

Основы синтеза фотореалистичных изображений.

## **Глава 2. Взаимодействие света и материала. ДФО. Модели освещения**

Александра Афанасьева

Москва, 2014

## Оглавление

Взаимодействие света и материала. ДФО. Модели освещения .....	1
Введение .....	3
Трёхмерный этап синтеза как звено графического конвейера .....	3
Взаимодействие света с поверхностью .....	4
Двулучевая функция отражения .....	6
Отражение и Двулучевая функция отражения .....	6
Физическая корректность Двулучевой Функции Отражения .....	8
Обратимость Двулучевой Функции Отражения .....	9
Сохранение энергии при моделировании отражательной способности.....	9
Пример идеально диффузного или близкого к диффузному объекта. Коэффициент Альбедо.....	9
Дискретизация Двулучевой функции отражения по длинам волн .....	11
Идеально зеркальное отражение .....	12
Двулучевая Функция Пропускания (Преломления) .....	12
Двулучевая Функция Рассеивания .....	12
Расчет излучения точки поверхности. Уравнение рендеринга (общий случай).....	13
Расчет излучения точки поверхности. Уравнение рендеринга (дискретный случай).....	14
Ограничения модели Двулучевой Функции Отражения .....	14
Модель освещения.....	15
Процесс тонирования изображения.....	15
Физически обоснованные и эмпирические модели освещения .....	16
Физически обоснованные модели материалов.....	16
Эмпирические модели материалов .....	16
Первичное и вторичное освещение .....	16
Сфера как удобное представление освещения .....	17
Локальные и глобальные модели освещения.....	20
Эмпирические модели освещения .....	20
Модель Ламберта .....	20
Модель Фонга .....	21
Модель Блинна-Фонга.....	23
Разделение зеркальной и диффузной составляющей модели освещения .....	24
Модель Лафорта .....	24
Физические модели освещения.....	25
Законы Френеля .....	25
Микрофасетные модели. Модель Кука-Торранса .....	26
Табличное представление Двулучевой Функции Отражения .....	29
Табличное представление ДФО.....	29
Хранение табличного представления ДФО .....	30

## Введение

Вторая часть курса будет связана с работой в пространстве, работой с энергией, с построением фоторелистичных изображений.

Если в первой части курса мы работали с цветом, то в данной главе речь пойдет о том, как энергия света преобразуется в пиксели результирующего изображения, т.е. затронем так называемый трехмерный этап синтеза изображений.

## Трехмерный этап синтеза как звено графического конвейера

Формализуем понятие источника света. Источник света задается некоторым непрерывным распределением в пространстве, т.е. для каждого направления необходимо знать количество энергии, излучаемое за одну секунду в данном направлении. Зная данное распределение, можно вычислить силу света в данном направлении и, что для нас более полезно, узнать яркость этого источника для наблюдателя, находящегося в некотором направлении.

В конечном счете, **чтобы построить изображение**, требуется информация об энергии, пришедшей в оптическую систему. Свет может попасть в камеру или в глаз как напрямую из источника света, так и отразившись от некоторой поверхности, или же пройдя через нее. При взаимодействии с поверхностью часть света отражается от поверхности, а часть – проходит через поверхность (в случае, если поверхность полупрозрачная).

