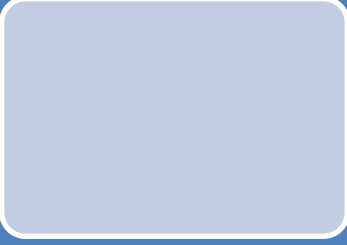


Глобальное освещение. Трассировка лучей. Излучательность.

Алексей Викторович Игнатенко
Лаборатория компьютерной графики и
мультимедиа
ВМК МГУ



Лекция посвящена обзору двух подходов к синтезу изображений: излучательности и трассировке лучей



Понятие о глобальном освещении и других сложных оптических эффектах



Трассировка лучей



Излучательность

Графический процесс: типовая последовательность применения алгоритмов



При выборе алгоритма надо выбрать между скоростью и качеством

Скорость



Растеризация

Качество




Трассировка
лучей/фотонов
Излучательность

Некоторые оптические эффекты крайне сложно визуализировать средствами метода растеризации

- Отражения
- Преломления
- Тени
- Вторичное освещение
- Сложные материалы

Лекция посвящена обзору двух подходов к синтезу изображений: излучательности и трассировке лучей



Понятие о глобальном освещении и других сложных оптических эффектах



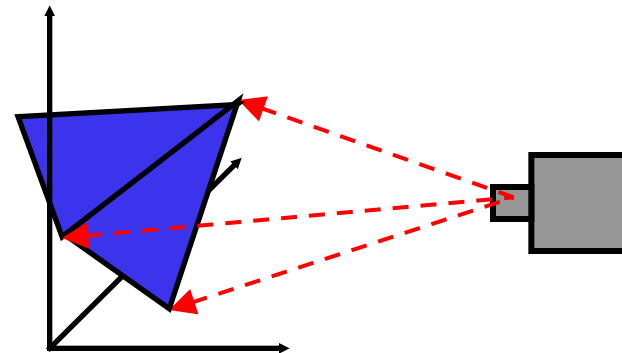
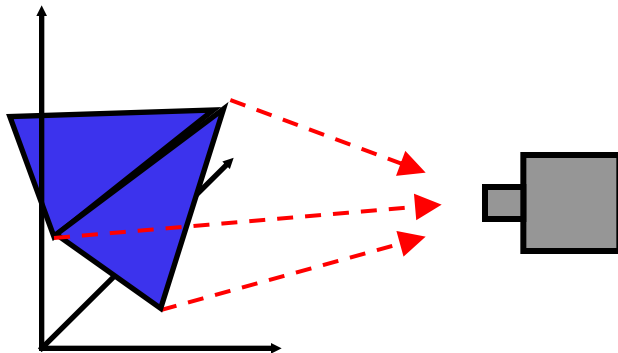
Трассировка лучей



Излучательность

Растреризация и трассировка лучей – два основных подхода к синтезу изображений

Два основных подхода



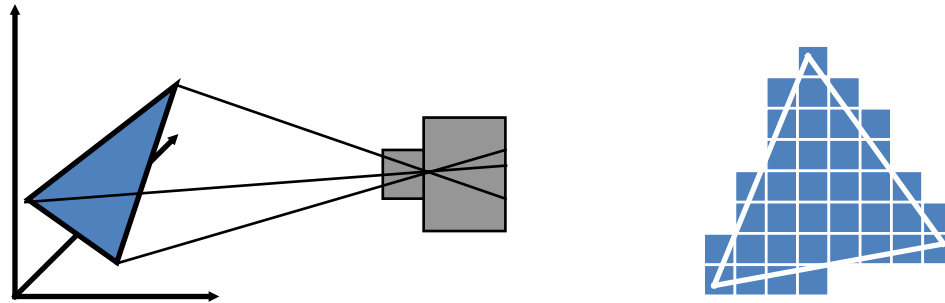
Растреризация:

Прямая проекция геометрии

Трассировка лучей:

Обратная проекция пикселей
изображения

Растеризация: быстро, но каждый треугольник обрабатывается отдельно



Последовательная обработка всех треугольников по одному

- Сложно (неэффективно) работать более, чем с одним треугольником за раз
- Но большинство реалистичных эффектов требуют доступа ко всей сцене: тени, отражения, глобальное освещение!

Трассировка лучей: моделируем распространение света вдоль лучей

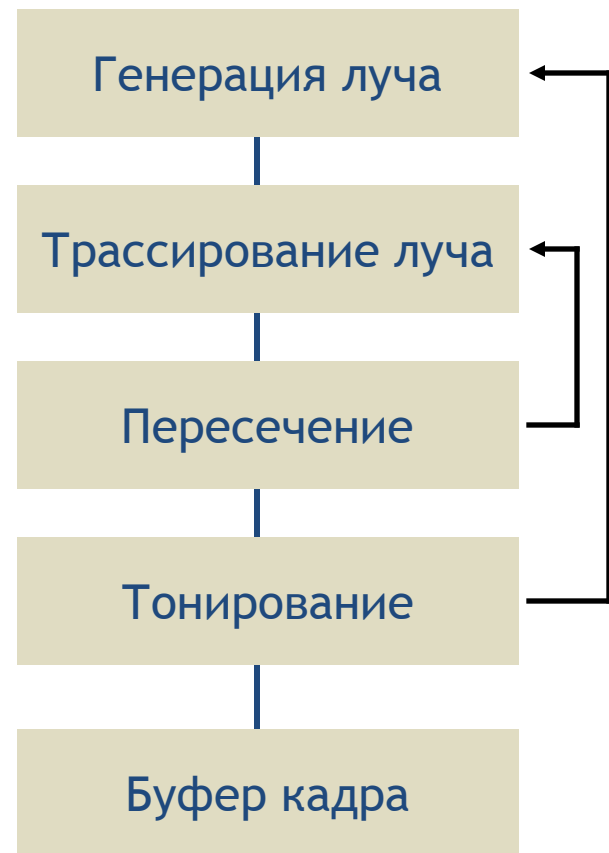
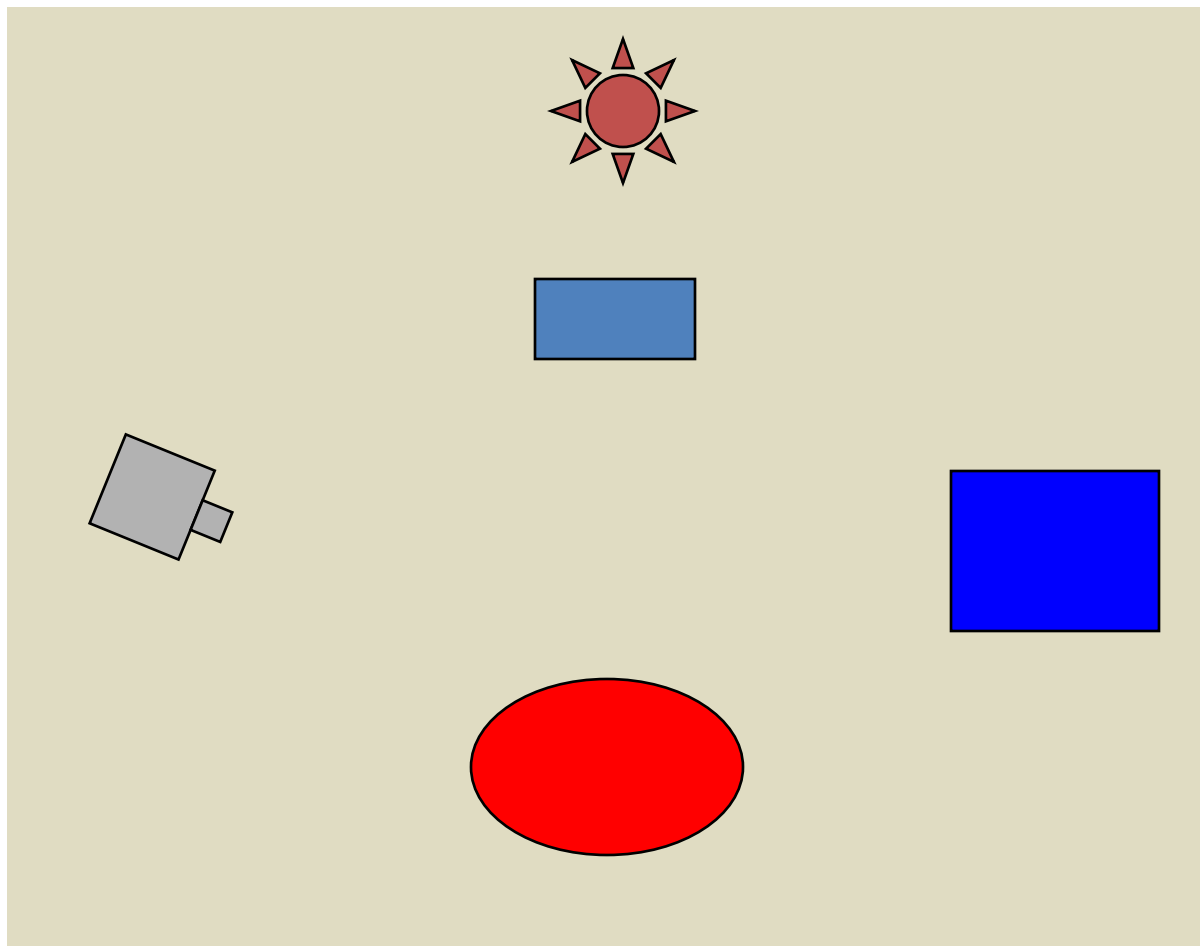
Прямая трассировка: свет идет из источников света

- Плюсы: точная физическая модель
- Минусы: нам нужен только свет, попадающий в камеру
=> очень неэффективно

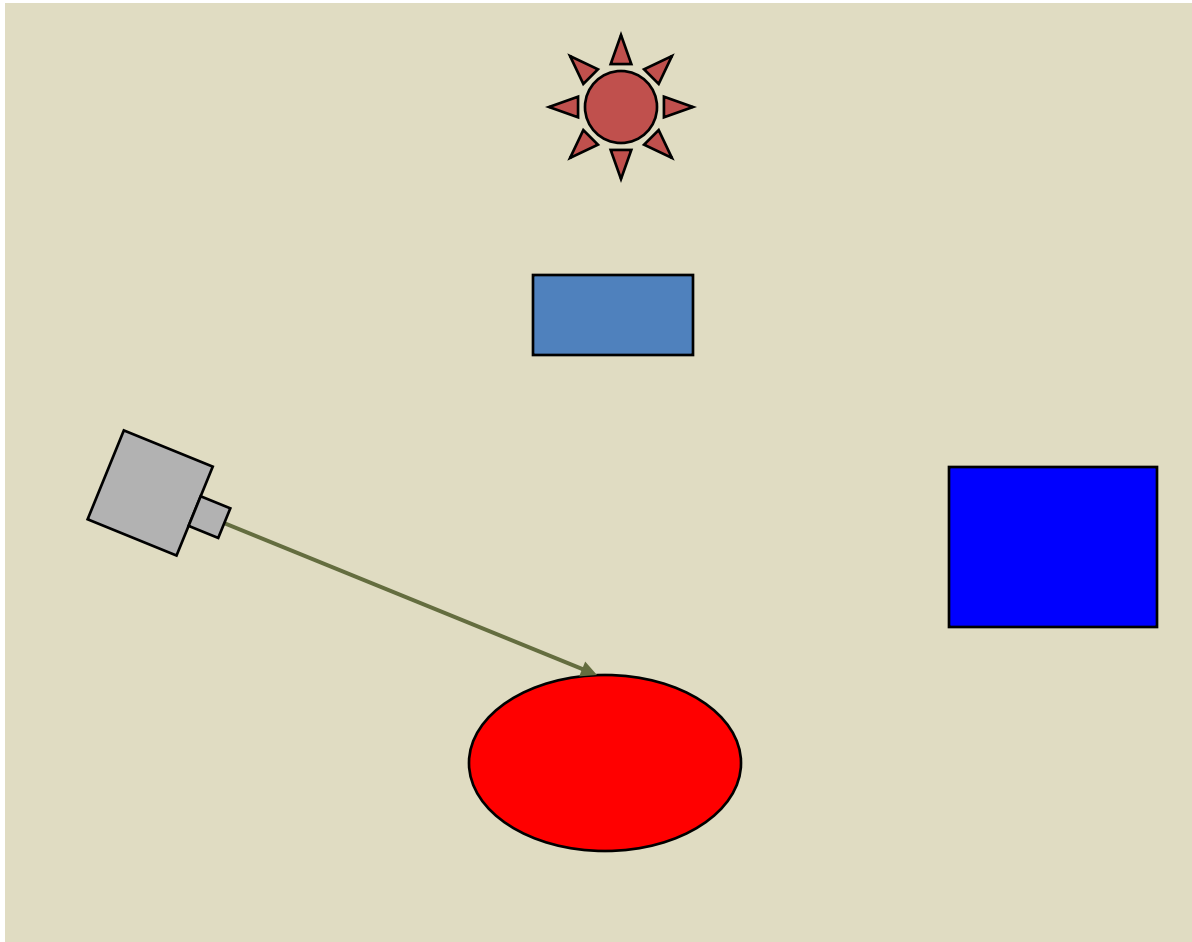
Из физики известно, что распространение света обратимо
=> можно проследить (протрассировать) свет из каждого пикселя.

Обратная трассировка: «свет» идет из каждого пикселя изображения

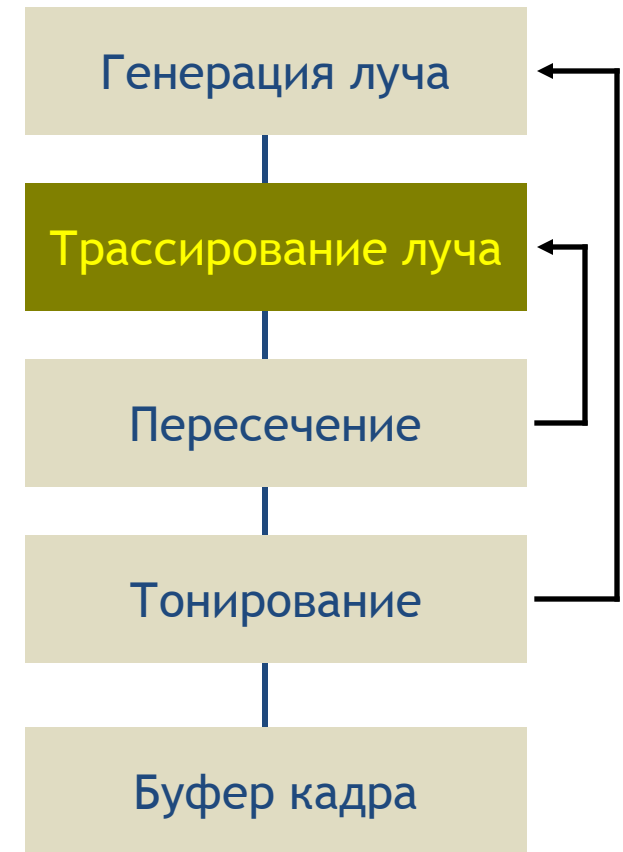
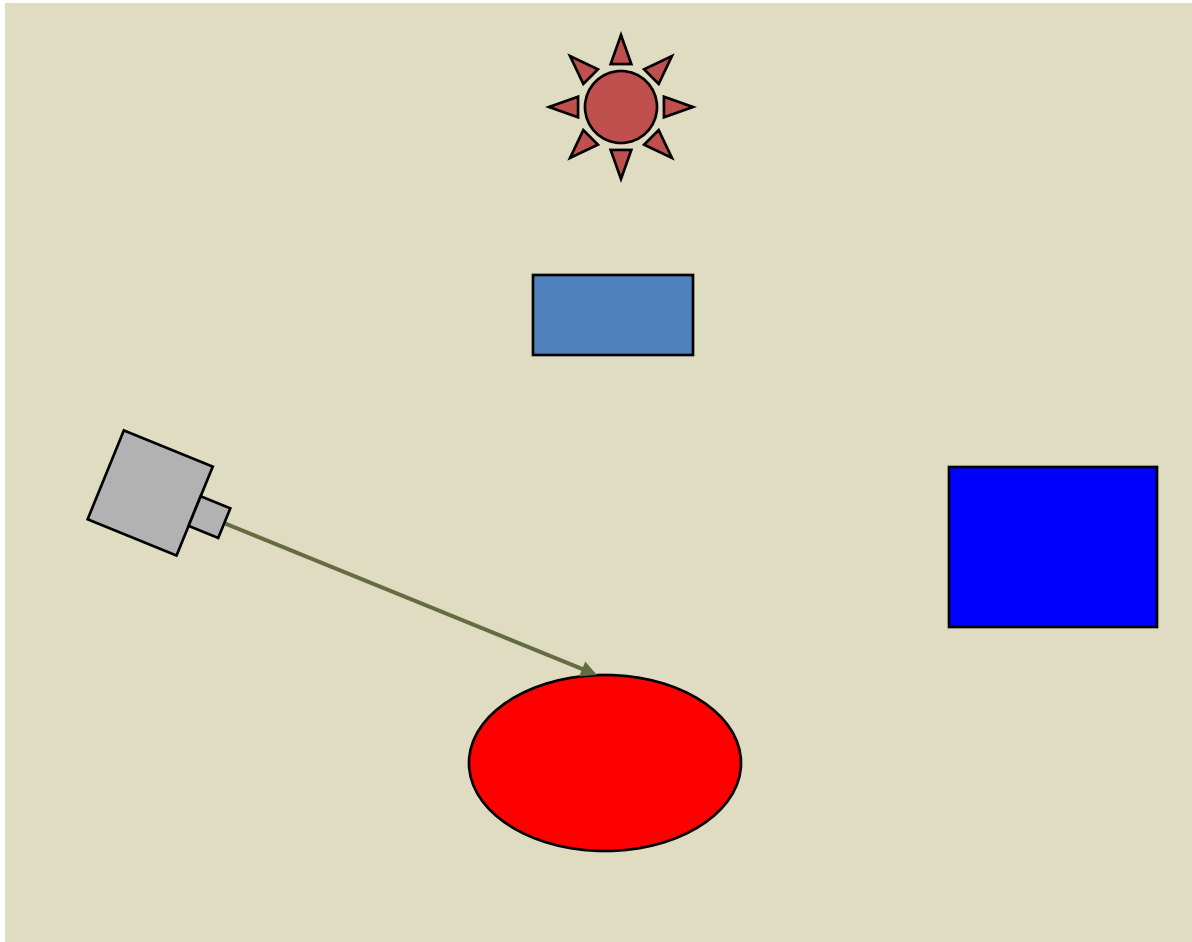
Трассировка лучей



