

Модели
○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○
○

Компьютерная графика: Дополнительные главы

Лекция 1: Модели освещение

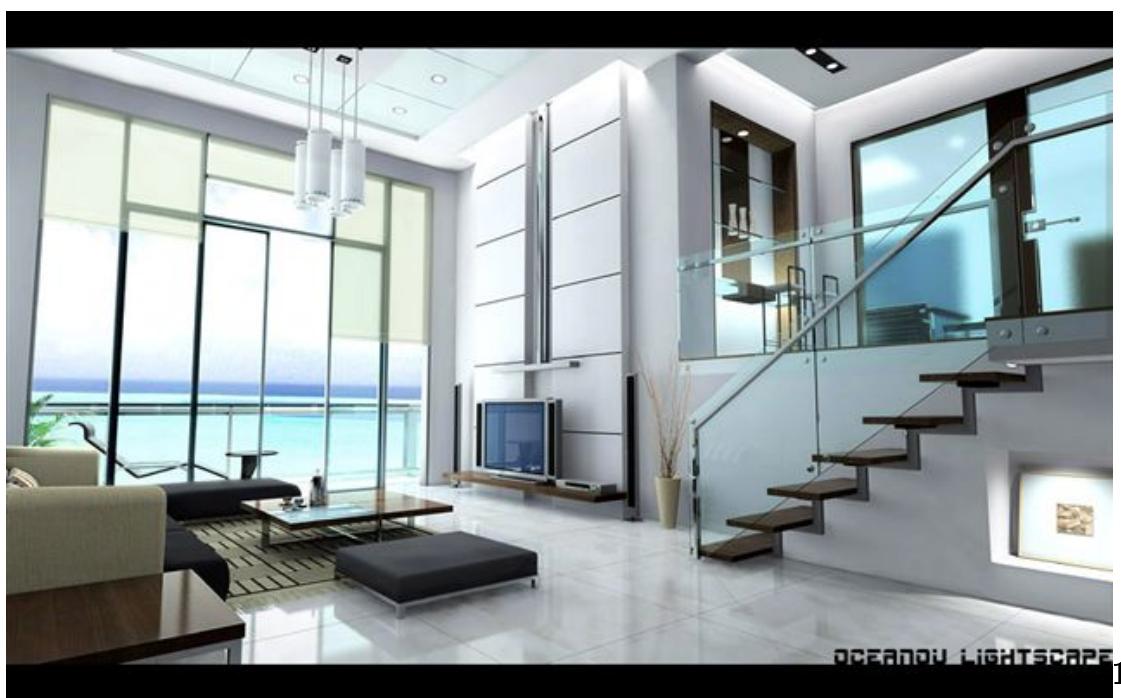
Н.Д. Смирнова

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

13.01.2011

Модели
○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○
○

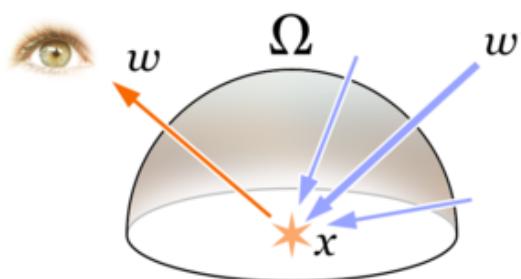
Очень хочется красивых реалистичных картинок



OPERAONI LIGHTING AREA¹

¹ http://www.mahaweb.com.my/creative_solution.html

Модели
 ●○○○○○○○○○○○○○○○○
 ○○○
 ○○
 ○



2

- необходимо уравнение визуализации (rendering equation)

$$L_o(x, \omega, \lambda, t) =$$

$$L_e(x, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega', \omega, \lambda, t) L_i(x, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot n) d\omega'$$

- упростим $L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega', \omega) L_i(x, \omega') (-\omega' \cdot n) d\omega'$

- а для одного источника

$$L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + f_r(x, \omega_i, \omega) L_i(x, \omega_i) (-\omega_i \cdot n)$$

