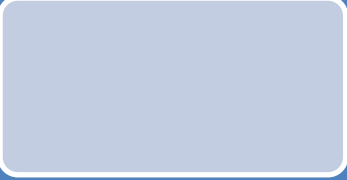


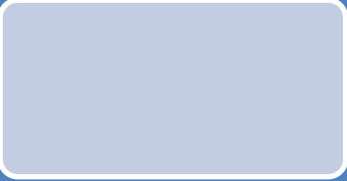
Локальные и глобальные модели освещения. Модель Фонга. Закраска Фонга и Гуро

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

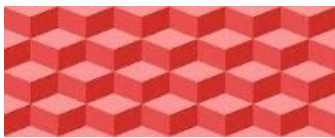
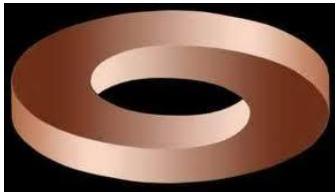


Модель освещения включает в себя отражения, преломления света, тени, текстуры и т.п.



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**



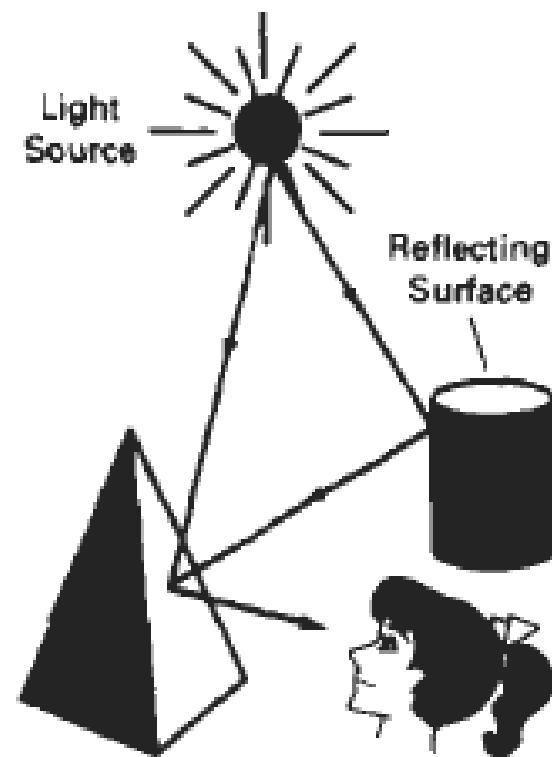
Источники света: первичные и вторичные

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

Две категории:

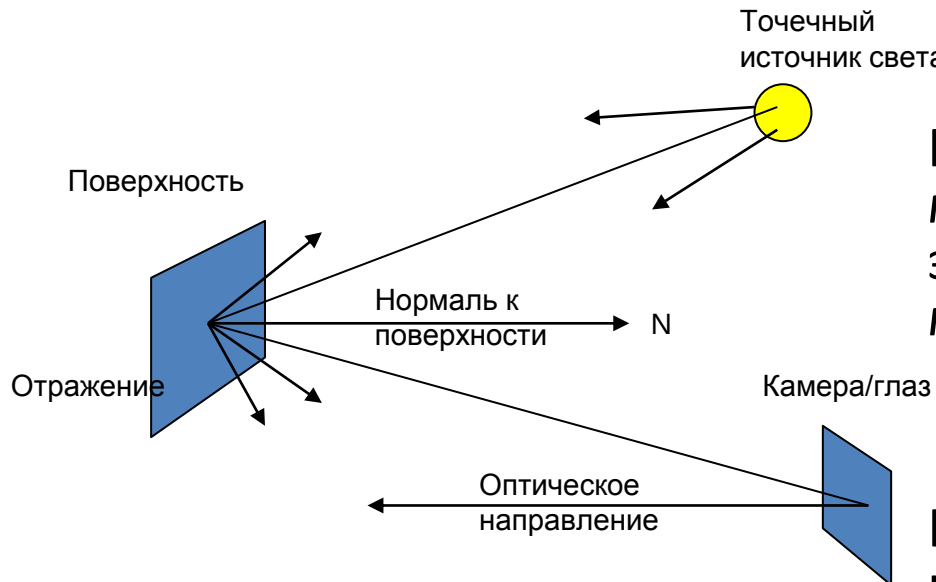
- Светоиспускающие источники = первичные источники
- Светотражающие источники = вторичные источники

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

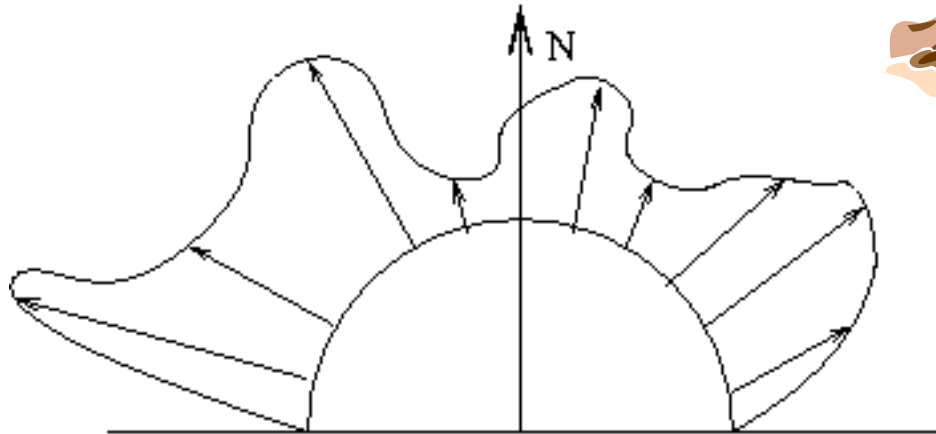
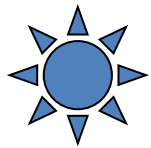
В реальном мире видимый цвет определяется количеством энергии видимого спектра, которая попадает на чувствительные элементы сетчатки глаза

Как правило, мы видим отраженный свет

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

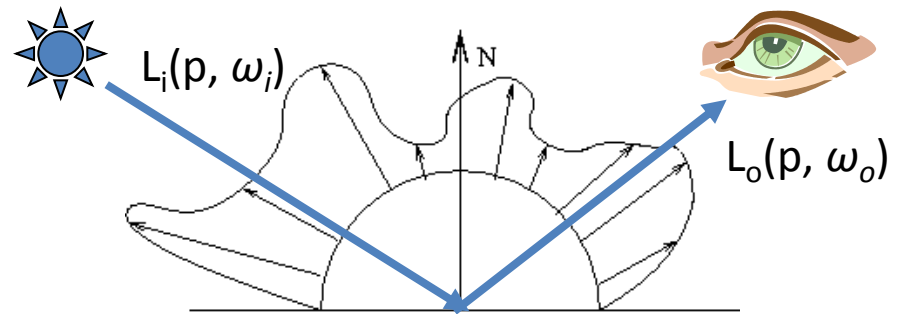
Более формально: источник, наблюдатель, рассчитать отражение

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 ω_o при условии излучения по направлению ω_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 освещенность поверхности в малой окрестности точки p :



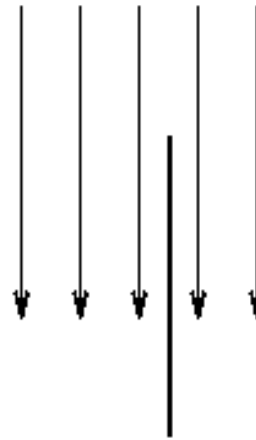
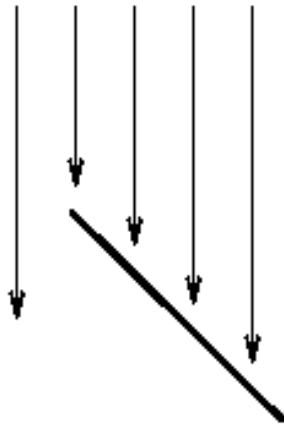
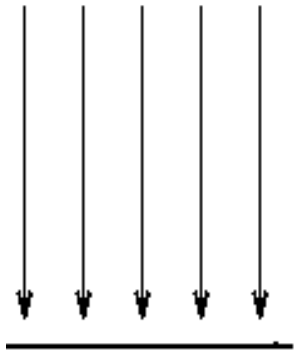
$$E(p, \omega_i) = L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

В направление ω_0 будет излучаться

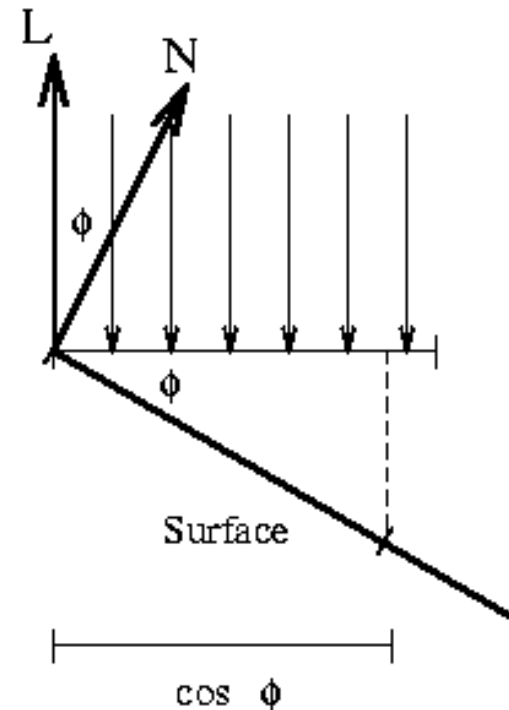
$$L_o(p, \omega_o) \propto E(p, \omega_i)$$