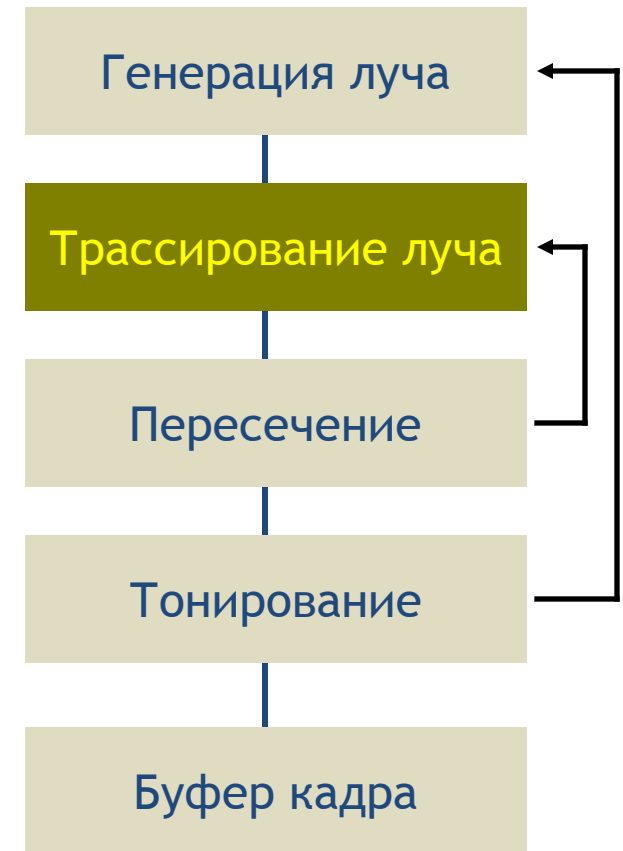
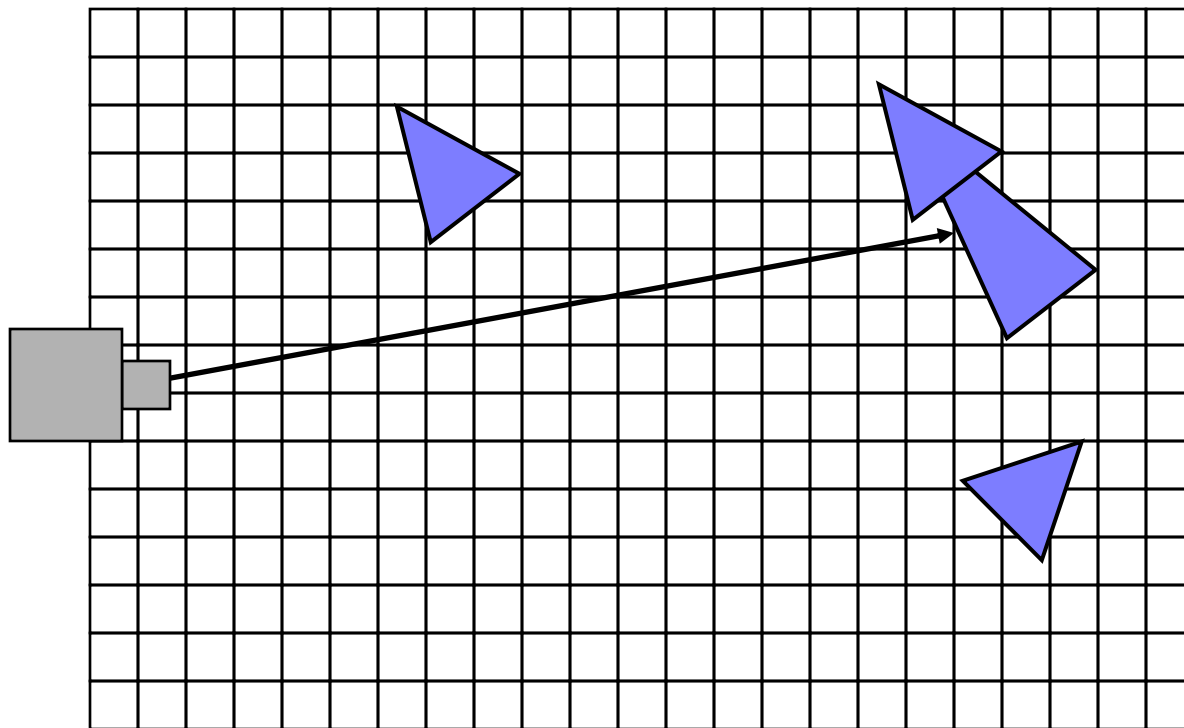
Трассировка лучей: генерируем луч через каждый пиксель изображения



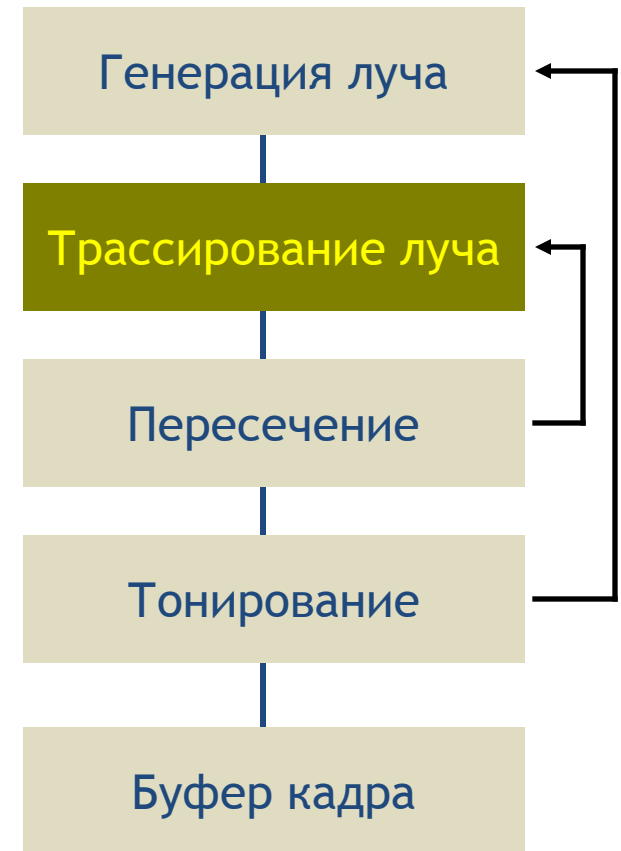
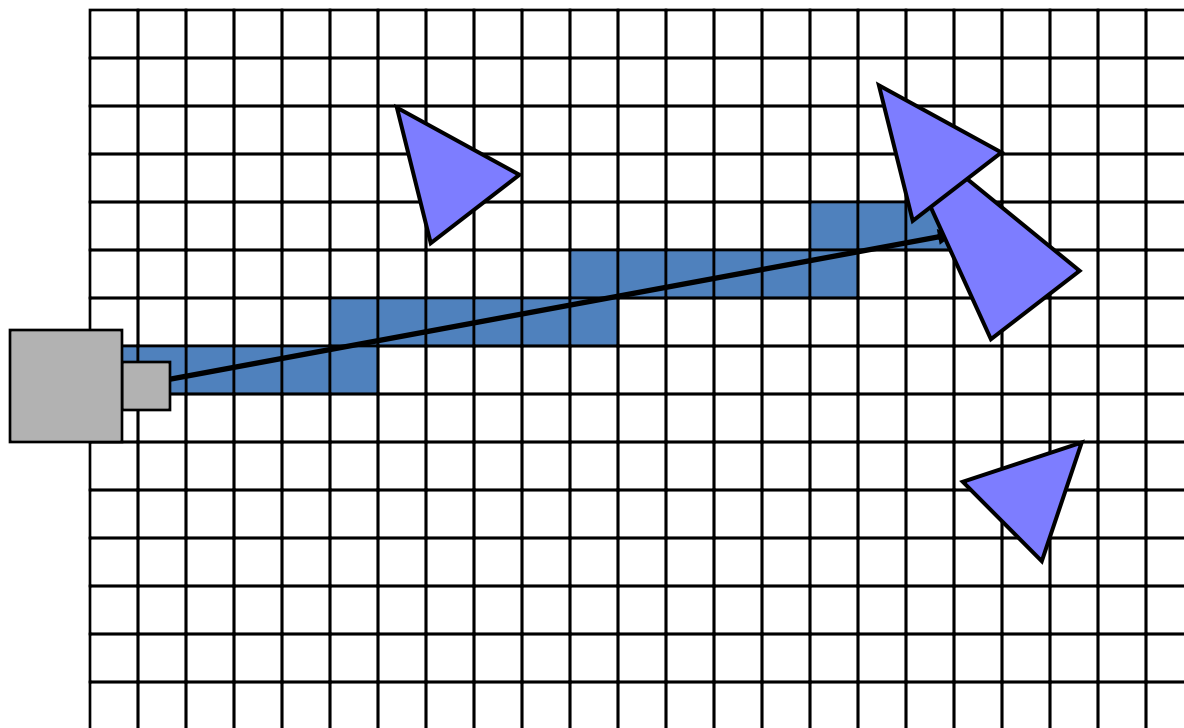
Трассировка лучей: далее необходимо найти пересечения луча с поверхностью сцены



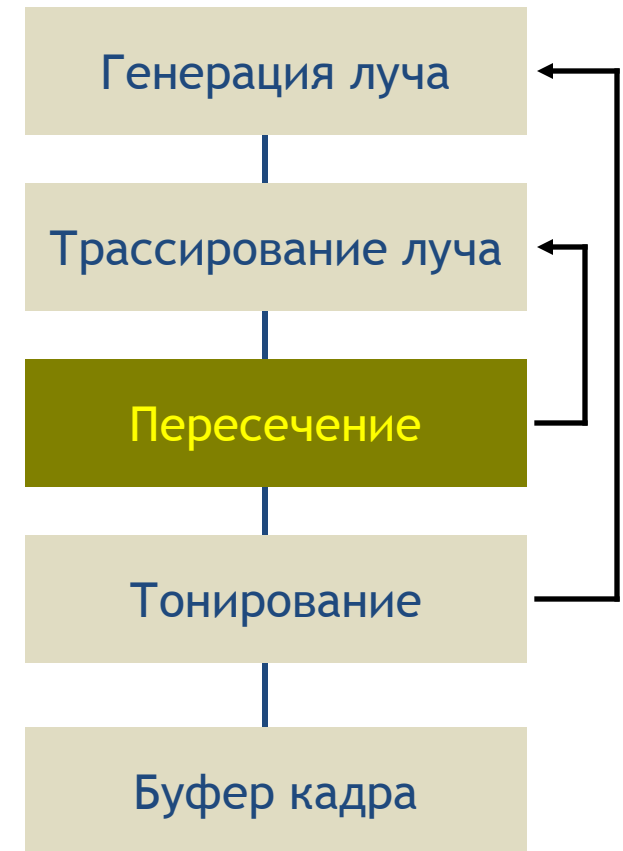
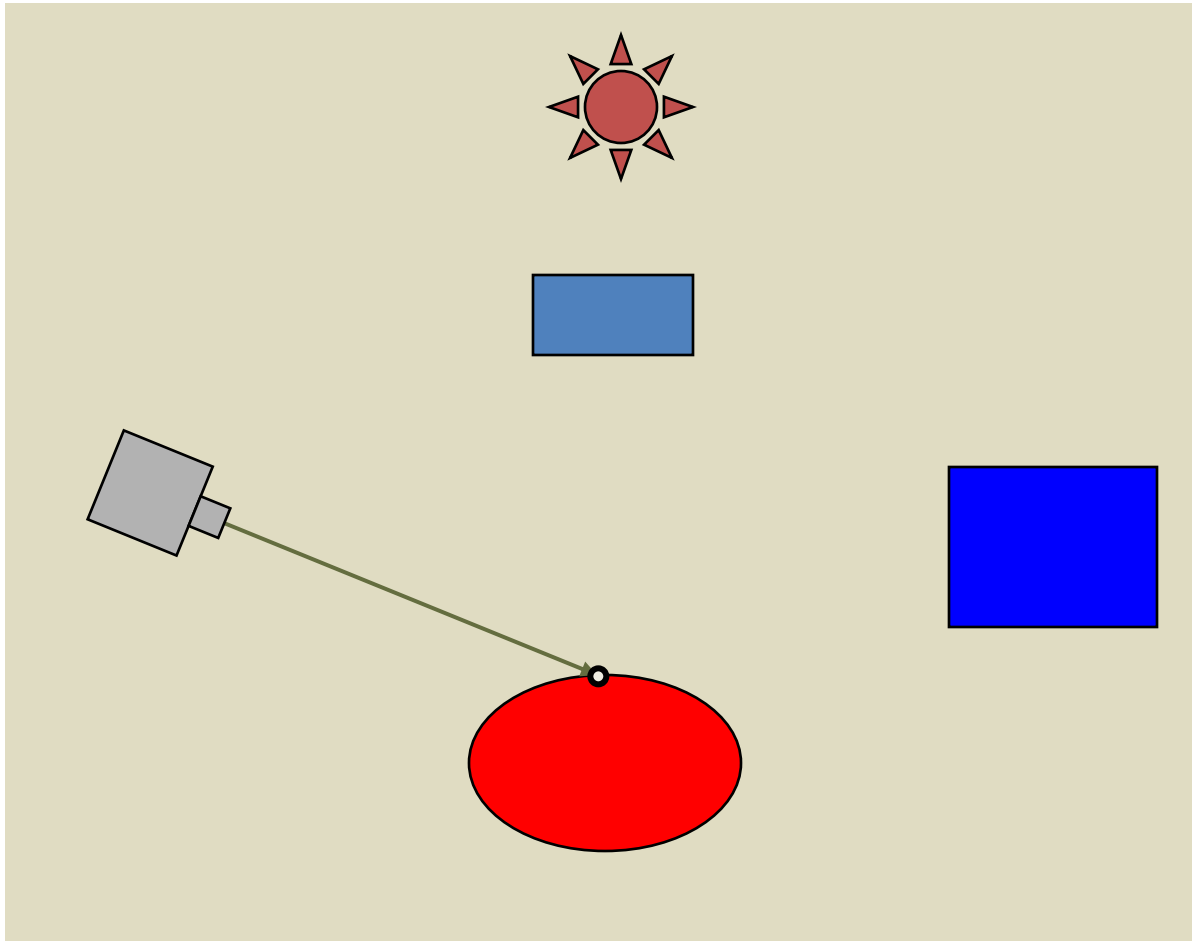
Пространственные структуры позволяют быстро ограничить множество примитивов



