



Спецкурс ОСФИ

Лекция 2

02 марта 2011

Взаимодействие света и материала. ДФО. Модели освещения

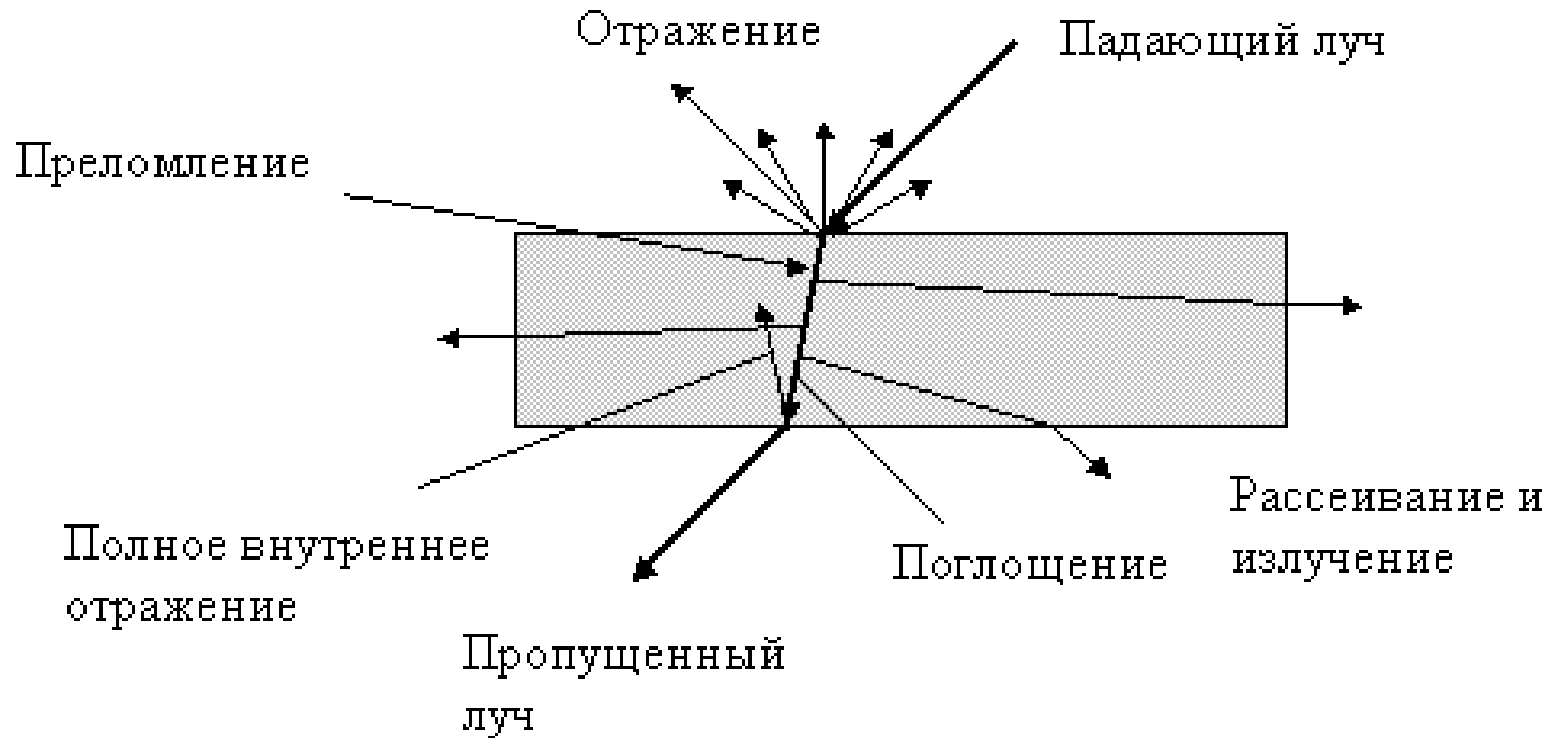
Алексей Игнатенко, к.ф.-м.н.

Лаборатория компьютерной графики и
мультимедиа ВМК МГУ

На прошлой лекции: радиометрия, фотометрия

- Для расчета изображения необходимо уметь количественно считать энергию
- Инструмент: радиометрия
 - Поток
 - Сила
 - Освещенность / светимость
 - **Яркость (излучение)**
- Излучение сохраняется вдоль прямой!
- Фотометрия: раздел радиометрии, спектр энергии взвешен функцией спектральной эффективности глаза

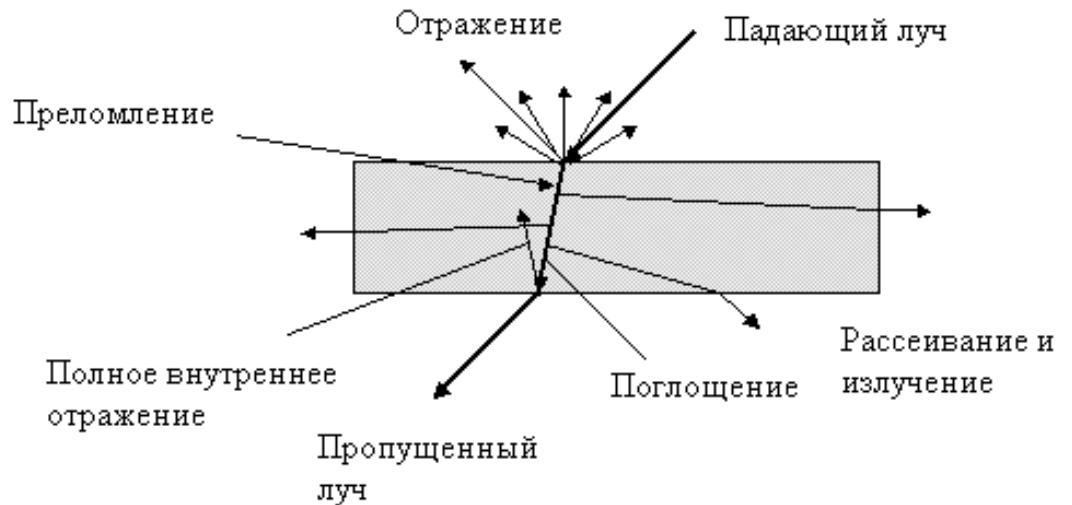
Взаимодействие света и материала: отражение, поглощение, пропускание



Типы взаимодействия света и материала

Отражение

- Зеркальное
- Диффузное
- Смешанное
- Ретро-зеркальное
- Блеск

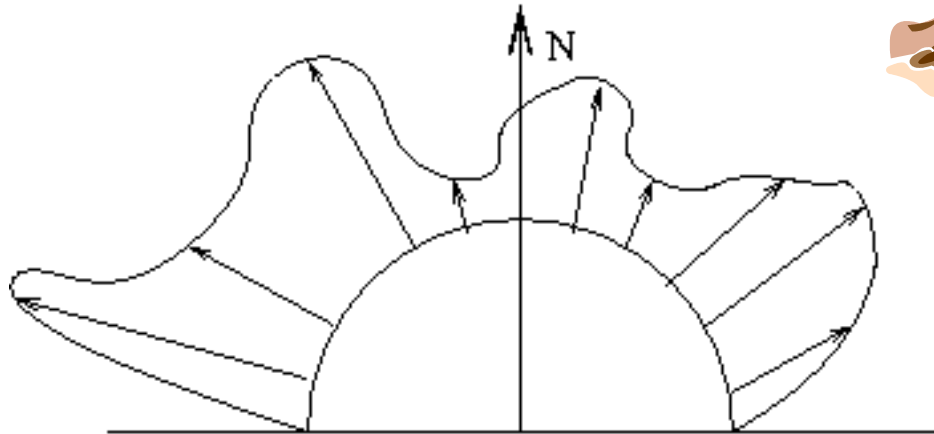
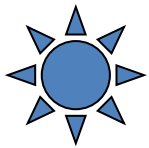


Преломление (пропускание)

- Зеркальное
- Диффузное
- Смешанное

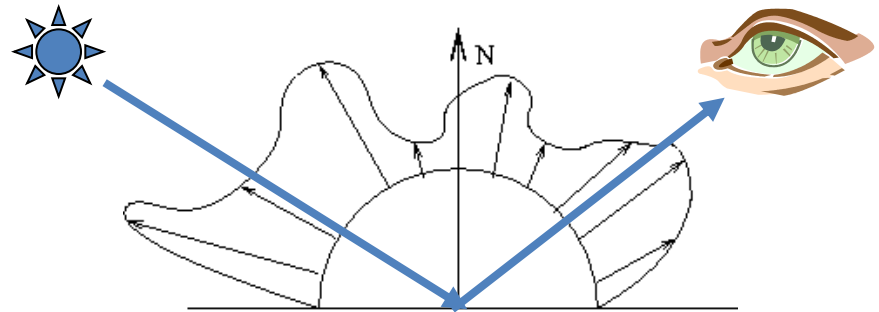
Отражение и ДФО

Задача – рассчитать количество энергии, излучаемой в сторону наблюдателя при заданном входящем излучении



ДФО: определение

- Чему равна $L_o(p, \omega_o)$ - излучение поверхности в направлении ω_o
- При условии излучения по направлению ω_i , равной $L_i(p, \omega_i)$
- BRDF – Bidirectional Reflection Distribution Function
- **ДФО = Двухнаправленная Функция Отражения**



Предполагается, что исходящее излучение зависит только от входящего излучения для данной точки!

ДФО (2)

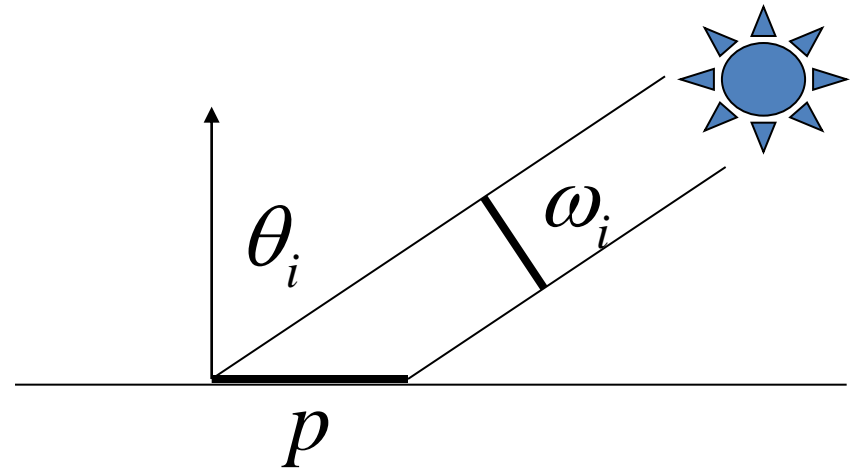
Рассмотрим
дифференциальную
освещенность
поверхности в точке p в
зависимости от яркости:

$$dE(p, \omega_i) = L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

В направление ω_o будет
излучаться

$$dL_o(p, \omega_o) \propto dE(p, \omega_i)$$

Из предположения линейности и
сохранения энергии



ДФО (3)