²http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_equation

Модели
 ●○○○○○○○○○○○○○○○○
 ○○○
 ○○
 ○

Bidirectional reflection distribution function

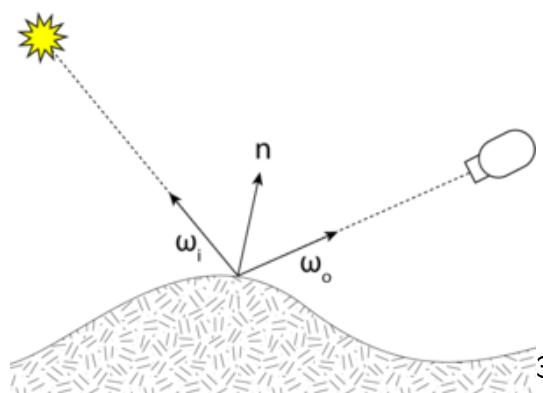
- $L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\omega_i \cdot n)$

- для однородной поверхности

$$L_o(\omega_o) = L_e(\omega_o) + f_r(\omega_i, \omega_o) L_i(\omega_i) (\omega_i \cdot n)$$

- рассмотрим только отраженный свет

$$L_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_i, \omega_o) L_i(\omega_i) (\omega_i \cdot n)$$



3

³en.wikipedia.org/wiki/Bidirectional_reflectance_distribution_function

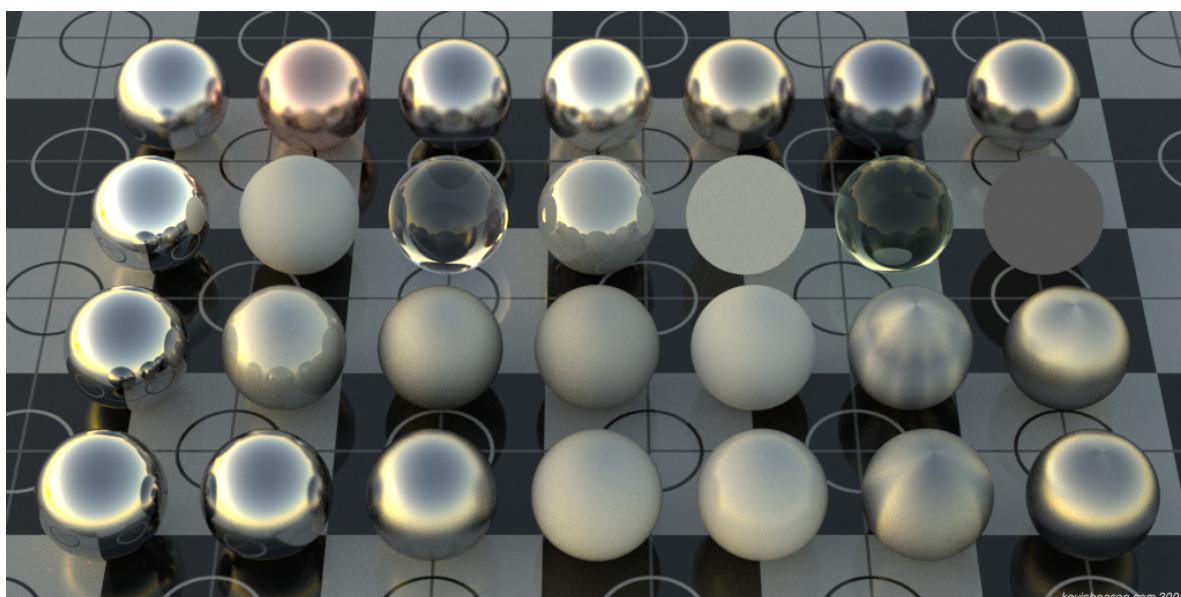
Свойства

- 4-х мерная функция определяет отражение света от **непрозрачной** поверхности $f_r(\omega_i, \omega_o)$ (Fred Nicodemus 1965)⁴
 - все векторы нормализованы
 - неотрицательна $f_r(\omega_i, \omega_o) \geq 0$
 - удовлетворяет равенству Гельмгольца $f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i)$
 - сохранение энергии $\forall \omega_i, \int_{\Omega} f_r(\omega_o, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \leq 1$

⁴Nicodemus, Fred (1965). "Directional reflectance and emissivity of an opaque surface"(abstract). Applied Optics 4 (7): 767–775.
doi:10.1364/AO.4.000767

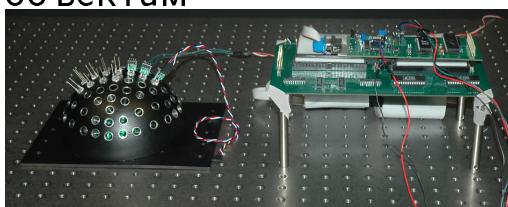
Где используется?

