
X39RSO/A4M39RSO

Odraz světla, BRDF

Vlastimil Havran

ČVUT v Praze – CTU Prague

Verze 2014

Interakce světla s povrchem

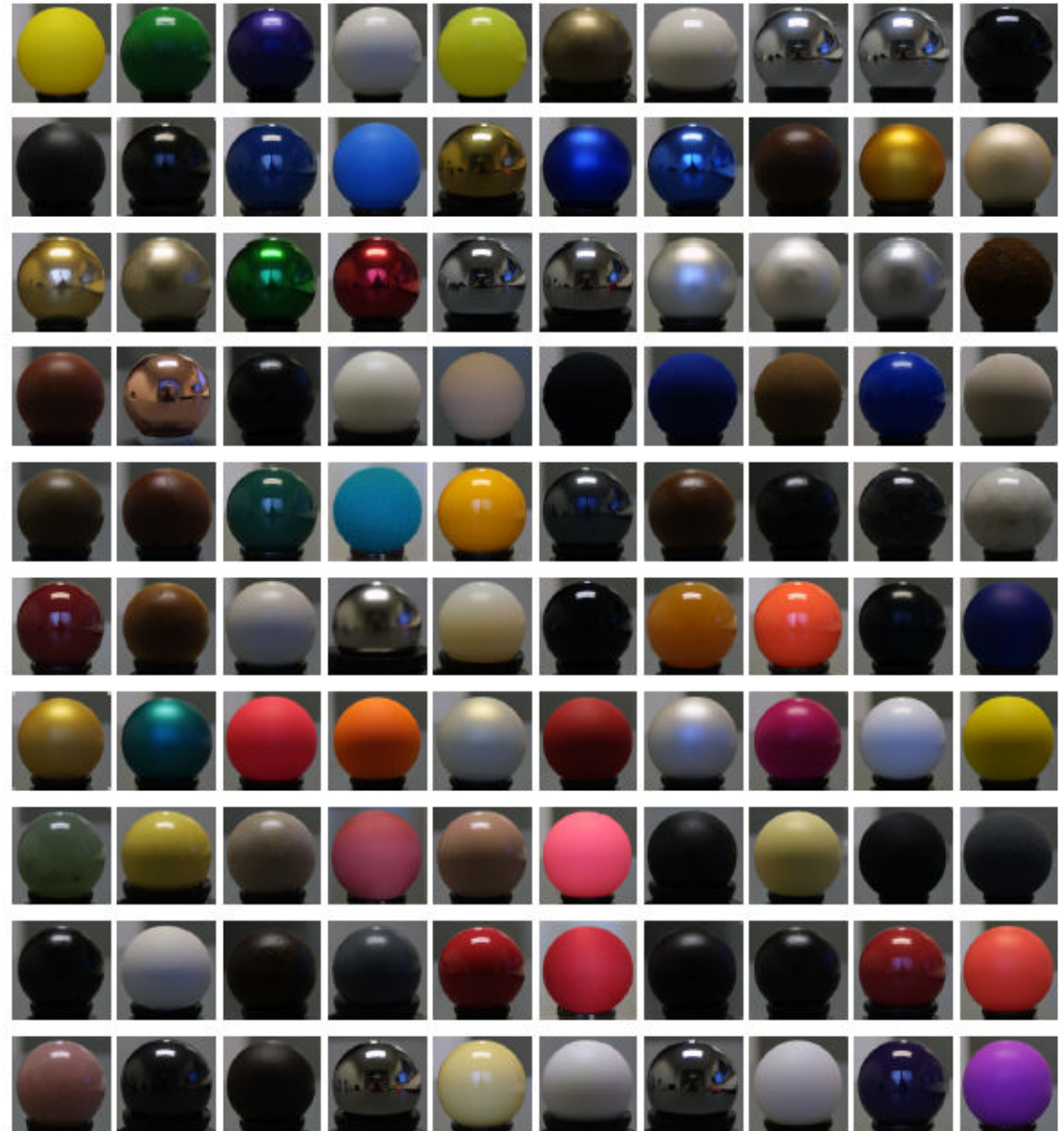
- Odraz
 - Lom
 - Rozptyl pod povrchem

 - 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



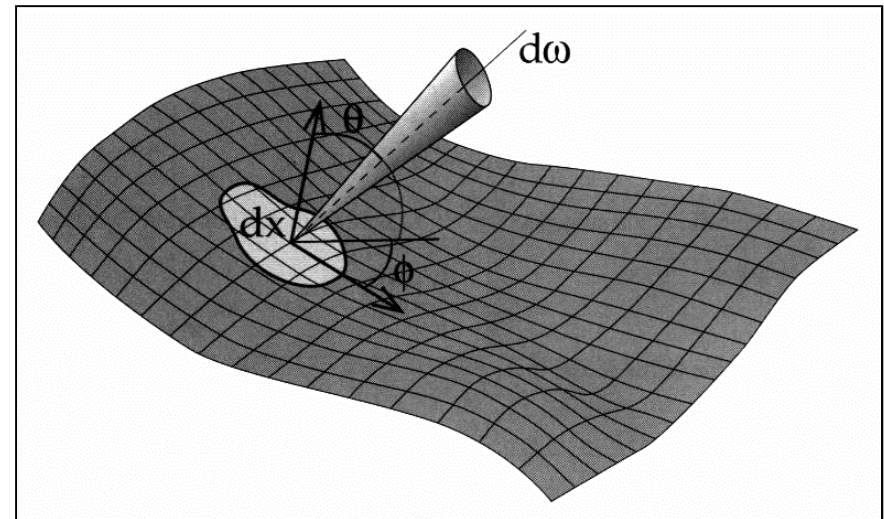
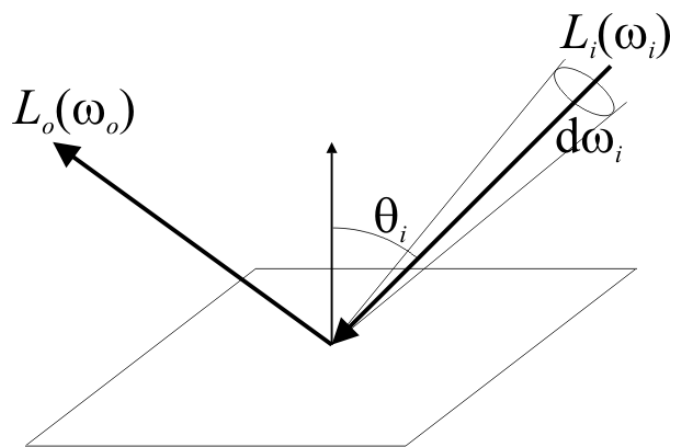
Zdroj: MERL BRDF database

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]

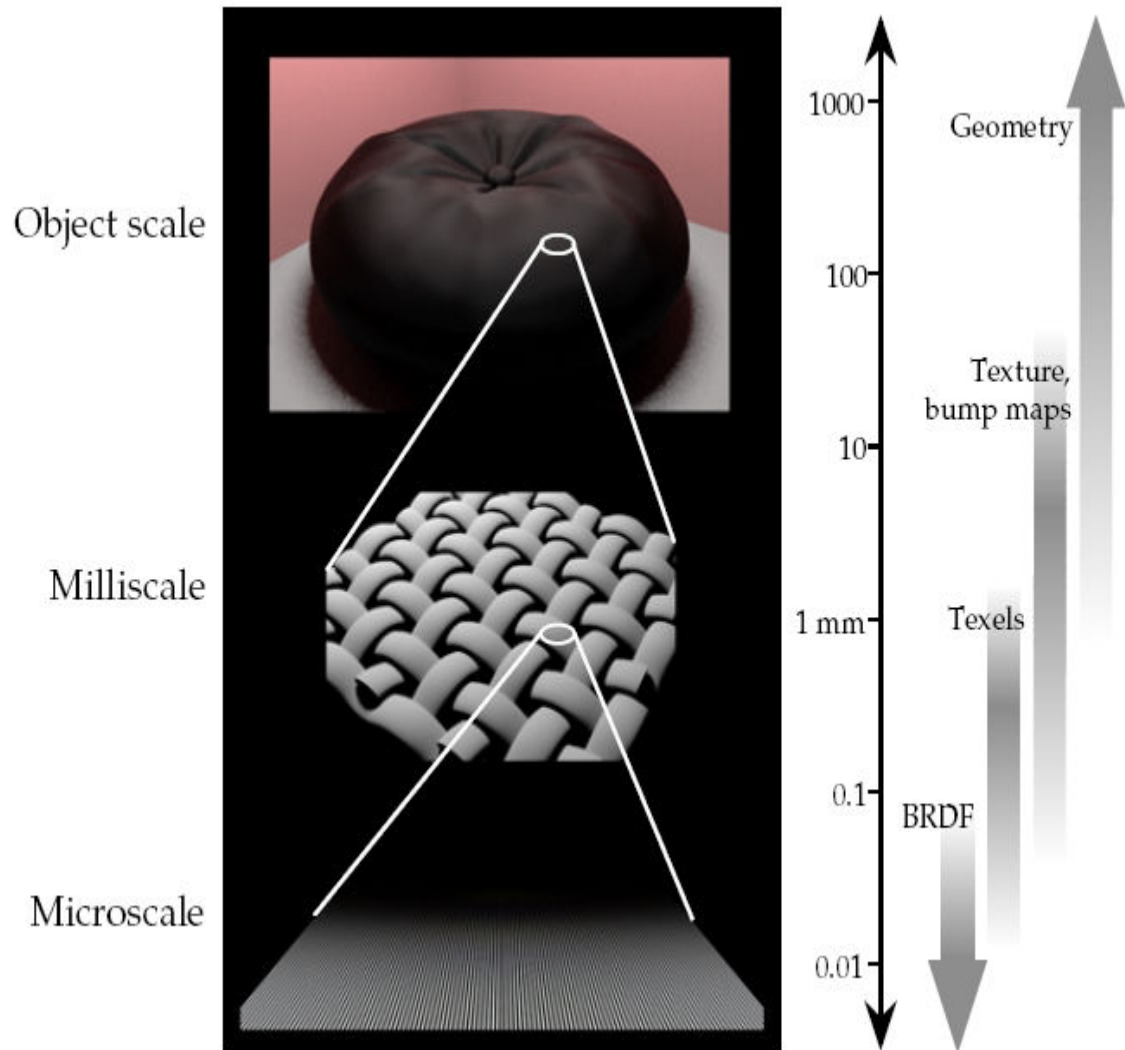


BRDF poznámky

- 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:

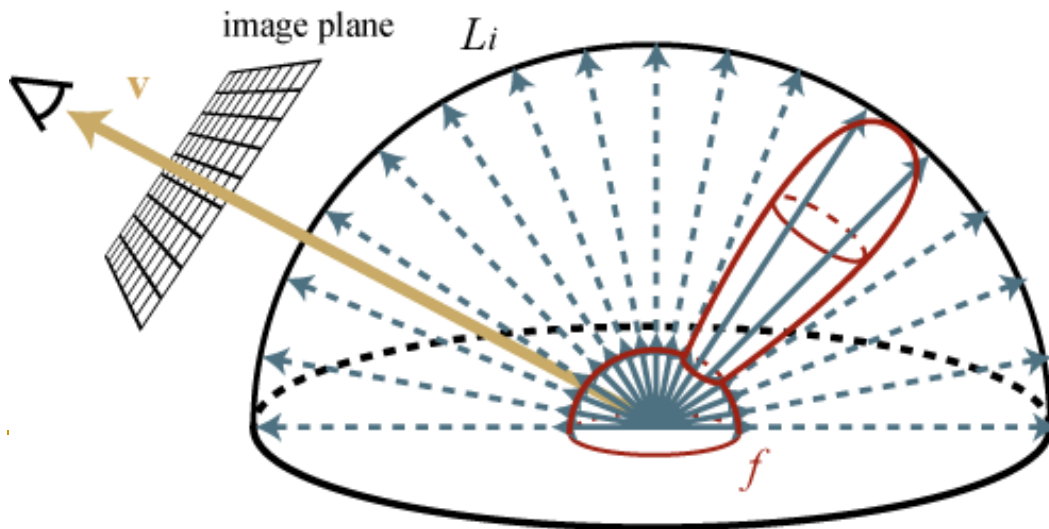
$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i)$$