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



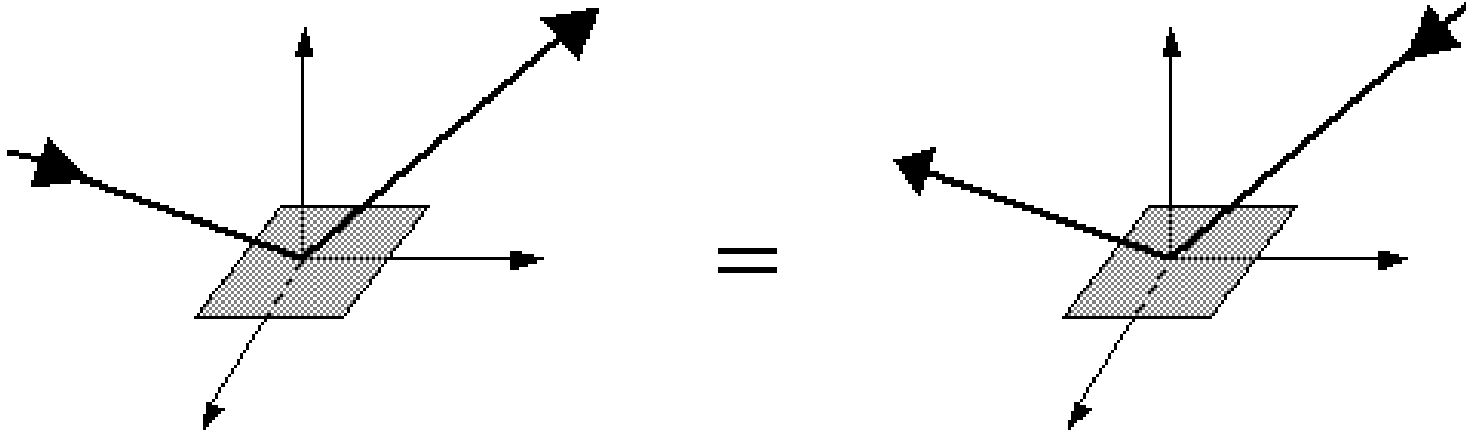
ДФО

Свойства физически-корректных ДФО

- Обратимость
- Сохранение энергии

Свойства ДФО: обратимость

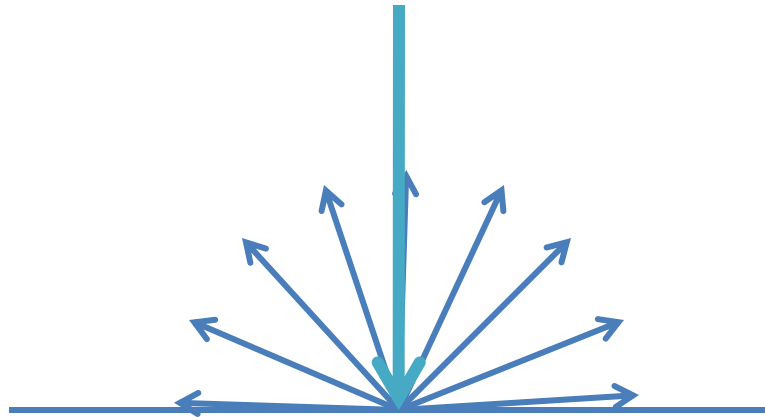
$$\forall \omega_o, \omega_i \quad f_r(p, \omega_o, \omega_i) = f_r(p, \omega_i, \omega_o)$$



Еще называют «принцип обратимости Гельмгольца»

Свойства ДФО: сохранение энергии

$$\int f_r(p, \omega_i, \omega') \cos \theta' d\omega' \leq 1$$



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

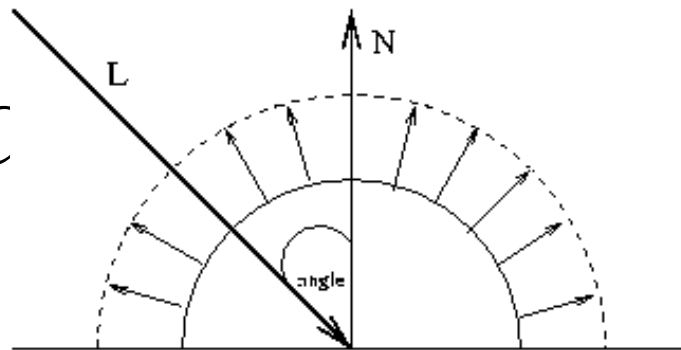
Примеры ДФО: диффузное отражение

$$f_{r,d}(p, \omega_i, \omega') = f_{r,d}(p) = C$$

Для идеального диффузного
отражения (ламбертовой
поверхности)

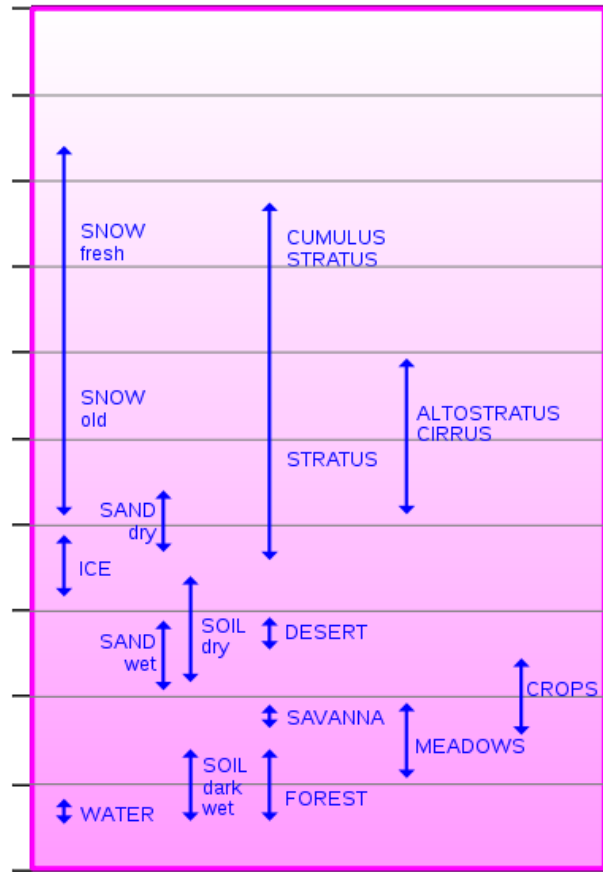
$$f_{r,d}(p, \omega_i) = \frac{1}{\pi}$$

Вывод: $L = E/\pi$, $f = L/E$, $\Rightarrow f = 1/\pi$



Альбе́до

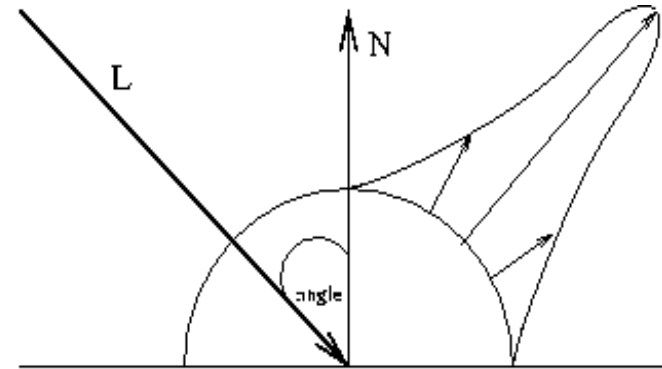
$$f_{r,d}(p, \omega_i) = \frac{1}{\pi}$$



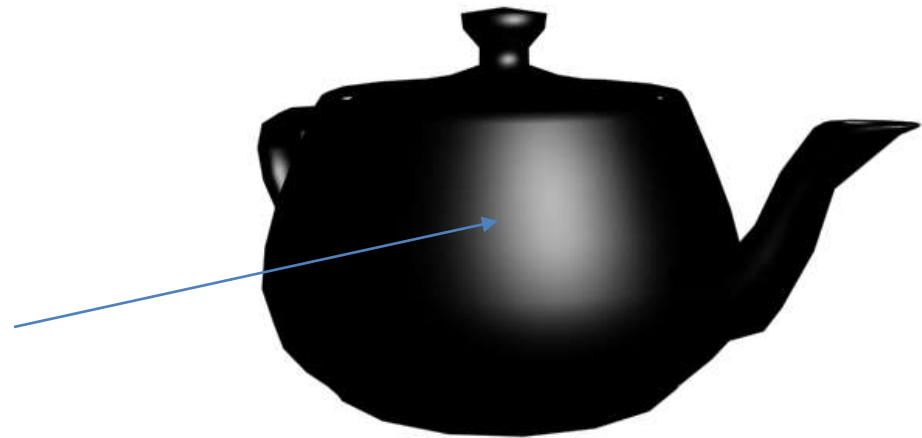
Примеры ДФО: зеркальное отражение

- Идеальное зеркальное отражение

$$f_{r,s}(p, \omega_i, \omega_o) = f_{r,d}(p, \omega_i)$$



«Блеск»
(glossiness)

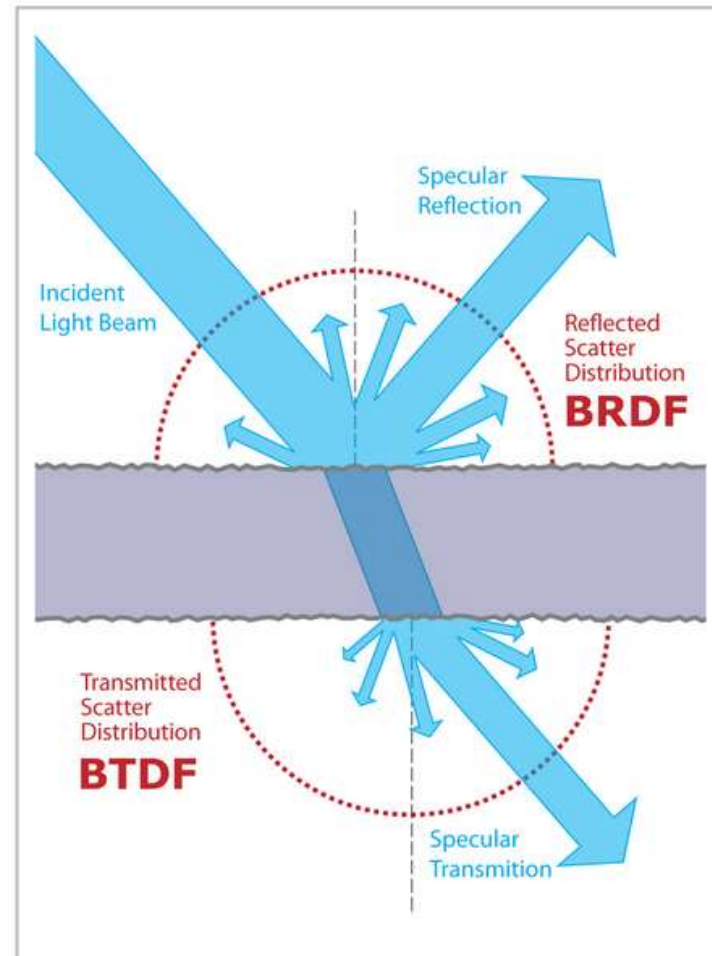


ДФП

- BTDF – Bidirectional Transmittance Distribution Function
- ДФП = Двунаправленная Функция Пропускания
- Определение аналогично ДФО, но для другой стороны поверхности