- "компьютерное зрение" для распознавания образов
- фотorealisticный рендеринг

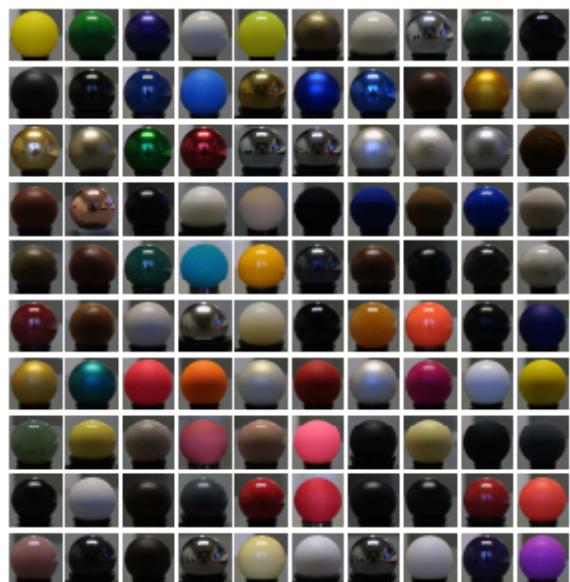


Откуда взять?

- измерение по реальным объектам



откалиброванные камеры и
источники света



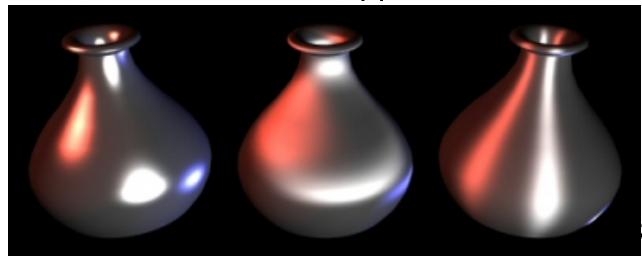
6 7

⁶Moshe Ben-Ezra and Jiaping Wang and Bennett Wilburn and Xiaoyang Li and Le Ma, An LED-only BRDF Measurement Device, IEEE, 2008

⁷<http://www.merl.com/brdf/>

Откуда взять?

- аналитические модели



8

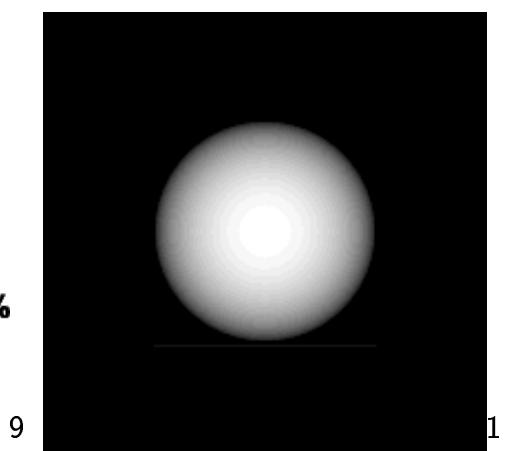
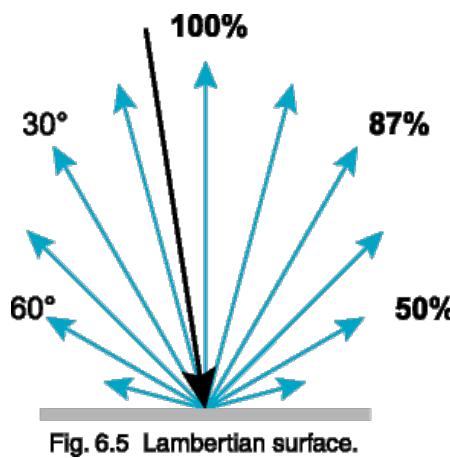
- Diffuse(бетон, песок) versus Specular (пластик, любая глянцевая поверхность)
- Isotropic versus Anisotropic (волосы, DVD)