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.“

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

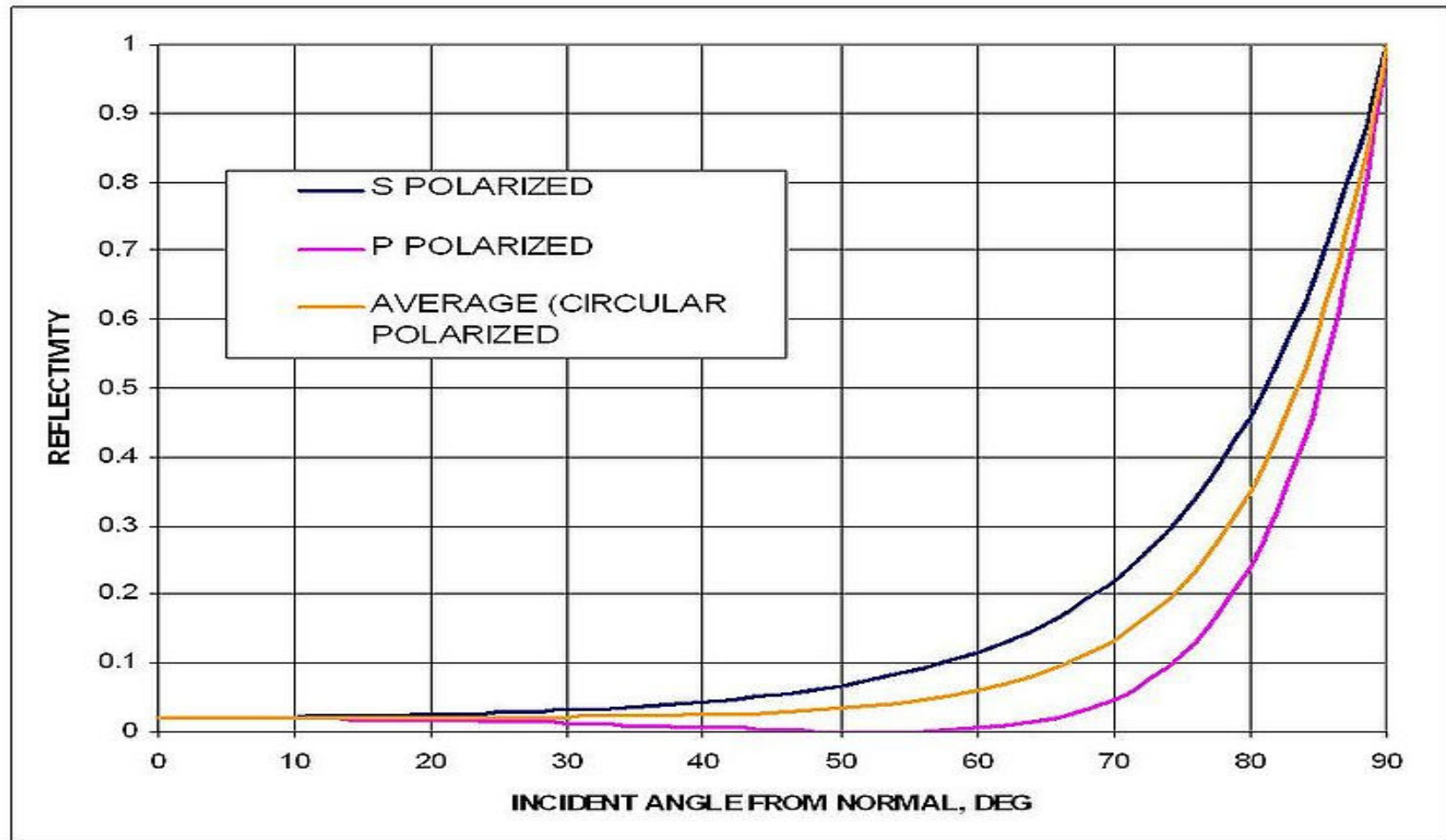
- Vždy je nezáporná a menší nebo rovna 1 = odpovídá zákonu o zachování energie.
- Ekvivalentní se hemisféricko-směrová reflektancí:
 - „Jaké procento světelného toku příchozího ze směru ω_i je odraženo (do libovolného směru).“
 - Ekvivalence vyplývá z Helmholtzovy reciprocity pro BRDF

Hodnoty odrazivosti (albeda)

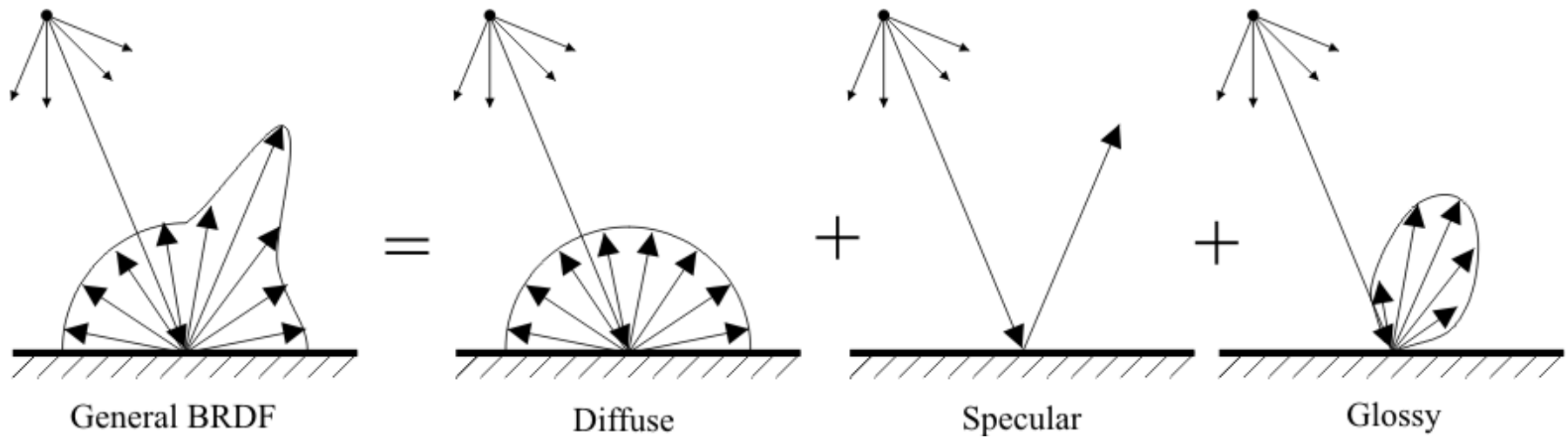
Udává se normálně pro viditelné spektrum:

- 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
-

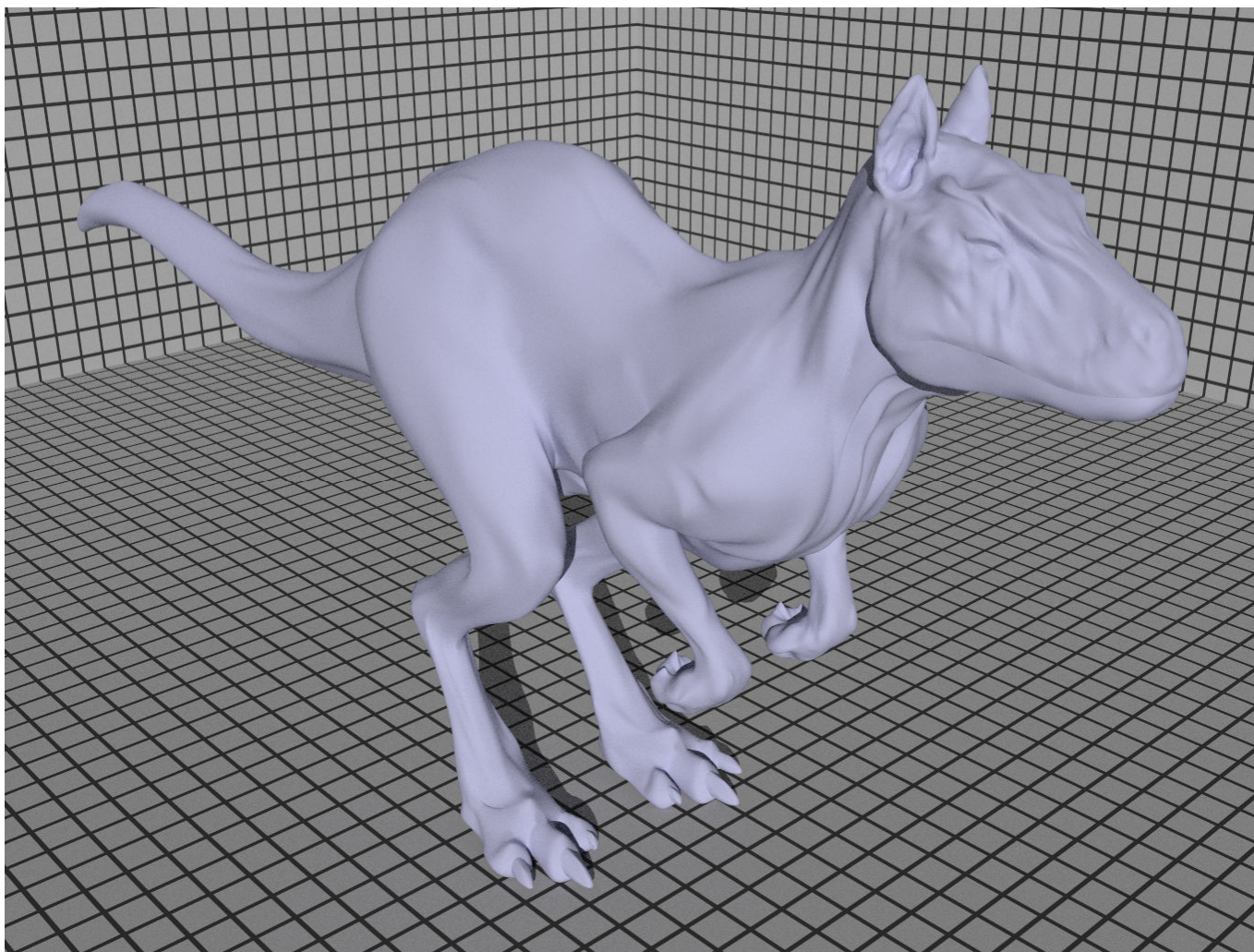
Odrazivost (albedo) pro vodu, závislost na úhlu dopadajícího světla, 20°C