$$\text{ДФР} = \text{ДФО} + \text{ДФП}$$

Двунаправленная функция
рассеивания



Расчет излучения точки поверхности: rendering equation

- Для каждой длины волны!
- Здесь учитываем только отражение

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

$$dL_o(p, \omega_o) = f_r(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

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

Rendering Equation

Расчет излучения точки поверхности: дискретный случай

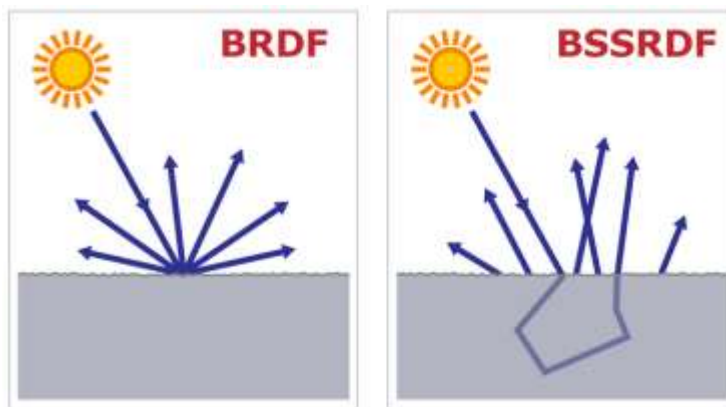
$$L(p, \omega_o) = \sum_{j=0}^{n-1} f_r(p, \omega_o, \omega_i^j) L_i^j \cos \theta_i^j$$

ω_i^j - Направление на j-й источник света

θ_i^j - Угол между направлением на j-й источник и нормалью к поверхности

Ограничения модели ДФР

- Отсутствие дифракции, интерференции
- Отсутствие поляризации
- Отсутствие флюоресценции и фосфоресценции
- Отсутствие поверхностного рассеивания
 - Surface scattering
 - Задачу решает ФОР (Функция Объемного Рассеивания) – обобщение модели ДФР



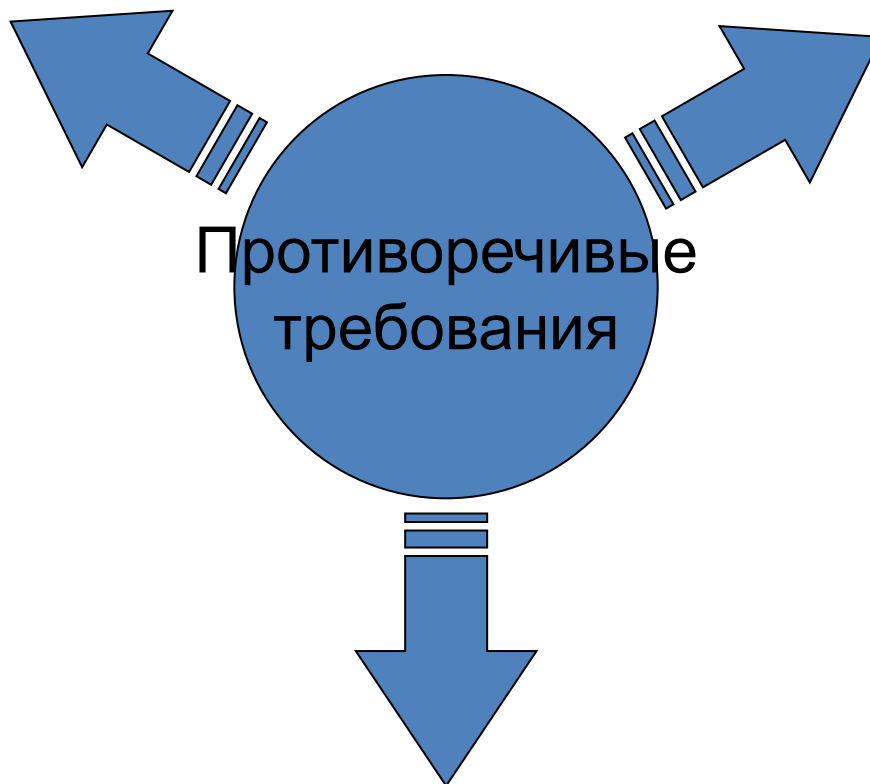
Что такое модель освещения?

- Тонирование (shading)
 - Процесс вычисления исходящего излучения для точки поверхности
- Модель тонирования = модель освещения (shading model)
 - Функция, задающая исходящую энергию в зависимости от входящей

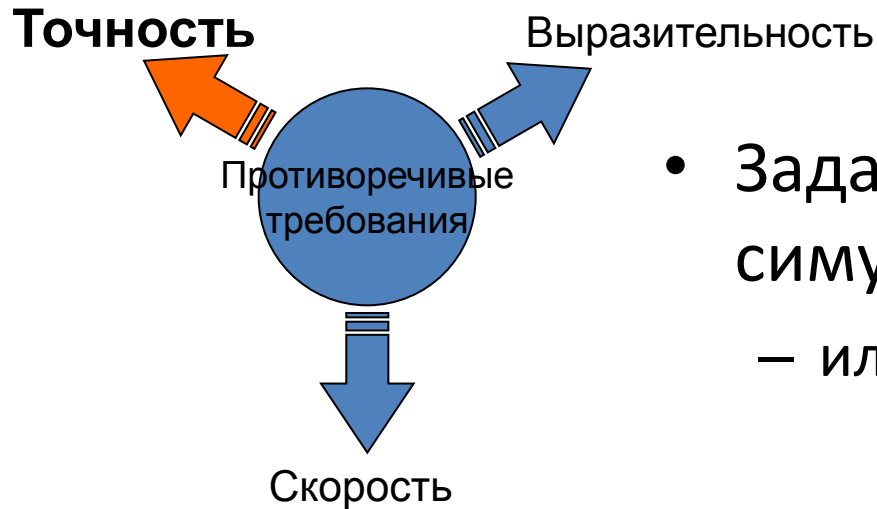
Модели освещения

Точность

Выразительность

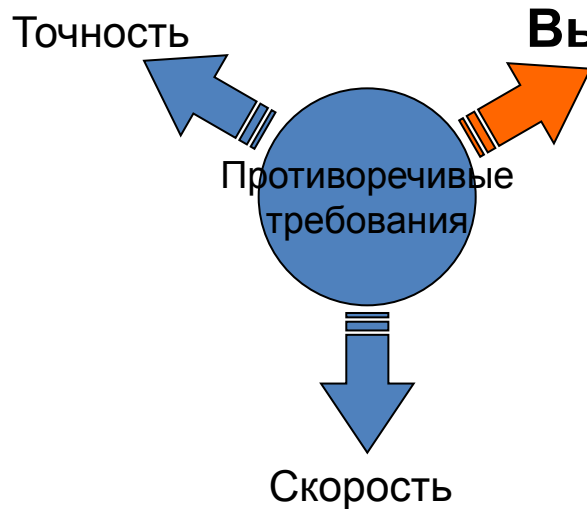


Модели освещения: точность



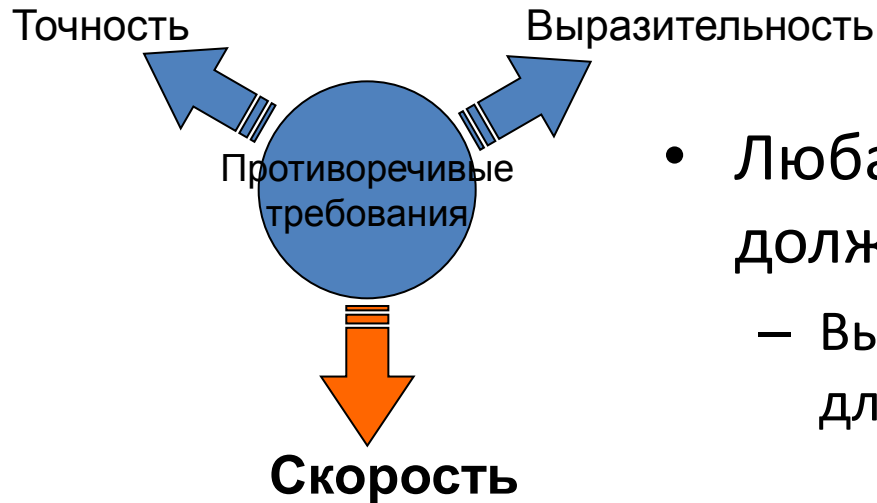
- Задачи физически точной симуляции реальных сцен – или «предсказания»
- Нужна численная точность

Модели освещения: выразительность



- Творчество и искусство
- Объекты должны выглядеть так, как мы хотим
- Не важно, возможно ли это в реальности

Модели освещения: скорость



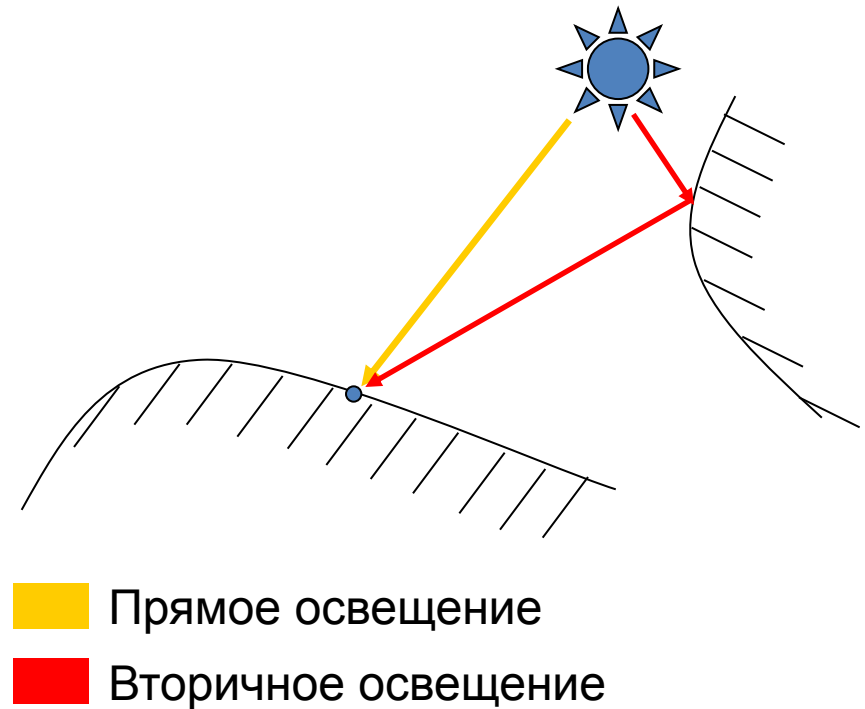
- Любая модель освещения должна быть быстрой
 - Выполняется миллионы раз даже для простых сцен!
- Не имеют смысла модели, расчет которых возможен только теоретически

Физически обоснованные и эмпирические модели

- Физически обоснованные
 - Аппроксимация свойств реального материала (слои, поведение частиц и т.п.)
- Эмпирические
 - «Подгон» под внешний вид материала
 - При грамотном выборе параметров может давать более качественные результаты!

