

# Локальные и глобальные модели освещения. Модель Фонга. Закраска Фонга и Гуро

Алексей Викторович Игнатенко  
Лаборатория компьютерной графики и  
мультимедиа  
ВМК МГУ

# Лекция посвящена моделированию освещения и освещению в OpenGL

Моделирование освещения. ДФО

Локальные и глобальные модели.  
Модель Фонга

Растеризация. Закраска Фонга и Гуро

Освещение в OpenGL

# Графический процесс: типовая последовательность применения алгоритмов



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

---

Фотореализм включает в себя два элемента:

- Качественная геометрическая модель
- Хорошая физическая модель освещения

Модель освещения включает в себя отражения, преломления света, тени, текстуры и т.п.

Моделировать освещение очень важно, т.к. на основе освещения мы воспринимаем форму объектов

---

Глаз воспринимает освещение и «реконструирует» трехмерную форму

Моделирование освещения – ключевой элемент фотореализма

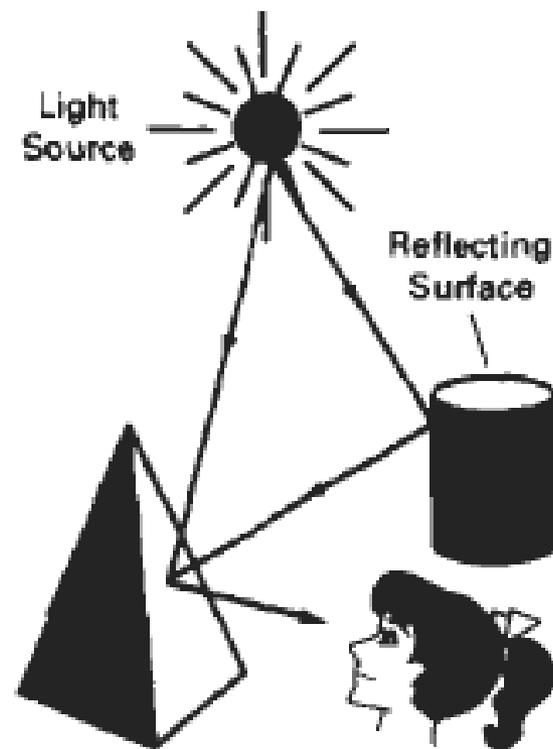
# Источники света: первичные и вторичные

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

Две категории:

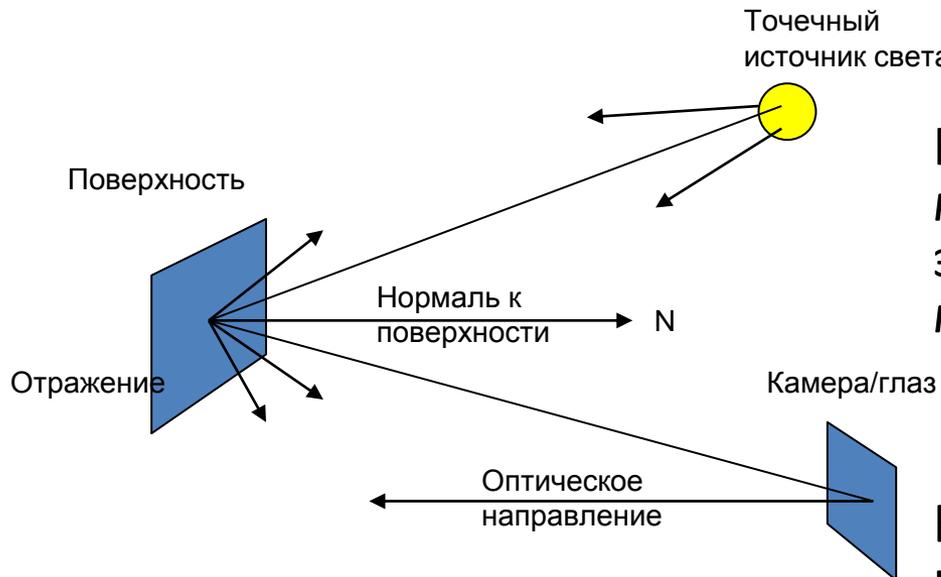
- Светоиспускающие источники = первичные источники
- Светотражающие источники = вторичные источники

Поверхность, не освещаемая источником света, все равно может быть видима!



# Суть задачи: моделирование переноса световой энергии

Моделирование процессов из физики и физиологии



Необходимо разработать модель передачи электромагнитной энергии между объектами

Как только свет достигает наших глаз, запускается процесс восприятия

- определяет, что мы «видим» в сцене

# Нужно рассчитать количество и распределение энергии на чувствительных элементах

---

В реальном мире видимый цвет определяется количеством энергии видимого спектра, которая попадает на чувствительные элементы сетчатки глаза

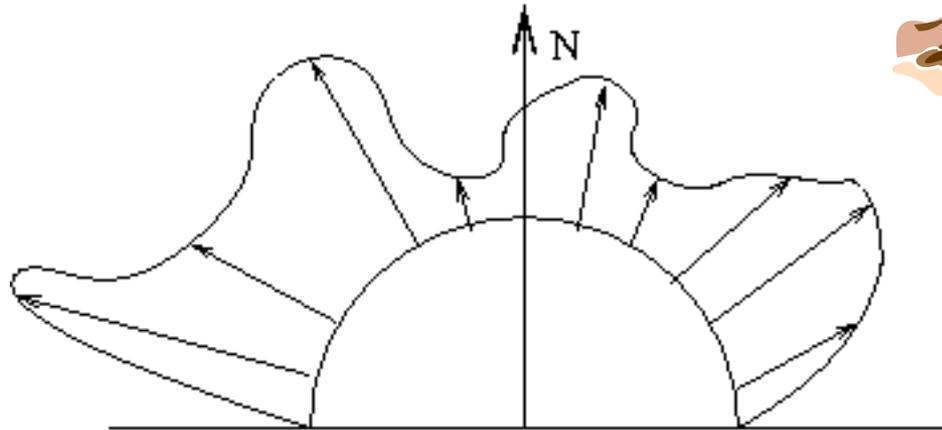
Как правило, мы видим отраженный свет

Отражающие характеристики поверхности определяются отражающими способностями по отношению к волнам различной длины

# Более формально: источник, наблюдатель, рассчитать отражение

---

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

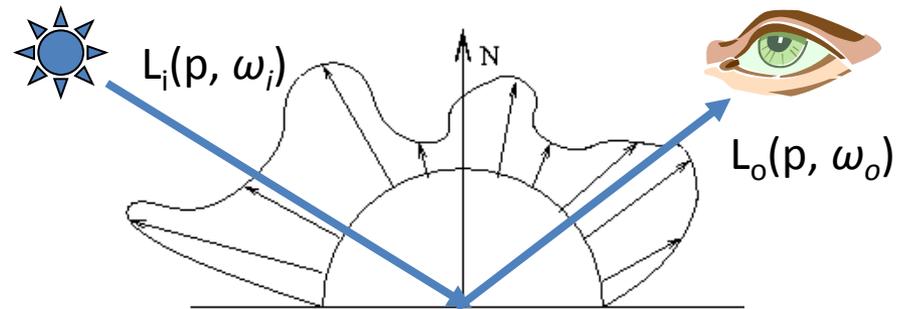


# Двулучевая Функция Отражения (ДФО): определение

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

Определяется с помощью ДФО

- BRDF = Bidirectional Reflection Distribution Function
- ДФО = Двулучевая функция отражения



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

В заданном направлении излучается энергия, пропорциональная освещенности

Рассмотрим дифференциальную освещенность поверхности в точке  $p$ :



