

Фотореалистичные и реалистичные изображения пространственных сцен

1. Методы реализма
2. Геометрическая оптика (среда)
3. Взаимодействие света с объектом
(локальная модель освещенности)

Методы реализма

Реализм изображения – это понятие субъективное и его надо напрямую связывать с ответом на вопрос «для чего?». Во времена, когда растровые устройства почти не применялись, представление трехмерных сцен требовалось, например, при геометрическом моделировании. Использование визуального представления проектируемого объекта позволяло избежать очевидных ошибок в задании объектов, интерактивное создание трехмерной модели на основе визуальной обратной связи и т.д.

Методы псевдо- (или квази-) реализма

- 3 проекции
- Перспектива
- Передача глубины яркостью или толщиной линии
- Отсечение по глубине
- Проекции с разных точек зрения (подмена вращения объекта)
- Удаление скрытых ребер и поверхностей
- Стереоскопические изображения (поляризация, очки, шлем с 2 дисплеями)

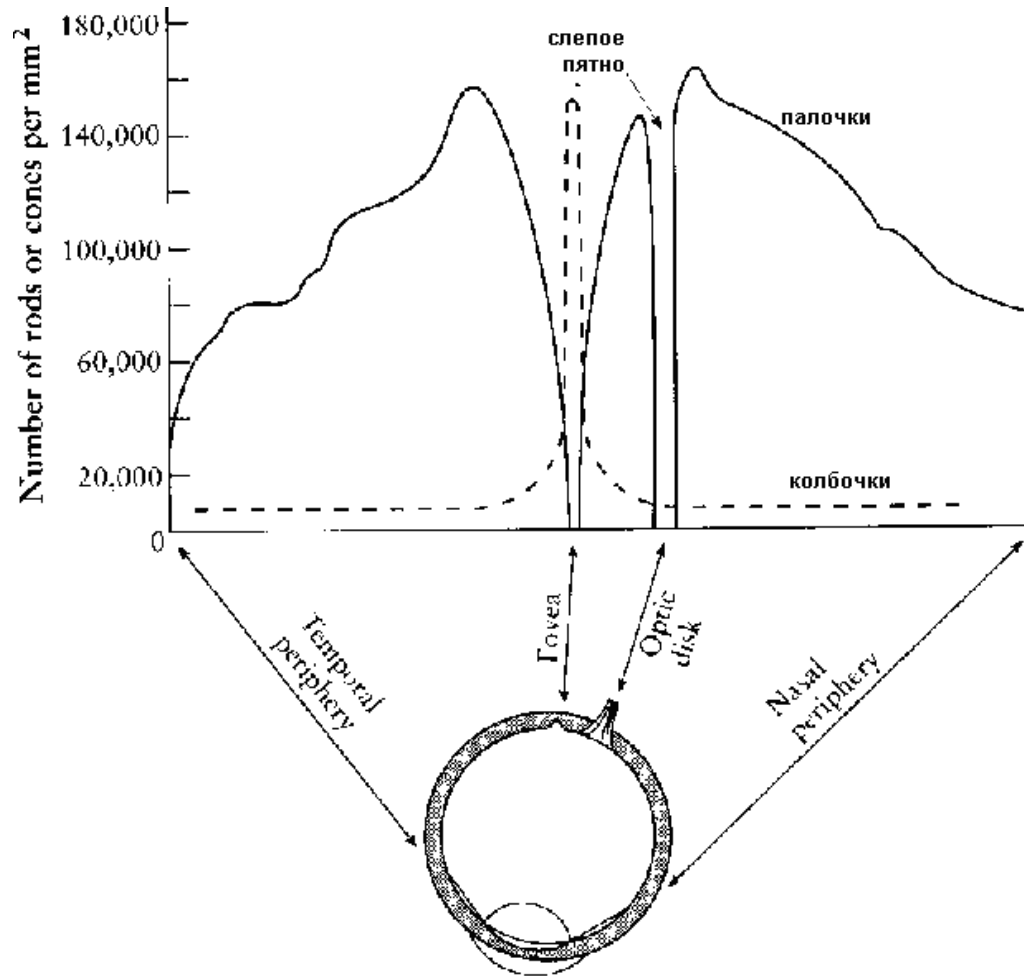
Немного о психофизиологии зрения

- Построение реалистических изображений – это процессы:
 - **Психофизические**
 - Физические

Психофизиология зрения



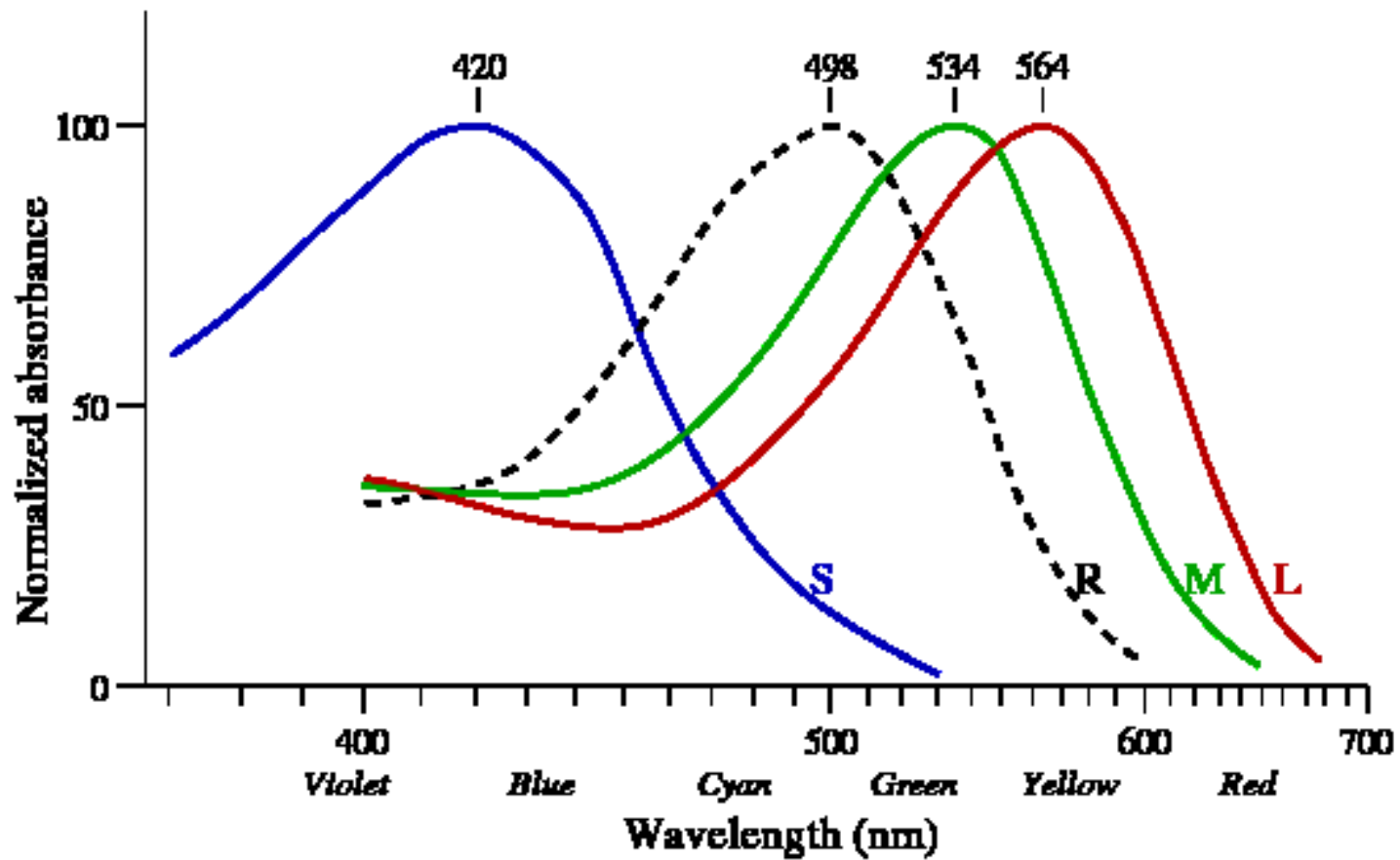
Психофизиология зрения



Психофизиология зрения

- Колбочки
 - 6-7 млн.
 - Высокие уровни освещенности (от 50-100 фотонов)
 - 1 к одному нервному окончанию
 - Цвет
- Палочки
 - 75-150 млн.
 - Низкие уровни освещенности (отдельные фотоны)
 - Несколько к одному нерву
 - Цвет чувствуется слабо

Восприятие длин волн

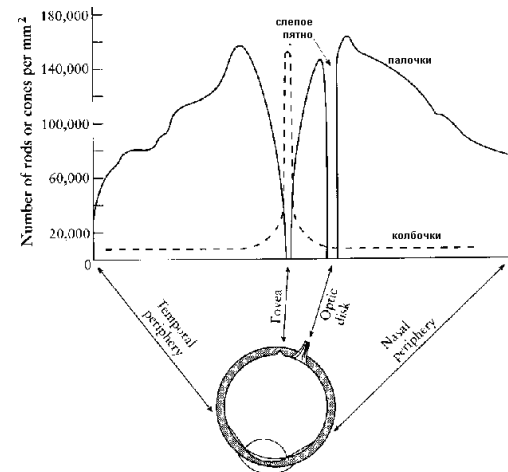


Чувствительность глаза

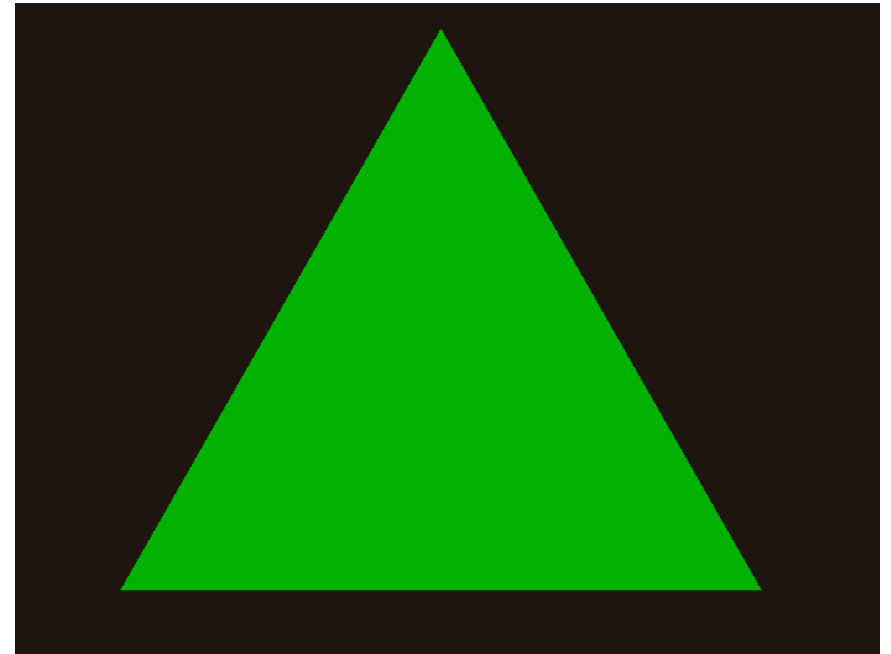
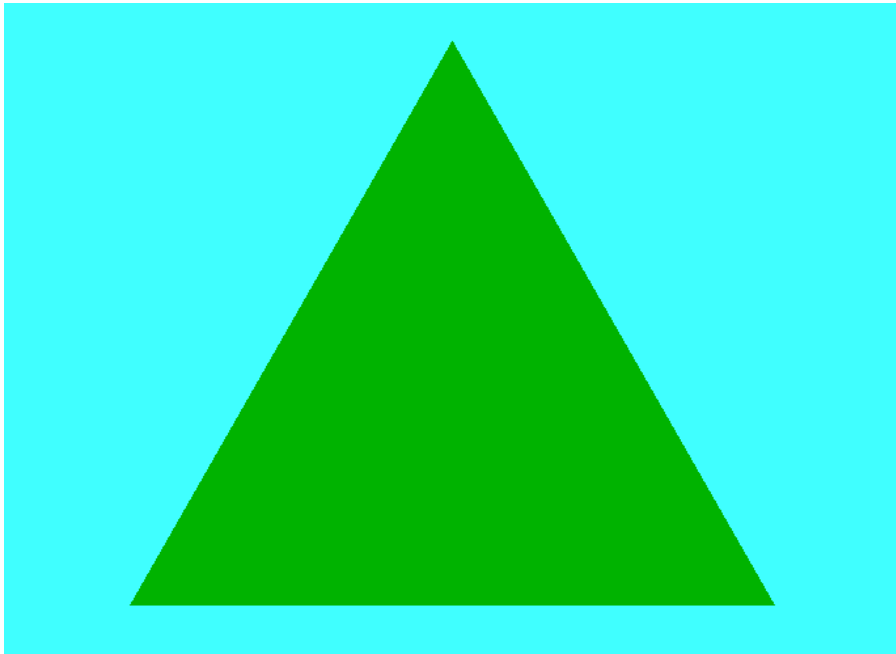
- Логарифмический закон (было про гамму)
- При низкой освещенности все предметы кажутся черно-белыми
- Пределы широки – 10 в 10-й
- Локально! – вокруг уровня адаптации и освещенности. Ну, 100-150 единиц ~ 2.2 лог.единицы (*о мониторе и видеопамяти «или зачем много битов? – а кино?»*)

Чувствительность глаза

- Скорость адаптации неодинакова для различных областей сетчатки
- Экстремумы диапазона относительной яркости воспринимаются как черное и белое
- Относительность: область на черном фоне кажется ярче, чем на белом (фонарь)

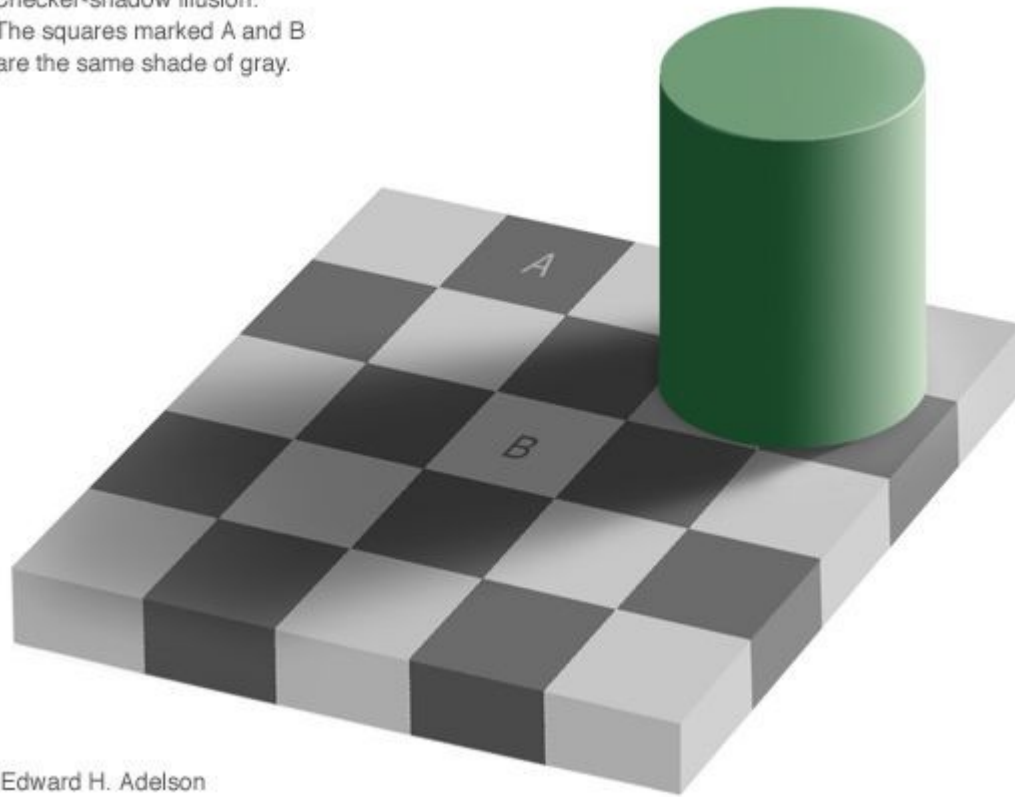


Чувствительность глаза



Чувствительность глаза

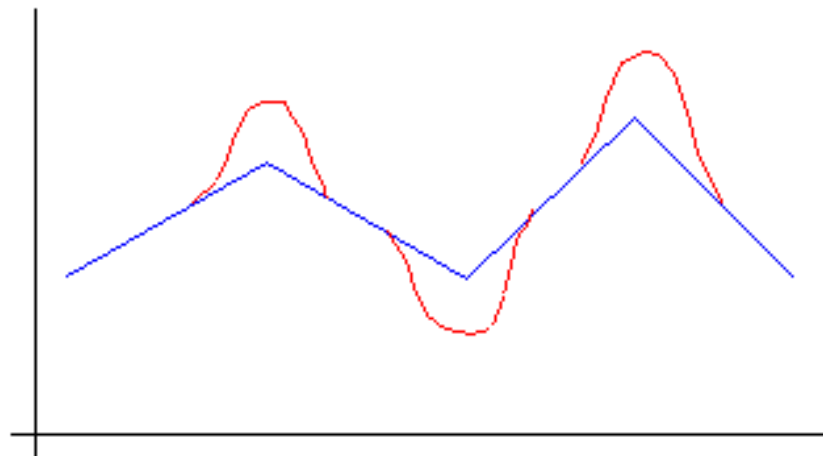
Checker-shadow illusion:
The squares marked A and B
are the same shade of gray.



