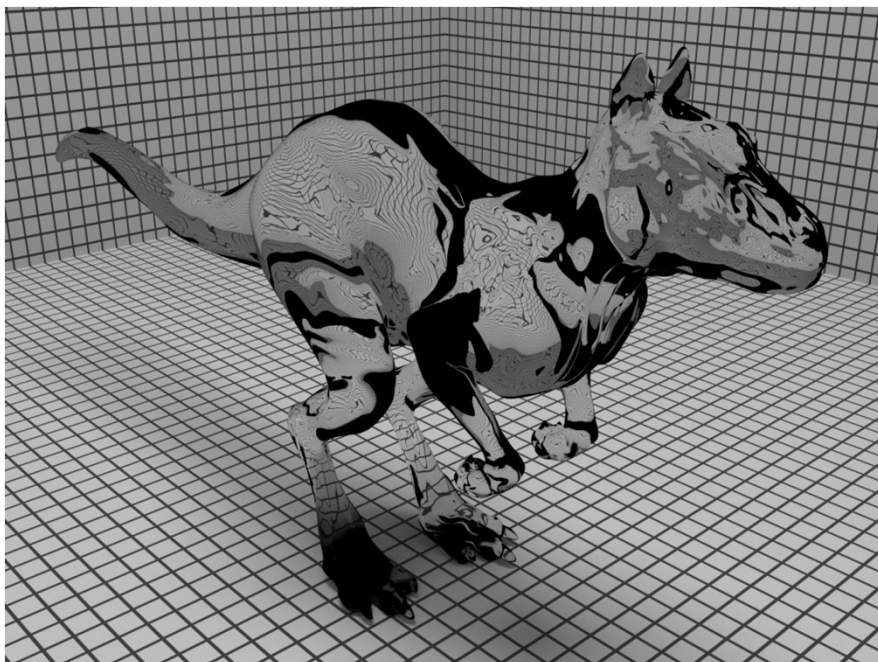
Ideální zrcadlový odraz

- BRDF je delta-distribuce (Diracův impuls)
 - Tj. pro daný příchozí směr ω_i existuje jediný směr ω_o , pro který je BRDF nenulová, a to:
 - směr odraženého paprsku

$$\omega_o = 2(\omega_i \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} - \omega_i$$

- V reálném světě neexistuje odpovídající materiál
-

Ideální zrcadlový lom



Ideální lom světla

- Index lomu (voda 1.33, sklo 1.6, diamant 2.4)
- Snellův zákon: $\eta_i \sin \theta_i = \eta_o \sin \theta_o$
- Směr lomeného paprsku:

$$\omega_o = -\eta_{io} \omega_i - \left[\eta_{io} \cos \theta_i + \sqrt{1 - \eta_{io}^2 (1 - \cos^2 \theta_i)} \right] \mathbf{n}$$

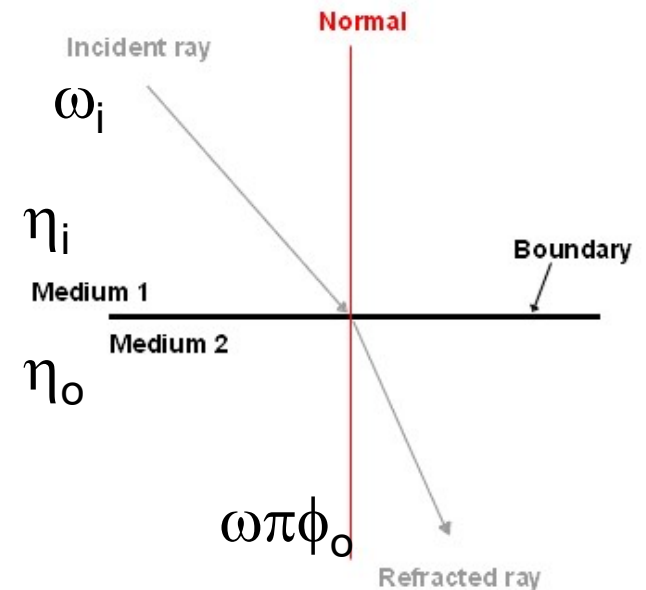
$$\eta_{io} = \frac{\eta_i}{\eta_o}$$

- Mění se radiance!!!!

$$L_o = \tau L_i \frac{\eta_o^2}{\eta_i^2}$$

τ ... činitel prostupu (transmittance)

- Brewsterův úhel – dochází k totálnímu odrazu



Fresnelovy faktory



- Čti [frenel]
- Poměr lomeného a odraženého světla závisí na směru pohledu
 - Shora – více lomeného
 - Ze strany – více odraženého
- Důležité pro realistický rendering skla nebo vody, ale i jiných lesklých materiálů

- Neplést s Fresnelovými čočkami (používají se pro majáky)



Fresnelovy faktory

Kelemen and Szirmay-Kalos / Microfacet Based BRDF Model



Figure 1: Photos of a specular table from different angles. Note that the table becomes more mirror-like for greater viewing angles

Ze strany

- málo lomu
- hodně odrazu

Vyzkoušejte!!!