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

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

$$L_o(p, \omega_o) \propto E(p, \omega_i)$$



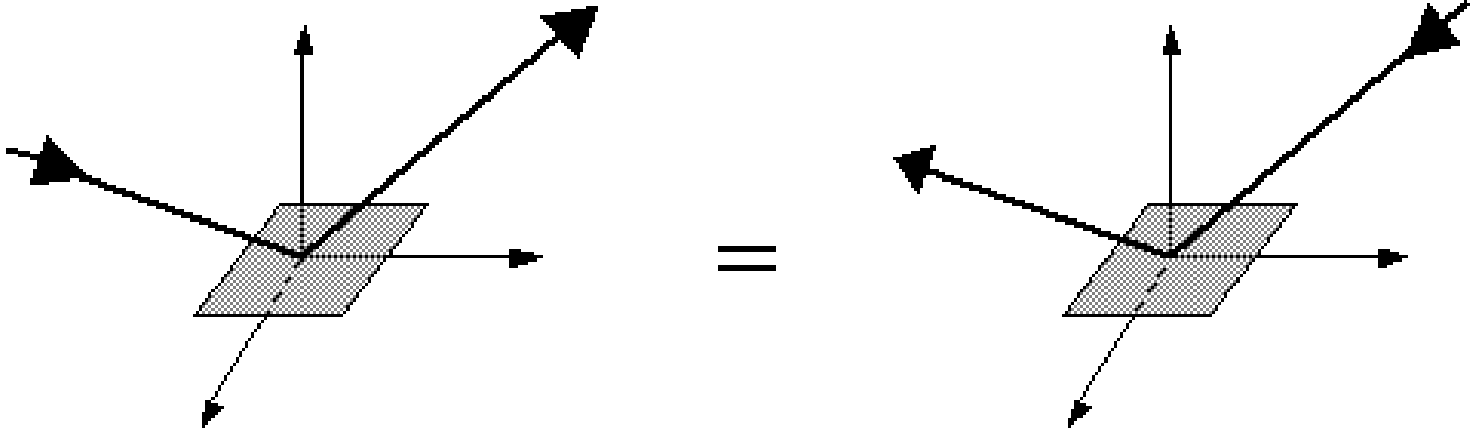
$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{L_o(p, \omega_o)}{E(p, \omega_i)} = \frac{L_o(p, \omega_o)}{L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$



ДФО

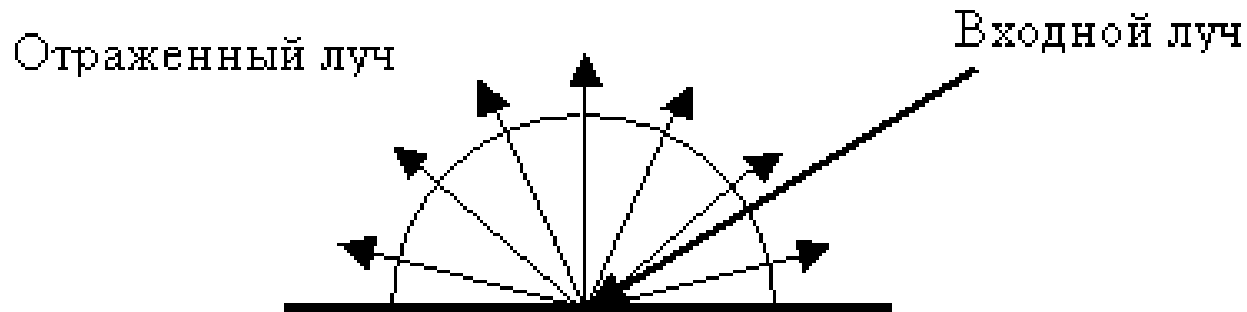
Свойство ДФО: обратимость

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



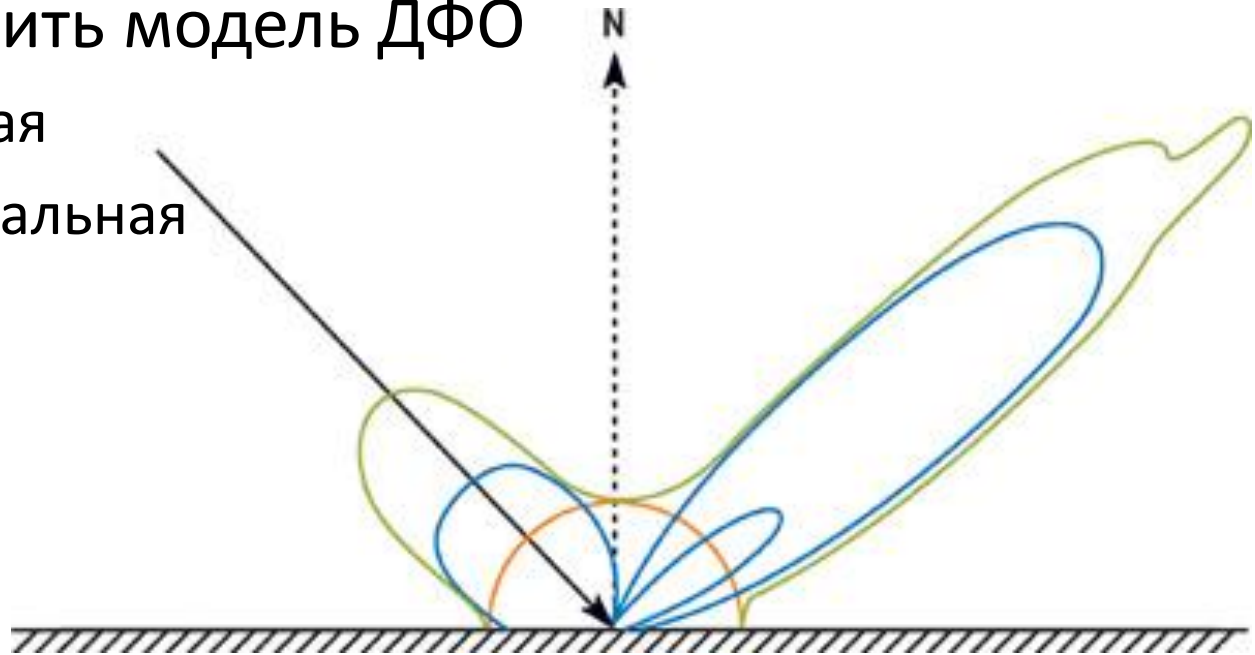
Свойство ДФО: сохранение энергии

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



Вычисление яркости точки

- $f_r = \frac{L}{E}$
- $L_o = f_r E = f_r L_i \cos \theta_i d\omega_i$
- Нужно построить модель ДФО
 - Аналитическая
 - Экспериментальная

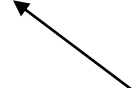


Расчет излучения точки поверхности через интегрирование по всем входящим направлениям

Для каждой длины волны!

Здесь учитываем только отражение

$$L(p, \omega_o) = \int L_{oi}(p, \omega_o, \omega_i)$$

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


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

Расчет излучения точки поверхности: дискретный случай

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



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

ω_i^j - Направление на j-й источник света

θ_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

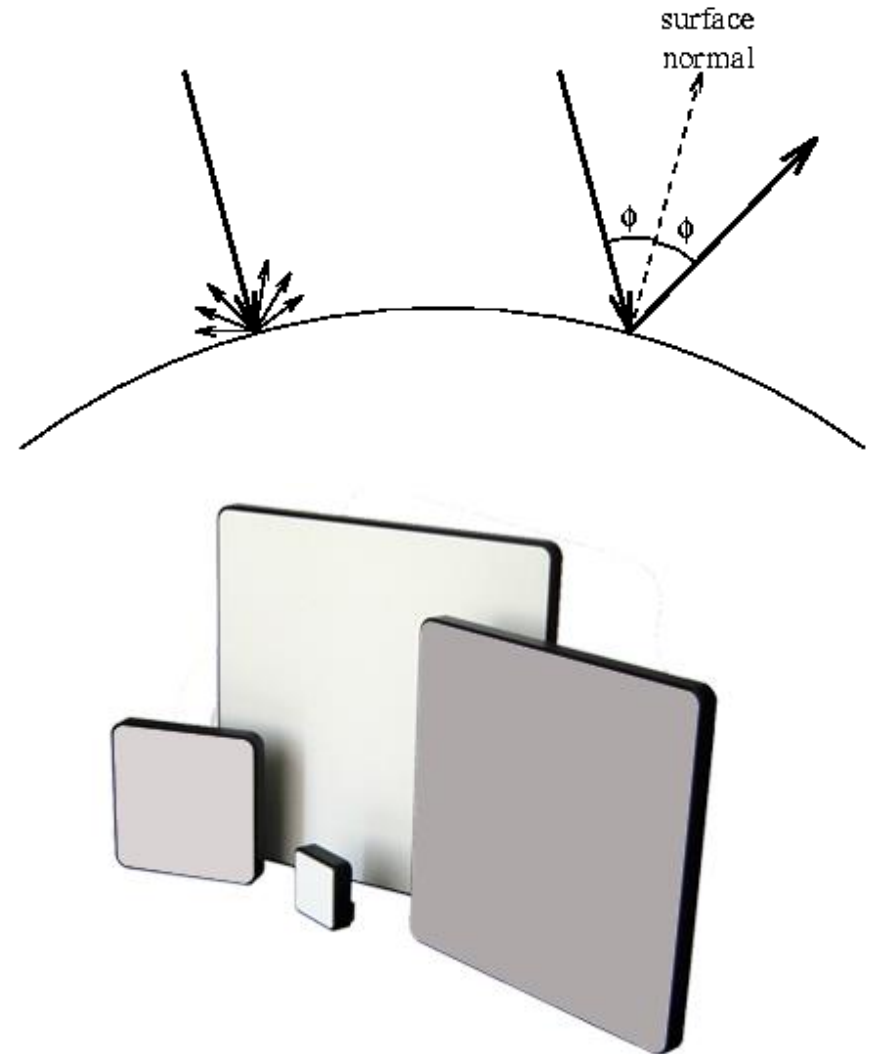


Выделяют локальные и глобальные модели освещения

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

- Ламбертова (идеально диффузная) поверхность выглядит одинаково яркой со всех направлений
- В природе не существует, но есть близкие приближения
- Пример: бумага