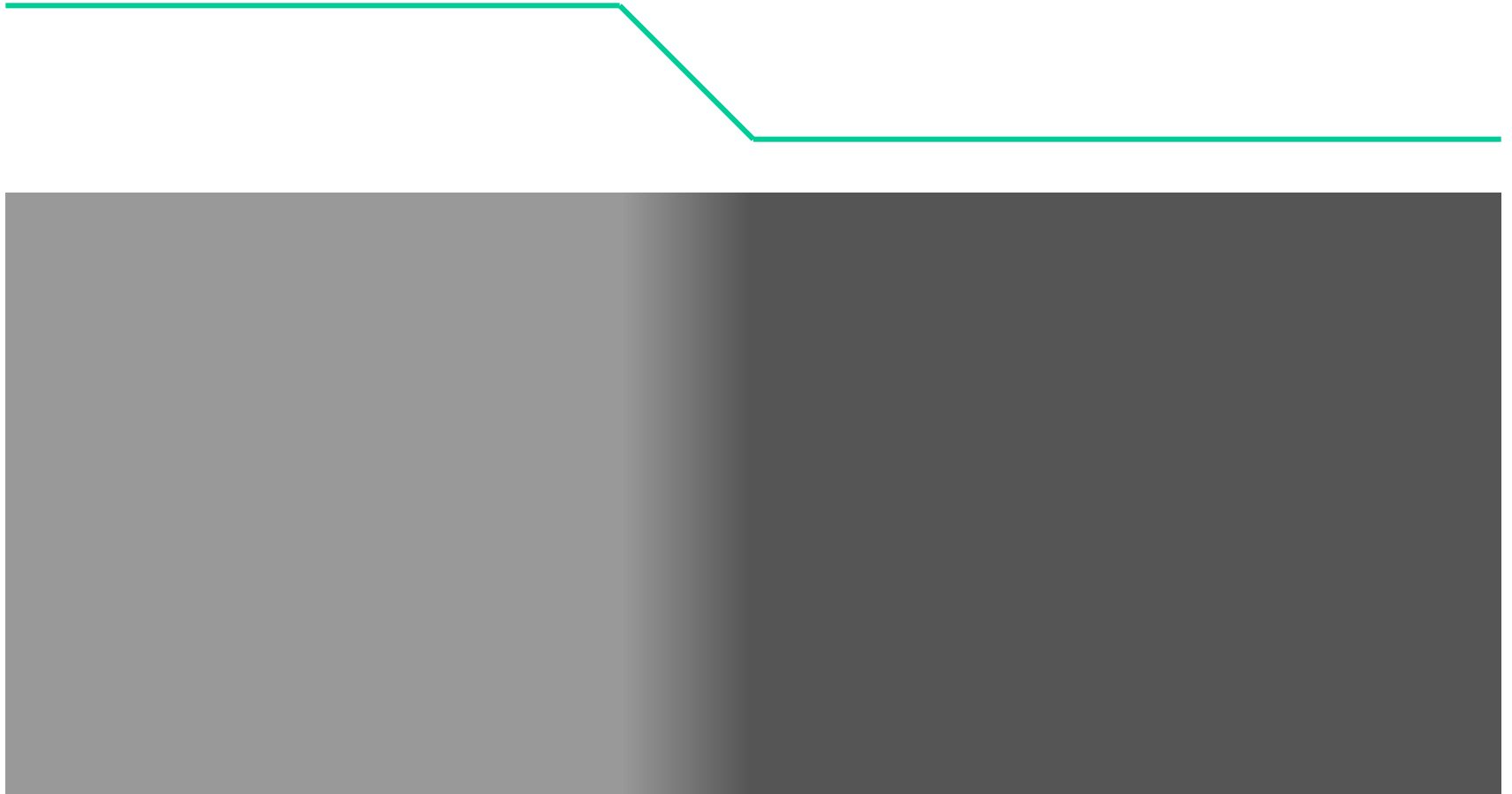
Edward H. Adelson

Полосы Маха

- Эффект заметен на полигональных приближениях гладких тел
- Глаз чувствует перепады на граничных ребрах *величины интенсивности и ее производной*

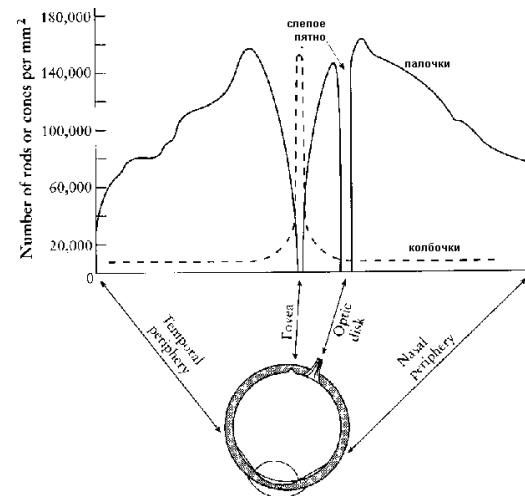
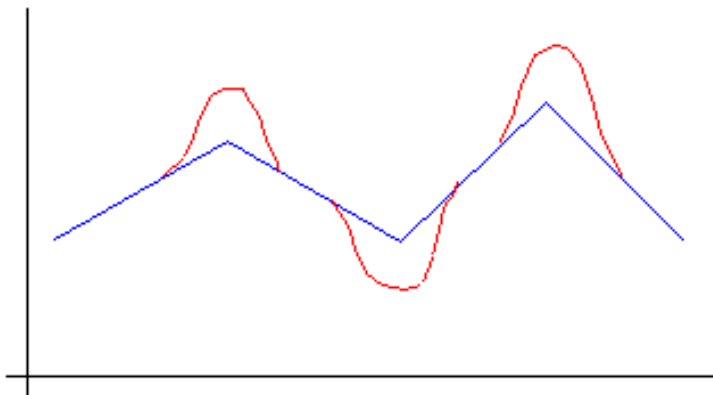


Полосы Маха



Полосы Маха

- Различия в графиках вызваны *латеральным торможением* рецепторов глаза, реакция на свет которых подвергается воздействию соседних рецепторов как $(1/R)$



Полосы Маха

Итак, это интересный визуальный артефакт, известный как Mach band effect — на границе скачкообразного перехода интенсивности человек видит темные цвета более темными, а светлые цвета более светлыми, чем они есть на самом деле, что в случае полигональных геометрических моделей еще более усиливает эффект «гранёности» поверхности

Полосы Маха (полигональные модели)

Flat



Gouraud



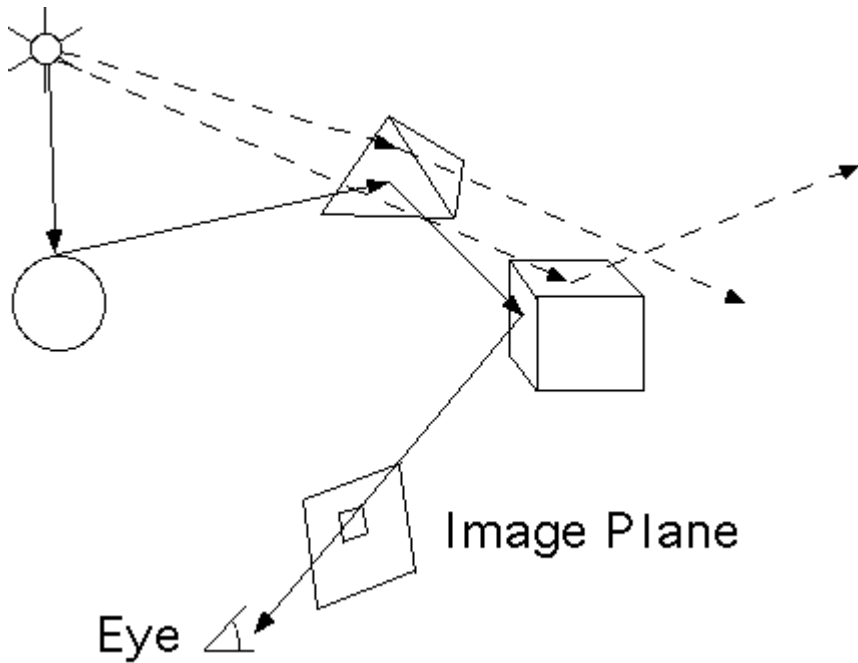
Немного о психофизиологии зрения

- Построение реалистических изображений – это процессы:
 - Психофизические
 - **Физические**

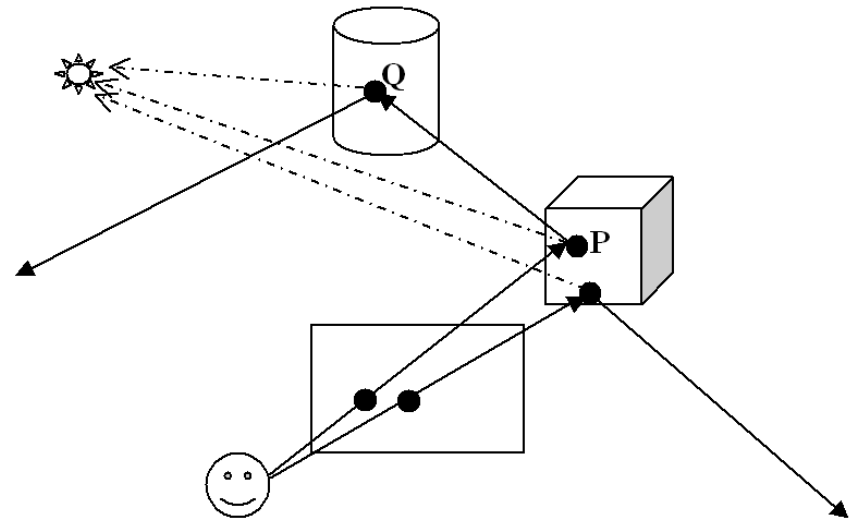
Допущения модели

Современные программы базируются на достаточно упрощенной модели взаимодействия света с объектами. Как правило, эта модель содержит допущения, описанные Ханраханом, где он говорит: *«Поляризация падающего излучения является важным параметром, влияющим на отражение света от поверхности, но в дальнейшем изложение будет упрощено за счет игнорирования поляризации. ... Для достижения наших целей вполне достаточно остановиться на геометрической оптике».*

Прямая и обратная трассировки



Photon Mapping

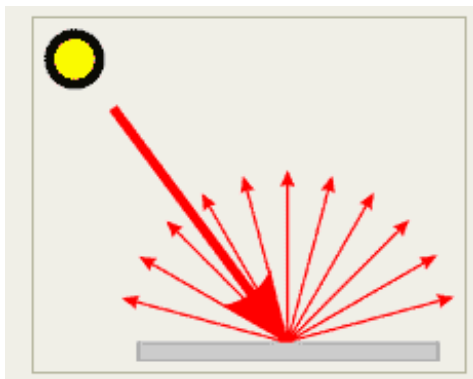


Photon mapping

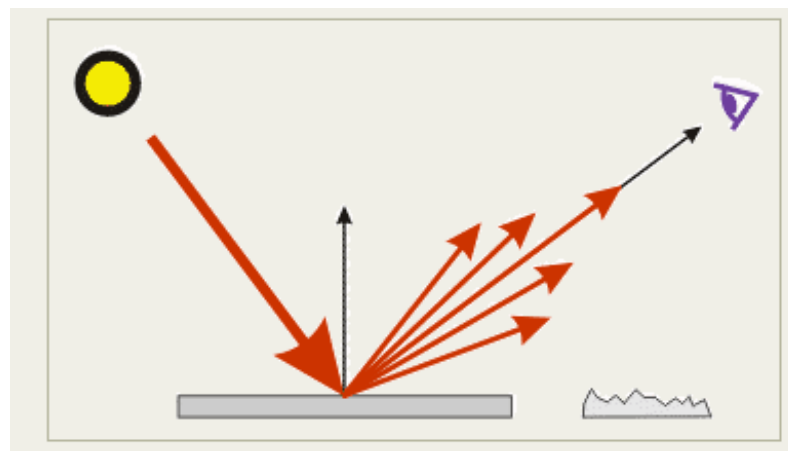


Отражение от поверхности

- Диффузное
- Поглощение и эмиссия
- По всем направлениям равномерно



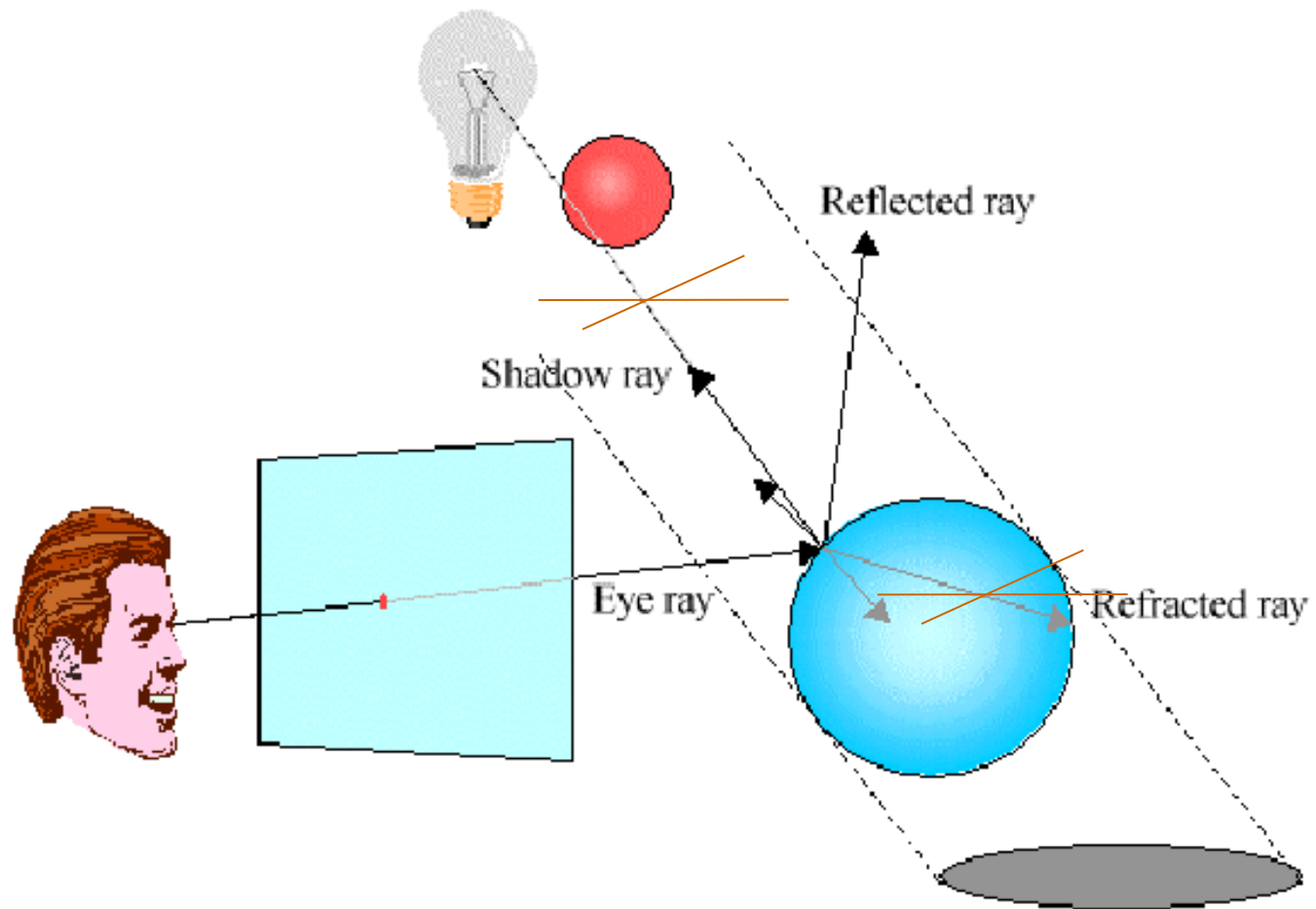
- Зеркальное
- От внешней поверхности
- Зависит от положения источников и камеры
- Гладкая – узкий блик; шероховатая – широкое пятно



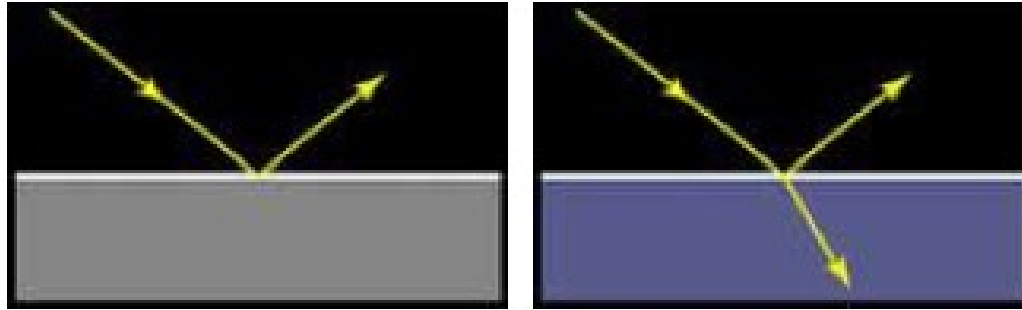
Локальная модель освещенности

- Каждый источник освещения отдельно
- Линейная комбинация для нескольких источников:
 - $I(a + b) = I(a) + I(b)$
 - $I(k * a) = k * I(a)$
- Нет влияния объектов друг на друга
- Без теней, без отражений
- Каждый пиксель обрабатывается независимо от других пикселей

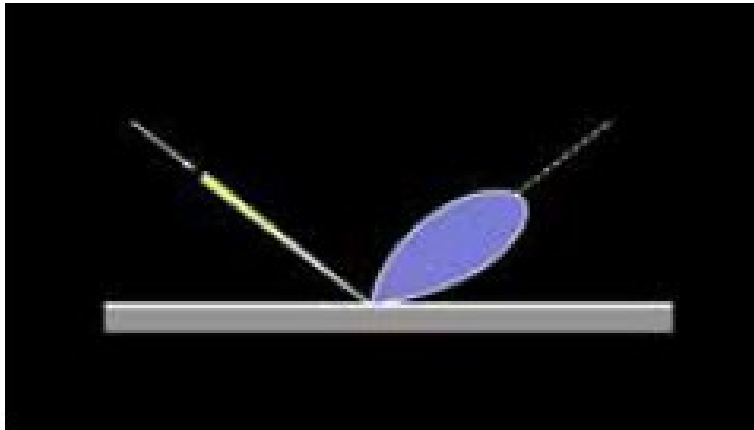
Локальная модель освещенности



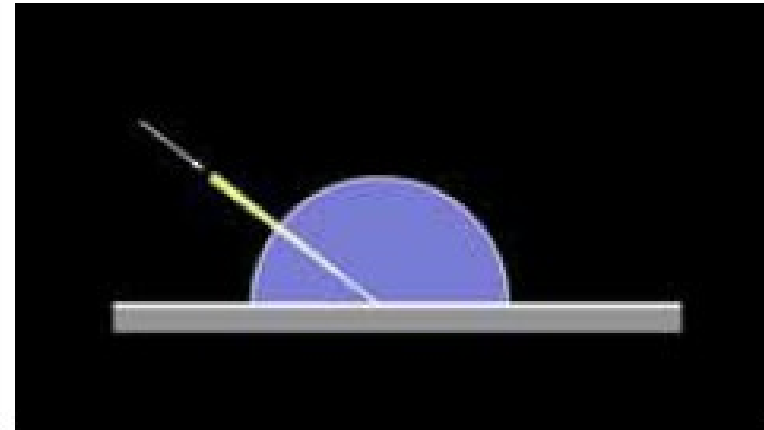
Допущения модели



ideal specular (Fresnel)