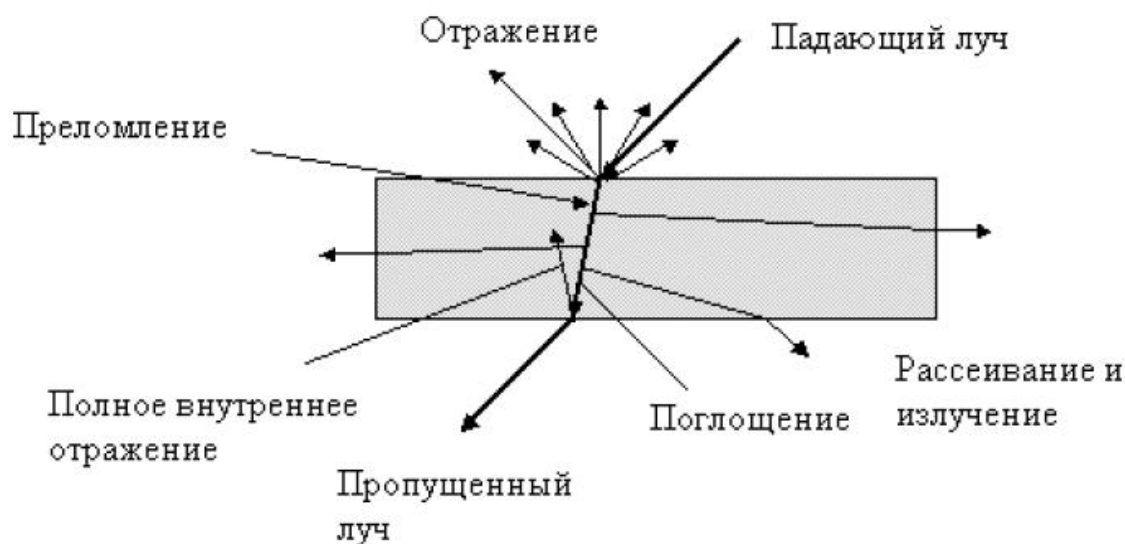


Рис. Взаимодействие света с поверхностью.

**На поверхности** источники света создают некоторую аналитическую освещенность поверхности, т.н. облученность. Т.е. мы имеем некоторый спектр распределения энергии, распределение плотности энергии в точке некоторой поверхности. С учетом особенностей материала этой поверхности мы можем посчитать, сколько энергии было отражено в том или ином направлении.

Все методы синтеза изображений по сути строятся вокруг моделирования этого процесса перемещения света и его взаимодействия с поверхностью, в той или иной степени упрощающие эту модель для достижения скорости и интерактивности или же приближающие ее в той или иной степени к максимальному моделированию физических законов.

В процессе синтеза изображений моделируется 2 основных аспекта:

- 1) Все виды распространения света, переотражения, преломления (с разной степенью точности), т.е. «путь» света от источника к наблюдателю
- 2) Процесс взаимодействия света с поверхностью

Первый аспект, и методы синтеза, его затрагивающие, будут подробно рассмотрены в следующих главах. В данной главе мы подробно рассмотрим второй аспект.

## Взаимодействие света с поверхностью

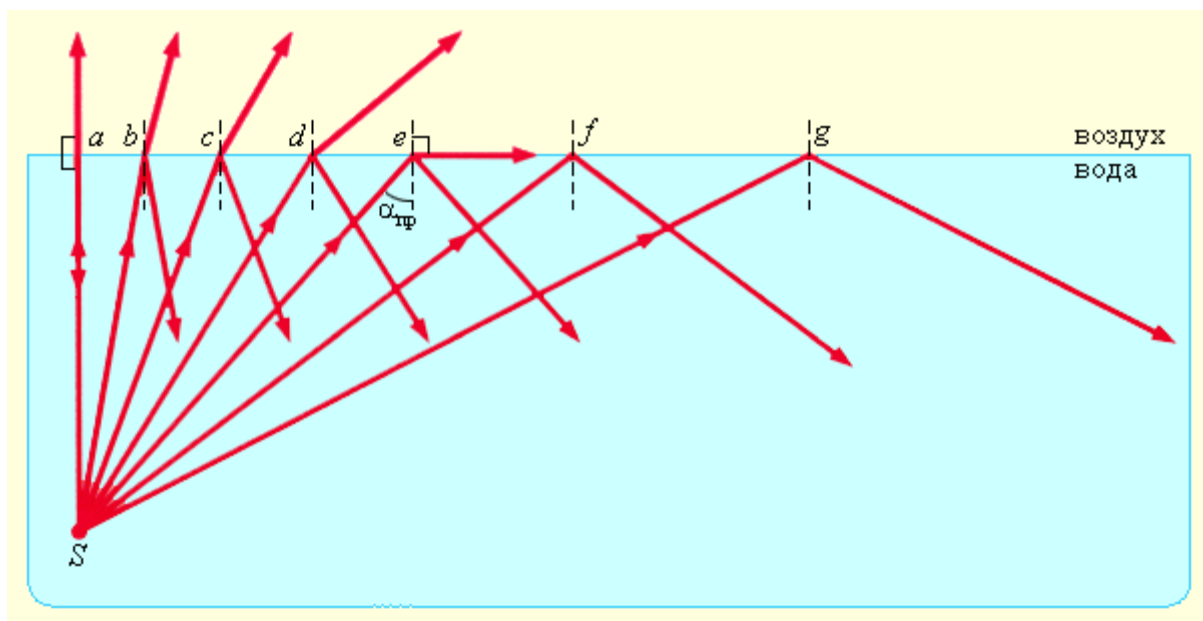
Существуют некоторые модели, описывающие взаимодействие света с поверхностью, определяющие, что происходит при попадании света на поверхность и при отражении от нее. Кратко перечислим возможные эффекты:

- 1) Отражение. Часть энергии, пришедшей на поверхность, может отразиться в от нее в некотором направлении.
- 2) Преломление. Часть энергии может быть пропущено через поверхность. Этот эффект весьма существенен для некоторых материалов.
- 3) Поглощение. Часть энергии может быть поглощено поверхностью.
- 4) Подповерхностное рассеивание. Часть световых лучей, пройдя через поверхность, могут рассеиваться внутрь, а затем отражаться от внутренних слоев объекта и возвращаться к наблюдателю, создавая эффект подповерхностного свечения.



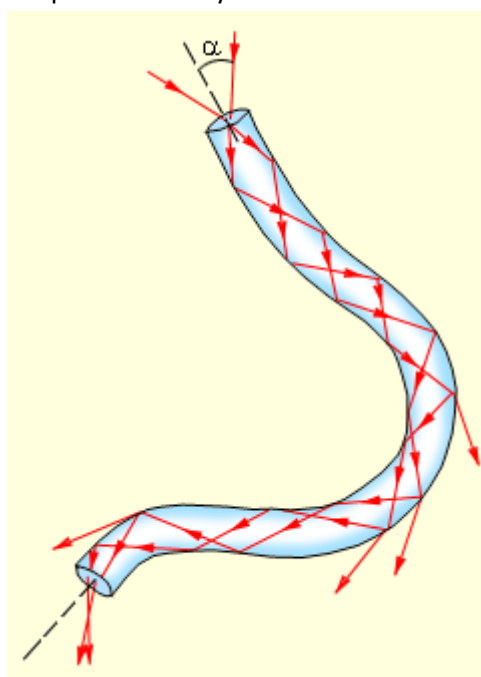
*Рис. Эффект подповерхностного рассеивания.*

- 5) Полное внутреннее отражение. Находясь внутри некоторой среды и попав на границу этой среды с другой средой, свет может не преломиться, а отразиться от границы обратно в среду.



*Рис. Полное внутреннее отражение на границе воды и воздуха.*

Эффект полного внутреннего отражения характерен для объектов с высоким показателем преломления, находящихся в среде с относительно низким показателем преломления. В этом случае луч, упавший на границу сред под достаточно большим углом с нормалью к границе, не сможет пройти через нее в силу величины показателя преломления.



*Рис. Пример полного внутреннего отражения внутри оптоволоконного кабеля.*

Угол, при котором луч перестает преломляться и начинает отражаться обратно от границы в ту же среду, из которой он пришел, называется *углом полного внутреннего отражения*.

Мы перечислили основные эффекты, имеющие место при попадании света на поверхность. Следует отметить, что данные эффекты, конечно же, будут зависеть и от материала поверхности, и от того, под каким углом луч падает на поверхность. Например, в зависимости от угла падения и показателя преломления может произойти полное внутреннее отражения, или же луч может быть

пропущен через поверхность.