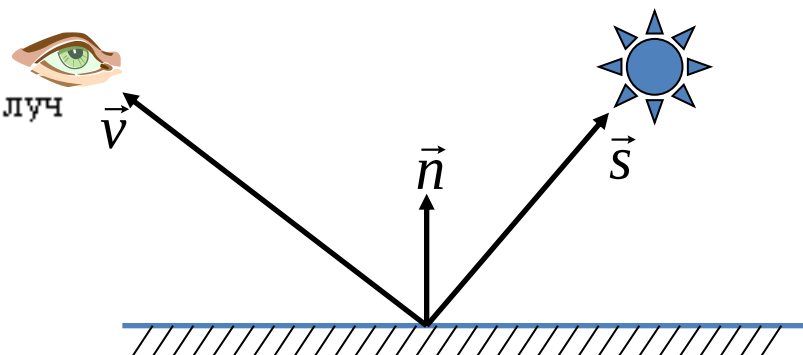
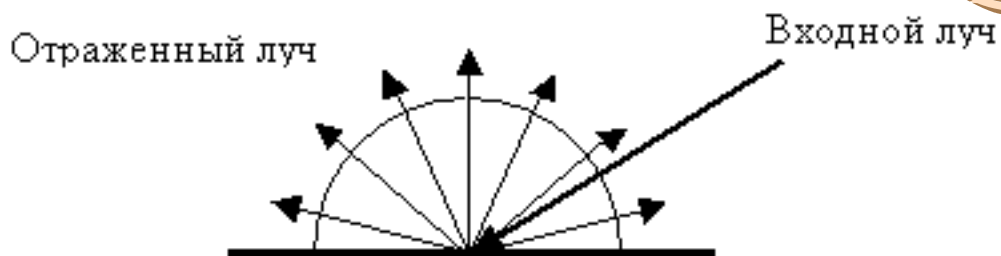
Модель Ламберта учитывает только идеальное рассеивание света

Для одного источника света

ДФО константна = C/ρ_i

– C определяет процент отражения для данной длины волны

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



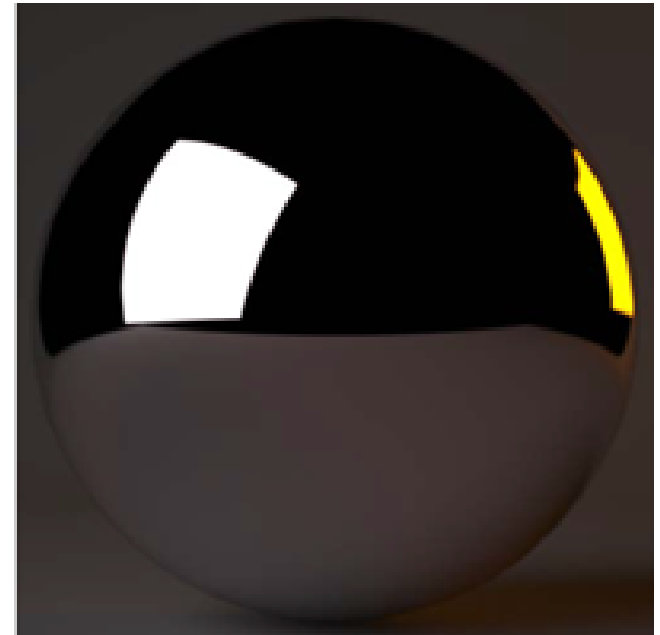
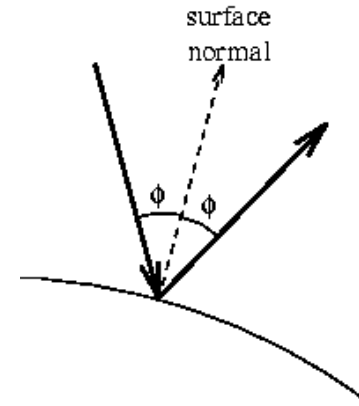
Идеально зеркальное отражение

ДФО равно нулю везде, кроме

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

- Дельта-функция от направления идеального отражения

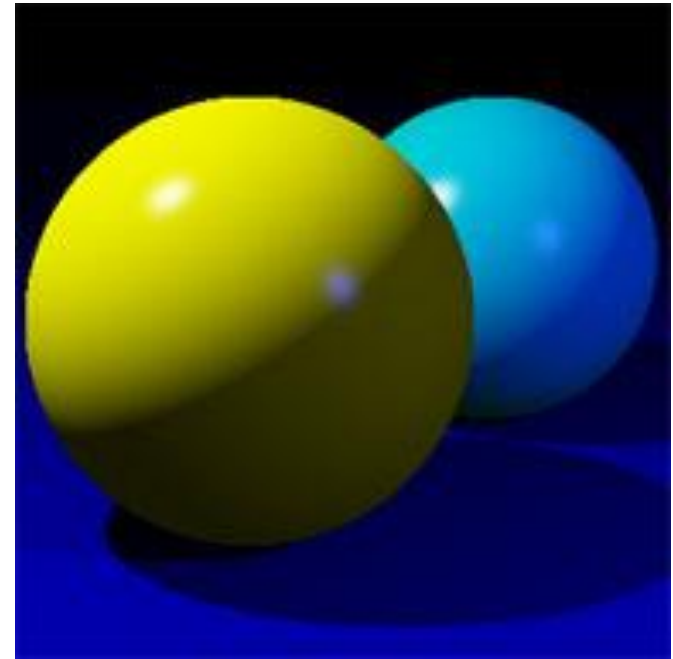
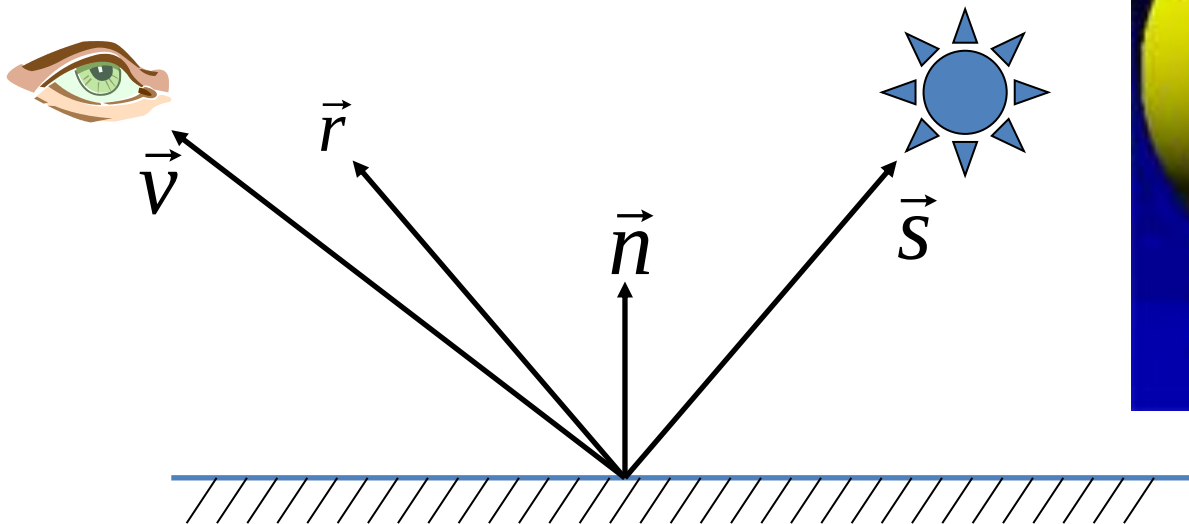
- $$f_{mirror} = \frac{\delta(\theta_i - \theta_o)\delta(\phi_i - \phi_o)}{\cos(\theta_i)}$$



Модель Фонга добавляет в модель Ламберта зеркальное отражение

Добавляет эмпирический косинус для моделирования отражений (блеска)