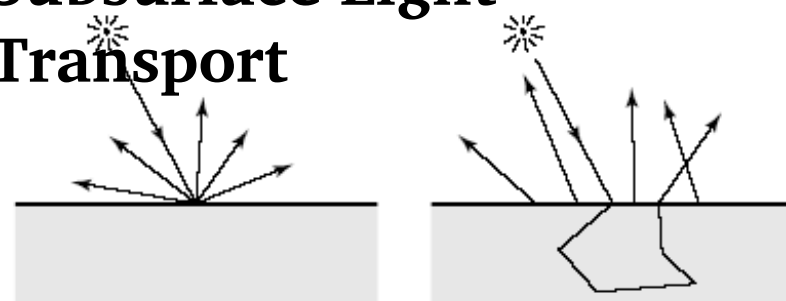
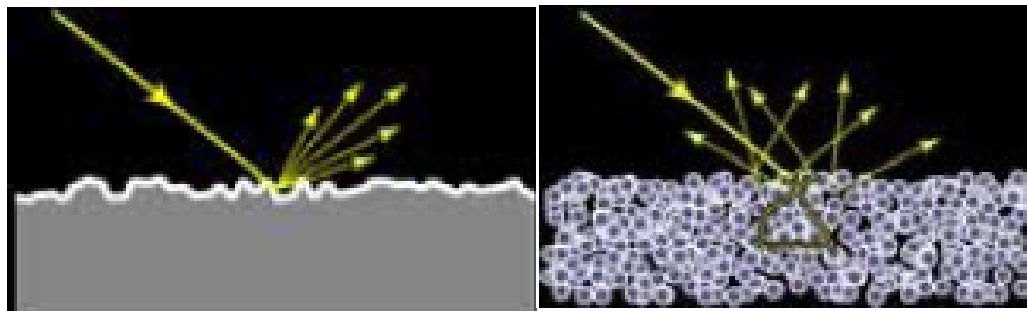


rough specular



Lambertian

Subsurface Light Transport



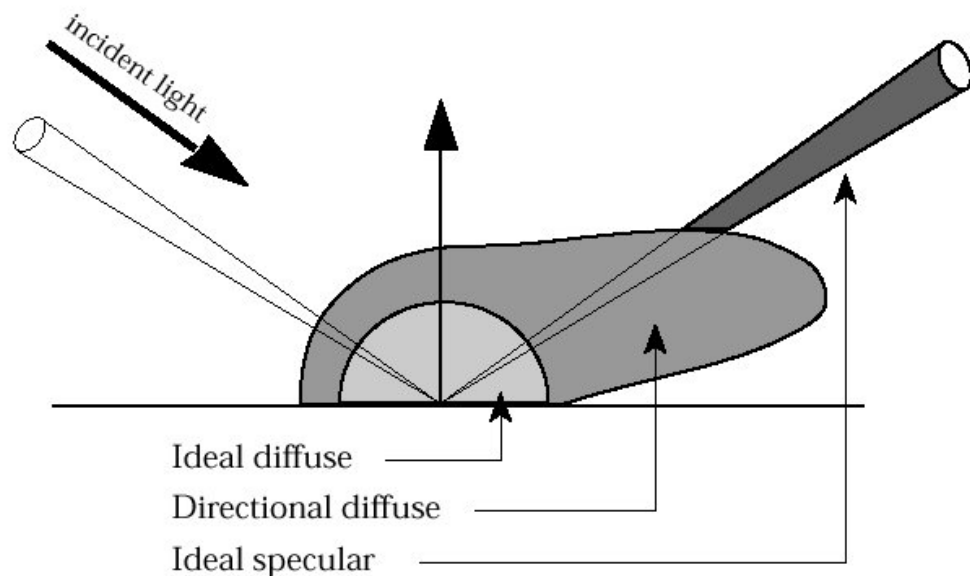
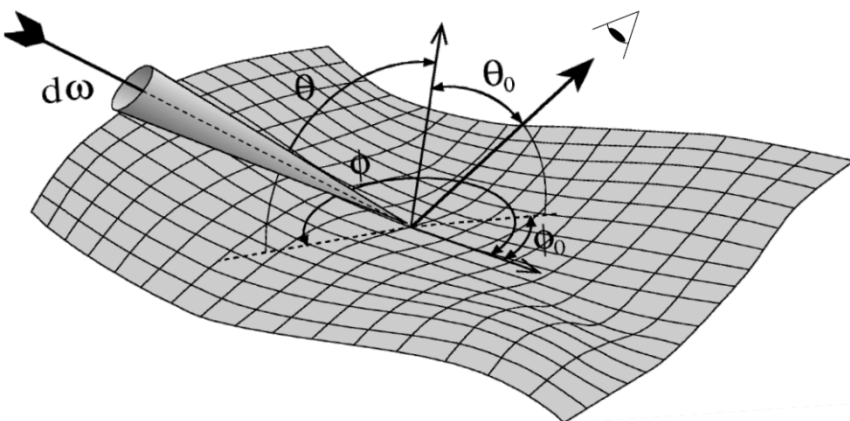
Локальная модель освещенности

BRDF

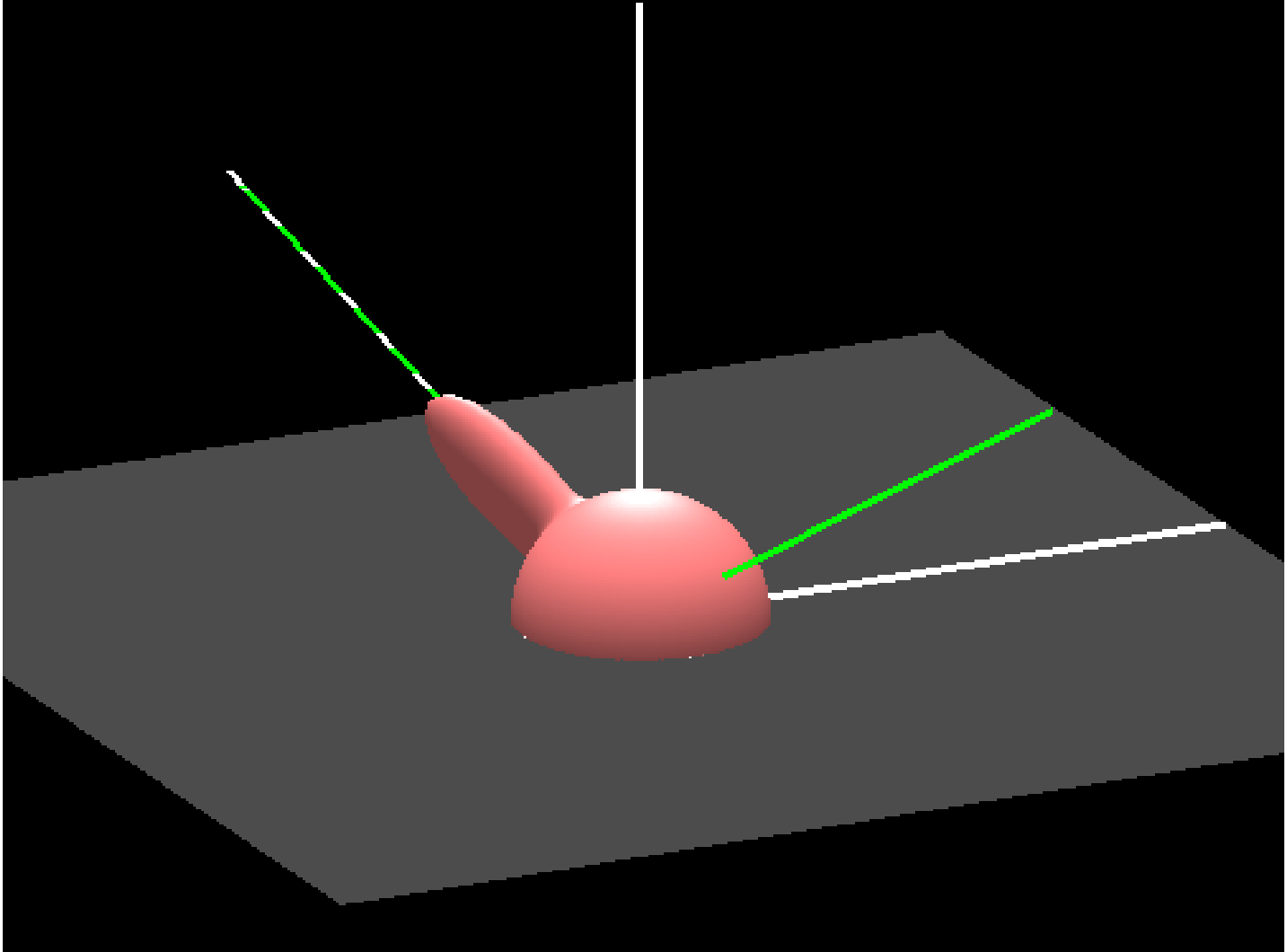
Bidirectional reflectance
distribution function

Двухлучевая функция отражательной способности

Функция $I(\varphi_{out}, \theta_{out}) = brdf(\varphi_{in}, \theta_{in}, \varphi_{out}, \theta_{out}) \cdot I(\varphi_{in}, \theta_{in})$

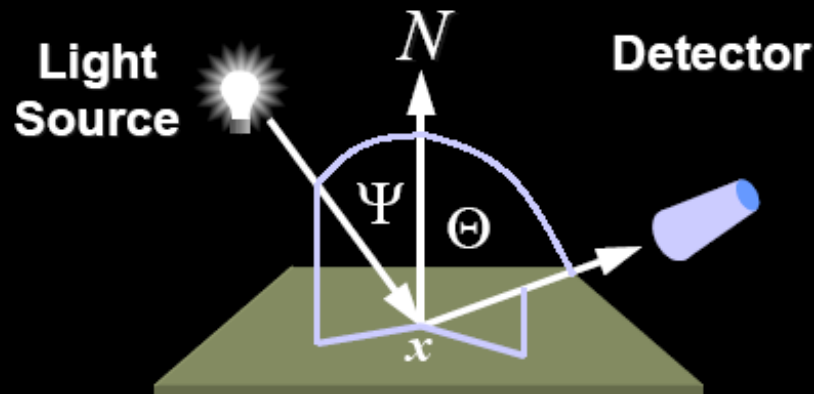


BRDF



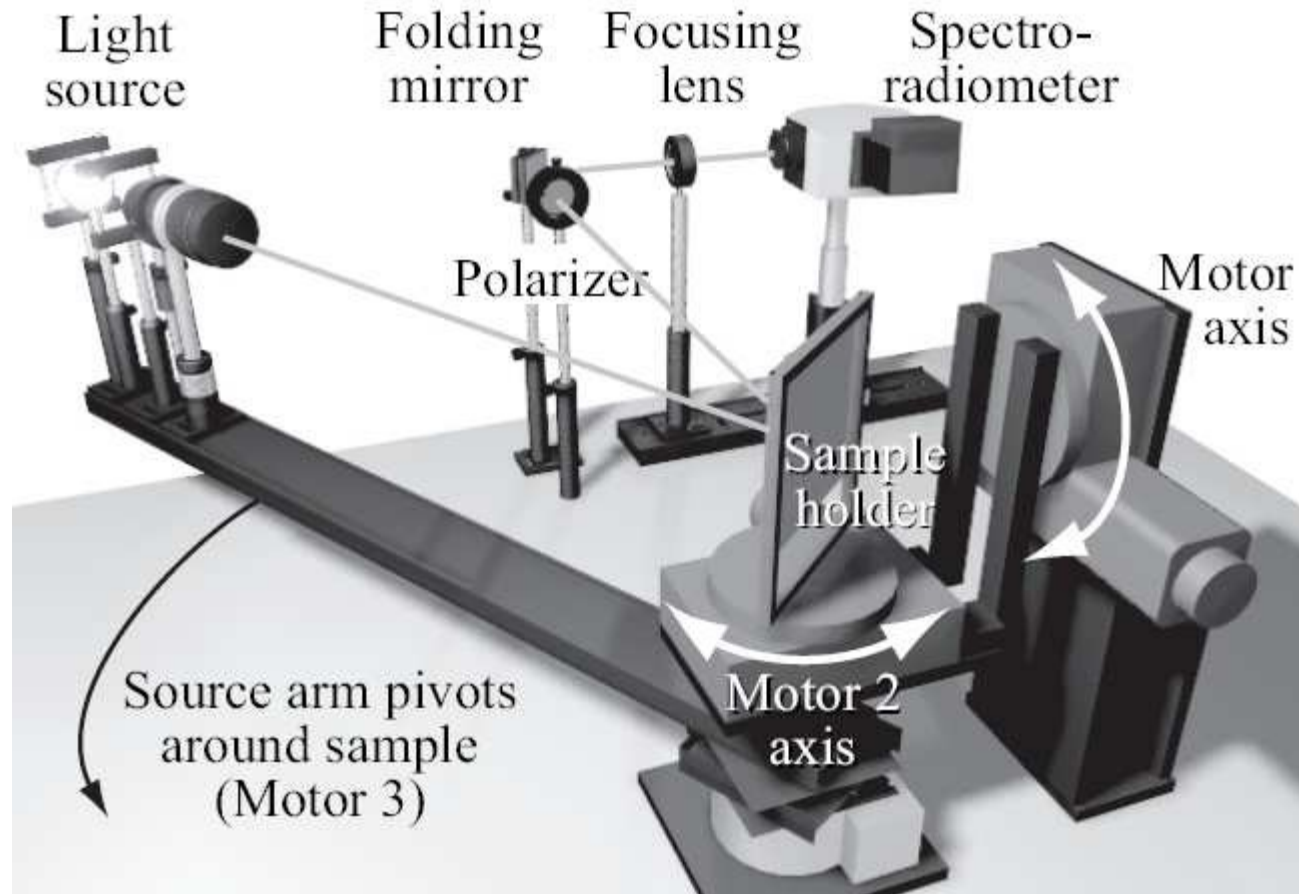
ИЗМЕРЕНИЯ BRDF

- Bidirectional Reflectance Distribution Function



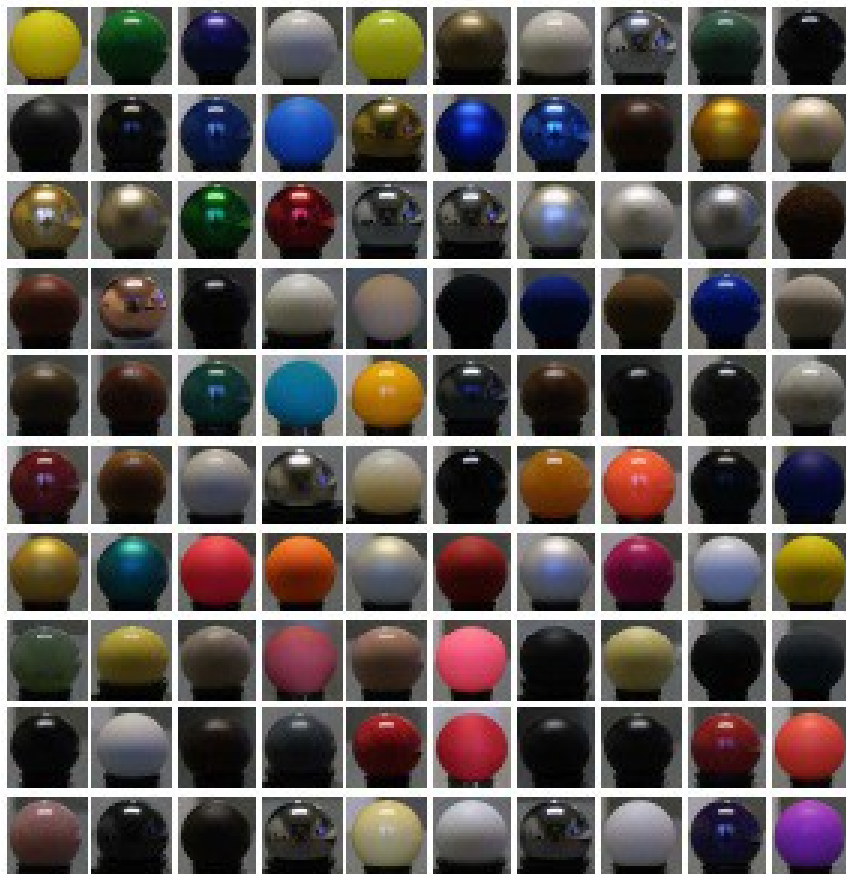
$$f_r(x, \Psi \rightarrow \Theta) = \frac{dL(x \rightarrow \Theta)}{dE(x \leftarrow \Psi)} = \frac{dL(x \rightarrow \Theta)}{L(x \leftarrow \Psi) \cos(N_x, \Psi) d\omega_\Psi}$$

