



Глобальное освещение и Трассировка лучей

проф. каф. МО ЭВМ ф-та ВМК Турлапов В.Е.,
vadim.turlapov@cs.vmk.unn.ru



Global & Local Illumination

Алгоритмы моделирования освещения можно разделить на две группы: алгоритмы локального освещения (**local illumination**) и алгоритмы глобального освещения (**global illumination**).

Local illumination

Алгоритмы локального освещения - самые простые способы расчета освещенности поверхностей, рассматривают отражение или пропускание света для каждой поверхности 3D сцены независимо от других поверхностей, принимая во внимание только первичные источники света (задача Lighting/Shading: интенсивность, цвет, направление распространения отражённого и преломленного света).

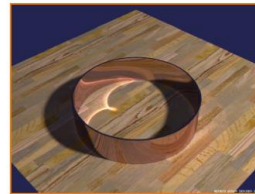
Алгоритмы *local illumination* могут использоваться в качестве элементарных составляющих расчета глобального освещения.

Алгоритмы *local illumination* используются в играх для расчета динамического освещения моделей.

Световые эффекты.

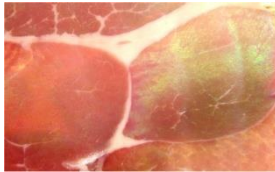
Проблемы моделирования. Глобальное освещение

Каустики и
godrays



Воздух, заполненный капельками воды, пылью или дымом, представляет собой объемную среду, с которой свет активно взаимодействует:

Интерференция



Рассеивание света



Радуга:
рефракция
и полное
внутреннее
отражение
в капле



Освещение
отраженным светом
(непрямое, radiosity)



HDR



Главной целью алгоритмов *global illumination* является воспроизведение **реального освещения**. Тестирование на Корнуэльской комнате: ([history](#), [comparison](#), [lab](#), [course](#)):



Трассировка лучей (Ray tracing)

Прямая и обратная трассировка

Классический ray tracing, или метод трассировки лучей, предложен Артуром Аппелем (Arthur Appel) в 1968 году и дополнен алгоритмом общей рекурсии, разработанным Whitted в 1980 году. Понадобилось почти 12 лет эволюции вычислительных систем, прежде чем этот алгоритм стал доступен для широкого применения в практических приложениях.

Суть метода: отслеживание траекторий лучей и расчета взаимодействий с лежащими на траекториях объектами, от момента испускания лучей источником света до момента попадания в камеру.

Под взаимодействием луча с объектами понимаются процессы диффузного (в смысле модели локальной освещенности), многократного зеркального отражения от их поверхности и прохождение лучей сквозь прозрачные объекты.

Ray tracing – первый метод расчета глобального освещения, рассматривающий освещение, затенение (расчет тени), многократные отражения и преломления.

Различают два подхода к трассировке лучей: **метод прямой трассировки** – forward ray tracing, и **метод обратной трассировки** – backward ray tracing.

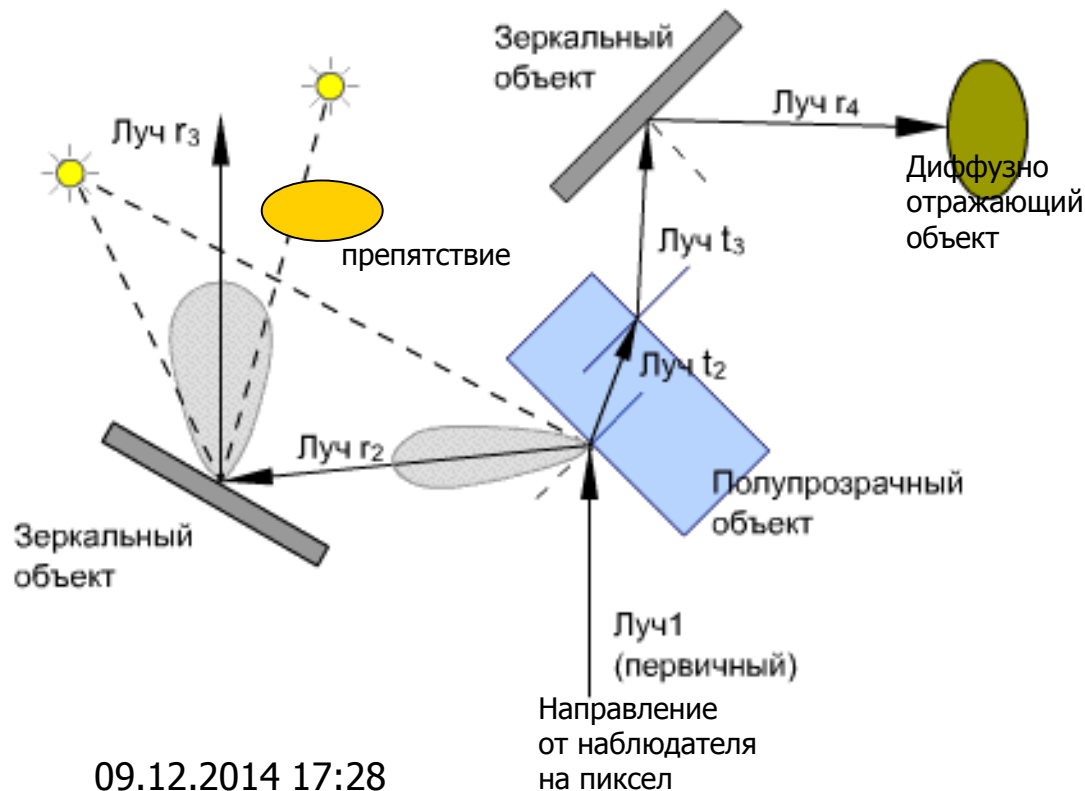
Path tracing и Ray tracing по Thomas Funkhouser (Princeton University, COS 526, Fall 2002).

Ray tracing **не использует модели шейдинга**. Расчет освещенности "честно" выполняется во всех точках пересечения лучей и объектов.

Алгоритмы глобального освещения

Метод обратной трассировки (от точки наблюдения)

Обратная трассировка. Метод разработан в 80-х годах. основополагающими считают работы Уиттеда и Кея, ссылки на которые можно найти в книге Дж.Фоли и А.ван Дэма (1985)



Пояснение содержания метода:
Луч t – преломленный;
Луч r – отраженный;

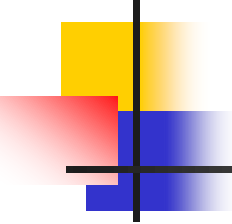


Метод обратной трассировки

Ограничения метода

Ограничения метода

1. Выделяют источники света. Они могут только излучать, но не отражать и преломлять. Ограничивают многообразие источников точечными.
2. Свойства отражающих поверхностей задаются суммой диффузной и зеркальной компонент
3. Зеркальность описывается составляющими reflection и specular. Reflection учитывает отражение других объектов не являющихся источниками. Строится только 1 зеркально отраженный луч r для дальнейшей трассировки. Specular дает световые блики от источников. Для этого определяются углы α отраженного луча обратной трассировки со всеми источниками.
4. При диффузном отражении учитываются только лучи от источников света (от зеркал игнорируются)
5. Для прозрачных (transparent) объектов обычно не учитываются зависимость преломления от λ . Иногда прозрачность моделируется без преломления.
6. Для учета освещенности объектов светом, рассеиваемым другими объектами вводится фоновая составляющая (ambient)
7. Завершают трассировку либо по числу итераций, либо по величине приращения освещенности, оказавшейся на данной итерации ниже пороговой