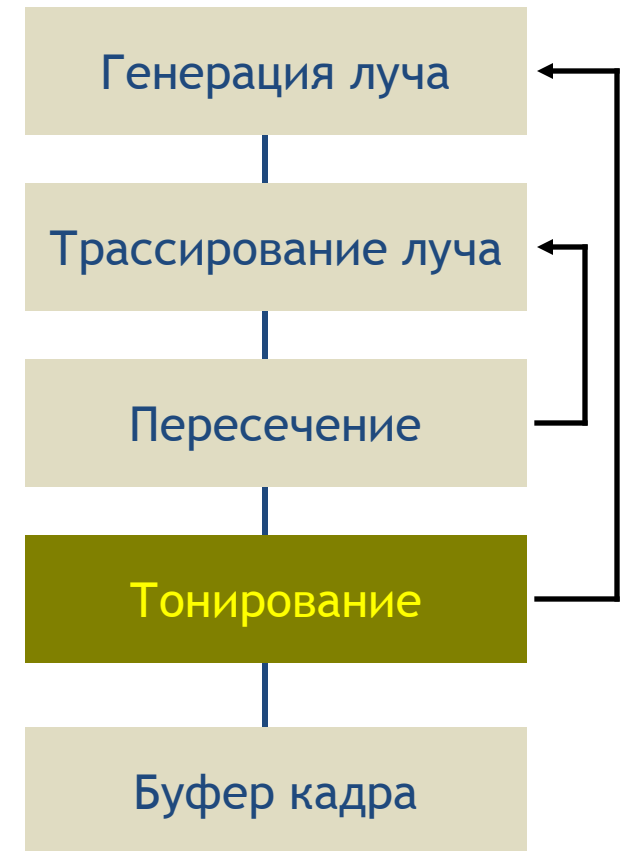
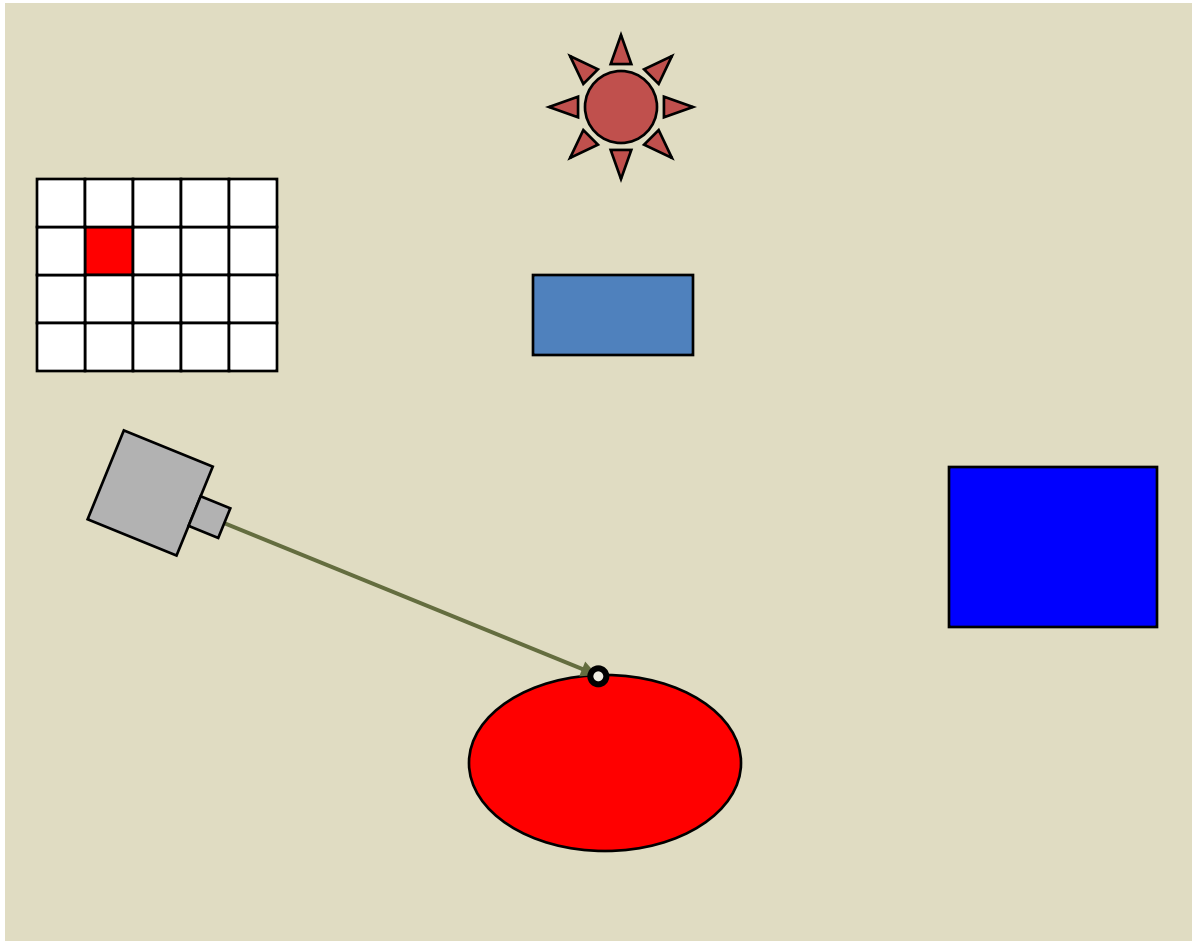
Пример: трассировка луча по пространственной сетке



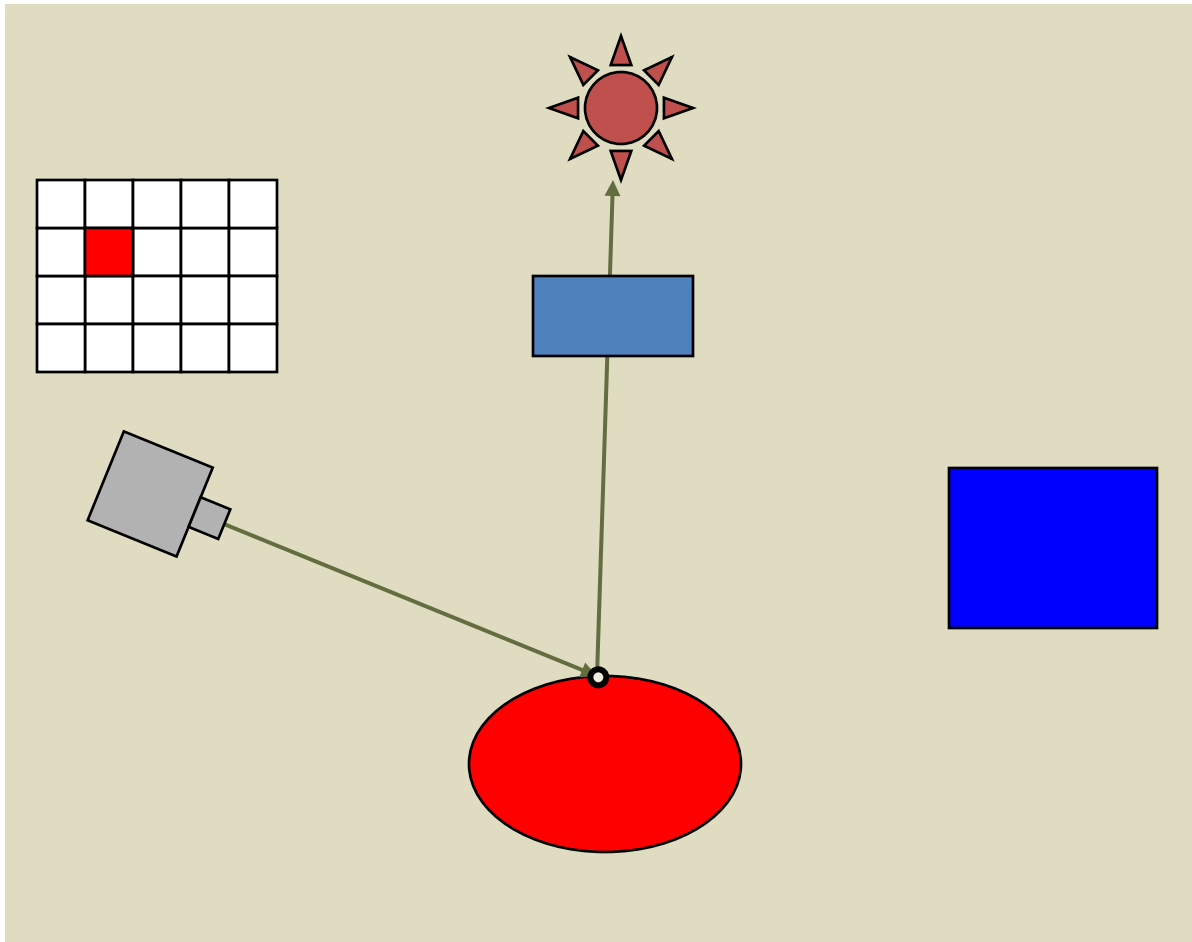
Трассировка лучей: необходимо найти точное положение пересечения с объектом



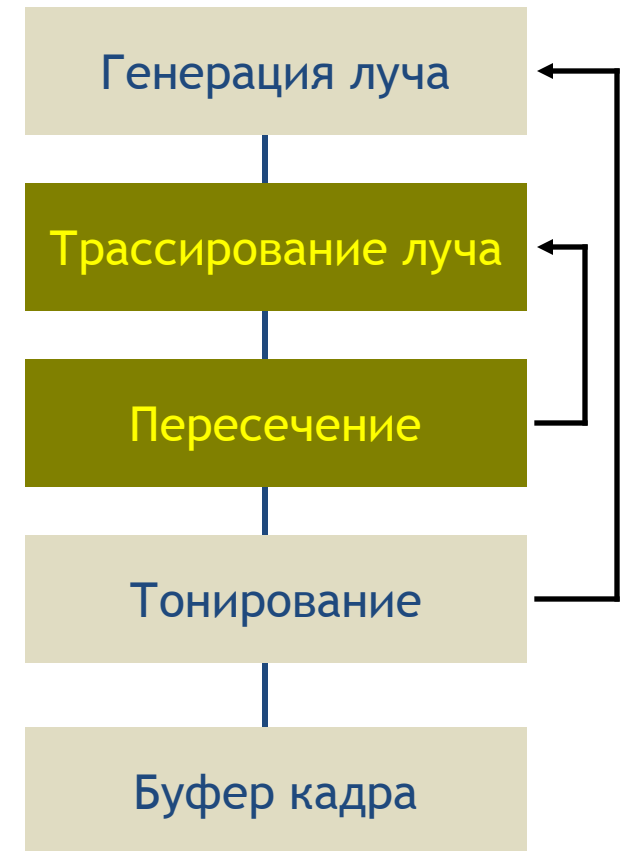
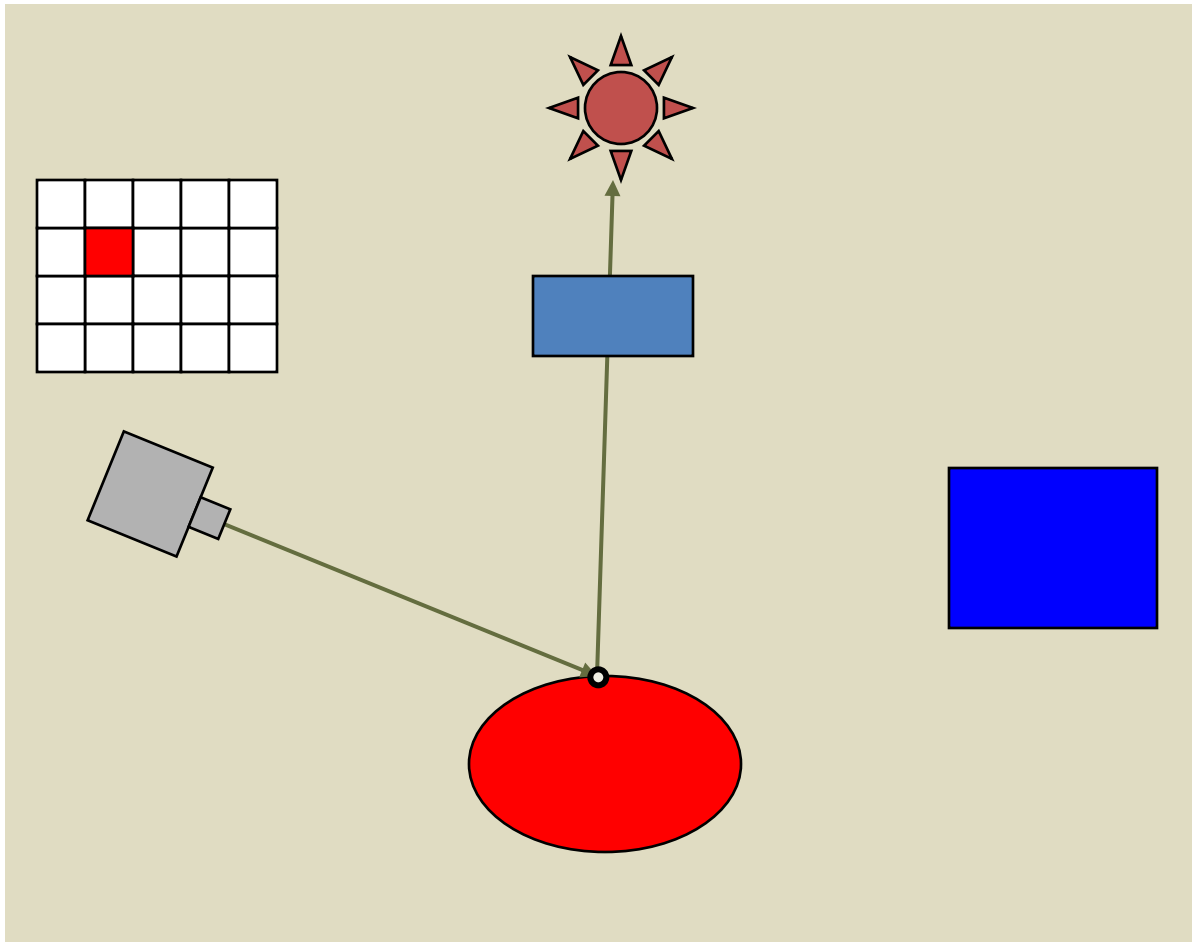
Трассировка лучей: получение цвета пикселя



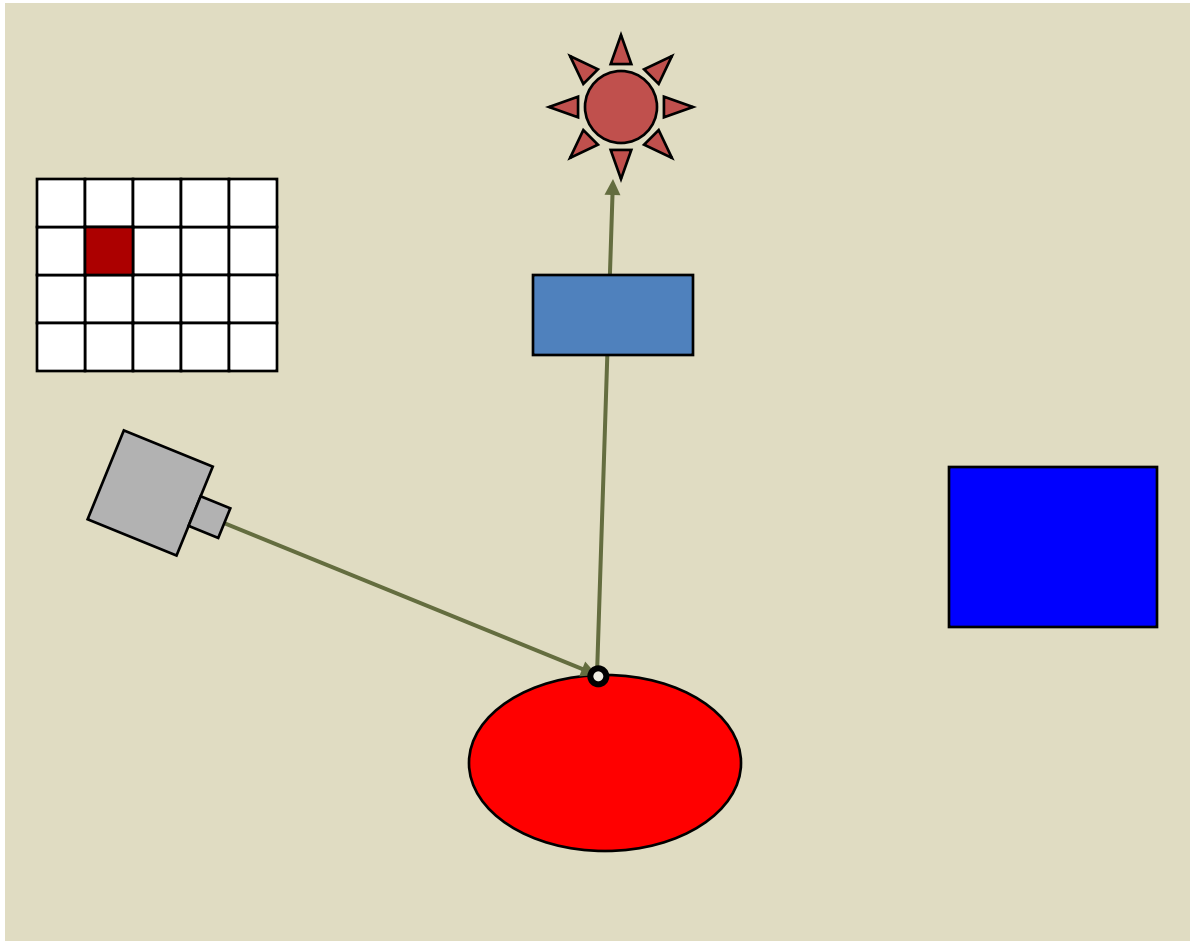
Трассировка лучей: для получения цвета пикселя бросаем дополнительные лучи