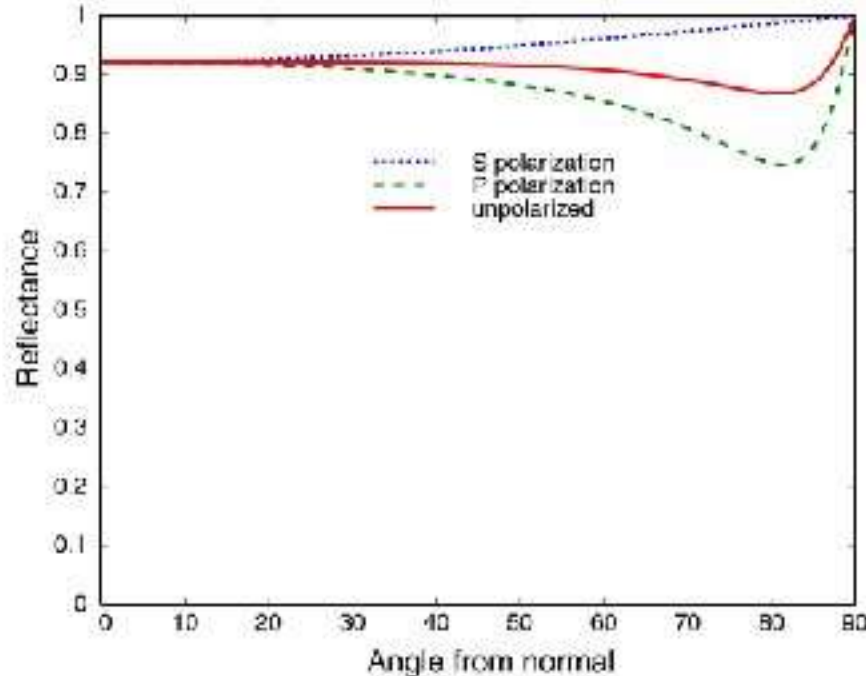
Shora

- málo odrazu
- hodně lomu

Závislost způsobena Fresnelovým faktorem

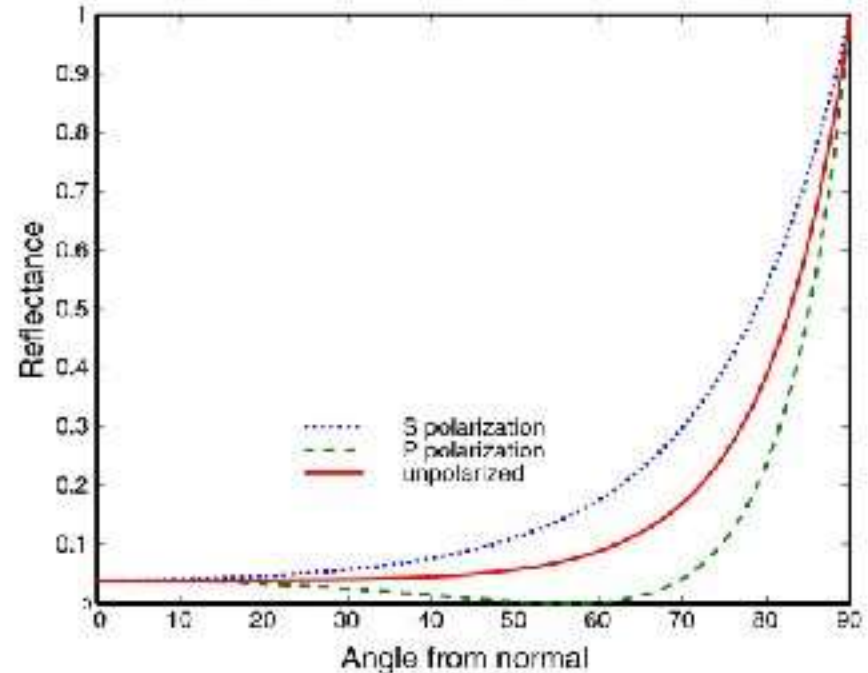
Fresnel Reflectance

Metal (Aluminum)



Gold $F(0)=0.82$
Silver $F(0)=0.95$

Dielectric (N=1.5)

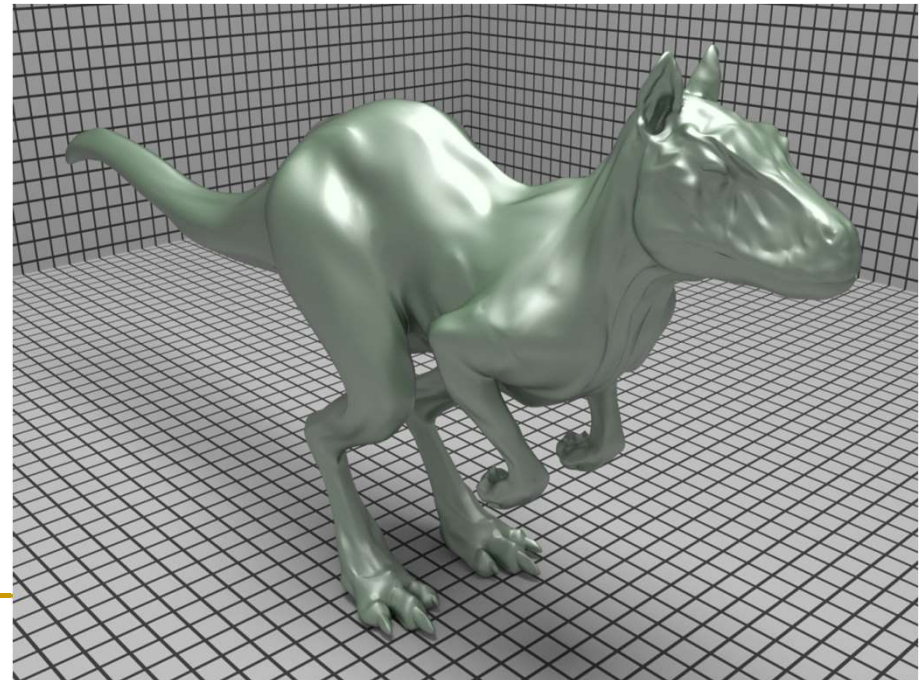
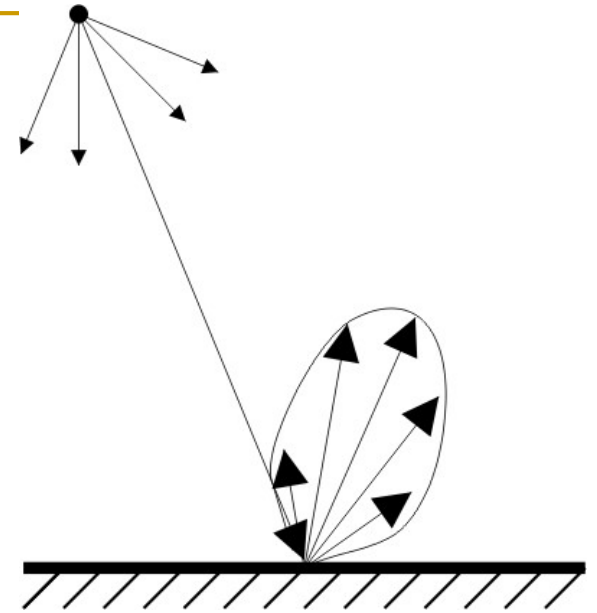


Glass $n=1.5$ $F(0)=0.04$
Diamond $n=2.4$ $F(0)=0.15$

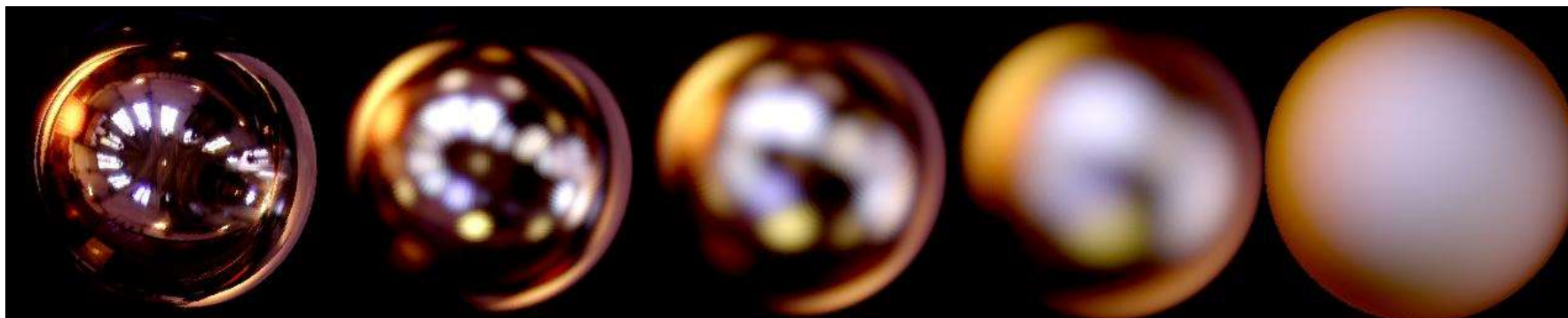
Schlick Approximation $F(\theta) = F(0) + (1 - F(0))(1 - \cos\theta)^5$

Lesklý odraz

- Ani difúzní, ani ideálně zrcadlový
- Většina skutečných materiály spadají do této kategorie
- Anglicky to je “glossy”



