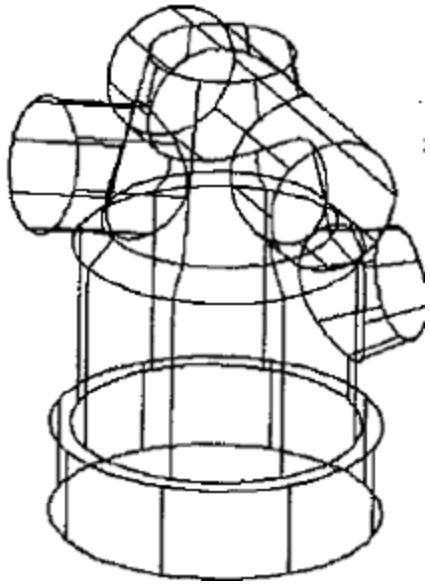
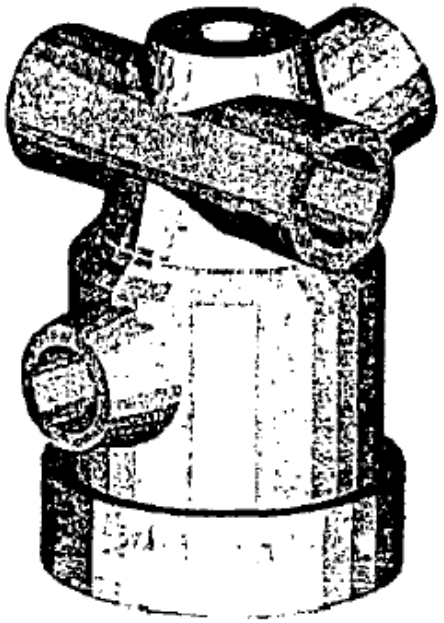
Растеризация. Освещение. Текстурирование

Компьютерная графика

Что нужно?



Модель → Алгоритм синтеза → Изображение



План

- Растеризация (было раньше)
- Освещение
- Шейдинг (затенение)
- Текстурирование

Что даёт освещение?

- Глаз воспринимает освещение и «реконструирует» трёхмерную форму
- Фотореализм

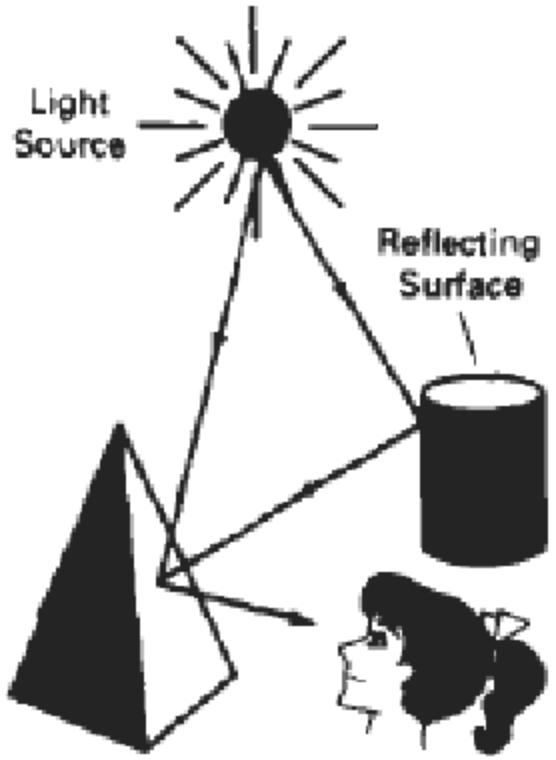
Фотореализм

- Фотореализм включает в себя два элемента:
  - качественная геометрическая модель
  - хорошая физическая модель освещения

Полный отраженный свет

- Поверхность, не освещаемая первичным источником света, всё равно может быть видима!

- Полный отраженный свет = сумма вклада от источников света и других поверхностей сцены

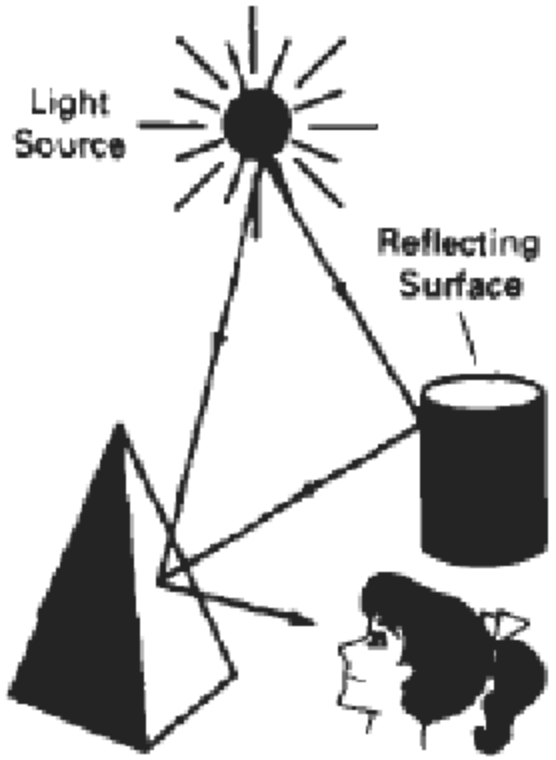


Две категории источников света

- светоиспускающие источники = первичные источники
- светотражающие источники = вторичные источники

Источниками энергии могут быть не только источники света, но и другие отражающие объекты

Такие взаимоотношения сложно учитывать



Локальные и глобальные модели освещения: что учитывают?

- Локальные модели учитывают только первичные источники света, глобальные – все источники

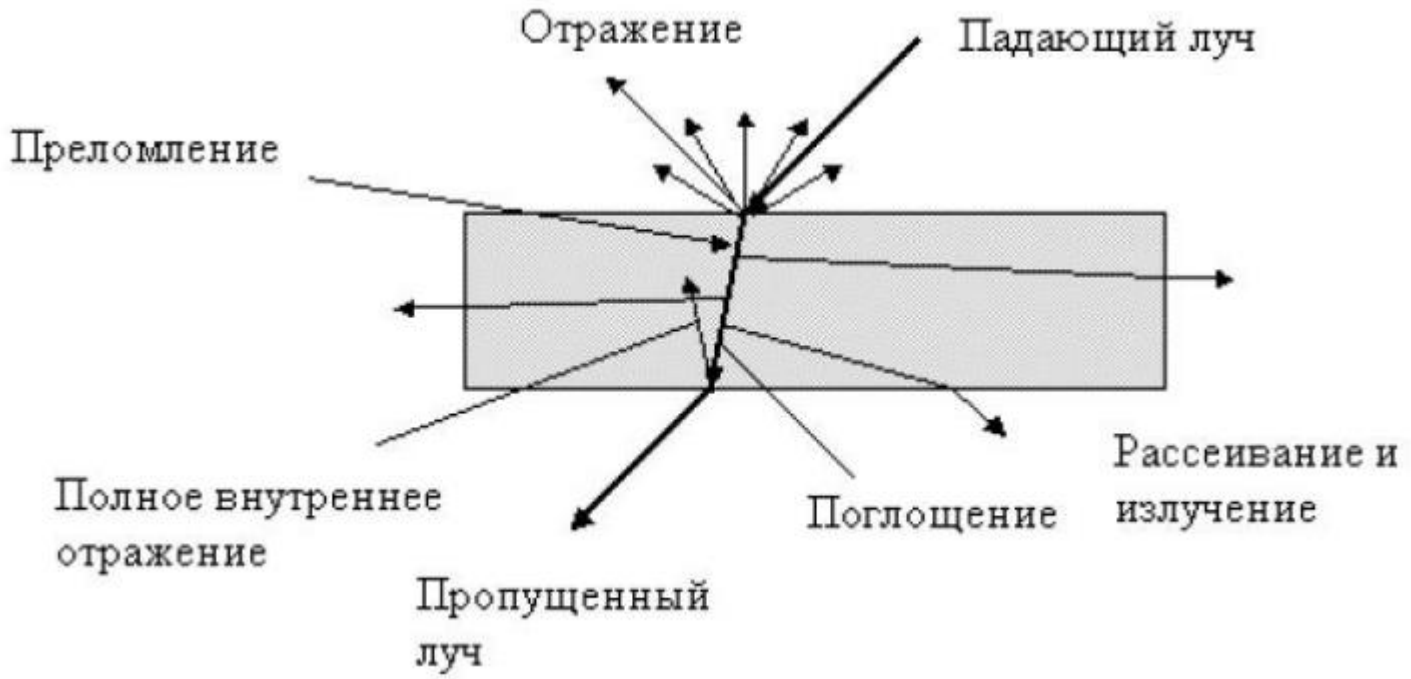
- Локальные модели при вычислении освещения в данной точке учитывают только положение этой точки относительно первичных источников света

Модель освещения

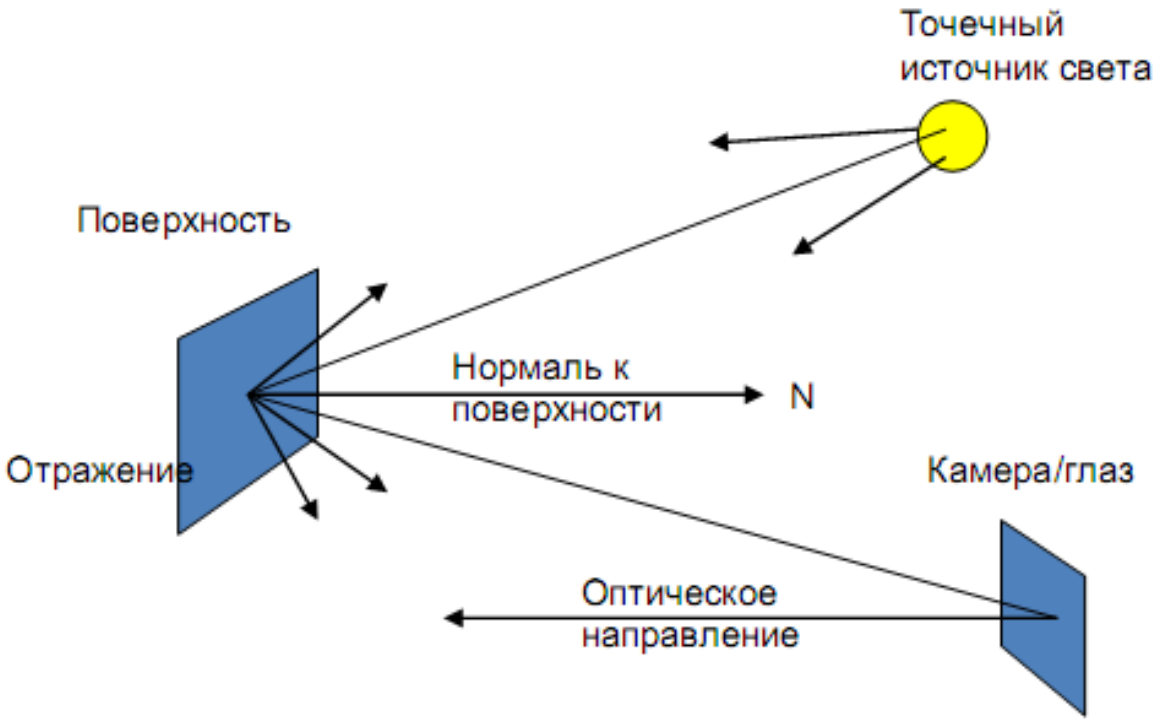
- Модель освещения используется для вычисления интенсивности света для данной точки на поверхности модели

- Модель освещения включает в себя
  - отражение,
  - преломление света,
  - тени,
  - текстуры и т.п.