Модели освещения: первичное и вторичное освещение

- Прямое освещение
 - Свет приходит в точку тонирования из источника
- Вторичное освещение
 - Свет был отражен или преломлен объектами сцены



Удобное представление освещения – сфера

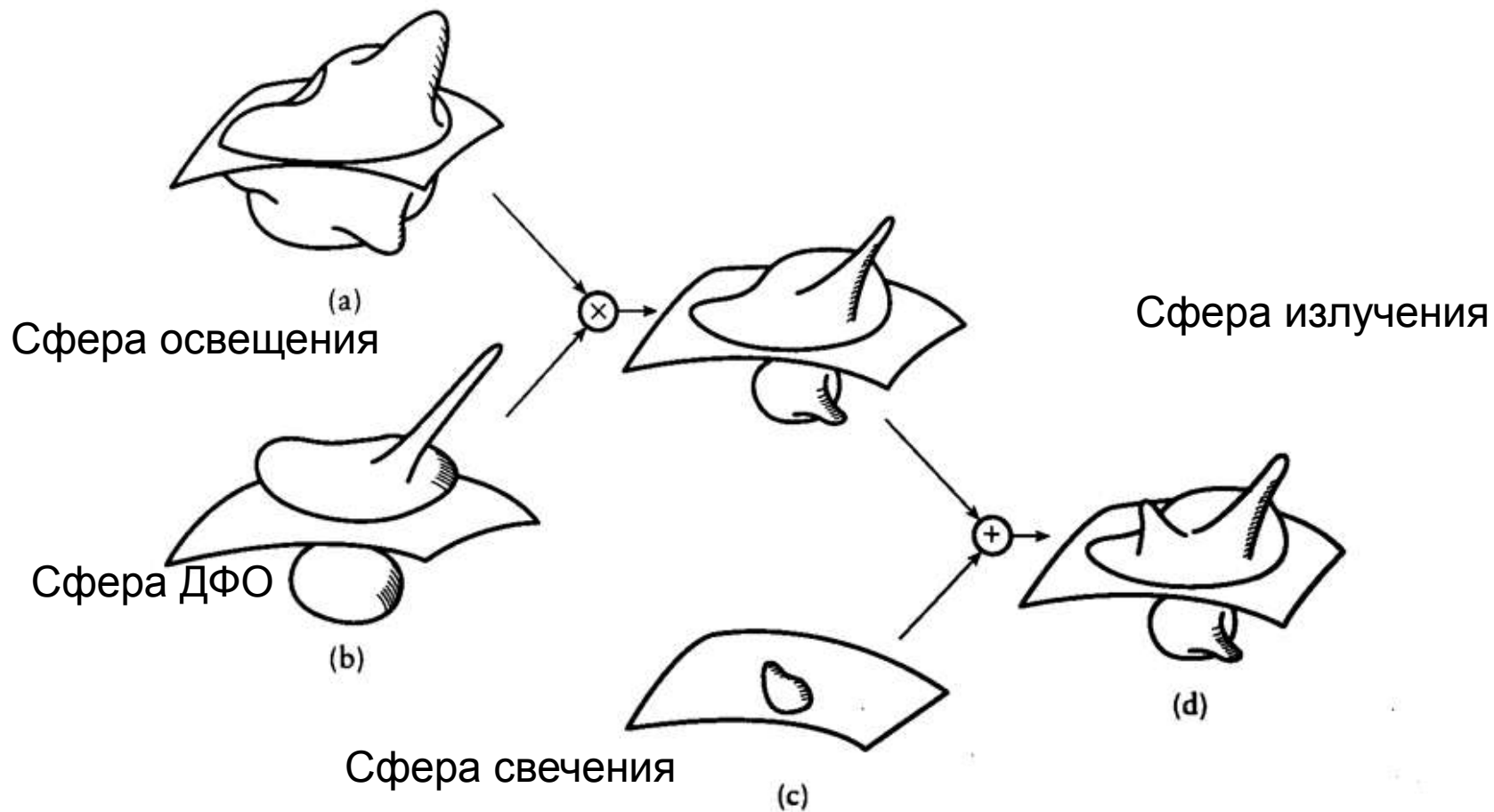
- Стоим вокруг точки тонирования сферу
- Каждой точке сферы сопоставлено входящее (исходящее) направление
- Излучение (яркость) по данному направлению задает радиус в данной точке
 - Получается не сфера, а «клякса»
 - Может быть не яркость, а любой параметр



Типы сфер освещения

- Сфера освещения (illumination sphere)
- Сфера ДФО (BRDF sphere)
- Сфера излучения (luminance sphere)
- Сфера свечения (emission sphere)

Вычисление сферы излучения



Процесс тонирования

1. Строим сферу освещения (сколько света попадает на данную точку?)
 2. Комбинируем с ДФО/ДФР (На выходе - сфера излучения)
 3. Находим излучения для любого направления (телесного угла)
- На практике шаги редко выполняются полностью и в этом порядке
 - Часто используется априорное знание о материале для дискретизации сфер по наиболее важным направлениям
 - Пример – зеркальный материал

Модели освещения: локальные и глобальные модели

- Локальные модели
 - Собирается излучение только от источников света
 - Часто используется рассеянное (ambient) освещение
- Глобальные модели
 - Собирают вторичное освещение

Модели освещения: локальные и глобальные модели (2)

- «Глобальность» модели часто не зависит от функции вычисления излучения в точке!
- Разница в построении сферы освещения
 - Обусловлена разными алгоритмами синтеза

Модели освещения

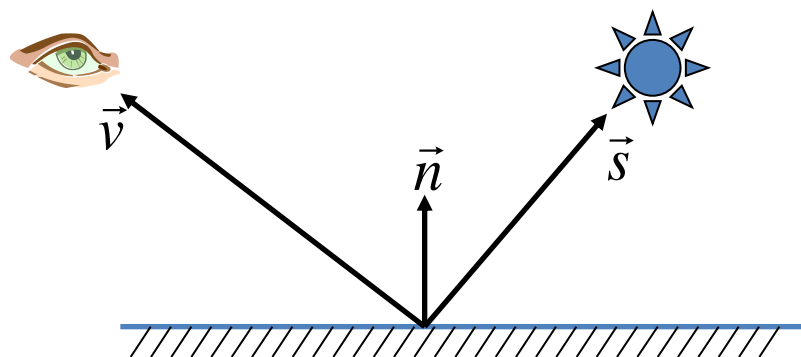
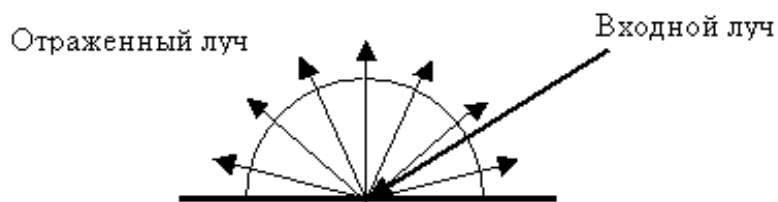
- Эмпирические
 - Ламберт
 - Фонг
 - Блинн-Фонг
 - Лафортюн
- Физические
 - Френель
 - Кук-Торранс
- Дискретизованная BRDF

Модели освещения: Ламберт

- BRDF константна всегда
=C/Pi
 - C определяет процент отражения для данной длины волны

Для одного
источника света

$$L_o = L_i k_d \underbrace{(\vec{s} \cdot \vec{n})}_{\cos \omega_i}$$



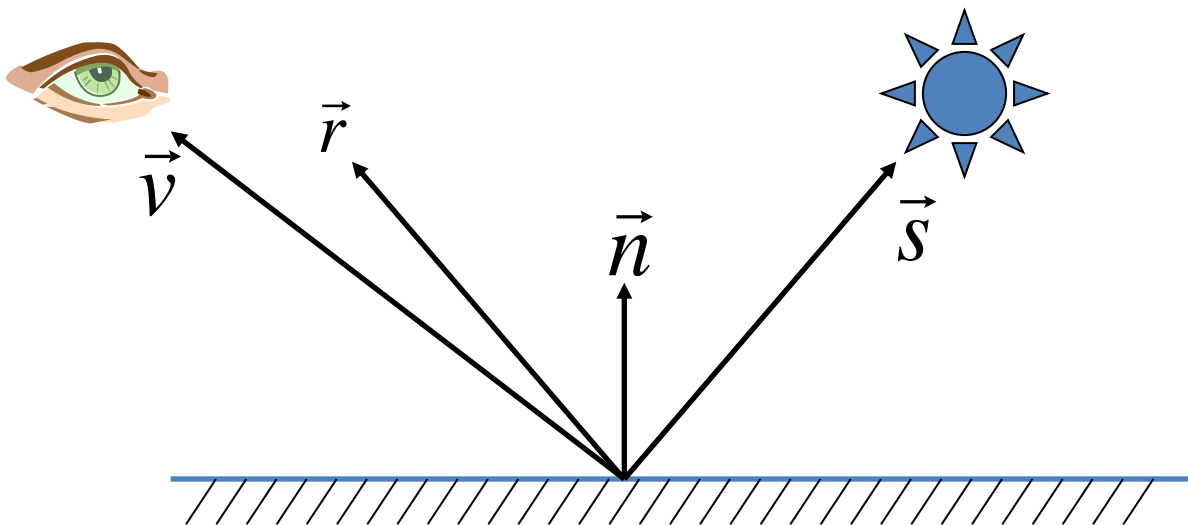
Ламберт: свойства

- Самая простая модель освещения
- Позволяет описывать отражение идеально диффузных поверхностей
 - В природе не существует таких
- Удобная модель
 - в том числе для анализа свойств других