Druhý BRDF



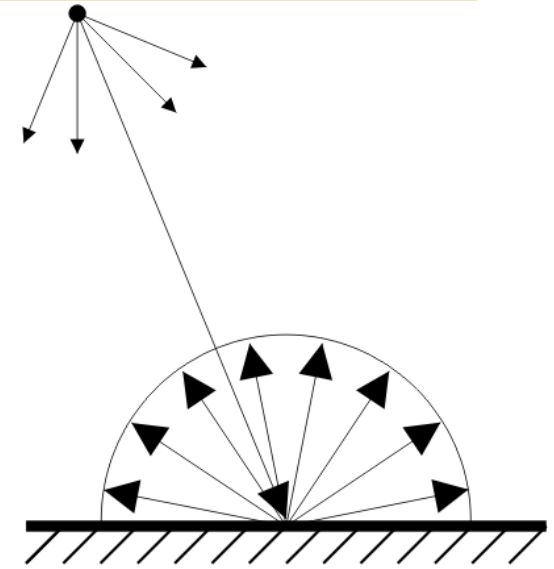
Ideální difúzní odraz



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

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

- 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

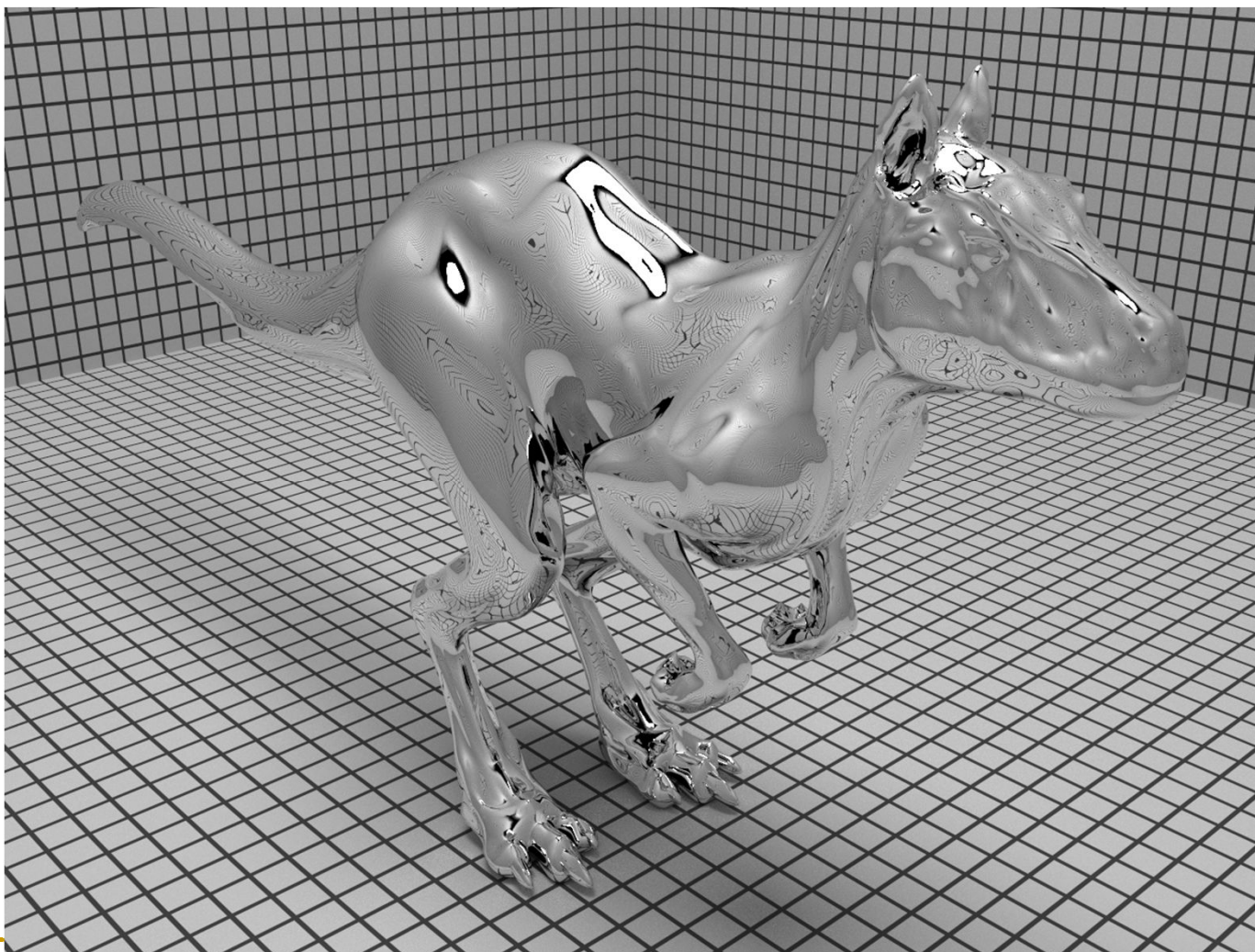
$$L_i(\theta_i, \phi_i) = L^{sky}$$

- 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

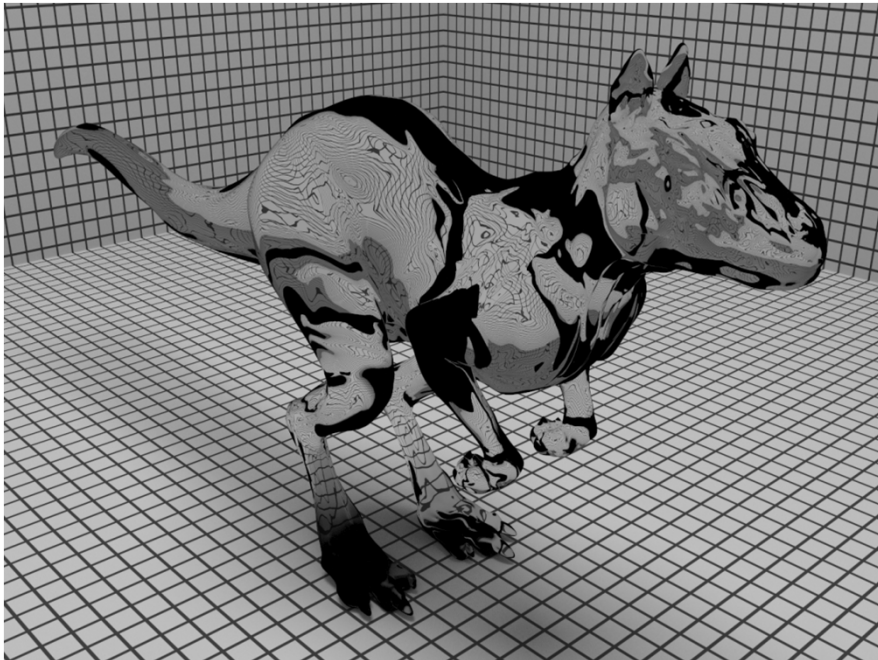
Ideální zrcadlový odraz

- 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:

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

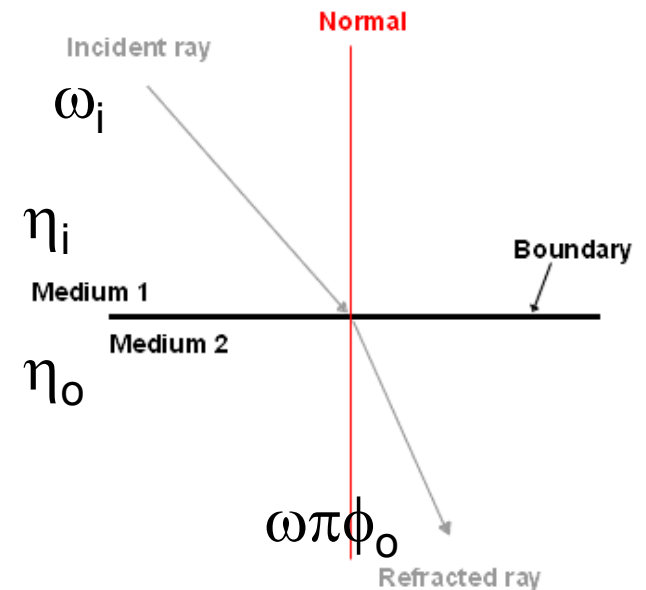
$$\eta_{io} = \frac{\eta_i}{\eta_o}$$

- 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

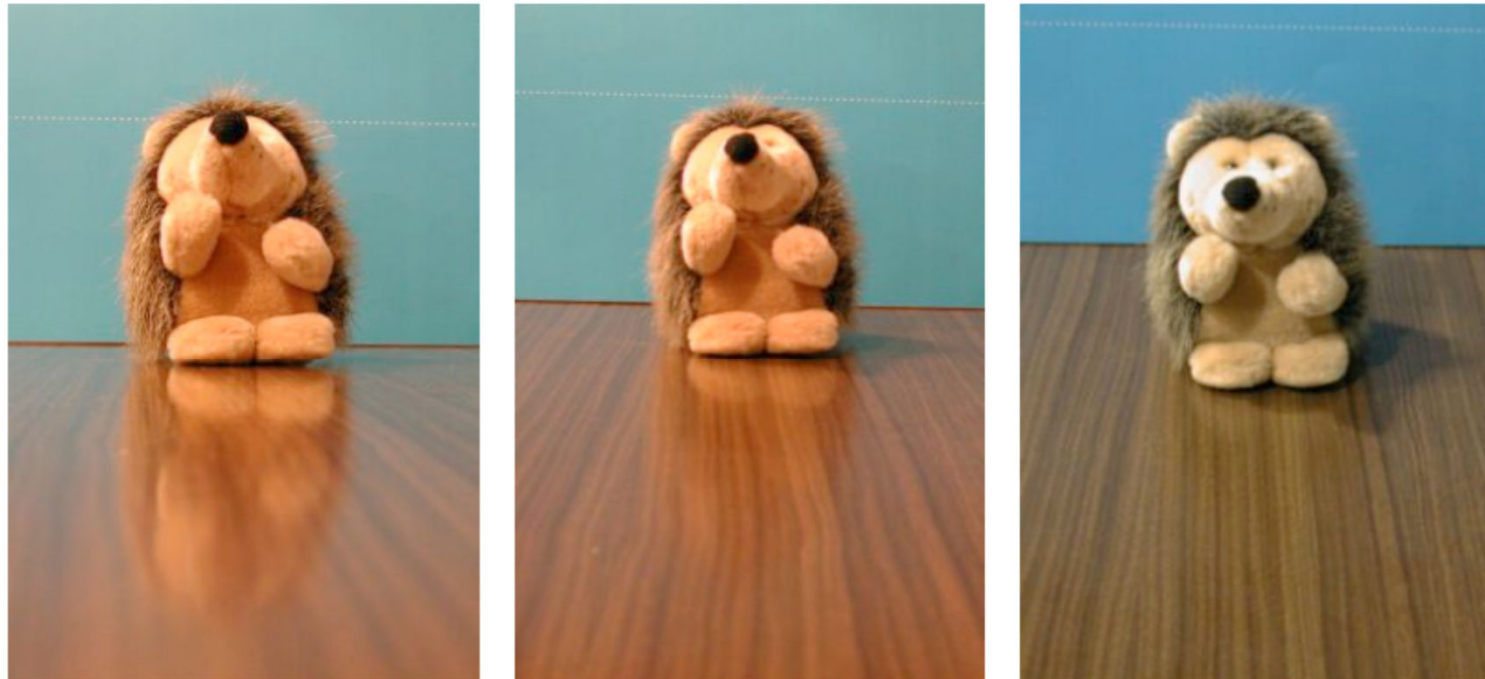


Figure 1: Photos of a specular table from different angles. Note that the table becomes more mirror-like for greater viewing angles

Ze strany

- málo lomu
- hodně odrazu

Vyzkoušejte!!!