Взаимодействие света с поверхностью

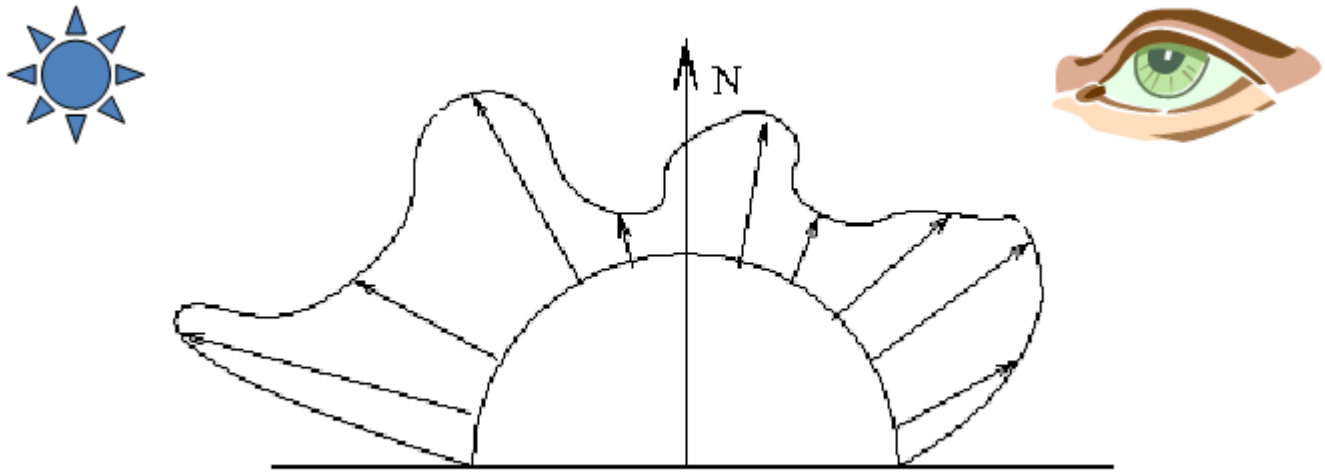


Суть задачи: моделирование переноса световой энергии



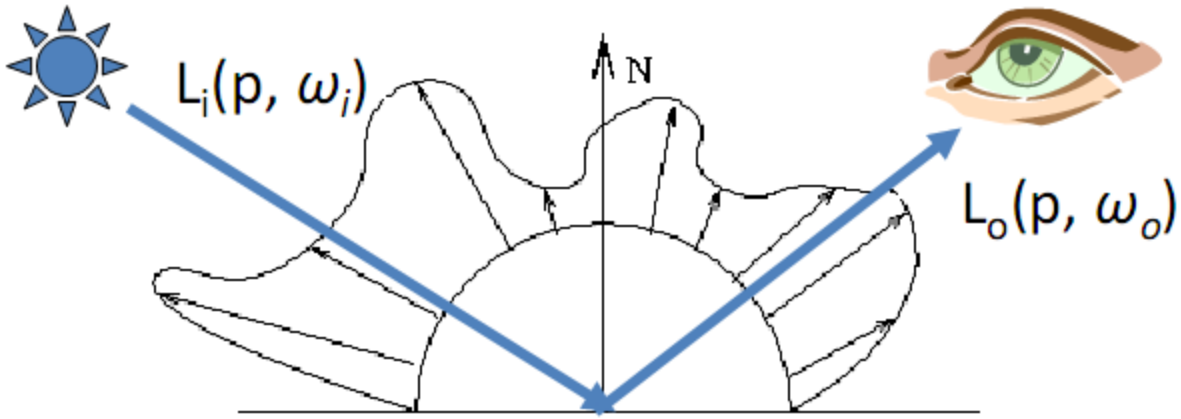
Как только свет достигает наших глаз, запускается процесс восприятия – определяется, что мы видим на сцене

Более формально: источник, наблюдатель, рассчитать энергию



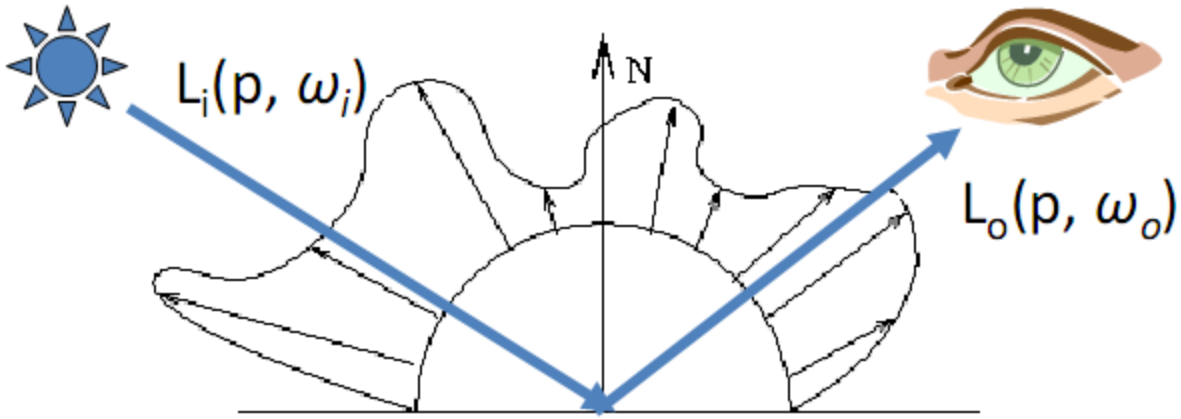
Задача – рассчитать количество энергии, излучаемой в сторону наблюдателя при заданном входящем излучении

От чего зависит?



Чему равно излучение поверхности $L_o(p, \omega_o)$ в направлении ω_o при условии излучения $L_i(p, \omega_i)$ по направлению ω_i?

Двулучевая Функция Отражения (ДФО) — Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)



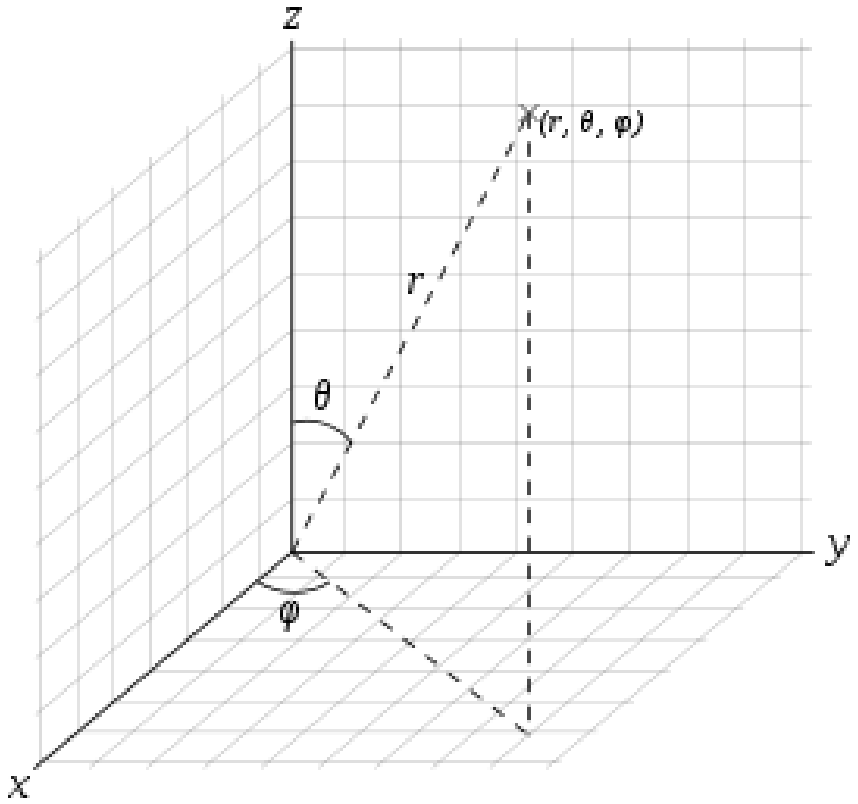
Bidirectional reflectance distribution function — BRDF — функция $f_r(\omega_i, \omega_o)$ **определяющая, как свет отражается от непрозрачной поверхности**.

Двулучевая Функция Отражения $f_r(\omega_i, \omega_o)$

Каждое направление ω само по себе зависит от:

- азимутального угла ϕ и
- зенитного угла θ (зенитный также называют полярным углом),

вследствие чего ДФО является функцией четырёх переменных.



Определение ДФОС (BRDF)

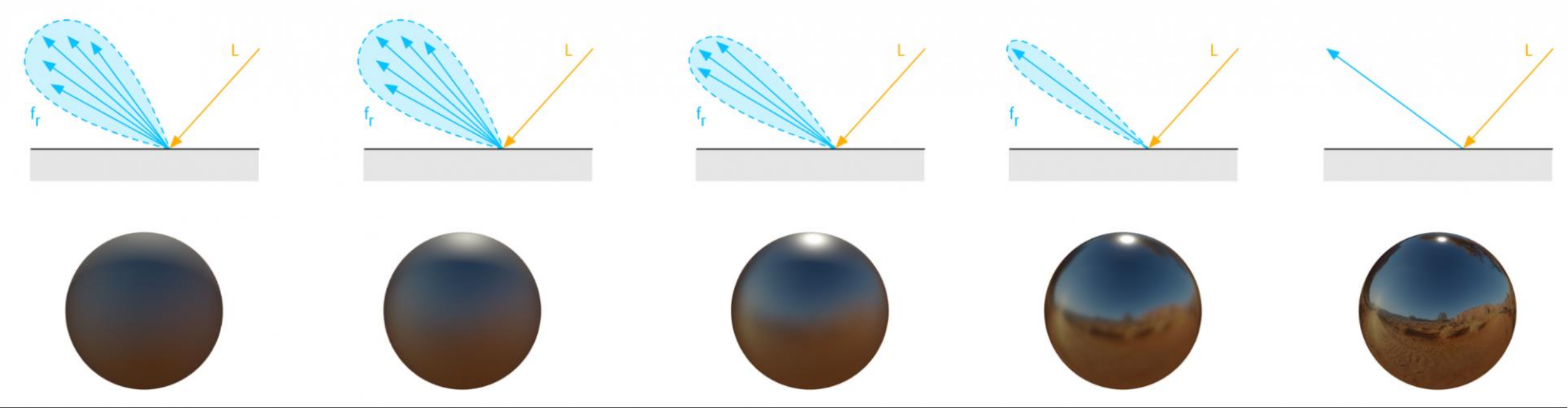
- Впервые ДФОС была определена Эдвардом Никодемусом в 1965 году. Современное определение данной функции таково:

$$f_{\mathrm{r}}(\omega_{\mathrm{i}},\, \omega_{\mathrm{r}}) \;=\; \frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{r}}(\omega_{\mathrm{r}})}{\mathrm{d}E_{\mathrm{i}}(\omega_{\mathrm{i}})}$$

где L— яркость, E — освещённость

фактически показывает отношение падающего и исходящего света с учетом направления падения и свойств материала

Как функция влияет на внешний вид



Более подробно о BRDF

Bidirectional Reflectance Distribution Function — двулучевая функция распределения света, наиболее общий способ представления **отражающих свойств поверхности** материала (без учета внутреннего рассеивания).

BRDF для каждой точки поверхности объекта определяет коэффициент переноса энергии между любой парой направлений (направление падения и направление отражения) в этой точке.

В общем случае она **зависит от свойств материала, длины волны** (то есть, цвета) **падающего света, его поляризации** и т.п.

Каждой модели освещения своя функция DRDF

BRDF аппроксимирует, насколько каждый отдельный **световой луч вносит вклад в конечный отраженный свет** непрозрачной поверхности с учетом свойств ее материала.