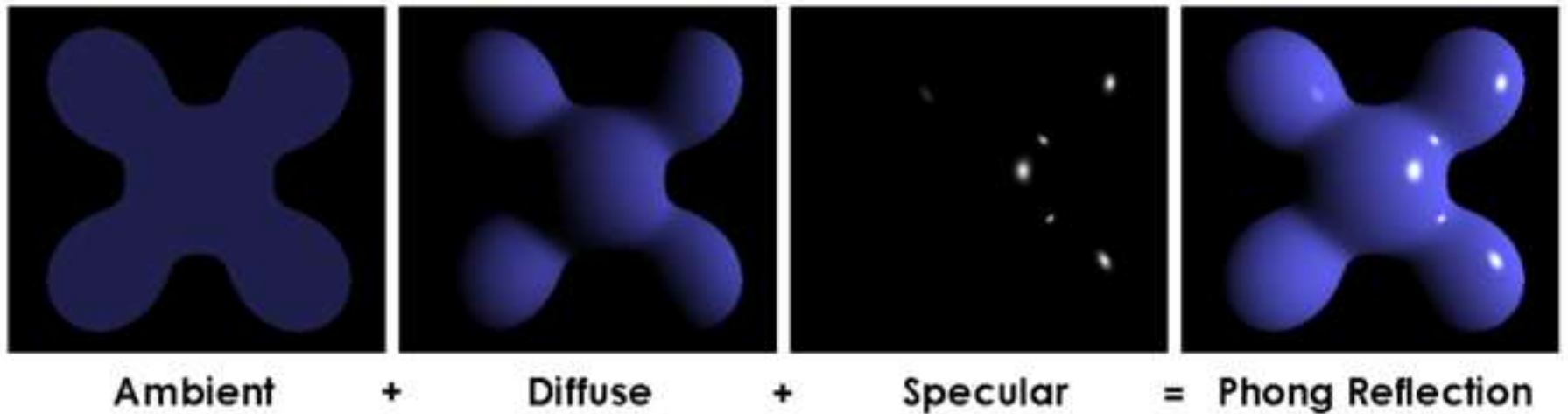
Модели освещения: Фонг

Добавляет эмпирический косинус для моделирования отражений (блеска)

$$L_o = L_i (k_d (\vec{s} \cdot \vec{n}) + k_s (\vec{r} \cdot \vec{v})^{k_e})$$



Фонг: пример



Фонг: особенности

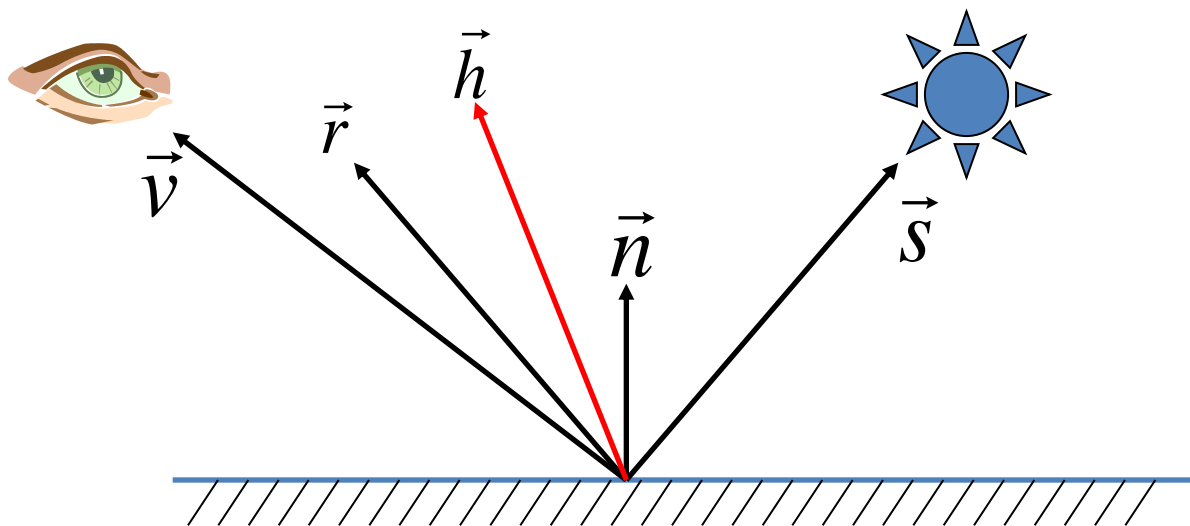
- Не является обратимой
 - Поменяйте местами v и s
- Не сохраняет энергию

Модели освещения: Блинн-Фонг

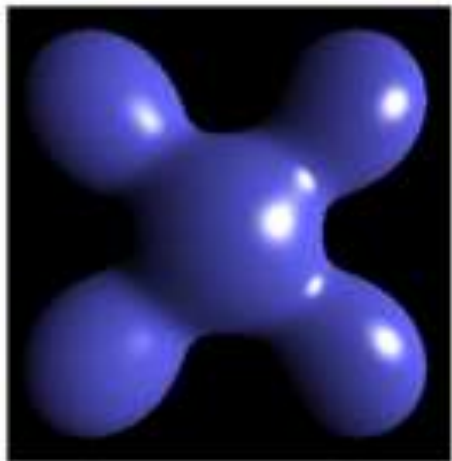
$$L_o = L_i (k_d (\vec{s} \cdot \vec{n}) + k_s (\vec{h} \cdot \vec{n})^{k_e})$$

$$\vec{h} = \frac{(\vec{v} + \vec{s})}{2}$$

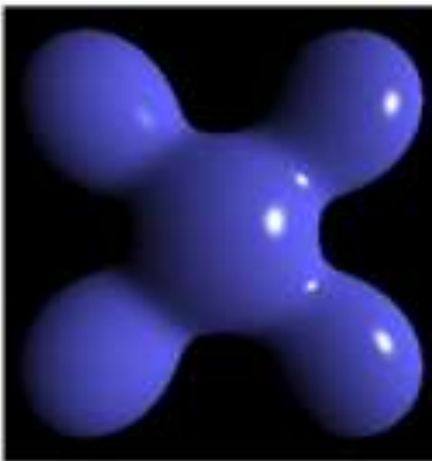
Не требуется вычисления
вектора отражения



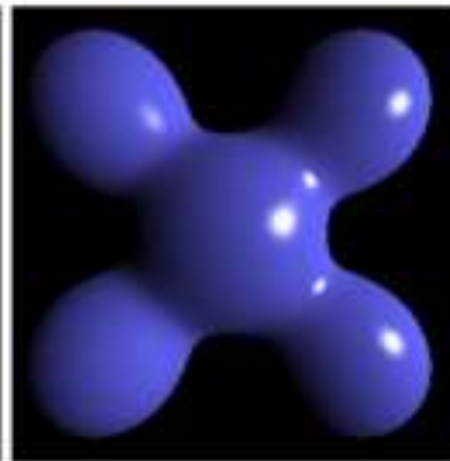
Сравнение Фонг и Блинн-Фонг



Blinn-Phong



Phong



**Blinn-Phong
(Lower Exponent)**

Зеркальная и диффузная составляющие BRDF

- Насколько это оправдано?
- Оправдано!
 - Описывает материалы, содержащие отражающие и диффузные частицы
 - Пропорции частиц задают коэффициенты k_s, k_d

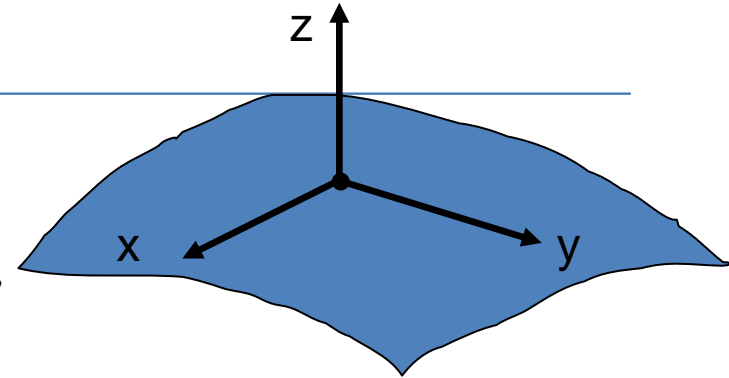
Модели освещения

- Эмпирические
 - ✓ Ламберт
 - ✓ Фонг
 - ✓ Блинн-Фонг
 - Лафортюн
- Физические
 - Френель
 - Кук-Торранс
- Табличная BRDF

Модели освещения: Лафортюн

- Специально разработана для подгона измеренных BRDF под модели с небольшим числом параметров
- Основана на модели Фонга

Лафортюн: модификация модели Фонга



$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{k_d}{\pi} + (\omega_o \cdot R(\omega_i, n))^e$$

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{k_d}{\pi} + (\omega_o (-\omega_{ix}, -\omega_{iy}, \omega_{iz}))^e$$

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{k_d}{\pi} + (\omega_o (o_{ix} \omega_{ix}, o_{iy} \omega_{iy}, o_{iz} \omega_{iz}))^e$$

O_i можно использовать
как параметр модели!

Лафортюн: основная формула

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{k_d}{\pi} + \sum_{i=1}^{nlobes} (\omega_o(o_{ix}\omega_{ix}, o_{iy}\omega_{iy}, o_{iz}\omega_{iz}))^{e_i}$$

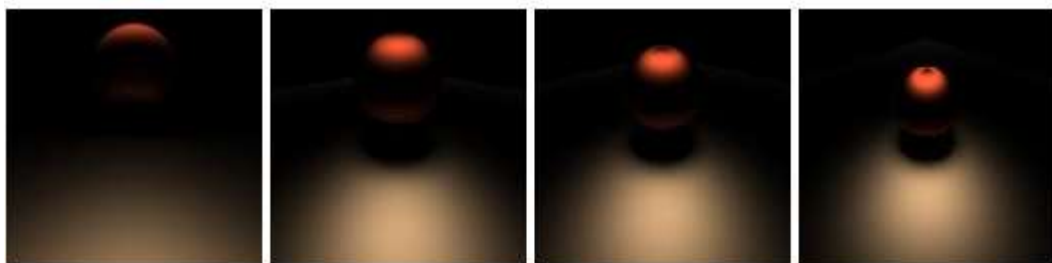
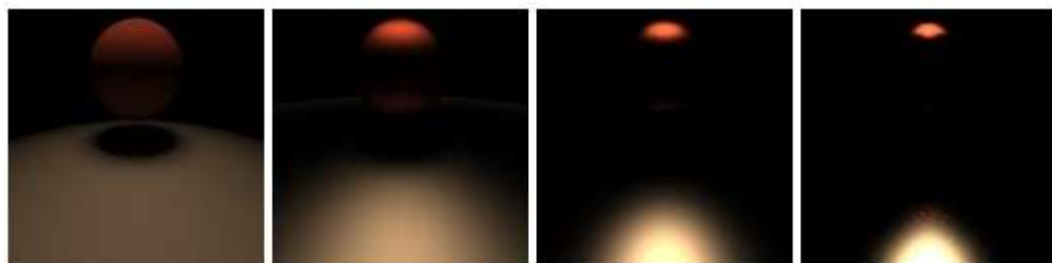
Лафортюн: свойства и примеры