Игнорируя некоторые из этих эффектов при моделировании взаимодействия света с той или иной поверхностью, мы можем лишиться реализма конечного результата. Без учета подповерхностного рассеивания бессмысленно моделировать такие материалы, как воск или кожа, а не принимая во внимание эффект полного внутреннего отражения в бриллианте, мы точно не получим физически корректную модель.

## Отражение

***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)

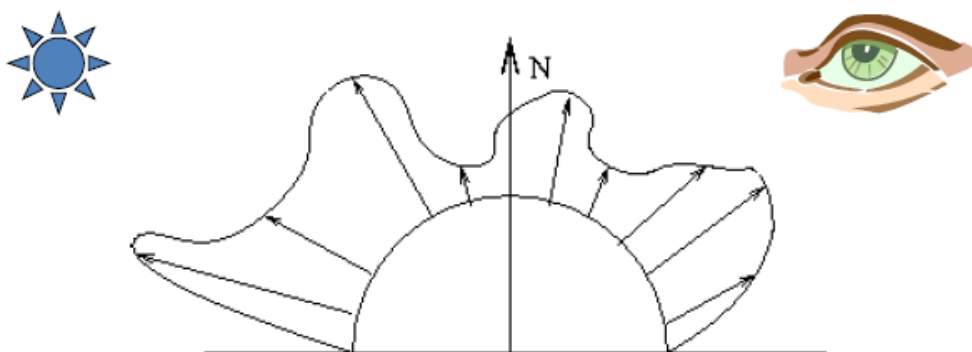
Данную классификацию нельзя считать полной ввиду существования куда более сложных моделей материалов. В качестве примера можно привести материалы с анизотропным отражением (подробнее см. ниже), материалы, отражающие в ту же сторону, откуда пришел свет, блестящие материалы с ярко выраженным блеском, но при этом не являющиеся идеально гладкими. Различные модели позволяют моделировать различные типы поверхностей, невозможно построить универсальную модель, подходящую для всех материалов.

Некоторую условную классификацию материалов можно также провести в зависимости от ***способа взаимодействия с падающим лучом с точки зрения пропускания (преломления)***

# Двулучевая функция отражения

## Отражение и Двулучевая функция отражения

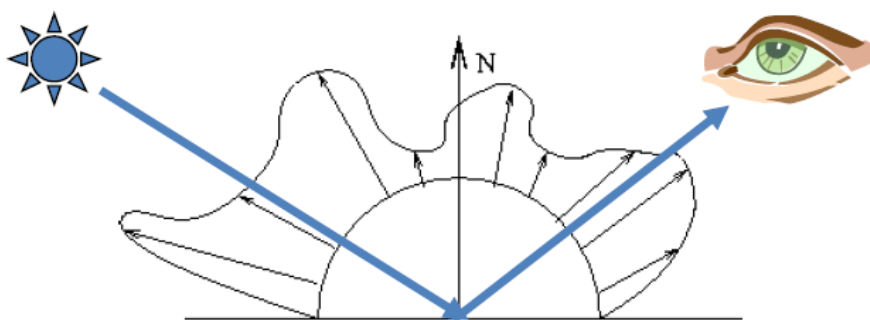
Попробуем аккуратно разобраться в упомянутых процессах с точки зрения моделирования. Рассмотрим точку некоторой поверхности (координаты ее известны). Пусть в некоторой точке  $L$  пространства задан источник света. Зафиксируем точку  $C$ , в которой находится наблюдатель. Поскольку координаты точек известны, то можно вычислить направление на источник и направление на наблюдателя. Наша цель – определить, сколько энергии было отражено в направлении наблюдателя при условии освещения нашей точки заданным источником света.



*Рис. Источник света, наблюдатель, энергия.*

Свойства материала, как и свойства источника света, можно рассматривать в виде спектрального распределения, и в зависимости от рассматриваемой длины волны можно получить совершенно разные зависимости, разную интенсивность источника света и разное поведение материала.