Например, если поверхность совершенно гладкая (почти как зеркало), функция BRDF вернет 0.0 для всех входящих световых лучей, за исключением одного.

Классы материалов

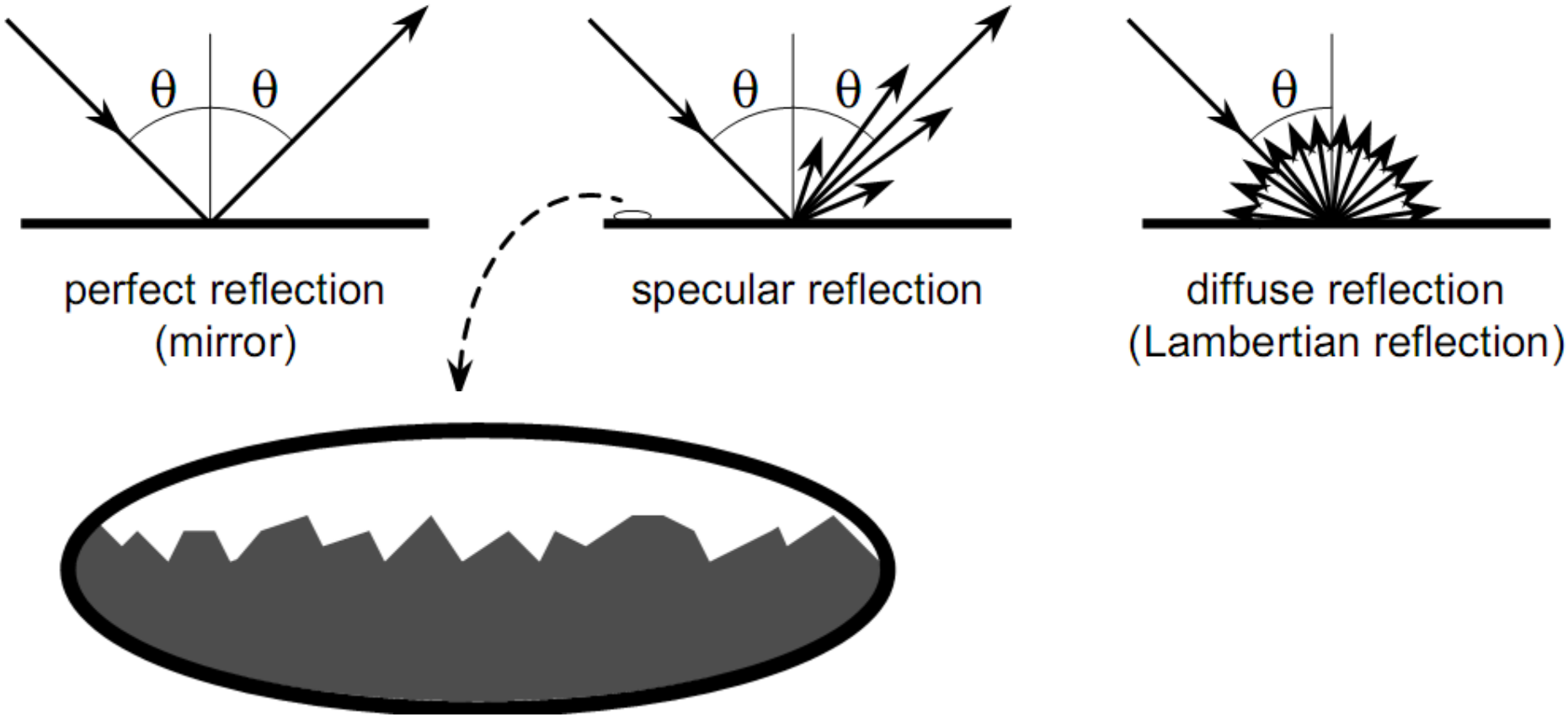
По способу взаимодействия с падающим лучом с точки зрения отражения можно условно классифицировать материалы на классы:

1) Материалы, обладающие **зеркальным** отражением (к ним близки зеркало, стекло, наблюдаемое под большим углом, глянцевые поверхности)

2) **Диффузные** материалы, т.е. материалы, не имеющие блика (материалы, близкие к диффузным: бумага, дерево, ткань с матовой краской)

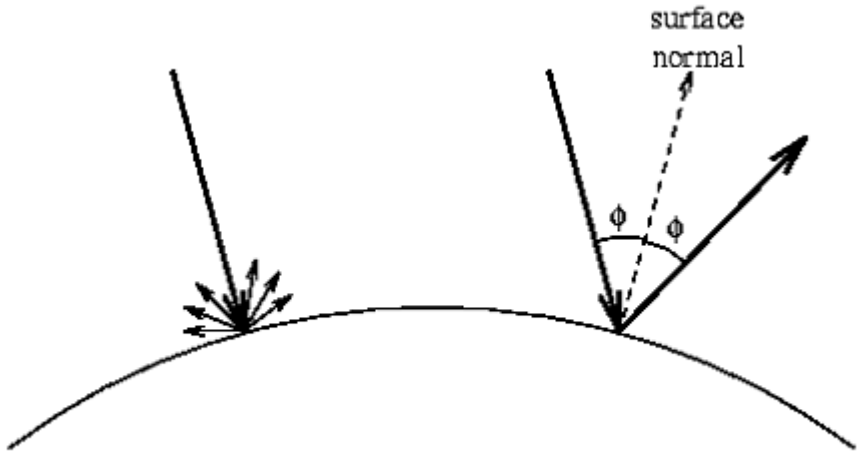
3) Материалы со **смешанным** типом отражения, имеющие и диффузную, и зеркальную составляющую (например, пластик)

Виды отражений



Отражения в моделях освещения

- Диффузное отражение
  - матовый пластик, дерево т.п.
  - модель Ламберта
- Идеально зеркальное отражение
  - зеркало
  - модель отражения
- Зеркальное отражение
  - блики на объекте
  - модели Фонга и Блинна

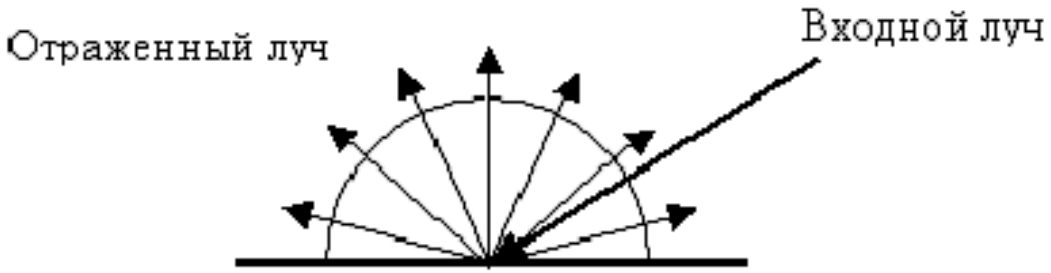


Модель Ламберта — диффузное отражение (diffuse)

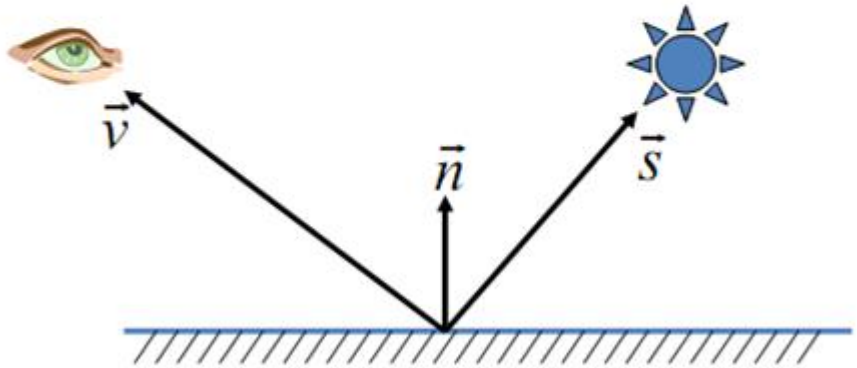
- Ламбертова (идеально диффузная) поверхность выглядит одинаково яркой со всех направлений
- В природе не существует, но есть близкие приближения
- Пример: бумага
- Свет рассеивается с одинаковой по всем направлениям интенсивностью.
- Матовая поверхность имеет свой цвет.
- Наблюдаемый цвет матовой поверхности определяется комбинацией собственного цвета поверхности и цвета излучения источника света.

Модель Ламберта учитывает только идеальное рассеивание света

ДФО константна определяет процент отражения для данной длины волны



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



Для одного источника света

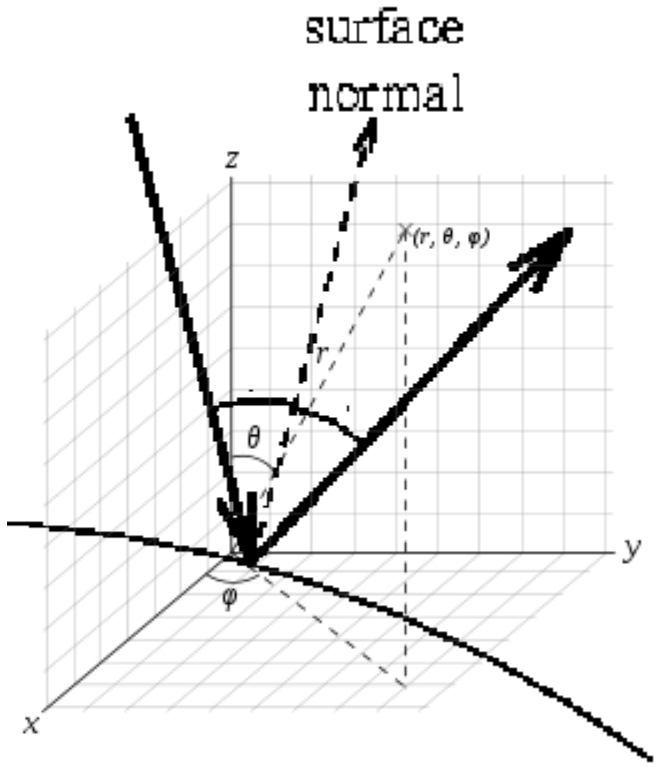
Идеально зеркальное отражение

- ДФО равно нулю везде, кроме

$$\theta_o = \theta_i$$
$$\phi_o = \phi_i + \pi$$

Дельта-функция от направления идеального отражения

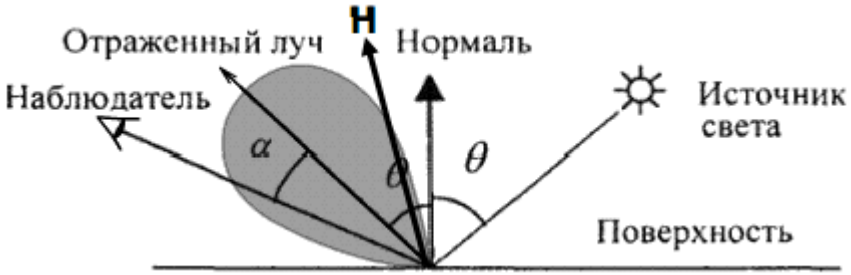
$$f_{rmirror} = \frac{\delta(\theta_i - \theta_o)\delta(\phi_i - \phi_o)}{\cos(\theta_i)}$$



Зеркальное отражение (specular)

Поверхность считается идеально зеркальной, если глубина её шероховатостей h << λ (длины волны отражаемого света ≅ 0.5 мкм). Собственный цвет у такой поверхности отсутствует.