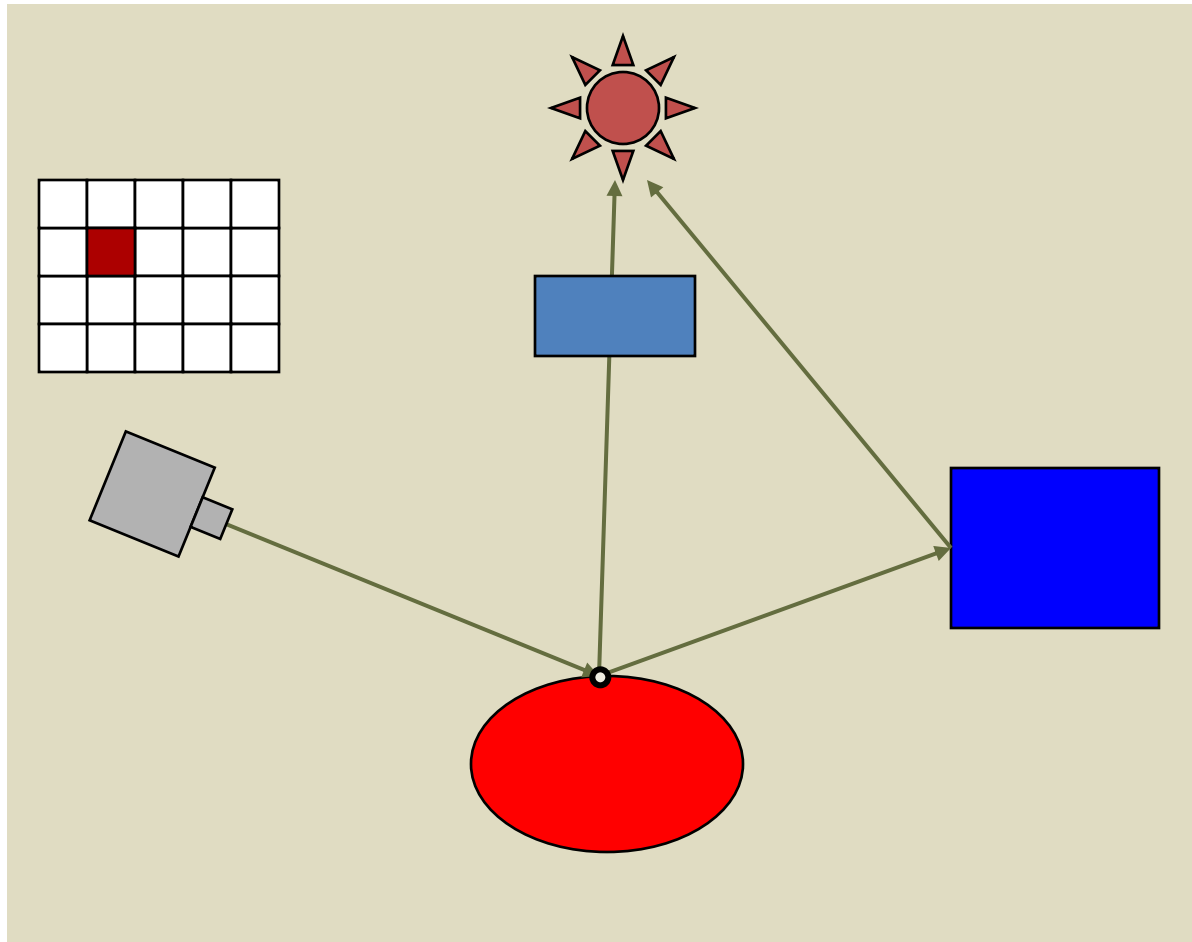
Трассировка лучей: для получения цвета пикселя бросаем дополнительные лучи



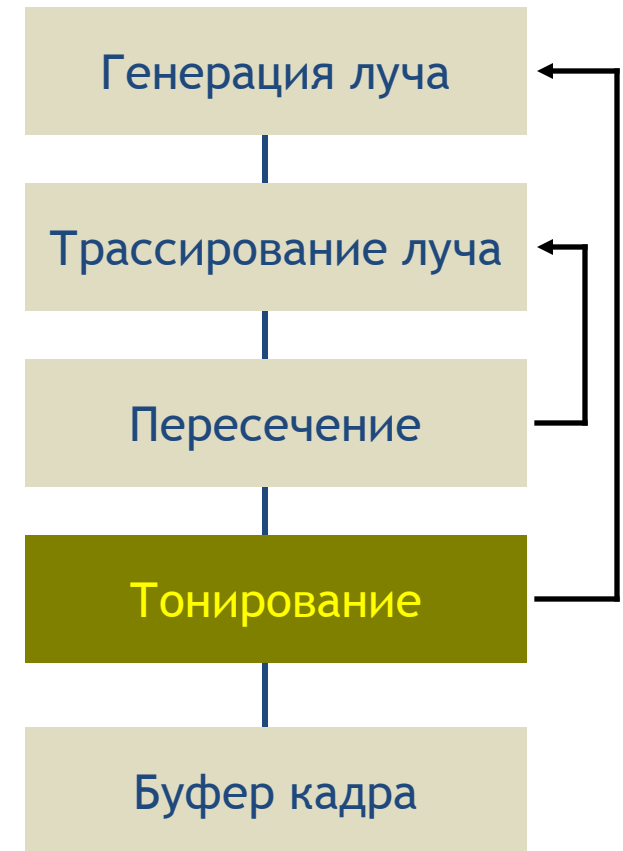
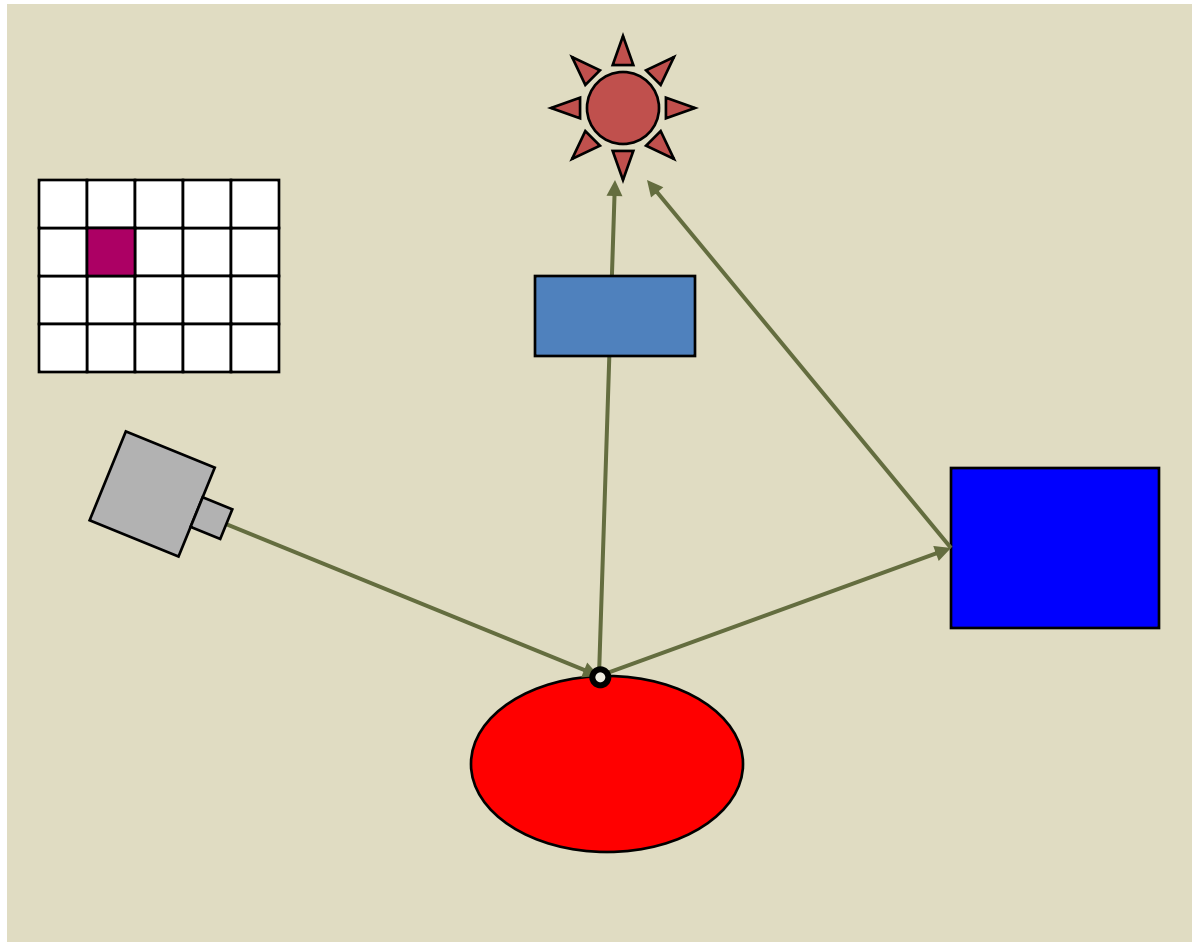
Трассировка лучей: для получения цвета пикселя бросаем дополнительные лучи



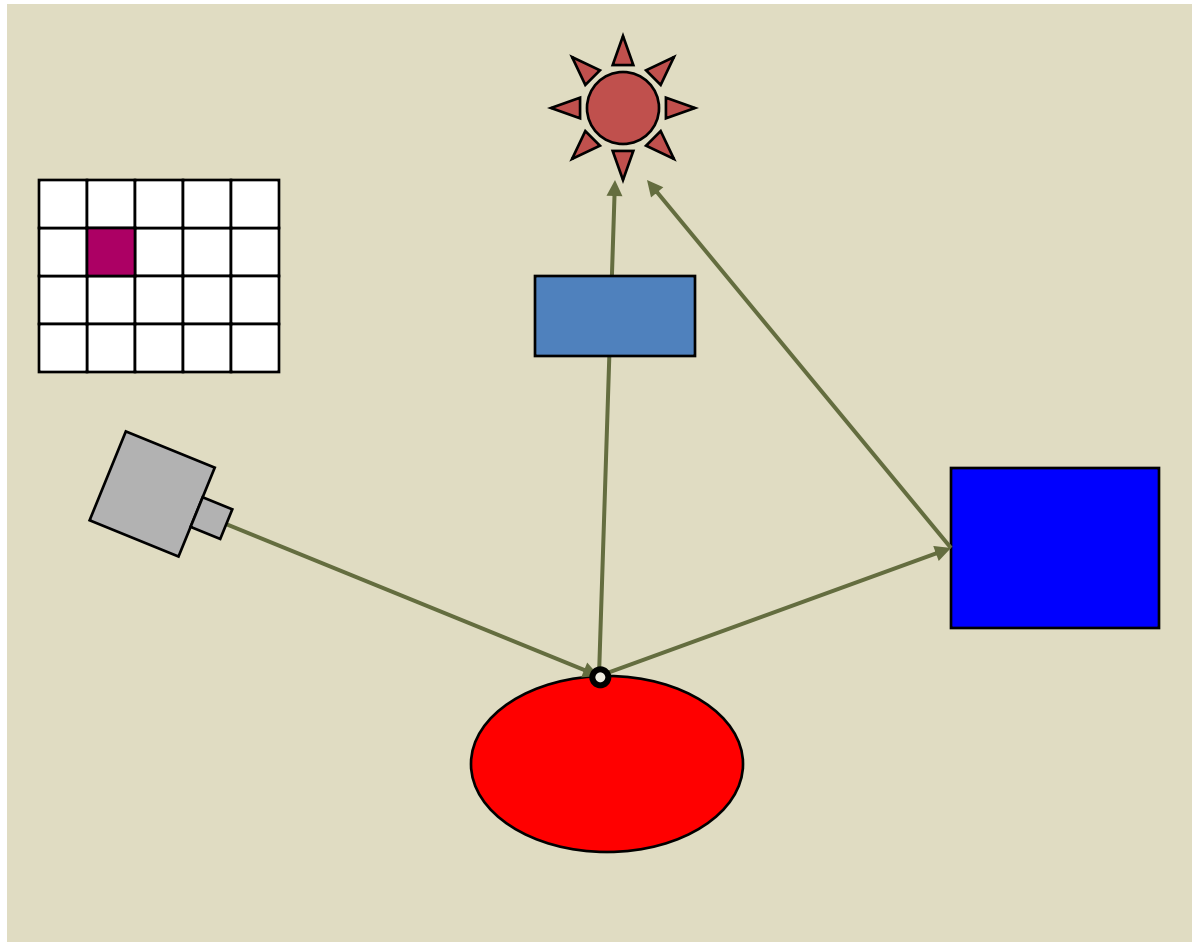
Трассировка лучей: для получения цвета пикселя бросаем дополнительные лучи



Трассировка лучей: для получения цвета пикселя бросаем дополнительные лучи



Трассировка лучей: записываем полученный цвет в пиксель и переходим к следующему

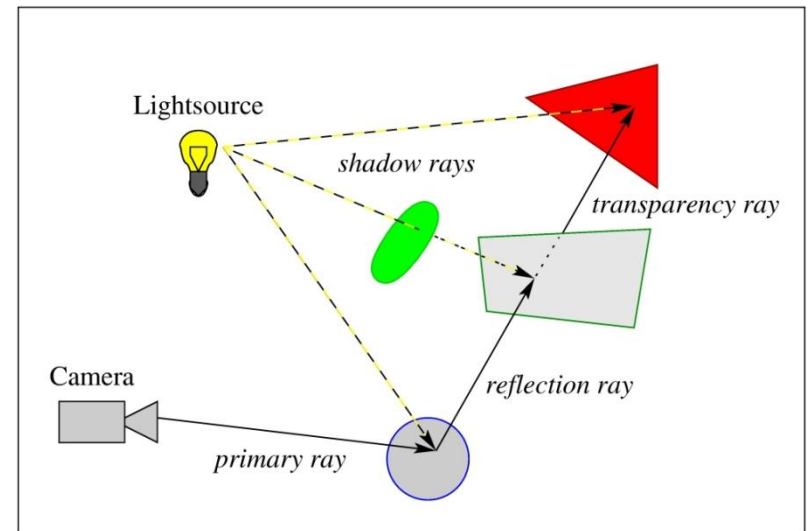


Псевдокод простой трассировки лучей (Whitted)

```
for each pixel of the screen {
  Final color = 0;
  Ray = { starting point, direction };
  Repeat {
    for each object in the scene {
      determine closest ray object/intersection;
    }
    if intersection exists {
      for each light in the scene {
        if the light is not in shadow of another object {
          add this light contribution to computed color;
        }
      }
    }
    Final color = Final color + computed color * previous reflection factor;
    reflection factor = reflection factor * surface reflection property;
    increment depth;
  } until reflection factor is 0 or maximum depth is reached;
}
```

Особенности трассировки лучей: глобальное освещение, вычисления по запросу

- Глобальное освещение
- Параллелизм
- Расширяемость
- Вычисления только по запросу
- Попиксельные операции



Ускорение трассировки

Пересечение луча со всеми объектами и сортировка для поиска ближайшего пересечения

Очень дорого!