Метод обратной трассировки

Модель Уиттеда и базовая операция

Модель Уиттеда (Whitted) для цвета точки:

$$I(\lambda) = k_a L_a(\lambda) \cdot C(\lambda) + k_d L_d(\lambda) \cdot C(\lambda) + k_s L_s(\lambda) + k_r L_r(\lambda) + k_t L_t(\lambda), \quad (*)$$

где λ - длина волны света; $C(\lambda)$ – исходный цвет материала в точке

k_a, k_d, k_s, k_r, k_t - коэффициенты, учитывающие свойства материала в отношении фоновой подсветки, диффузного рассеивания, зеркальности, отражения и прозрачности; L – соответствующие интенсивности. При решении задачи в цвете формула (*) применяется для каждой цветовой составляющей (RGB).

Для каждой точки окна осуществляется внешнее обращение к базовой рекурсивной процедуре:

$I = \text{ЛУЧ}(1, \text{первичный}, \text{направление}, 0);$ // см. следующий слайд

В данной процедуре следует при каждом вызове проверять (вычислять) наличие пересечения с гранями объектов → перебор всех граней. Для ускорения процесса применяется метод оболочек (для отбрасывания заведомо неприемлемых кандидатов). Оболочки могут образовывать древовидную структуру. Это позволяет существенно ускорить перебор и сделать его теоретически пропорциональным логарифму от числа граней (аналогия с количеством информации).

Метод обратной трассировки

Базовая операция. Алгоритм

Базовая операция обратной трассировки – вычисление интенсивности для трассируемого луча:

```

ЛУЧ(номер итерации ind, тип луча, направление луча dir, номер объекта no) {
Находим точку пересечения луча с ближайшим объектом (гранью); Если точка найдена, то
{ no=номер пересекаемого объекта;           // использовать метод оболочек
  Вычисляем нормаль к видимой стороне пересекаемой грани;
  Если ( $k_d > 0$ ), то                          // задано свойство диффузного отражения
    { $L_d$ =Сумма интенсивности диффузного отражения для всех источников;}
  Если ( $k_s > 0$ ), то                          // зеркальные блики от источников света
    {Определяем направление отраженного луча dirR;
       $L_s$ =Интенсивность зеркального блика с учетом  $\alpha$  для всех источников;}
  Если ( $k_r > 0$ ), то                          // зеркальное отражение других объектов
    {Определяем направление отраженного луча dirR;
       $L_r$ =ЛУЧ(ind+1, отраженный, dirR, no);} // рекурсия
  Если ( $k_t > 0$ ), то                          // объект полупрозрачный
    {Определяем направление преломленного луча dirT;
       $L_t$ =ЛУЧ(ind+1, преломленный, dirT, no);} // рекурсия
  return  $k_a \cdot L_a \cdot C + k_d \cdot L_d \cdot C + k_s \cdot L_s + k_r \cdot L_r + k_t \cdot L_t$ ; //  $k, L$  и  $C$  - вектора (для RGB)
}
иначе {Луч уходит в свободное пространство; return Значение по умолчанию (цвет фона)}

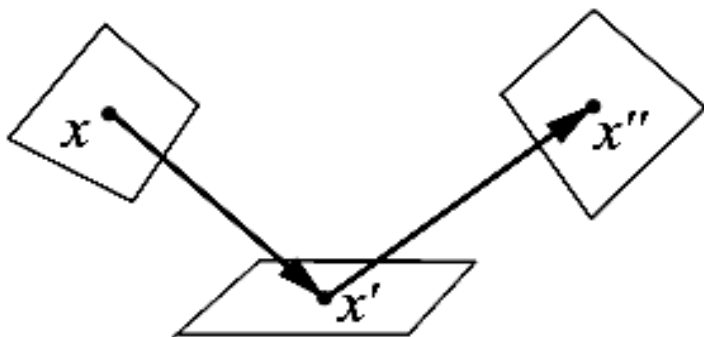
```


Прямое и не прямое освещение. Основное уравнение освещенности

Световая энергия, которая излучается в точке x' в направлении другой точки x'' - это сумма отраженной энергии и энергии излучаемой точкой самостоятельно.

Должны быть учтены все лучи, которые пришли в эту точку от всех точек $x \rightarrow$ интеграл.

$$L(x' \rightarrow x'') = E(x' \rightarrow x'') + \int_x f_r(x, x', x'') L(x \rightarrow x') V(x, x') G(x, x') dx$$



В этом уравнении функция L стоит как в правой, так и в левой части уравнения, причем в правой части под интегралом. Уравнения такого вида называются уравнениями Фредхольма второго рода, они не имеют аналитического решения (решаются численно).

Основное уравнение освещенности

$$f_r(x, x', x'') = \frac{L(x', x'')}{L(x', x) \cos \theta d\omega}$$

-функция двунаправленного отражения (Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF), - доля световой энергии, пришедшей из x в направлении, задаваемом точкой x' , уходит затем в направлении, точки x'' [1/стерадиан]. Удовлетворяет условию симметричности (принцип Гельмгольца):
 $BRDF(x, x'') = BRDF(x'', x)$.

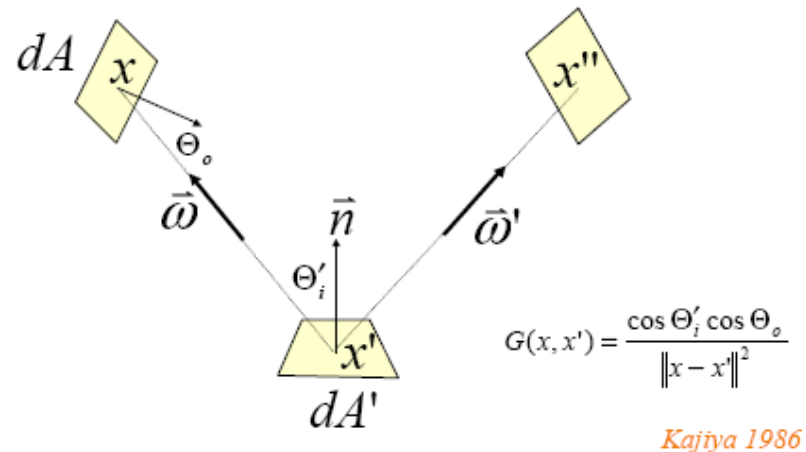
$V(x, x') = 0$, если луч из точки x в точку x' будет перегороден поверхностью, и 1 иначе.