Наиболее часто в качестве модели зеркального отражения используется эмпирическая модель Фонга (одна из простейших):

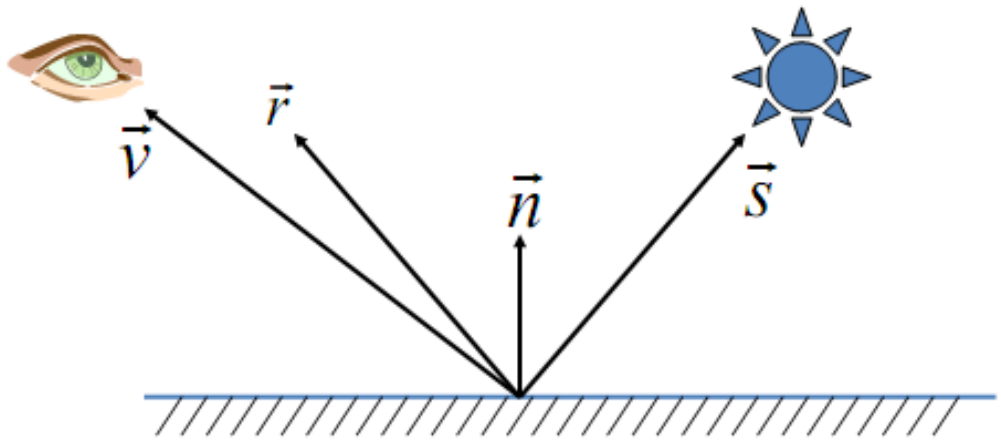


$$I_s = L_s \cdot k_s \cdot \cos^p(\alpha)$$

p, глянцевость (glossiness), зависит от качества полировки. Его малые значения (<100) соответствуют наиболее распространённым материалам с обычными оптическими свойствами, а значения в диапазоне от 100 до 500 соответствуют отражению от большинства металлических поверхностей.

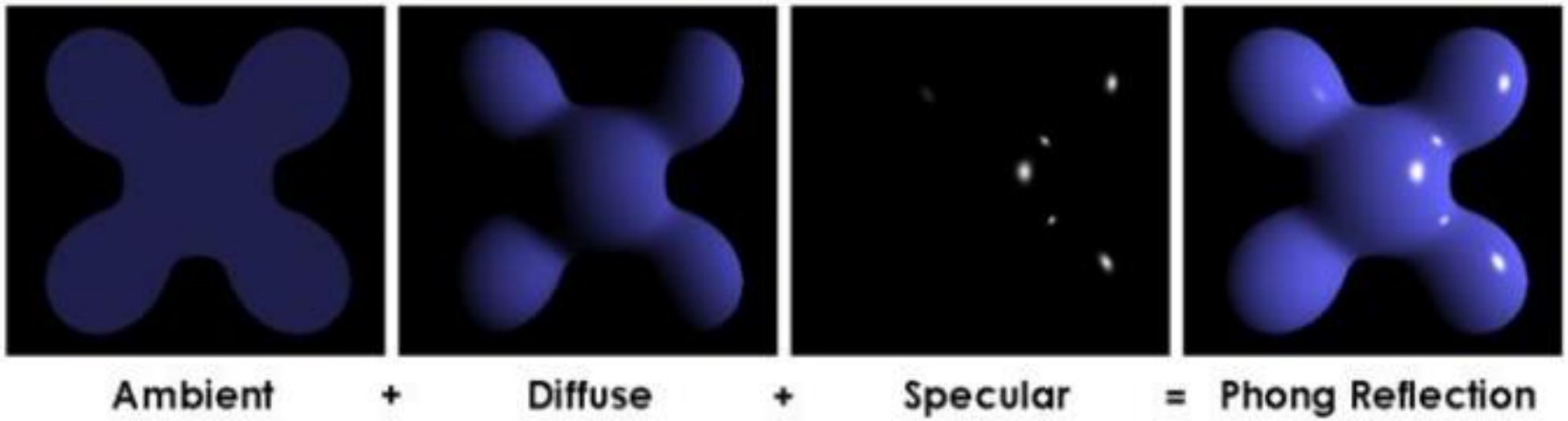
Модель Фонга

добавляет в модель Ламберта зеркальное отражение



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

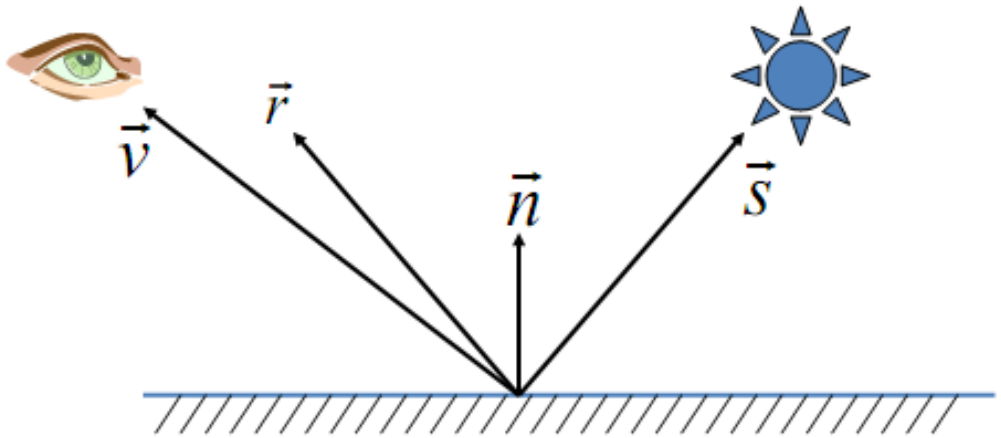
Составляющие модели освещённости



Теневая, диффузная и бликовая (зеркальная) составляющие модели Фонга.
Справа – сумма всех составляющих

Учёт ослабления в модели Фонга

$$I = \frac{1}{k_0 + k_1 d + k_2 d^2}(k_d L_d \cdot \cos\theta + k_s L_s \cdot \cos^p \alpha) + k_a L_a$$



Недочёты модели Фонга

Модель Фонга при определенных условиях может терять часть компоненты зеркальных бликов.

Это можно заметить при малых значениях силы блеска (shininess), когда область зеркального отражения становится довольно большой.

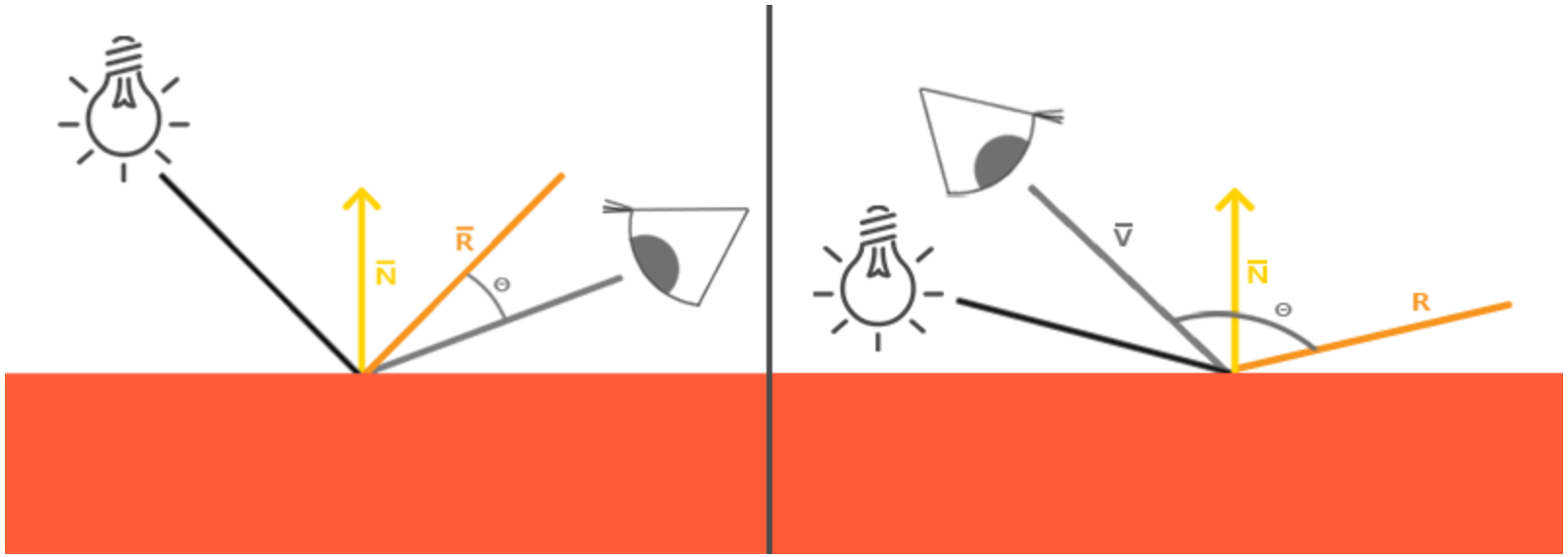
Сила зеркального блеска 1.0 для плоской текстурированной поверхности



Область зеркального отражения имеет резко очерченную границу.

Кто может объяснить?

Что же происходит?



Слева мы видим привычную нам картину Фонговского отражения с θ менее 90 градусов.

На правом рисунке угол θ между направлениями зрения и отражения больше 90 градусов, в результате чего вклад зеркального освещения аннулируется.

Теперь проблема становится очевидной.

Недочёты модели Фонга

Модель Фонга при определенных условиях может терять часть компоненты зеркальных бликов.

Это можно заметить при малых значениях силы блеска (shininess), когда область зеркального отражения становится довольно большой.

Сила зеркального блеска 1.0 для плоской текстурированной поверхности



Область зеркального отражения имеет резко очерченную границу.

Это происходит потому что угол между вектором обзора и вектором отражения не должен превышать 90 градусов, иначе их скалярное произведение становится отрицательным, что делает компоненту зеркальных бликов равной нулю.

Модель Фонга

- Имеет неприятные особенности, но все равно очень широко применяется
  - Не является обратимой
  - Не сохраняет энергию
- Является полностью эмпирической и не используется в серьезных движках для синтеза изображений.
- Реализацию модели Фонга можно найти в библиотеке OpenGL

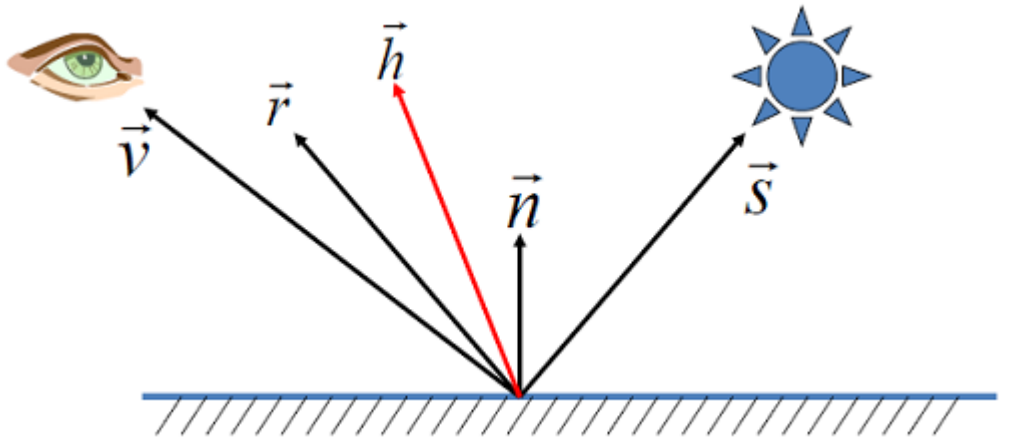
Модель Блинна-Фонга

- Это модификация модели Фонга, принципиальной разницы между двумя этими моделями нет.

$$L_O = L_i(k_d(s,n) + k_s(r,v)^{k_l})$$

$$L_O = L_i(k_d(s,n) + k_s(h,n)^{k_l})$$

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



Данная аппроксимация позволяет в ряде случае упростить вычисления.