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

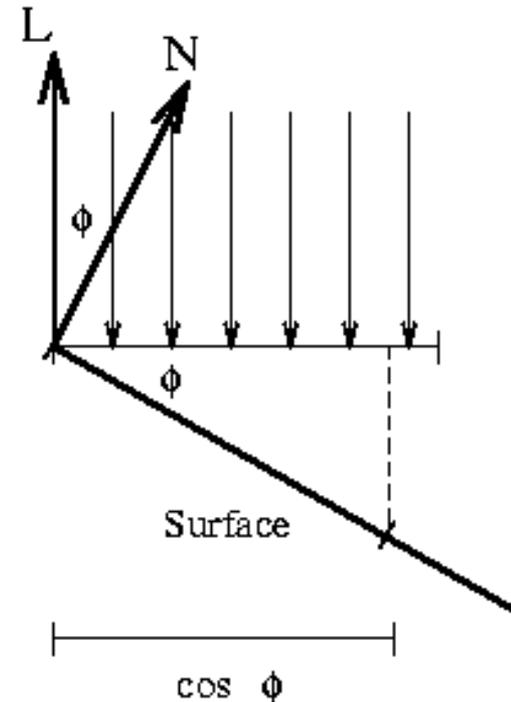
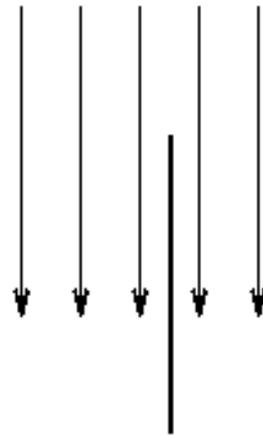
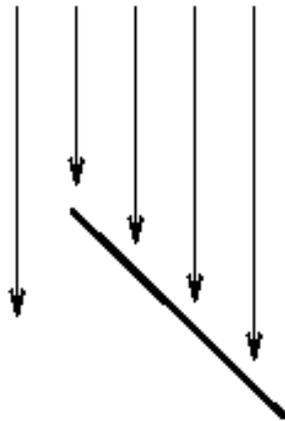
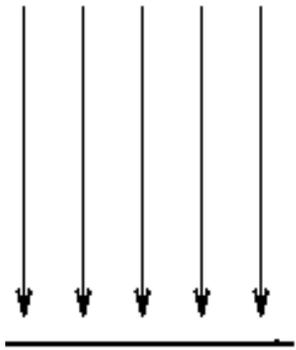
В направлении  $\omega_0$  будет излучаться

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

Из предположения линейности и сохранения энергии

# Освещенность пропорциональна площади распределения потока света от источника

---



Появляется косинус!

Вывод определения ДФО: фактически отношение падающего и исходящего света с учетом направления падения

---

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

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



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

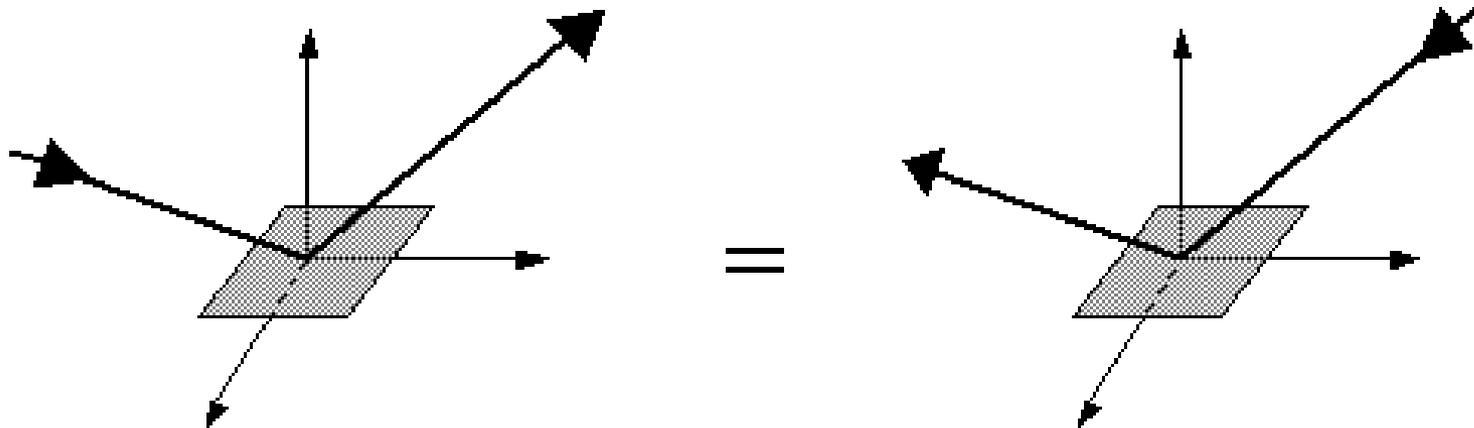


ДФО

# Свойство ДФО: обратимость

---

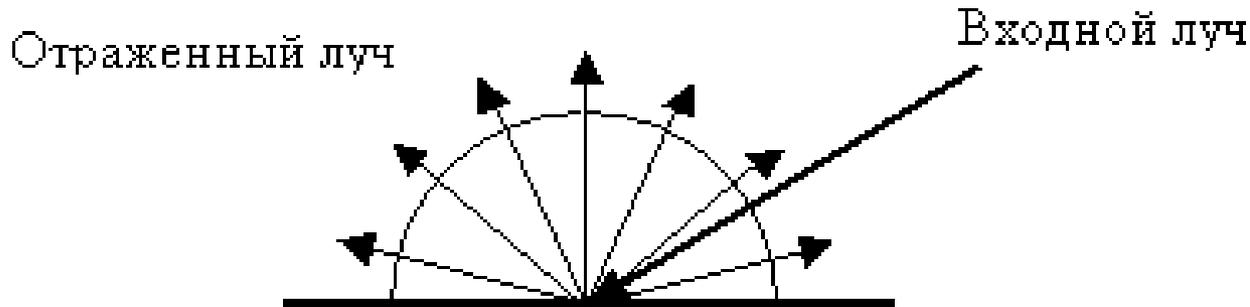
$$\forall \omega_o, \omega_i \quad f_r(p, \omega_o, \omega_i) = f_r(p, \omega_i, \omega_o)$$



# Свойство ДФО: сохранение энергии

---

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



# Расчет излучения точки поверхности через интегрирование по всем входящим направлениям

Для каждой длины волны!

Здесь учитываем только отражение

$$L(p, \omega_o) = \int_{\Omega} L_{o \text{ due to } i}(p, \omega_o, \omega_i) d\omega_i$$

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

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

Интеграл освещенности

# Расчет излучения точки поверхности: дискретный случай

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



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

$\omega_i^j$  - Направление на j-й источник света

$\theta_i^j$  - Угол между направлением на j-й источник и нормалью к поверхности

# Лекция посвящена моделированию освещения и освещению в OpenGL

Моделирование освещения. ДФО

Локальные и глобальные модели.  
Модель Фонга

Растеризация. Закраска Фонга и Гуро

Освещение в OpenGL

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

---

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



Такие взаимоотношения сложно учитывать



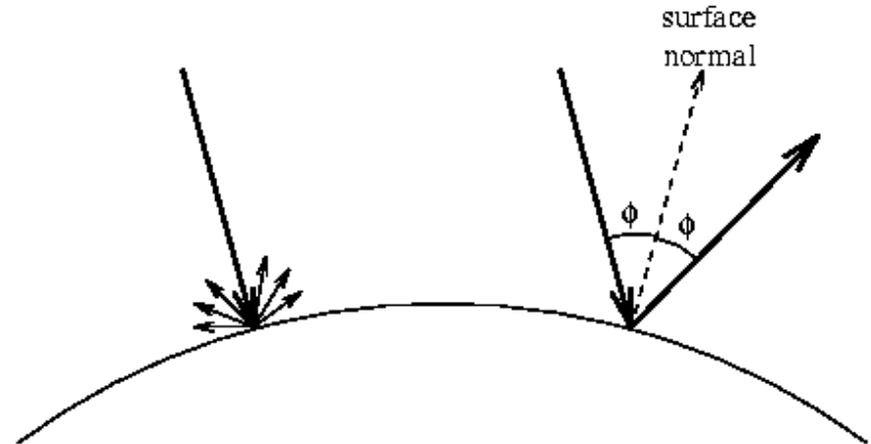
Выделяют локальные и глобальные модели освещения