Hrubost povrchu a rozmazané odrazy

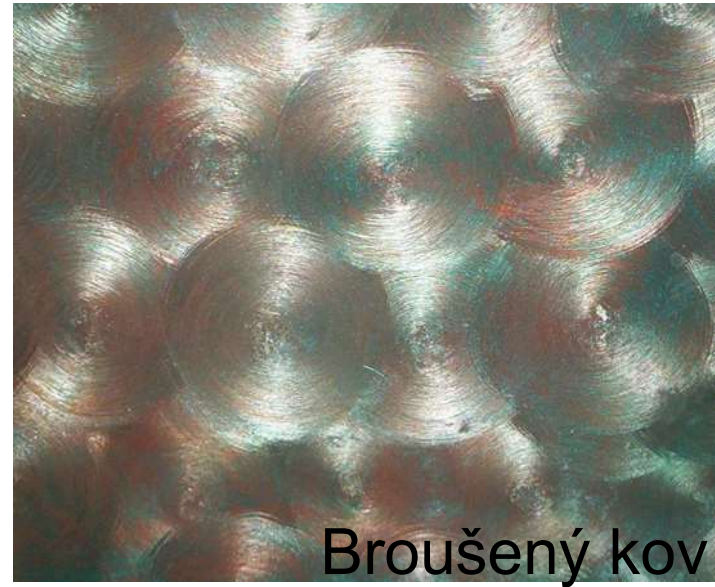


→
Mikroskopická hrubost povrchu

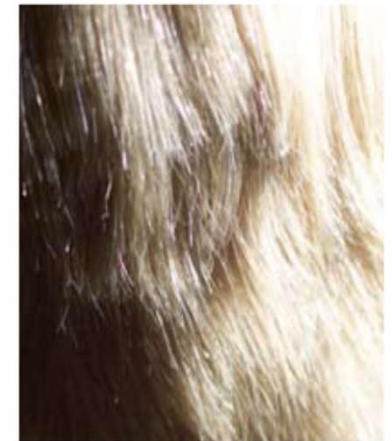
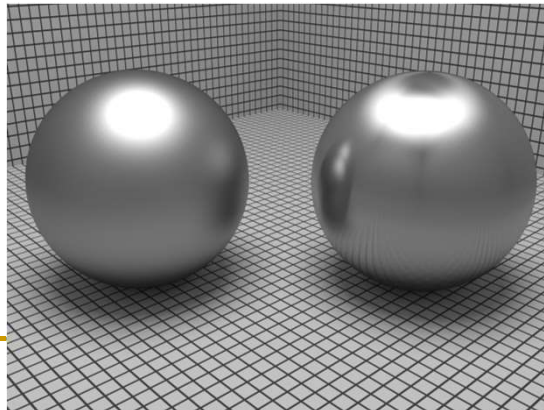
Anizotropie BRDF