- Ускорение алгоритма пересечения
Небольшой эффект

- Уменьшение количества пересечений

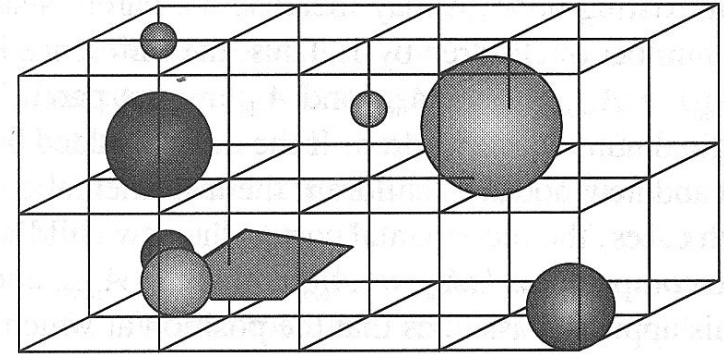
Разбиение пространства (часто иерархическое)

- Сетки, октодеревья, BSD и kd-деревья, деревья ограничивающих объемов
- 5D разбиение (позиция и направление)

Сетки (Grids): равномерное разбиение пространства

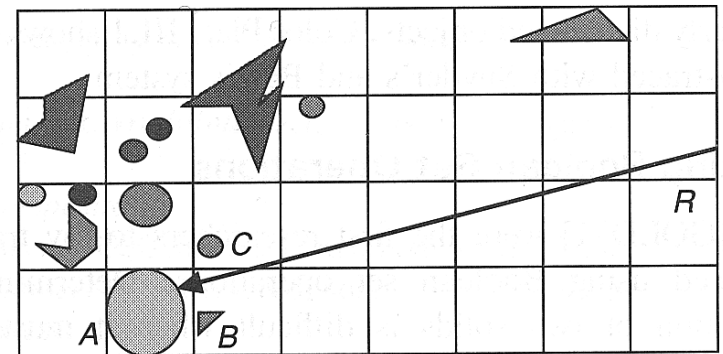
Построение сетки

- Начинаем с описывающего параллелепипеда
- Треугольники разбиваются по вокселям



Трассировка

- Алгоритм Брезенхема в 3D
- Останавливаемся, если пересечение найдено в текущем вокселе



Сетка: проблемы связаны с неадаптивностью разрешения

Обход сетки

- Перечисление вокселей вдоль луча
- Очень простой алгоритм, возможна аппаратная реализация

Разрешение сетки

- Очень сильно зависит от сцены
- Невозможна адаптация к локальной плотности примитивов
 - Проблема «Чайника на стадионе»
- Возможное решение: иерархические сетки

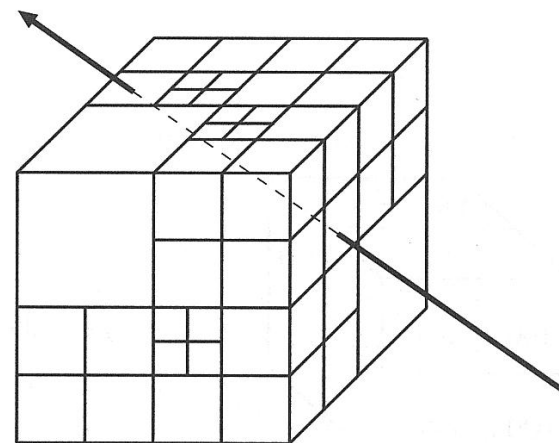
Октодерево: «иерархическая сетка»

Иерархическое разбиение пространства

- Адаптивное рекурсивное разбиение пространства на 8 равных частей

Проблемы

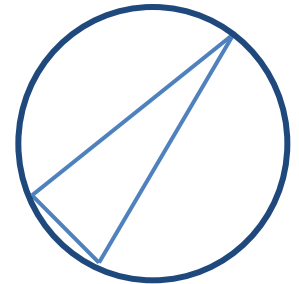
- Достаточно сложный алгоритм обхода
- Сложные регионы сходятся медленно



Описывающие объемы: нерегулярное разбиение пространства

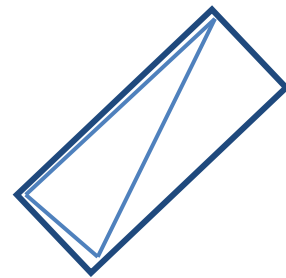
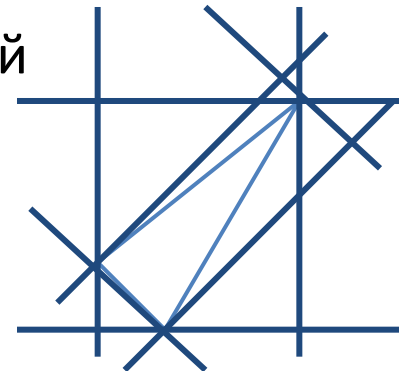
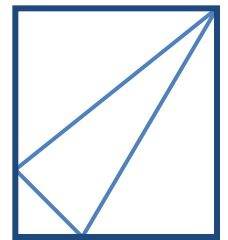
Идея

- Вычислять пересечение с объектом только если луч пересекает простой описывающий объем



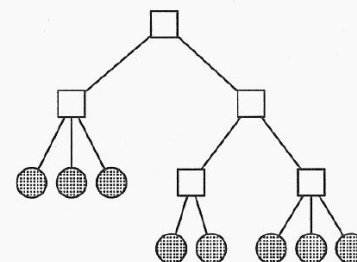
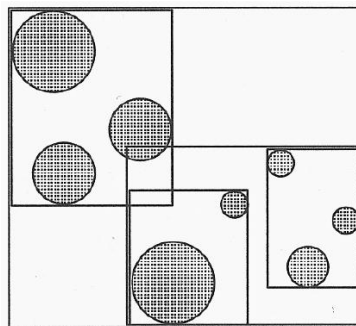
Возможные описывающие объемы:

- Сфера
- Выровненный по осям описывающий параллелепипед
- Описывающий параллелепипед



Иерархия описывающих сфер

- Идея:
 - Разбиваем рекурсивно



□ = Bounding Volume

● = Objekt der Szene

Преимущества:

- Очень хорошая адаптивность
- Эффективный обход $O(\log N)$

Проблемы

- Как располагать описывающие объемы?

BSP- и Kd-деревья: усложнение схемы октодерева для лучшей сходимости

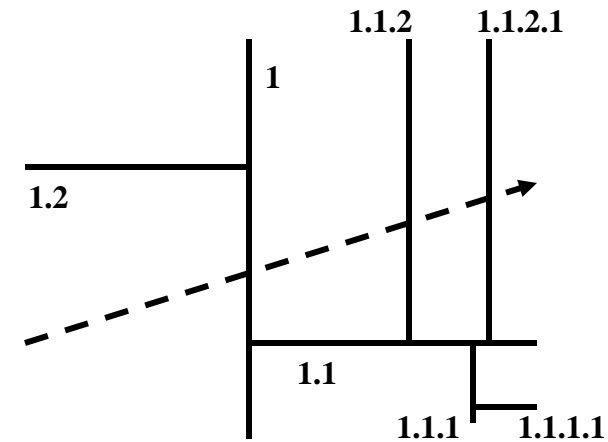
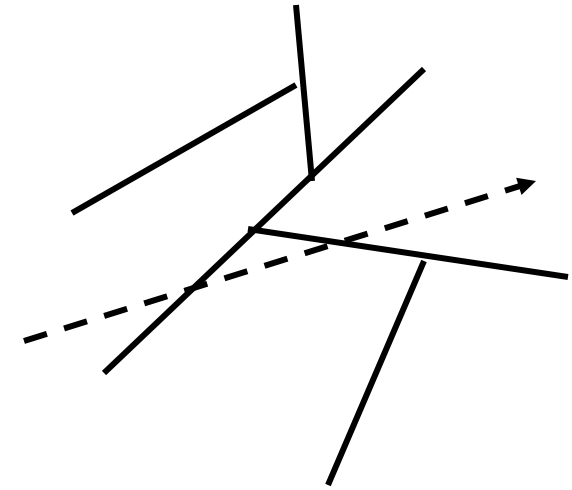
Рекурсивное разбиение пространства
на полупространства

Двоичное разбиение пространства
(BSP):

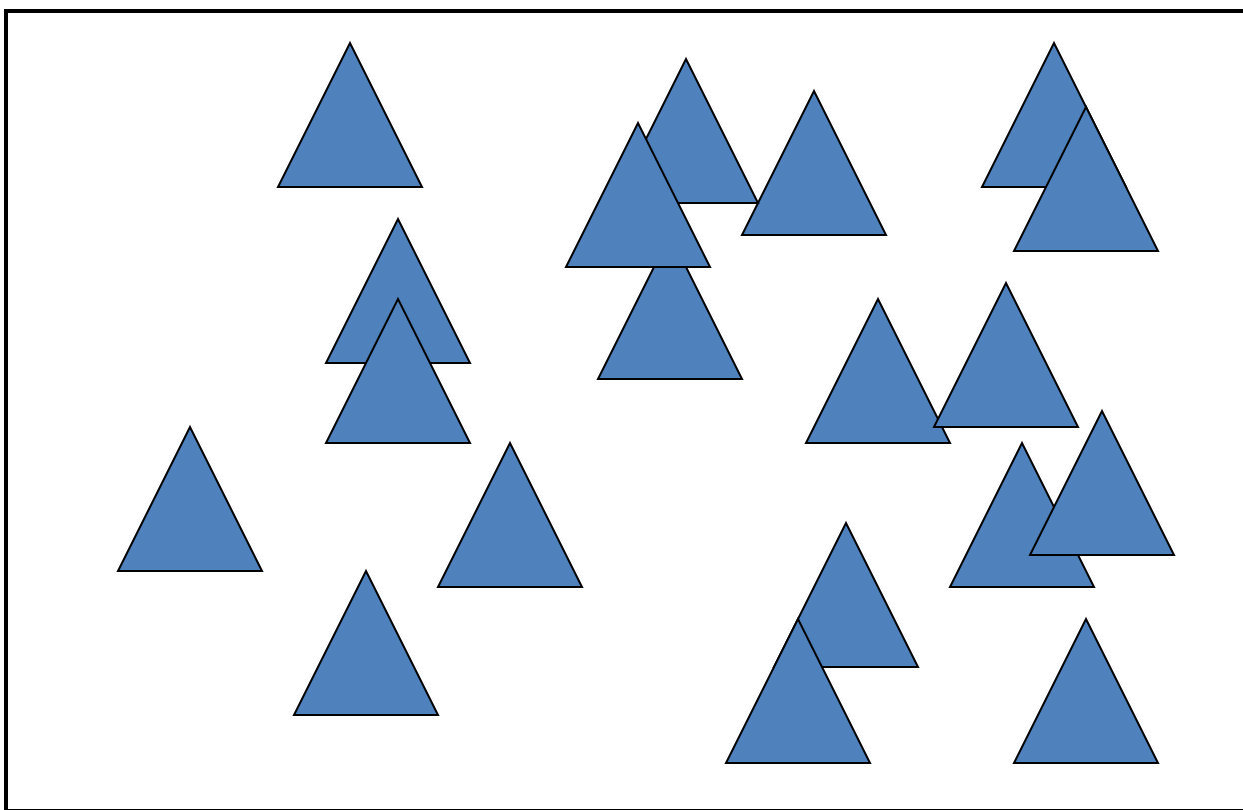
- Разбиение плоскостями в произвольных положениях

Kd-деревья

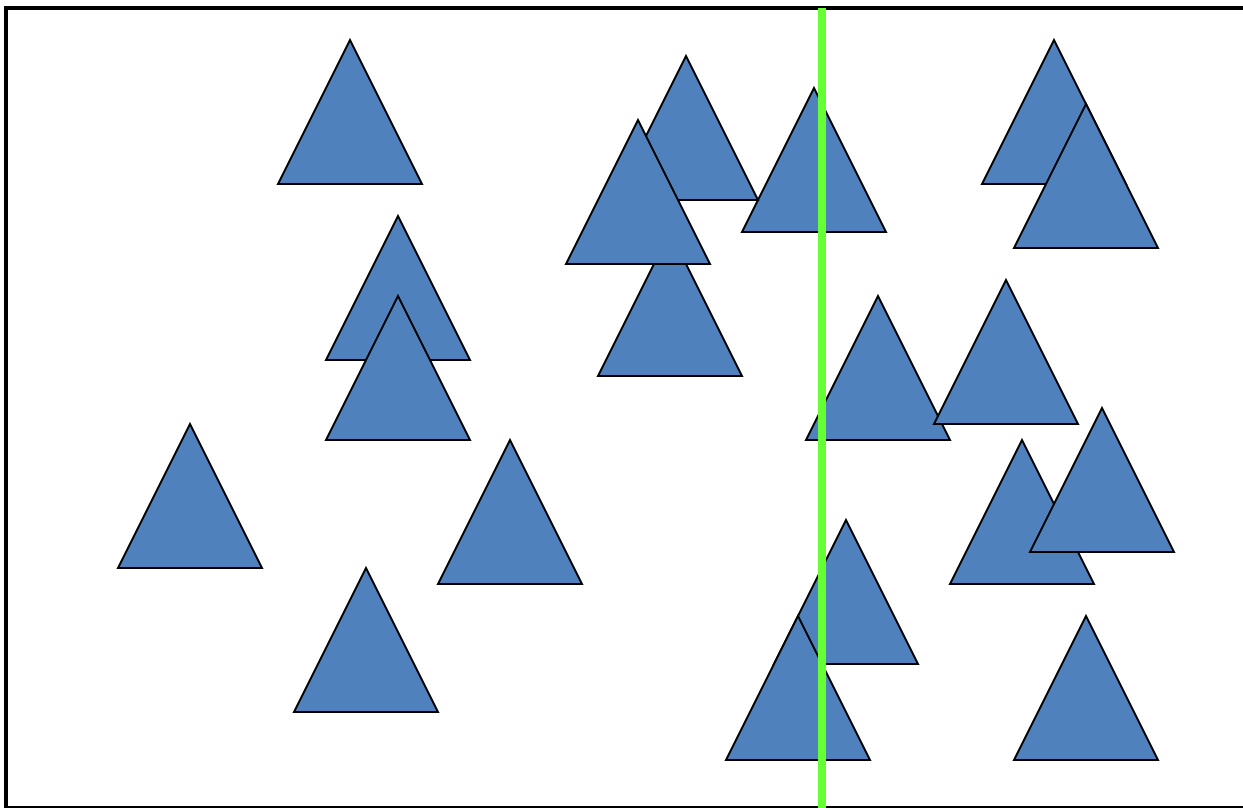
- Разбиение выровненными относительно осей плоскостями