⁸<http://www.now3d.it/Eng/news.htm>

Модели
 ○○○○●○○○○○○○○○○○

Diffuse - Lambertian

$$f_r = k_d, L_r(\omega_i) = k_d C_i(\omega_i \cdot n)$$



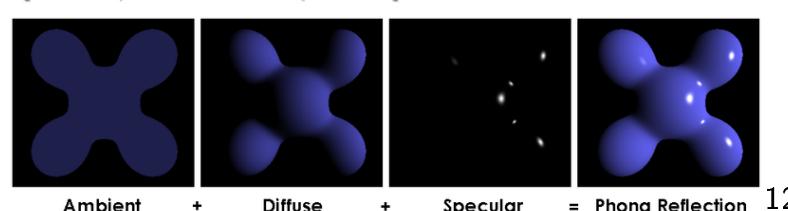
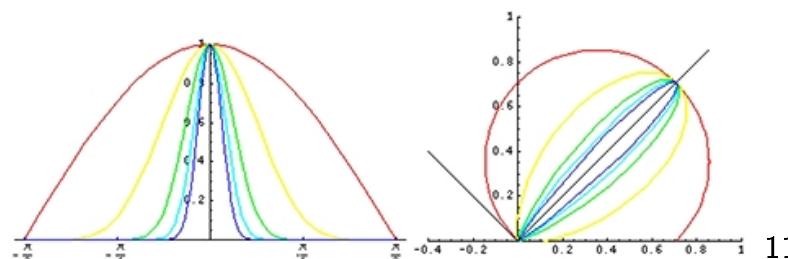
⁹homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/RYER/ch06.html

¹⁰www.math.montana.edu/frankw/ccp/multiworld/twothree/lighting/learn4.htm

Модели
 ○○○○●○○○○○○○○○○○

Specular - Phong

- Phong $f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{k_s(\omega_r \cdot R)^m}{\omega_i \cdot n} \Rightarrow L_r(\omega_i) = k_s C_i(\omega_r \cdot R)^m$
- Blinn-Phong $f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{k_s(n \cdot h)^m}{\omega_i \cdot n} \Rightarrow L_r(\omega_i, \omega_r) = k_s C_i(n \cdot h)^m$
- m характеризует гладкость поверхности (большие величины дают Gaussian Distribution)
- совершенно нефизична, крайне эффективна



¹¹<http://odforce.net/wiki/index.php/ReflectanceFunctions>

¹²<http://www.cs.cmu.edu/~pavlik/PLT/>

А еще specular

- Gaussian Distribution

$$f_r(\omega_i) = \frac{k_s e^{-(\frac{\cos(n,h)}{m})^2}}{\omega_i \cdot n} \Rightarrow L_r(\omega_i) = k_s C_i e^{-(\frac{\cos(n,h)}{m})^2}$$

- Beckmann distribution ¹³ (физичная модель)

$$f_r(\omega_i) = \frac{k_s e^{-(\frac{\tan(n,h)}{m})^2}}{\pi m^2 (n \cdot h)^4 (\omega_i \cdot n)} \Rightarrow L_r(\omega_i) = \frac{k_s C_i e^{-(\frac{\tan(n,h)}{m})^2}}{\pi m^2 (n \cdot h)^4}$$

- $m \in [0, 1]$ - характеризует гладкость поверхности

¹⁴ ¹⁵ (внимание: там есть ошибки в формулах)

¹³ Petr Beckmann, Andrey Spizzichino, The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, Pergamon Press, 1963

¹⁴ http://graphics.wikia.com/wiki/Specular_highlight

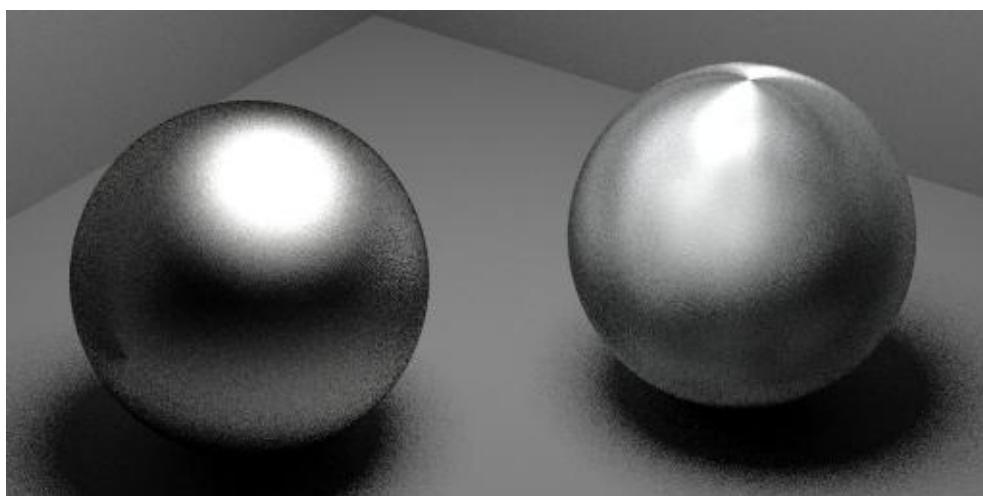
¹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Specular_highlight