$G(x, x')$ -форм-фактор (функция, учитывающая взаимное расположение поверхностей, которым принадлежат точки x и x').

Для площадной формы основного уравнения

$$G(x, x') = \frac{\cos \theta \cdot \cos \theta'}{\|x - x'\|^2}$$

Для телесно-угловой формы $G(x, x') = \cos \theta'$



Основное уравнение освещенности.

Пример вывода (Chris Wynn, NVIDIA Corporation)

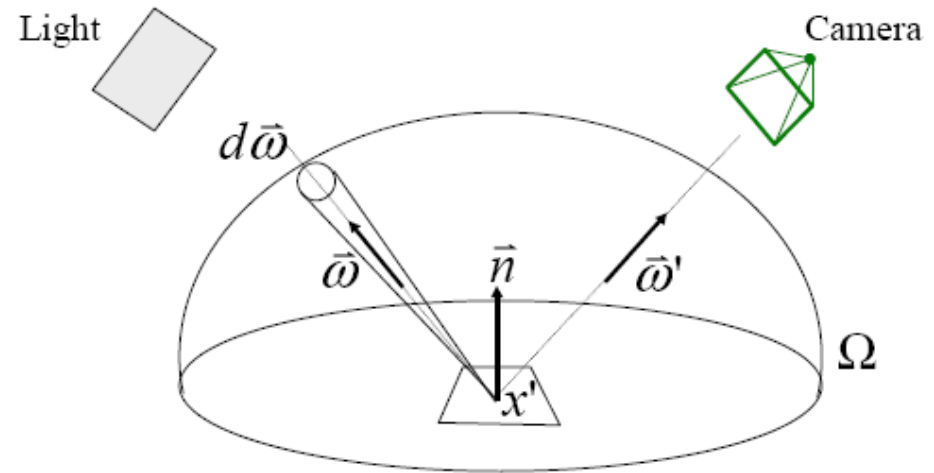
Модель освещения по Phong:

$$L_{\omega'} = L_{\omega} \left(k_d (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n \right)$$

$$L_{\omega'} = L_{\omega} \cdot \text{Refl}(\omega, \omega')$$

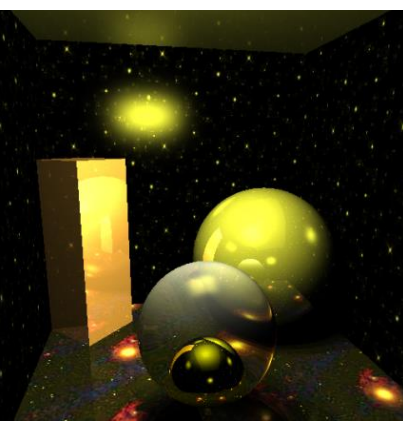
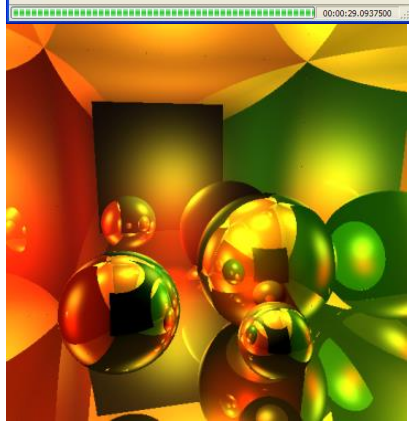
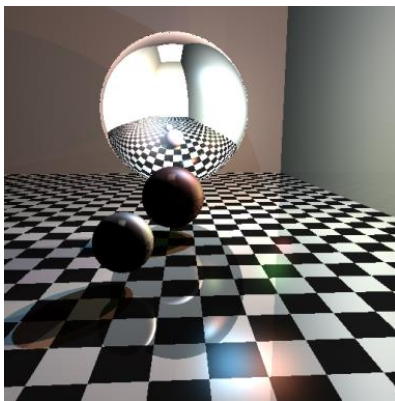
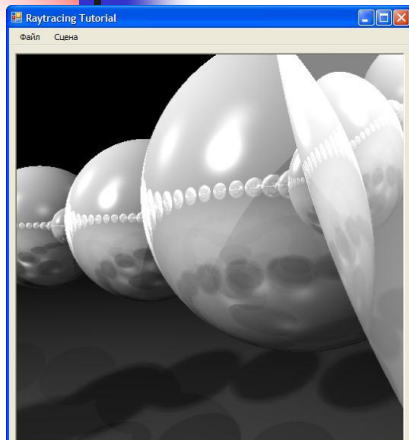
$$L_{\omega'} = \frac{\cos \theta_{\omega} d\omega}{\cos \theta_{\omega'} d\omega'} \text{Refl}(\omega, \omega') L_{\omega}$$

$$L_{\omega'} = \frac{\text{Refl}(\omega, \omega')}{\cos \theta_{\omega'} d\omega'} L_{\omega} \cos \theta_{\omega} d\omega$$



Thomas Funkhouser
Princeton University,
COS 526, Fall 2002

Проблема реального времени и подходы к упрощению основного уравнения освещенности

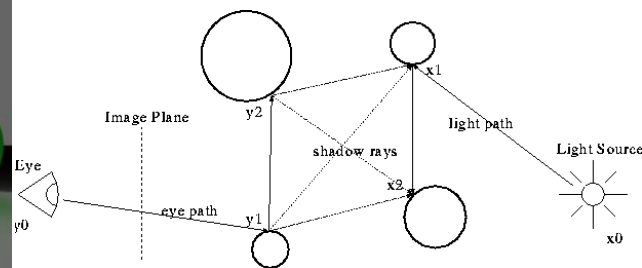
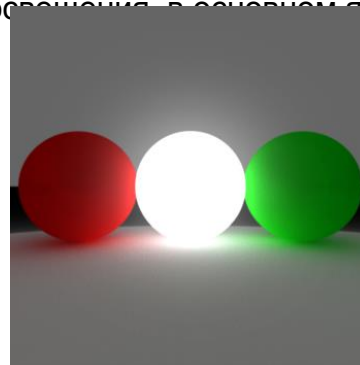


Результаты трассировки лучей на процессоре Core 2 Duo, полученные стажерами Зимней школы 2008 по компьютерной графике (Intel-ННГУ). 512x512pix. Время – порядка 1 мин.

Главной целью алгоритмов **global illumination** ставится решение основного уравнения освещенности (визуализации). Т.к. это уравнение не имеет аналитического решения, на практике применяются различные подходы к его аппроксимации. Наиболее известны метод *трассировки лучей* (Ray tracing), Radiosity ([Michael F. Cohen, John R. Wallace](#), 1995), [Photon Mapping](#) (Henrik Wann Jensen, 1996).

Вторая цель – выполнить эту задачу в реальном времени (12-25 изображений в секунду).