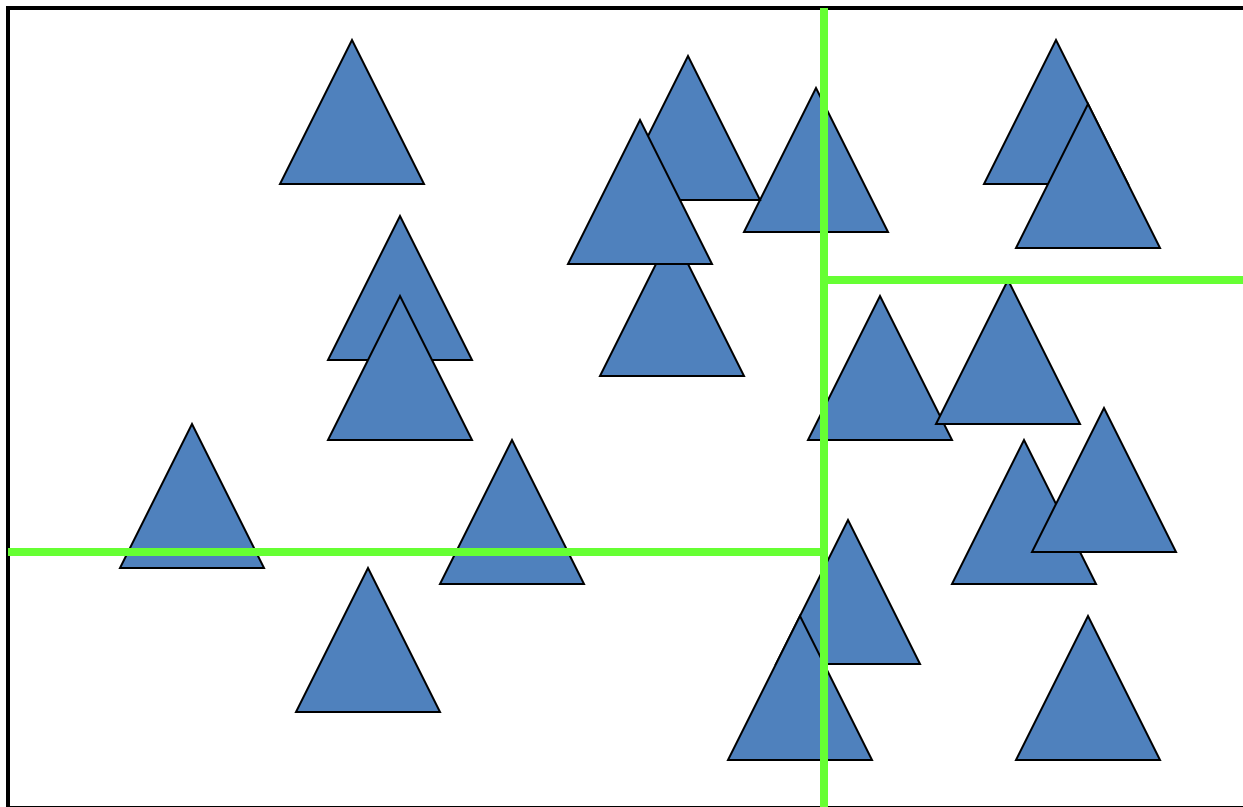
Построение kD-дерева



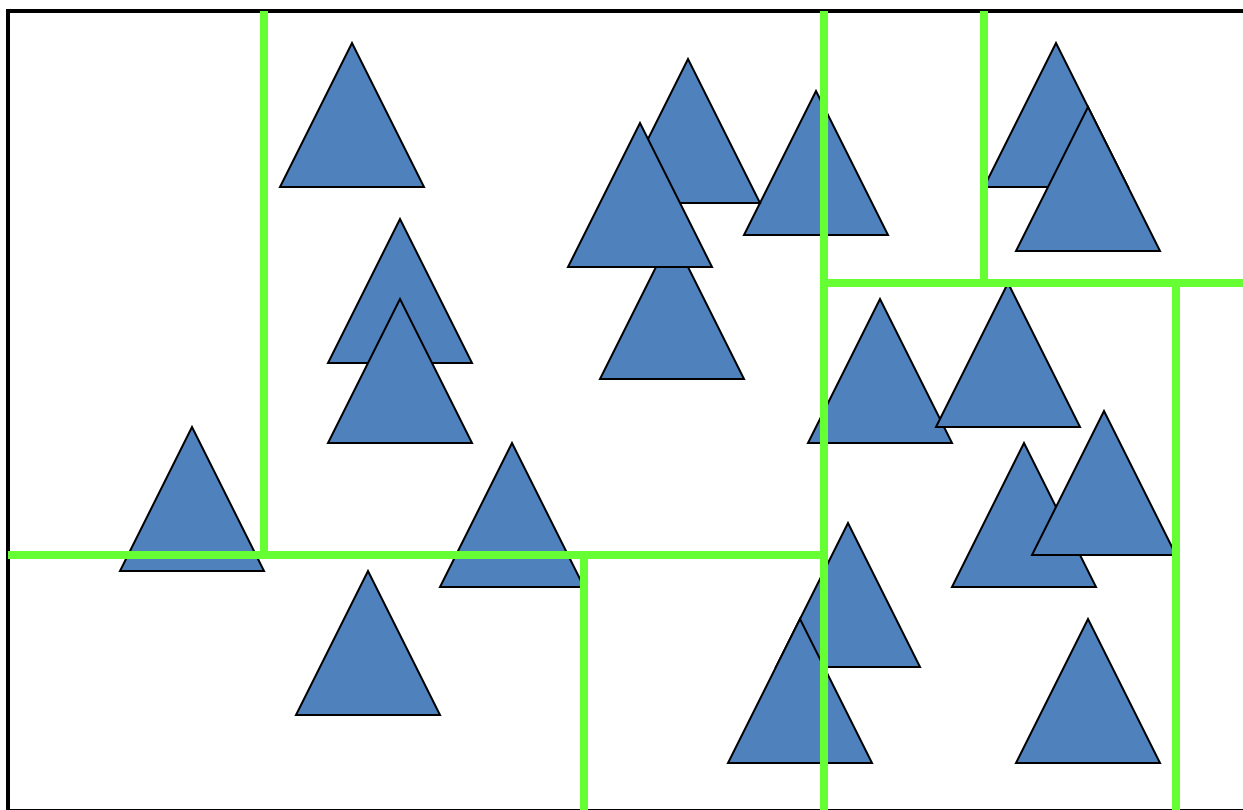
Построение kD-дерева: уровень 1



Построение kD-дерева : уровень 2



Построение kD-дерева : уровень 3



Реалистичные изображения по умолчанию



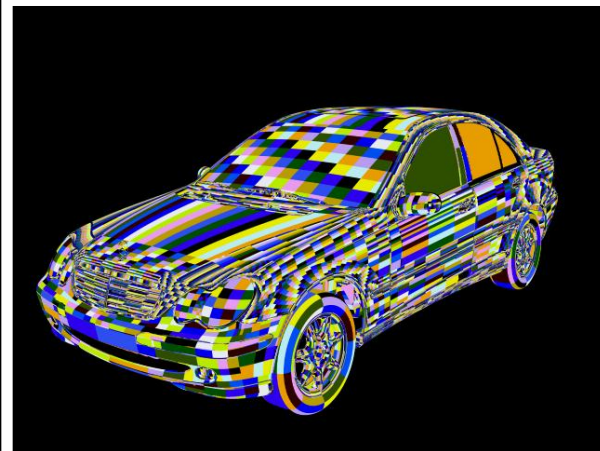
Volkswagen Beetle with correct shadows and (multi-)reflections on curved surfaces

Физическая корректность



Fully ray traced car head lamp, faithful visualization requires up to 50 rays per pixel

Физическая корректность



Rendered directly from trimmed NURBS surfaces, with smooth environment lighting

Физическая корректность



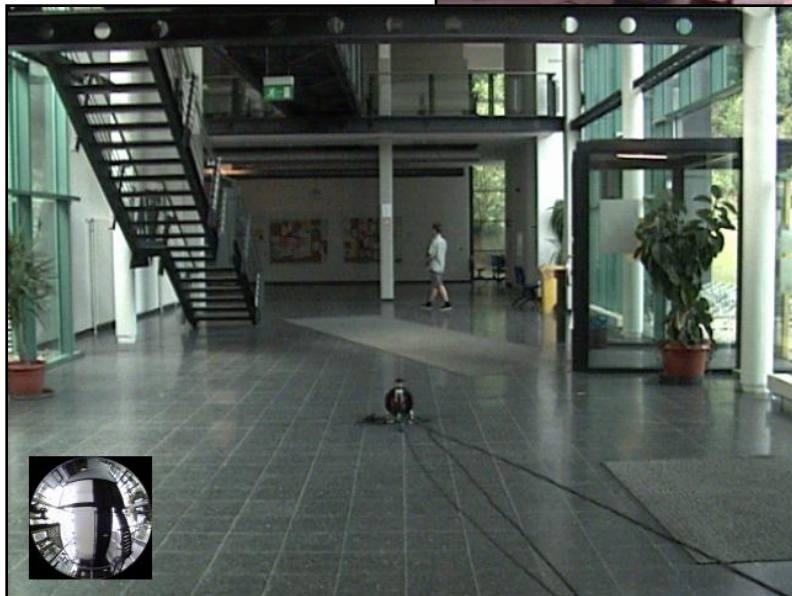
Rendered with accurately measured BTF data that accounts for micro lighting effects

Textured Phong for comparison



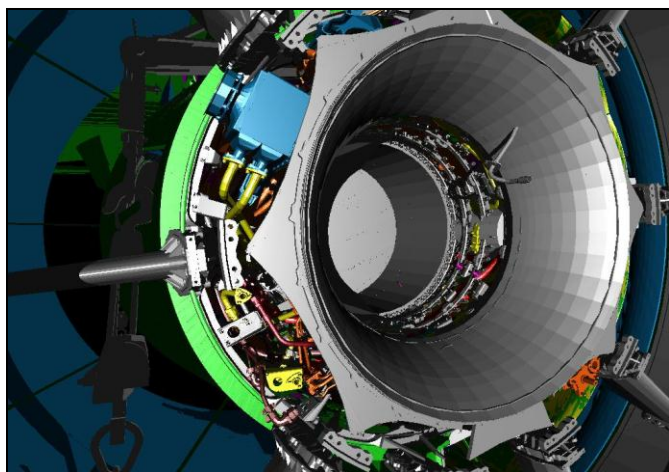
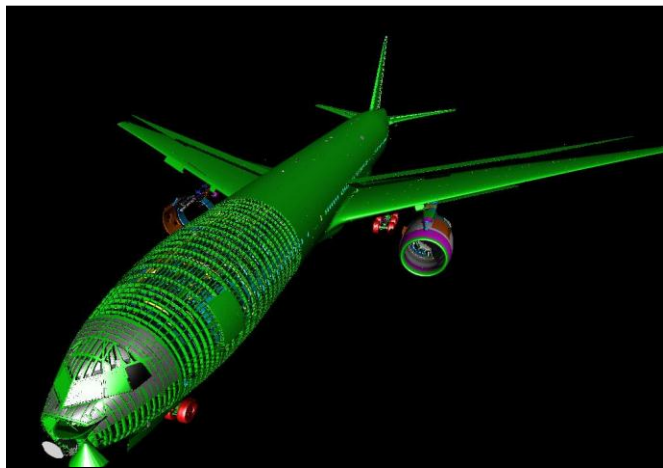
BTF Data Courtesy R. Klein, Uni Bonn

Физическая корректность



VR scene illuminated from realtime video feed, AR with realtime environment lighting

Поддержка массивных сцен

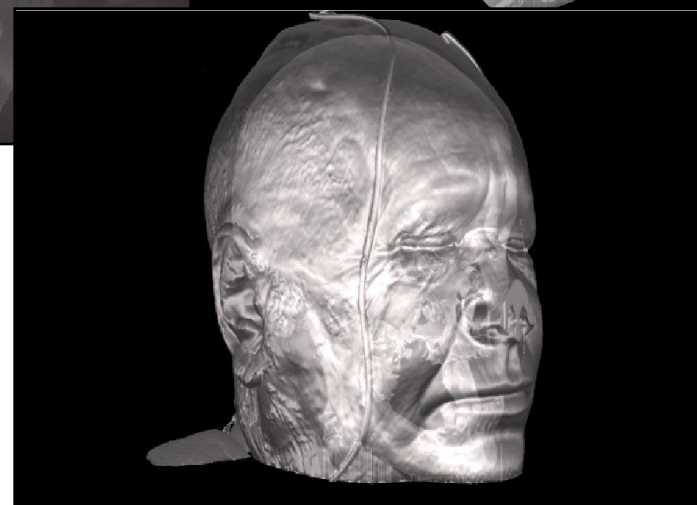
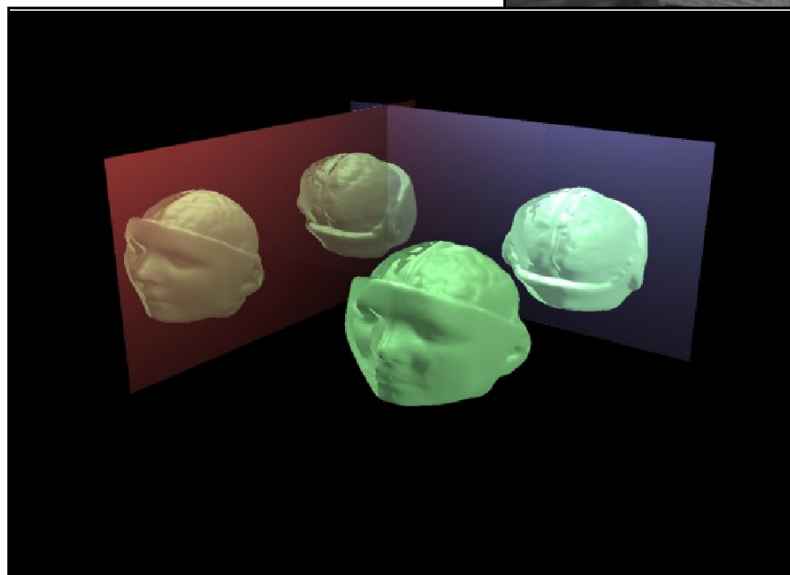
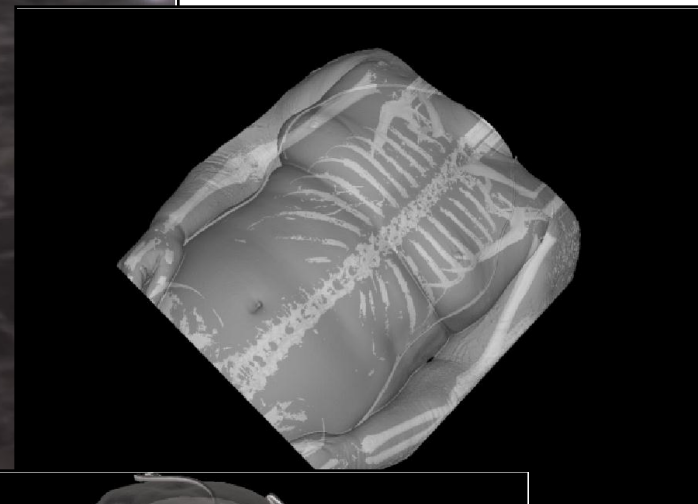
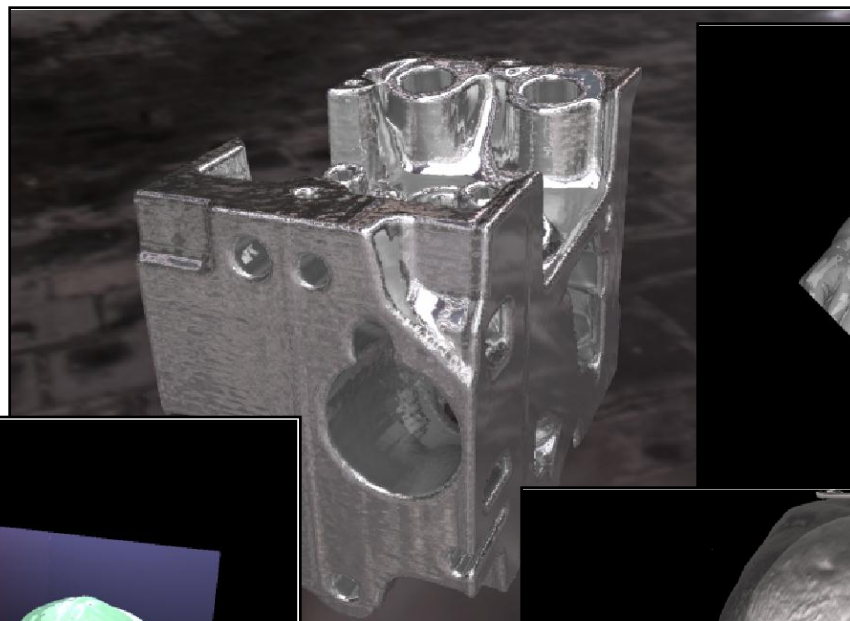


Интеграция различных типов примитивов



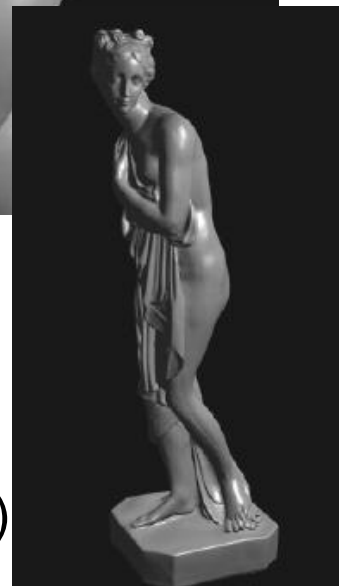
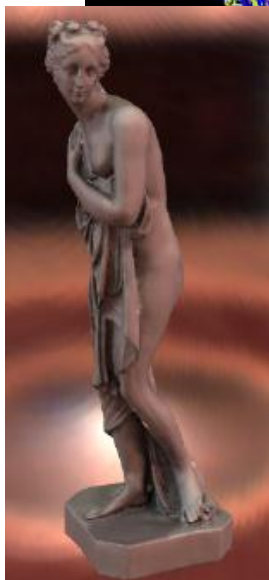
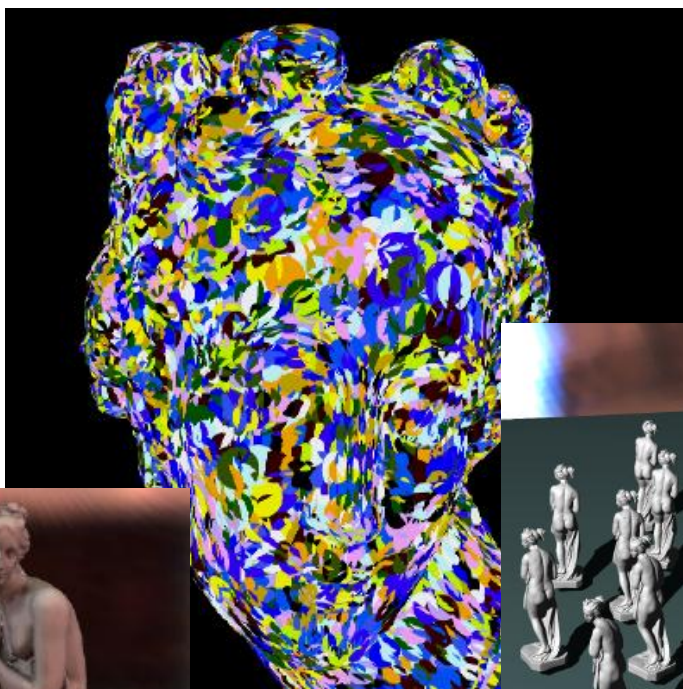
Triangles, Bezier splines, and subdivision surfaces fully integrated

Интеграция различных типов примитивов



Volume visualization using multiple iso-surfaces in combination with surface rendering

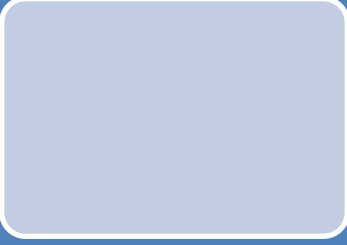
Интеграция различных типов примитивов



24 MPoints, 2.1 fps with shadow @ 640x480

Realtime ray tracing of point clouds (1 Mpoints each)
On *one* dual-Opteron 2.4 GHz: 4-9 fps

Лекция посвящена обзору двух подходов к синтезу изображений: излучательности и трассировке лучей