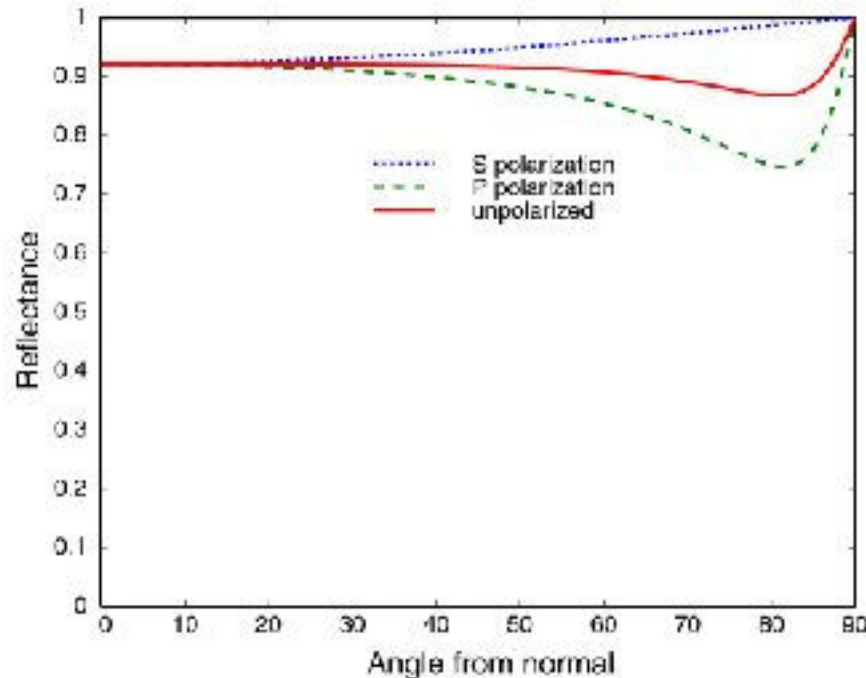
Shora

- málo odrazu
- hodně lomu

Závislost způsobena Fresnelovým faktorem

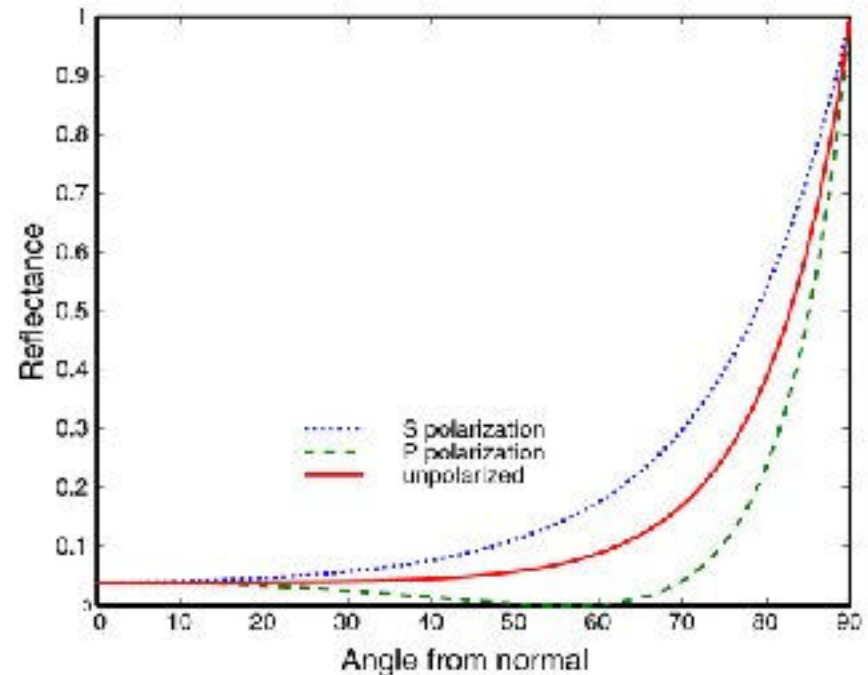
Fresnel Reflectance

Metal (Aluminum)



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

Dielectric (N=1.5)

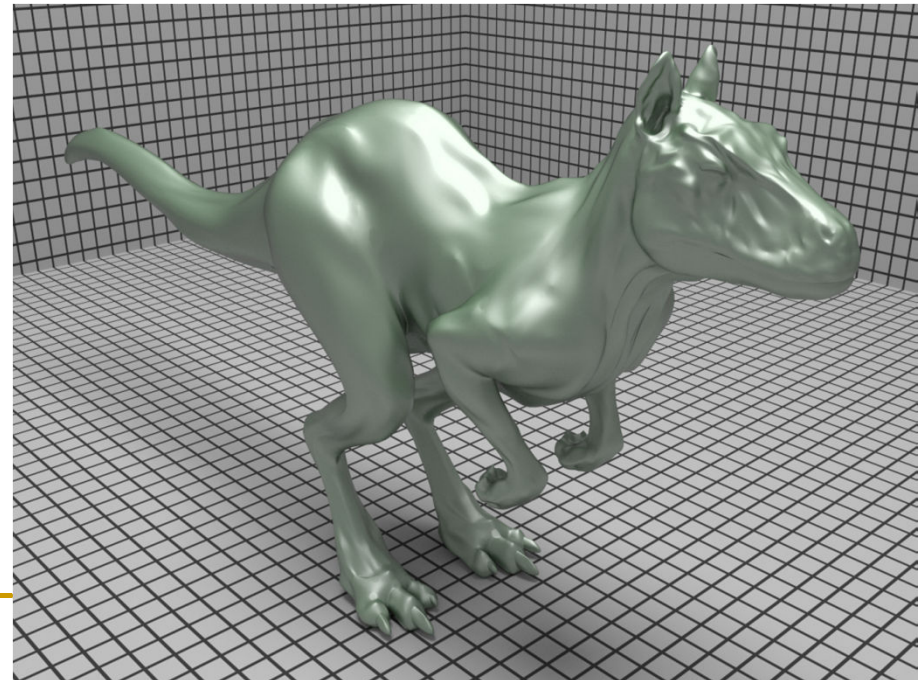
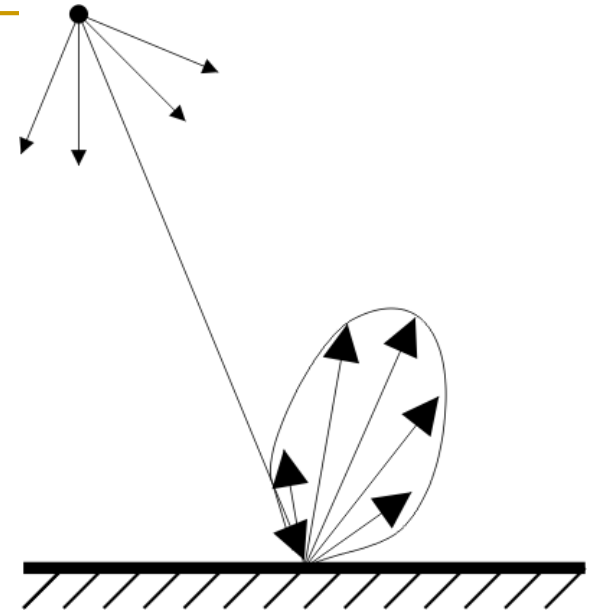


Glass $n=1.5$ $F(0)=0.04$
Diamond $n=2.4$ $F(0)=0.15$

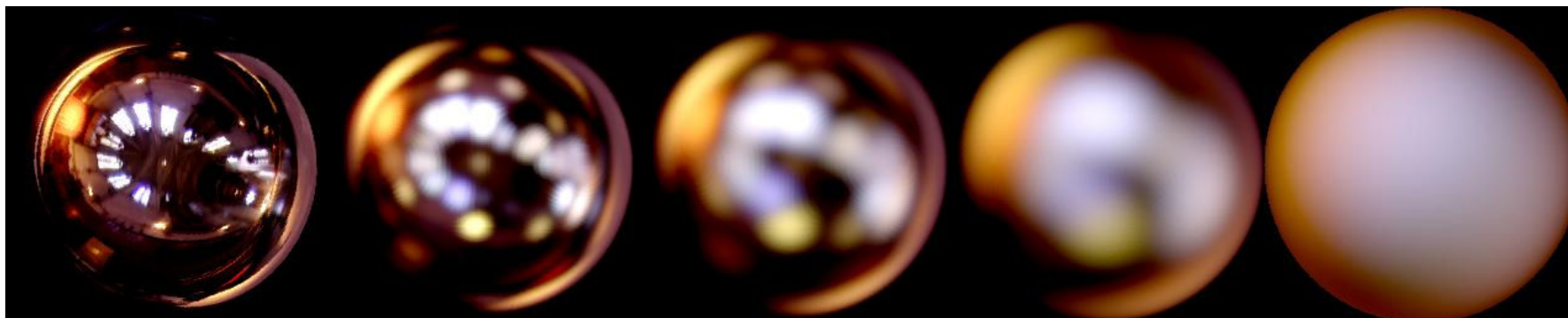
Schlick Approximation $F(\theta) = F(0) + (1 - F(0))(1 - \cos\theta)^5$

Lesklý odraz

- Ani difúzní, ani ideálně zrcadlový
- Většina skutečných materiály spadají do této kategorie



Hrubost povrchu a rozmazané odrazy

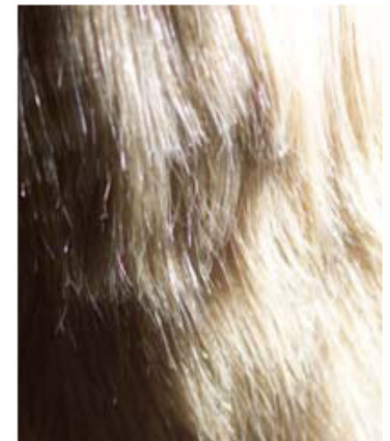
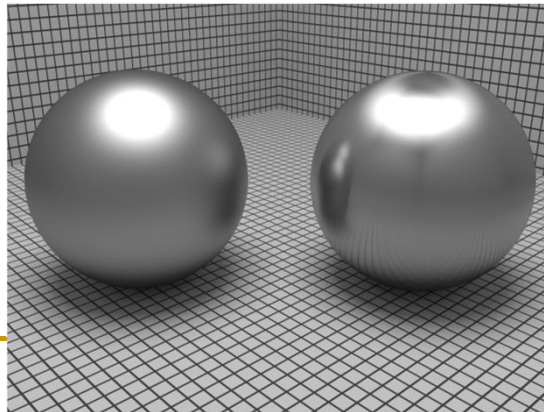
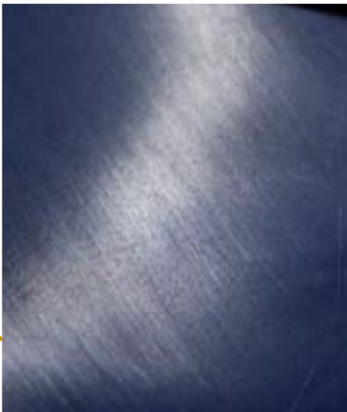
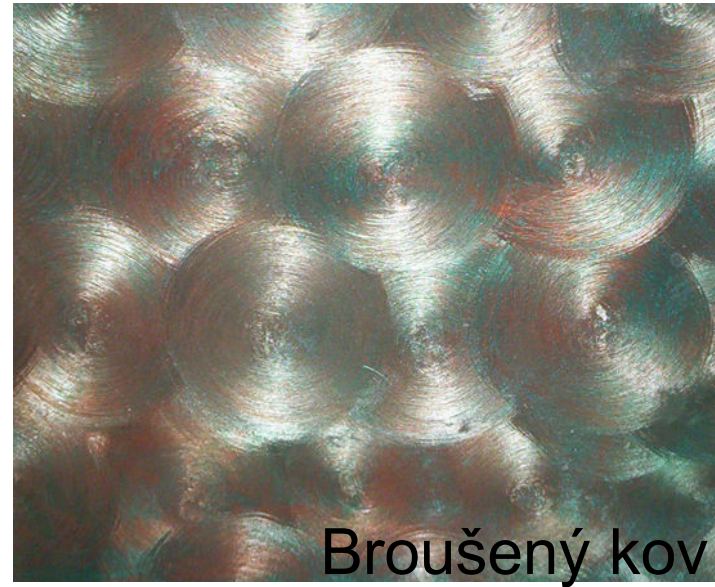