UNDER CONSTRUCTION

- Torrance-Sparrow - идеально отражающие микрографии
- Blinn - тот же результат, только дешевле
- Cook-Torrance - учитывает еще длину волны
- Oren-Nayar - идеально рассеивающие микрографии
- Minnaert - для некоторых тканей типа вельвета
- HTSG - всеобъемлющая физически-ориентированная модель

Anisotropic

- ориентация микрограней имеет предпочтительное направление
- волосы, мех, диски, елочные игрушки, стальные поверхности

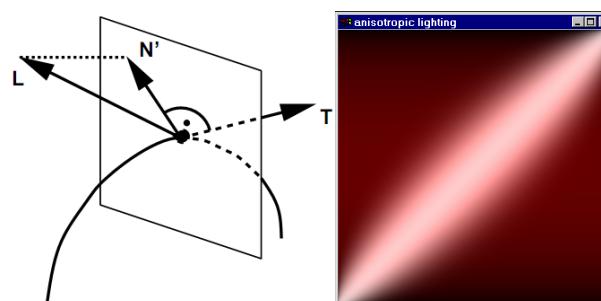


16

¹⁶http://www.graphics.cornell.edu/~westin/image_gallery.html

Heidrich-Seidel

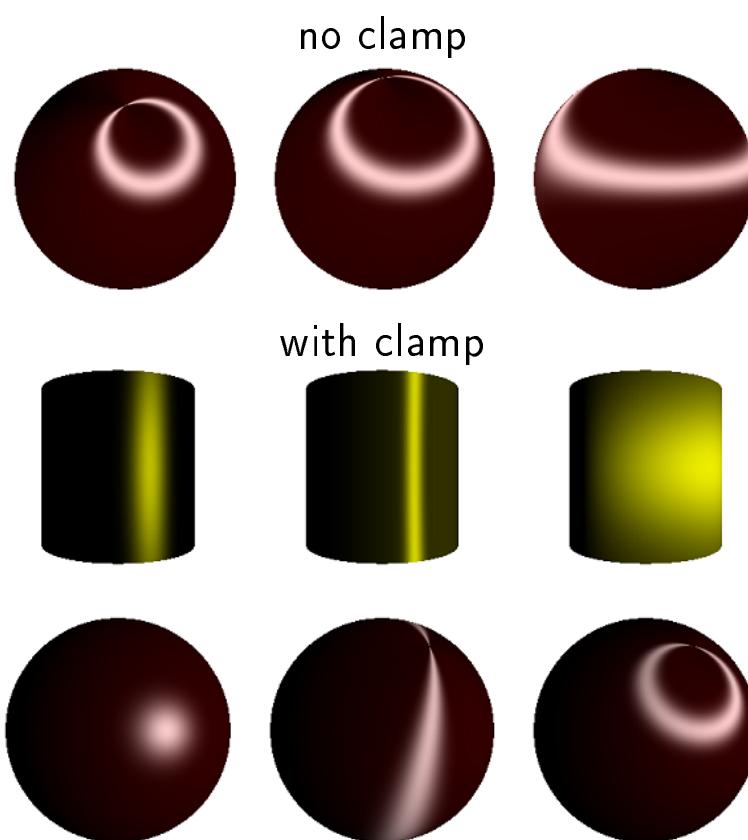
- Выбор нормали
 - Phong lighting $L_r = L_d + L_s = C_i(k_d(\omega_i \cdot n) + k_s(\omega_r \cdot R)^m)$
 - Heidrich-Seidel
- $$L_s = C_i(\sqrt{(1 - (\omega_i \cdot T))^2} \sqrt{(1 - (\omega_r \cdot T)^2)} - (\omega_i \cdot T)(\omega_r \cdot T))^m$$
- 17
- Для реалистичности $L_r = clamp(\cos(-n, \omega_i))(L_d + L_s)$
 - Lookup текстура $(\omega_i \cdot T)x(\omega_r \cdot T)$