Измерения BRDF



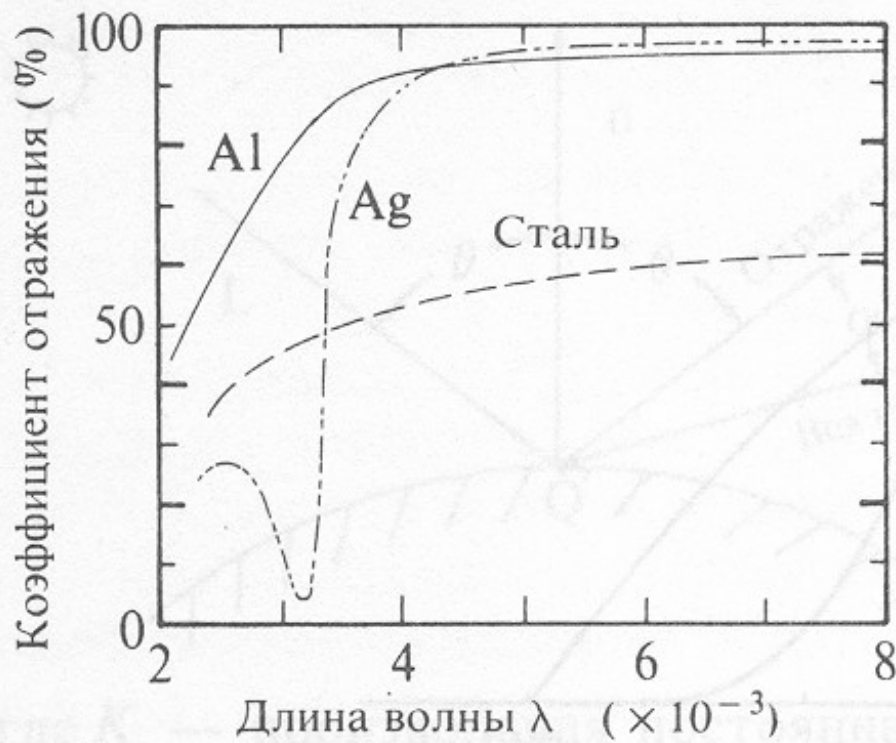
База данных MERL BRDF

MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES

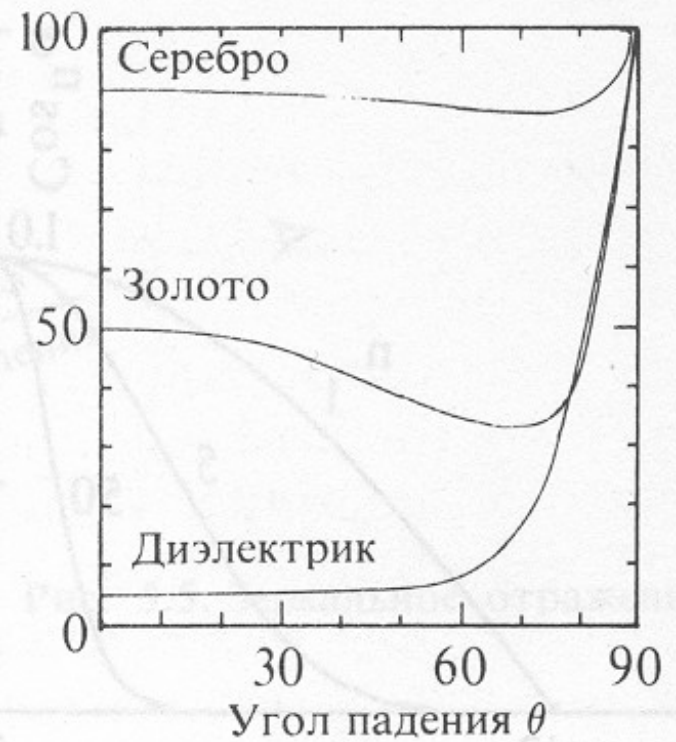


100
измеренных
материалов

Зеркальное отражение



а

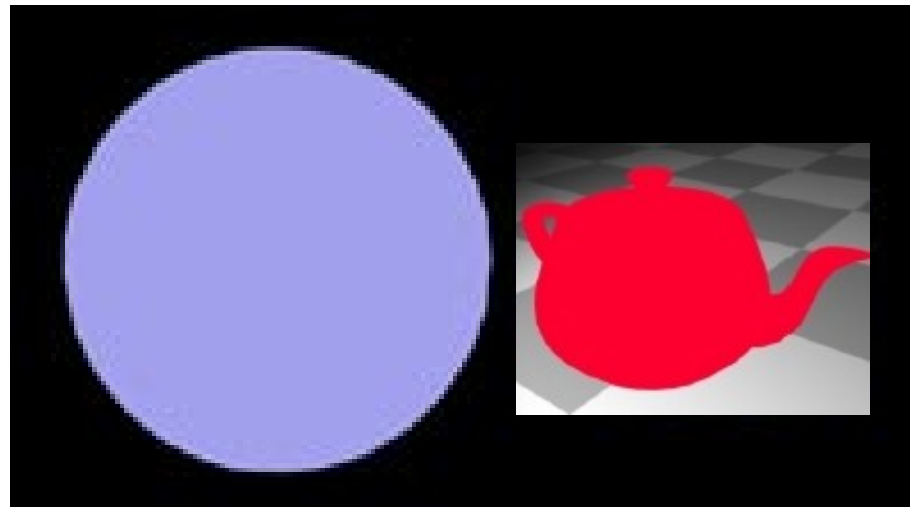


б

Рассеянный свет и диффузное отражение

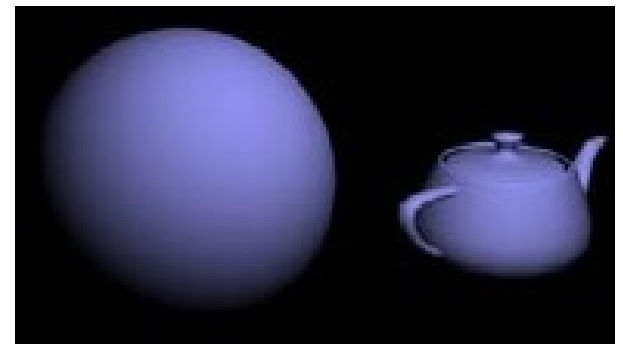
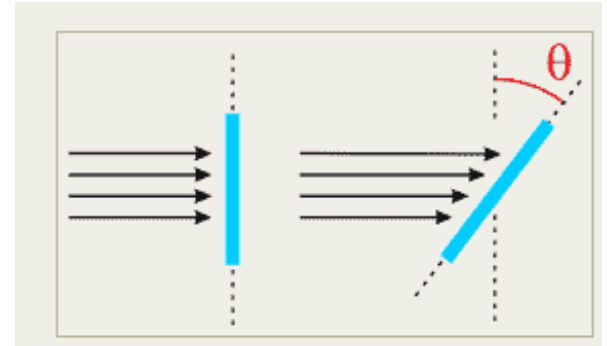
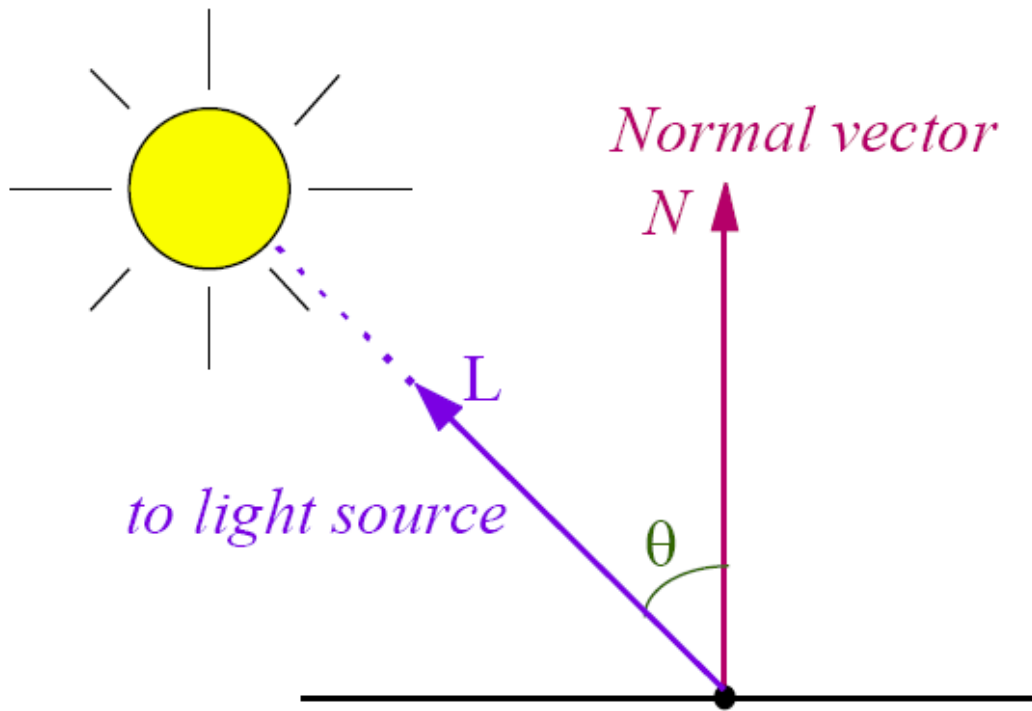
$$I = k_a \cdot I_A$$

ambient light



Увеличение k_a 

Рассеянный свет и диффузное отражение



$$I = k_d \cdot \cos \theta \cdot I_L$$

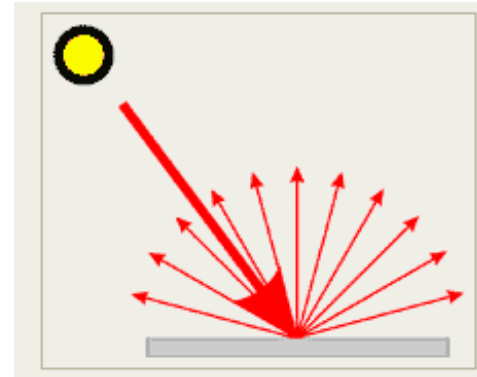
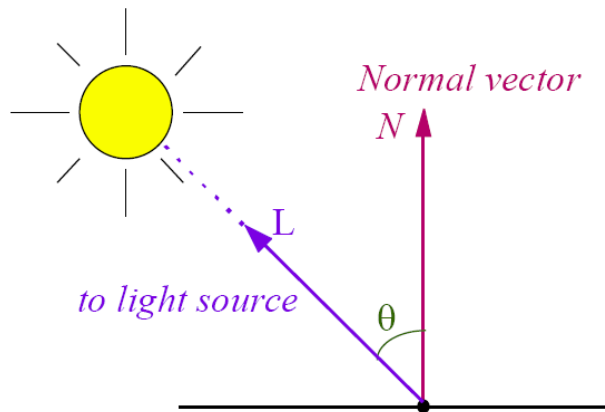
diffuse light

Рассеянный свет и диффузное отражение

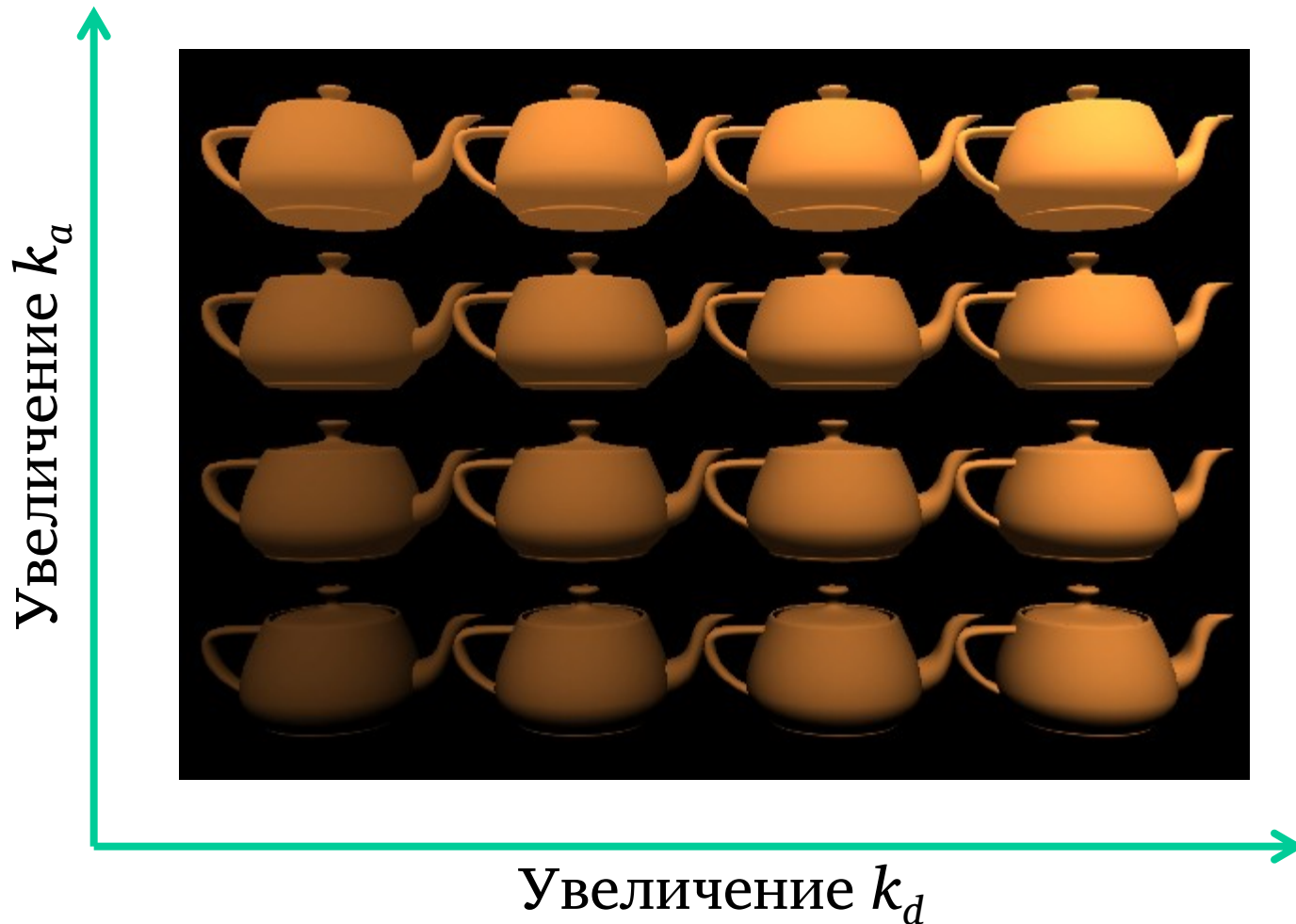
$$I = k_d \cdot \cos \theta \cdot I_L + k_a \cdot I_A$$

diffuse light

ambient light

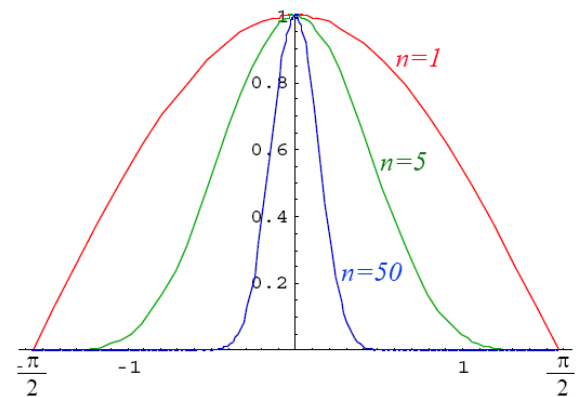
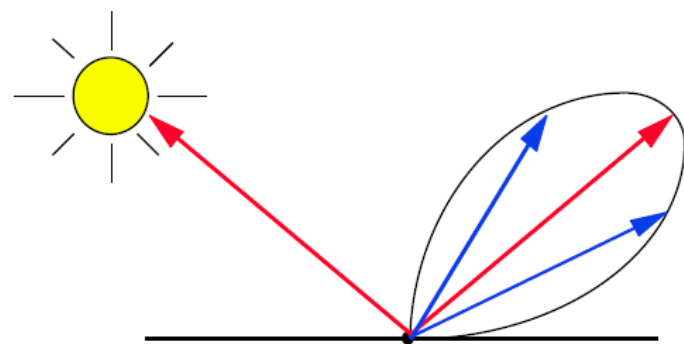
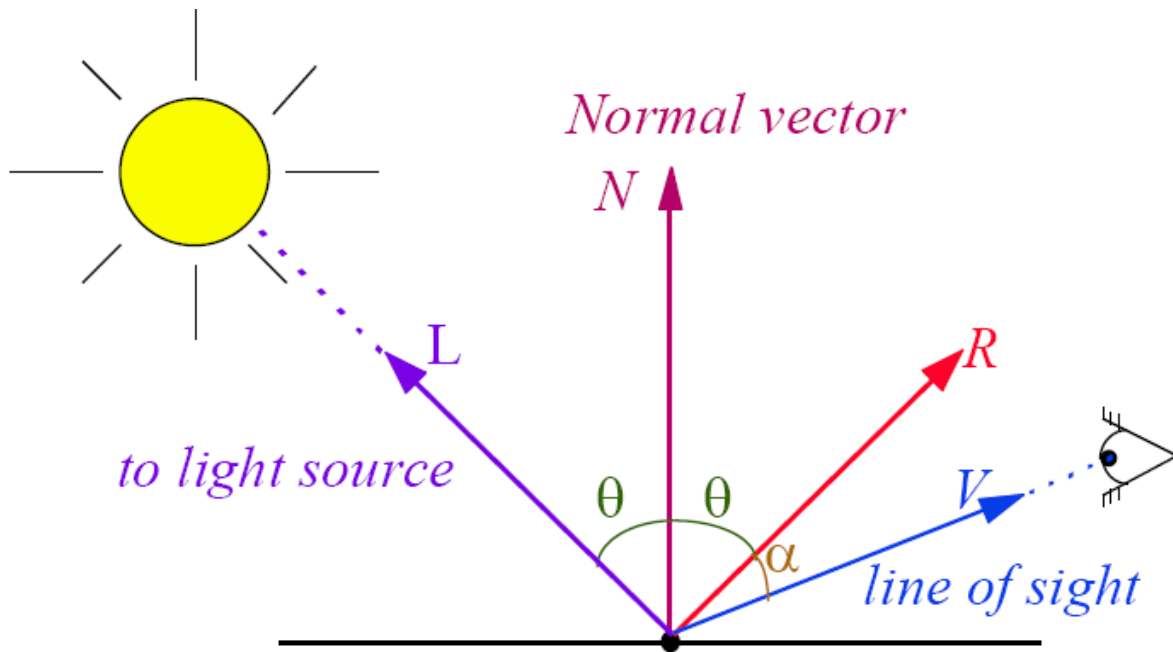


Рассеянный свет и диффузное отражение





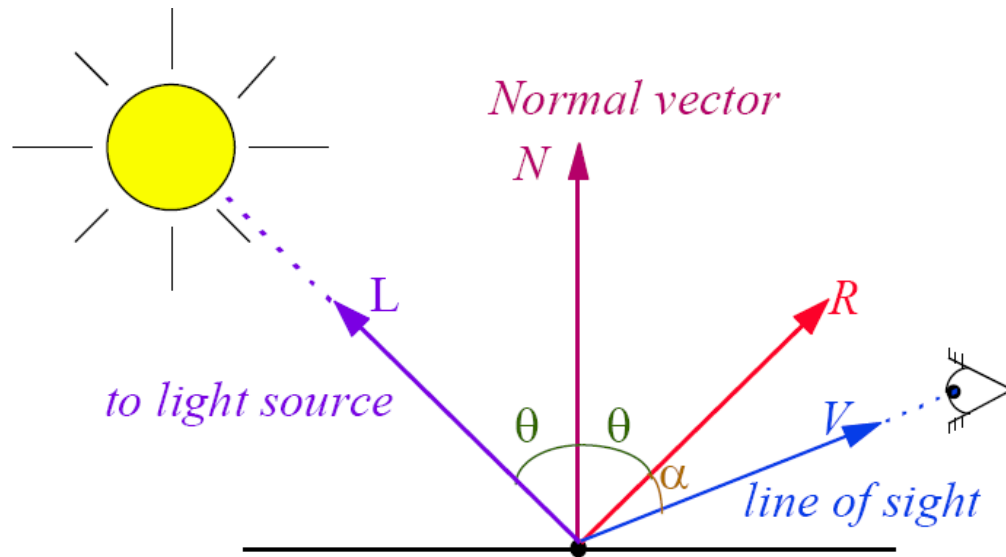
Зеркальное отражение



$$I = k_s \cdot \cos^n \alpha \cdot I_L$$

specular light

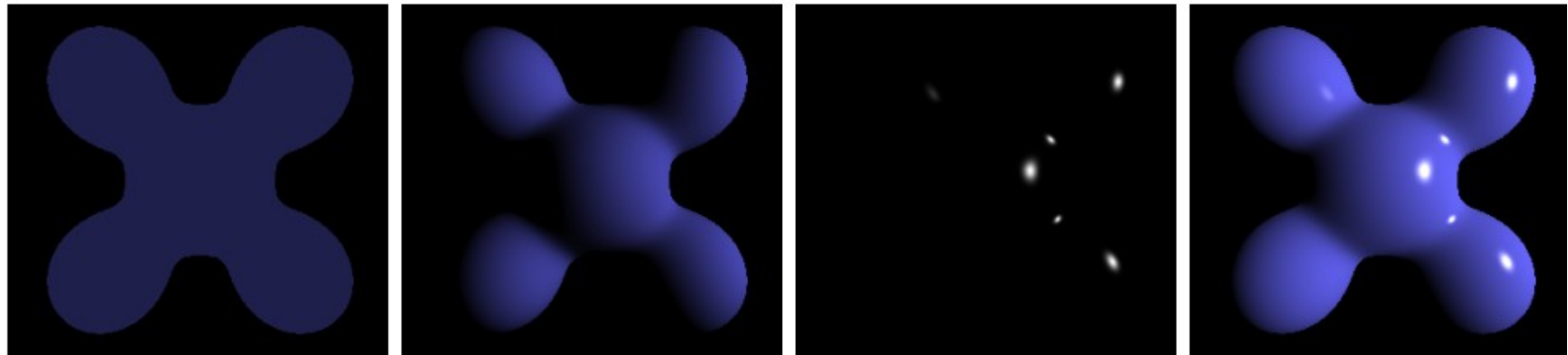
Модель полного отражения по Фонгу (Phong reflection model)



$$I = I_A \cdot k_a + I_L \cdot (k_d \cdot \cos \theta + k_s \cdot \cos^n \alpha)$$

$$I = I_A \cdot k_a + I_L \cdot (k_d \cdot (N \cdot L) + k_s \cdot (R \cdot V)^n)$$

Модель полного отражения по Фонгу (Phong reflection model)



Ambient

+

Diffuse

+

Specular

= Phong Reflection



(a) ambient



(b) diffuse



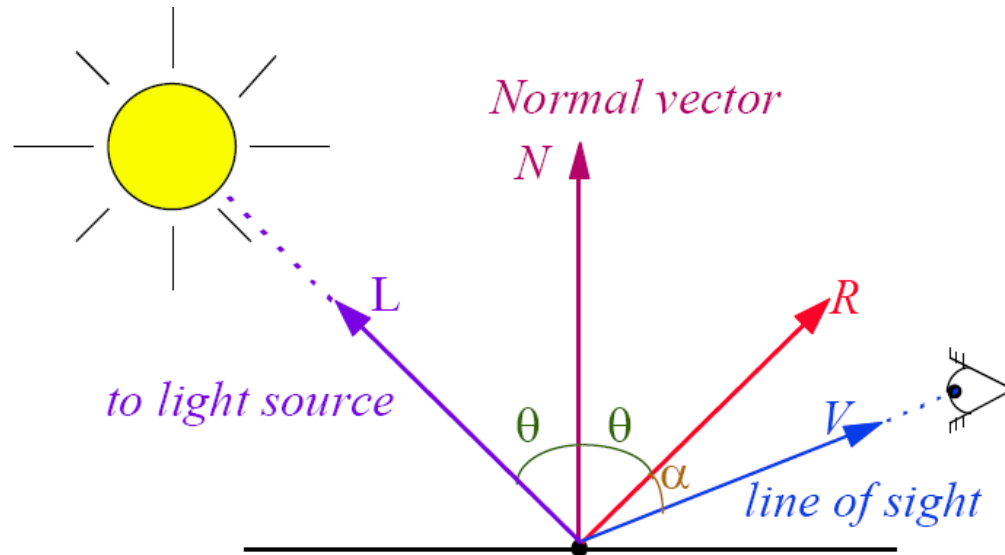
(c) specular



(d) diff.+spec.