Понятие о глобальном освещении и других сложных оптических эффектах



Трассировка лучей



Излучательность

Трассировка и Излучательность

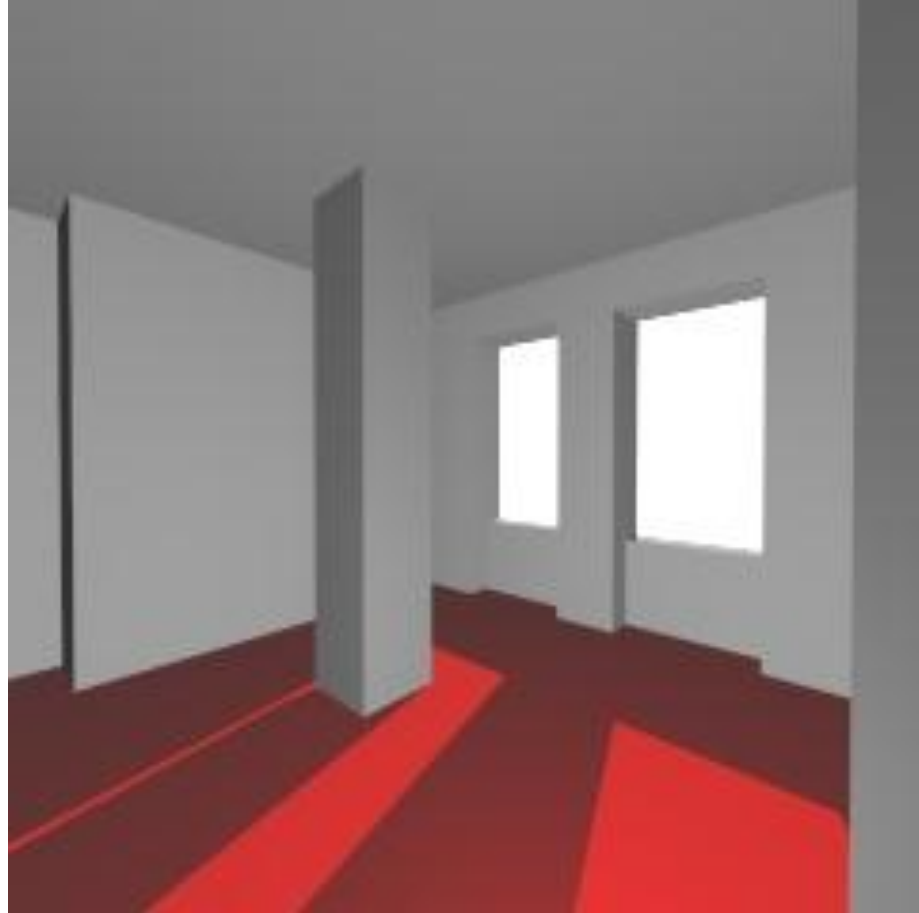
- **Проблема трассировки лучей** – для вычисления глобального освещения нужно трассировать большое количество лучей
 - Вычислительно сложная задача
- **Основная идея излучательности** – сохранение светимости поверхностей по мере продвижения света от источников



Трассировка



Излучательность



Излучательность = Энергетическая СВЕТИМОСТЬ

- Полная энергия, покидающая поверхность единичной площади
- Обозначение: V ($=M$)
- Единицы измерения: $Вт/м^2$

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

Предположения для решения задачи излучательности. Ламбертовы поверхности

- Алгоритмы излучательности решают уравнение глобального освещения при наборе ограничивающих предположений:
 - Все поверхности ламбертовы (идеально диффузные)
 - Поверхности могут быть поделены на участки (патчи) константной излучательности
 - Излучательность рассчитывается только на поверхностях
 - Требуются дополнительные действия по построению изображения
 - Расчет производится для замкнутой системы
 - Энергия не пропадает
- Эти предположения позволяют сделать уравнение глобального освещения линейным!

Излучательность диффузных поверхностей: простая форма, простая ДФО

- Излучательность для диффузных поверхностей

$$B(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} L_o(\mathbf{x}) \cos \theta d\omega_o = \pi L_o(\mathbf{x})$$

- Диффузная ДФО в терминах коэффициента отражения поверхности:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{\rho}{\pi}$$

Можно упростить интеграл освещенности

$$f(\mathbf{x}) = \frac{\rho}{\pi}$$

Упрощение формулы глобальной освещенности:

$$L(\mathbf{x}, \omega_o) = L_e(\mathbf{x}, \omega_o) + \int_{\Omega} f(\mathbf{x}, \omega_o, \omega) L(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta d\omega$$

$$\pi L(\mathbf{x}) = \pi L_e(\mathbf{x}) + \pi \int_{\Omega} \frac{\rho(\mathbf{x})}{\pi} L(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta d\omega$$

$$B(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x}) + \rho(\mathbf{x}) \int_{\Omega} L(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta d\omega$$

По-прежнему есть интеграл для вычисления освещенности...

Будем рассчитывать интеграл по точкам поверхностей вместо направлений

Преобразуем интеграл по телесному углу в интеграл по всем точкам поверхностей сцены

$$d\omega = \frac{\cos \theta' dA}{r^2}$$

θ' – угол между нормалью площадки

A - дифференциальная площадь

$$V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{если } \mathbf{x} \text{ и } \mathbf{y} \text{ взаимно видны} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$B(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x}) + \rho(\mathbf{x}) \int_{\mathbf{y} \in S} B(\mathbf{y}) \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dA$$

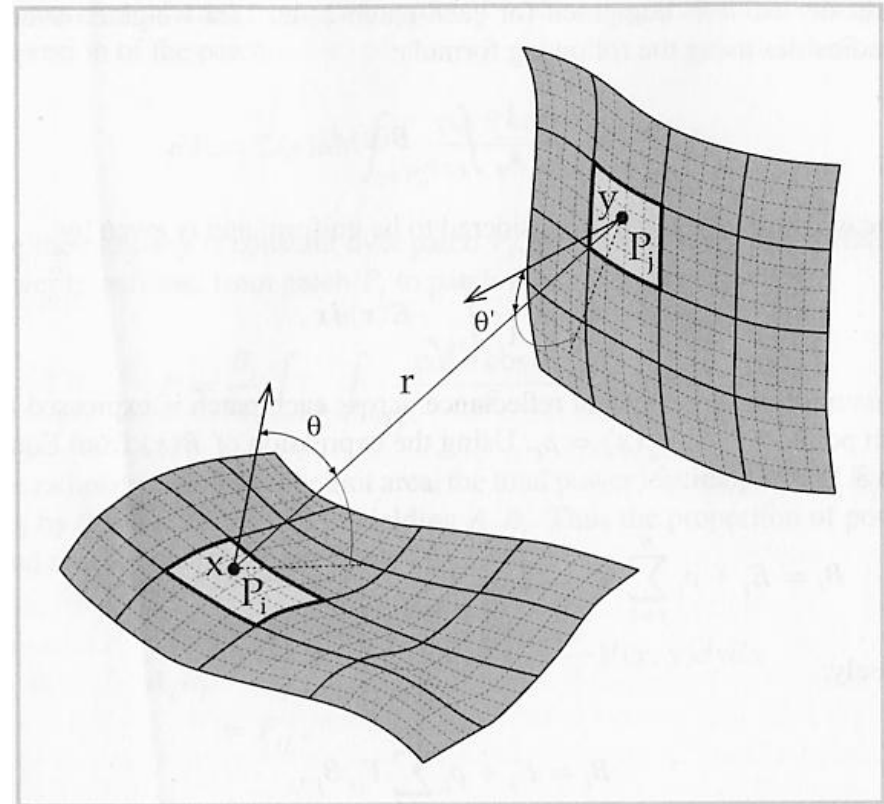
Чтобы преобразовать интеграл в сумму, необходимо представить сцену как набор поверхностей

Предположим, что геометрия разбита на N непересекающихся поверхностей (patches) P_i , $i=1..N$

Площадь каждой A_i

Предположим, что излучательность константна на каждом

$$B_i = \frac{1}{A_i} \int_{\mathbf{x} \in P_i} B(\mathbf{x}) dx$$



Уравнение освещенности для дискретного диффузного случая – продолжаем упрощение

Заменяем интеграл по точкам геометрии на сумму по поверхностям

$$B(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x}) + \rho_{hd}(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^N \int_{y \in P_j} B(\mathbf{y}) \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dy$$

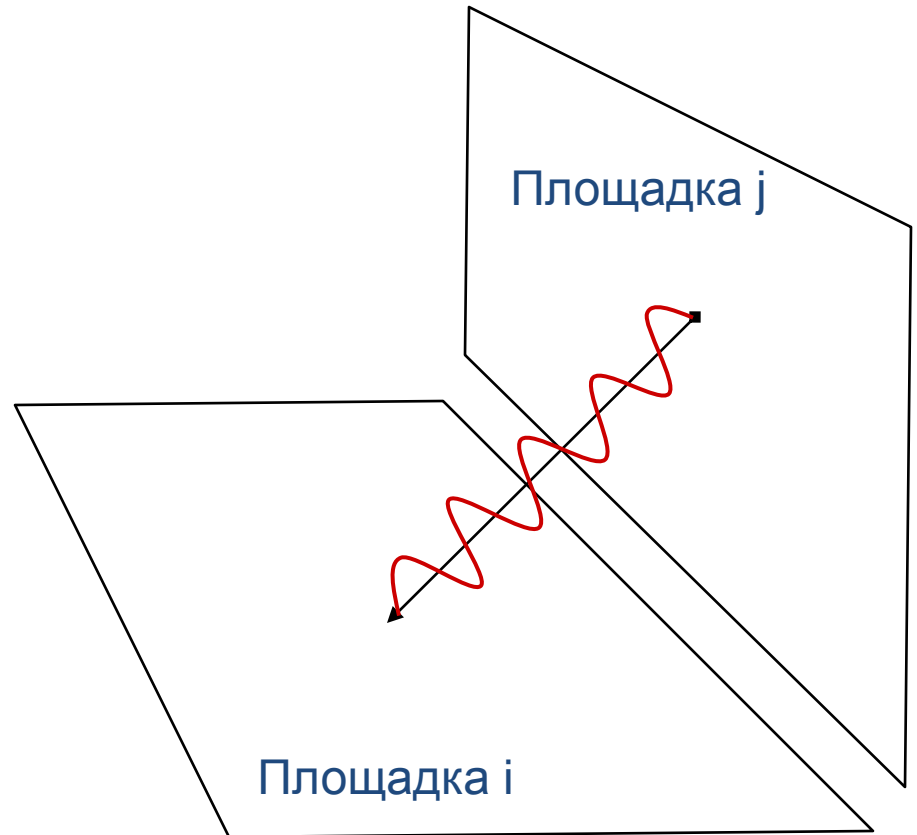
$$\frac{1}{A_i} \int_{\mathbf{x} \in P_i} B(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \frac{1}{A_i} \int_{\mathbf{x} \in P_i} \left[E(\mathbf{x}) + \rho_{hd}(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^N \int_{y \in P_j} B(\mathbf{y}) \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dy \right] d\mathbf{x}$$

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j \frac{1}{A_i} \int_{\mathbf{x} \in P_i} \int_{y \in P_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dy d\mathbf{x}$$

Форм-фактор: зависит только от размера и расположения поверхностей

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{x \in P_i} \int_{y \in P_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(x, y) dy dx$$

F_{ij} - часть полной энергии, покинувшей площадку P_i и полученной площадкой P_j



Уравнение для дискретной излучательности
может быть записано в виде СЛАУ

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j F_{ij}$$

Это СЛАУ!

$$\mathbf{B} = \mathbf{E} + \rho \mathbf{B} \mathbf{F}$$

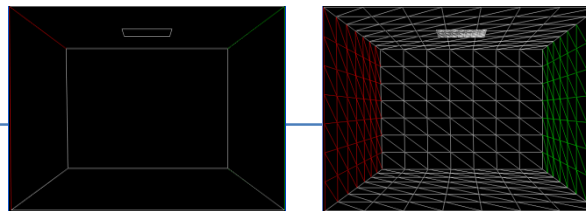
$$\mathbf{E} = \mathbf{M} \mathbf{B} \quad \text{где} \quad \mathbf{M} = (\mathbf{I} - \rho \mathbf{F})$$

Размеры M : $N \times N$

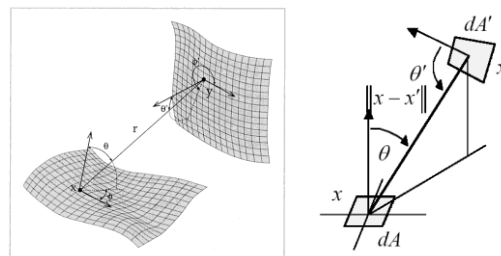
- Большая система 😊
- Но матрица M имеет некоторые особенности,
упрощающие вычисление

Излучательность

Разбиваем геометрию на площадки



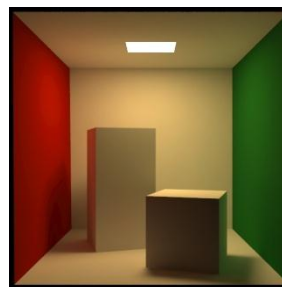
Вычисляем форм-факторы



Решаем СЛАУ

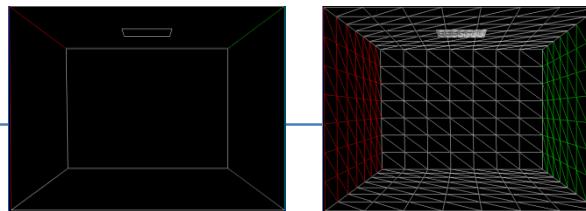
$$\begin{bmatrix} \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$

Реконструкция и показ решения

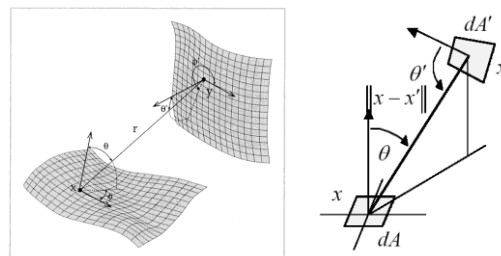


Излучательность

Разбиваем геометрию на площадки



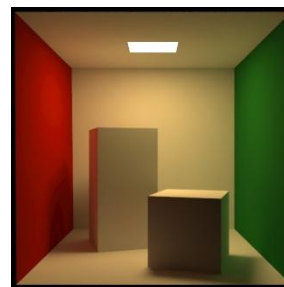
Вычисляем форм-факторы



Решаем СЛАУ

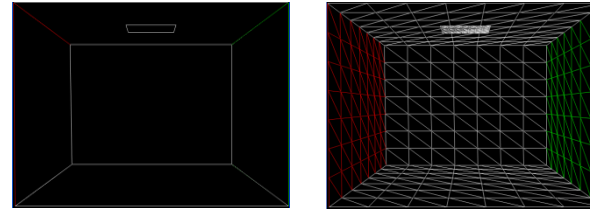
$$\begin{bmatrix} \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$

Реконструкция и показ решения

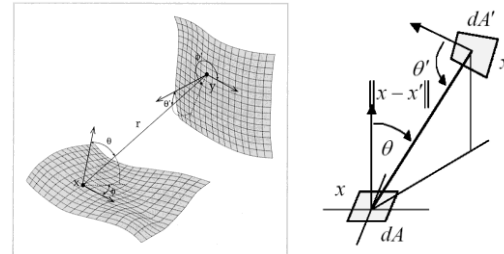


Излучательность

Разбиваем геометрию на площадки



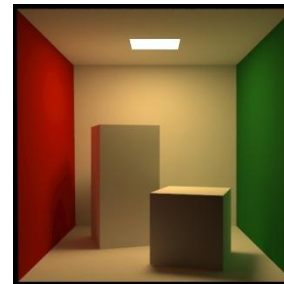
Вычисляем форм-факторы



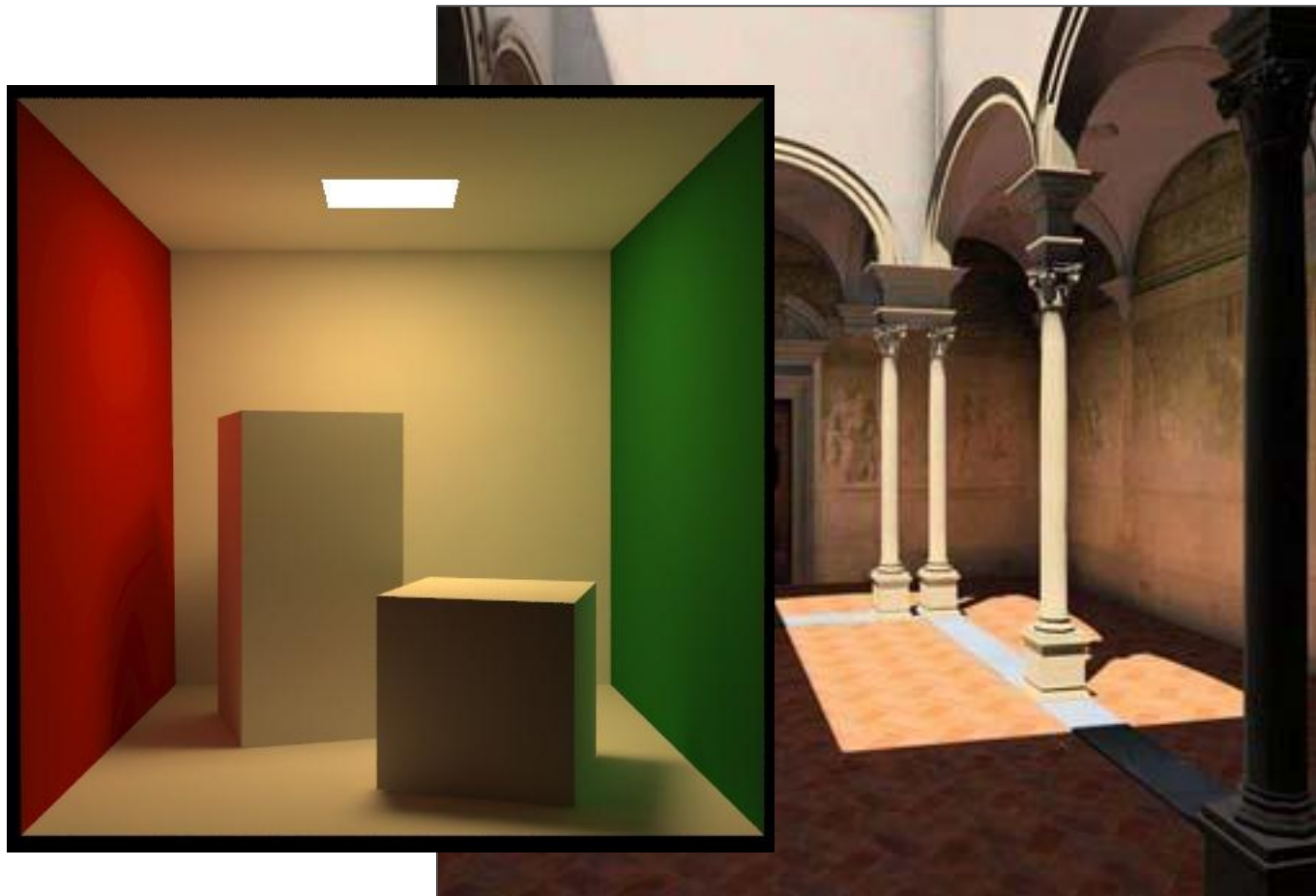
Решаем СЛАУ

$$\begin{bmatrix} \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times & \times \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$