Mikroskopická hrubost povrchu

Anizotropie BRDF



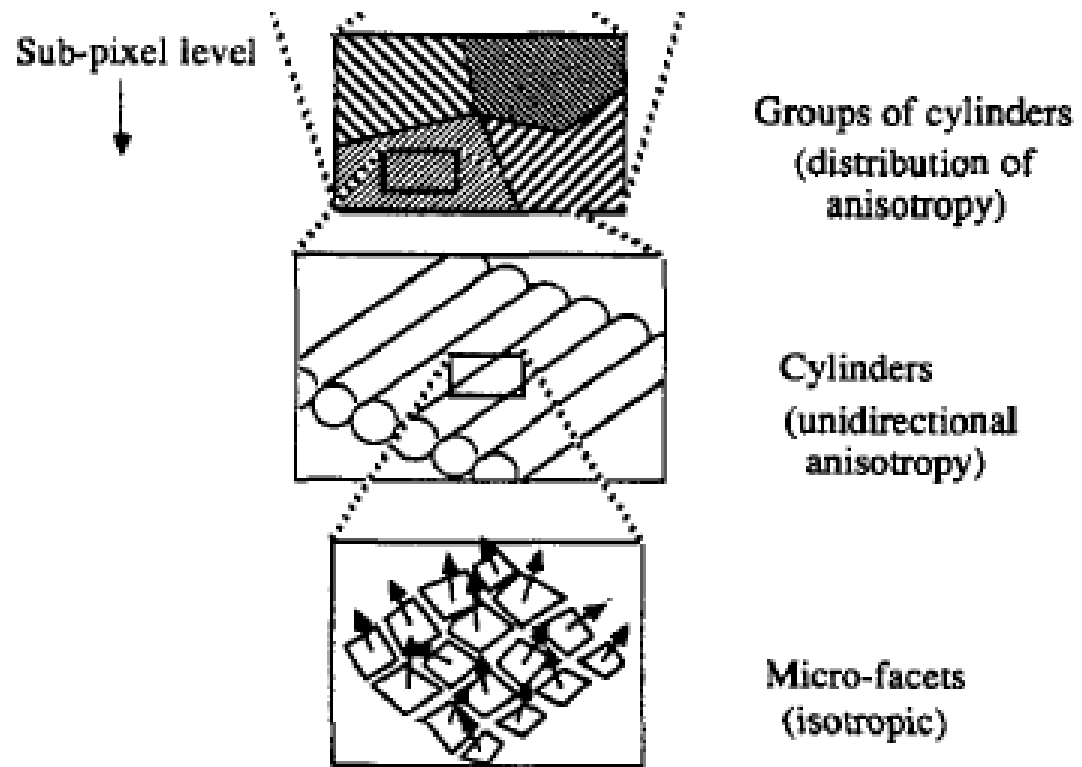
Figure 9: Anisotropic Aluminum Wheel



fibers

Anizotropie BRDF

- Různá mikroskopická hrubost povrchu v různých směrech

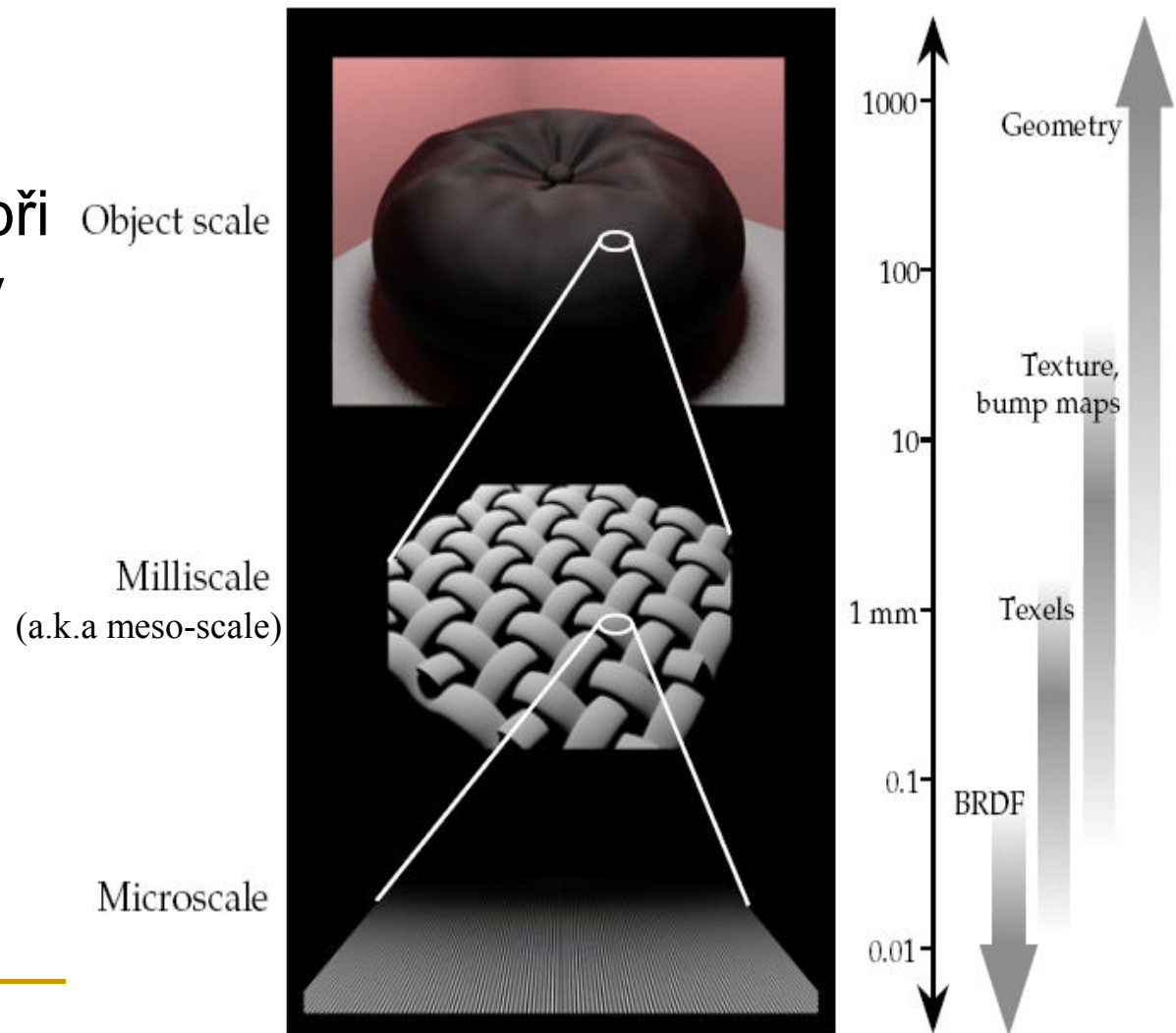


Anizotropie BRDF

- 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

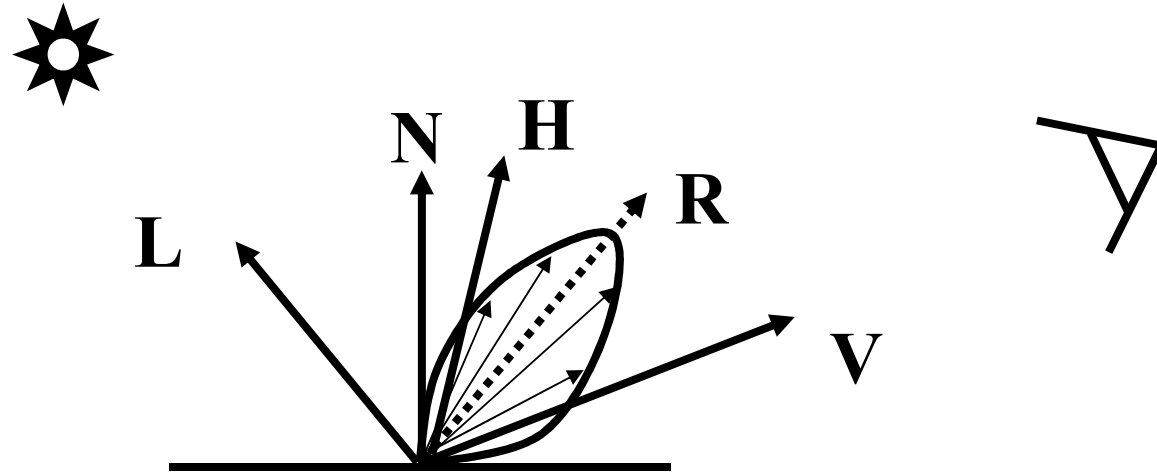


Modelování BRDF:

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

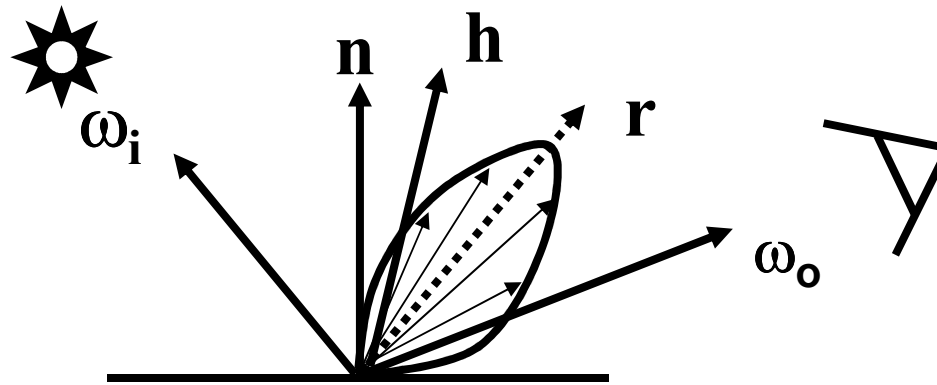
Blinn

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

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

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

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
-

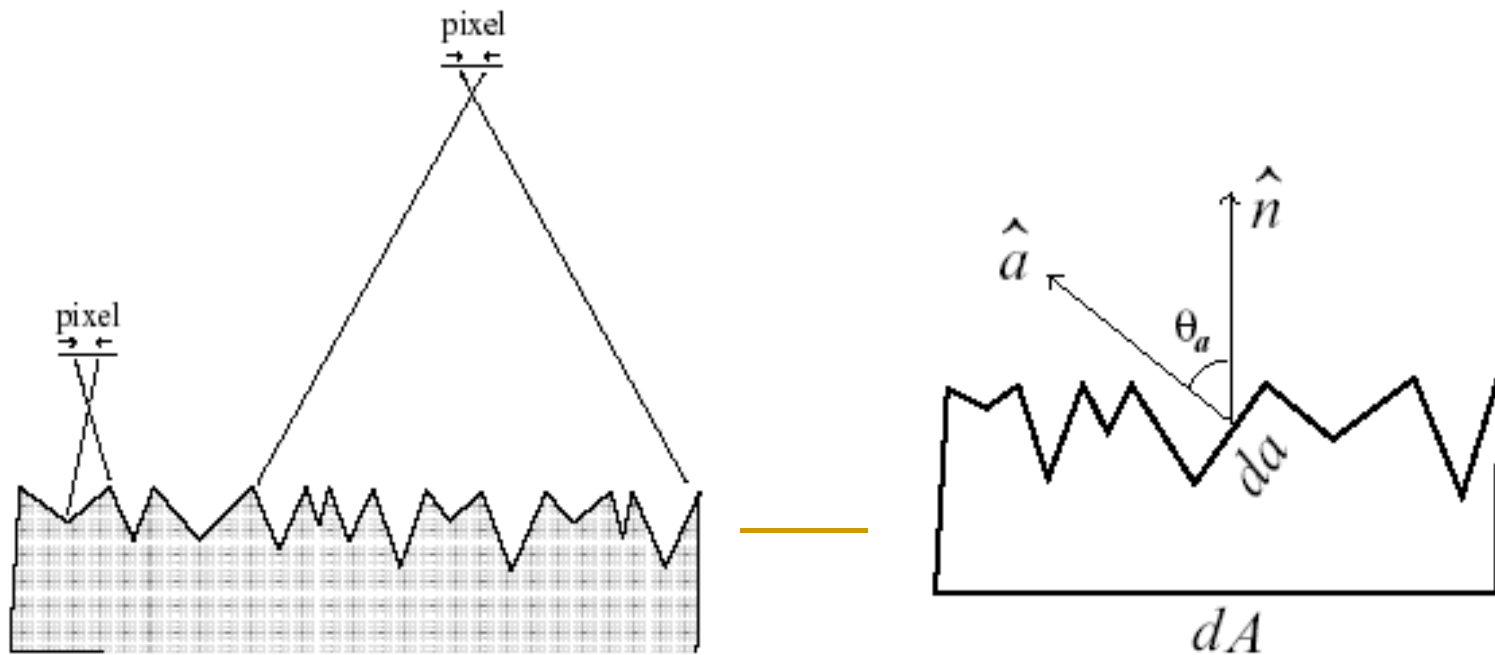
Modelování BRDF:

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.

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

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

How much of
the macroscopic
surface is visible
to the viewer

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

Modelování BRDF

3) Aproximace naměřených dat parametrickým modelem

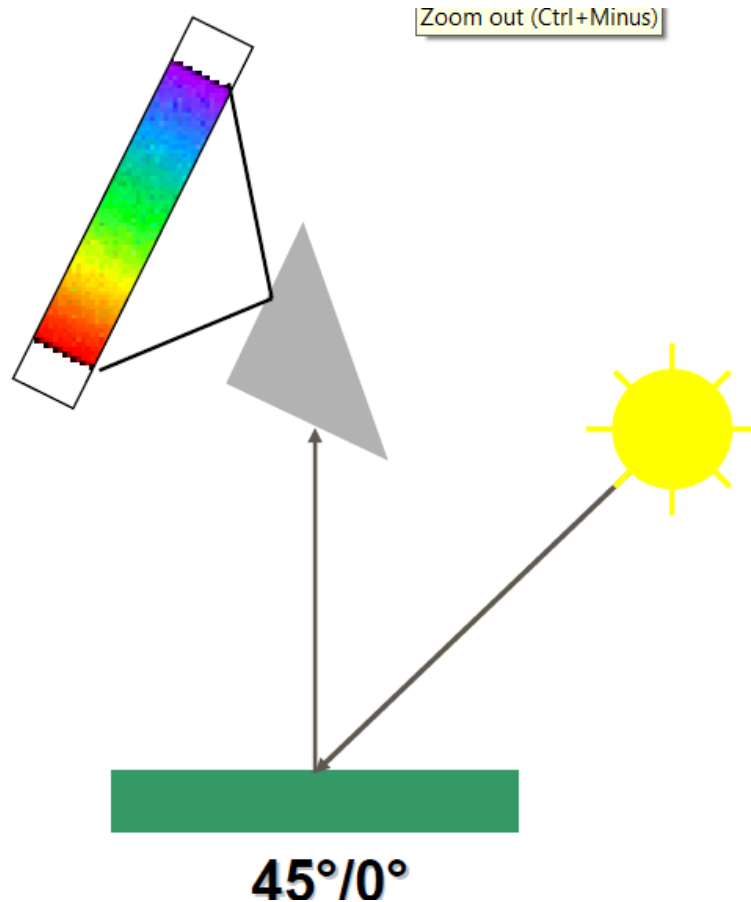
- Bud' pomocí fyzikálního modelu
 - Nebo pomocí funkce navržené pro aproximaci naměřených dat: např. Ward BRDF, Lafortune BRDF, viz semestrální práce – knihovna BRDFLIB.
 - Pro nalezení parametrů BRDF modelu z dat je třeba provést nelineární optimalizaci tak, aby RMSE byla co nejmenší.
-

Použití měřených dat z BRDF

4) Interpolace z měřených dat či komprimace a dekomprimace

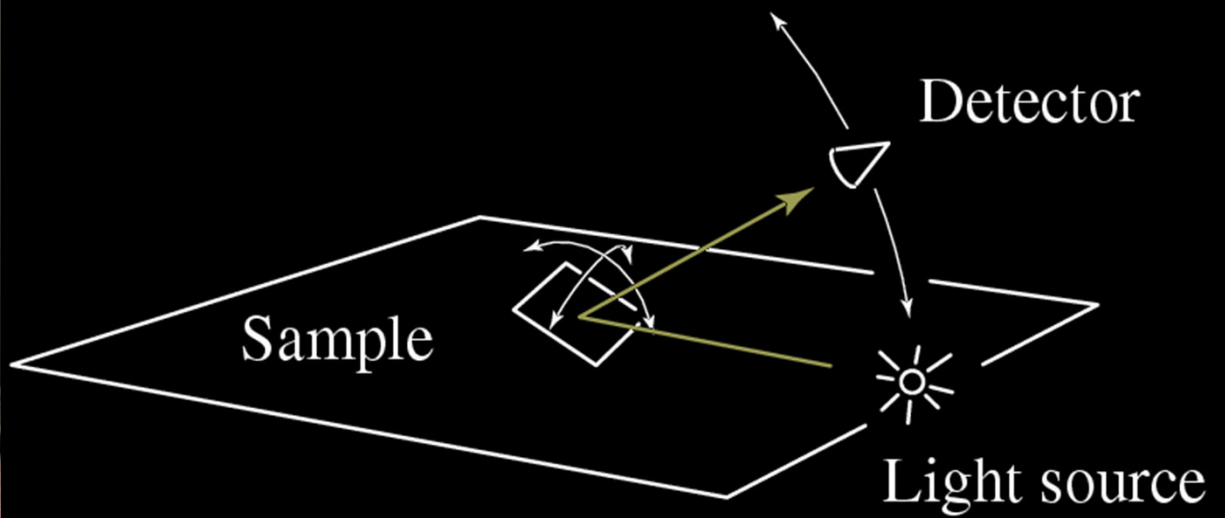
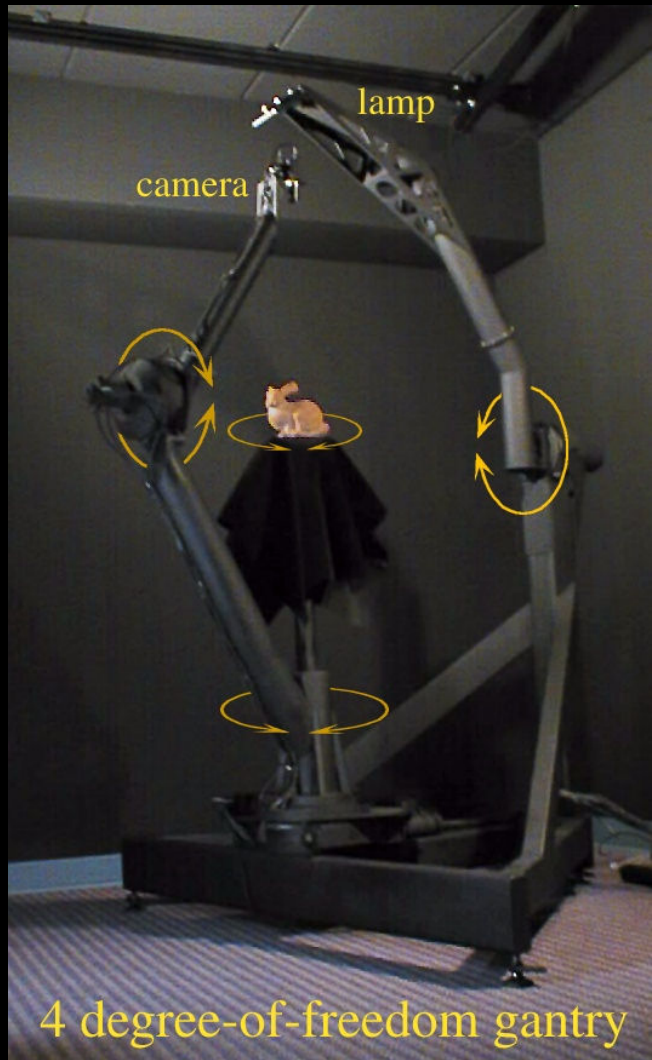
- Počet měřených dat je velký – 4D funkce pro anisotropní a 3D funkce [x vlnová délka]
 - Příklad pro isotropní měřená data:
50 (θ pro 0-90 deg) x 50 (θ pro 0-90 deg) x
200 (φ pro 0-360deg) x 3 (RGB)
= 1,500,000 reálných čísel
 - Vhodné komprimační metody jsou na místě
 - Do budoucna největší perspektiva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