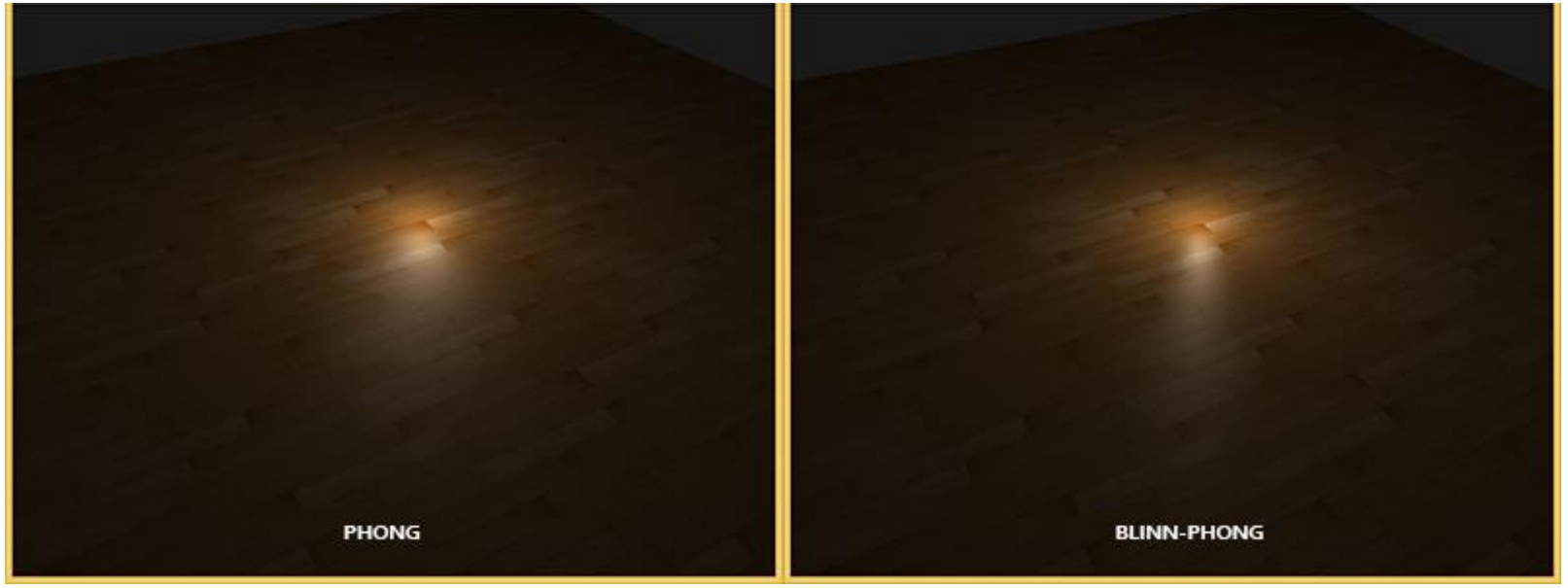
Именно модель освещения Блинна-Фонга использовалась в более раннем, фиксированном конвейере OpenGL.

Сравните



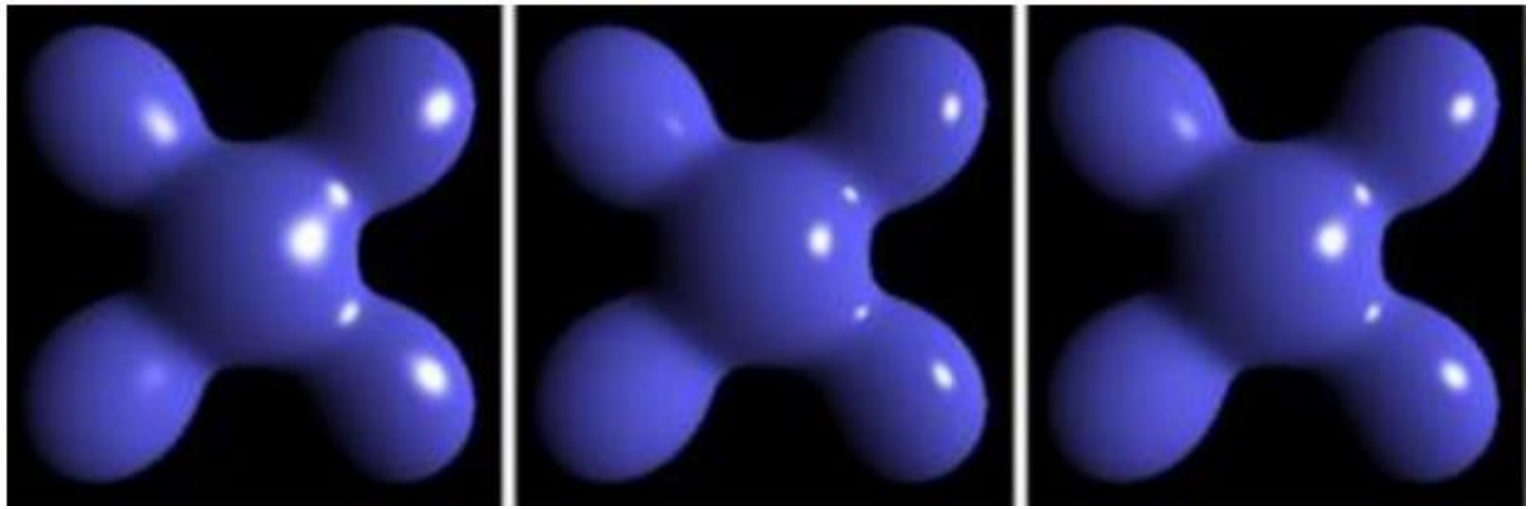
Ещё одно различие между моделями Фонга и Блинна-Фонга

Еще одно небольшое различие между моделями Фонга и Блинна-Фонга заключается в том, что угол между медианным вектором и нормалью к поверхности часто меньше угла между векторами обзора и отражения.



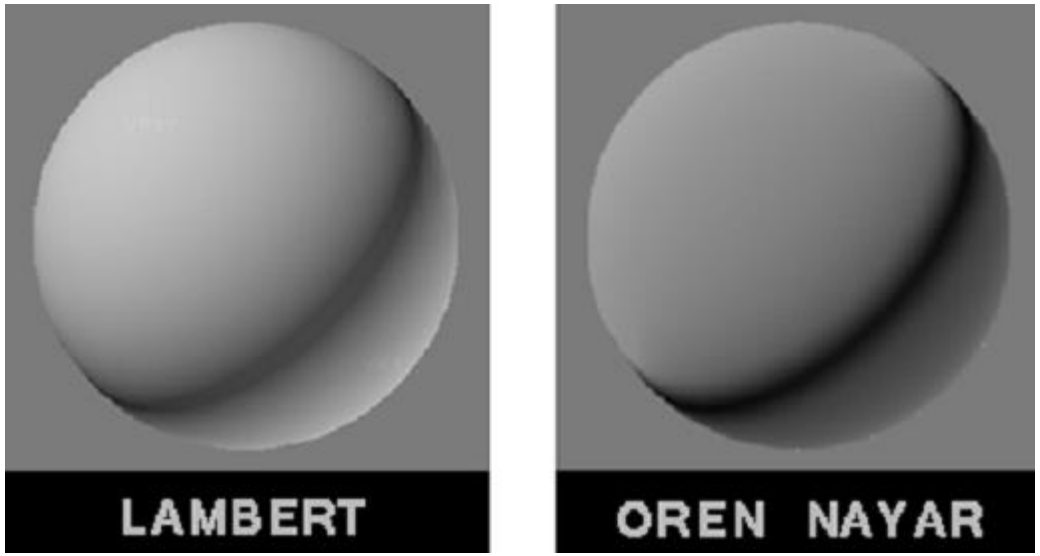
Поэтому, чтобы получить аналогичные модели Фонга результаты, значение силы зеркального блеска должно быть немного выше. Эмпирически установлено, что оно где-то в 2-4 раза больше по сравнению с моделью Фонга.
Сравнение зеркальной компоненты между моделями с силой зеркального блеска равной 8 для модели Фонга и 32 для модели Блинна-Фонга

Применение модели освещения Блинна-Фонга вместо модели Фонга **непринципиально** изменяет результат



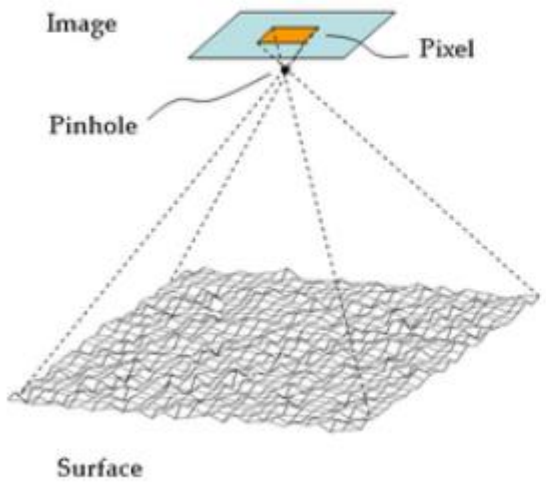
Слева – результат применения модели Блинна-Фонга,
посередине – результат применения модели Фонга,
справа – модель Блинна-Фонга с меньшей, чем у левого изображения,степенью.

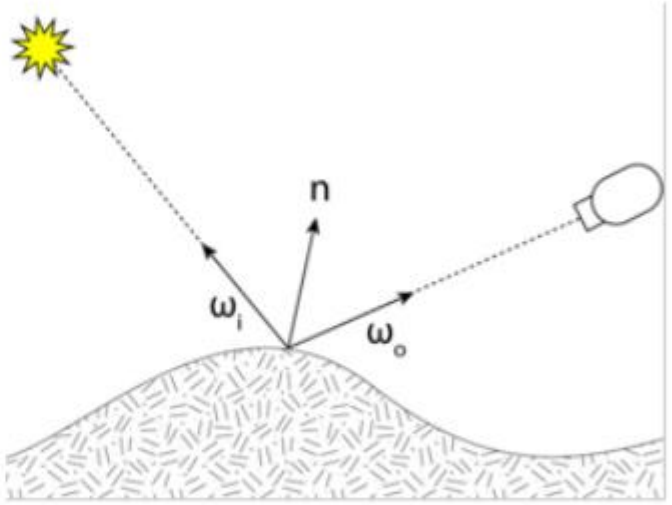
Модель Ламберта – Модель Орен-Найара

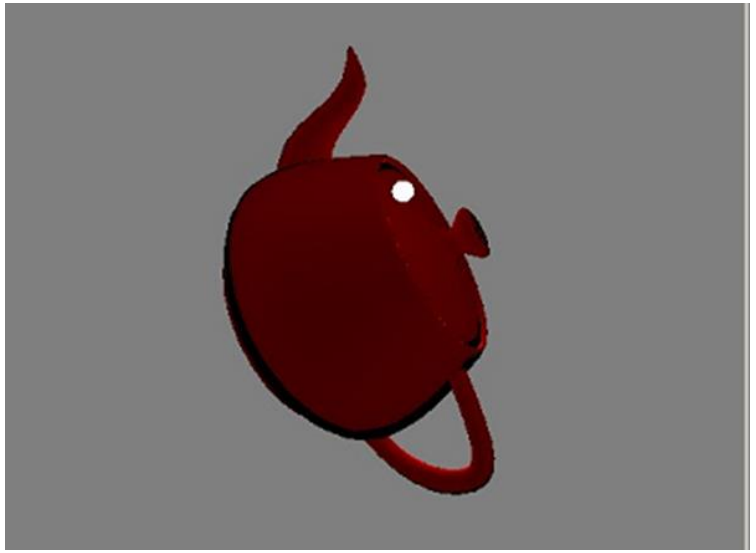


Цвет шершавых поверхностей – **для подповерхностного отражения**.
Модель имеет параметр для контроля шершавости поверхности. Он определяет, сколько света отразится назад в направлении источника света, что является характеристикой «шершавой» (запыленной) поверхности.
Чем более шершавая поверхность, тем менее отчетливым является диффузное отражение.
Шершавая поверхность рассеивает свет во всех направлениях, но абсолютно неравномерно.
Поэтому Орен-Найар – это упрощенное представление реальности.