Модель полного отражения по Фонгу (Phong reflection model)

$$I = \frac{I_{\text{source}}}{4 \pi d^2}$$

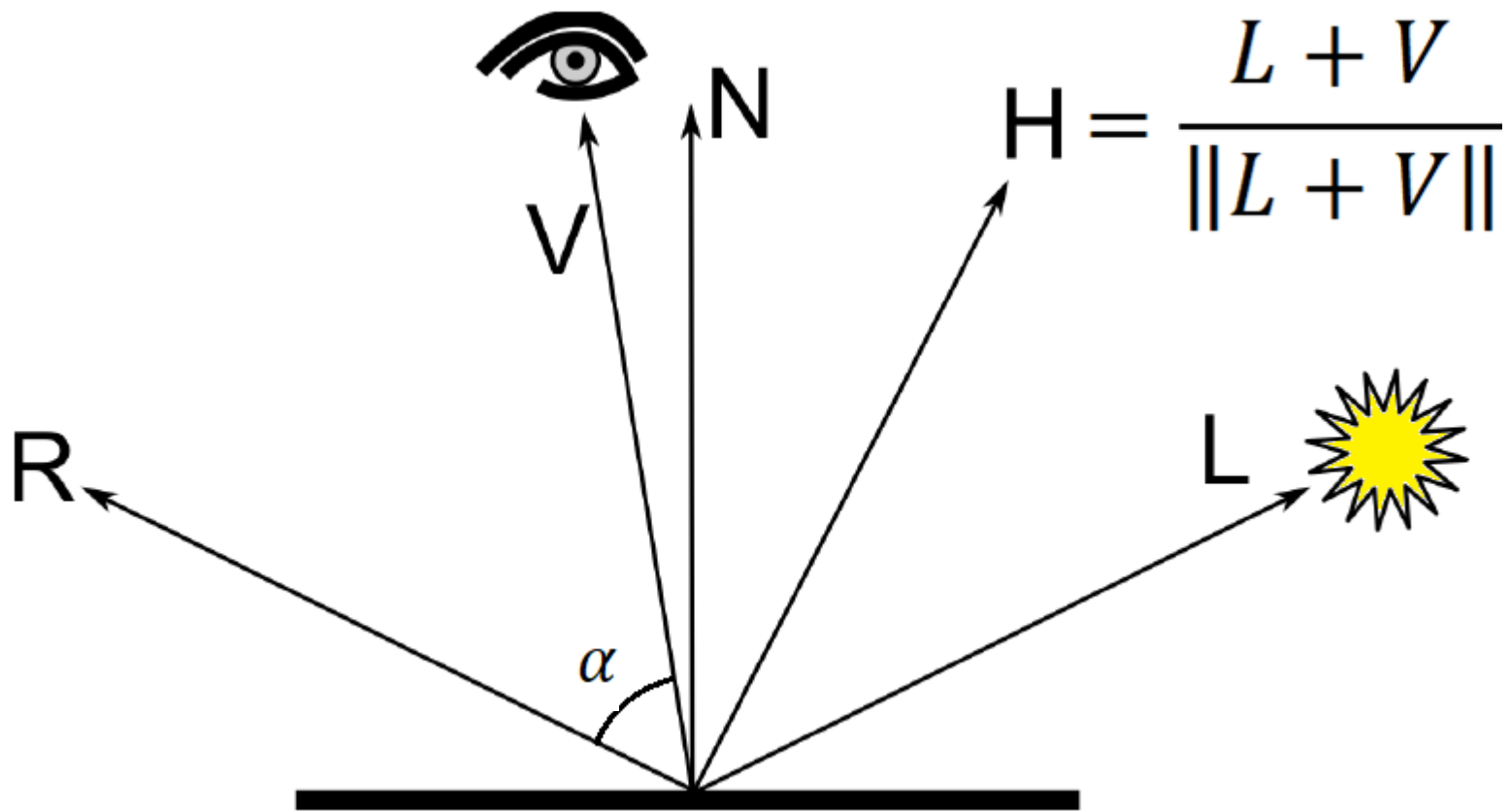


$$I = K_{\alpha} I_{\alpha} + \frac{I_l}{d^p + K} (K_d \cos(\theta) + K_s \cos^n(\alpha))$$

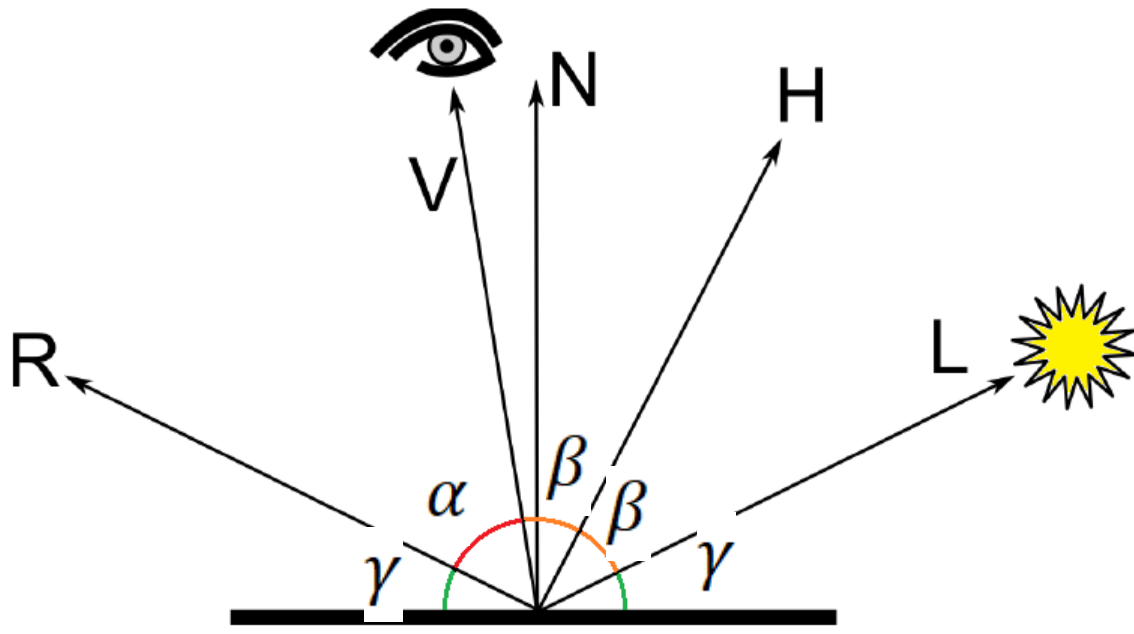
$I = \text{Ambient} + \text{attenuation} (\text{diffuse} + \text{specular})$

$$I = K_{\alpha} I_{\alpha} + \frac{I_l}{d^p + K} (K_d (N \cdot L) + K_s (R \cdot V)^n)$$

Blinn-Phong reflection model



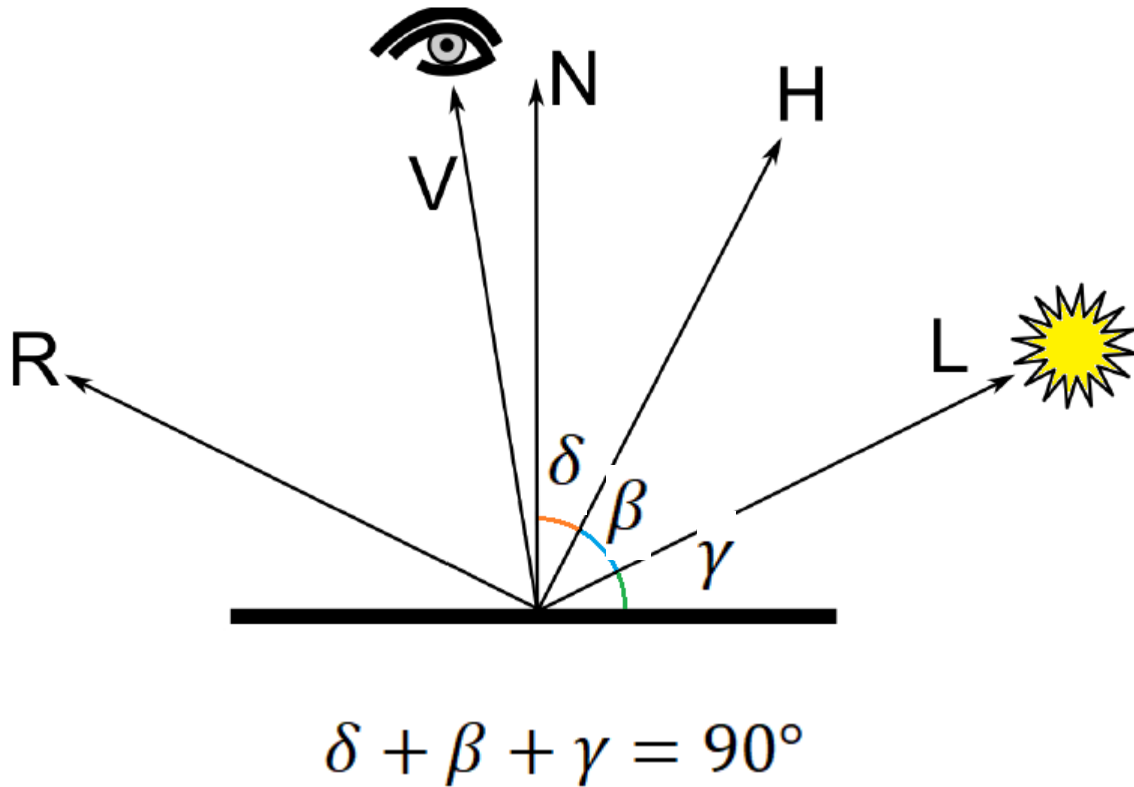
Blinn-Phong reflection model



$$H = \frac{L + V}{\|L + V\|}$$

$$\alpha + 2\beta + 2\gamma = 180^\circ$$

Blinn-Phong reflection model



$$H = \frac{L + V}{\|L + V\|}$$

$$\alpha + 2\beta + 2\gamma = 180^\circ$$

Blinn-Phong reflection model

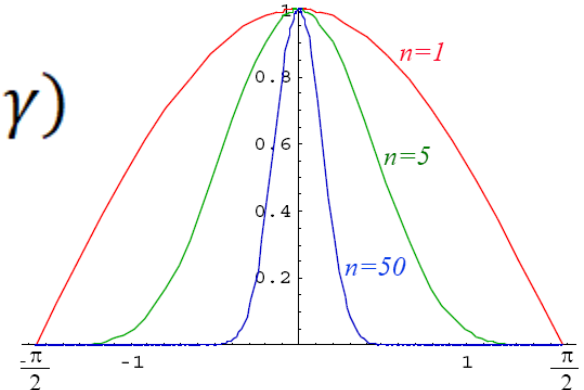
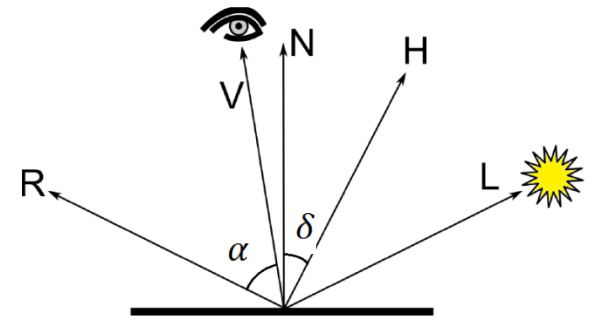
$$\alpha + 2\beta + 2\gamma = 180^\circ$$

$$\delta + \beta + \gamma = 90^\circ$$

$$\delta = 90^\circ - \beta - \gamma$$

$$\alpha = 180^\circ - 2\beta + 2\gamma = 2 \cdot (90^\circ - \beta - \gamma)$$

$$\alpha = 2\delta$$



$$I = I_A \cdot k_a + I_L \cdot (k_d \cdot (N \cdot L) + k_s \cdot (N \cdot H)^n)$$

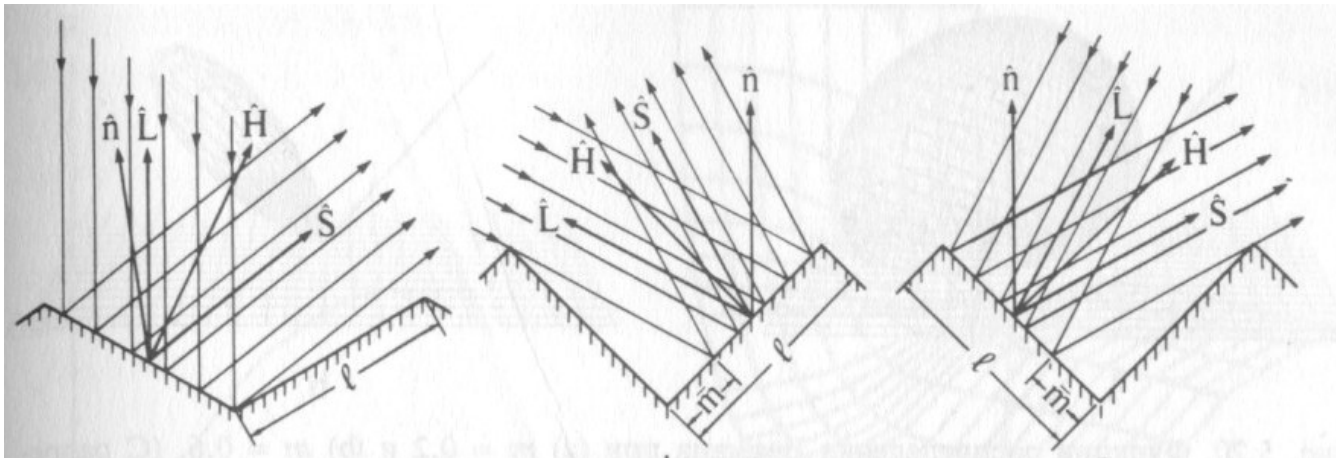
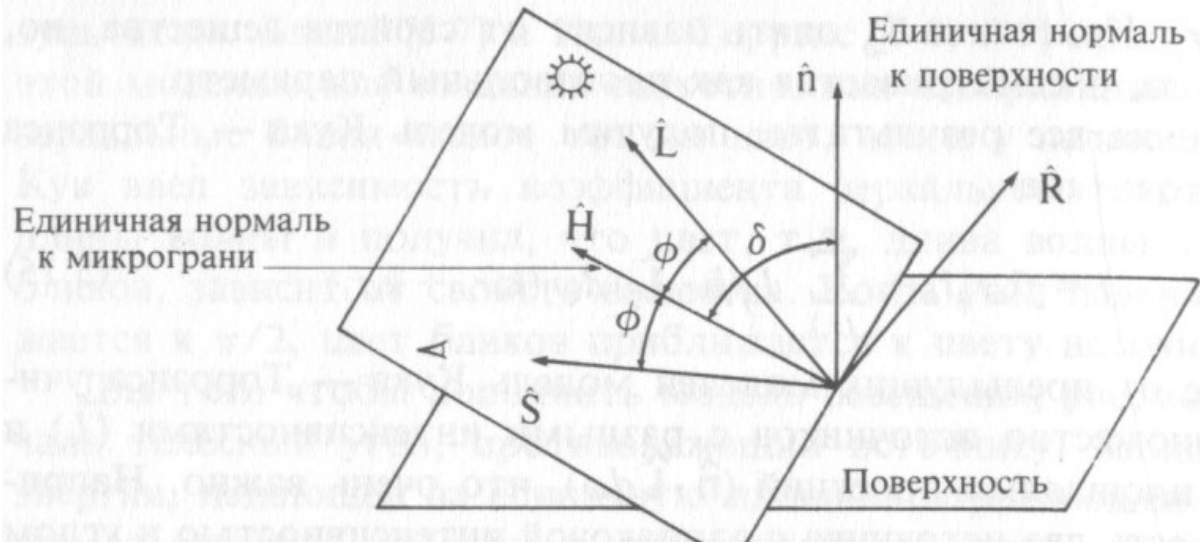
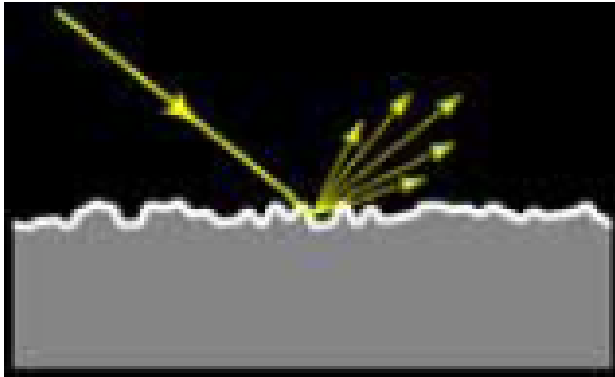
$$I = I_A \cdot k_a + I_L \cdot (k_d \cdot (N \cdot L) + k_s \cdot (R \cdot V)^n)$$

Торрэнс-Спэрроу

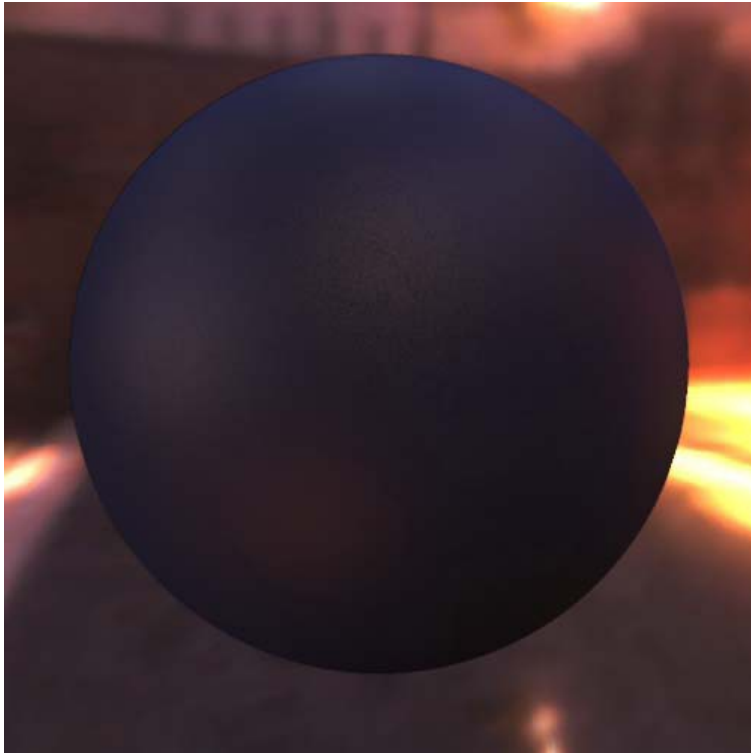
(распр.Гаусса, Бэкмана)

$$D = c_1 e^{-(\delta/m)^2},$$

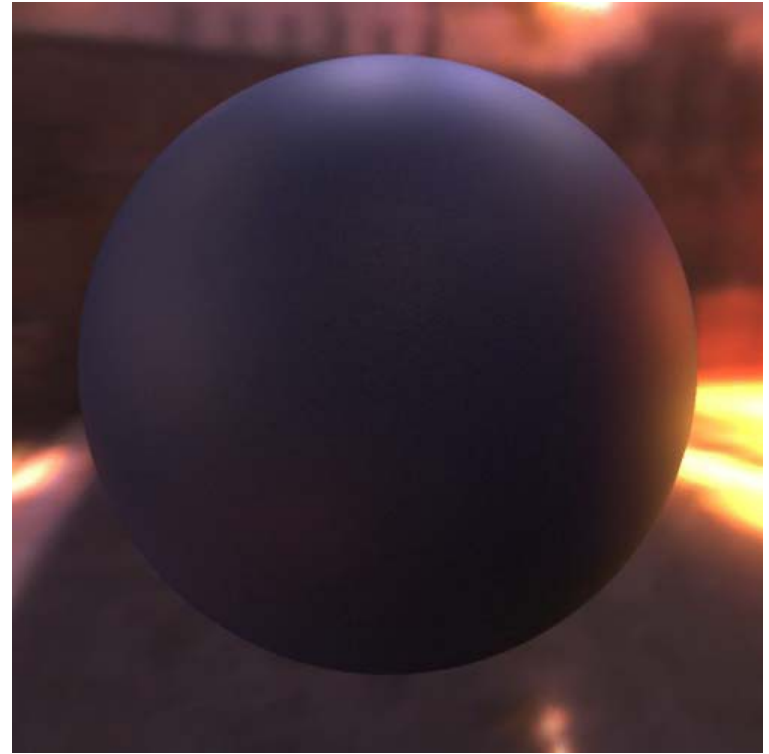
$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \delta} e^{-(\text{tg} \delta / m)^2},$$