- Обобщенный Ламберт



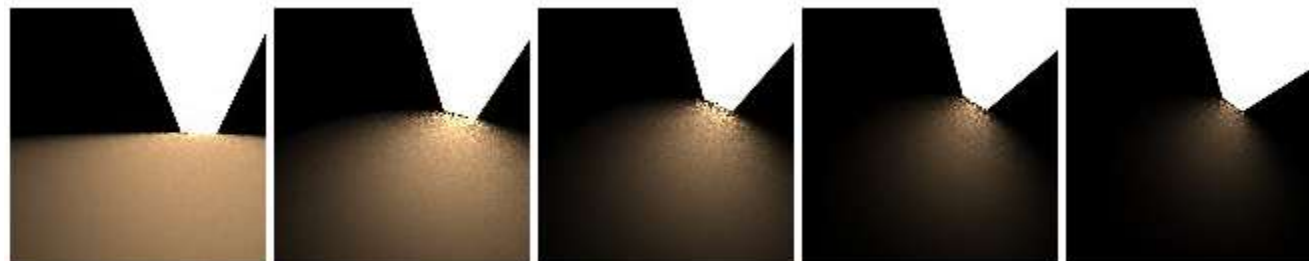
Лафортюн: свойства и примеры

- Фонг



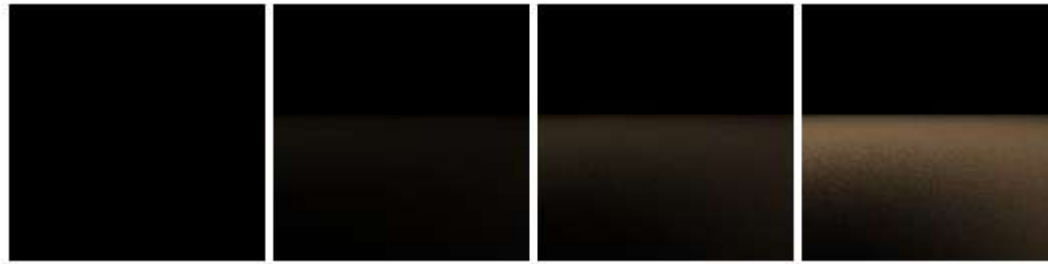
Лафортюн: свойства и примеры

- Фонг – исправление проблемы яркости под острыми углами осмотра



Лафортюн: свойства и примеры

- Retro-reflection



Модели освещения

- ✓ Эмпирические
 - ✓ Ламберт
 - ✓ Фонг
 - ✓ Блинн-Фонг
 - ✓ Лафортюн
- Физические
 - Френель
 - Кук-Торранс
- Табличная BRDF

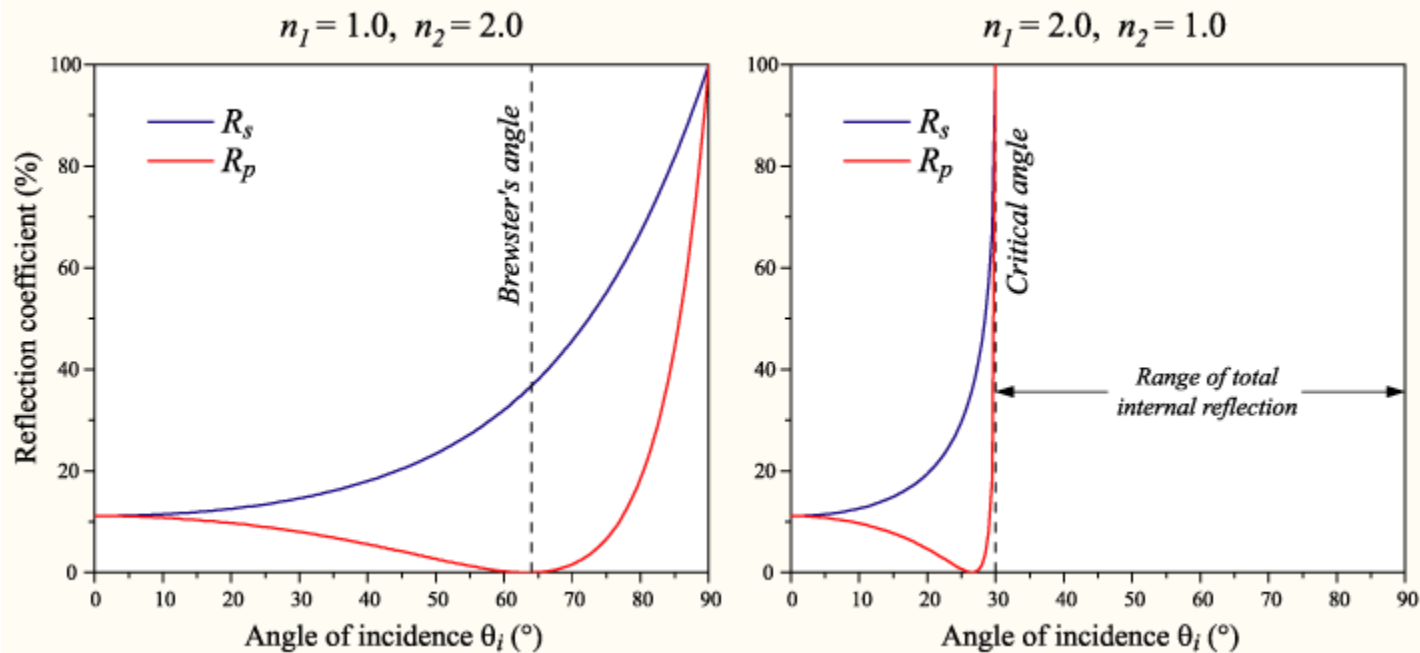
Модели освещения: Френелевские отражения

- Процент отраженного и преломленного света неодинаков для разных входящих направлений!
- Задается законом Френеля (Fresnel)

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right]^2$$

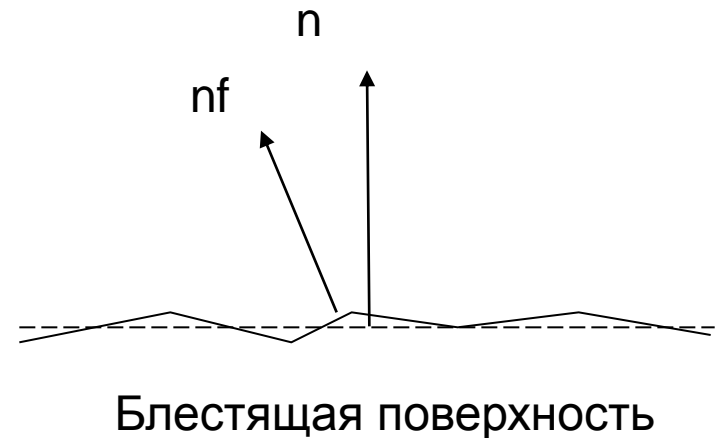
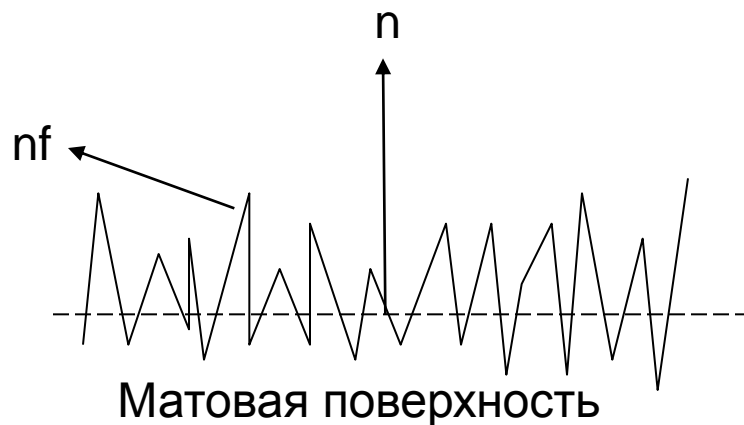
$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2$$

Модели освещения: Френелевские отражения

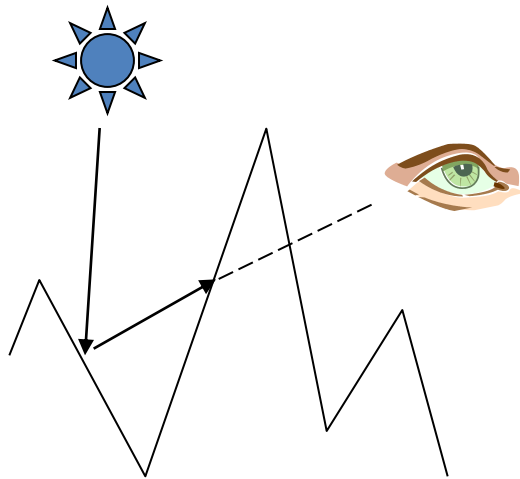


Модели освещения: микрофасетные модели

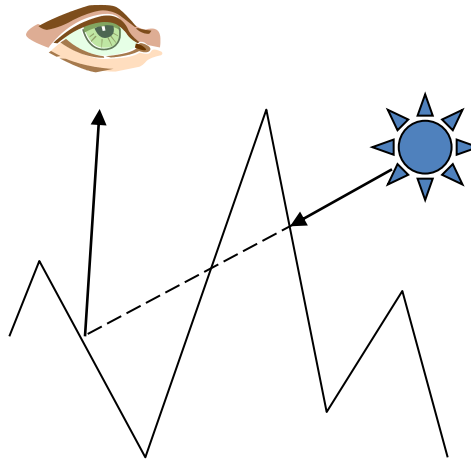
- Модель:
 - Статистическое распределение микрофасетов nf
 - ДФО каждого микрофасета
- У каждой модели своя аппроксимация
- Разная точность и сложность



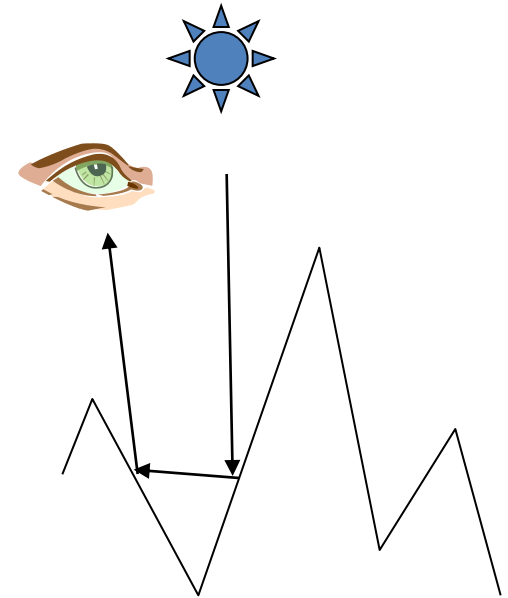
Микрофасетные модели: основные эффекты



Маскирование



Затенение



Переотражение

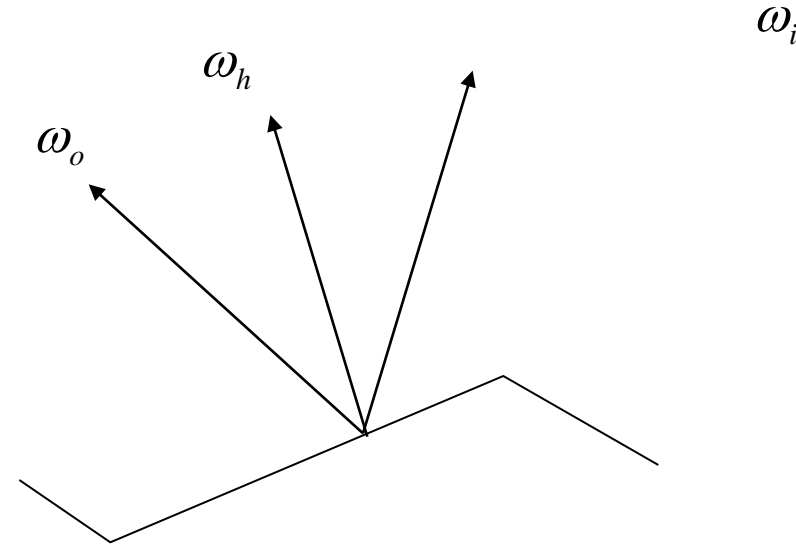
Вероятность того или иного события
задается конкретной моделью