¹⁷Heidrich, Seidel, Efficient Rendering of Anisotropic Surfaces Using Computer Graphics Hardware. IMDSP'98

Модели
 ○○○○○○○○○○●○○○○○

Heidrich-Seidel



Модели
 ○○○○○○○○○○●○○○○○

Ward

- эмпирическая модель на базе Gaussian Distribution (isotropic, anisotropic form)
- формула будет потом¹⁸
- довольно сложна в расчетах, используют аппроксимацию!
- физична (нормализована и симметрична)
- охватывает большое количество материалов



19

¹⁸Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. SIGGRAPH '92

¹⁹http://www.maxtutorials.org/anisotropic_shader.html

Модели
○○○○○○○○○○○○●○○○
○○○
○○
○

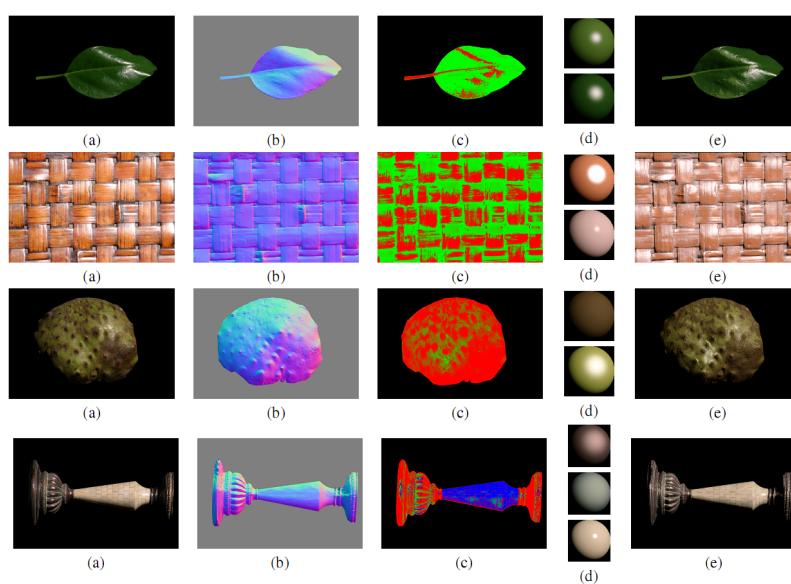