Сформулируем вышесказанное математически. Будем рассматривать единицу, инвариантную вдоль падающего луча (под лучом в данном случае подразумевается направление распространения световой энергии). Яркость для данной точки  $P$  будет равна исходящей яркости луча внутри телесного угла  $\omega_0$  из данной точки, при условии того, что эта точка облучается с направления  $\omega_i$  входящего направления яркости интенсивности  $L$ .



*Рис. Определение Двухлучевой Функции Отражения.*

Итак, мы рассматриваем:

- координату точки  $P$  (или координаты некоторой параметризованной поверхности),
- направления, заданные некоторым телесным углом (работать непосредственно с тонкими лучами некорректно, и под лучами мы будем подразумевать небольшие конусы с высотой, совпадающей с направлением луча, т.е. телесные углы),
- излучение, попадающее на поверхность с направления  $\omega_i$ ,
- излучение поверхности в направлении  $\omega_0$ .

Функция, связывающая две последних единицы – это как раз и есть та функция, которую мы ищем. Данная функция называется Двухнаправленной Функцией Отражения или Двухнаправленной Функцией Отражательной Способности (сокращенно ДФО или ДФОС). Английский аналог

названия данной величины – BiDirectional Distribution Function (сокращенно BRDF). Данная функция непосредственно описывает свойства материала

Важно обратить внимание, что в том предположении, в котором только что было сказано, получается, что исходящее излучение (или исходящая яркость) зависит исключительно от входящего излучения для данной точки, что, вообще говоря, будет несправедливым для поверхности с рассеиванием внутри материала. Близлежащая точка в таком случае может дать вклад в излучение, исходящее в направлении наблюдателя. В данной ситуации предложенная модель работать не будет, и для более универсального ее использования ее нужно будет на некотором уровне обобщить до модели, включающей в себя подповерхностное рассеивание.

Дадим более точное определение Двулучевой Функции Отражения. Рассмотрим дифференциальную освещенность, которую дает источник света в точке P. Из определения функции следует, что она имеет связь с яркостью, которая падает в этой точке. Иными словами, согласно дифференциальному определению освещенности верно следующее равенство:

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

Нас интересует, сколько энергии будет излучаться в направлении  $\omega_0$ . Из закона о линейности и сохранении энергии можно сделать некоторое предположение относительно того, что энергия, излучаемая материалом в исходящем направлении, будет пропорциональна освещенности в данной точке.

$$dL_0(p, \omega_0) \propto dE(p, \omega_i)$$

Нас интересует связь освещенности и величины исходящей яркости. Раскрывая данное отношение, мы получаем интересующую нас Двулучевую Функцию Отражения:

$$f_r(p, \omega_0, \omega_i) = \frac{dL_0(p, \omega_0)}{dE(p, \omega_i)} = \frac{dL_0(p, \omega_0)}{L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i \omega_i}$$

Небольшая буква r в определении величины  $f_r(p, \omega_0, \omega_i)$  говорит о том, что мы записываем свойства материала для отражения (reflect).

Следует обратить внимание: нельзя просто утверждать, что данная функция записывает отношение энергий, пришедшей с направления  $\omega_i$  и ушедшей с направления  $\omega_0$ . Это будет неверно уже в силу того, что эта функция может принимать различные значения, вплоть до бесконечных. ( $f_r$  была введена как дифференциальное приращение, способное в принципе принимать любые значения).

## Физическая корректность Двулучевой Функции Отражения

Функция, не нарушающая физических законов, считается *условно корректной*.

При моделировании нужно по возможности стремиться к физической корректности функции. В то же время нет никакой гарантии, что функция, моделирующая отражательную способность поверхности, и сохраняющая при этом физические законы, в принципе существует ☺. Однако по крайней мере данная функция может существовать в рамках нашего представления о физике (хотя бы потенциально).