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

# Можно упростить расчет модели, ограничив передаваемые свойства материалов

---

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



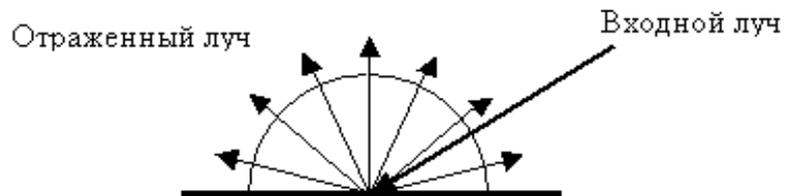
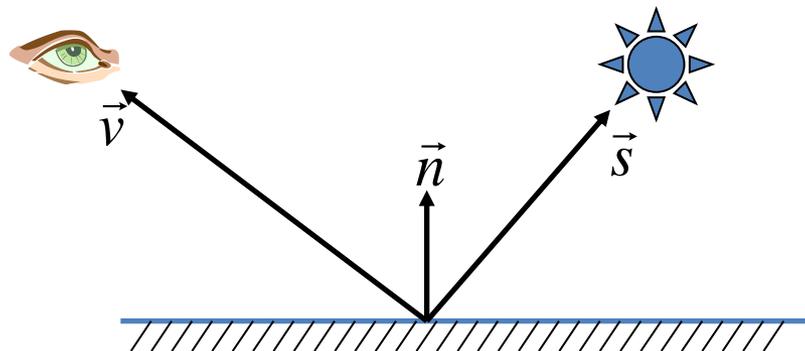
# Модель Ламберта учитывает только идеальное рассеивание света

Для одного источника света

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

ДФО константна всегда  
= C/Pi

– C определяет процент отражения для данной длины волны

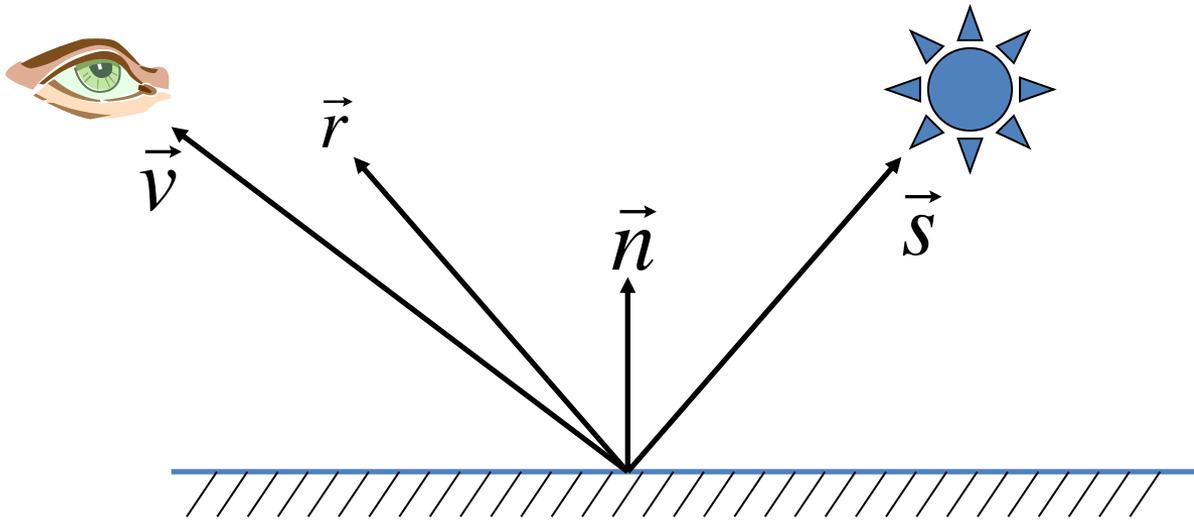


# Модель Фонга добавляет в модель Ламберта зеркальное отражение

---

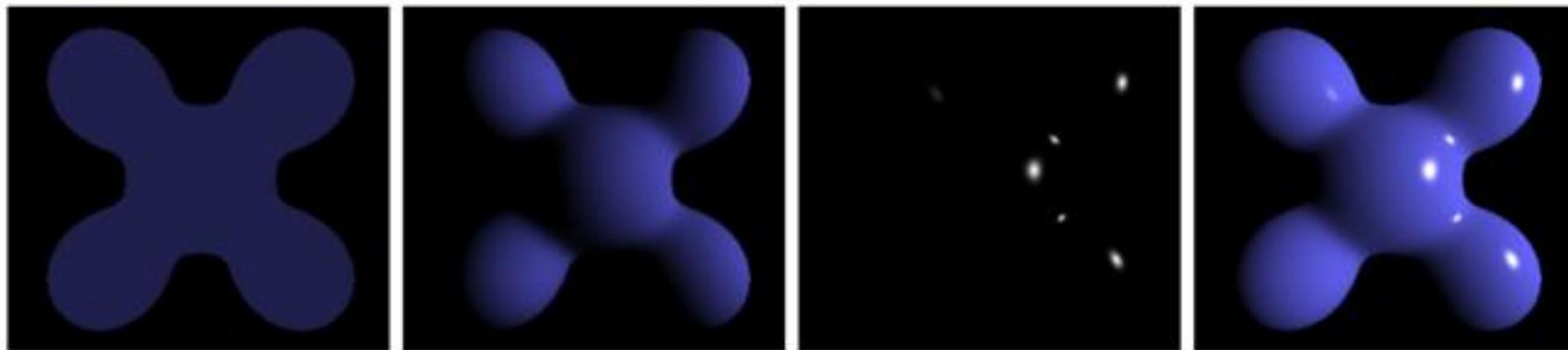
Добавляет эмпирический косинус для моделирования отражений (блеска)

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



# Модель Фонга: пример

---



Ambient

+

Diffuse

+

Specular

=

Phong Reflection

Модель Фонга имеет неприятные особенности, но все равно очень широко применяется

---

Не является обратимой

Не сохраняет энергию

# Зеркальная и диффузная составляющие BRDF – это оправдано?

---

Описывает материалы, содержащие отражающие и диффузные частицы

Пропорции частиц задают коэффициенты  $k_s$ ,  $k_d$

# Лекция посвящена моделированию освещения и освещению в OpenGL

---

Моделирование освещения. ДФО

Локальные и глобальные модели.  
Модель Фонга

Растеризация. Закраска Фонга и Гуро

Освещение в OpenGL

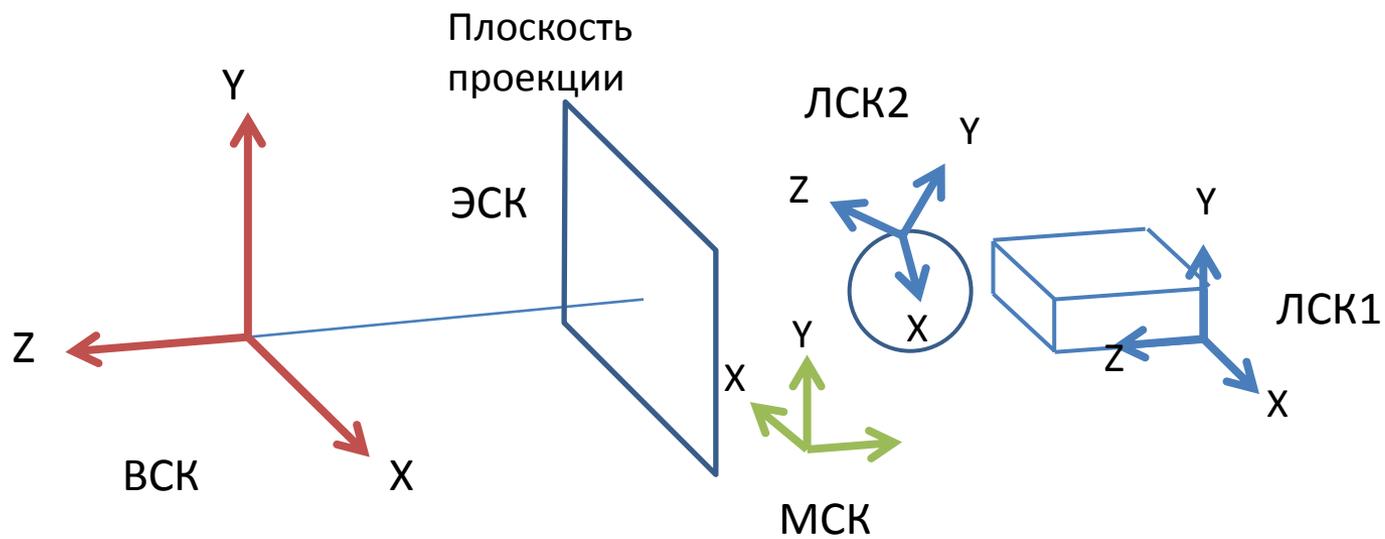
# Конвейер OpenGL. Переходим к этапу растеризации и обработки фрагментов