UNDER CONSTRUCTION

- Poulin-Fournier

Модели
○○○○○○○○○○○○●○○○
○○○
○○
○

Spatial-Varying BRDF

- поверхность объекта неоднородна

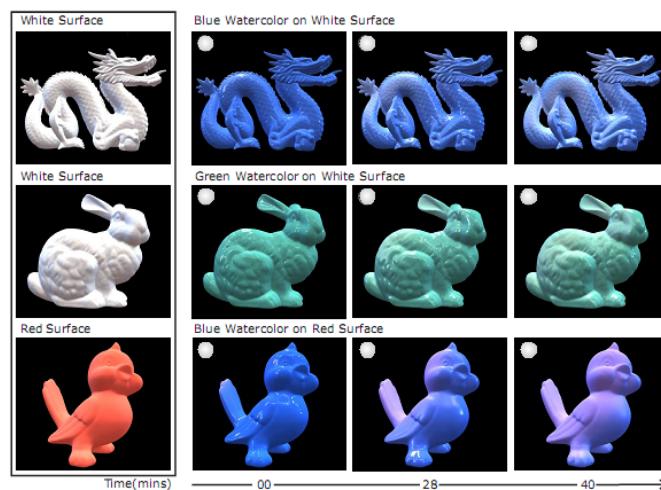


20

Модели
 ○○○○○○○○○○○○○○○○
 ○○○
 ○○
 ○

Time-Varying BRDF

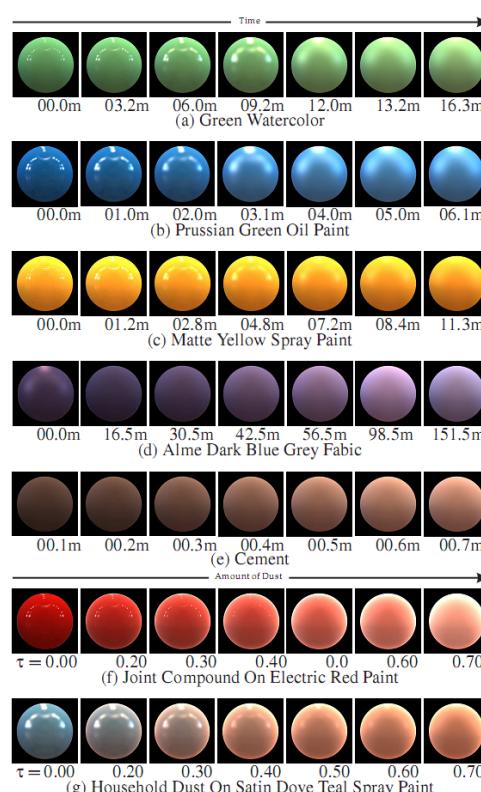
- физические свойства материала меняются во времени ²¹
 - высыхающие краски
 - высыхающие влажные шороховатые поверхности (цемент, ткани)
 - процесс накопления пыли на поверхности



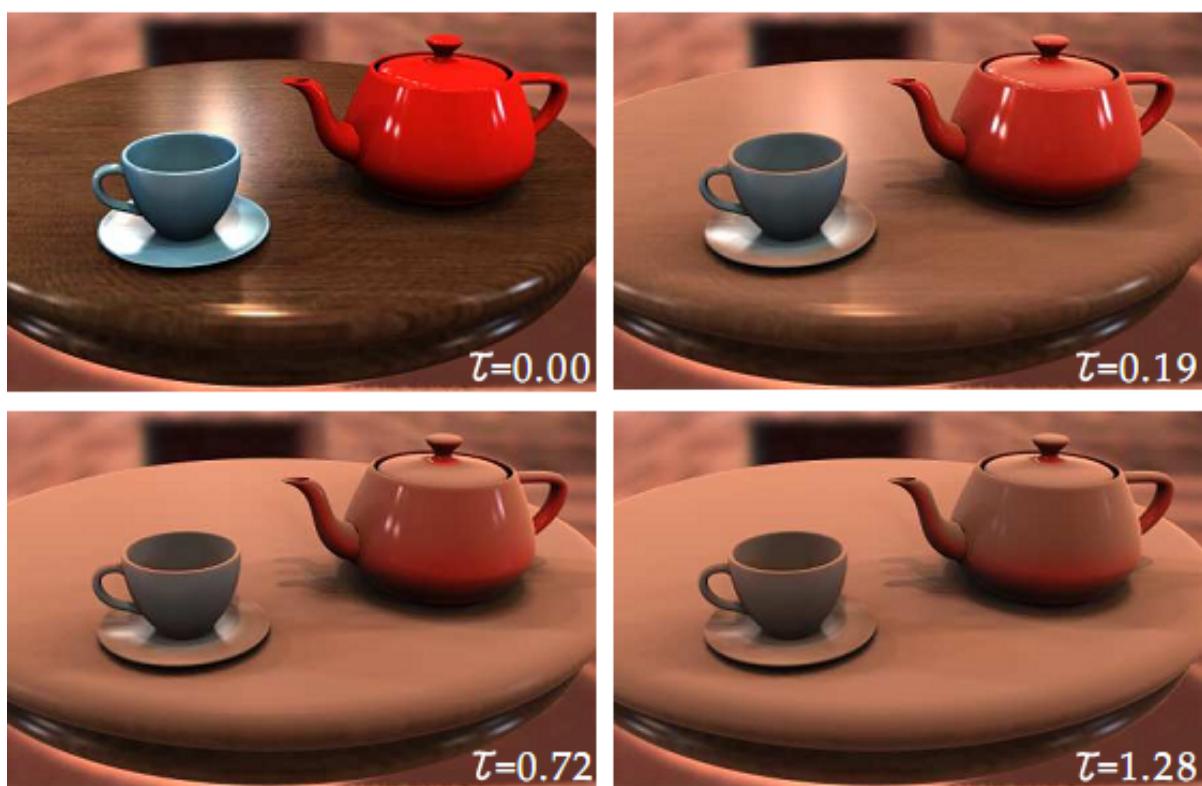
²¹Sun, Sunkavalli, Ramamoorthi, Belhumeur, Nayar. Time-Varying BRDFs. Eurographics Workshop on Natural Phenomena (2006)