Микрофасетные модели: Модель Кука-Торранса

- Одна из первых моделей на основе микрофасетов
- Предназначена для моделирования металлических поверхностей
- Каждый микрофасет – идеально зеркальный
- Поверхность описывается распределением $D(\omega_h)$
 - Дает вероятность, что микрофасет имеет ориентацию ω_h

Кук-Торранс

Только микрофасеты
с ориентацией ω_h
могут дать идеально
зеркальное отражение
в направлении ω_o

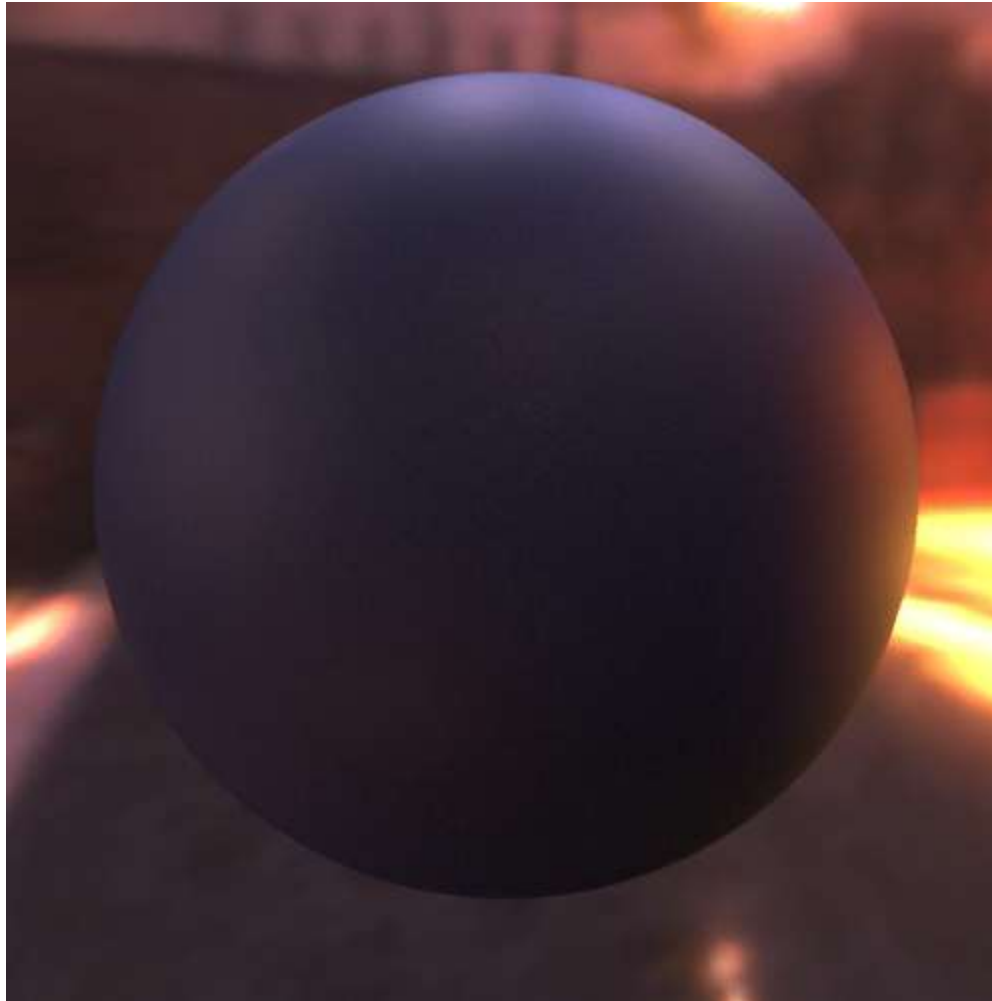


$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{D(\omega_h)G(\omega_o, \omega_i)F_r(\omega_o)}{4 \cos \theta_o \cos \theta_i}$$

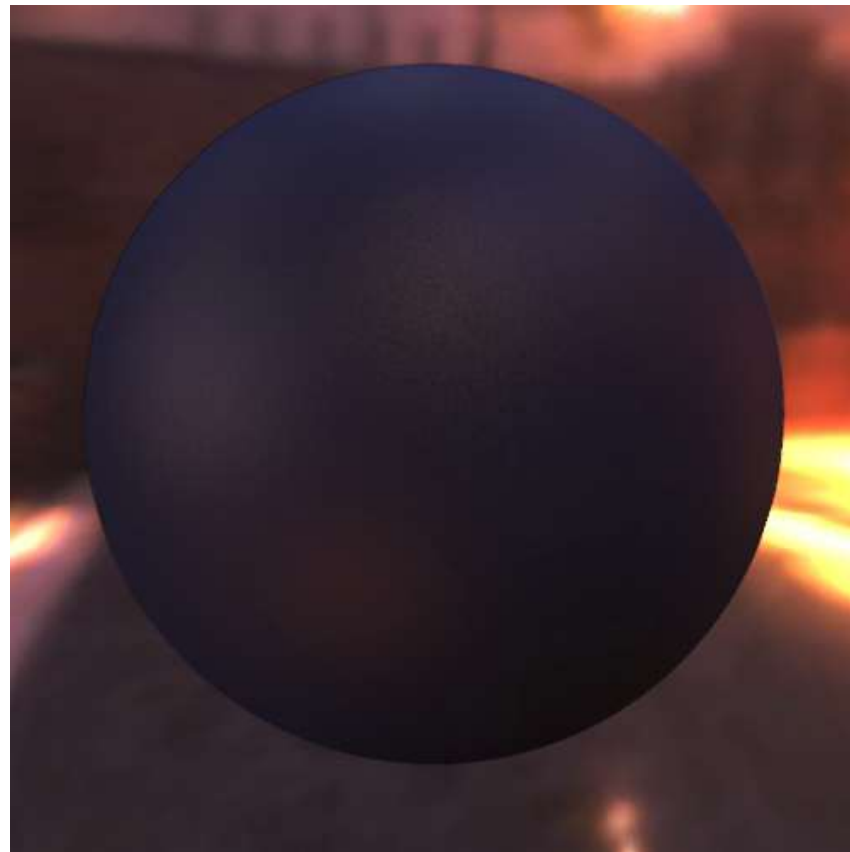
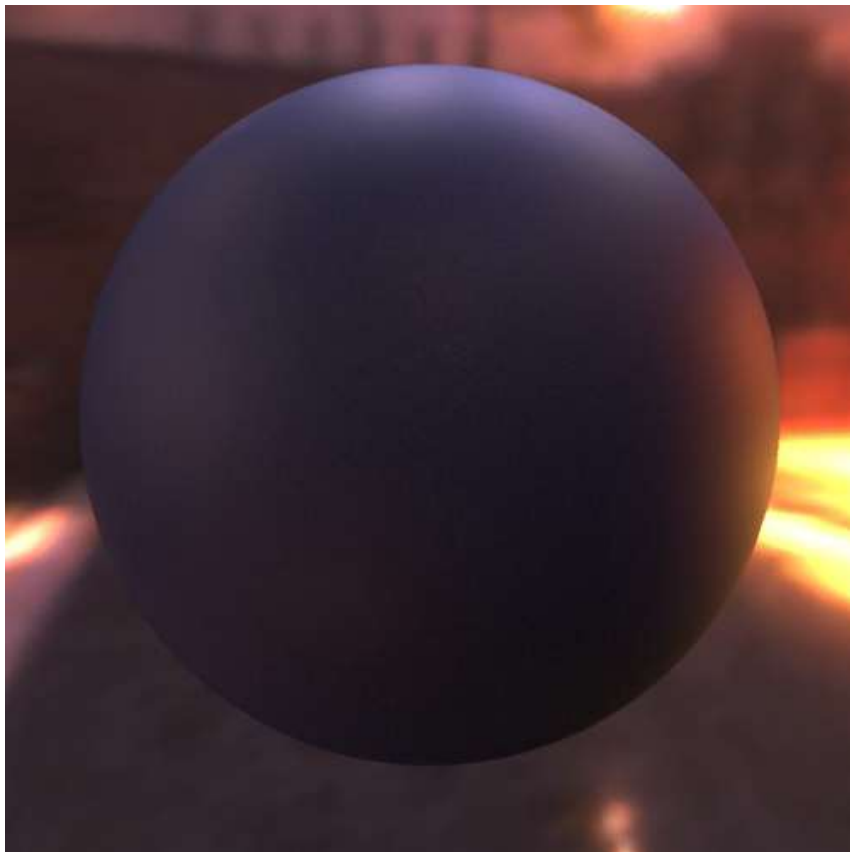
$G(\omega_o, \omega_i)$ вероятность маскирования или затенения

$F_r(\omega_o)$ коэффициент френевского отражения

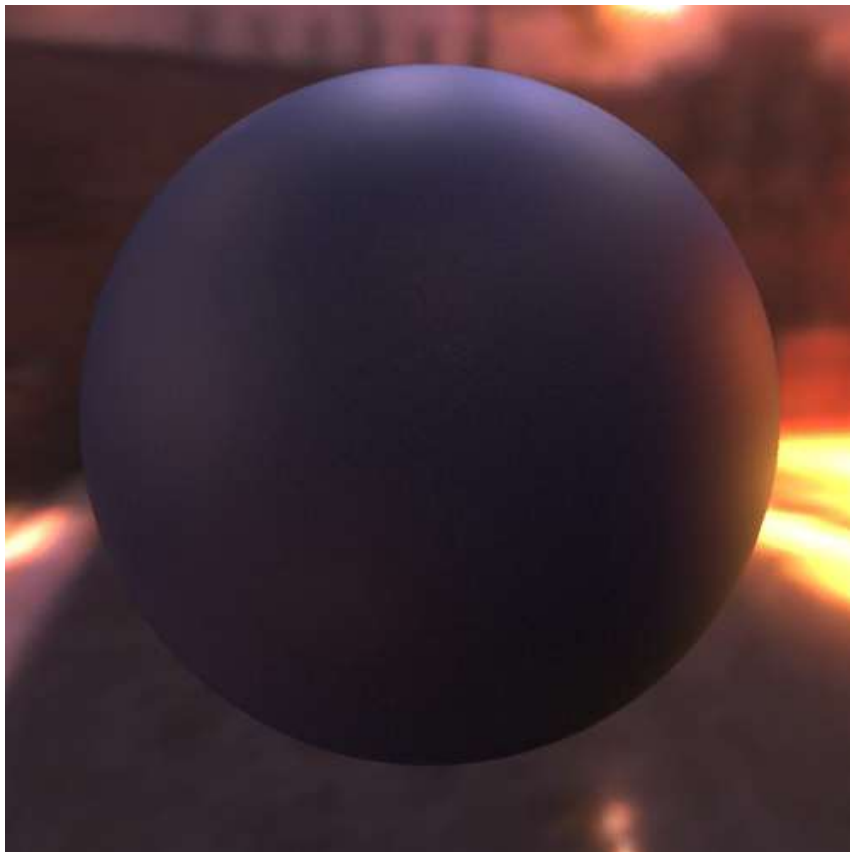
Применимость моделей для аппроксимации реальных данных