Figure 9: Anisotropic Aluminum Wheel



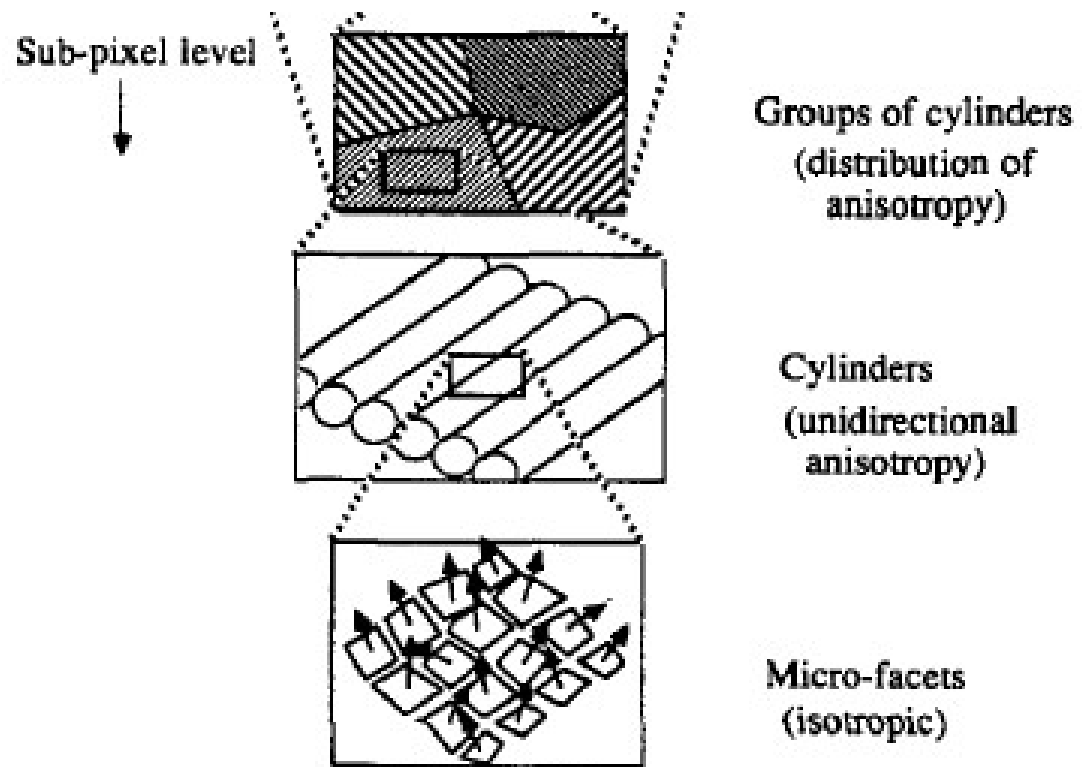
Broušený kov



fibers

Anizotropie BRDF

- Různá mikroskopická hrubost povrchu v různých směrech

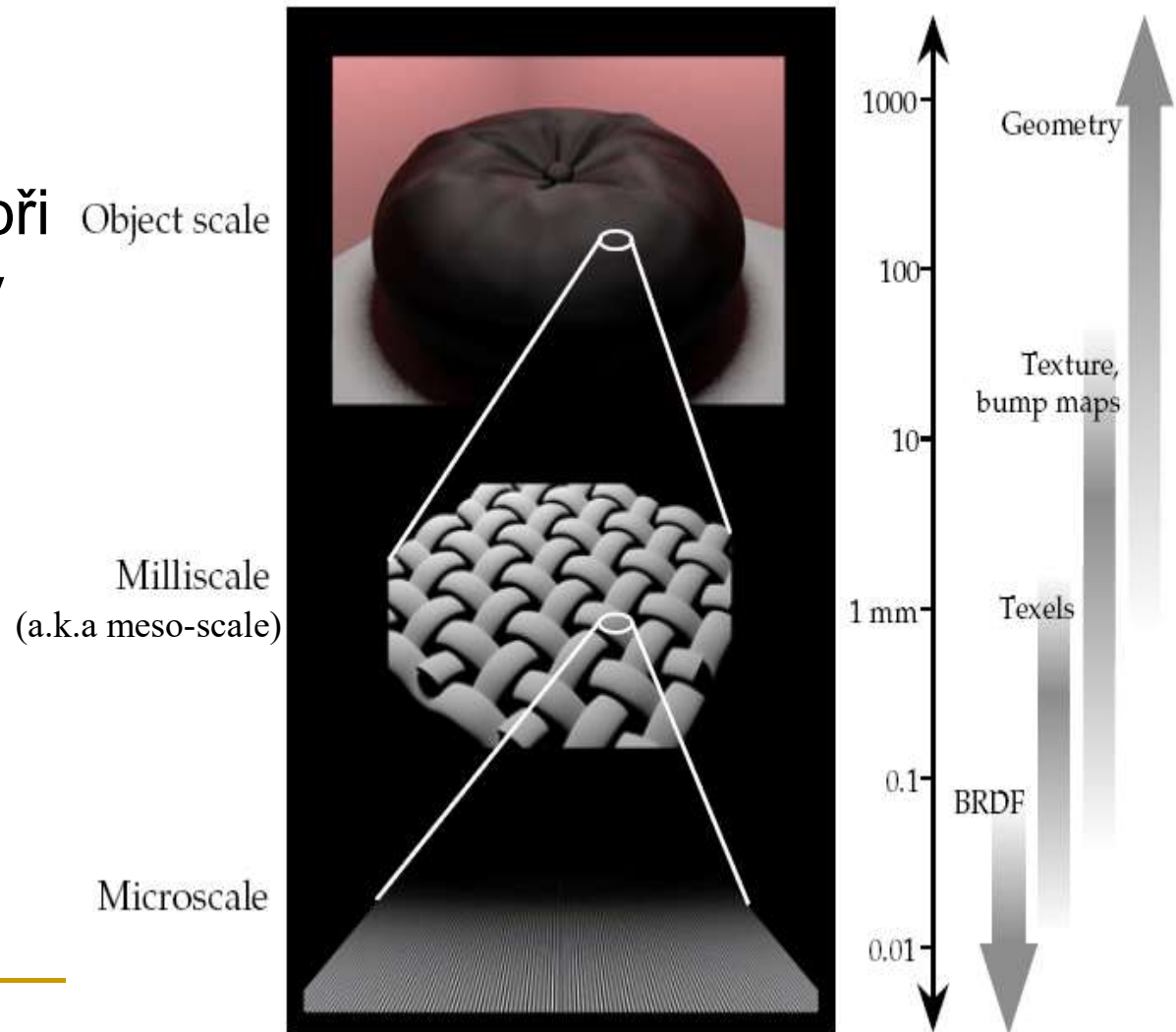


Anizotropie BRDF

- Otočím-li plochu kolem normály, změní se vzhled (to by se u isotropní BRDF nestalo!)
 - Izotropní BRDF jsou pouze 3D
 - Místo ϕ_i a ϕ_o stačí uvažovat pouze $\Delta\phi = \phi_i - \phi_o$
 - To pro popis anizotropní BRDF nestačí
 - Pro popis anizotropní BRDF v bodu:
 - ϕ_i a ϕ_o se musí vztáhnout k referenčnímu (lokálnímu) souřadnému systému U,V,N
 - U ... tangenta – směr broušení kovu
 - V ... bitangenta – kolmá na tangentu
 - N ... normála ... osa z lokálního souřadného systému
-

Modelování BRDF

- BRDF je modelem mikrostruktury při pohledu z dálky
- Modely BRDF
 1. Empirické
 2. Fyzikálně motivované
 3. Aproximace měřených dat

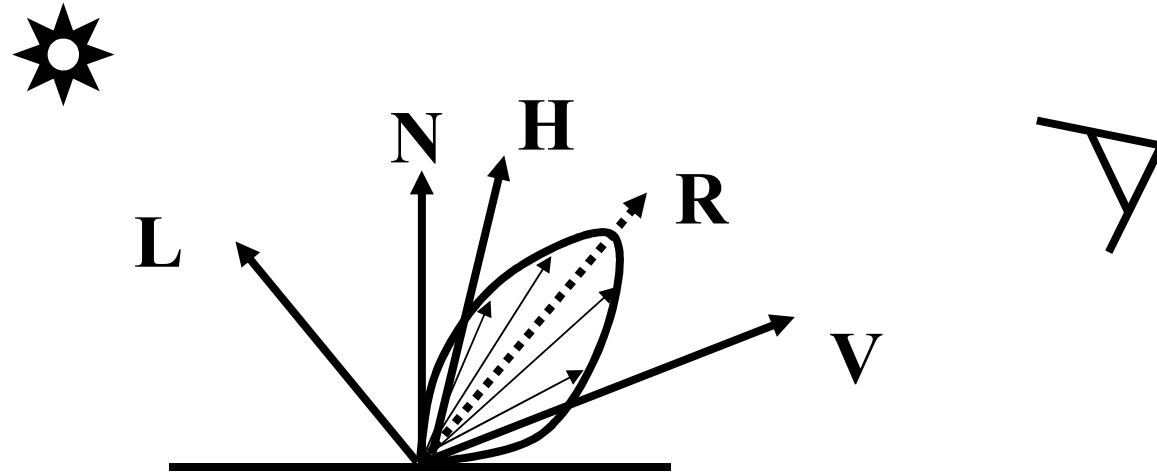


Modelování BRDF:

1) Empirické modely

- Libovolný vzoreček mající za argumenty ω_i a ω_o
 - ω_i a ω_o se někdy značí L (light direction) a V (viewing direction)
 - Např. Phongův model, Blinnův model
 - Libovolné shadery
-

Phongův a Blinnův osvětlovací model



Phong

$$C = I \left(\rho_d (N \cdot L) + \rho_s (V \cdot R)^{n_{shiny}} \right)$$

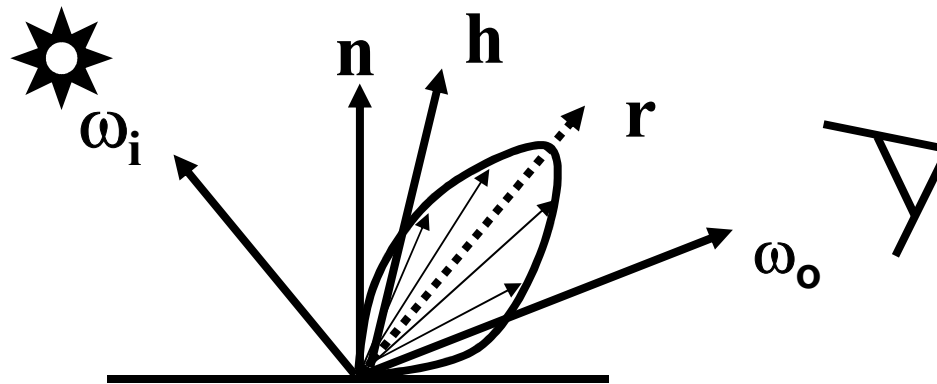
$$R = 2(N \cdot L)N - L$$

Blinn

$$C = I \left(\rho_d (N \cdot L) + \rho_s (N \cdot H)^{n_{shiny}} \right)$$

$$H = (L + V) / 2$$

Phongův a Blinnův osvětlovací model v radiometrickém názvosloví



	Phong (1973)	Blinn, Phong-Blinn (1977)
Osvětlovací model:	$L_o(\omega_o) = L_i(\omega_i) (\rho_d \cos \theta_i + \rho_s \cos^n \theta_r)$ $\cos \theta_r = \omega_o \cdot \mathbf{r}$ $\mathbf{r} = 2(\mathbf{n} \cdot \omega_i)\mathbf{n} - \omega_i$	$L_o(\omega_o) = L_i(\omega_i) (\rho_d \cos \theta_i + \rho_s \cos^n \theta_h)$ $\cos \theta_h = \mathbf{n} \cdot \mathbf{h}$ $\mathbf{h} = (\omega_i + \omega_o) / 2$
BRDF: $f_r = \frac{L_o}{L_i \cos \theta_i}$	$f_r^{Phong\ orig} = \rho_d + \rho_s \frac{\cos^n \theta_r}{\cos \theta_i}$	$f_r^{Blinn\ orig} = \rho_d + \rho_s \frac{\cos^n \theta_h}{\cos \theta_i}$

Fyzikálně korektní Phongův model

- Modifikace pro zajištění reciprocity a zachování energie

$$f_r^{\text{Phong modif}} = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{n+2}{2\pi} \rho_s \cos^n \theta_r$$

- Zachování energie:

$$\rho_d + \rho_s \leq 1$$

- Stále empirická BRDF (tj. není fyzikálně motivovaná), ale alespoň splňuje základní vlastnosti BRDF
-