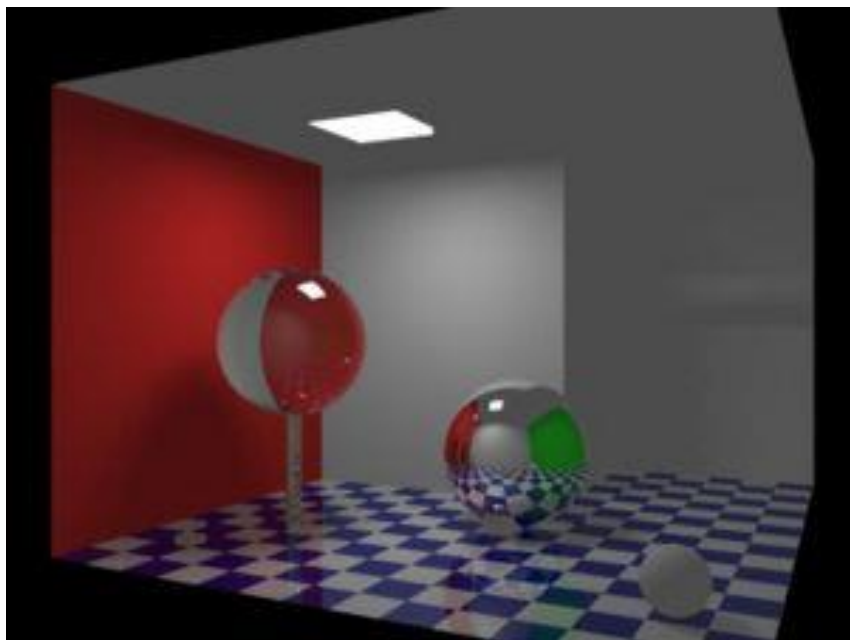
В настоящее время существует несколько методов глобального освещения, в основном являющихся модификациями **path tracing**



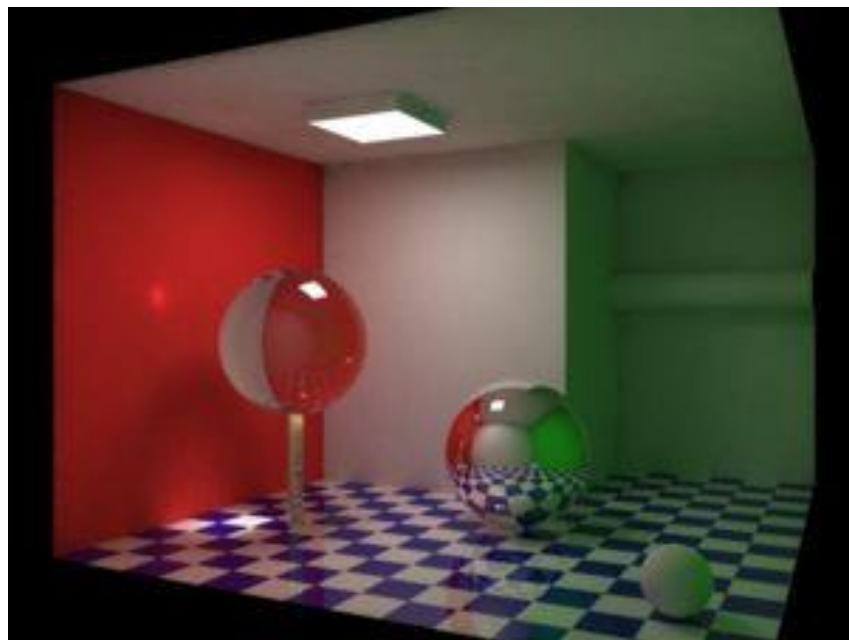
и в разной степени приближающихся к достижению обеих целей: **beam tracing**, **cone tracing**, **ambient occlusion**, **photon mapping**, **bidirectional path tracing**, **metropolis light transport**, **VCM**.

Сравнение возможностей моделей глобального освещения

Ray Tracing



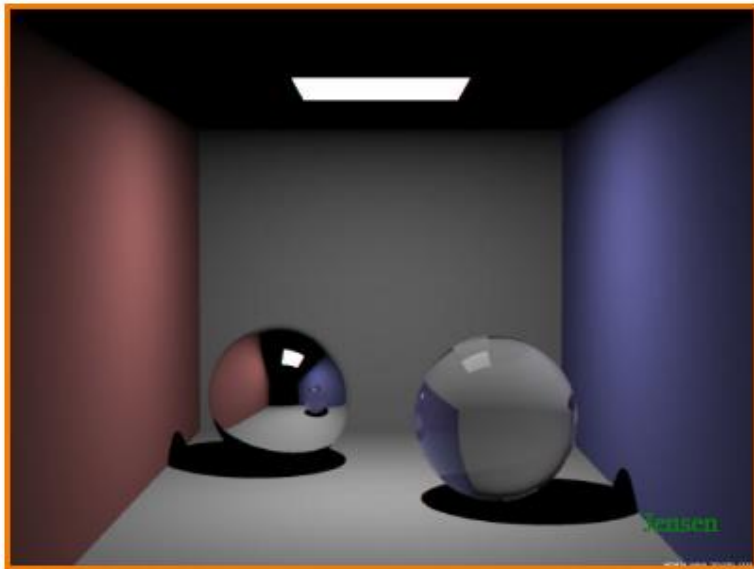
Global Illumination



Источник: Wikipedia

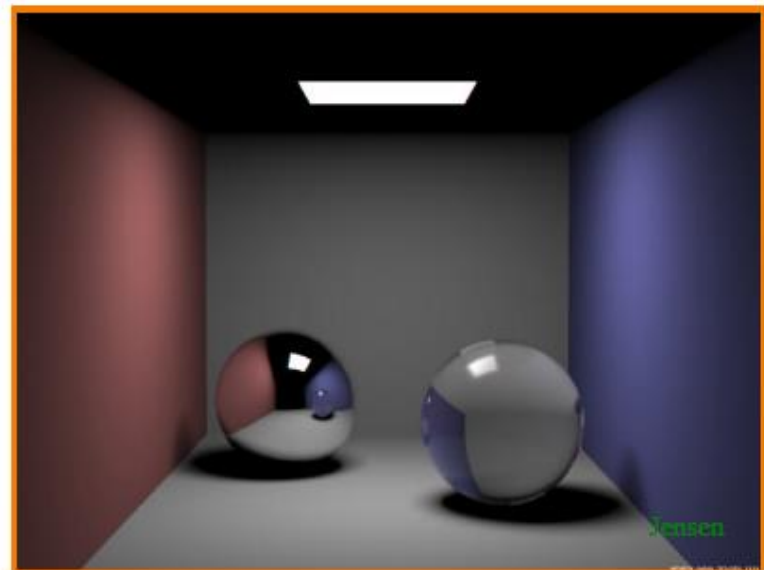
Корнуэльская комната: ([history](#), [comparison](#), [lab](#), [course](#)):