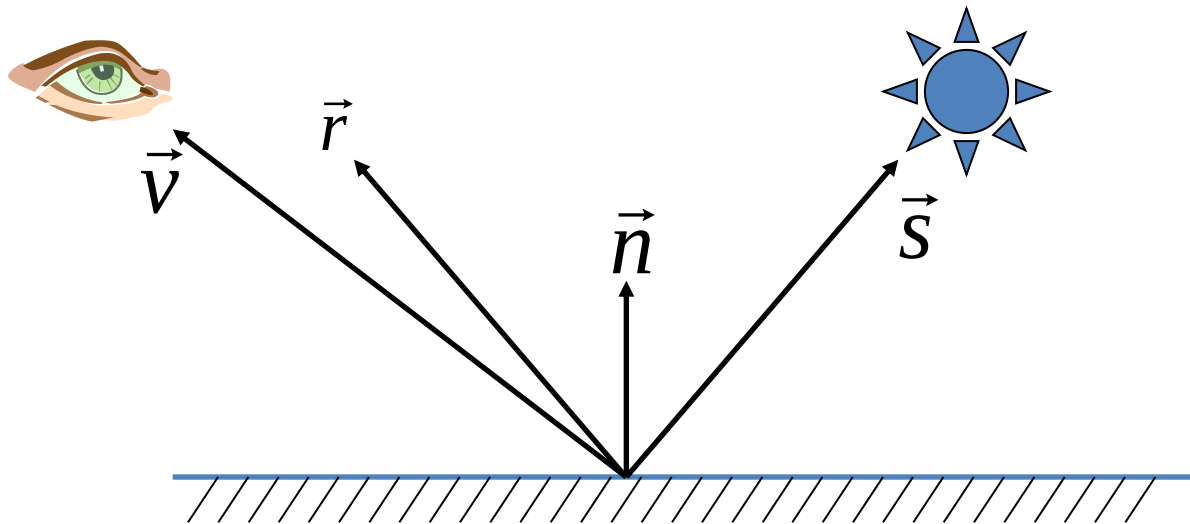
$$f_{rphong} = \frac{k_d(s \cdot n) + k_s(s \cdot v)^k}{\cos \theta_i}$$



Модель Фонга добавляет в модель Ламберта зеркальное отражение

Добавляет эмпирический косинус для моделирования отражений (блеска)

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

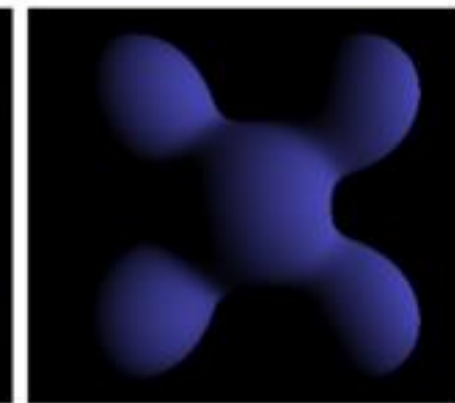


Модель Фонга: пример

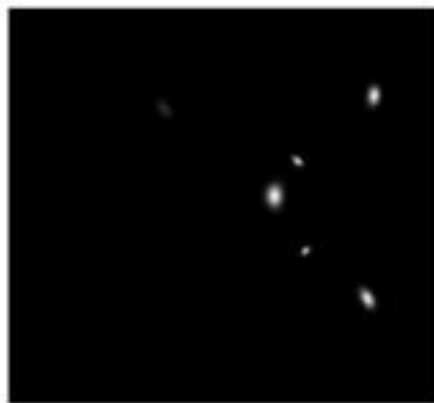
$$L_o = k_a L_a + L_i (k_d (\vec{s} \cdot \vec{n}) + k_s (\vec{r} \cdot \vec{v})^{k_e})$$