Для Двулучевой Функции Отражательной Способности поверхности должны выполняться два физических закона: *закон обратимости* и *закон сохранения энергии*.



## Обратимость Двухлучевой Функции Отражения

Обратимость рассматриваемой функции заключается в следующем: если мы рассматриваем нашу функцию с одного направления (падающего света) и с другого направления (т.е. луч исходит из камеры), и при этом луч проходит по одной и той же траектории, то значения функции в данных двух случаях должны совпадать. Данный закон также называют *принципом обратимости Геймгольца*.

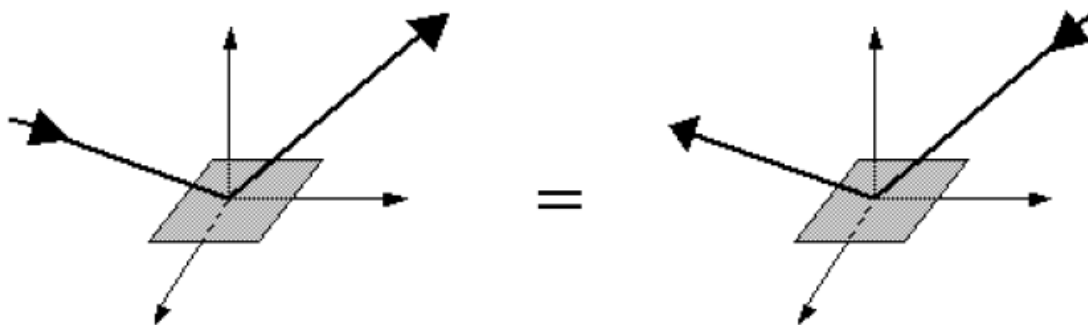


Рис. Обратимость Двухлучевой Функции Отражения.

Математически принцип обратимости Двухлучевой Функции отражения записывается так:

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

При рассмотрении эффекта преломления света важно учитывать тот факт, что преломление приводит к изменению фронта волны, часто меняется ее плотность, и для выполнения закона сохранения энергии в этом случае при моделировании Двухлучевой Функции Отражения может понадобиться ввести некоторые дополнительные коэффициенты.

## Сохранение энергии при моделировании отражательной способности

Пусть уходящая с поверхности и попадающая на поверхность энергии рассчитываются суммарно по всем направлениям. Закон сохранения энергии говорит о том, что энергия, покидающая поверхность, не должна превосходить энергии, попавшей на поверхность.

## Пример идеально диффузного или близкого к диффузному объекта. Коэффициент Альбедо

Рассмотрим простой пример. Пусть мы имеем дело с объектом, обладающим идеальным диффузным отражением (так называемый *ламбертовым объектом* – см. главу 1). У данного идеального объекта Двухлучевая Функция Отражения является константой, равной по абсолютной величине  $\frac{1}{\pi}$ .

$$f_{r,d}(p, \omega_i, \omega') = f_{r,d}(p) = C = 1/\pi$$

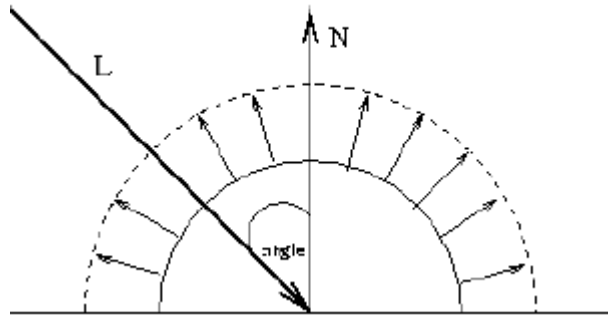


Рис. Отражение с поверхности идеально диффузного объекта.



Рис. Пример идеально диффузного объекта.

Поверхность объекта также характеризуется коэффициентом поглощения, который влияет на количество отраженной энергии. Отражающая способность для диффузных или близких к ним поверхностей характеризуется Альбедо данных поверхностей.

Альбедо (от латинского *albus* — белый) — характеристика отражательной (рассеивающей) способности поверхности.