---

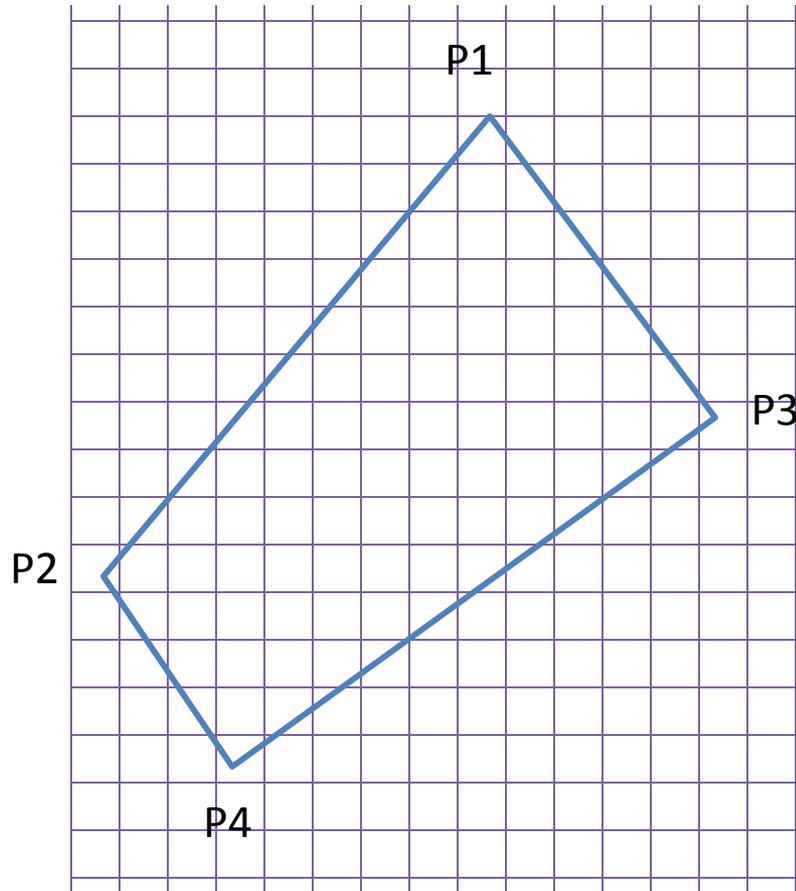


# Графический конвейер

---



Задача этапа растеризации – рассчитать цвет пикселей, соответствующих примитиву в экранных координатах

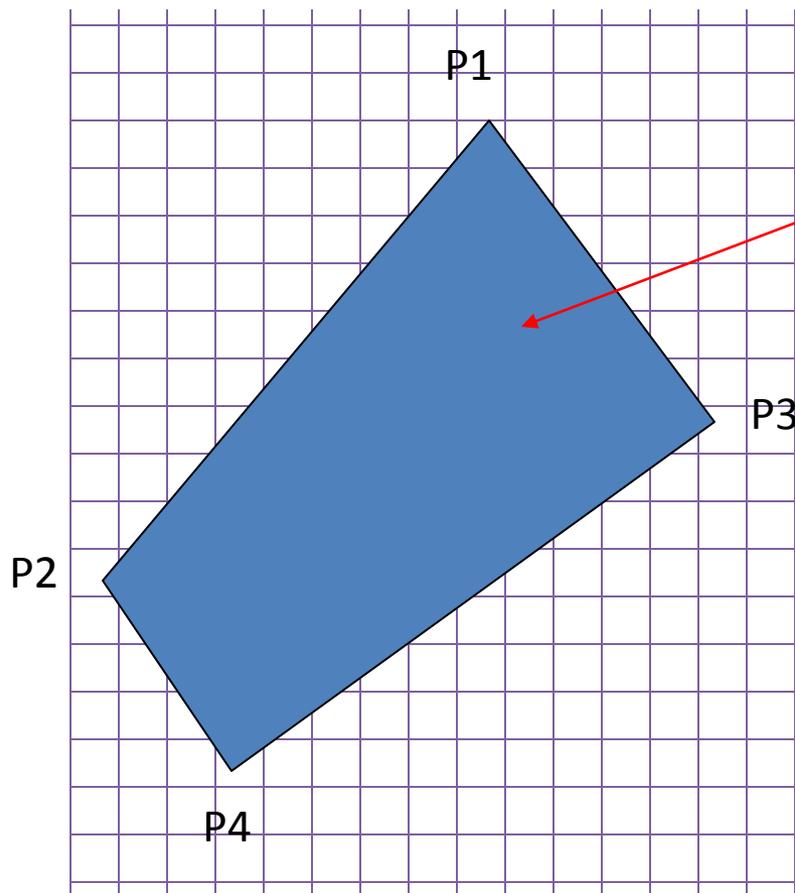


После преобразований получили точки P1, P2, P3, P4

Переходим на этап **растеризации**

# Три основных этапа вычисления цвета

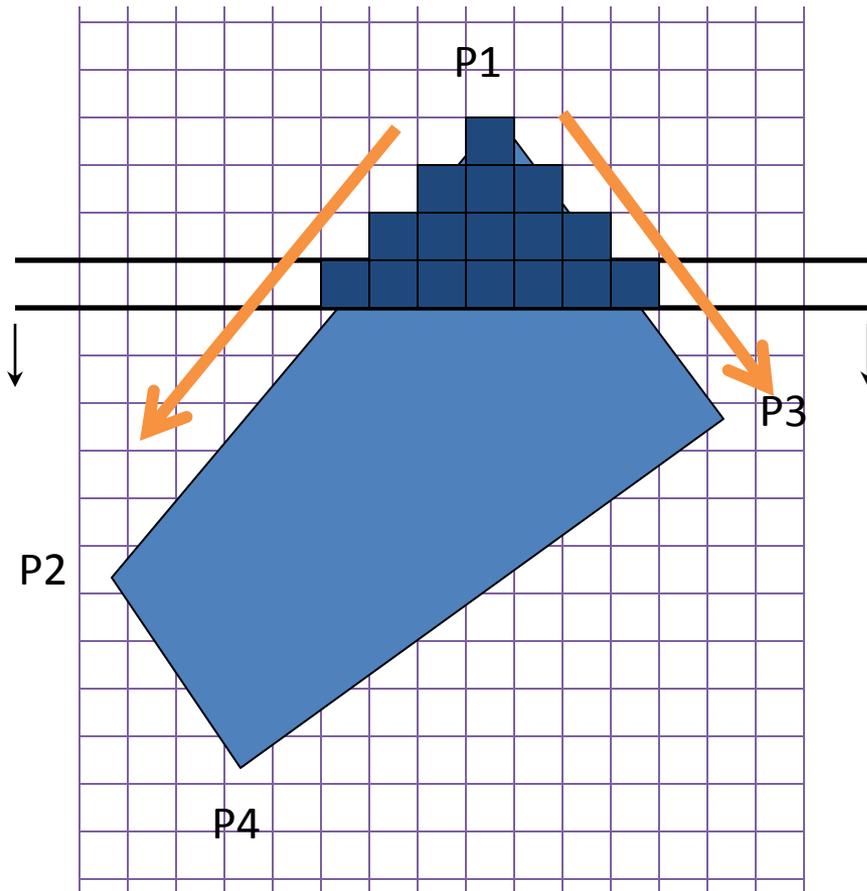
---



1. Растеризовать примитив
2. Вычислить цвет каждого пикселя
3. Скомбинировать с цветом фона