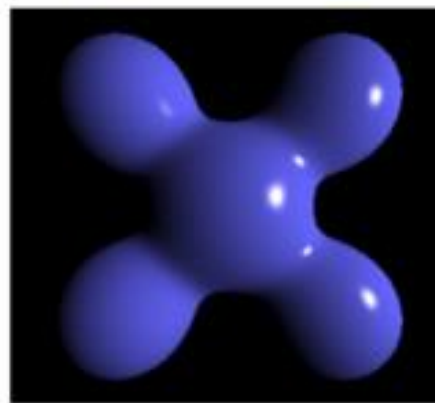
Ambient



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

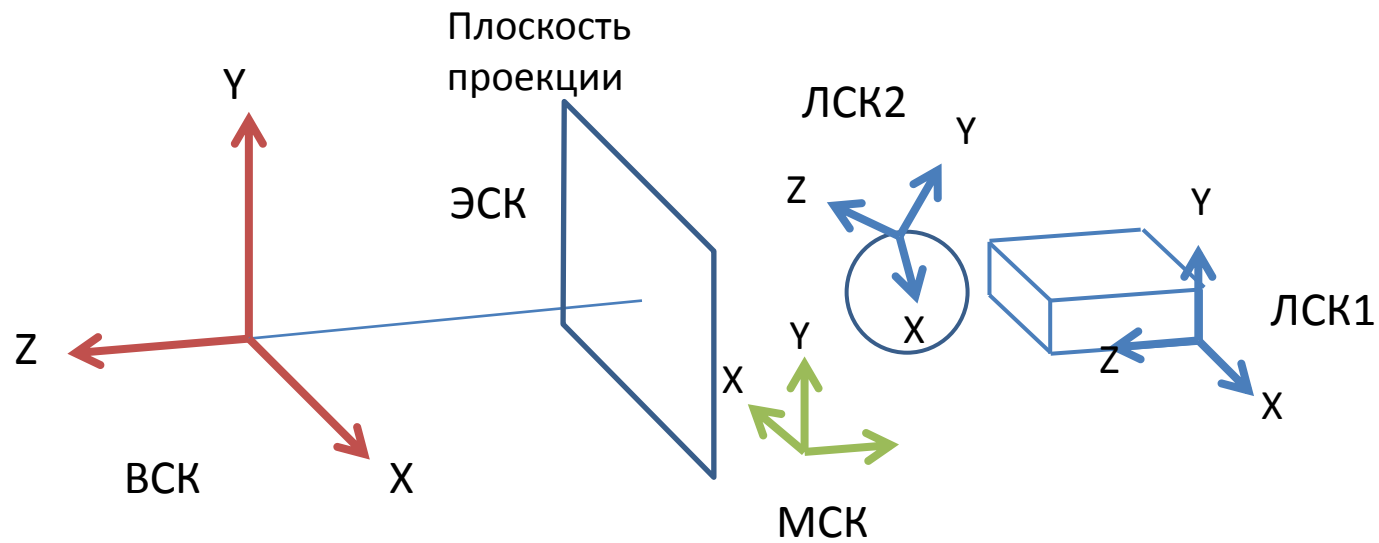
Моделирование освещения. ДФО

Локальные и глобальные модели.
Модель Фонга

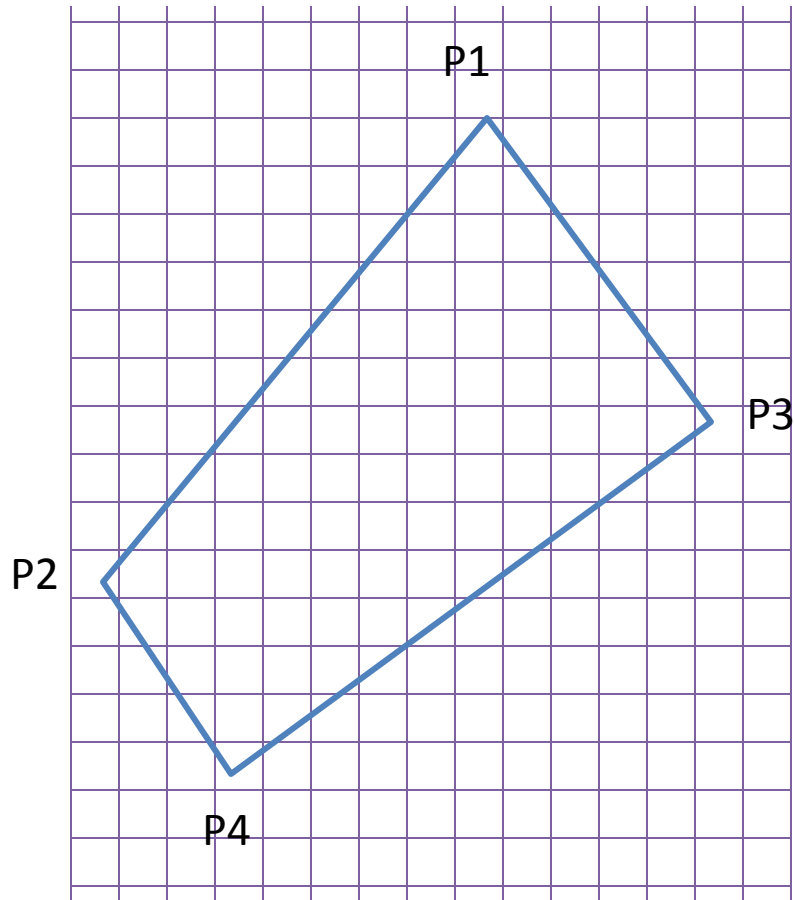
Растеризация. Закраска Фонга и Гуро

Освещение в OpenGL

Графический конвейер



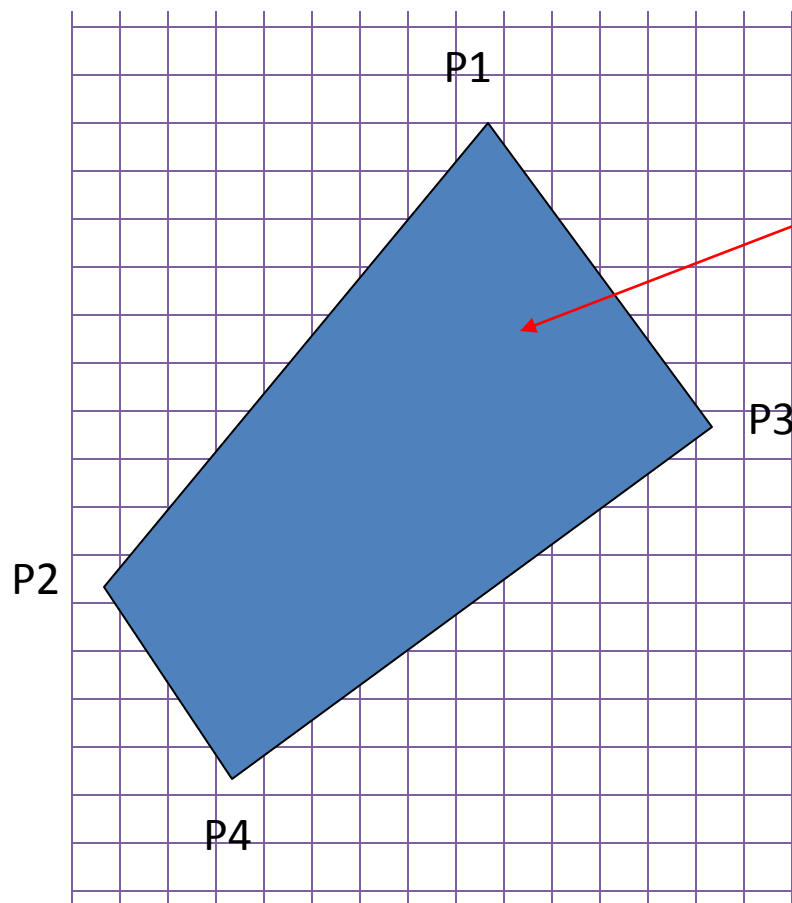
Задача этапа растеризации – рассчитать цвет пикселей, соответствующих примитиву в экранных координатах



После преобразований
получили точки
P1, P2, P3, P4

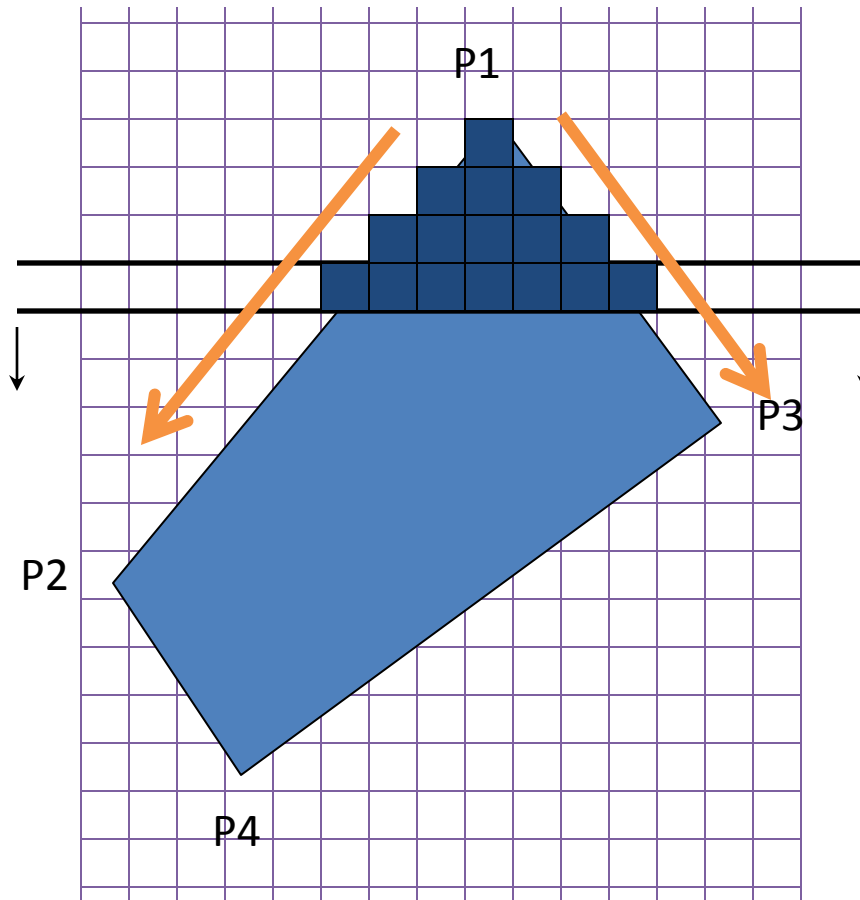
Переходим на этап
растеризации

Три основных этапа вычисления цвета



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

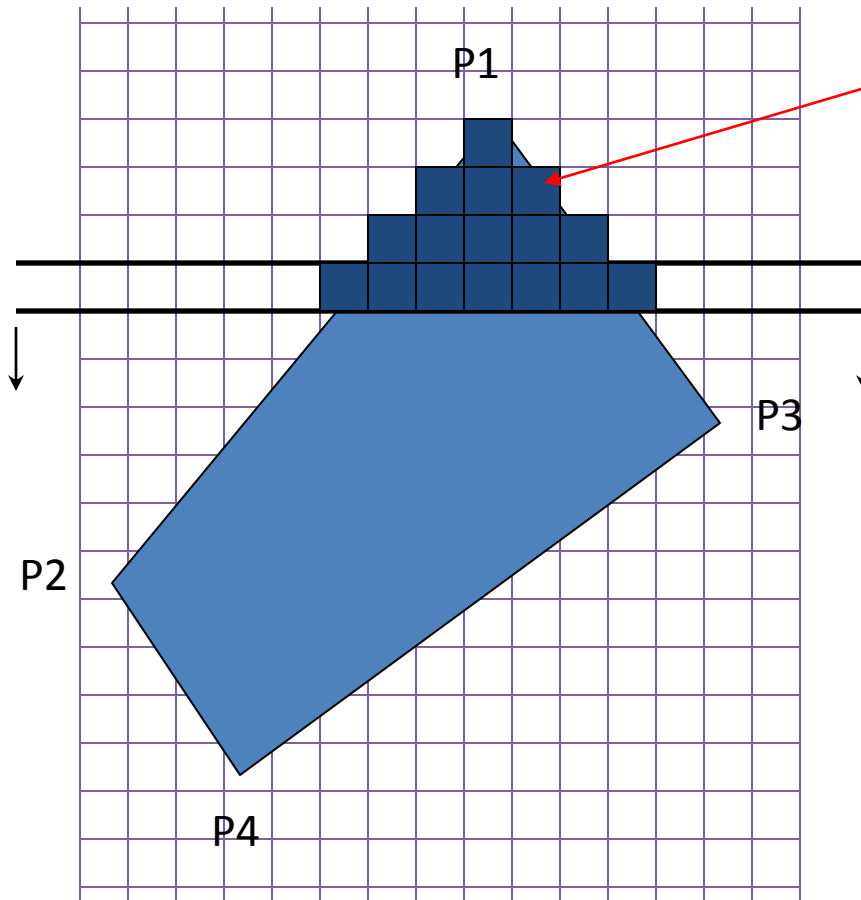
Растрезизация: процесс вычисления пикселей растра, принадлежащих примитиву



Линия
развертки
(scanline)

Алгоритм
построчной
развертки

Вычисление цвета пикселя: материал, текстура, фон

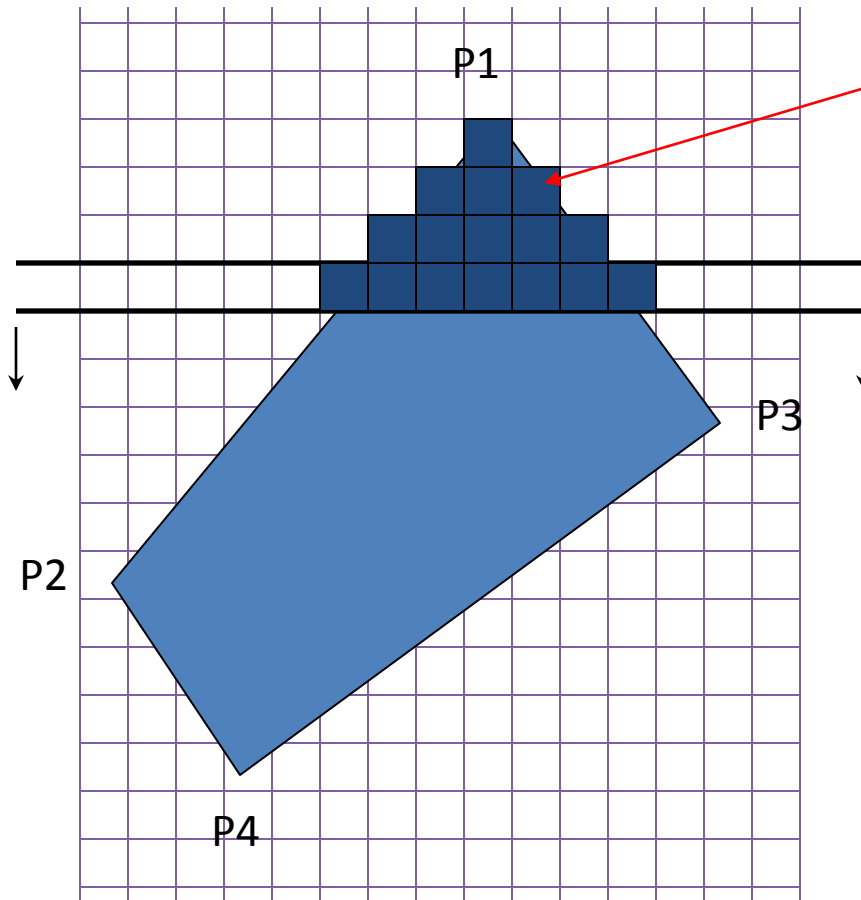


1. Цвет материала C_m
2. Цвет текстуры C_t
3. Цвет фона C_b

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

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

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)