Подходы к упрощению основного уравнения освещенности



Ray tracing

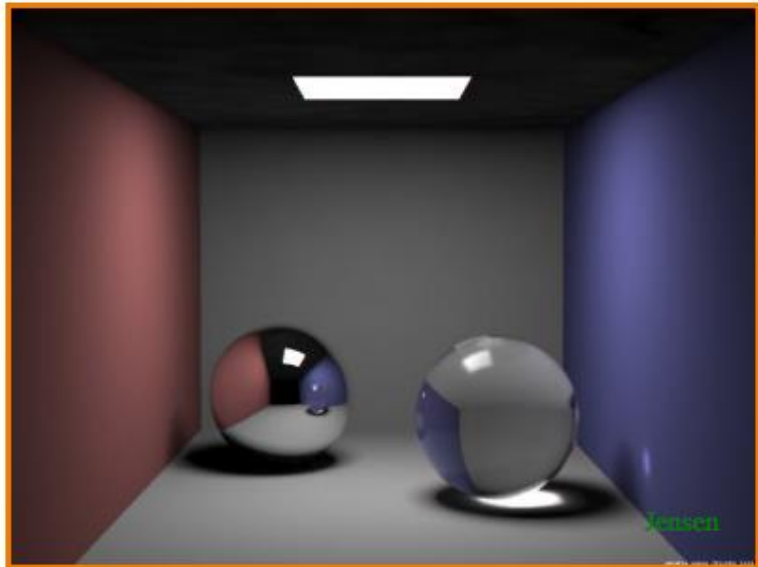
Henrik Wann Jensen



+ soft shadows

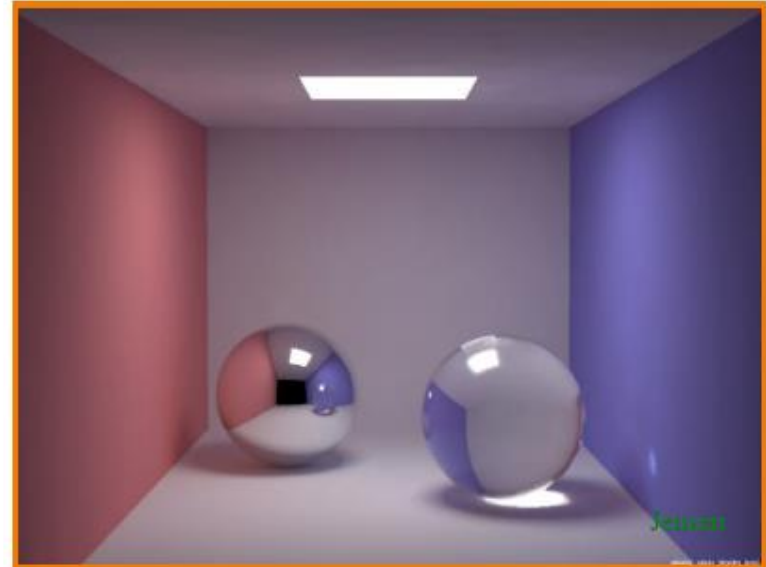
Henrik Wann Jensen

Подходы к упрощению основного уравнения освещенности



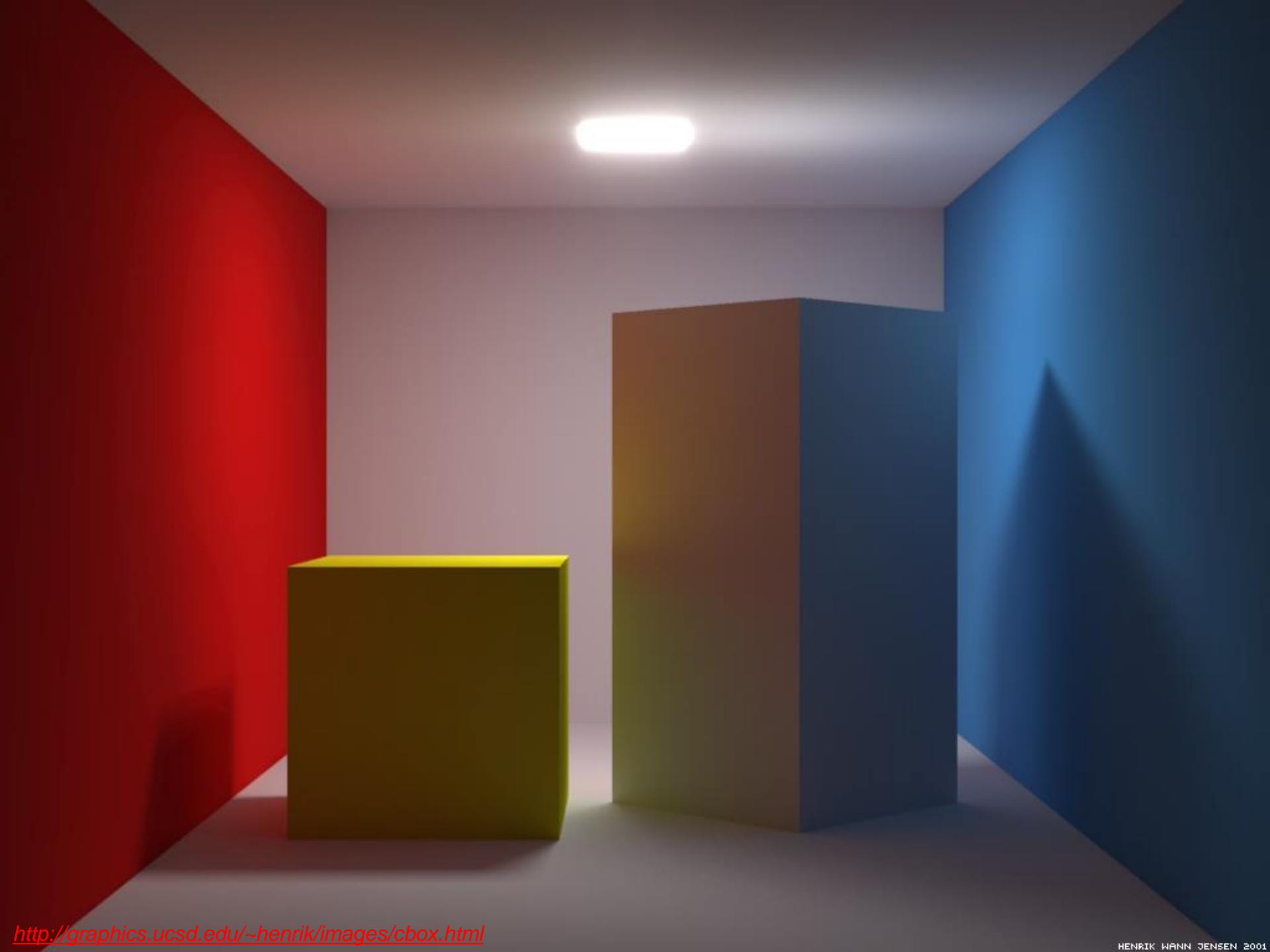
+ caustics

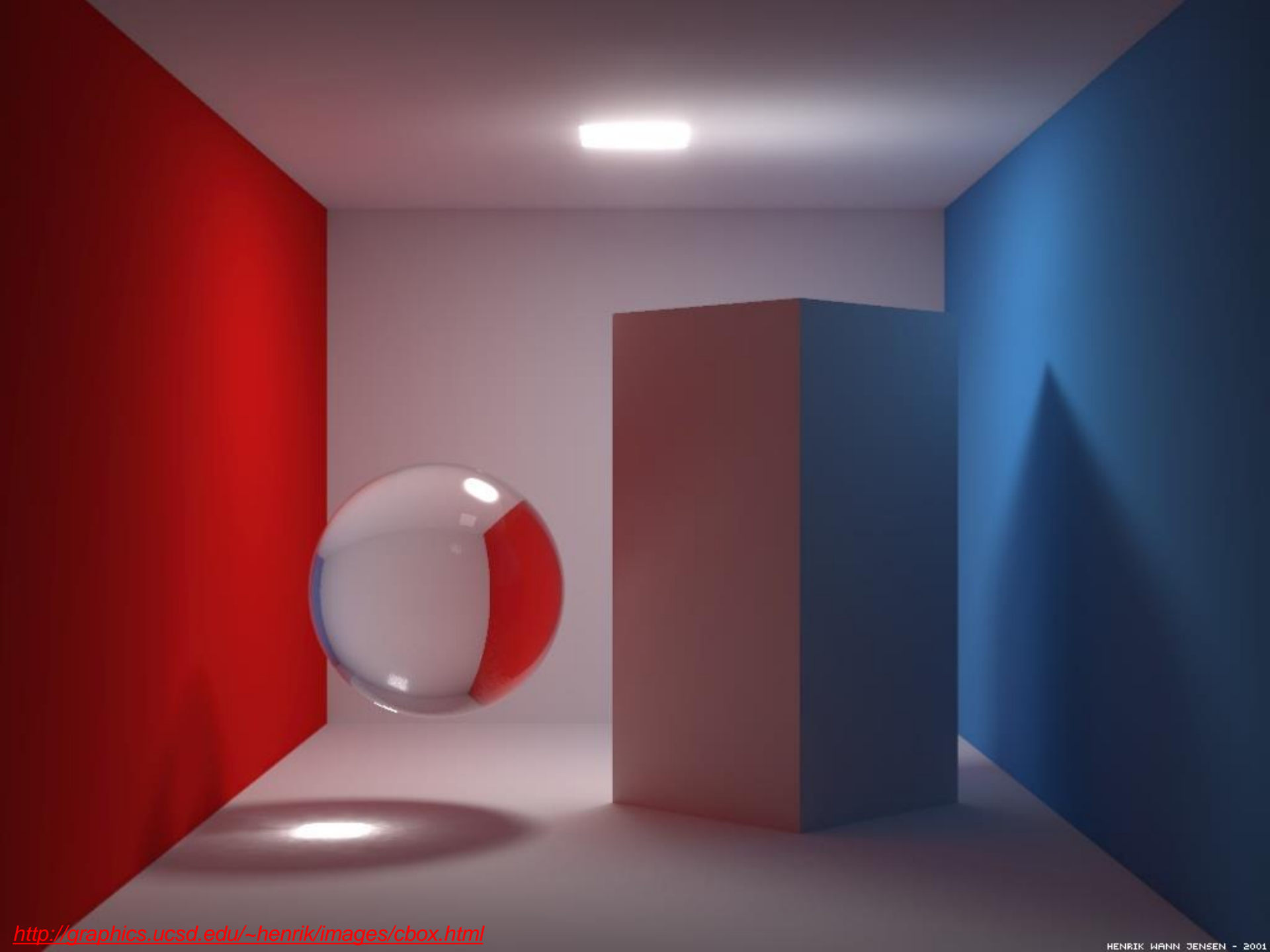
Henrik Wann Jensen



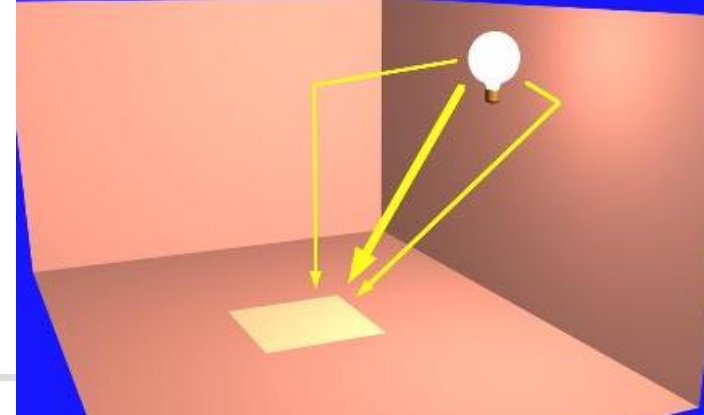
+ indirect diffuse illumination

Henrik Wann Jensen





Метод Radiosity



В ранних 1960-х инженеры разработали методы моделирования перемещения теплового излучения между поверхностями в печах или двигателях. В середине 1980-х → компьютерная графика.

Radiosity вычисляет интенсивность всех поверхностей в окружении, что предпочтительнее, чем вычислять цвет каждой точки экрана.

В основе аппроксимации основного уравнения визуализации методом Radiosity лежит предположение о том, что все поверхности сцены являются идеальными диффузными поверхностями, т.е. рассеивают падающий свет во все стороны с одинаковой интенсивностью (закон Ламберта).

После принятия такого упрощения мы можем вынести функцию BRDF из-под знака интеграла, т.к. она будет постоянной. В результате имеем основное уравнение Radiosity:

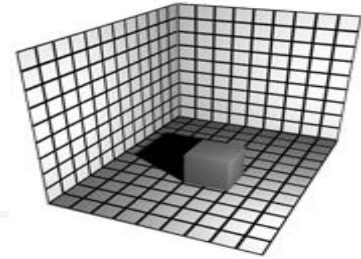