# Растрезизация: процесс вычисления пикселей растра, принадлежащих примитиву

---

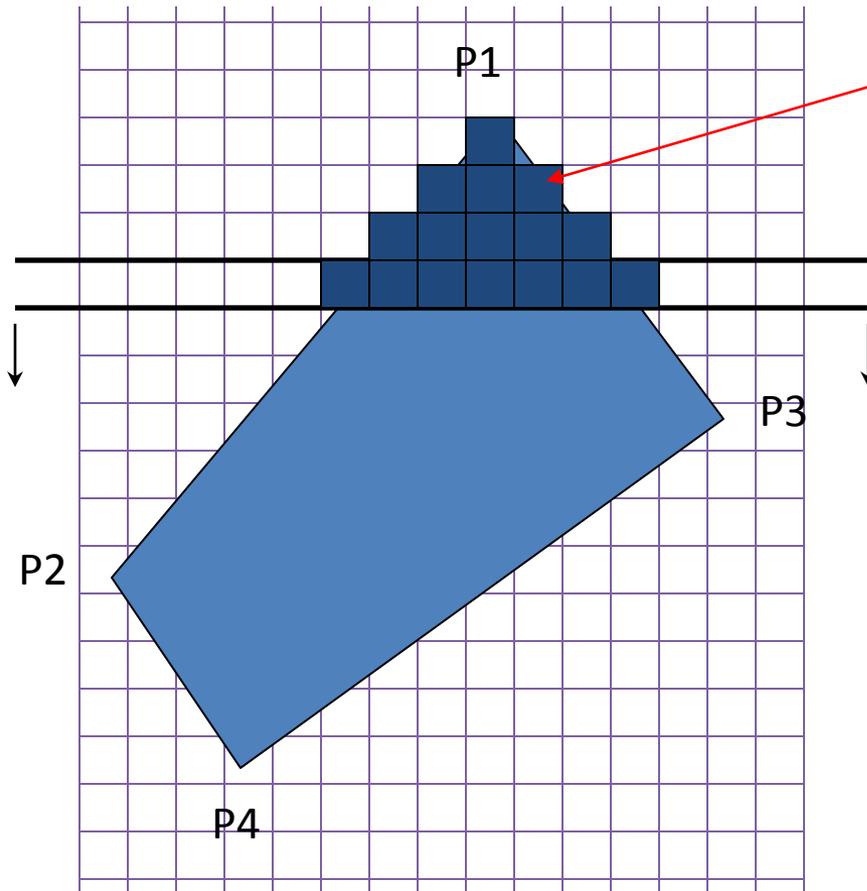


Линия  
развертки  
(scanline)

Алгоритм  
построчной  
развертки

# Вычисление цвета пикселя: материал, текстура, фон

---



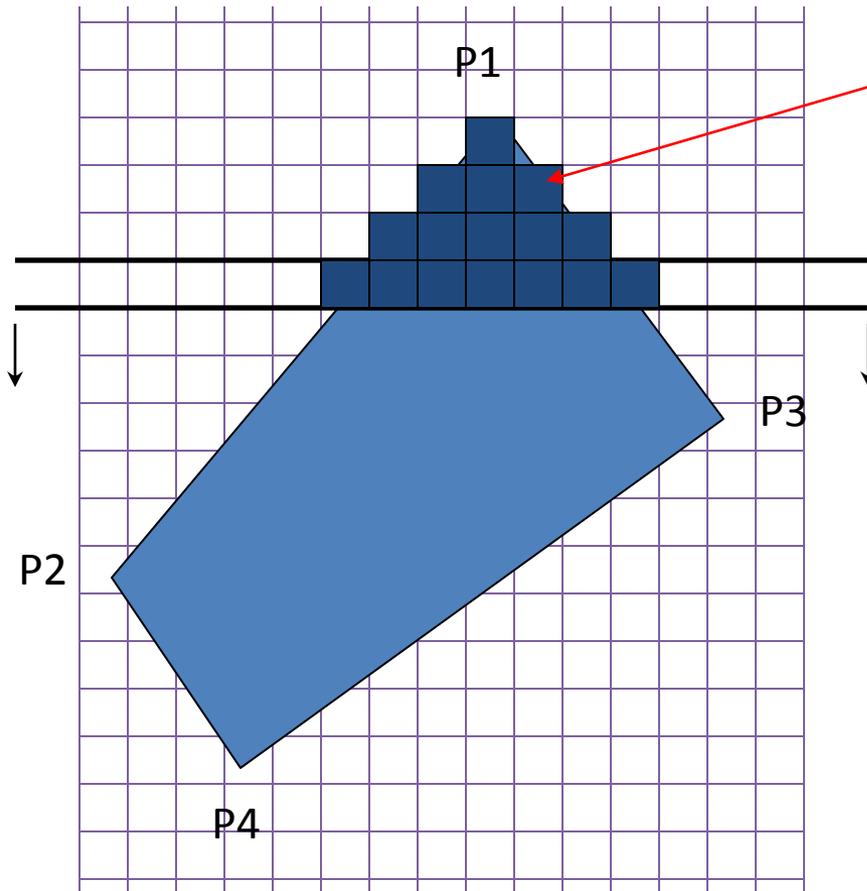
1. Цвет материала  $C_m$
2. Цвет текстуры  $C_t$
3. Цвет фона  $C_b$

$$C = F1(C_f, C_b)$$

$$C_f = F2(C_m, C_t)$$

# Вычисление цвета пикселя: цвет материала рассчитывается из модели освещения

---



1. Цвет материала  $C_m$
2. Цвет текстуры  $C_t$
3. Цвет фона  $C_b$

$$C = F1(C_f, C_b)$$

$$C_f = F2(C_m, C_t)$$

# Вычисление цвета материала: считаем в каждом пикселе или нет?

---

Варианты:

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

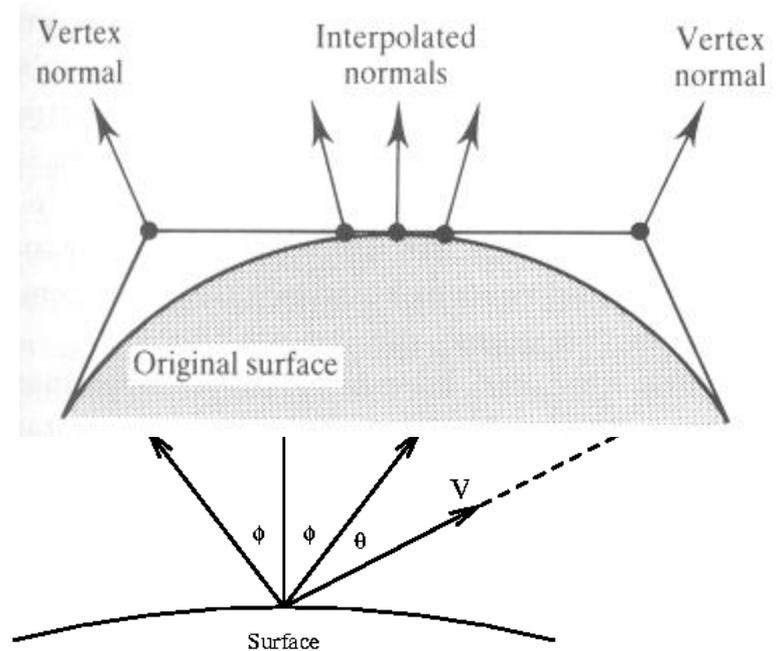
По-вершинное тонирование требует интерполяционной закраски