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

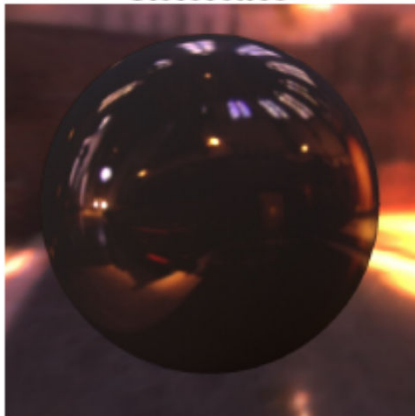
Rendered Images



Reference



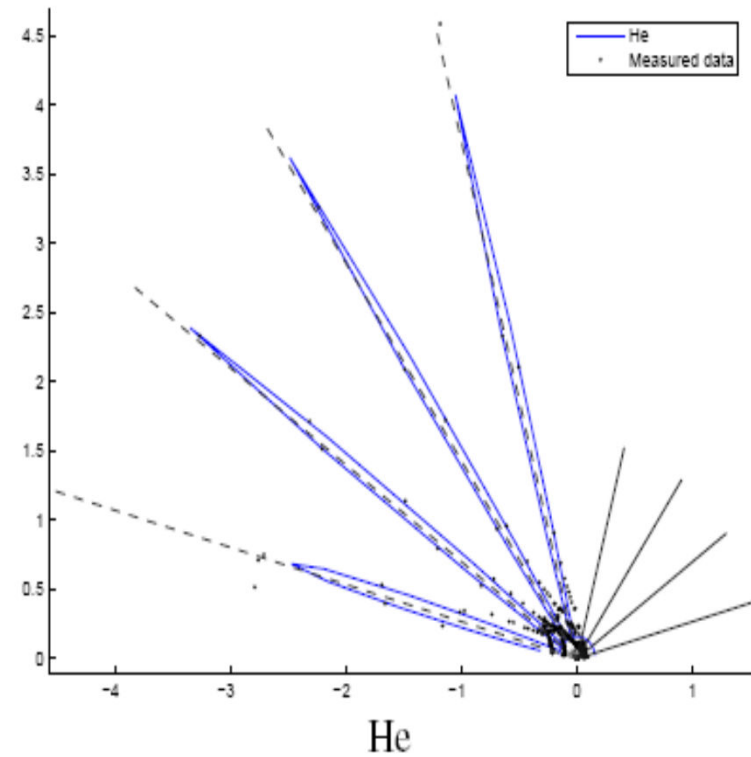
Ward: 0.314



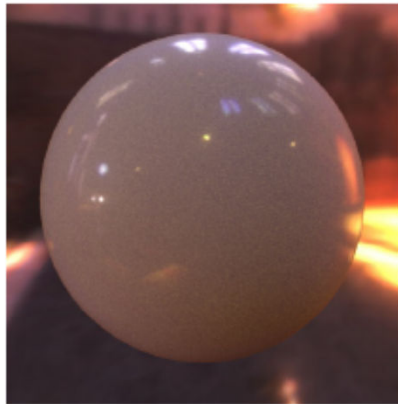
Lafortune: 0.313



CT: 0.314



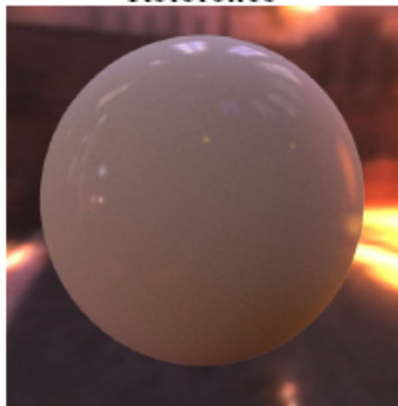
BRDF modely vs skutečnost



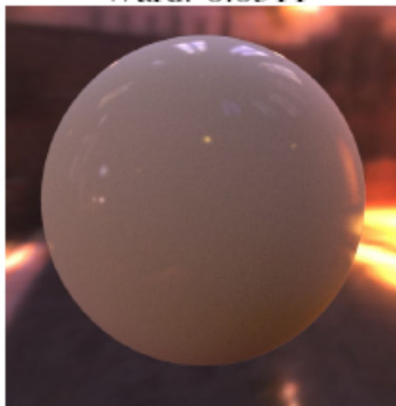
Reference



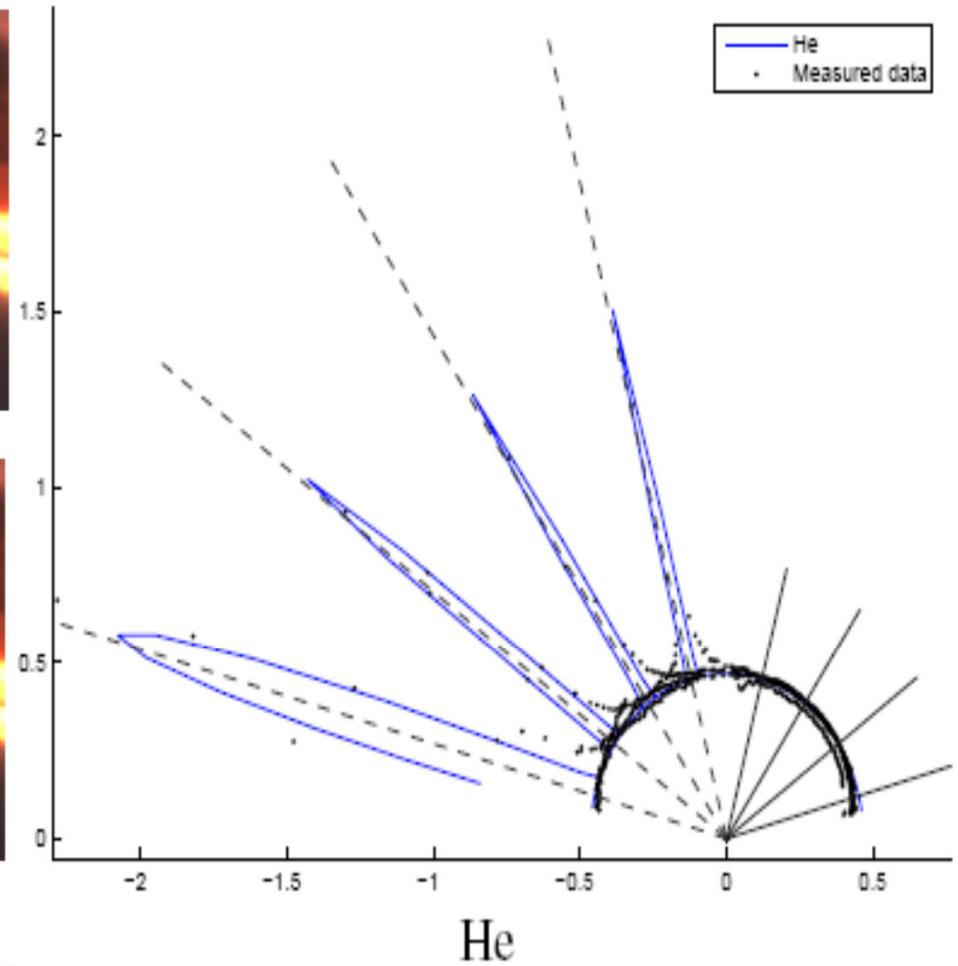
Ward: 0.0311



Lafortune: 0.0231



CT: 0.0221

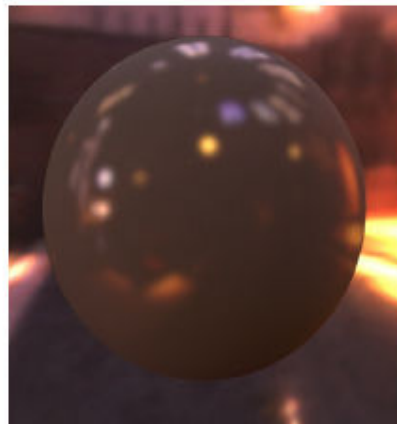


BRDF modely vs skutečnost

Rendered Images



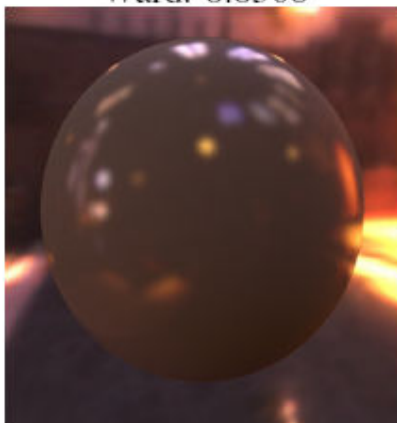
Reference



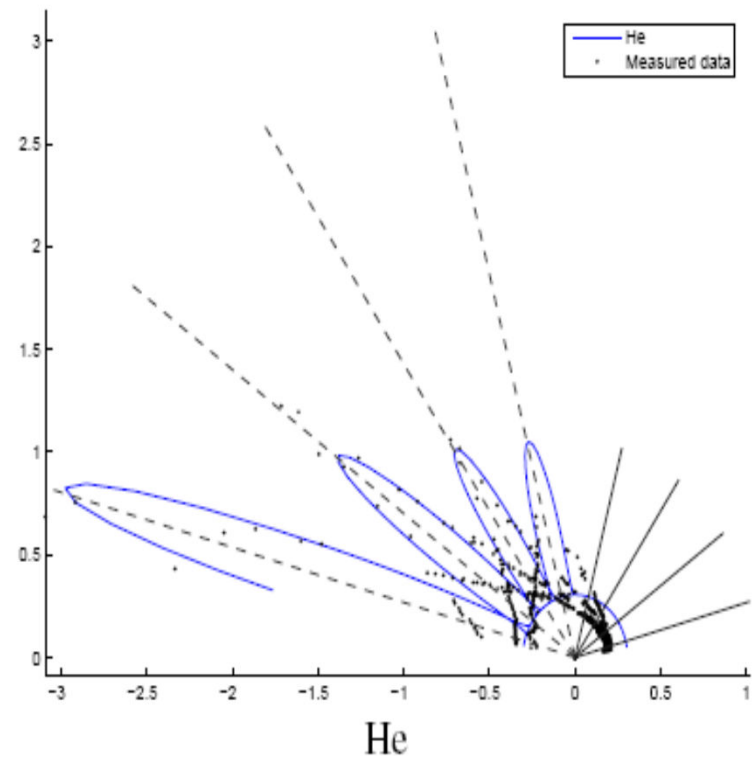
Ward: 0.0568



Lafortune: 0.0486



CT: 0.0434



BRDF modely vs skutečnost

Rendered Images



Reference



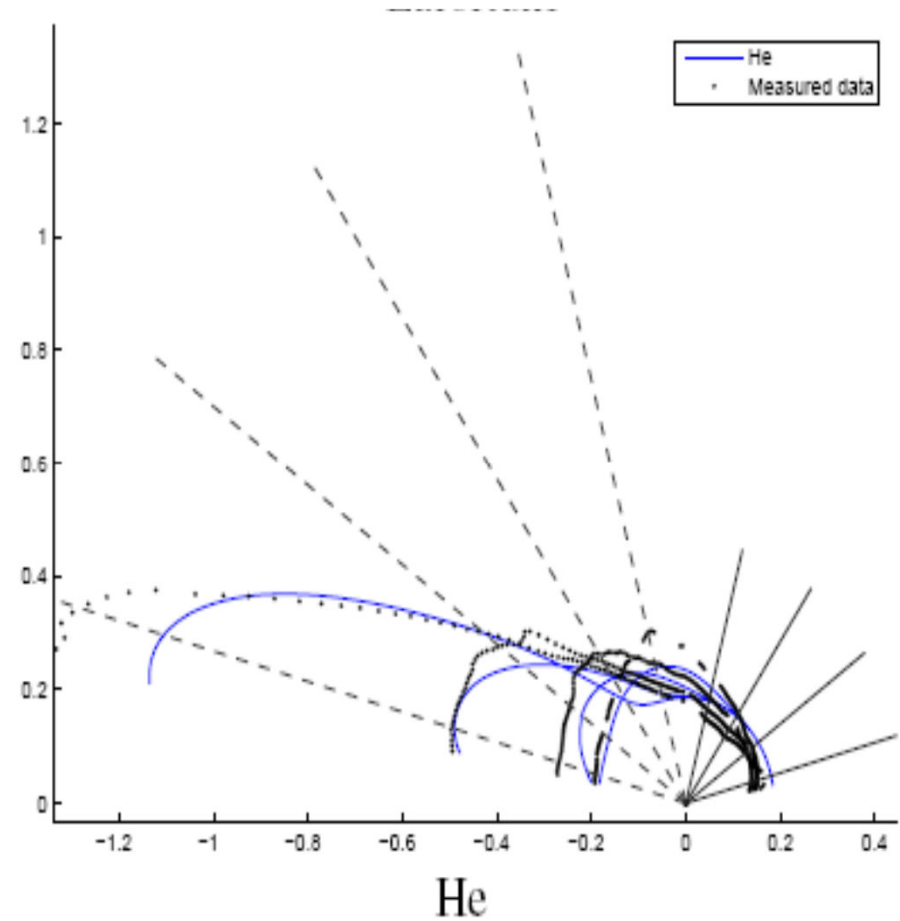
Ward: 0.0137



Lafortune: 0.00755

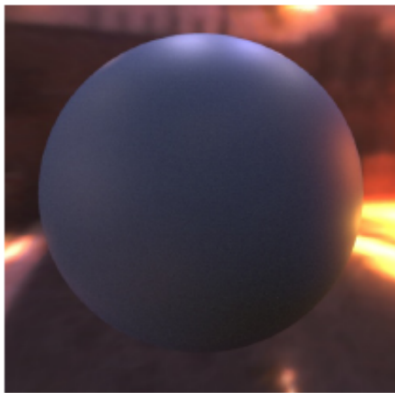


CT: 0.00307