$$B(x) = E(x) + \rho(x) \int_{x'} B(x') \frac{V(x, x') G(x, x')}{\pi} dx'$$

Здесь $B(x)$ - это энергия рассеиваемая элементом.

Для решения уравнения *Radiosity*, мы должны разбить все поверхности нашей сцены на дискретные элементы конечной величины, так чтобы это позволило нам перейти от интеграла к сумме. Также мы полагаем, что светопередающие характеристики (отражающая и рассеивающая способность) этих элементов одинаковы.



Метод Radiosity



Карта освещенности (лайтмэпам, light map). Под "дискретными элементами конечной величины" подразумеваются точки лайтмэпов.

Процедура:

- После разбиения поверхностей 3D сцены на дискретные элементы, в один проход по стандартным алгоритмам рассчитываем первичную освещенность поверхностей от всех источников света. После этого знаем, какая энергия источников света приходится на каждую точку лайтмэпа.
- Затем, собственно, само Radiosity: представив, что каждый элемент является самостоятельным источником световой энергии, которую он получил от первичных источников света, рассчитываем вторичную освещенность, т.е. учитываем влияние одних элементов на другие. Затем, учитывая поглощение, проход за проходом рассчитываем переизлучение световой энергии между поверхностями сцены до тех пор, пока не установится равновесие.