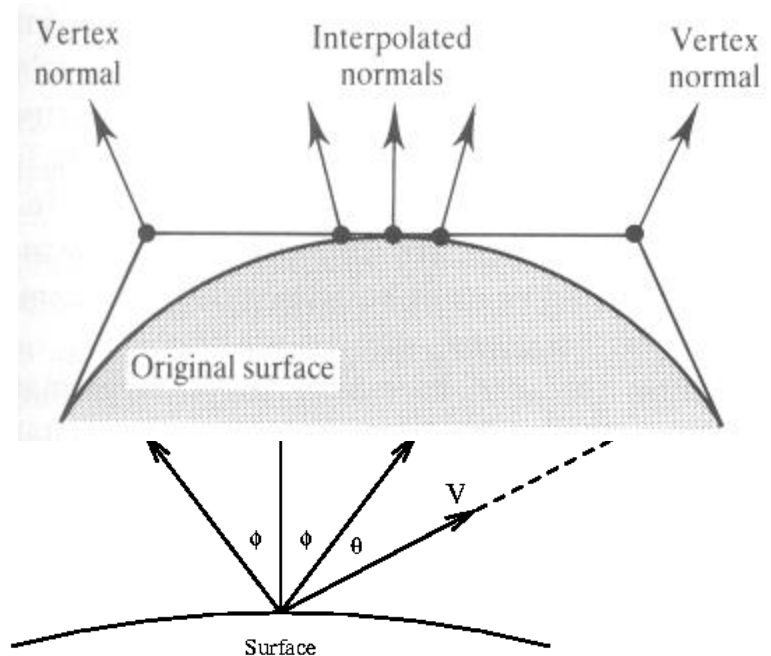
По-вершинное тонирование требует интерполяционной закраски

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)

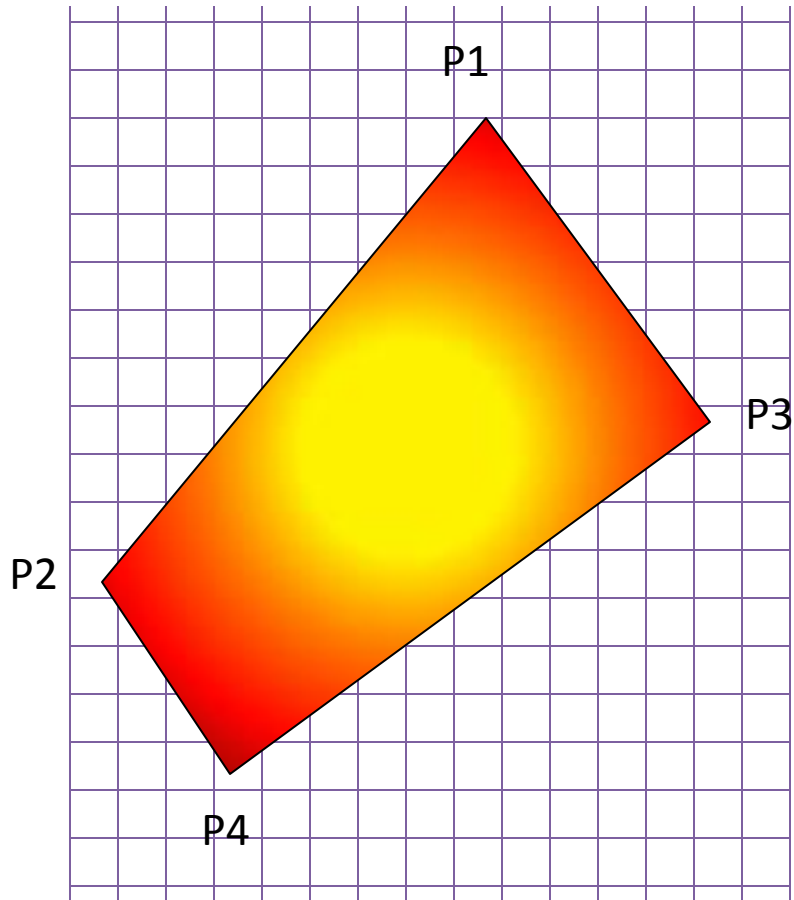


Закраска Гуро (повершинное)

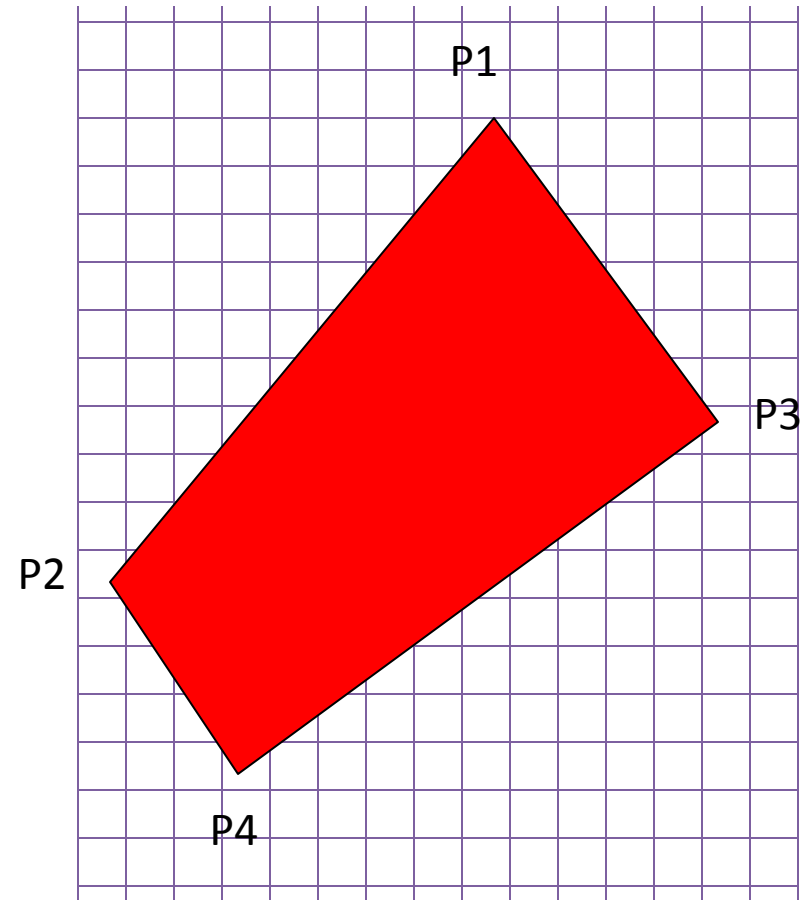
- Расчет цвета в вершинах
- Линейная интерполяция цвета