Торрэнс-Спэрроу

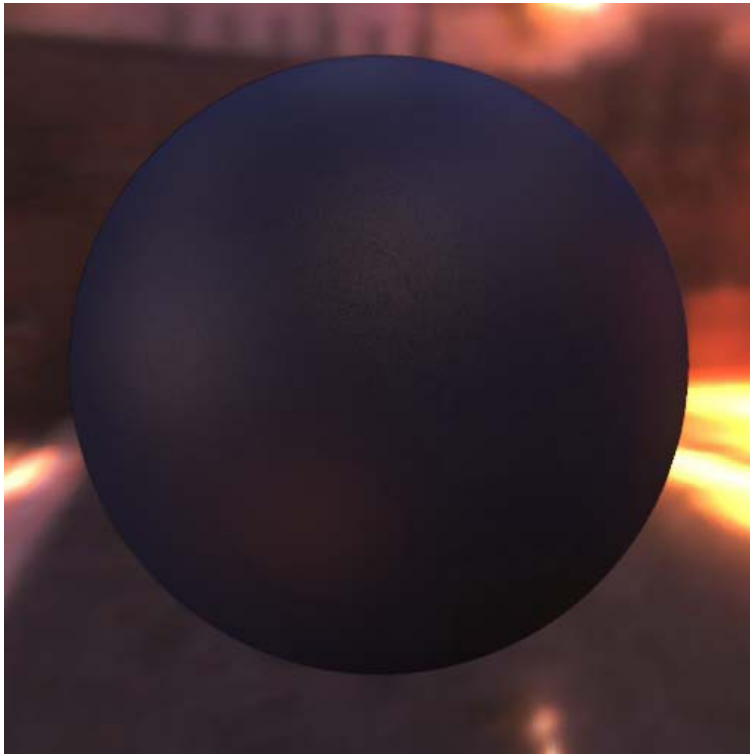


реальное изображение

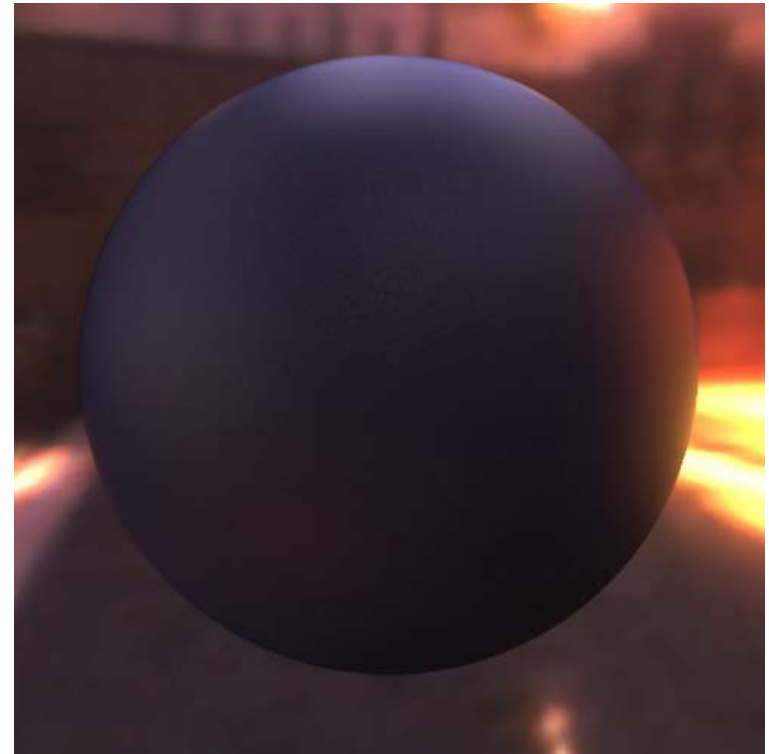


модель Фонга

Торрэнс-Спэрроу



реальное изображение



модель Торрэнса

Текстурирование BRDF

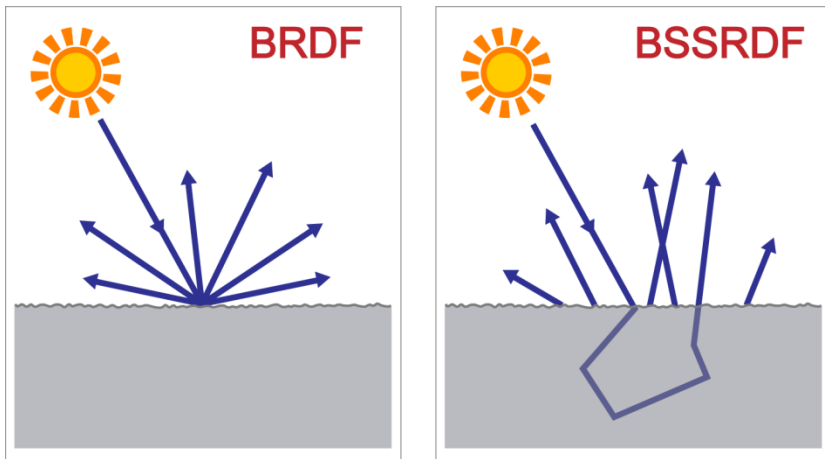


Одинаковая BRDF



BRDF в каждой точке

BSSRDF : Bidirectional surface scattering reflectance distribution function



- 8D function
- Subsurface Scattering



Ravi Ramamoorthi

BSSRDF : Bidirectional surface scattering reflectance distribution function



BRDF



BSSRDF

BSSRDF : Bidirectional surface scattering reflectance distribution function



BRDF



BSSRDF



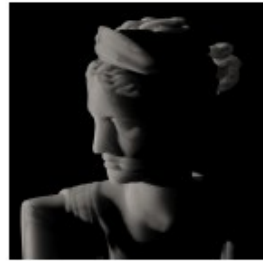
(a)



(b)



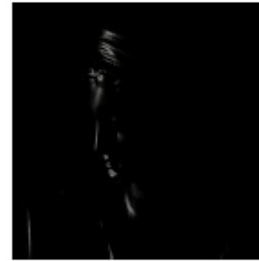
(c)



(d)



(e)

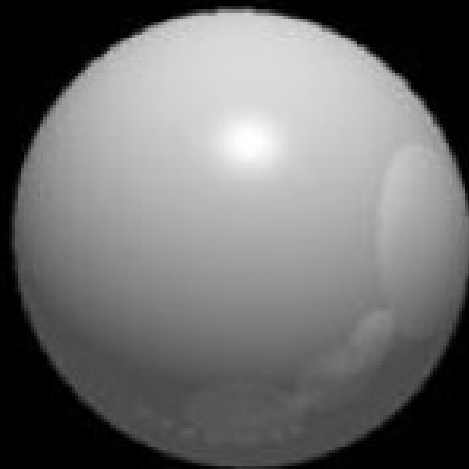


(f)

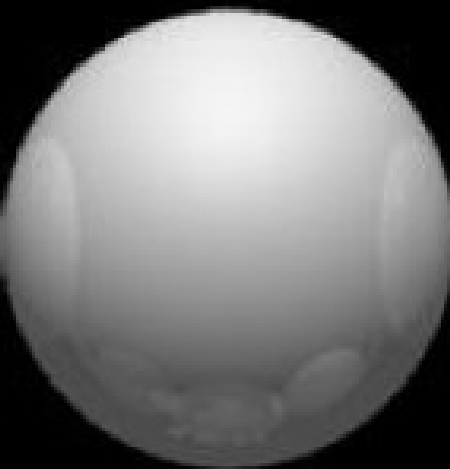
A simulation of subsurface scattering in a marble bust. illuminated from behind and rendered using: (a) BRDF approximation (2 m), (b) BSSRDF approximation (5 m), and (c) a full Monte Carlo simulation (in 1250 minutes).

Notice how the BSSRDF model matches the appearance of the Monte Carlo simulation, yet is significantly faster. The images in (d–f) show the different components of the BSSRDF: (d) single scattering term, (e) diffusion term, and (f) Fresnel term.

Глобальная модель освещенности



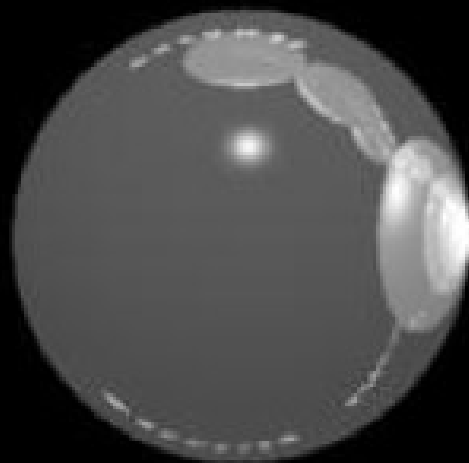
default



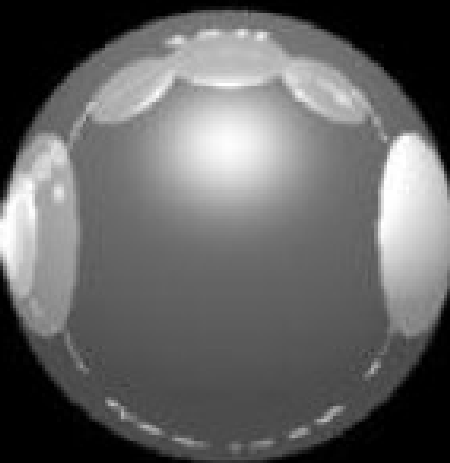
dull



shiny



metallic

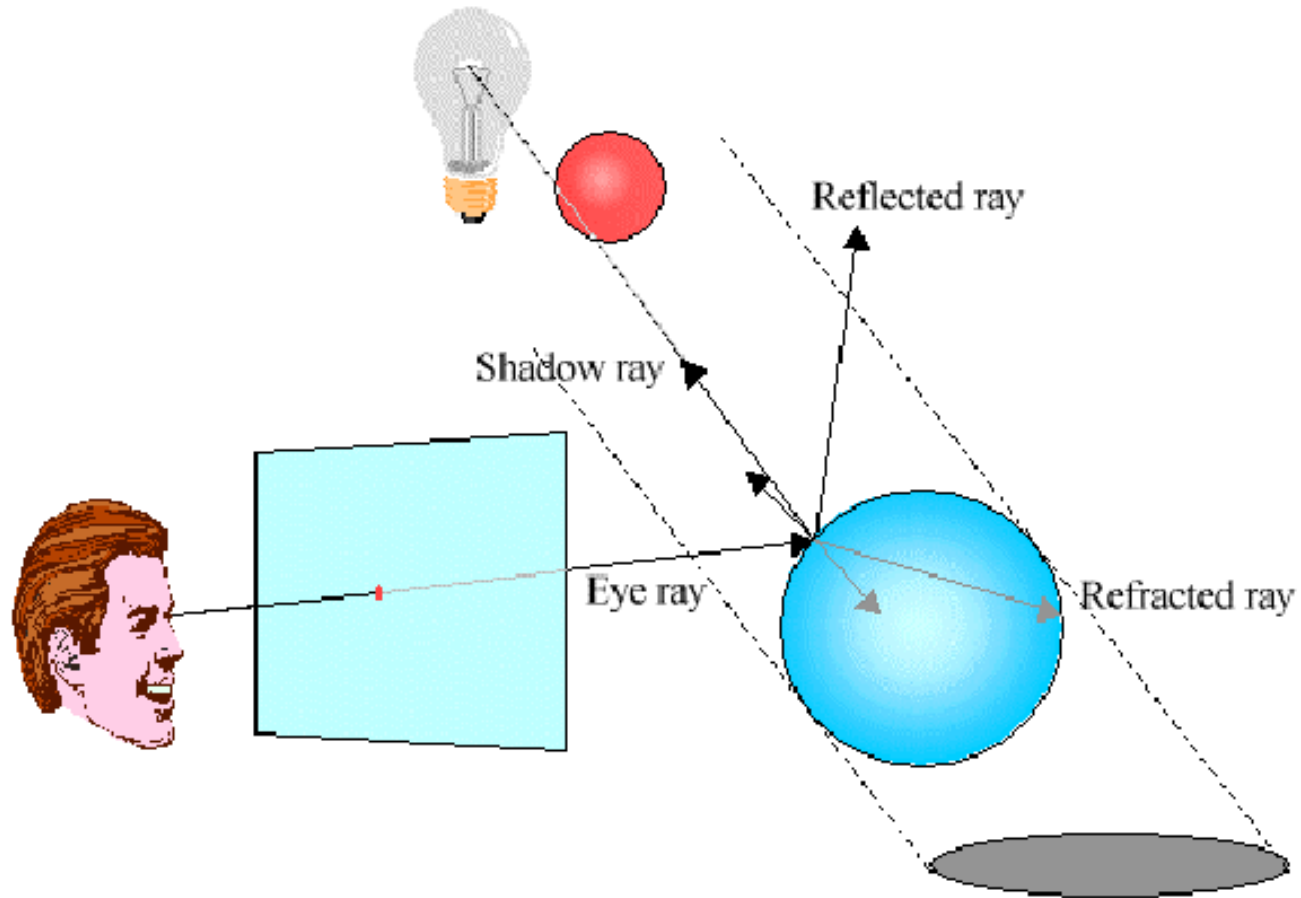


aluminum

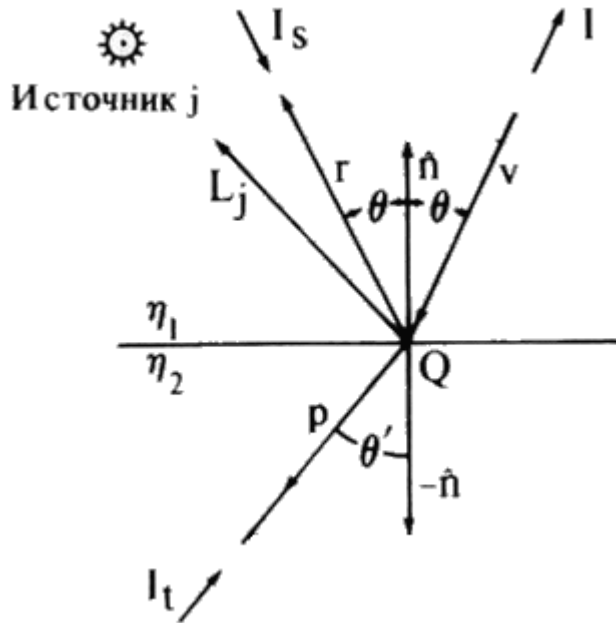


matte

Глобальная модель освещенности



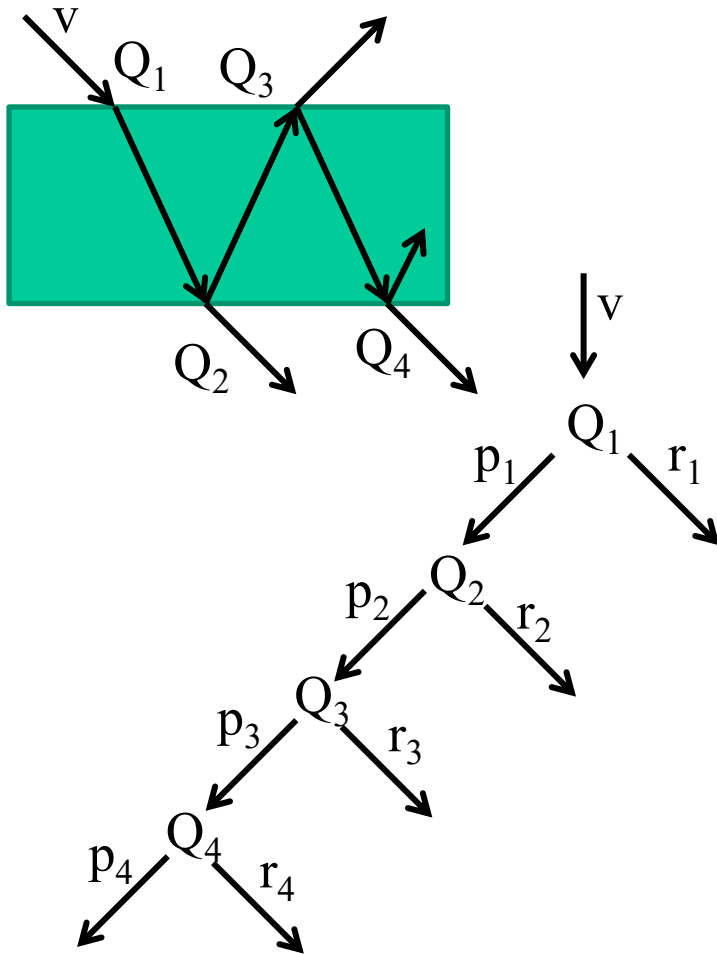
Глобальная модель освещенности



- v – трассируемый луч
- Q – точка пересечения
- n – нормаль к поверхности
- r – отраженный луч
- p – преломленный луч
- L_j – направление на j -й источник света
- I_s – интенсивность света по лучу r (зеркальное отражение)
- I_t – интенсивность света по лучу p

$$I = \sum_{j=1}^n I_j (k_d (N \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot V)^{pow}) + k_a I_A + k_s I_s + k_t I_t$$

Глобальная модель освещенности



- v – луч от камеры (через пиксель)
- Q_i – точка пересечения
- r_i – отраженный луч
- p_i – преломленный луч

Последовательно проходим по всем лучам p_i и r_i , пока луч не покинет сцену или пока не достигнем предела по числу порождаемых лучей

Глобальная модель освещенности

- Для всех точек Q_i интенсивность падает от расстояния (точечный источник освещения)
но для камеры ослабления нет !!!

$$f_{att} = 1/d^2$$

- Есть тени (перекрывание источника света другими объектами сцены)
 $V_j = 0$, если Q_i в тени для L_j (иначе равно 1)

$$I_{i-1} = k_a I_A + \sum_{j=1}^n V_j f_{att,j} I_j (k_d (N \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot V_i)^{pow})$$
$$+ k_s f_{att,s,i} I_{s,i} + k_t f_{att,t,i} I_{t,i}$$

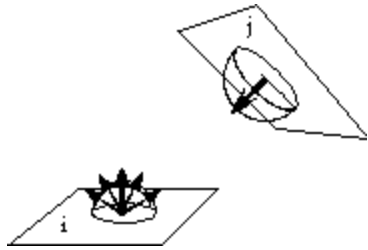
Рейтресинг для задачи

Нет преломления (все объекты непрозрачны)

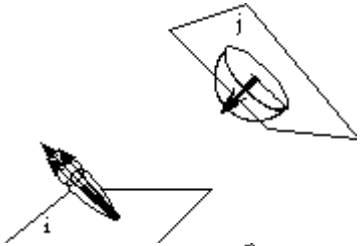
$$I = k_a I_A + \sum_{i=1}^n V_i f_{att,i} I_i [k_d (N \cdot L_i) + k_s (R_i \cdot V)^{pow}] + k_s f_{att,s} I_r$$