По-пиксельное тоже требует интерполяции, если нормали заданы на вершинах

# 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)



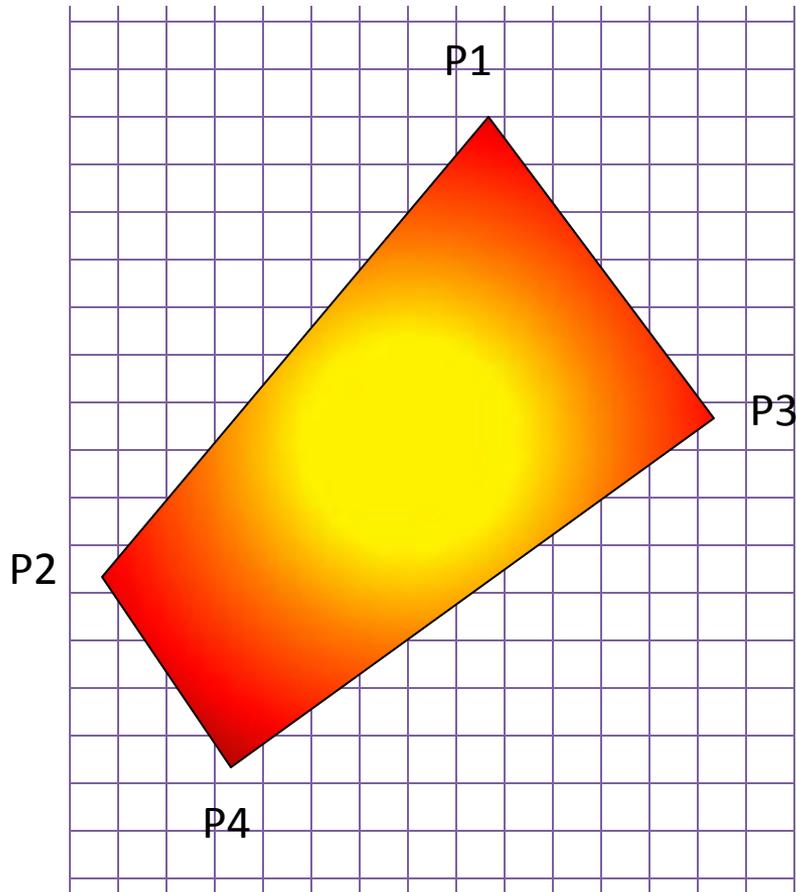
## Закраска Гуро (повершинное)

- Расчет цвета в вершинах
- Линейная интерполяция цвета

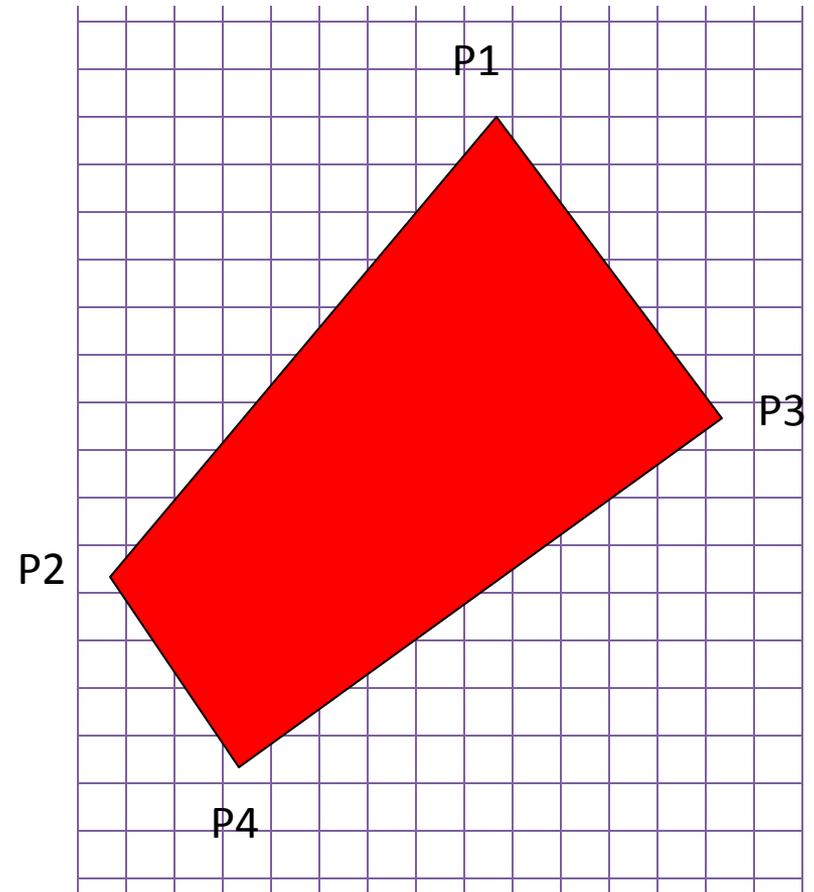
$$I_r = I_{pr}k_s(\cos \theta)^n \quad I_g = I_{pg}k_s(\cos \theta)^n \quad I_b = I_{pb}k_s(\cos \theta)^n$$