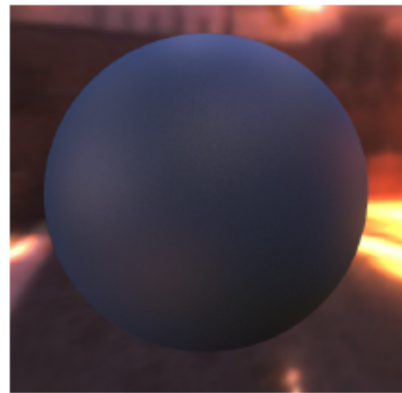


BRDF modely vs skutečnost

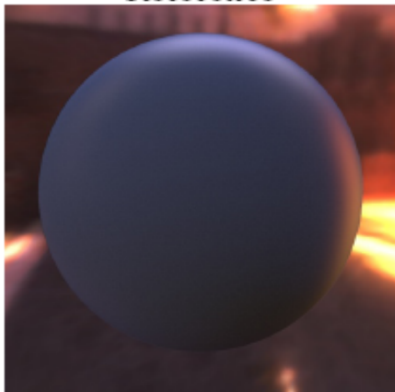
Rendered Images



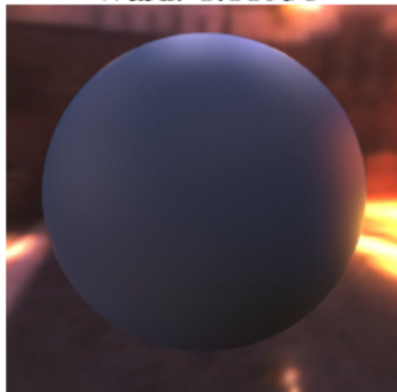
Reference



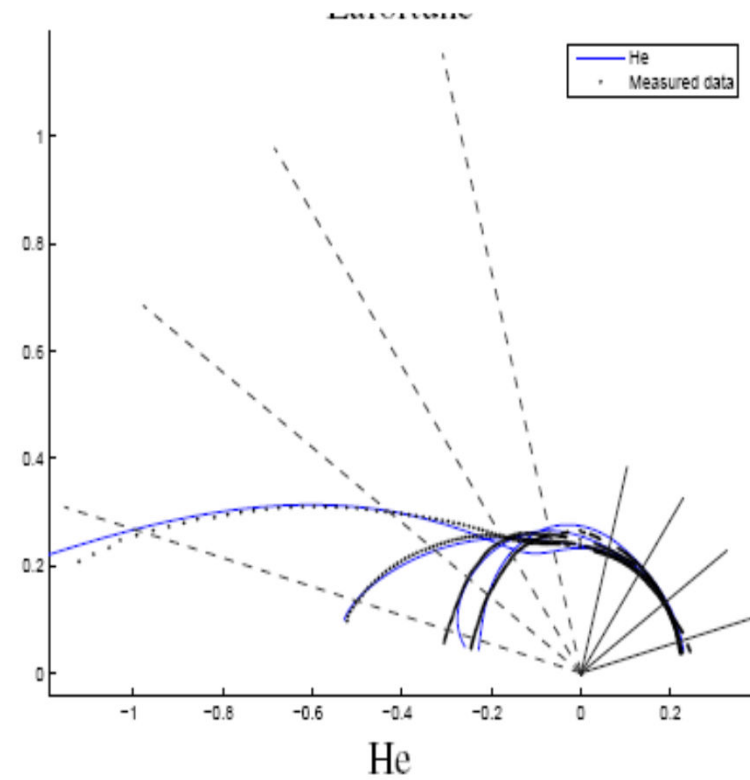
Ward: 0.00956



Lafortune: 0.00513



CT: 0.00139



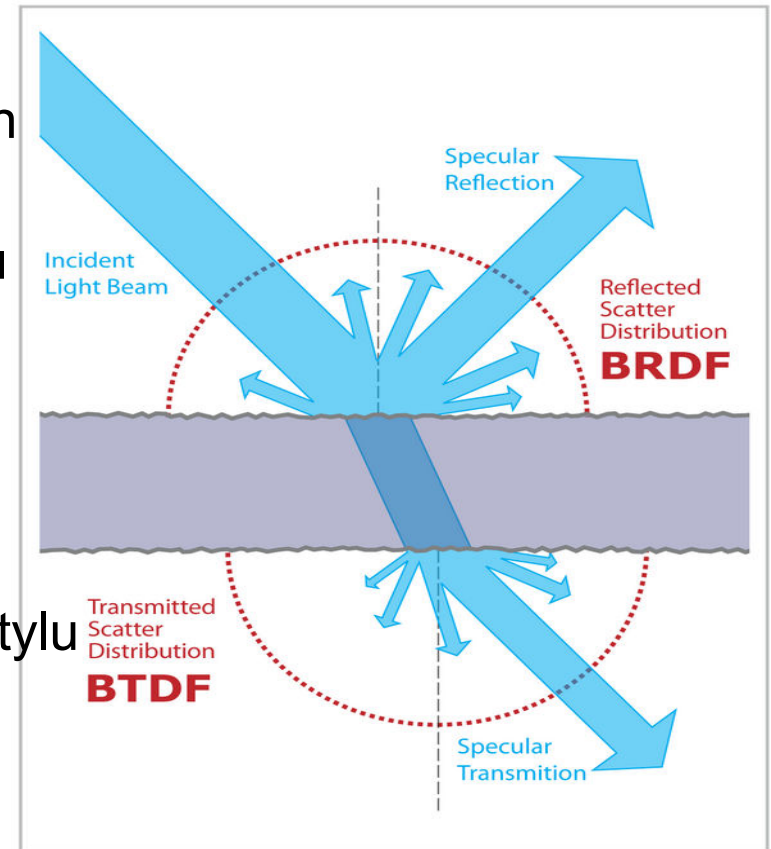
BRDF modely - metodologie

- 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



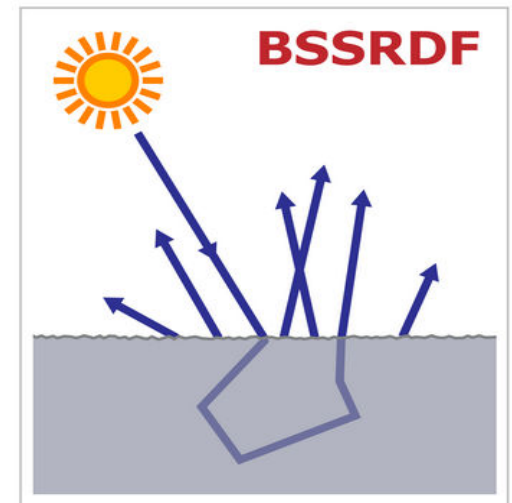
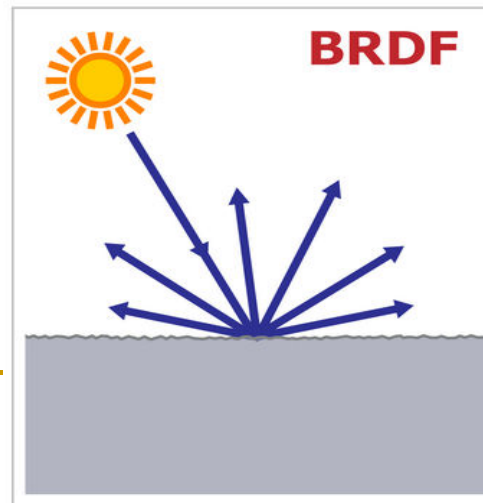
SBRDF, BTF

- 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
 - světlo přicházející v bodě x se odrazí ve stejném bodě
 - žádné cestování světla po povrchem
- BSSRDF [Jensen et al. 2001]
 - 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

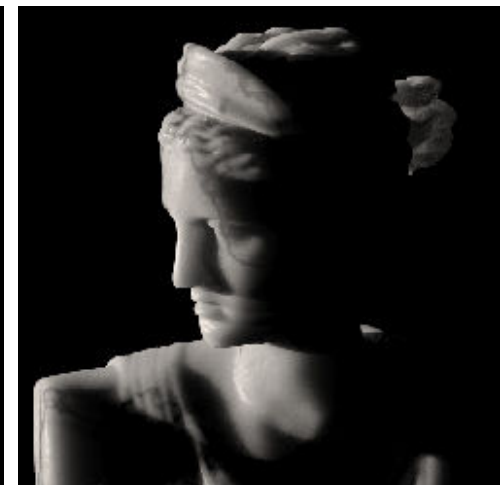
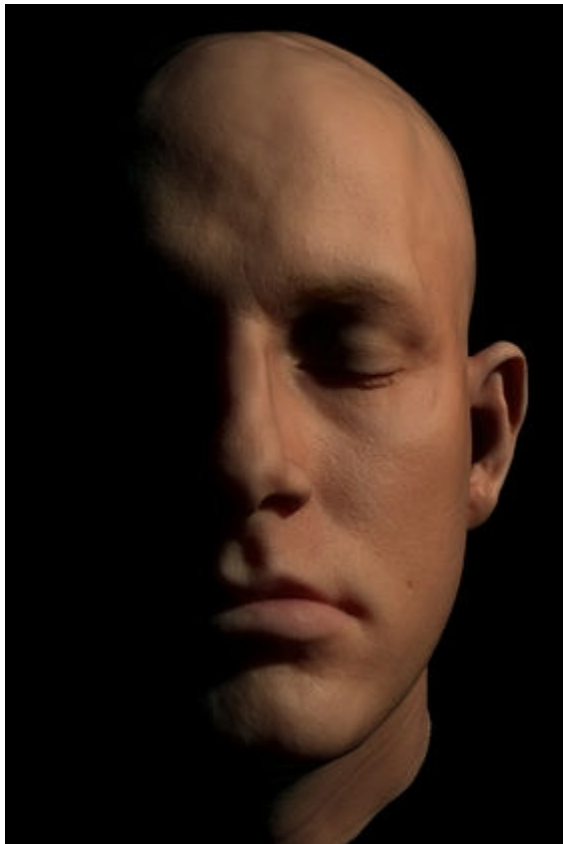


BRDF



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
-