- Для точек переотражения (луч от объекта к объекту) всегда используется f_{att} (ослабление)
- Для луча от камеры до объекта ослабление не используется
- Для бесконечно удаленных источников света тоже

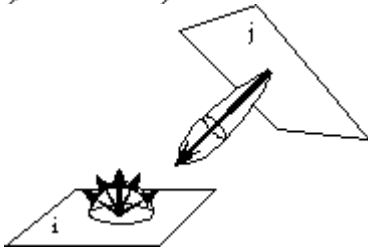
Отражение от поверхности



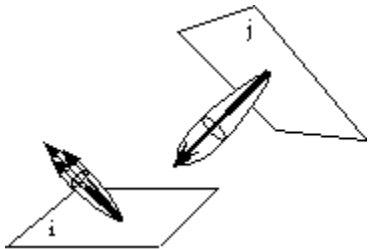
- диффузно от j -ой затем диффузно от i -ой radiosity, MCRT



- диффузно от j -ой затем зеркально от i -ой MCRT, RT



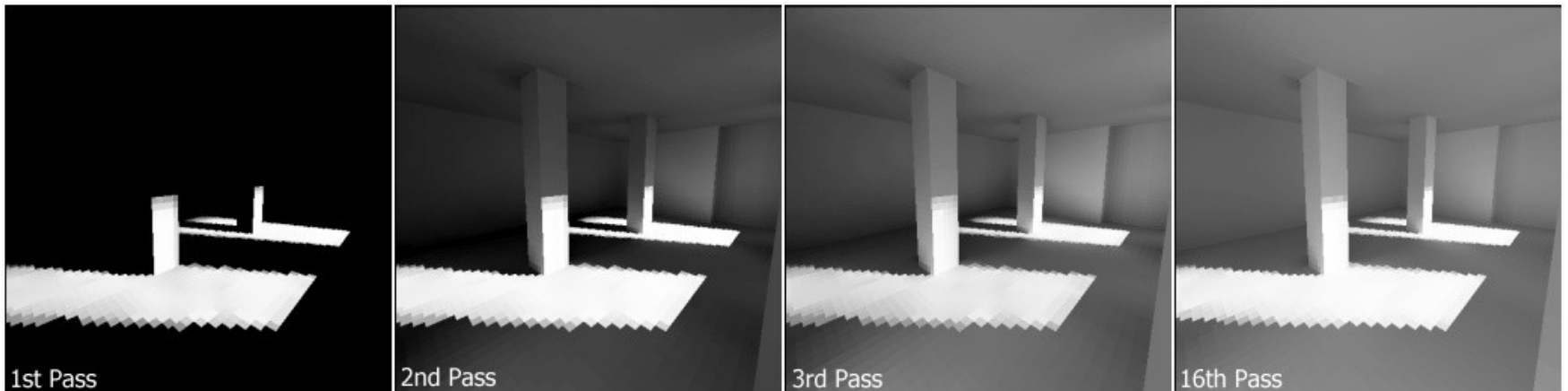
- зеркально от j -ой затем диффузно от i -ой MCRT



- зеркально от j -ой затем зеркально от i -ой MCRT, RT

Radiosity

- Сцена делится на «патчи». Для каждой пары «патчей» вычисляется форм-фактор, коэффициент видимости одного патча с другого.
- Составляется система линейных уравнений, которая решается итерационно и даёт яркость каждого «патча».
- Если нужны цвета, для каждого цвета решается своё уравнение.

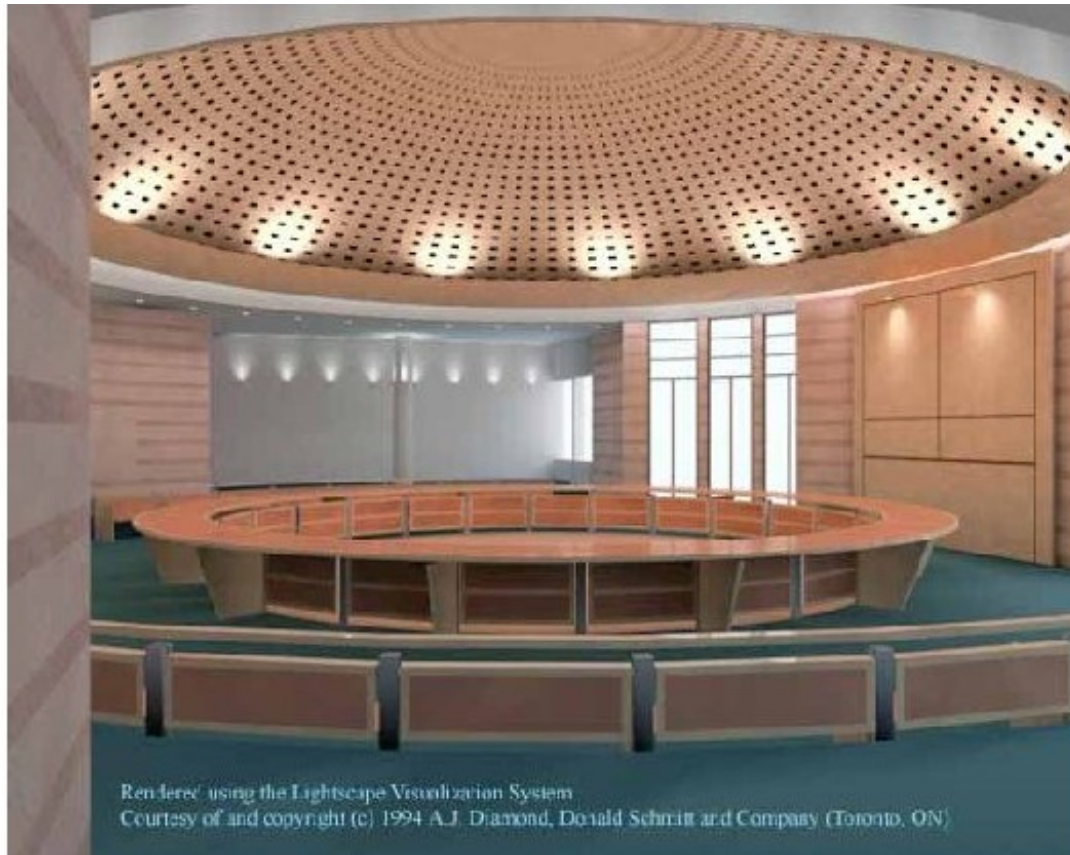


$$B_i = E_i + R_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ij}$$

Radiosity



Radiocity



Rendered using the Lightscape Visualization System
Courtesy of and copyright (c) 1994 A.J. Diamond, Donald Schmitt and Company (Toronto, ON)

Сканирующие алгоритмы

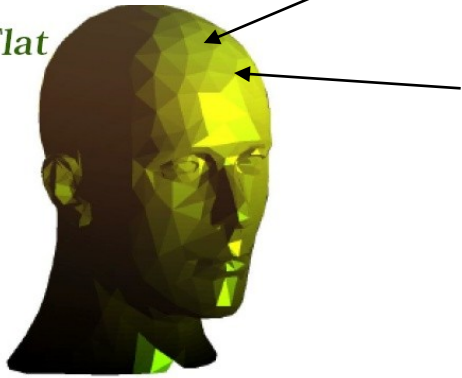
Полигональные модели

Flat

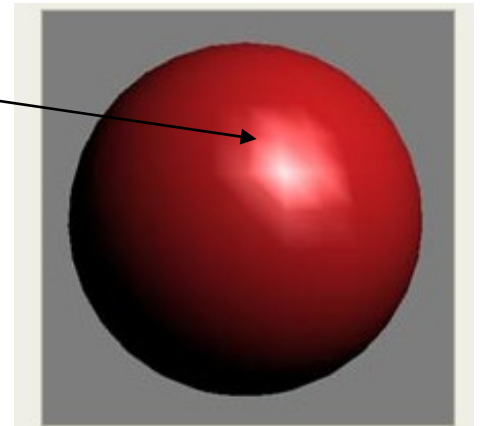
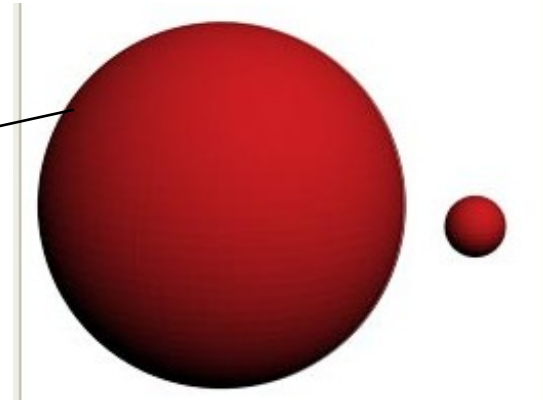
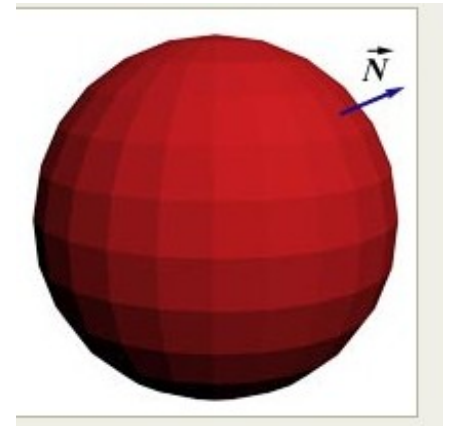
Gouraud (1971)

Phong (1973, Ph.D)

Flat



Гуро, Фонг



Гуро

Phong

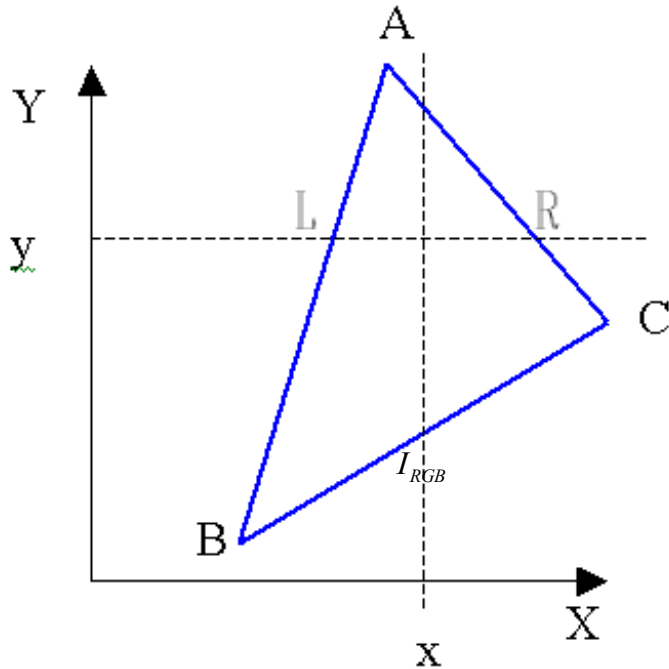


Гуро

Гуро

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Усреднение яркостей вершин пропорционально расстоянию



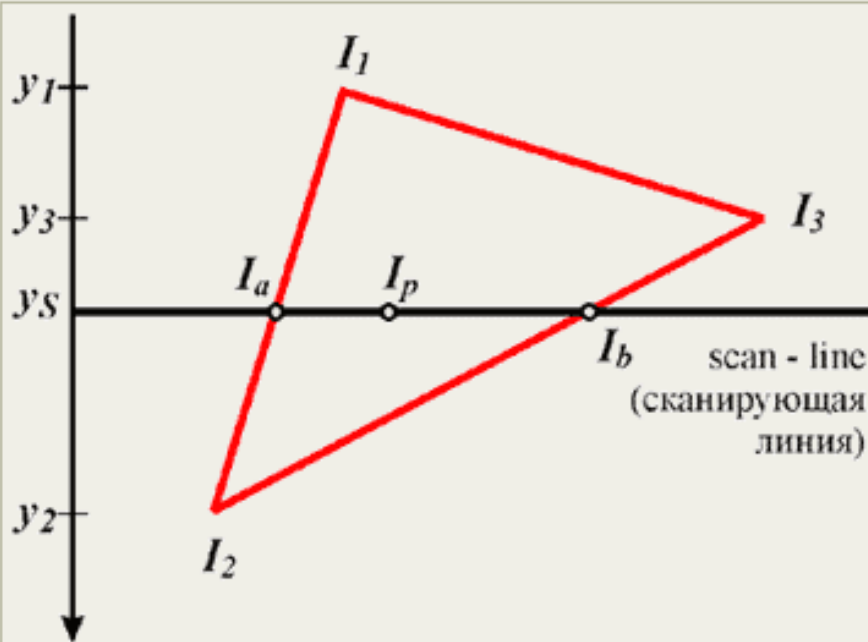
$$l = a \frac{y_A - y}{y_A - y_B} + b \frac{y - y_B}{y_A - y_B}$$

$$x_L = x_A \frac{y_A - y}{y_A - y_B} + x_B \frac{y - y_B}{y_A - y_B}$$

$$r = a \frac{y_A - y}{y_A - y_C} + c \frac{y - y_C}{y_A - y_C}$$

$$v = l \frac{x_L - x}{x_L - x_R} + r \frac{x - x_R}{x_L - x_R}$$

$$x_R = x_A \frac{y_A - y}{y_A - y_C} + x_C \frac{y - y_C}{y_A - y_C}$$



Интерполяция цвета вдоль границ полигона

$$I_a = \frac{(y_2 - y_S)}{(y_2 - y_1)} I_1 + \frac{(y_S - y_1)}{(y_2 - y_1)} I_2$$

$$I_b = \frac{(y_2 - y_S)}{(y_2 - y_3)} I_3 + \frac{(y_S - y_3)}{(y_2 - y_3)} I_2$$

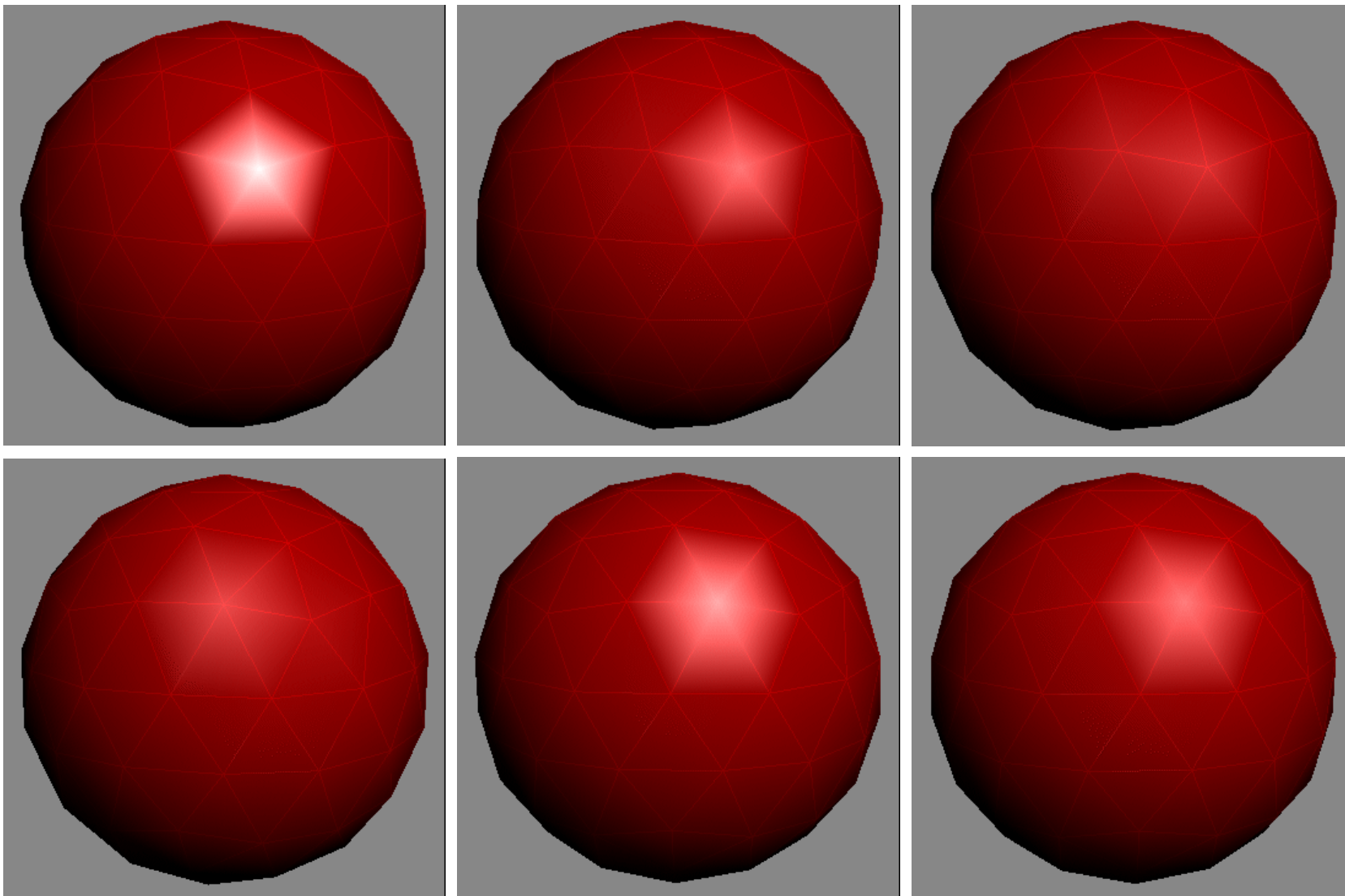
Интерполяция цвета внутренней точки полигона

$$I_p = \frac{(x_b - x_p)}{(x_b - x_a)} I_a + \frac{(x_p - x_a)}{(x_b - x_a)} I_b$$

Это Гуро,

А с Фонгом не так дешево.