История развития алгоритма:

В ранних версиях radiosity для отображения результата на экране необходимо было полностью просчитать распространение света и освещённость элементов. В 1988 разработан метод прогрессивного уточнения: немедленное отображение результата, который со временем уточнялся. В 1999 изобретена техника стохастической релаксации излучаемости (Stochastic Relaxation Radiosity). Этот алгоритм составляет основу коммерческих radiosity-систем производимых компанией Discreet.

Алгоритмы глобального освещения Метод Radiosity

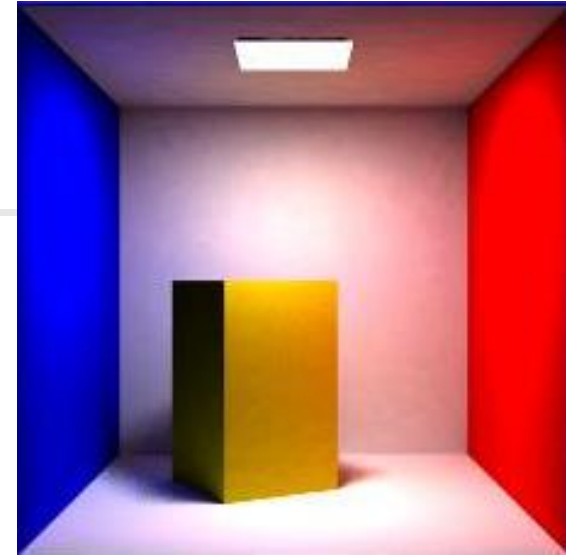
Из-за наложенных ограничений, метод Radiosity подходит только для расчета диффузных переотражений света между поверхностями (что, не под силу методу трассировки лучей) и не позволяет передать зеркальные отражения и элементы прозрачности. В профессиональных системах визуализации используются комбинированные алгоритмы, совмещающие трассировку лучей и Radiosity:

Ray-Tracing

- Точно рассчитывает прямое освещение, тени, отражения и эффекты прозрачности
- Экономит память
- Ресурсоёмкий. Время на производство картинki очень зависит от количества источников света в сцене
- Процесс должен повторяться **для каждой точки обзора заново**
- Не учитывает диффузного переотражения

Radiosity

- Рассчитывает диффузное переотражение от поверхностей (один раз **для каждого нового положения источников света**)
- Производит независимые решения, для быстрой визуализации из любой точки обзора
- Предлагает непосредственные визуальные эффекты
- 3D-сетка требует больше памяти, чем оригинальные поверхности
- Алгоритм дискретизации поверхности более восприимчив к артефактам, чем *ray tracing*
- Не работает с эффектами отражения или прозрачности

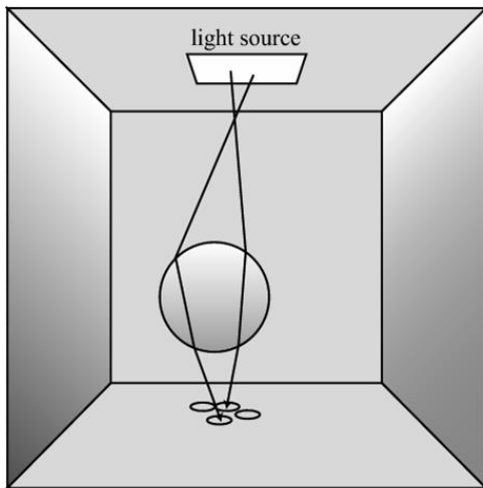


Метод фотонных карт

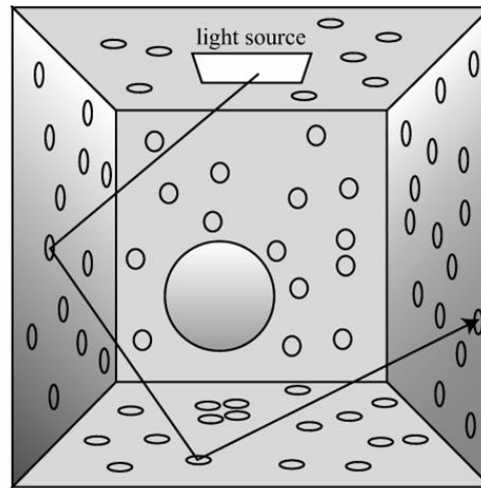
1996 Henrik Wann Jensen

Photon Mapping - алгоритм глобального освещения решающий уравнения рендеринга, разработанный в 1996 **Henrik Wann Jensen** ([annot.](#)). Метод позволяет снять ограничения Radiosity.

Согласно первому шагу алгоритма, лучи от источников света и лучи от камеры трассируются независимо до момента удовлетворения некоторого критерия завершения, затем во втором шаге они объединяются для расчета величин яркости (светимости).



Caustic Map



Global Photon Map

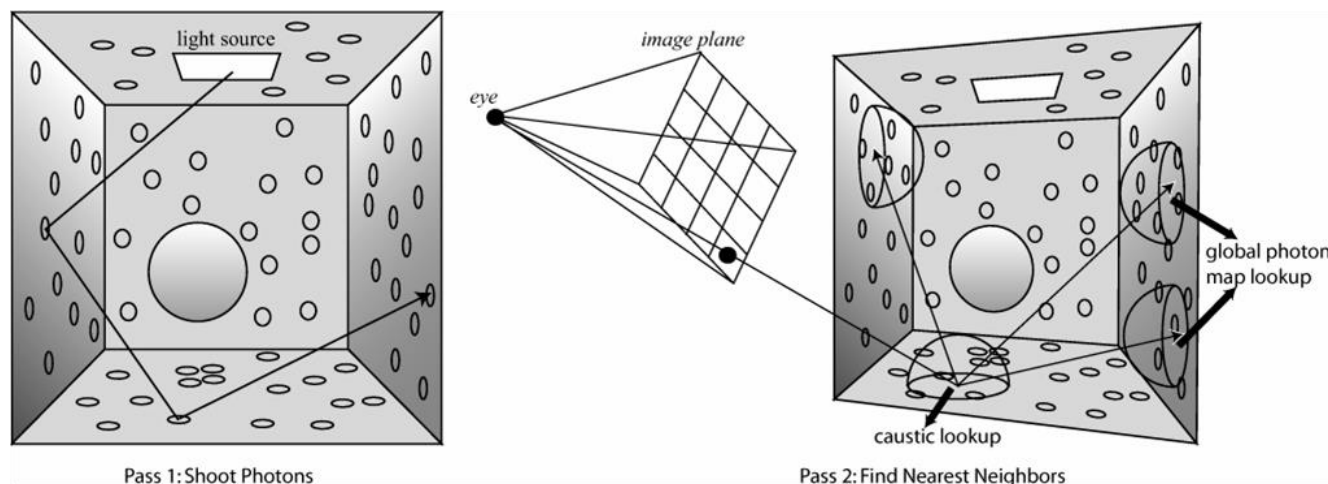
Эти данные далее используются как самосвечение в задаче обратного рейтрейсинга, что позволяет реалистично моделировать световое взаимодействие различных объектов. В частности, это позволяет моделировать рефракцию света при прохождении сквозь прозрачные объекты, такие как стекло или вода, перекрестное взаимное освещение диффузной составляющей и некоторые эффекты, обусловленные распределенной материей, такой как дым или водяной пар.