# Проблемы закраски Гуро – можно пропустить блики

---



Фонг

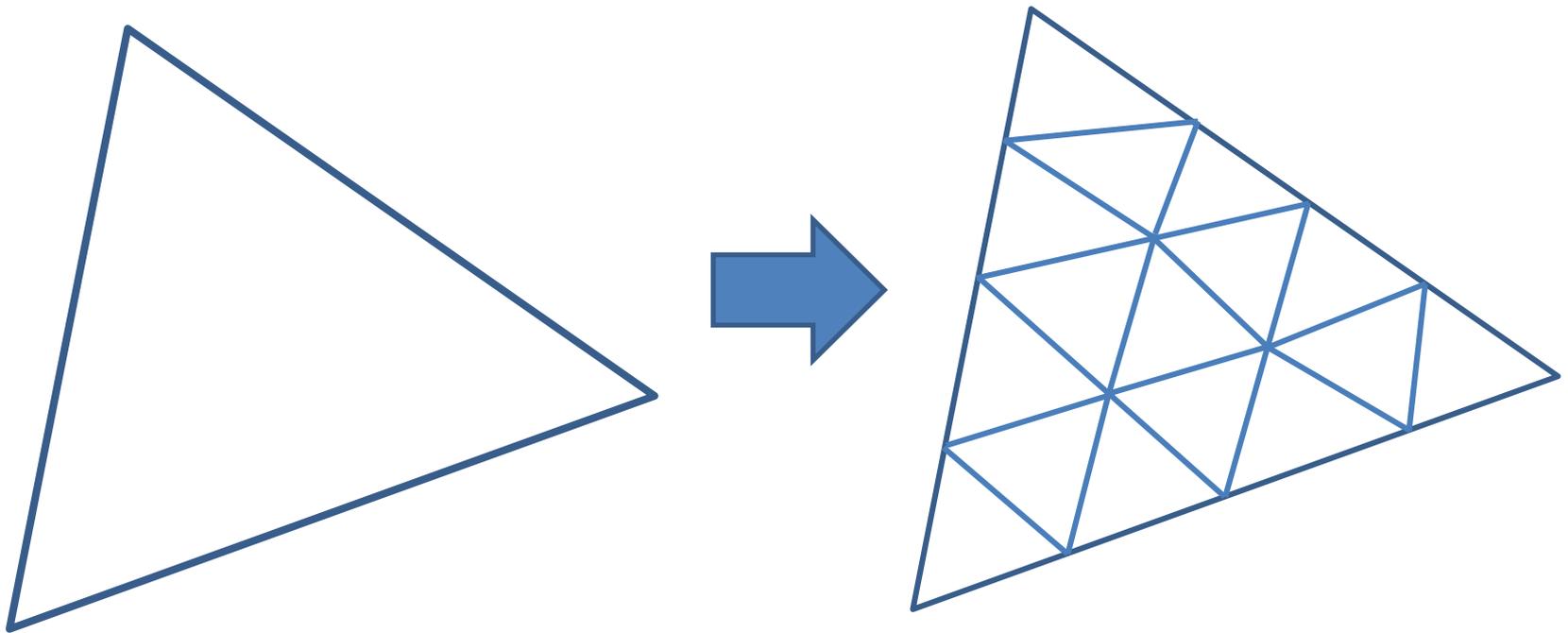


Гуро

# Решение проблемы закраски Гуро: подразбиение полигонов

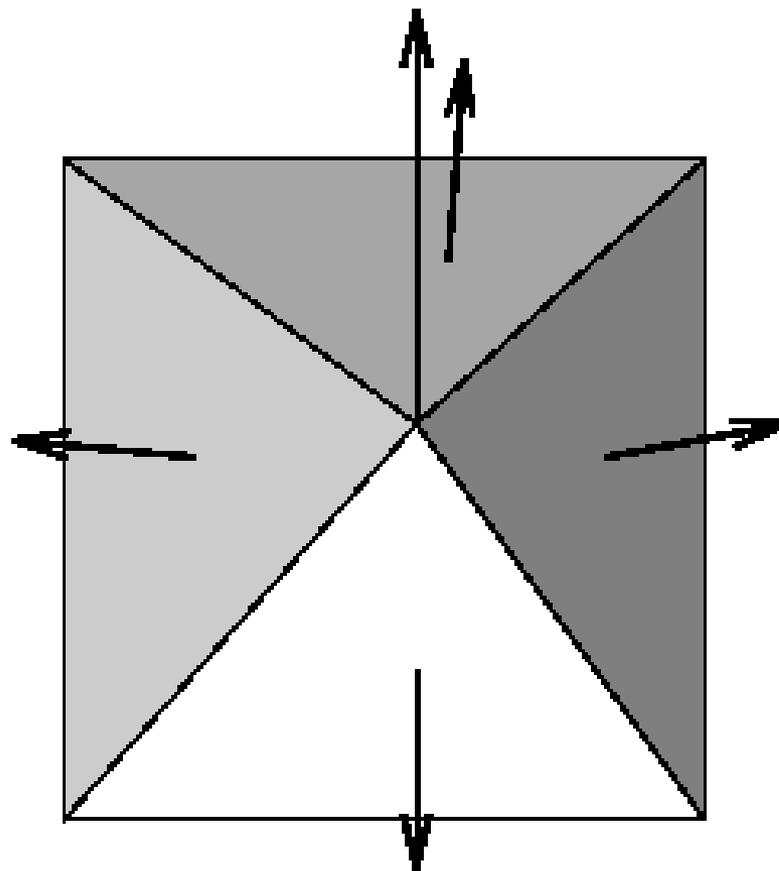
---

Увеличивает сложность геометрии



# Вычисление нормалей в вершинах

Нормали в вершинах  
вычисляются  
усреднением  
нормалей смежных  
граней

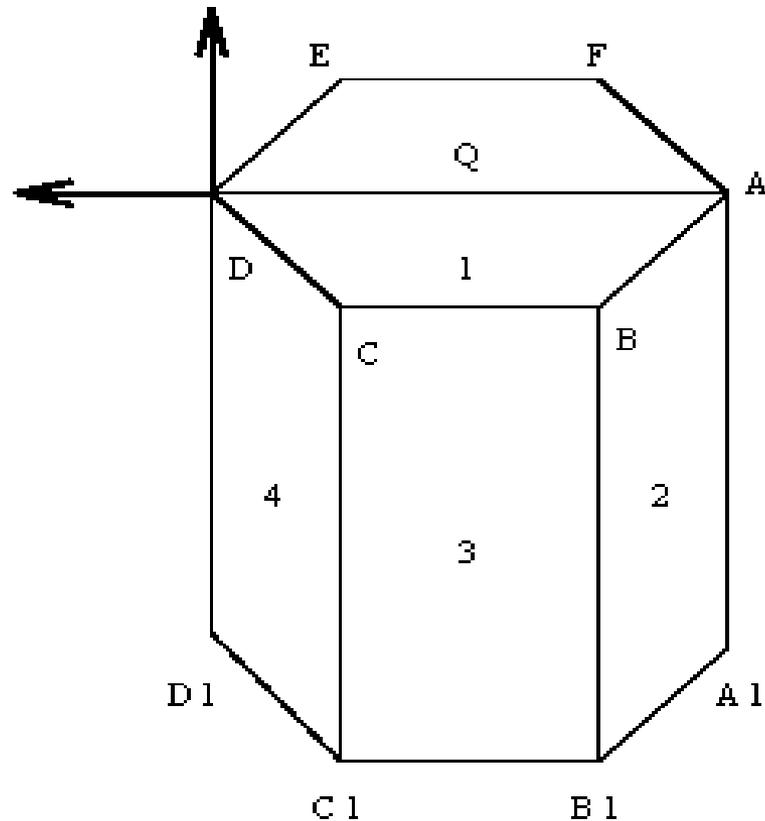


Для корректной закраски на стыках поверхности необходимо «клонирование» вершин

В вершине D нужно иметь две нормали:

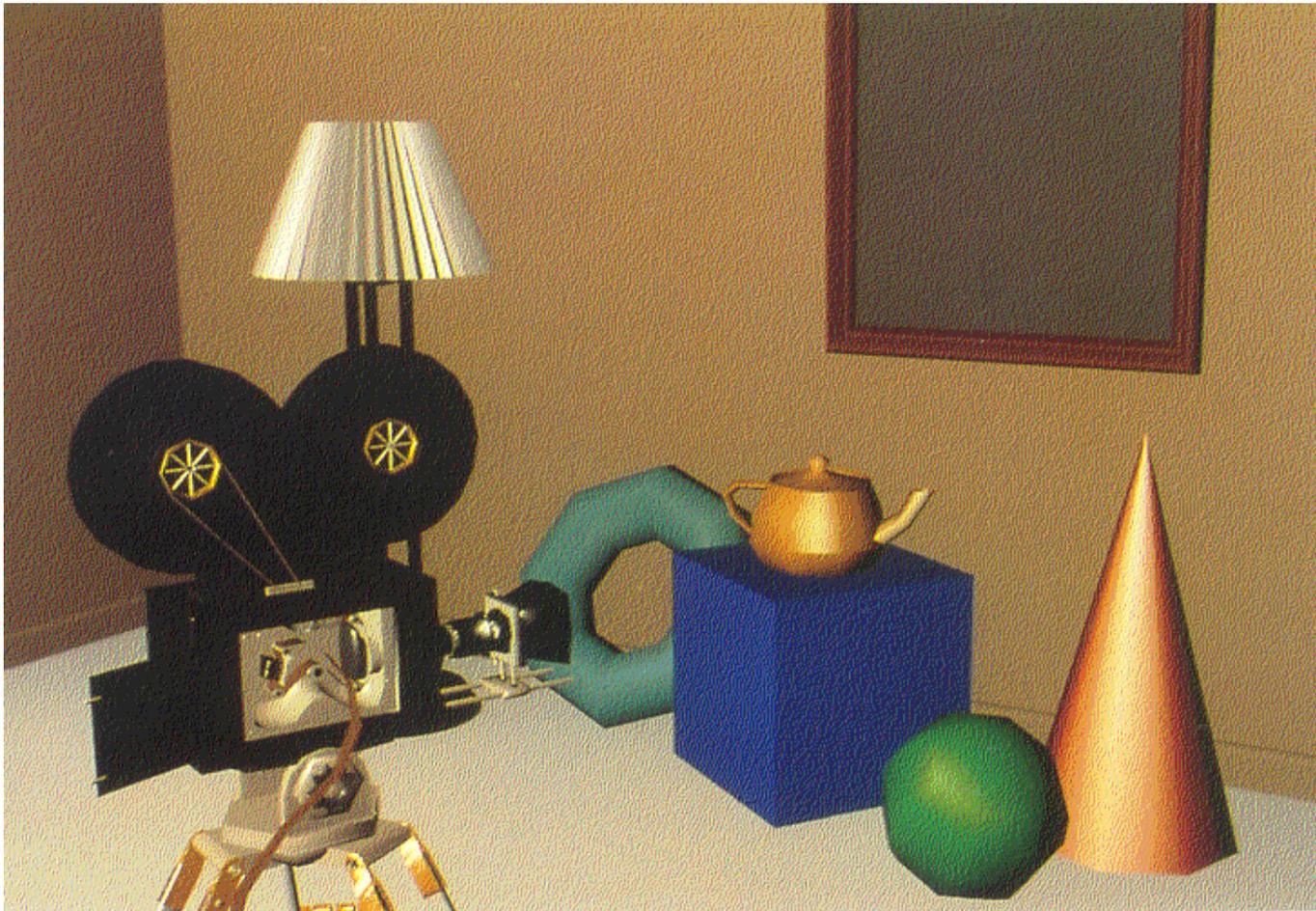
- Одна нормаль для гладкой закраски боковой поверхности
- Другая нормаль для закраски торца