Значение альбедо для данной длины волны или диапазона длин волн зависит от спектральных характеристик отражающей поверхности, поэтому альбедо отличается для разных спектральных диапазонов (оптическое, ультрафиолетовое, инфракрасное альбедо) или длин волн (монохроматические альбедо).

В зависимости от геометрии отражающей поверхности в оптике и астрономии различают несколько видов альбедо:

- Ламбертово (истинное, плоское) альбедо
- Геометрическое альбедо
- Бондовское (сферическое) альбедо

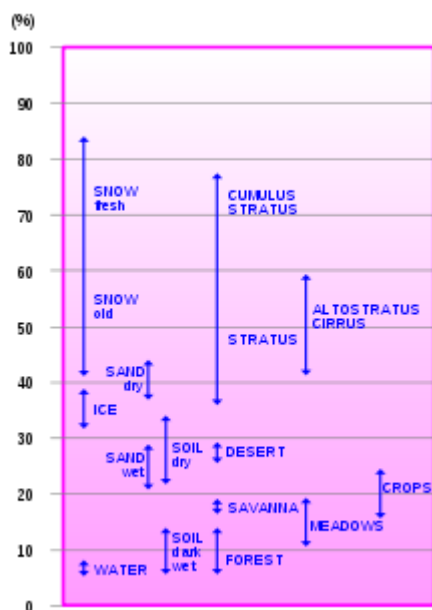


Рис. Сравнение диффузного отражения солнечного света (дано в %) различными поверхностями.

### Ламбертово (истинное, плоское) альбедо

Истинное или плоское альбедо — коэффициент диффузного отражения, то есть отношение светового потока, рассеянного плоским элементом поверхности во всех направлениях, к потоку, падающему на этот элемент.

В случае освещения и наблюдения, нормальных к поверхности, истинное альбедо называют *нормальным*<sup>[1]</sup>.

Нормальное альбедо чистого снега составляет ~0,9, древесного угля ~0,04.

### Геометрическое альбедо

В планетной фотометрии геометрическое (плоское) альбедо определяется отношением освещённости у Земли, создаваемой планетой в полной фазе  $E_0$ , к освещённости  $E_\pi$ , которую создал бы плоский абсолютно белый экран того же размера, что и планета, расположенный на её месте перпендикулярно лучу зрения и солнечным лучам.

Геометрическое оптическое альбедо Луны составляет 0.12, Земли — 0,367.

### Бондовское (сферическое) альбедо

Альбедо Бонда  $A_C$  определяется как отношение светового потока, рассеянного сферическим телом во всех направлениях, к потоку, падающему на тело. Альбедо Бонда связано с геометрическим альбедо следующим отношением:  $A_C = A_r * Q$ , где  $A_r$  — геометрическое альбедо, а  $Q$  — фазовый интеграл, учитывающий только ту часть освещённой поверхности, которая видна наблюдателю<sup>[3]</sup>. Бондовское альбедо Земли приблизительно равно 0,29, Луны — 0,067.

### Дискретизация Двулучевой функции отражения по длинам волн

Обратим внимание, что мы по-прежнему рассматриваем одну длину волны. Коэффициент Альбедо может быть свой у каждой длины волны. Для Двулучевой Функции Отражения, с которой мы оперируем, задается еще и для параметр  $\lambda$  (длина волны падающего излучения).

Для работы с Двулучевой Функцией Отражения мы должны решить, как задавать ее в конкретных

условиях: дробить спектр на 20, 40, 60 или 3 отрезка. Это наш выбор в зависимости от того, какие требования мы ставим к процессу синтеза изображений. В простейшем случае используется так называемый «расчет в цвете», условно эквивалентный выборке из спектра, состоящей из трех точек и замеру отражающей способности поверхности в каждой из этих трех точек. Для ряда случаев, (например, если нужно рассматривать некоторые волновые эффекты) данный подход неприменим.