Модель Орен-Найара







Шершавость не значит реально шершавый (как наждачная бумага, к примеру), речь скорее идет о малюсеньких выступах (микроструктуре) на поверхности

Шершавой считается поверхность кожи и бархата из-за наличия очень мелких деталей, таких как поры кожи и волокна бархата.
К примеру, поверхность пластика не такая шершавая, а резина, камень, ржавчина значительно грубее (шершавее) кожи или бархата.

Модель Кука-Торранса (Cook-Torrance)

- Модель для зеркальных бликов на поверхностях с микрогранями.

Металлический заяц



Модель освещения Cel (toon) shading

Тип нефотореалистичного рендеринга, результатом которого является компьютерное изображение, в некоторой мере имитирующее результат рисования вручную.

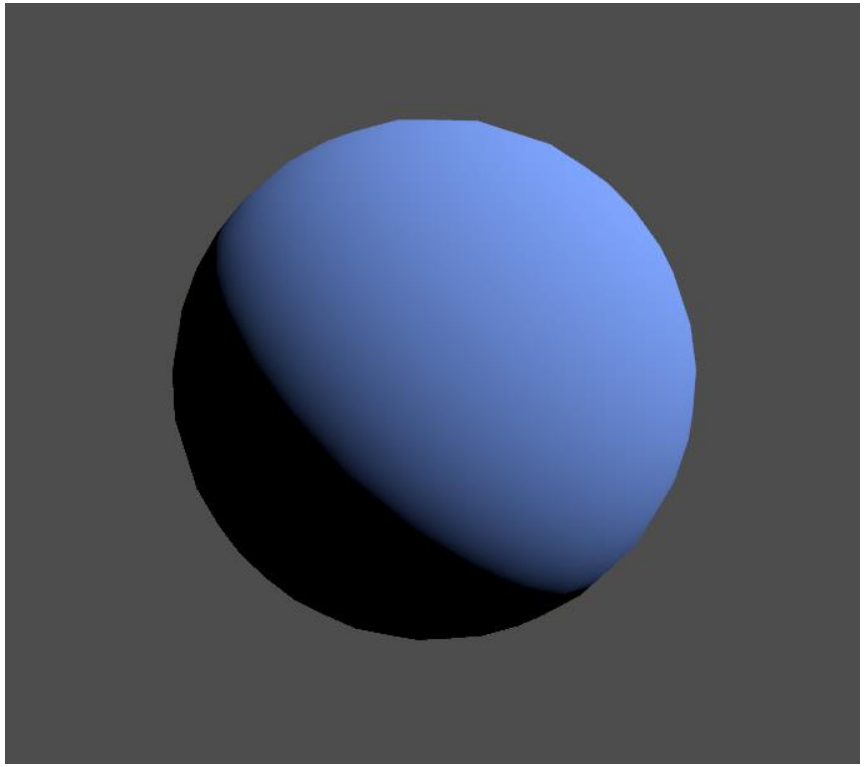
Cel — сокращение от celluloid (целлулоид — из этого материала делаются прозрачные листы, на которых рисуется традиционная мультипликация).

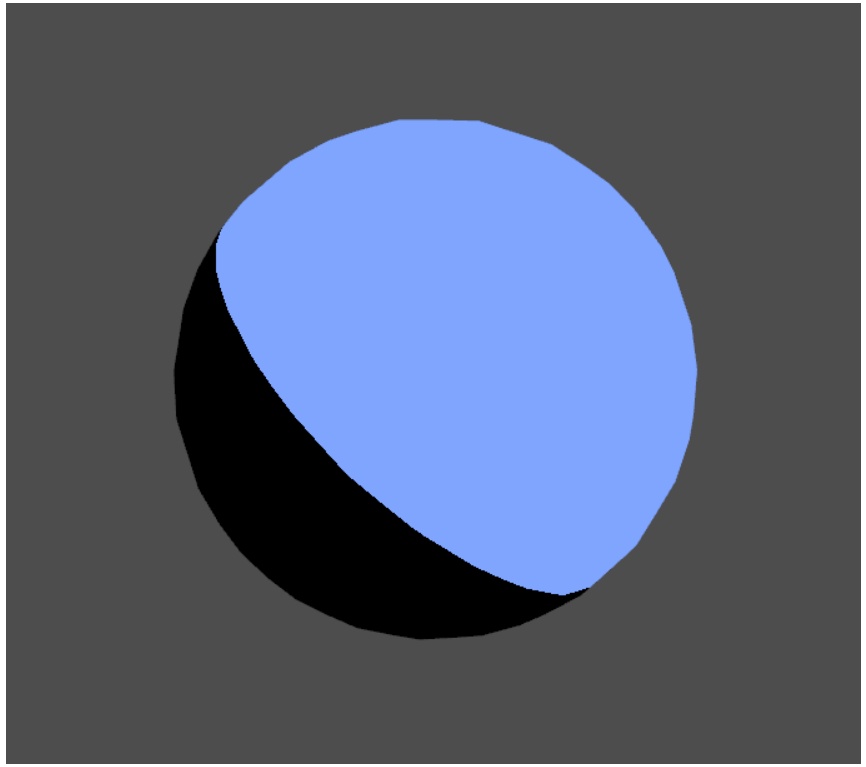
Такой тип рендеринга часто используется для одушевления комиксов, для которых характерны жёсткие контуры, ограниченное число цветов, неплавные переходы светотени.

Википедия



Cel (toon) shading только для диффузного освещения





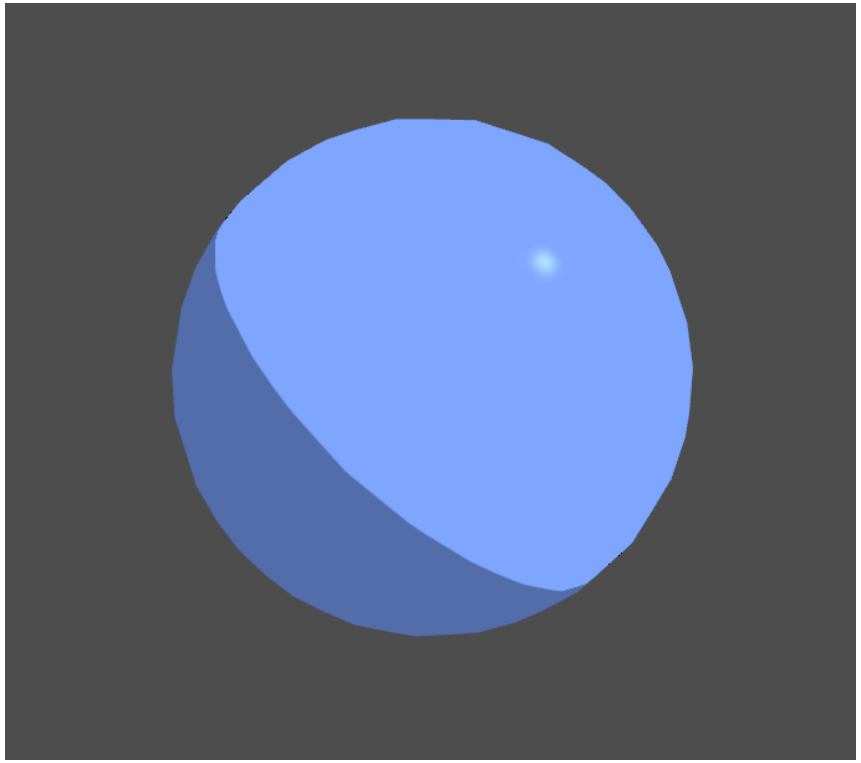
Пример реализации диффузного отражения

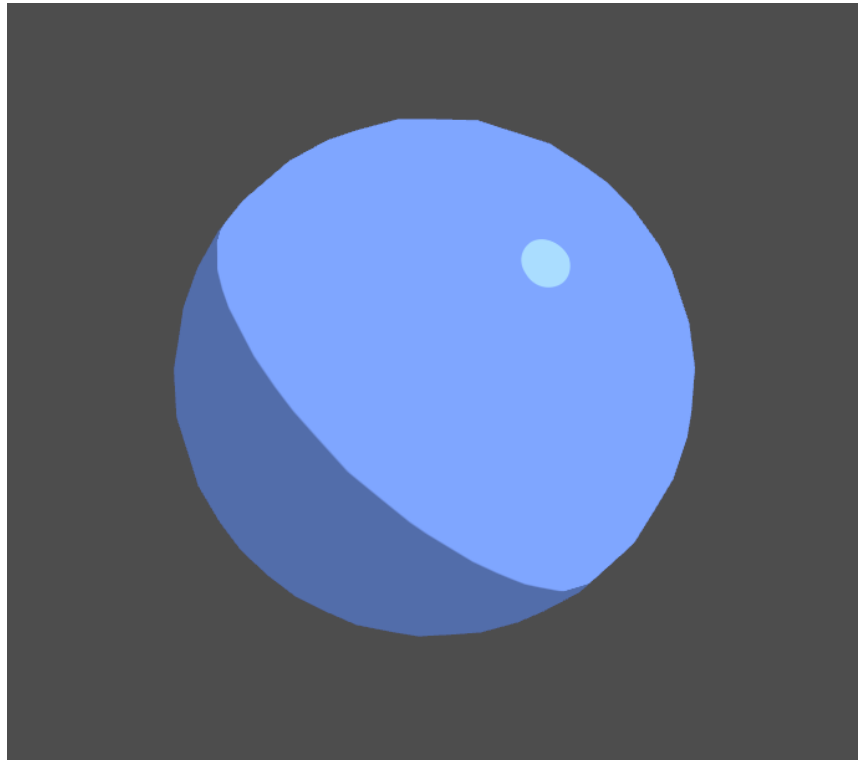
```
. . .
vec 3   n2 = normalize(n);
vec 3   l2 = normalize(l);
float   diff = 0.2 + max(dot(n2,l2),0.0);

if (diff < 0.4)
   clr = diffColor∗0.3;
else if (diff < 0.7)
   clr = diffColor;
else
  clr = diffColor∗1.3;
gl_FragColor = clr;
```