На острых ребрах нормали дублируются



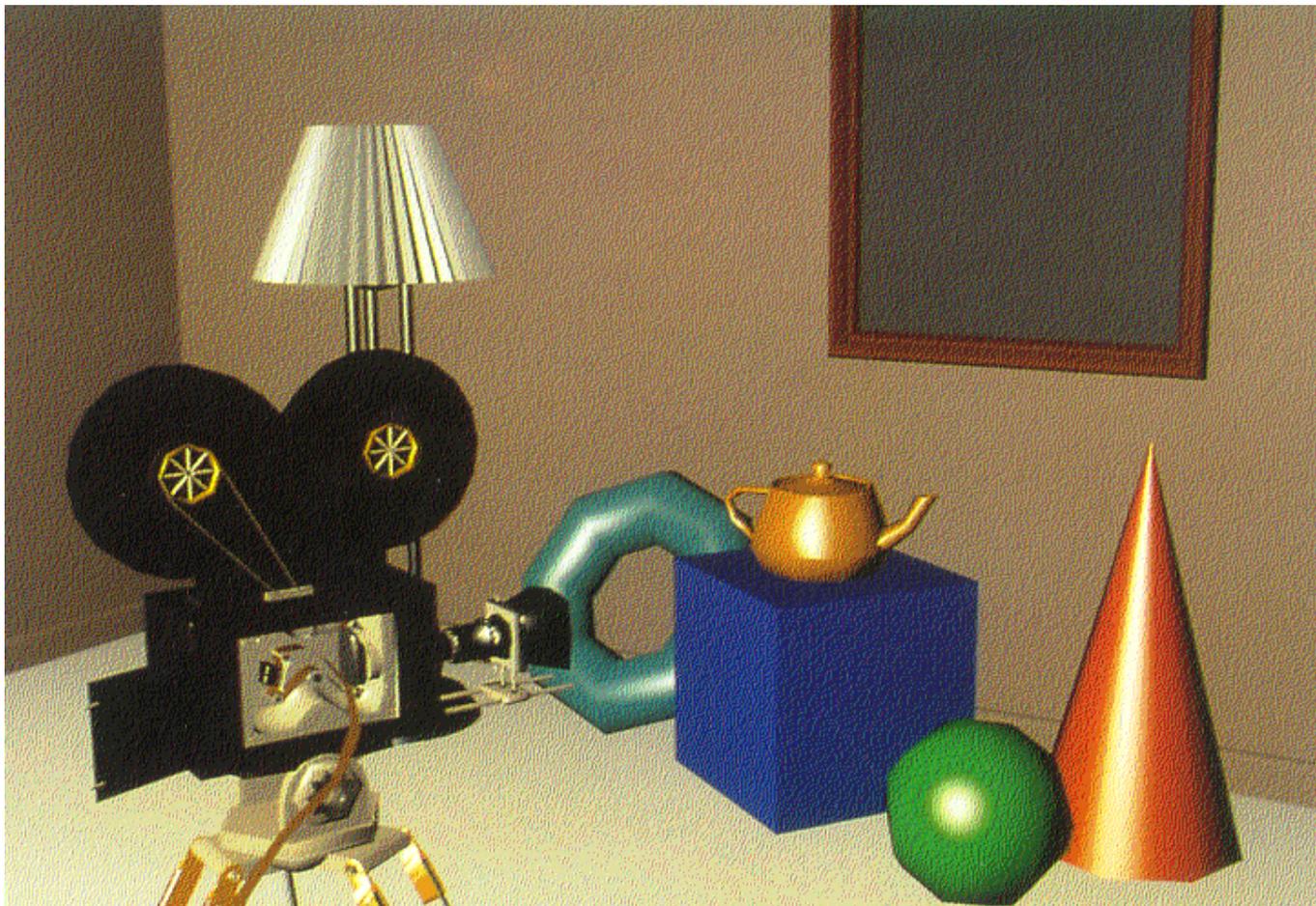
# Закраска Гуро (Gouraud) (зеркальное “specular” отражение)

---



# Закраска Фонга (Phong) (зеркальное отражение)

---



# Лекция посвящена моделированию освещения и освещению в OpenGL

---

Моделирование освещения. ДФО

Локальные и глобальные модели.  
Модель Фонга

Растеризация. Закраска Фонга и Гуро

Освещение в OpenGL

# Освещение в OpenGL: Модель Фонга, закраска Гуро

---

## Модель Фонга

- Вычисляется на вершинах
- Закраска Гуро или плоская

## Составляющие модели освещения

- Свойства материала поверхности
- Свойства источника света
- Свойства модели освещения

# Пример освещения

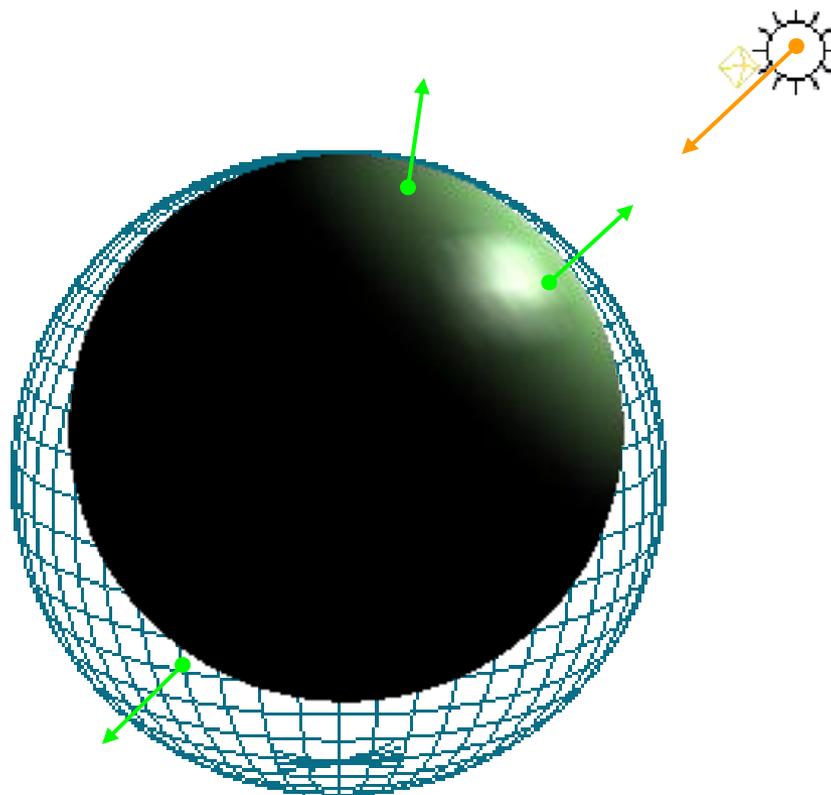
---

AMBIENT

DIFFUSE

SPECULAR

shininess



# Свойства материала

---

Определение свойств материала для примитива

`glMaterialfv (face, property, value)`

`GL_DIFFUSE`

`GL_SPECULAR`

`GL_AMBIENT`

`GL_EMISSION`

`GL_SHININESS`

# Свойства источника света

---

`glLightfv ( light, property, value )`

- цвет источника
- положение
- затухание

Внимание: при задании положения источника света к нему применяется текущий набор матриц преобразования (модельно-видовая)

# Типы источников света

---

OpenGL поддерживает два типа источников света

- Локальные (точечные) источники
- Бесконечно удаленные (параллельные) источники

Тип определяется координатой  $w$

- $w = 0$  параллельный источник
- $w \neq 0$  точечный источник  $(x / w, y / w, z / w)$

Точечные источники могут быть

- Всенаправленные (omni)
- Прожекторного типа (spotlight)

# Особенность: где нужно задавать положение источника света

- `glMatrixMode(GL_MODELVIEW);`

Видовое пространство.  
Свет приделан к камере

- `gluLookAt(..);`

Виртуальная  
камера

Мировое пространство.  
Свет зафиксирован в  
сцене

- `glTranslate(...);`

- `glRotate(...);`

- `glTranslate(...);`

Модельное  
преобразование

Модельное  
пространство.  
Свет приделан к  
объекту

- `glBegin(...);`

- ...

- `glEnd();`

Геометрия

# Итоги

---

- Задача моделирования освещения = задача выбора нужной аппроксимации перемещения электромагнитной энергии + модель восприятия
- Для описания взаимодействия света и материала используется понятие ДФО
- Модели, не учитывающие вторичного освещения, называются локальными
- Модель Фонга – наиболее распространенная локальная модель
- Растеризация – быстрый способ получения дискретизованного примитива.
- Заливки Гуро и Фонга
- Освещение в OpenGL построено на модели Фонга
  - Положение источников света задается так же, как и положение объектов!