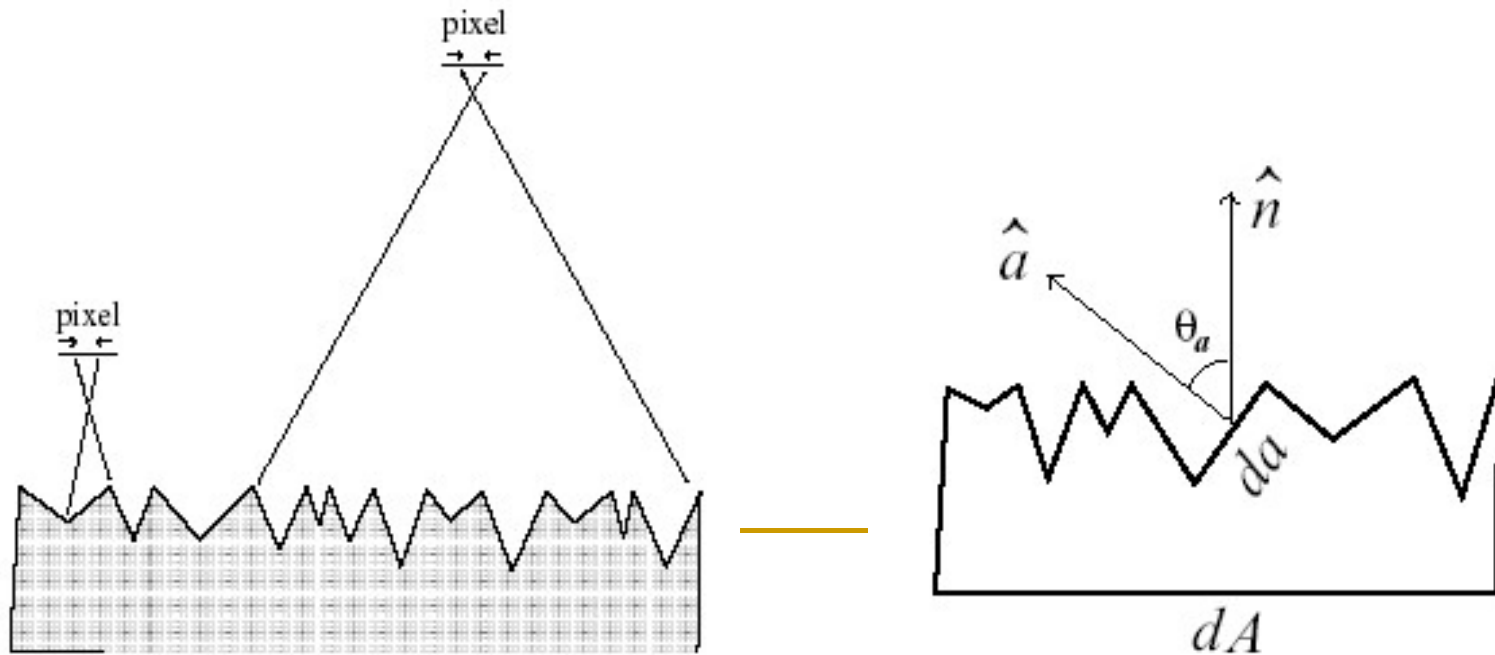
Modelování BRDF:

2) Fyzikálně motivované modely

- Např. Torrance-Sparrow model
- Založeno na teorii mikrofacet
- Funguje pouze pro hrubé plochy



Modeling Rough Surfaces - Microfacets



- Roughness simulated by Symmetric V-groves at Microscopic level.
- Distribution on the slopes of the V-grove faces are modeled.
- Each microfacet assumed to behave like a perfect mirror.

Torrance-Sparrow BRDF - Komponenty

Fresnel term:
allows for
wavelength
dependency

Geometric Attenuation:
reduces the output based on the
amount of shadowing or masking
that occurs.

$$f = \frac{F(\theta_i)G(\omega_i, \omega_r)D(\theta_h)}{4 \cos(\theta_i) \cos(\theta_r)}$$

Distribution:
distribution
function
determines what
percentage of
microfacets are
oriented to reflect
in the viewer
direction.

How much of the
macroscopic
surface is visible
to the light source

How much of
the macroscopic
surface is visible
to the viewer

Modelování BRDF

3) Aproximace naměřených dat parametrickým modelem

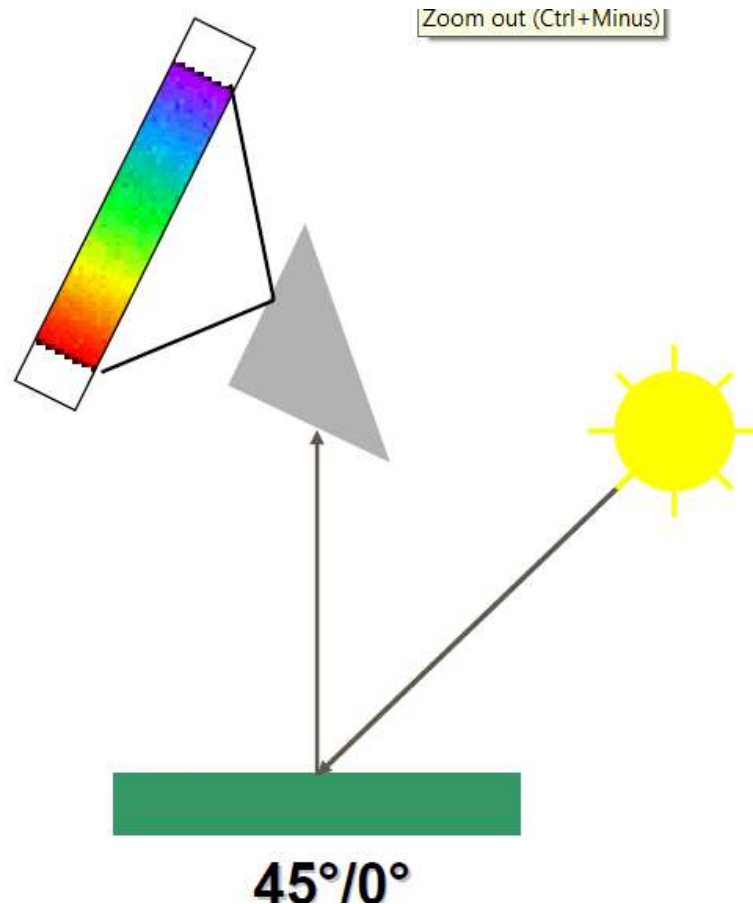
- Bud' pomocí fyzikálního modelu
 - Nebo pomocí funkce navržené pro aproximaci naměřených dat: např. Ward BRDF, Lafortune BRDF, viz semestrální práce – knihovna BRDFLIB.
 - Pro nalezení parametrů BRDF modelu z dat je třeba provést nelineární optimalizaci tak, aby RMSE byla co nejmenší.
-

Použití měřených dat z BRDF

4) Interpolace z měřených dat či komprimace a dekomprimace

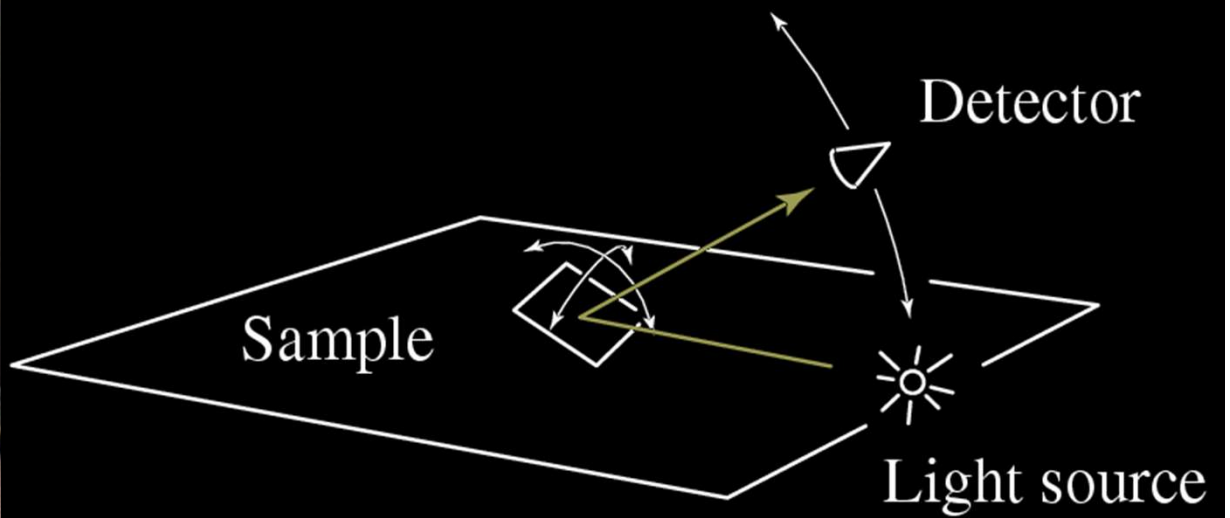
- Počet měřených dat je velký – 4D funkce pro anisotropní a 3D funkce [x vlnová délka]
 - Příklad pro isotropní měřená data:
50 (θ pro 0-90 deg) x 50 (θ pro 0-90 deg) x
200 (φ pro 0-360deg) x 3 (RGB)
= 1,500,000 reálných čísel
 - Vhodné komprimační metody jsou na místě
 - Do budoucna největší perspektiva
-

Spektrofotometr – zjednodušené měření barvy



- Osvětlení objektu pod úhlem 45 stupňů
- Kamera na normále k povrchů
- Spektrální analýza měření
- Vrací spektrum jako tabulku pro dané vlnové délky.