Модели
 ○○○○○○○○○○○○○○○○
 ○○○
 ○○
 ○

Time-Varying BRDF[1]



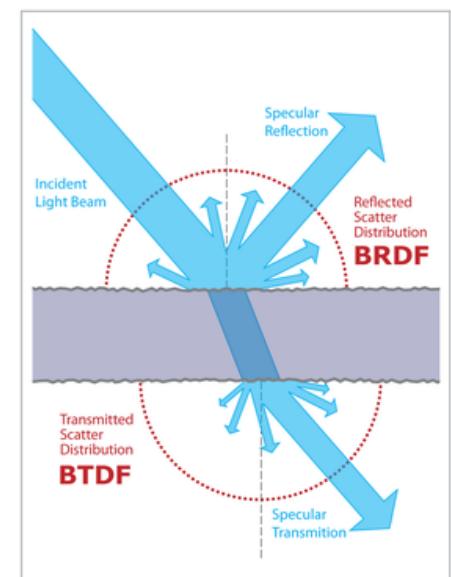
Time-Varying BRDF[2]



Bidirectional transmittance distribution function

- описывает перенос света через слой материала
- похоже на BRDF

$$L_t(\omega_i, \omega_o) = f_t(\omega_i, \omega_o)L_i(\omega_i)(\omega_i \cdot n)$$
- состоит из двух компонент:
 - reduced* - свет, прошедший через материал без рассеивания, с учетом поглощения
 - scattered* - доля света, полученная в результате рассеивания
- $$f_t(\omega_i, \omega_o) = f_{t,r}(\omega_i, \omega_o) + f_{t,s}(\omega_i, \omega_o)$$



Что же хорошего?

- тонкие полупрозрачные поверхности
- поверхности потолще, но слоеные

А что плохого?

- для каждого слоя надо считать BRDF + BTDF

Аналитические модели

- **HanrahanGrueger93** простое рассеивание - аналитический учет, множественное рассеивание - метод монте-карло
 - физично, но без рефракции, интерференции, квантовых эффектов
- **Stam01** поверхность - гауссовский шум
⇒ аналитическая модель
 - в разы быстрее и меньше памяти



²²P. Hanrahan and W. Krueger. Reflection from Layered Surfaces due to Subsurface Scattering. SIGGRAPH '93

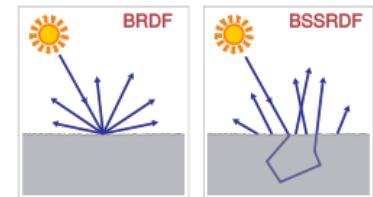
²³Jos Stam. An Illumination Model for a Skin Layer Bounded by Rough Surfaces. 2001

Bidirectional subsurface scattering distribution function

- учитывает рассеивание света внутри материала
- более полная модель по сравнению с BRDF
 - уравнение визуализации

$$L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega', \omega) L_i(x, \omega') (-\omega' \cdot n) d\omega'$$
 - излучаемый свет

$$L_e(x, \omega) = \int_A \int_{\Omega} f_s(x, x', \omega', \omega) L_i(x', \omega') (-\omega' \cdot n) d\omega' dx'$$
 - отдельно моделируют
 - одиночное рассеивание (single scattering)
 - множественное рассеивание (multiple scattering) ← важнее



24



25

²⁴ <http://www.blender.org/development/release-logs/blender-244/subsurface-scattering>

²⁵ <http://www.awn.com/imagepicker/image/6748>

Bidirectional scattering distribution function

Существует 4 значения:

- обобщение: BTDF + BRDF, черный ящик с двумя векторами, а внутри....
 - общее название всех BxDF
 - при производстве гладких поверхностей, как характеристика равномерности отражения света (Lambertian: BSDF= const)
 - класс моделей освещения более сложных, чем простейшие аналитические

TODO

- Компрессия BRDF
 - Env Mapping Based Lighting Models
 - Pre-computed radiance transfer