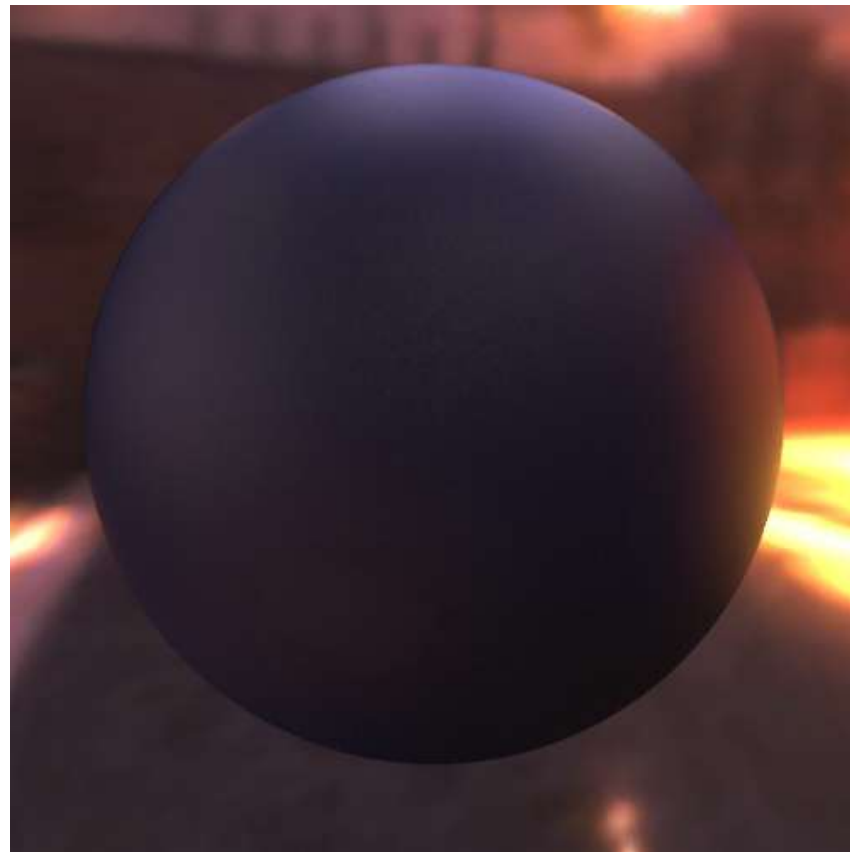
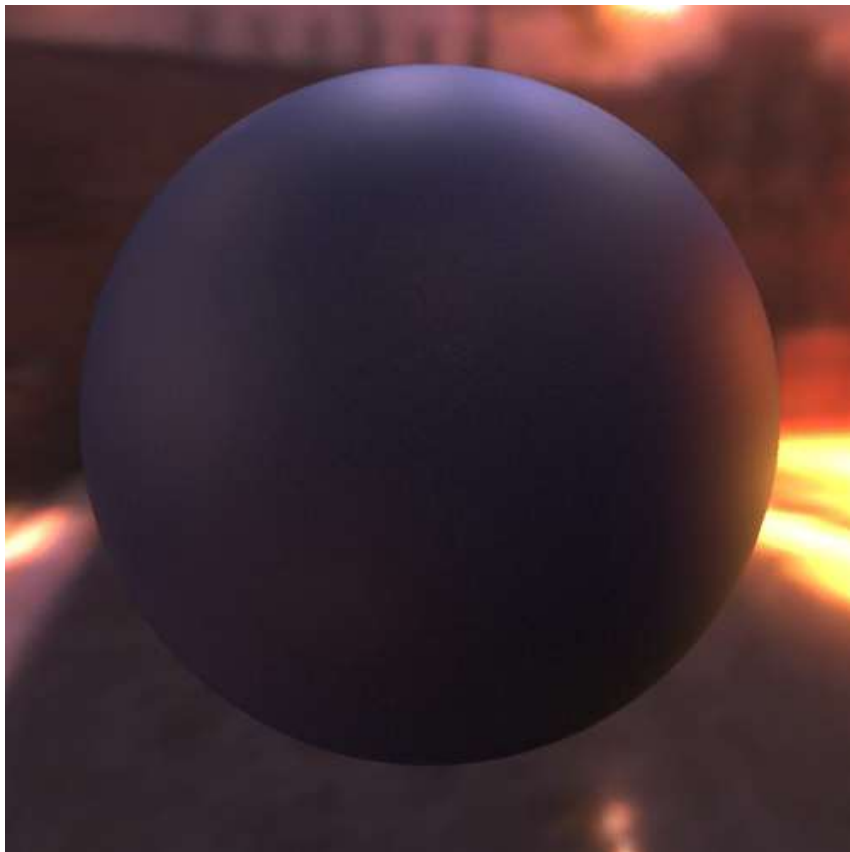
Для измеренной BRDF: Блинн-Фонг



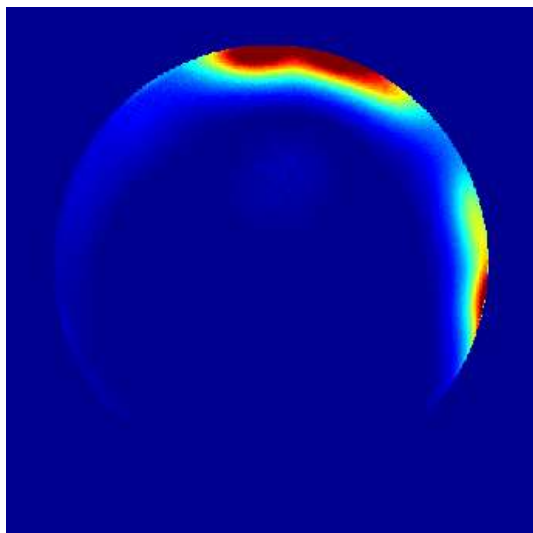
Для измеренной BRDF: Лафортюне



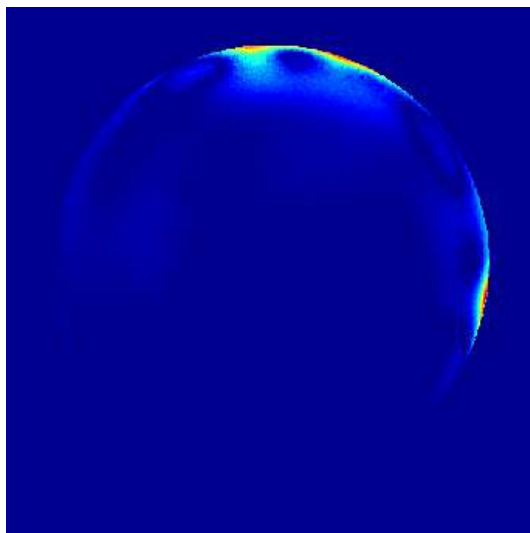
Для измеренной BRDF: Кук-торранс



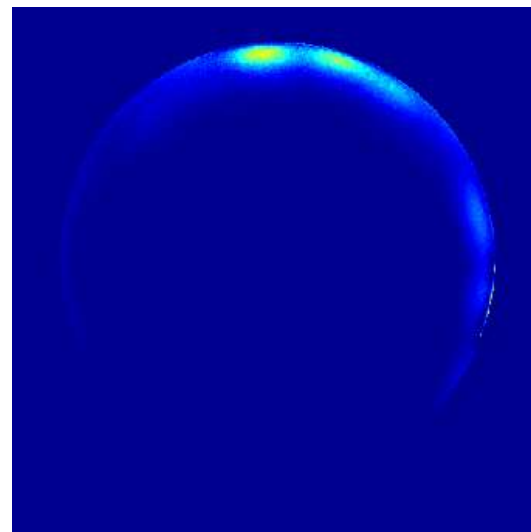
Для измеренной BRDF: сравнение



Блинн-Фонг



Лафортюн



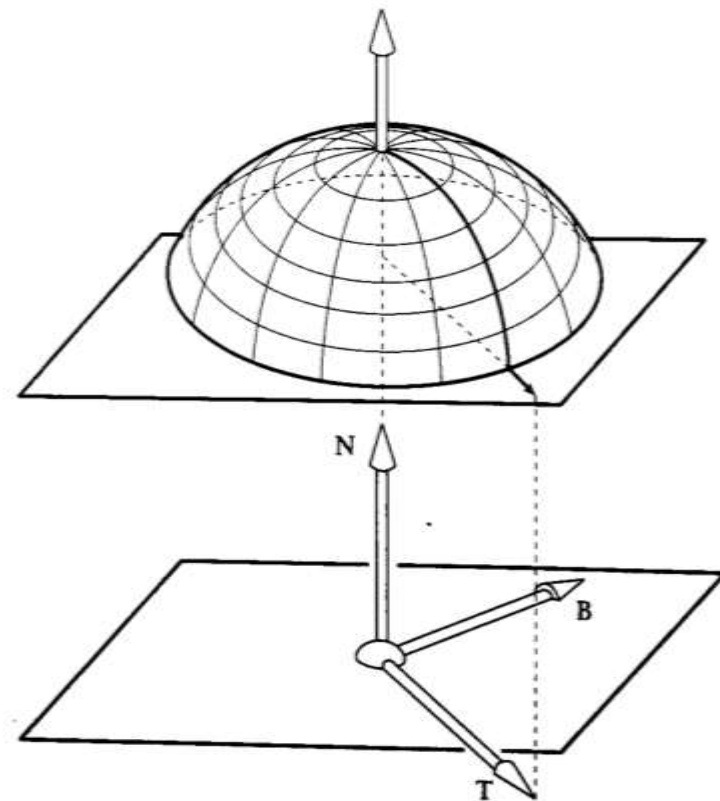
Кук-Торранс

Модели освещения

- ✓ Эмпирические
 - ✓ Ламберт
 - ✓ Фонг
 - ✓ Блинн-Фонг
 - ✓ Лафортюн
- ✓ Физические
 - ✓ Кук-Торранс
- Табличная BRDF

Табличная BRDF

- Вместо хранения коэффициентов модели можно хранить таблицу значений функции
 - Различные варианты сжатия, дискретизации
 - Сферические гармоники
 - ...



Модели освещения

- ✓ Эмпирические
 - ✓ Ламберт
 - ✓ Фонг
 - ✓ Блинн-Фонг
 - ✓ Лафортюн
- ✓ Физические
 - ✓ Торранс-Спарроу
- ✓ Табличная BRDF

Итоги

- Тонирование: процесс вычисления исходящего излучения для точки поверхности
- Точность, выразительность, скорость
- Физически обоснованные и эмпирические модели
- Модели:
 - Ламберт
 - Фонг и Блинн-Фонг
 - Лафортюн
 - Кук-Торранс
 - Табличная BRDF

Использованные материалы

- В презентации использованы изображения из
 - Andry Glassner. “Image syntesis”
 - Wikipedia (<http://wikipedia.org>)
 - Addy Ngan, Frédo Durand, Wojciech Matusik
Experimental Analysis of BRDF Models. In
proceedings of Eurographics Symposium on Rendering
2005.
 - <http://people.csail.mit.edu/wojciech/BRDFValidation/index.html>