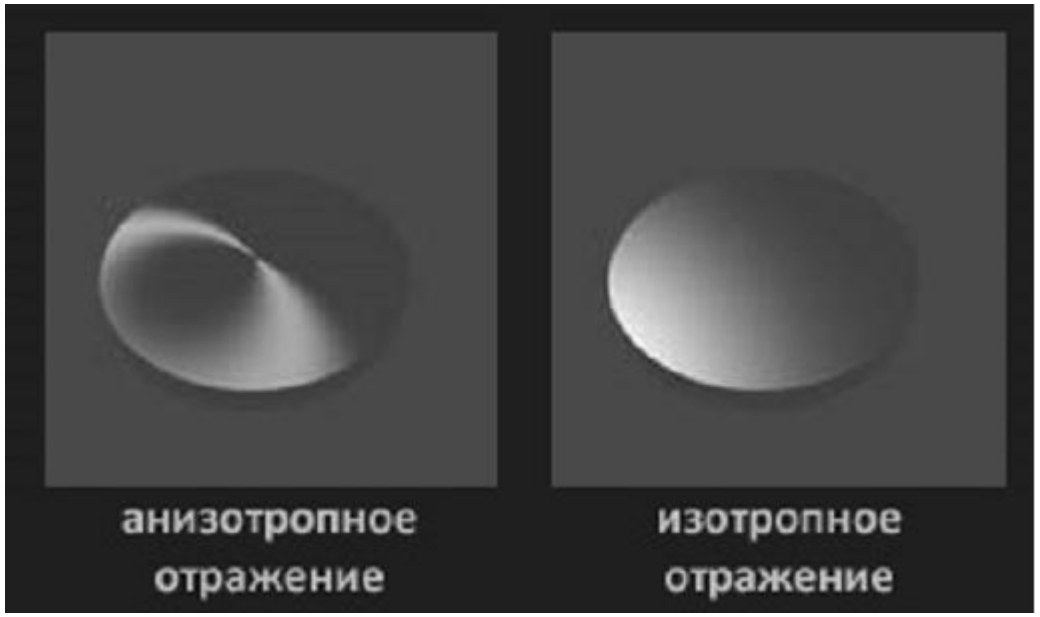


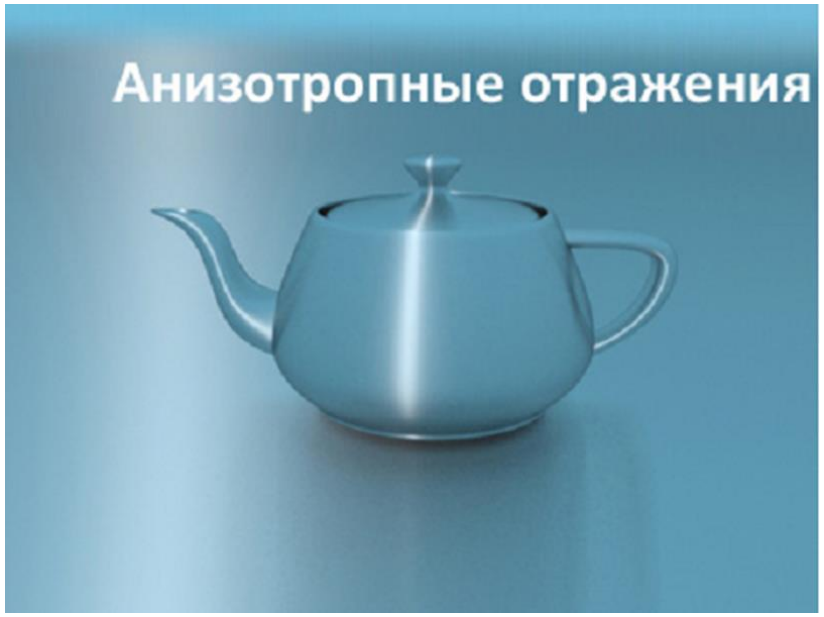
Cel (toon) shading: диффузное + зеркальное





Анизотропные модели





Фотореалистичное изображение, созданное POV-Ray 3.6 (Persistence of Vision Raytracer)



Программа трассировки лучей, доступная для множества компьютерных платформ.
Первоначально основана на DKBTrace, написанном Дэвидом Керком Баком и Аароном А. Коллинзом.
Также имело место влияние раннего трассировщика лучей Polyray, привнесённое его автором Александром Энзманном.

План

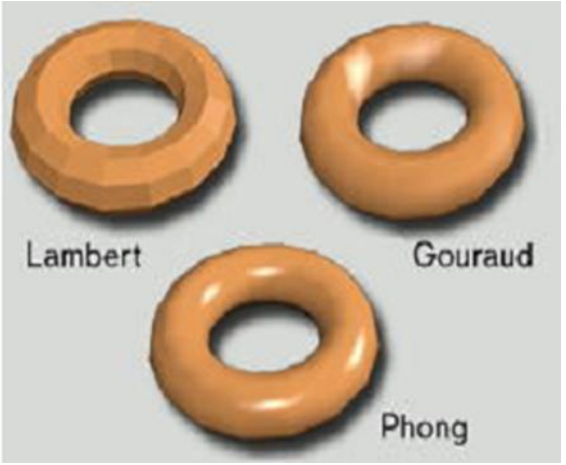
- Растеризация
- Освещение
- Шейдинг (затенение)
- Текстурирование

Вычисление цвета материала: считаем в каждом пикселе или нет?

- Варианты:
  - Вычисление цвета для примитива (flat shading)
  - Вычисление на вершинах с последующей интерполяцией (vertex shading)
  - Вычисление цвета по модели освещения для каждого пикселя (per-pixel shading)

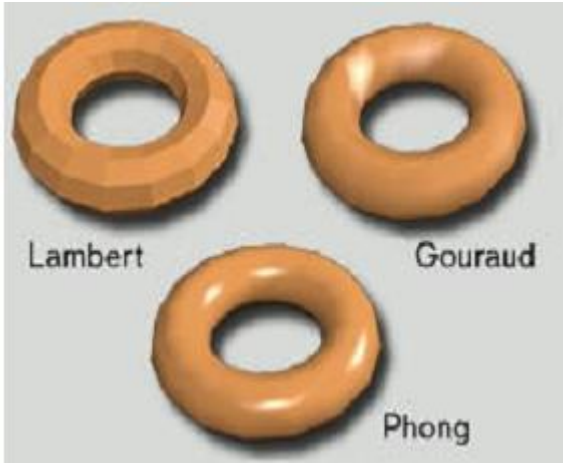
- Повершинное тонирование требует интерполяционной закраски

- Попиксельное тоже требует интерполяции, но нормалей



Закрашивание (Shading)

- Плоское закрашивание (по Ламберту)
- Закрашивание по Гуро
- Закрашивание по Фонгу





Рендеринг объектов по методу Гуро

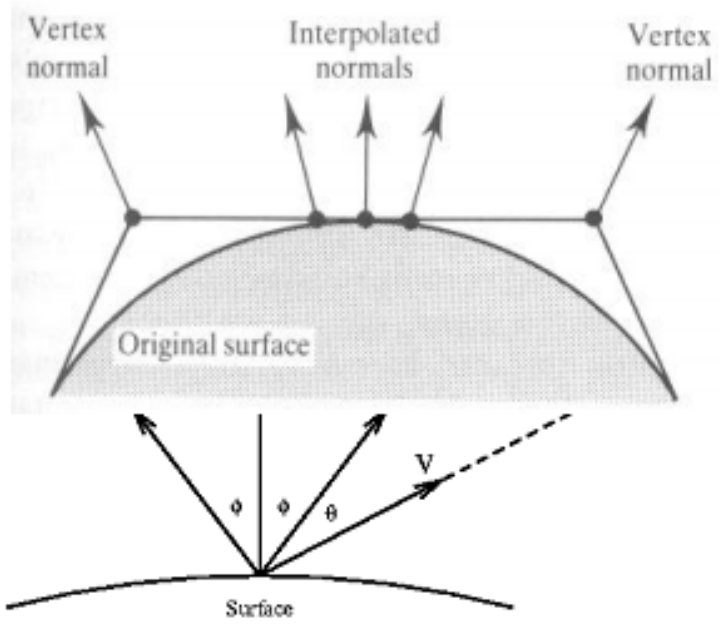


Cinema 4D или сокращённо **C4D** фирмы MAXON

Генерация цвета пикселя: нужна интерполяция, либо цвета, либо нормалей

Закраска Фонга (пописельное)

- Расчет нормалей в вершинах
- Линейная интерполяция нормалей по треугольнику
- Расчет цвета по формуле Фонга (или другой)

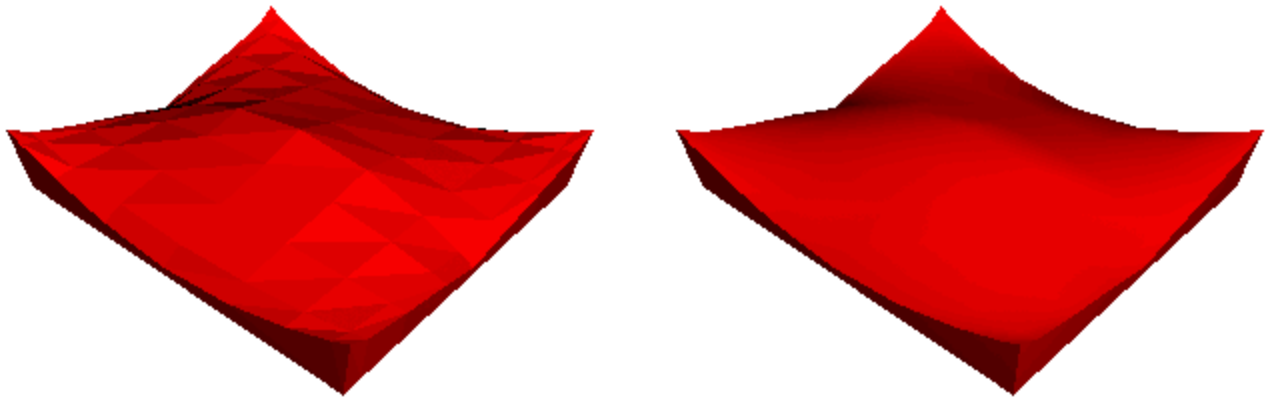


$$I_r = I_{pr} k_s (\cos\theta)^n \qquad I_g = I_{pg} k_s (\cos\theta)^n \qquad I_b = I_{pb} k_s (\cos\theta)^n$$

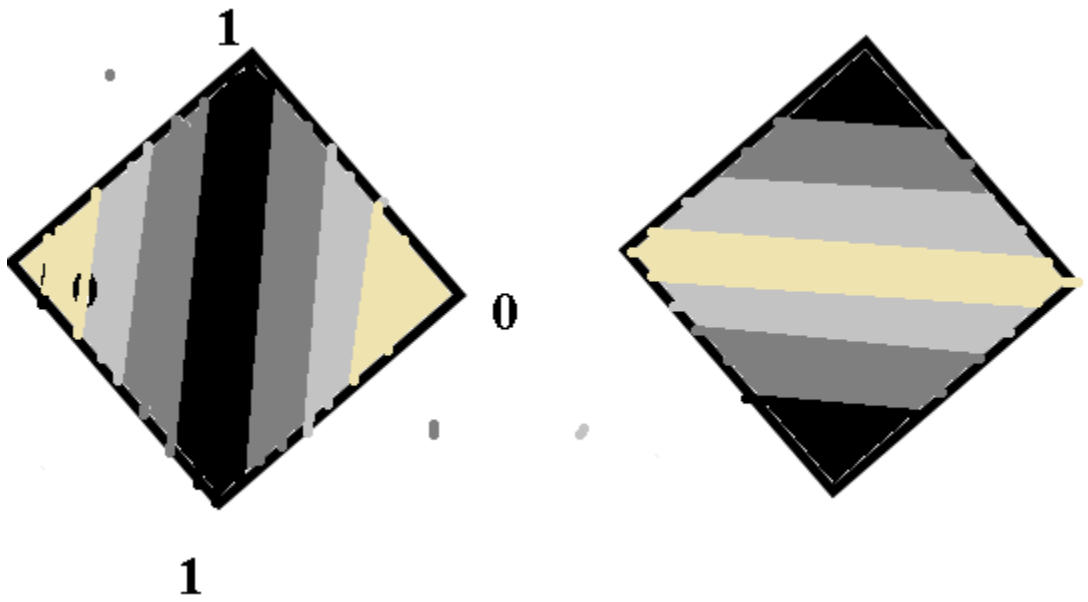
Закраска Гуро (повершинное)