Для ускорения процедуры вместо простого испускания фотонов в случайных направлениях, они испускаются в направлении известных объектов, которое рассчитывается манипулятором фотонов и позволяет получить как фокусировку, так и рассеивание светового пучка (потока).

Метод фотонных карт

1996 Henrik Wann Jensen

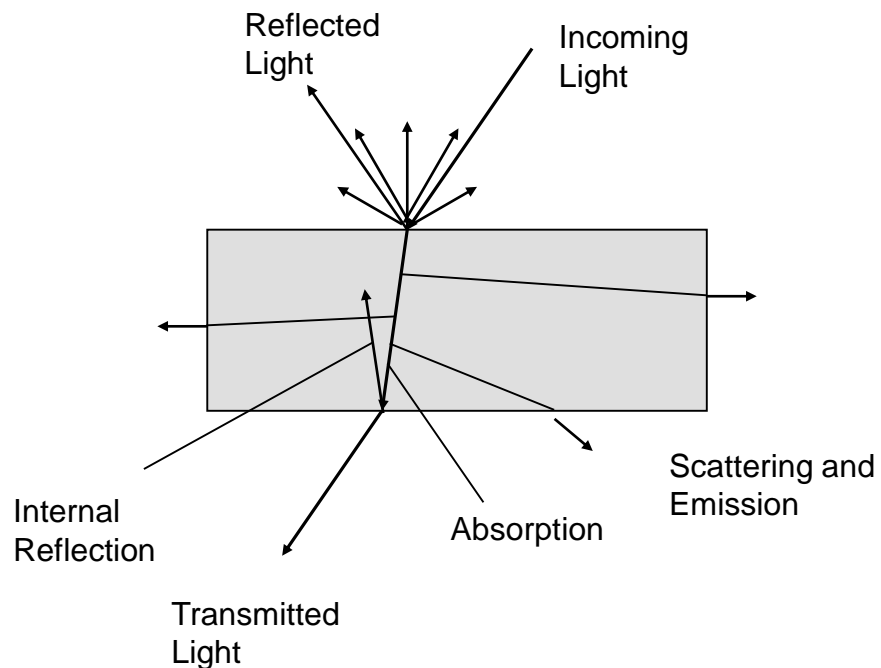
По своей основе Photon mapping является препроцессом и завершается до начала собственно рендеринга изображения. Часто фотонная карта сохраняется на диске для более позднего использования. Во время работы собственно рендеринга, каждое пересечение объекта и луча тестируется на попадание в зону одного или нескольких фотонов, и, если это так, то энергия фотонов добавляется к энергии рассчитанной по стандартным уравнениям освещения. Наиболее медленная часть алгоритма – это поиск в фотонной карте фотонов ближайших к точке, для которой рассчитывается освещенность.



Фотонная карта рассчитана на применение, прежде всего, с рейтрейсингом, но может быть также использована с рендерингом методом построочного сканирования ([scanline renderers](#)).

Дополнение

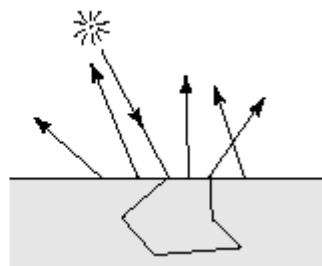
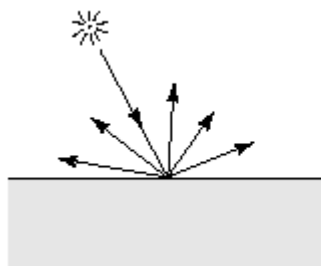
Более полная модель распространения света



Chris Wynn. **An Introduction to
BRDF-Based Lighting.** NVIDIA
Corporation

Распространение света в материалах (subsurface scattering, translucent)

В компьютерной графике во многих случаях принимается, что взаимодействие света с непрозрачными объектами определяются **исключительно** свойствами поверхности материалов, т.е. BRDF. В реальности свет проникает на некоторую глубину объема в некоторой точке поверхности, взаимодействует с материалом внутри объема и выходит через поверхность наружу в другой точке. При этом меняется интенсивность и цвет отраженного света. Это физическое явление получило название подповерхностного переноса света – subsurface scattering или translucency.



Слева - взаимодействие света с объектом, предполагаемое при использовании модели BRDF, справа - subsurface scattering (BSSRDF).

Для стакана молока справа, используется BSSRDF с заданными свойствами поглощения и рассеяния материала (цельное молоко). Дальнейшее развитие модели BSSRDF предполагает учет глобального, а не только прямого, освещения и введение в модель нескольких слоев материала. См. также статью Ю.М.Баяковского, В.А.Галактионова. Современные проблемы компьютерной (машинной) графики. 2001 (PDF, [local](#))



Источники

1. Thomas Funkhouser. Global Illumination/ Princeton University. COS 526, Fall 2002
2. Cohen M.F., Wallace J.R. Radiosity and realistic image synthesis. 1995. 412p. ([PDF](#))
3. Chris Wynn. An Introduction to BRDF Based Lighting/ NVIDIA Corporation
4. Radiosity OverView. Part 1/ Reference: SIGGRAPH 1993 Education Slide Set, by Stephen Spencer
5. BRDF-based Lighting: www.developer.nvidia.com/object/BRDFbased_Lighting.html, 2004
6. Ray Tracing - SIGGRAPH www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/raytrace/rtrace0.htm
7. Advanced Ray Tracing Techniques /SIGGRAPH, 1999
<http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/raytrace/rtrace0.htm>
8. [Henrik Wann Jensen](#): "Global Illumination using Photon Maps". In "Rendering Techniques '96". Eds. X. Pueyo and P. Schröder. Springer-Verlag, pp. 21-30, 1996. [Click here to download a slightly extended 1.3MB pdf version of the paper](#)
9. Henrik Wann Jensen. [Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping](#). 2nd Print. March 2005. Publisher: AK Peters. ISBN: 1568811470
10. Zack Waters. [Photon mapping introduction](#) /Worcester Polytechnic Institute. 2002
11. Alexander Reshetov, Alexei Soupikov, Jim Hurley. Multi-Level Ray Tracing Algorithm / Intel Corporation ([PDF](#))
12. Ю.М. Баяковский, В.А. Галактионов. Современные проблемы компьютерной (машинной) графики. 2001 ([pdf](#))
13. Е.В.Шикин, А.В.Боресков. Компьютерная графика. М., «Диалог-МИФИ», 2001
14. Сиваков Игорь. Как компьютер рассчитывает изображения. Технологии программного рендеринга. 2004 (www.fcenter.ru) (часть1, часть2)