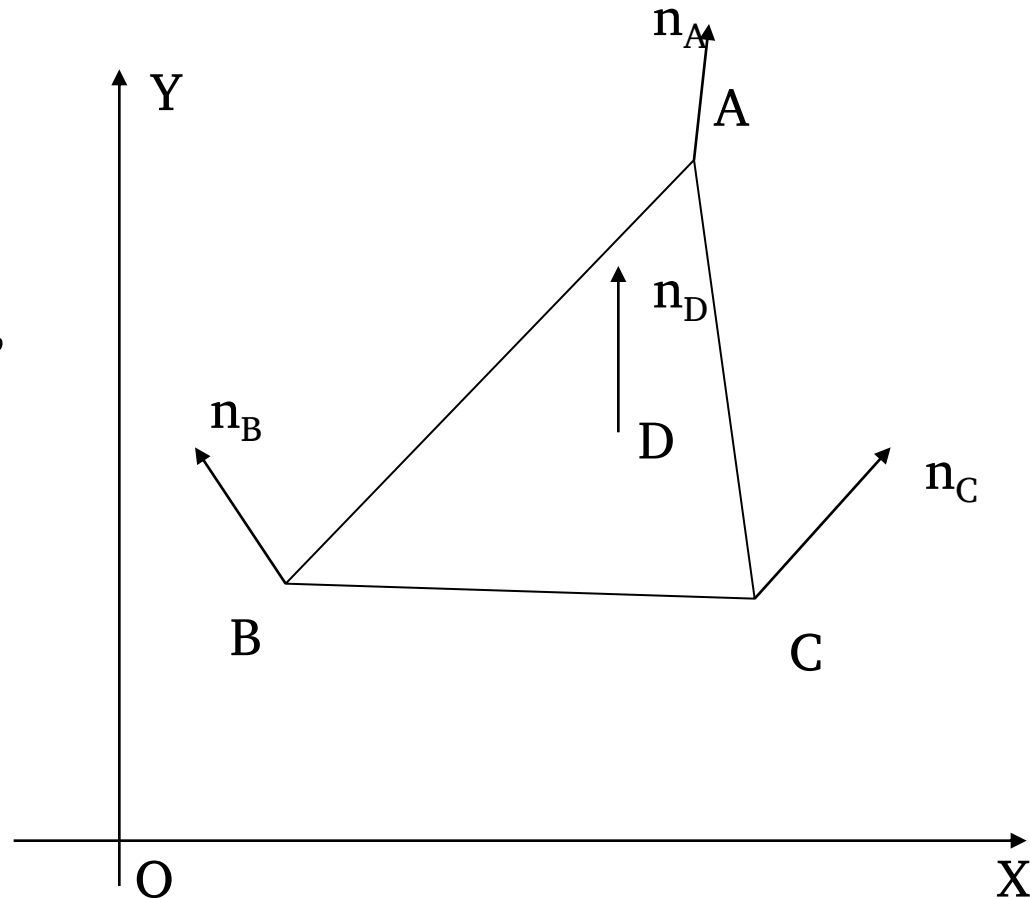
Проблемы Гуро



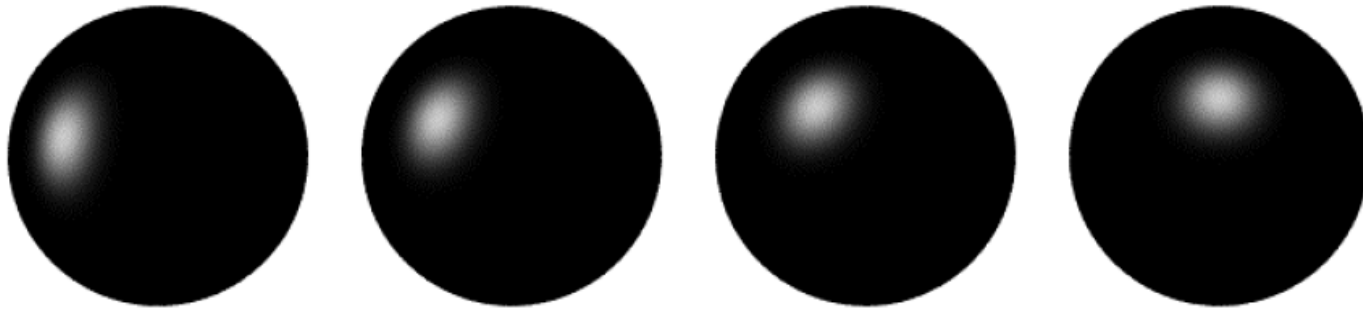
ФОНГ

Усреднение не яркостей, а нормалей во всех точках и пересчёт цвета точки для полученной нормали с использованием модели полного отражения по Фонгу.

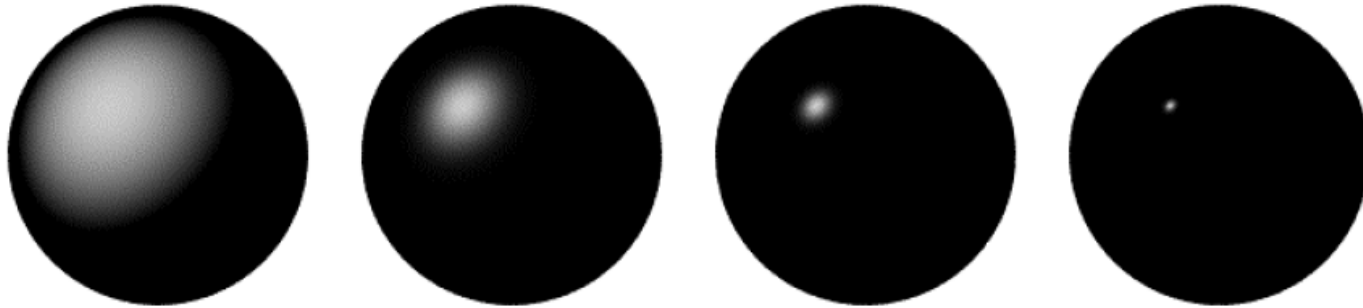
Усреднение нормалей работает так же, как усреднение яркостей в Гуро



Phong Illumination



Moving the light source



Changing n_{shiny}



Specular Highlight Exponent

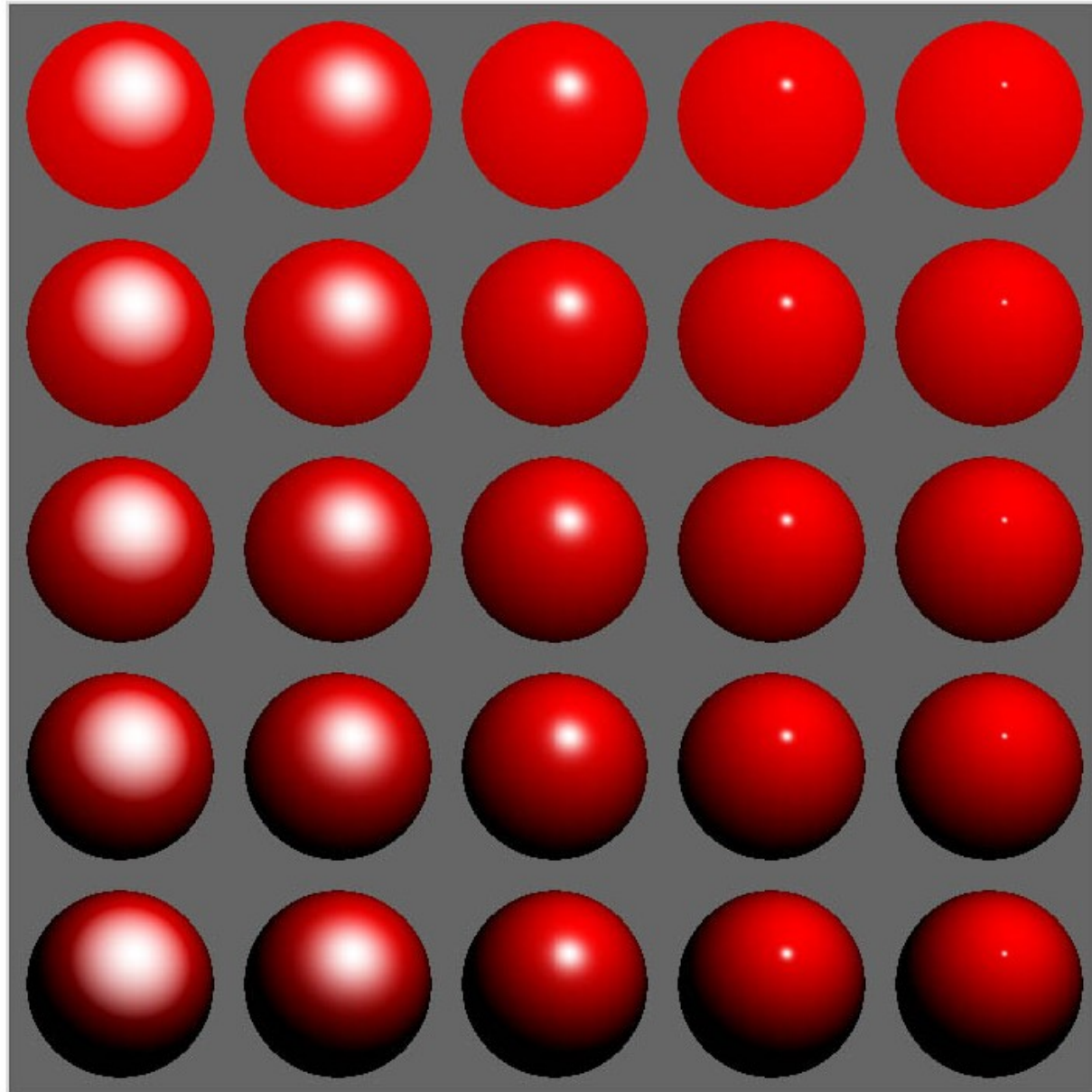
1

2

10

100

500



.8

.6

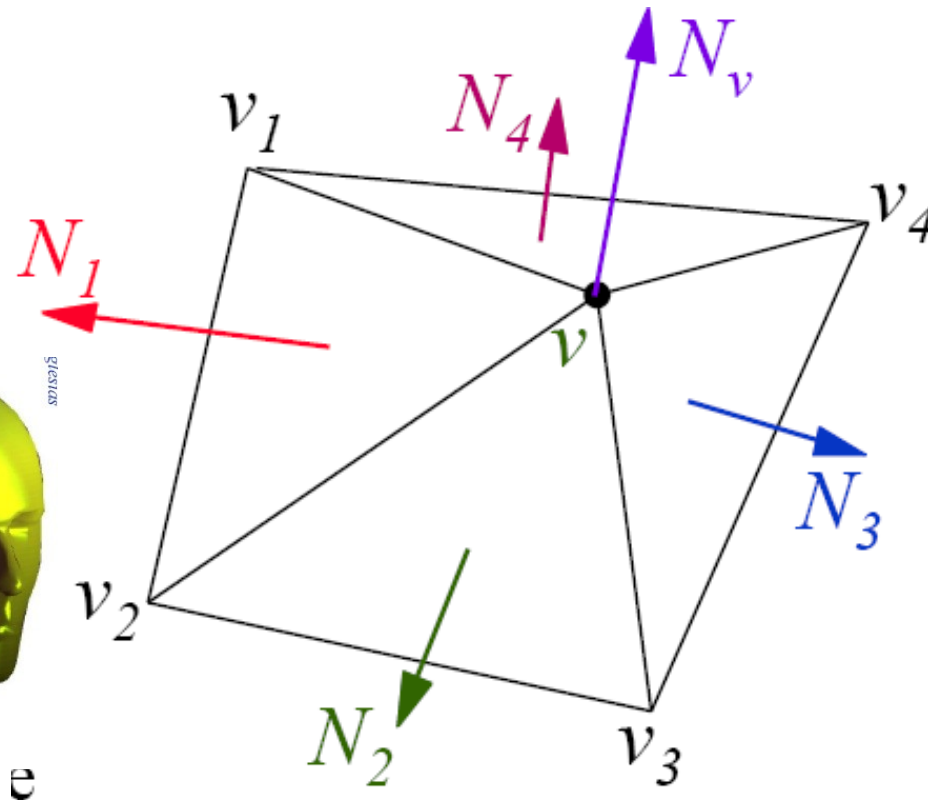
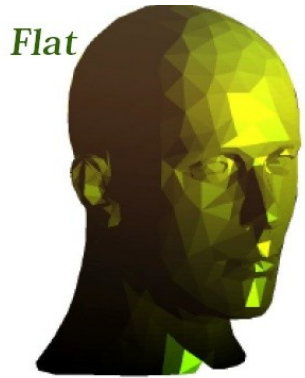
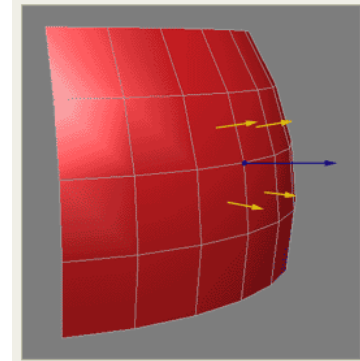
.4

.2

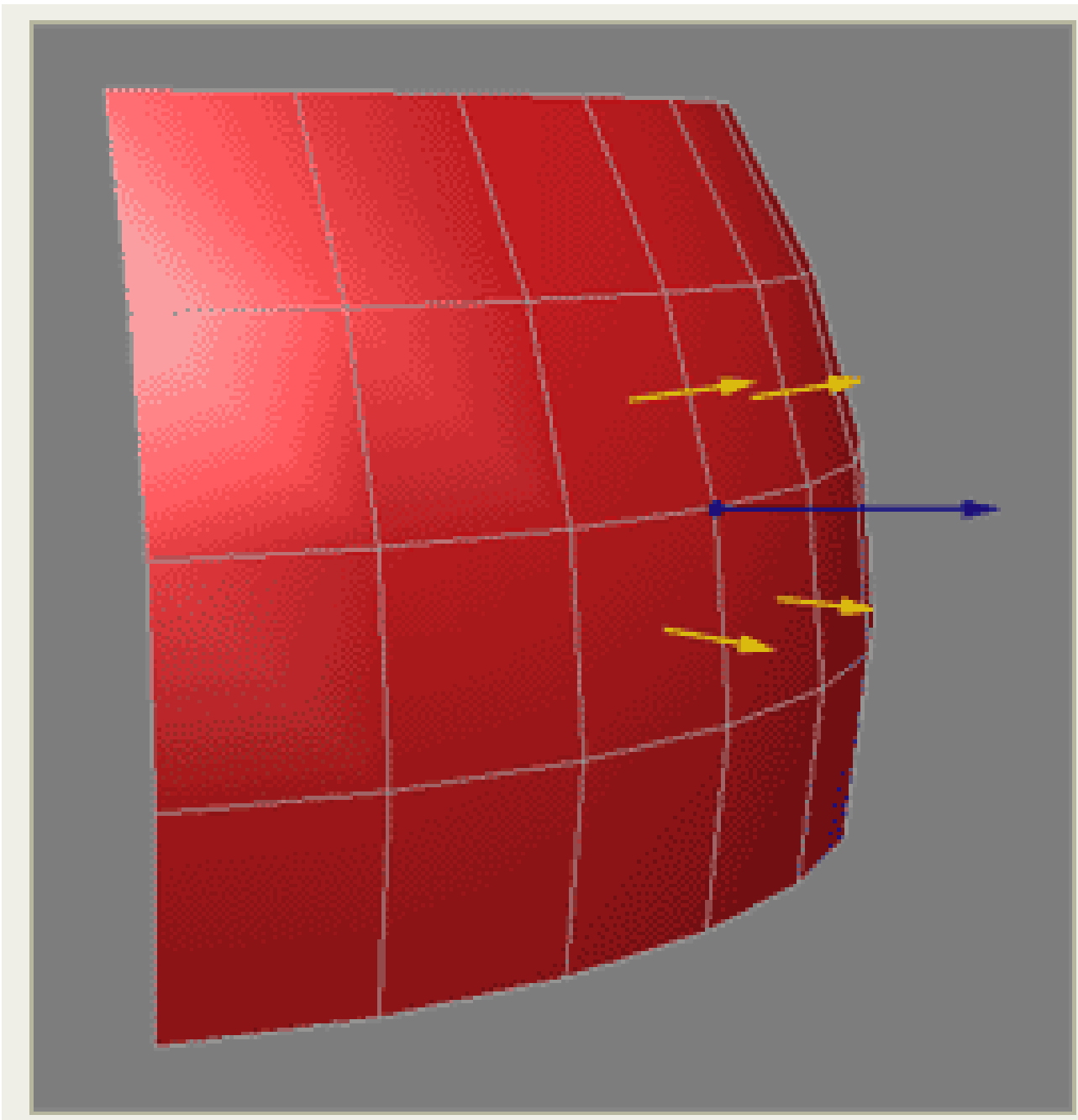
0

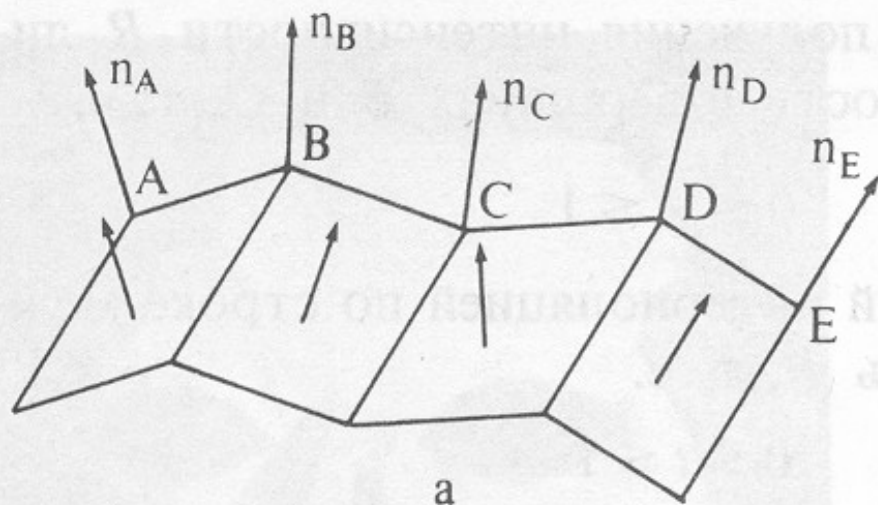
Ambient

Усреднение нормалей (полигональные сетки)

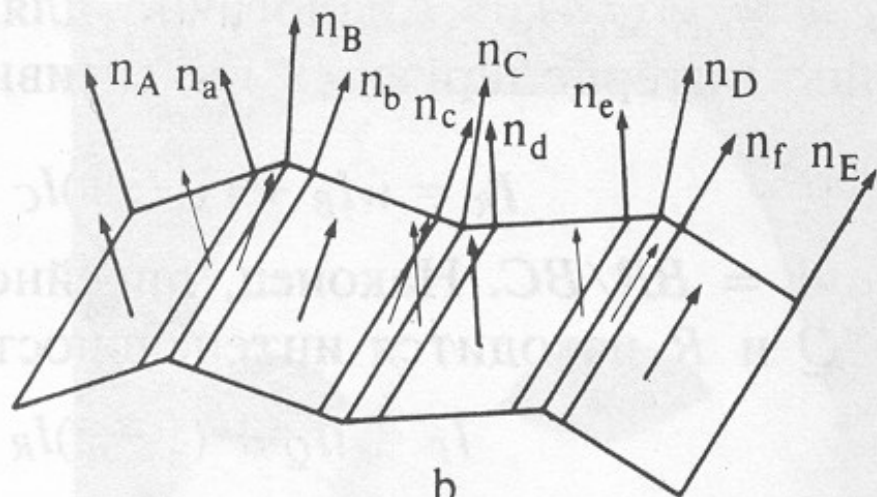


e

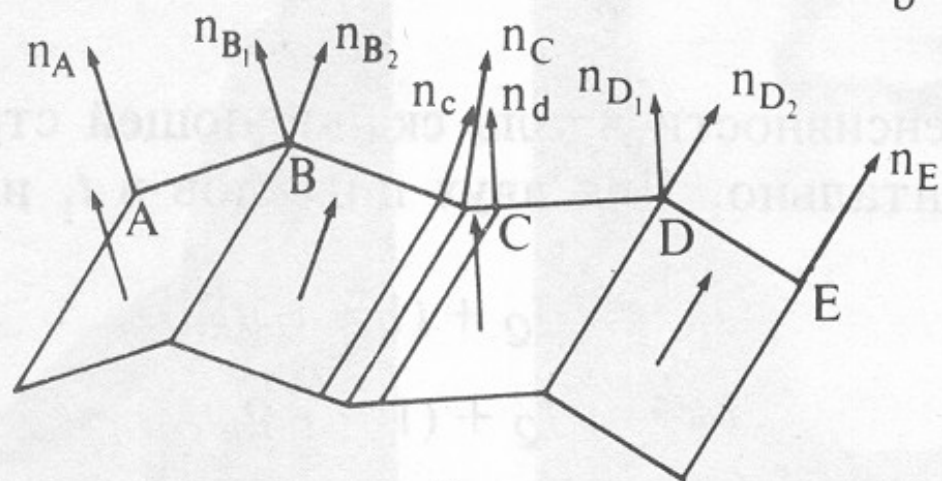




a



b



c

Итак, полигональный ПОДХОД

- Расчет в вершинах
- Интерполяция внутри полигона (Гуро)
- Z-буфер
- Проблема геометрии очерка/контура