- Расчет цвета в вершинах
- Линейная интерполяция цвета

Затенение по Гуро (Gourad Shading) 1971 год



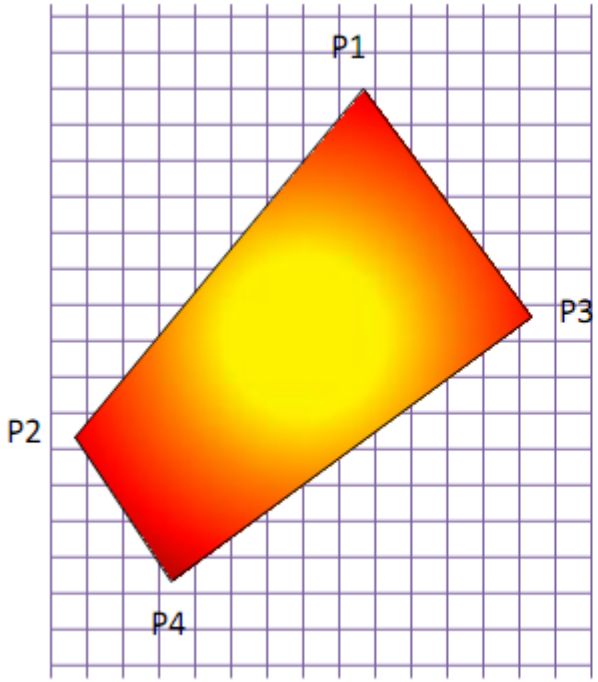
Проблемы шейдинга Гуро



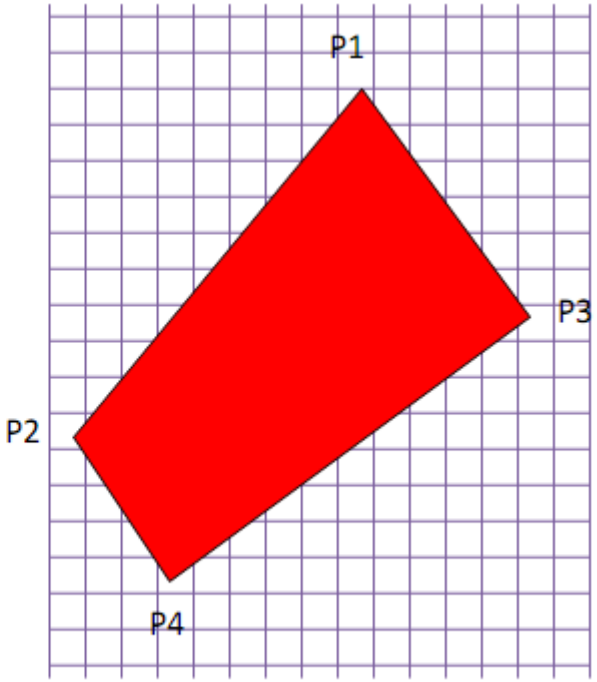
Вопрос

- Представьте себе — вы имеете большой полигон, освещенный единственным источником света, расположенным в центре полигона.
- Освещенность, создаваемая источником света в вершинах полигона, будет очень малой ввиду значительной удаленности от источника света.
- Что мы увидим?

Проблемы закраски Гуро – можно пропустить блики



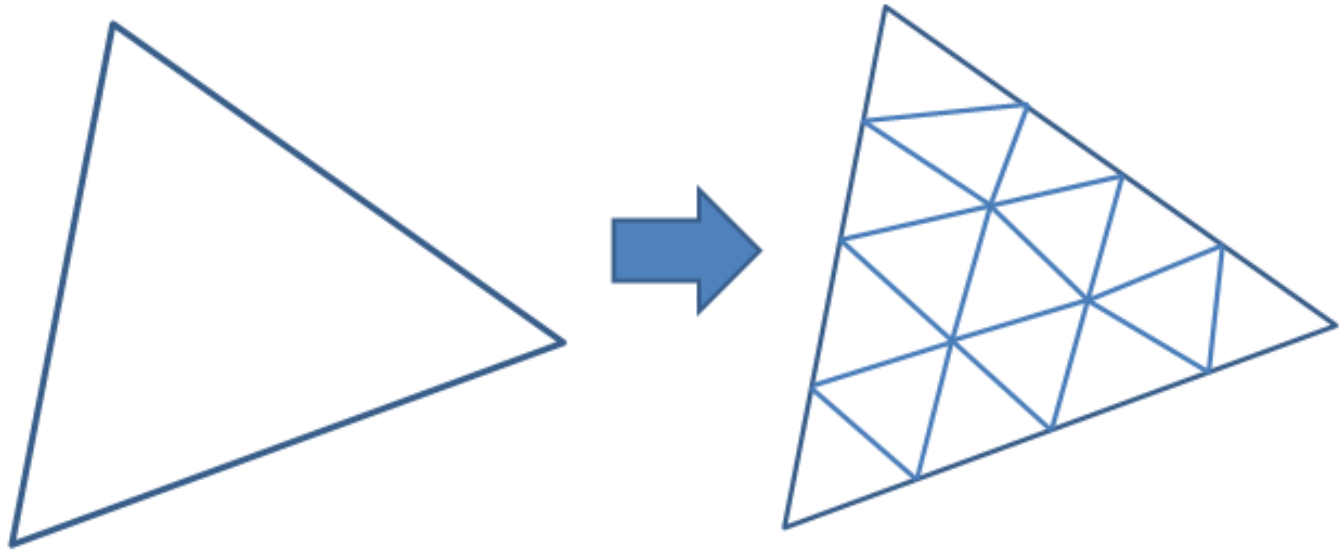
Фонг



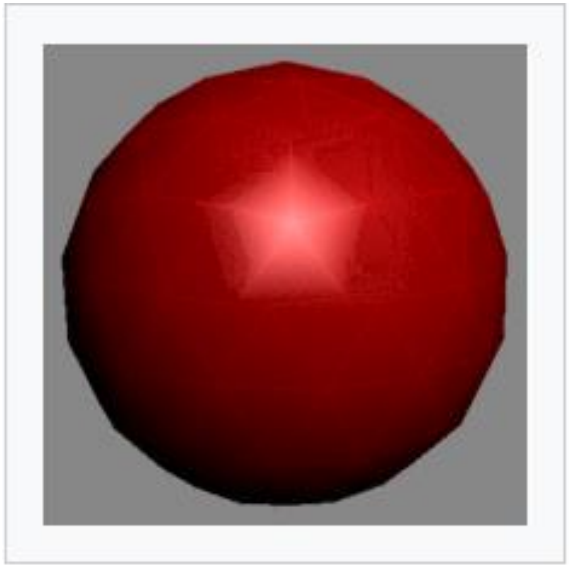
Гуро

Решение проблемы закраски Гуро: подразбиение полигонов

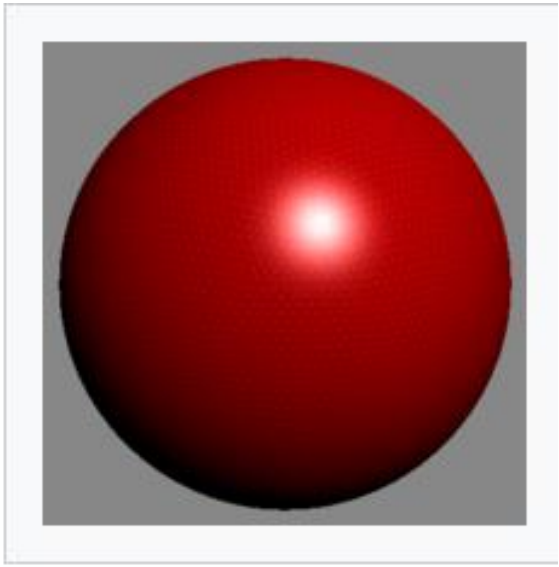
Увеличивает сложность геометрии



Метод тонирования Гуро



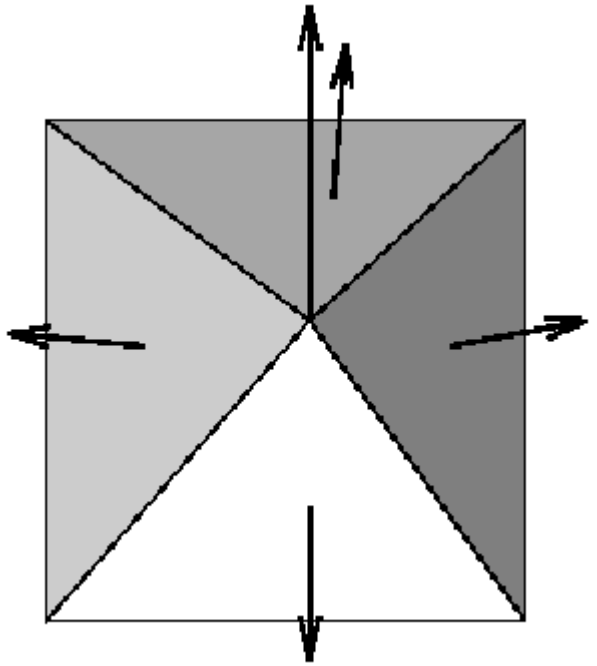
Сфера, тонированная по Гуро (малое количество граней)



Она же, но со значительно большим количеством граней.

Вычисление нормалей в вершинах

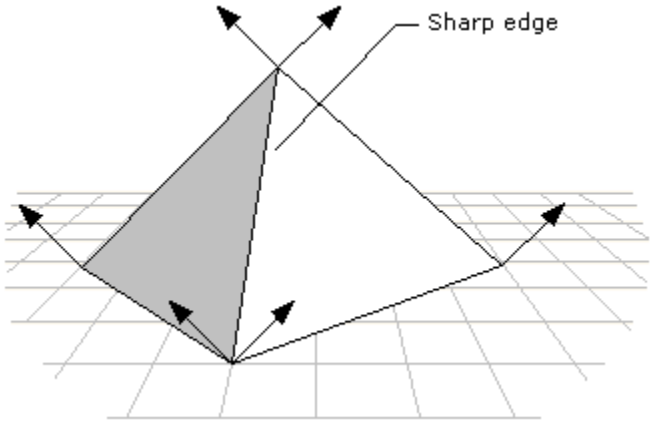
Нормали в вершинах вычисляются усреднением нормалей смежных граней

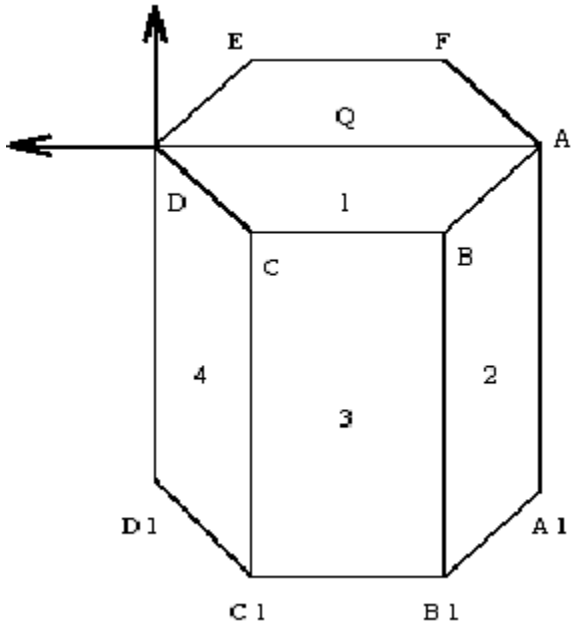


Для корректной закраски на стыках поверхности необходимо «клонирование» вершин

- В вершине D нужно иметь две нормали:
  - Одна нормаль для гладкой закраски боковой поверхности
  - Другая нормаль для закраски торца

- На острых ребрах нормали дублируются





Зеркальное (specular) отражение: Гуро и Фонга