Měření BRDF - Gonioreflektometr



Komerční řešení měřících přístrojů



BRDF modely vs skutečnost

Rendered Images



Reference



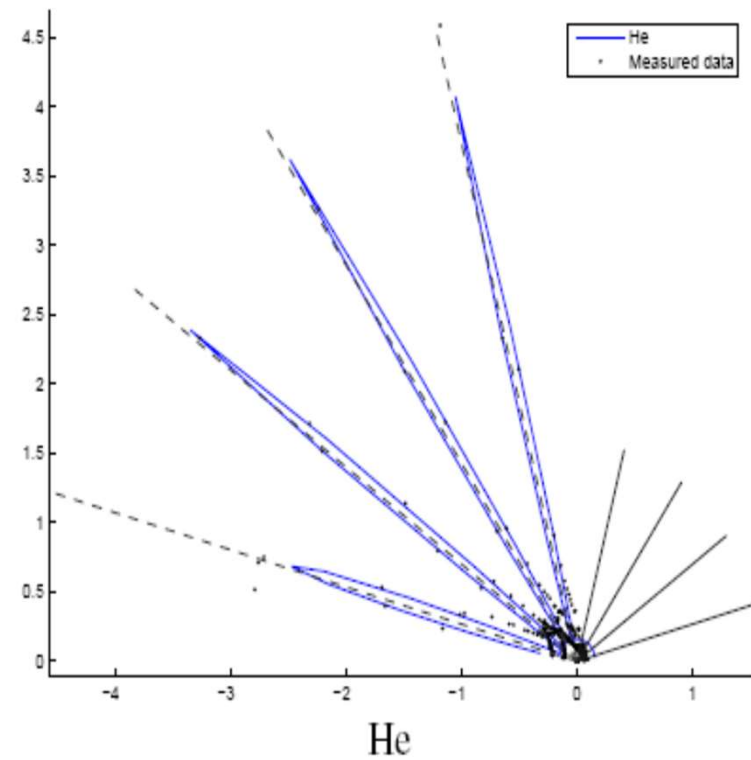
Ward: 0.314



Lafortune: 0.313



CT: 0.314



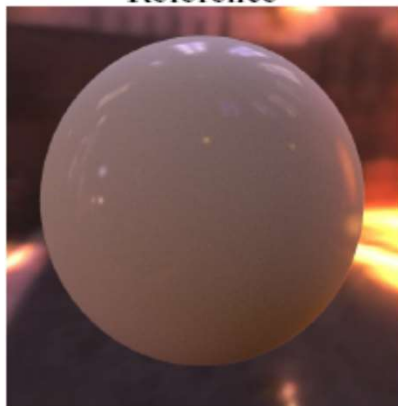
BRDF modely vs skutečnost



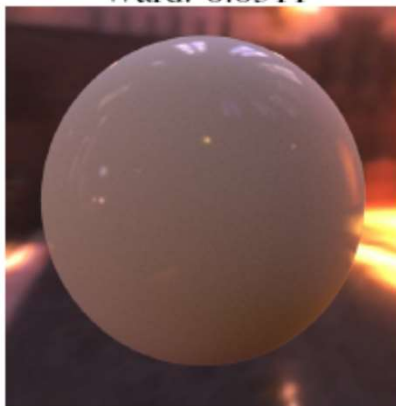
Reference



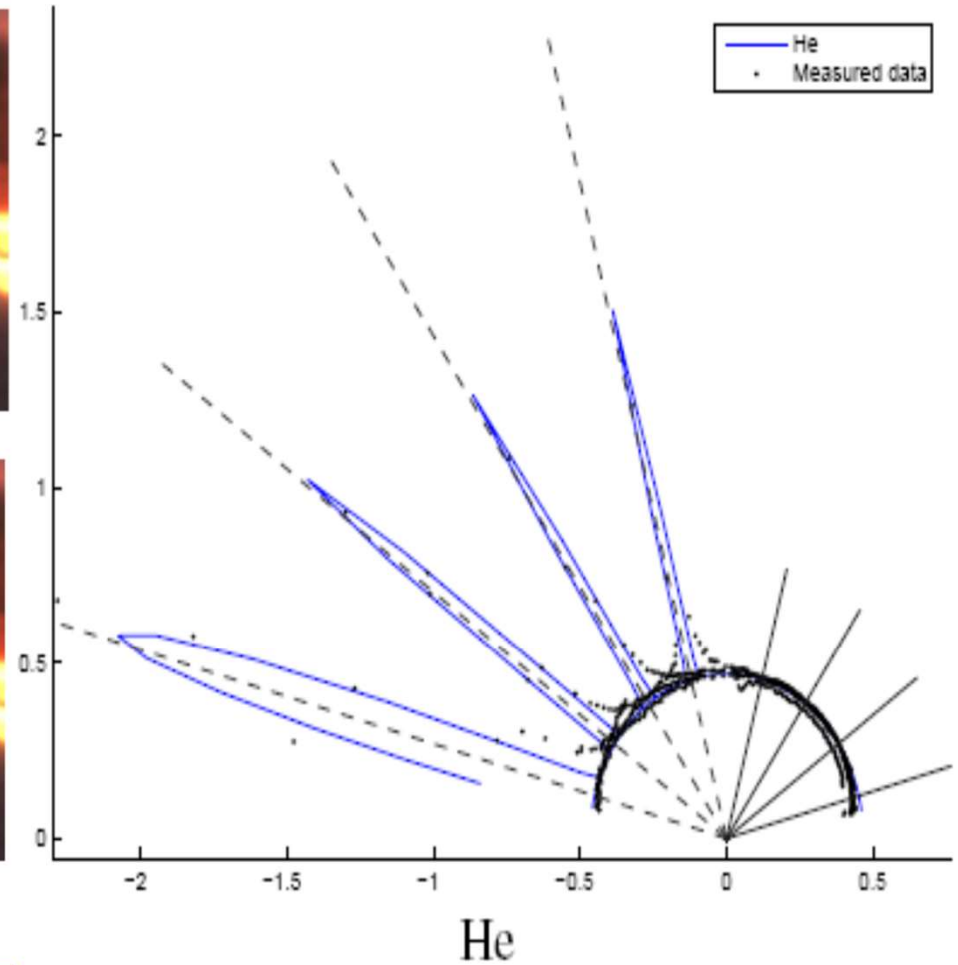
Ward: 0.0311



Lafortune: 0.0231



CT: 0.0221



BRDF modely vs skutečnost

Rendered Images



Reference



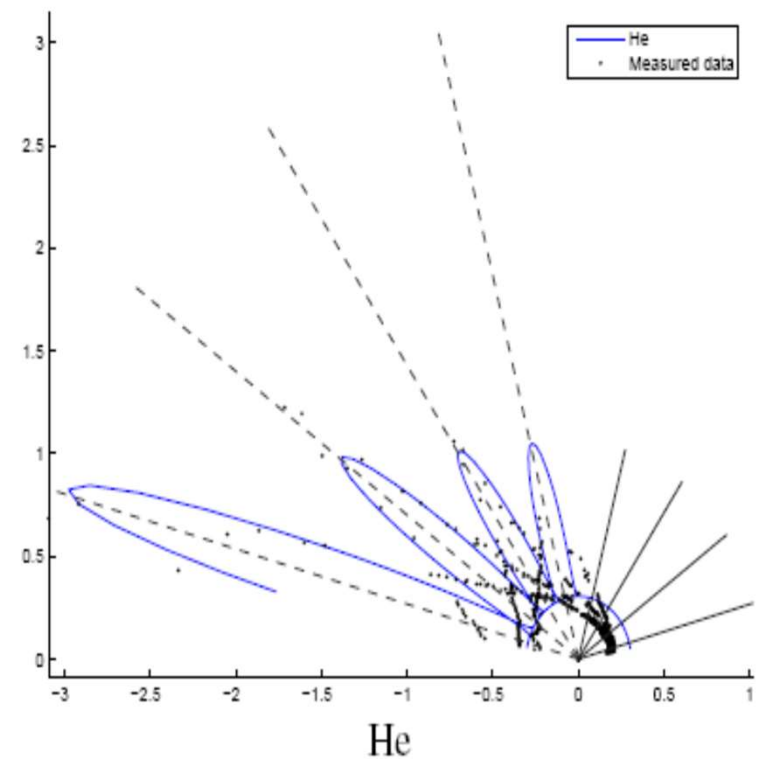
Ward: 0.0568



Lafortune: 0.0486



CT: 0.0434



BRDF modely vs skutečnost

Rendered Images



Reference



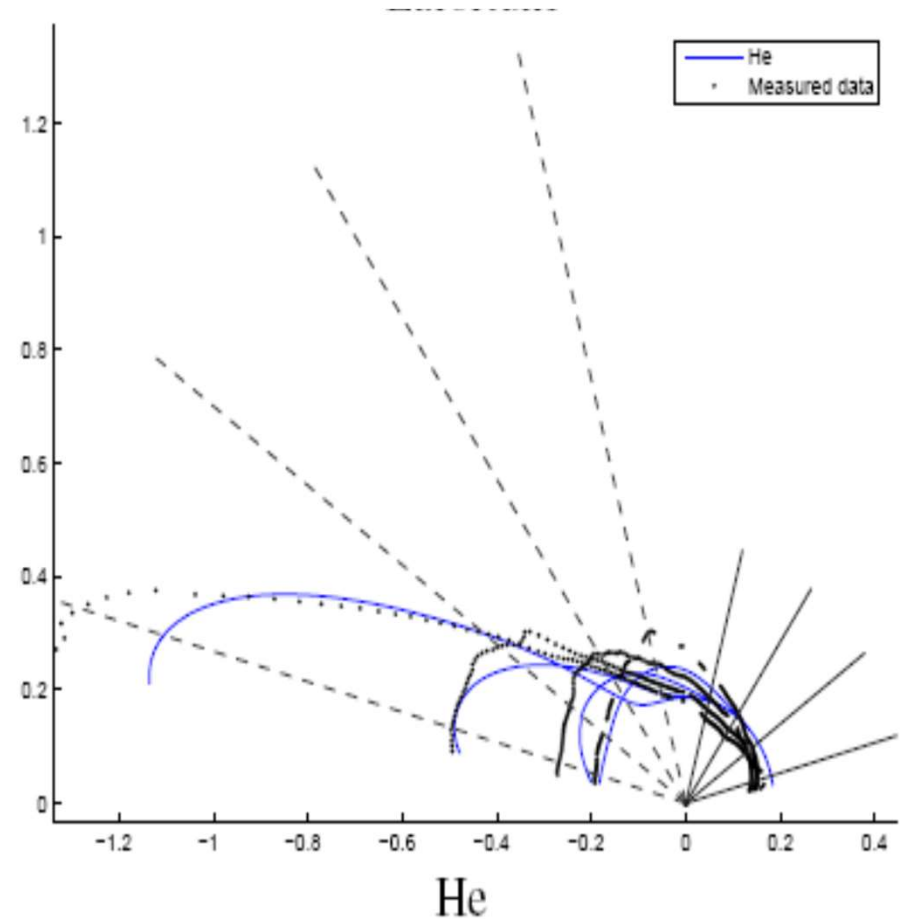
Ward: 0.0137



Lafortune: 0.00755

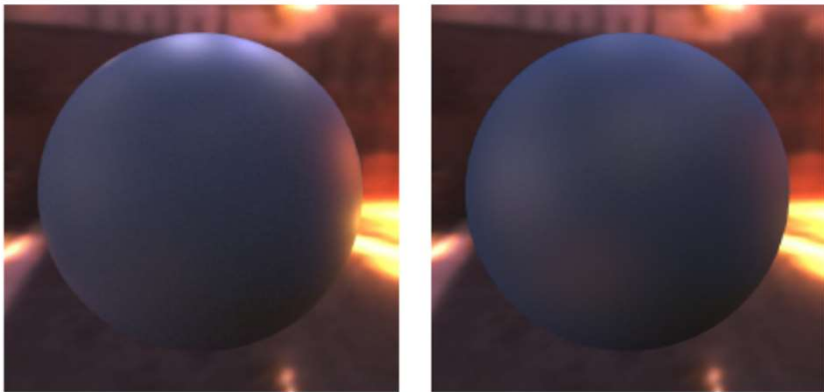


CT: 0.00307



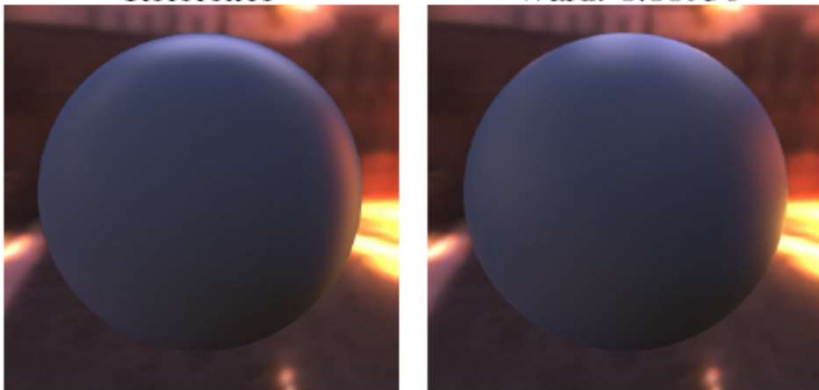
BRDF modely vs skutečnost

Rendered Images



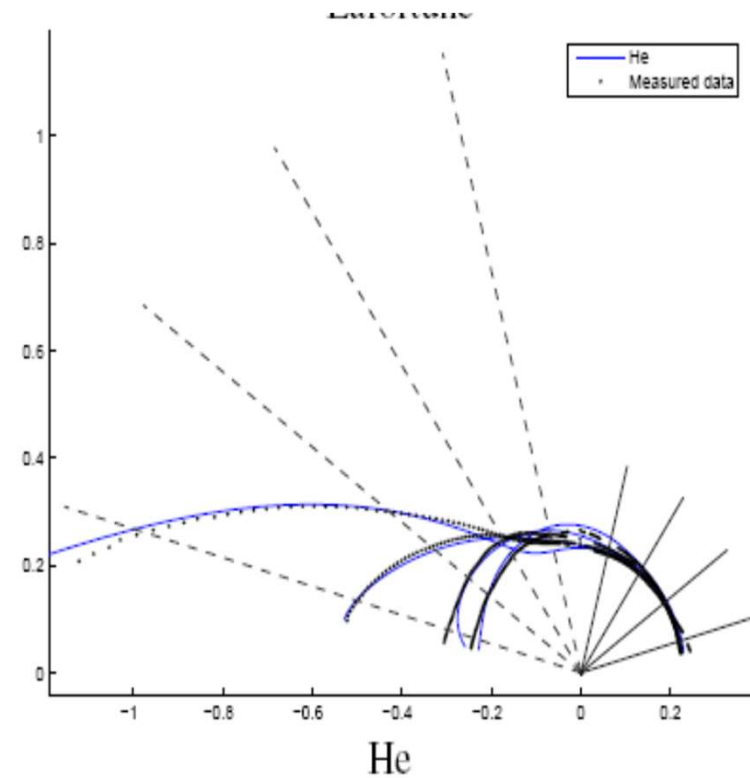
Reference

Ward: 0.00956



Lafortune: 0.00513

CT: 0.00139



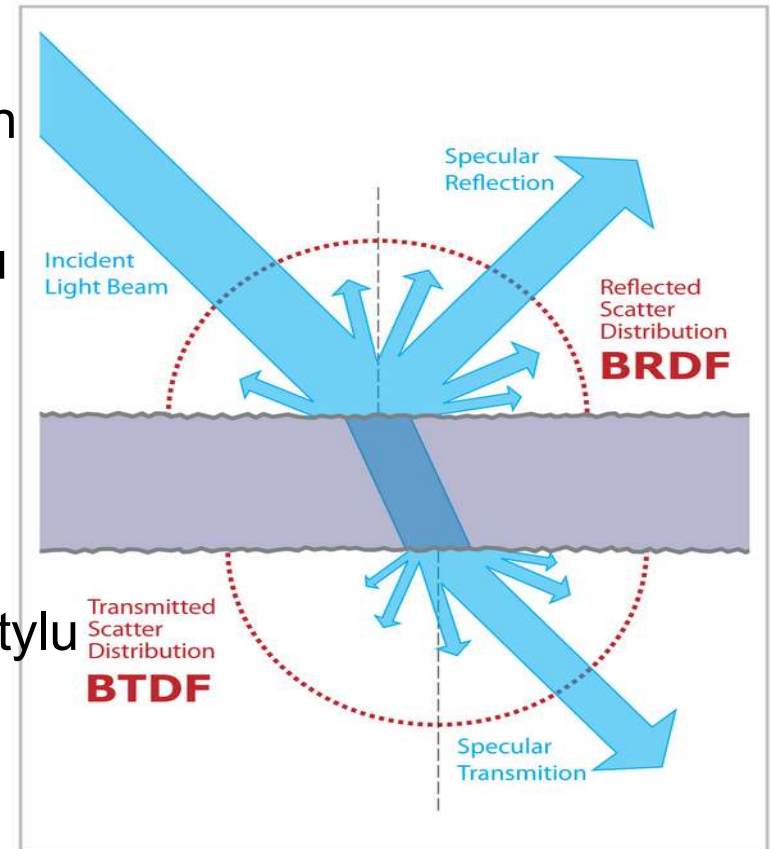