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

Проблемы закрашки Гуро – можно пропустить блики



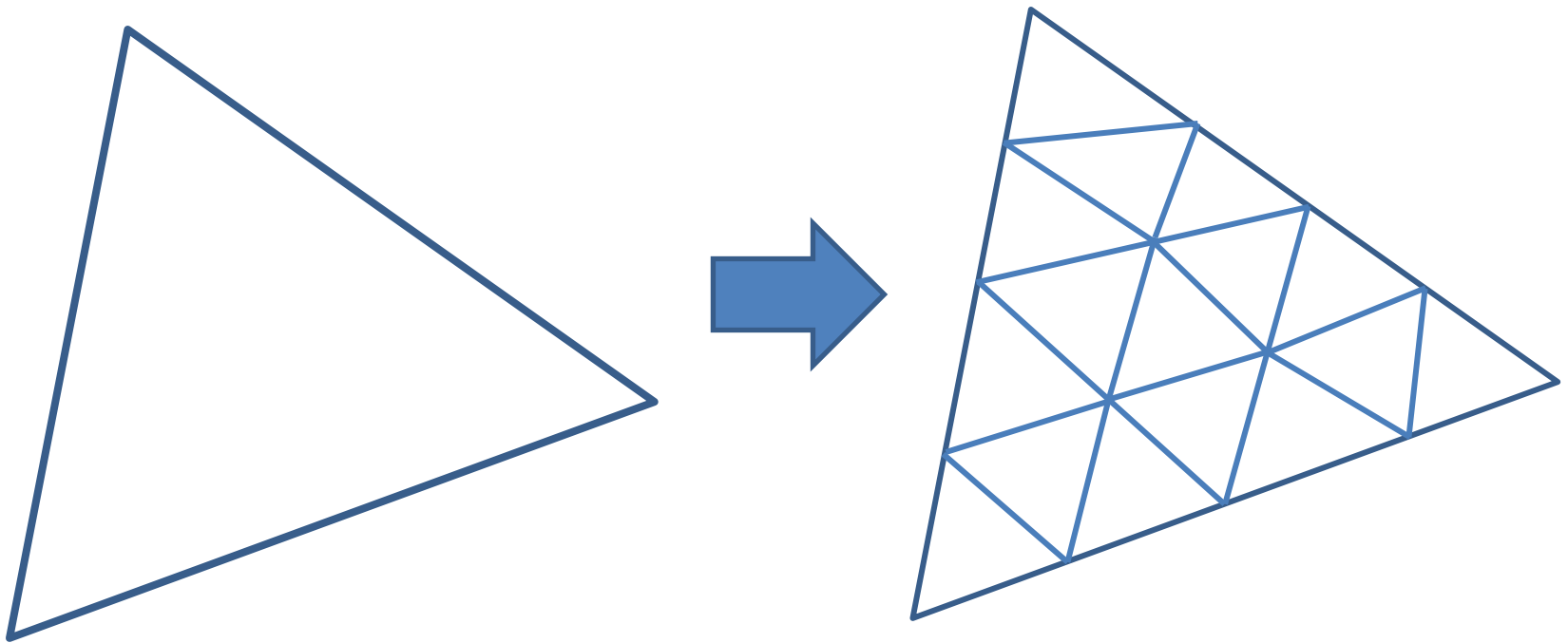
Фонг



Гуро

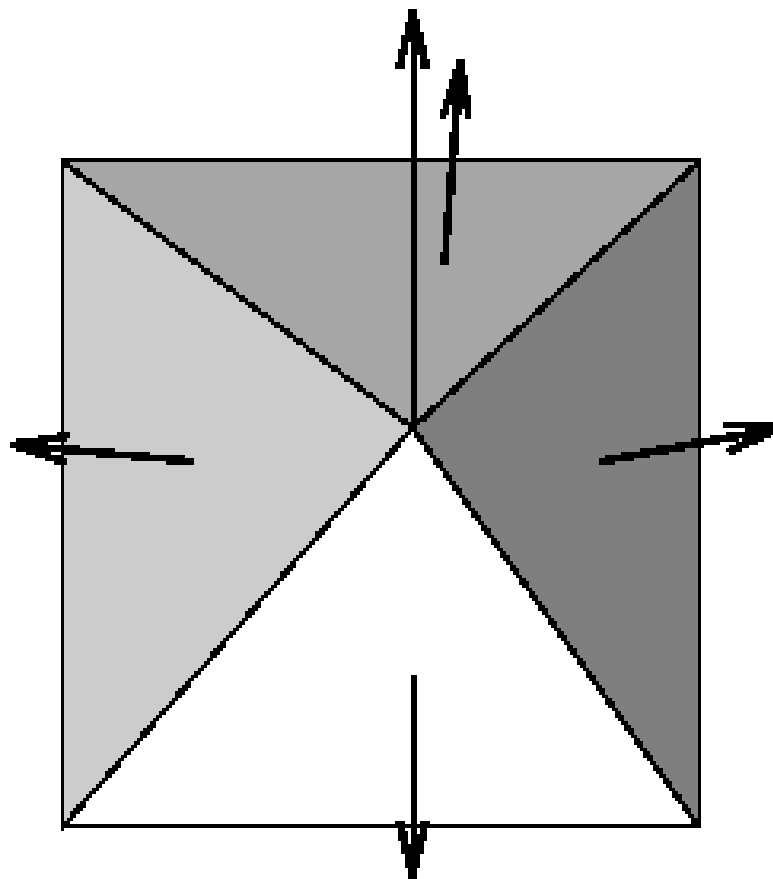
Решение проблемы закраски Гуро: подразбиение полигонов

Увеличивает сложность геометрии



Вычисление нормалей в вершинах

Нормали в вершинах
вычисляются
усреднением
нормалей смежных
граней

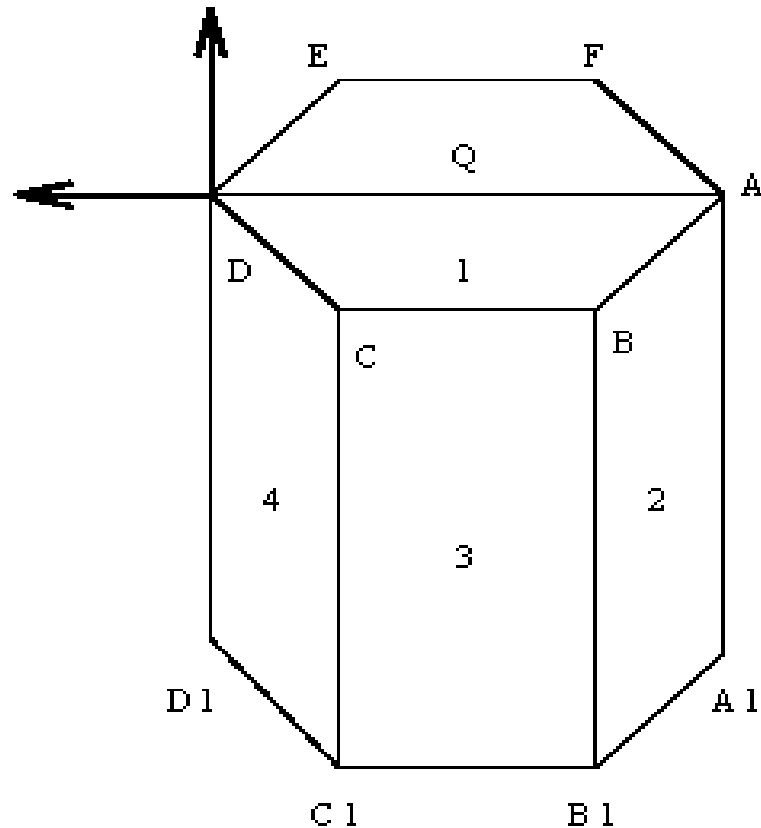


Для корректной закраски на стыках поверхности необходимо «клонирование» вершин

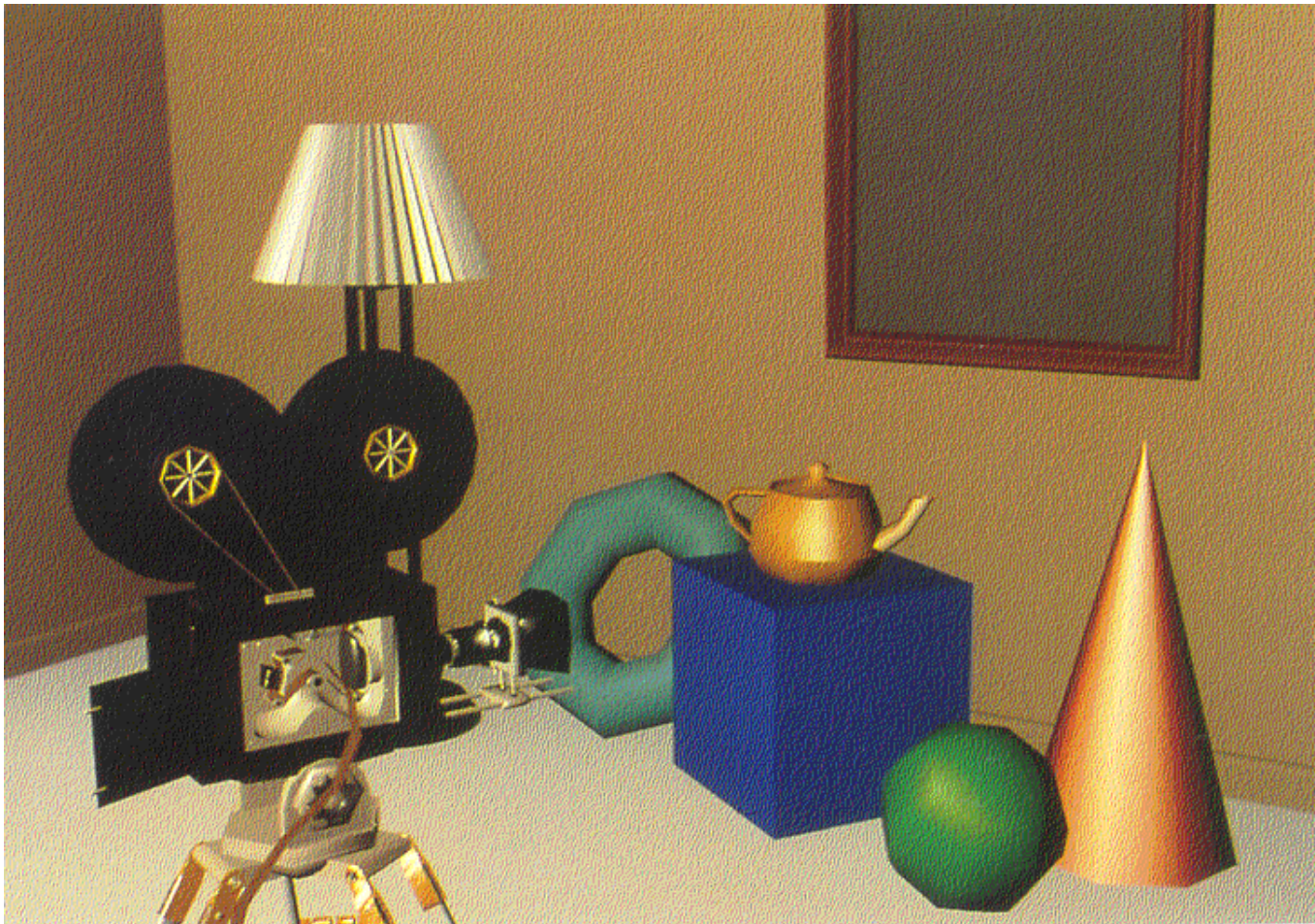
В вершине D нужно иметь две нормали:

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

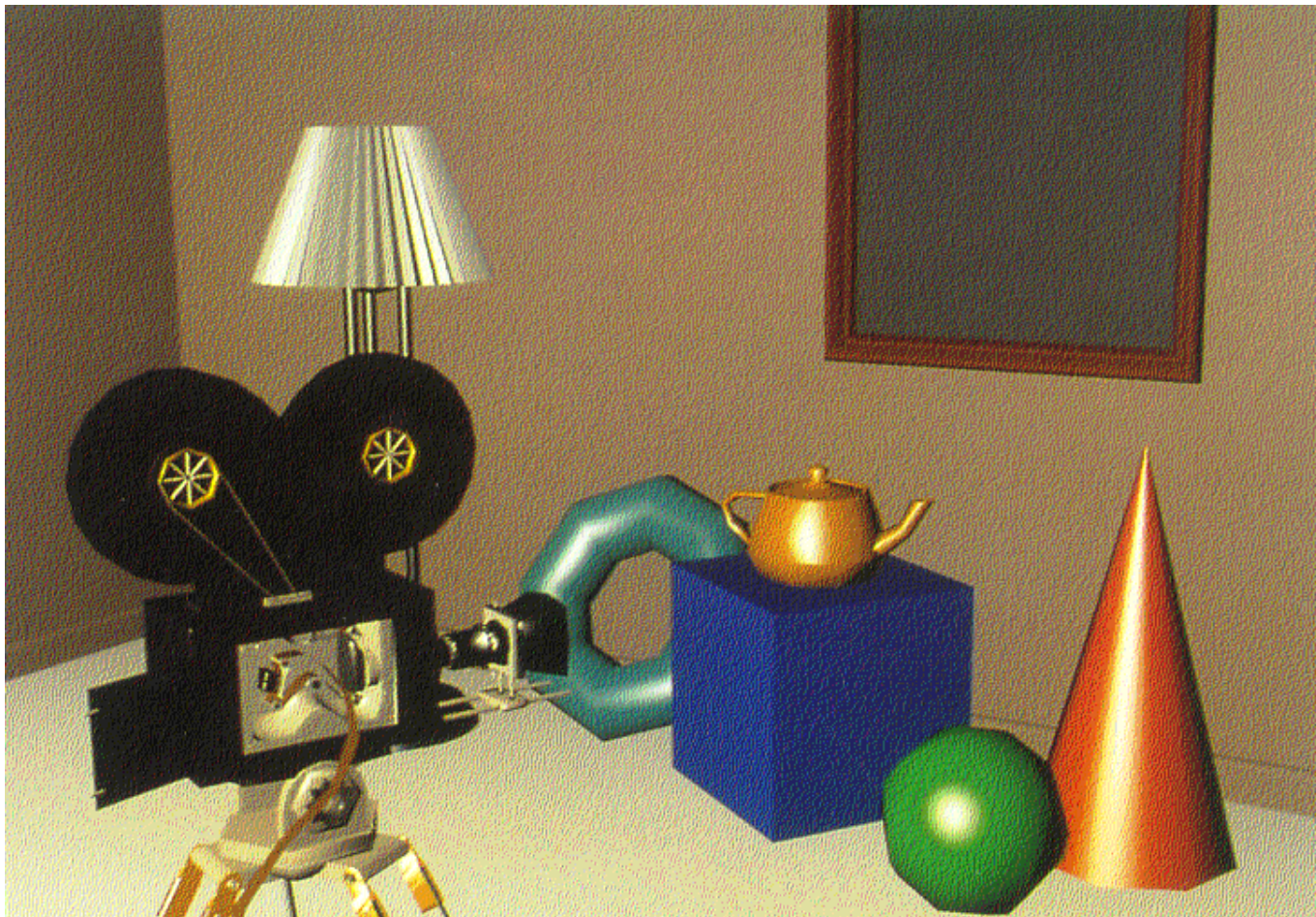
На острых ребрах нормали дублируются



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

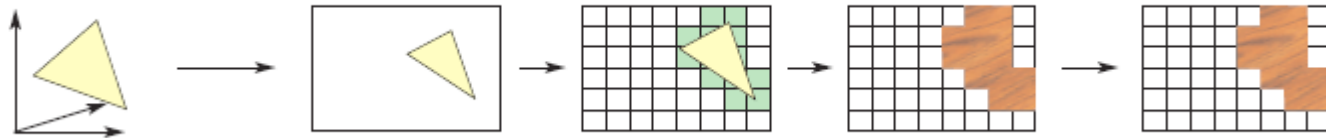
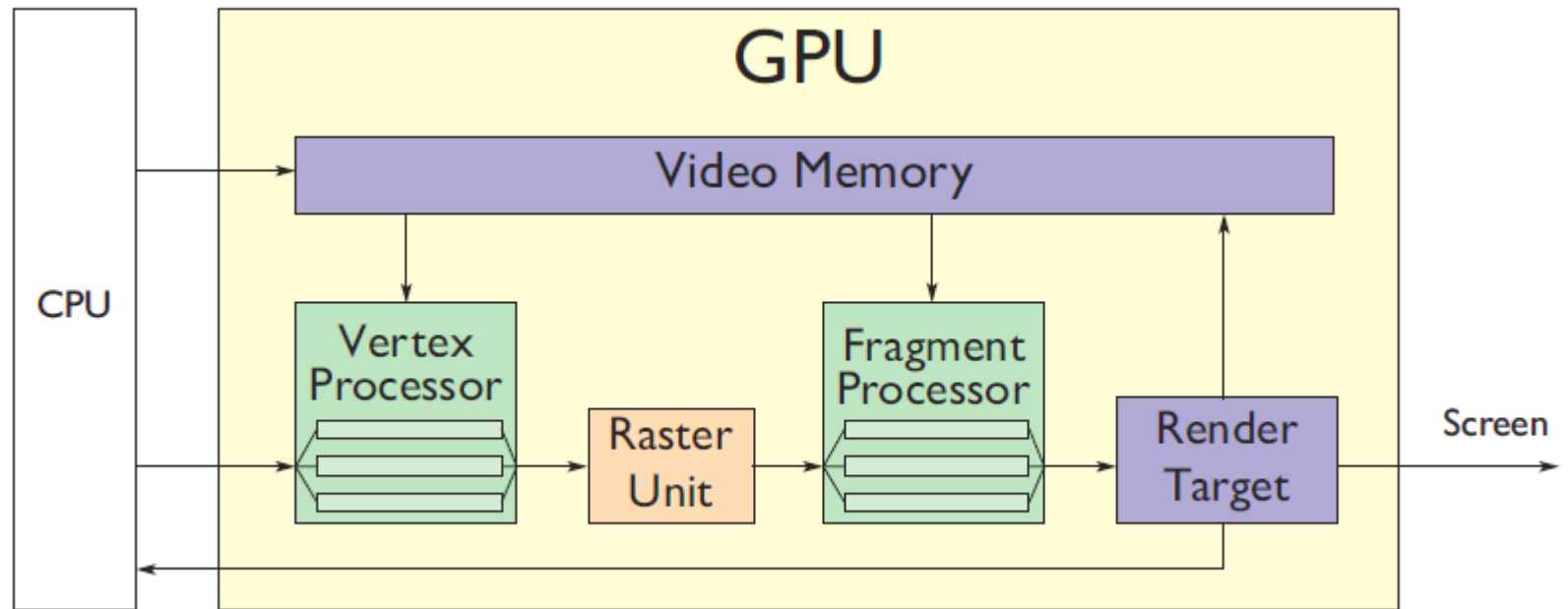


Растеризация. Закраска Фонга и Гуро



Освещение в OpenGL

Особенности освещения в OpenGL



Пример: вершинный шейдер

```
#version 330 core
```

```
uniform mat4 projectionMatrix;  
uniform mat4 modelViewMatrix;  
uniform mat4 viewMatrix;  
uniform mat3 normalMatrix;
```

```
in vec3 position;  
in vec3 normal;
```



```
glm::mat3 mtxNormal =  
glm::inverseTranspose(glm::mat3(mtxModelView));
```

```
out vec3 fragmentNormal;  
out vec3 fragmentEye;  
out vec3 lightLocationEye;
```

```
const vec4 lightLocation = vec4(0., 100., 0., 1.);
```

Пример: вершинный шейдер

```
void main(void)
{
    fragmentEye = (modelViewMatrix * vec4(position, 1.0)).xyz;
    fragmentNormal = normalMatrix * normal;
    lightLocationEye = (viewMatrix * lightLocation).xyz;

    gl_Position = projectionMatrix * modelViewMatrix *
                   vec4(position, 1.0);
}
```


Пример: фрагментный шейдер

```
#version 330 core
```

```
in vec3 fragmentNormal;  
in vec3 fragmentEye;  
in vec3 lightLocationEye;  
out vec4 fragmentColor;
```

```
uniform vec4 materialKd;
```

```
const vec4 ka=  vec4(0.05, 0.05, 0.05, 1);  
const vec4 ks = vec4(0.4, 0.4, 0.4, 0.4);  
const float ke = 20;
```

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

Пример: фрагментный шейдер

```
void main(void)
{
    vec3 light = normalize(lightLocationEye - fragmentEye);
    vec3 normal = normalize(fragmentNormal);
    vec3 eye = normalize(fragmentEye);

    float diffuseIntensity = clamp(max(dot(normal, light), 0.0),
                                   0.0, 1.0);
    vec3 reflection = normalize(reflect(light, normal));
    float specularIntensity = pow(clamp(max(dot(reflection, eye),
                                             0.0), 0.0, 1.0), ke );
    fragmentColor = ka + materialKd * diffuseIntensity +
                    ks * specularIntensity;
}
```

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 дискретизированного примитива.
- Заливки Гуро и Фонга