Реконструкция и показ решения



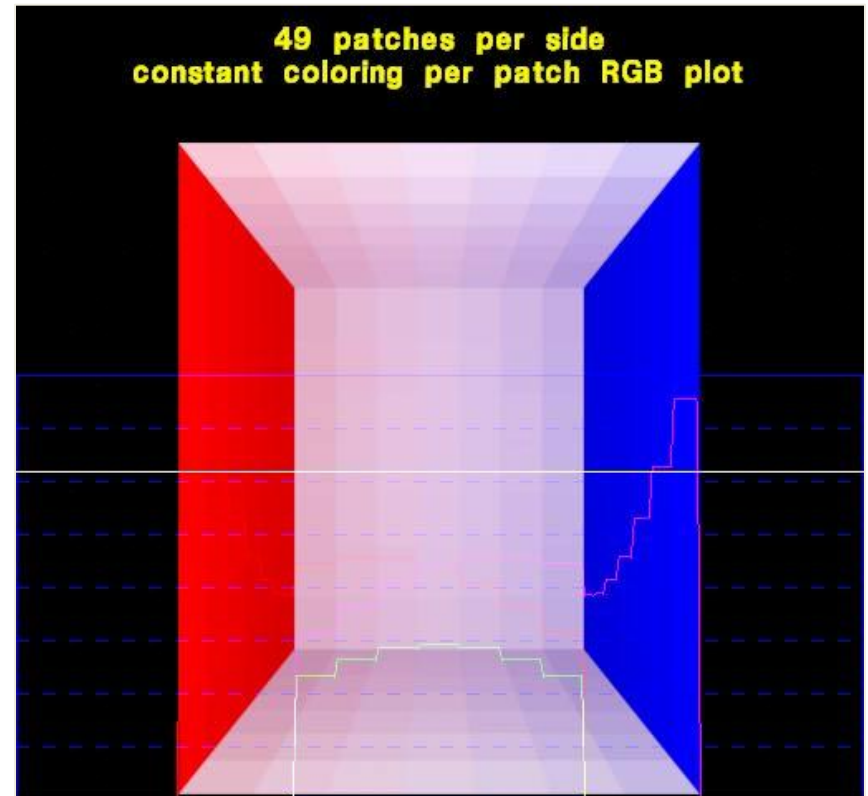
Результаты работы метода излучательности



Результаты работы метода излучательности

- Cornell box

Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg for the 1984 paper Modeling the interaction of Light Between Diffuse Surfaces, Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings), Vol. 18, No. 3, July 1984, pp. 213-222.

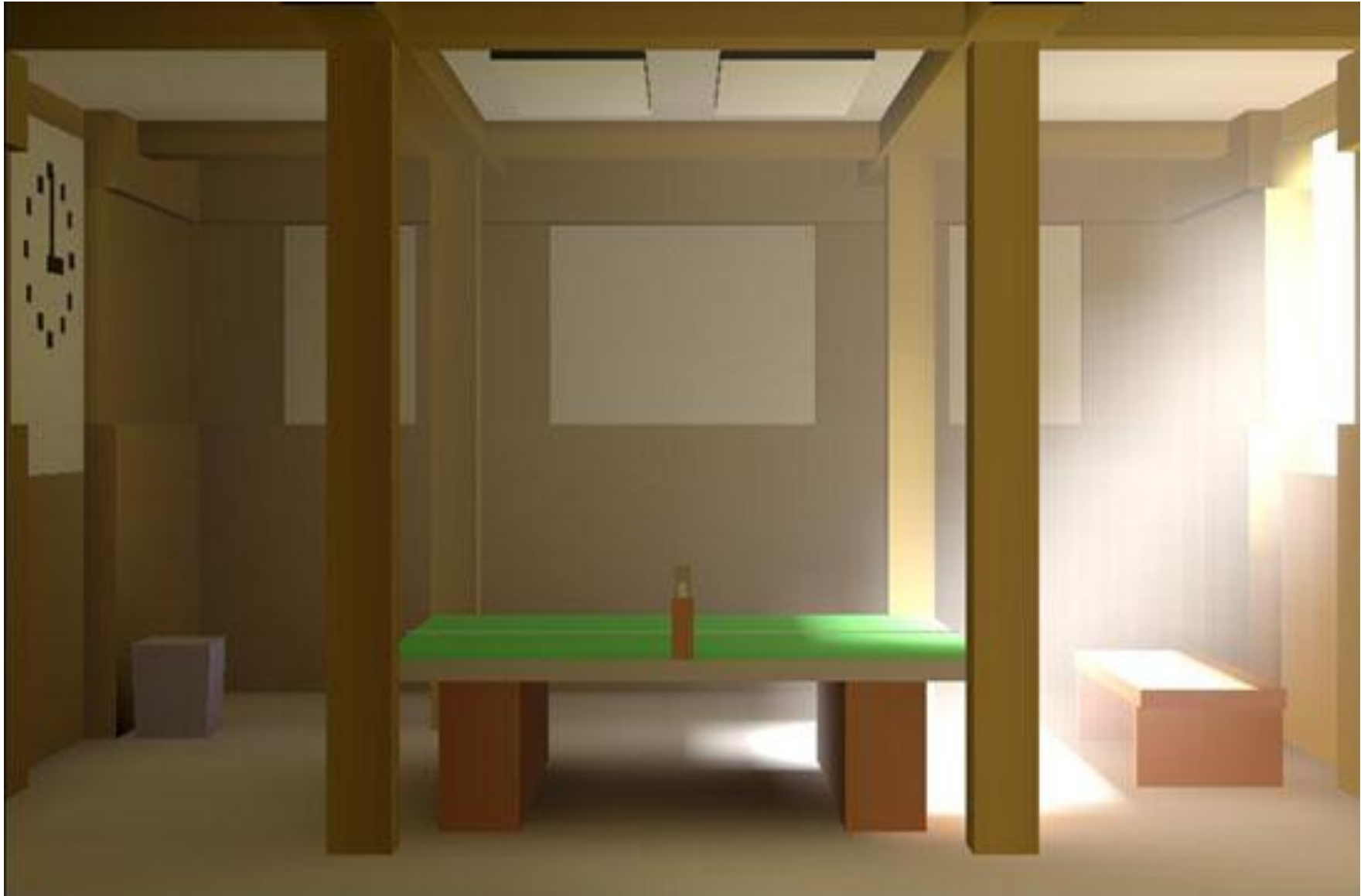


The Cornell Box

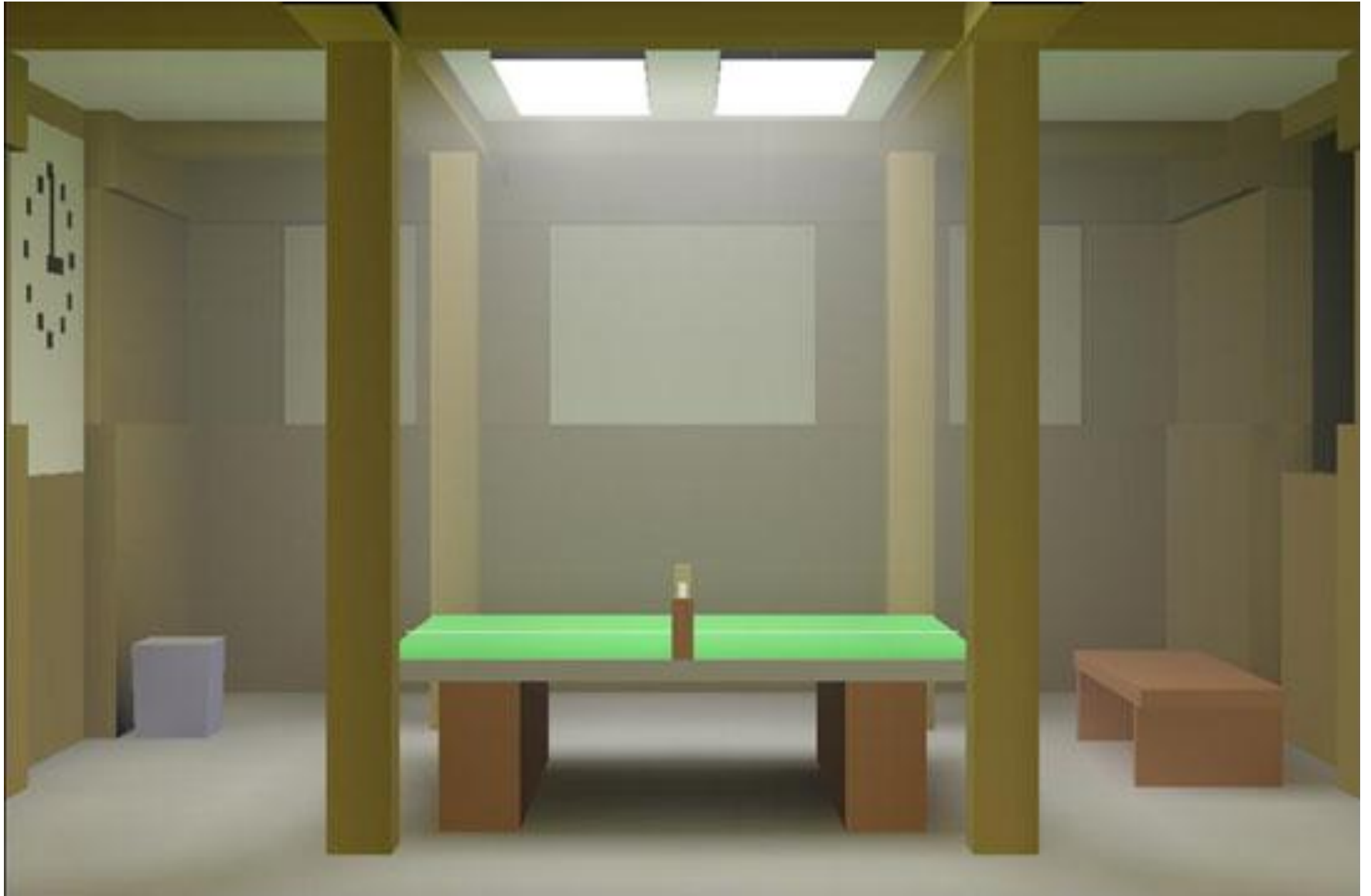
- Michael F. Cohen and Donald P. Greenberg for the 1985 paper **The Hemi-Cube, A Radiosity Solution for Complex Environments**, Vol. 19, No. 3, July 1985, pp. 31-40.
- The hemi-cube













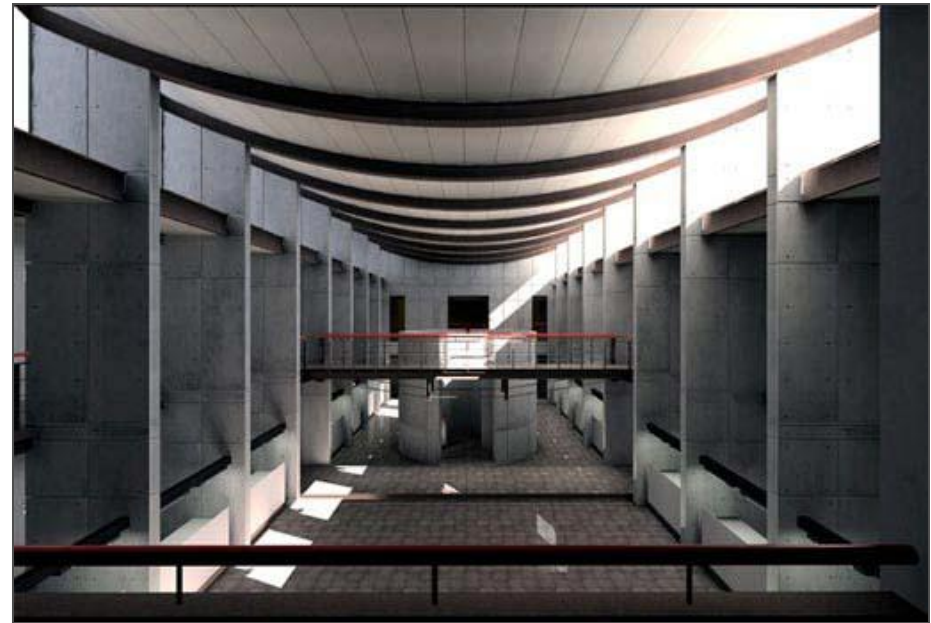


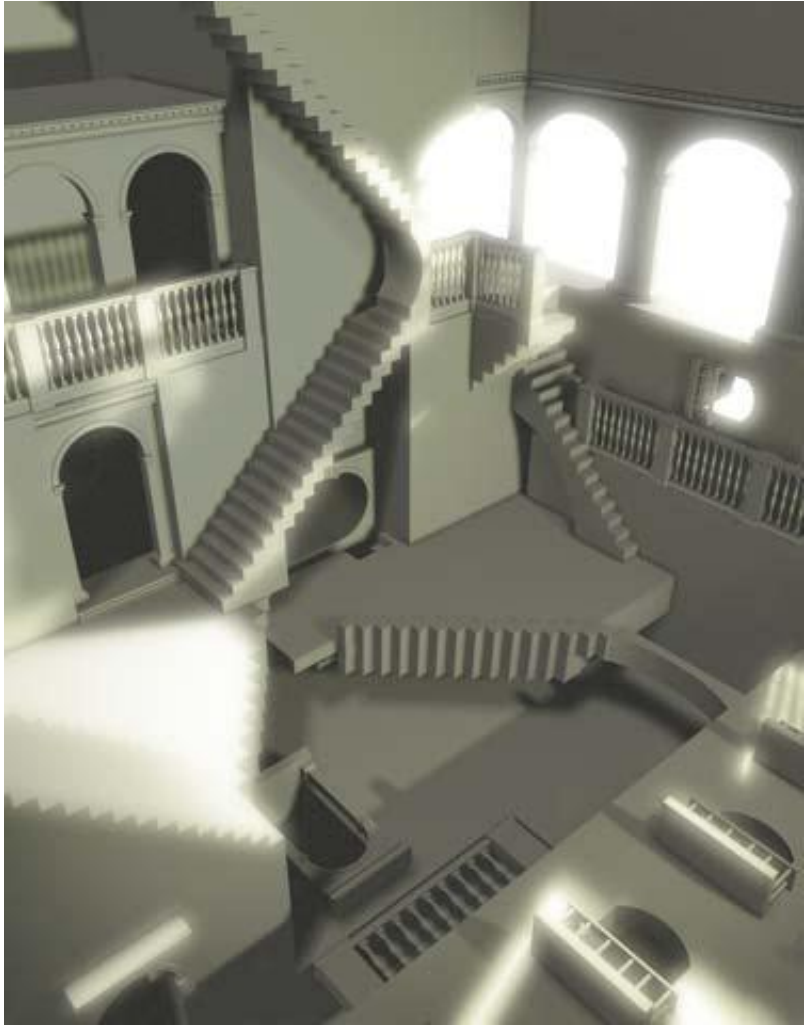
















Итоги

- Визуализация с помощью растеризации – очень быстро, но сложно реализовать некоторые эффекты: вторичное освещение, тени, отражения и преломления
- Трассировка лучей: «бросаем» луч через каждый пиксель экрана, находим пересечения с ближайшей точкой поверхностей сцены, затем для расчета освещения создаем новые лучи
- Излучательность: рассчитываем перенос энергии между поверхностями сцены, начиная с источников света