BRDF modely - metodologie

- BRDF nahrazuje simulaci světla na mikroskopické úrovni hotovou matematickou funkcí
- Stejný přístup lze použít i pro jiný případ než plochu, např. interakce světla s vlákny vlasů
 - odrazy uvnitř vlákna
 - mikroskopická úroveň = popíše se modelem
 - při renderingu vlasů je už není třeba uvažovat, neboť jsou zahrnuty v modelu



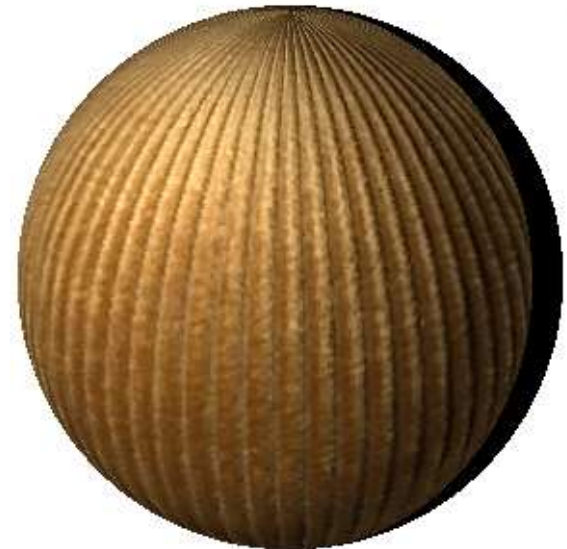
BRDF, BTDF, BSDF: Co to všechno znamená?

- BTDF
 - Bidirectional *transmittance* distribution function
 - Dvousměrová distribuční funkce lomu
 - popisuje průchod světla povrchem
- BSDF = BRDF+BTDF
 - Bidirectional *scattering* distribution function
 - Dvousměrová distribuční funkce rozptylu



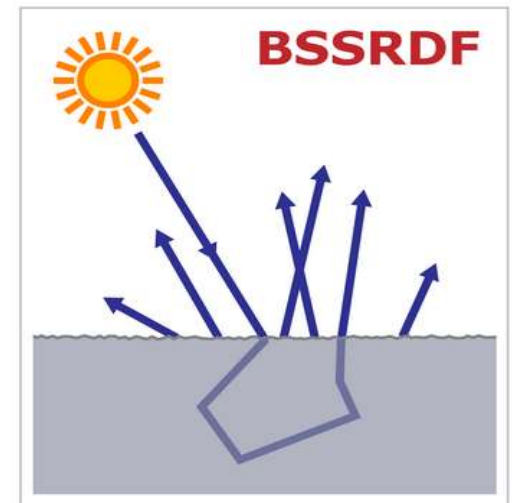
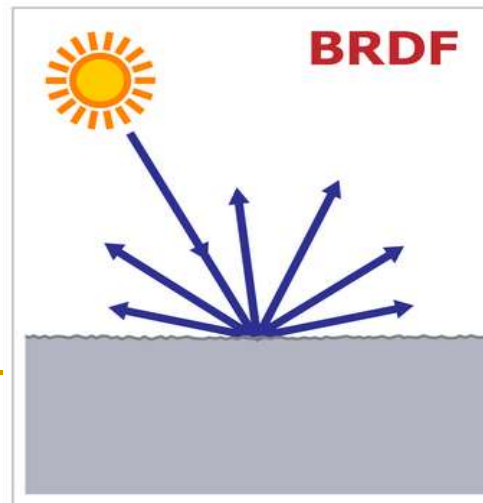
SBRDF, BTF

- SBRDF a BTF jsou 6D funkce x vlnová délka = 7D
- SBRDF ... spatially varying BRDF
 - Parametry BRDF se mění jako funkce pozice na povrchu
- BTF ... bidirectional texture function
 - Pro materiály se složitou odrazivostí a texturou
 - Na rozdíl od BRDF modeluje materiál i na meso-scale
 - Nahrazuje použití bump map / normal map



BSSRDF

- BRDF – 5 dimenzí
 - světlo přicházející v bodě x se odrazí ve stejném bodě
 - žádné cestování světla po povrchem
- BSSRDF [Jensen et al. 2001] – 9 dimenzí
 - bi-directional ***sub-surface scattering*** reflectance distribution function
 - Světlo chvíli cestuje pod povrchem a pak se může zase dostat ven



BSSRDF

- Sub-surface scattering způsobuje změkčení vzhledu materiálů



BRDF



BSSRDF

Použití BSSRDF – např. kůže, mramor



BRDF

BSSRDF

Použití BRDF a další

- Rendering běžného obrazu
 - Relighting existující scény – jiné osvětlení nebo jiné BRDF pro nějaký objekt
 - Počítačové vidění
 - Vzdálené měření země – detekce plodin, znečištění moře, ovzduší atd. z družice.
 - Astronomie – měření odrazivosti planet, detekce složení povrchu
 - Medicína - detekce kožních nemocí apod.
 - Materiály – optická detekce materiálů
-