## Идеально зеркальное отражение

Для идеально зеркального отражения ситуация упрощается: количество исходящей отраженной энергии будет зависеть, помимо того как от падающей, только от угла падения и отражения входящего и исходящего луча.

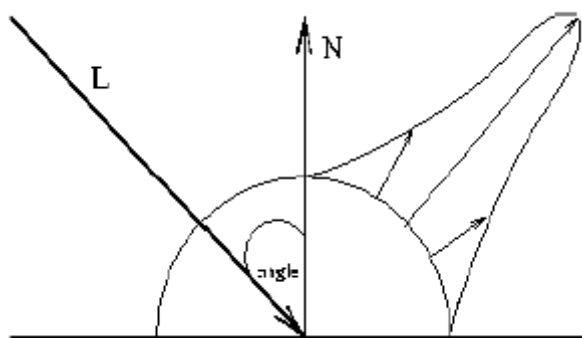


Рис. Отражение света с поверхности зеркального объекта

## Двулучевая Функция Пропускания (Преломления)

Аналогично ДФО можно определить и функцию пропускания. Разница в том, что мы говорим не об отраженной энергии, а об энергии пропускания. Двулучевая Функция пропускания (сокращенно BTDF – BiDirectional Transmission Function) определяет количество энергии, пропущенной через поверхность

## Двулучевая Функция Рассеивания

Объединив две рассмотренные функции, мы получаем функцию, которая должна вычислять отраженную и пропущенную энергию. Как уже было сказано выше, мы не рассматриваем те точки поверхности, которые могут дать вклад в отражение, но при этом находятся рядом и освещены. Для того, чтобы учесть освещение в соседних точках и их влияние на освещение в рассматриваемой точке необходимо будет работать не на уровне функций, а на уровне интегральных площадок в некоторой окрестности данной точки. Подобную интегральную функцию называют *Функцией Подповерхностного Рассеивания* (английское название - Bidirectional Subsurface Scattering Function, сокращенно BSSD). Данная функция может быть вычислена как интегральный случай Двулучевой Функции Отражения в окрестности заданной точки.

## Расчет излучения точки поверхности. Уравнение рендеринга (общий случай)

Покажем, как вычислить суммарную яркость в данной точке. Нам известно, как рассчитывать яркость заданной точки при облучении ее одним источником света (т.е. если яркость задана по одному направлению). В рамках принятых нами представлений об оптике вклад в освещение с разных сторон с разных источников света будет суммироваться. Аналогичным образом будет суммироваться и вывод энергии с данной точки в данном направлении.

Пусть нам известна дифференциальная яркость точки  $O$ . Нам нужно просуммировать (или проинтегрировать – в непрерывном случае) эту яркость по всем возможным входящим направлениям. В случае, если мы рассчитываем Двухлучевую функцию отражения, интегрирование будет происходить по полусфере, чтобы учесть пропускание света, нужно будет рассмотреть всю сферу. Фактически нужно посчитать яркость интересующей нас точки для каждого источника света для заданного наблюдателя и сложить все полученные яркости.

Пусть нужно вычислить излучение заданной точки  $O$  в интересующем нас направлении. По этому направлению, условно говоря, находится наблюдатель или какая-то сферическая поверхность, к которой нужно произвести расчет. Поэтому, если мы работаем с некоторой поверхностью, нужно знать ее отражающие свойства. Если луч попадает в источник света, то мы должны знать, какой силы в данном направлении идет свет (характеристику источника света). Из описанной схемы очевидно, что расчет будет рекурсивным. При расчете результирующей яркости нужно будет также учесть характеристики чувствительности элемента данной нашей оптической системы.

Дифференциальную яркость  $dL_o(p, \omega_o)$  поверхности в точке  $O$ , поделенную на яркость источника  $L_i(p, \omega_i)$  по направлению телесного угла  $\omega_i$ , при условии, что угол между нормалью к поверхности и источником равен  $\theta_i$ , обозначим как функцию  $f_r$

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

Выражая отсюда дифференциальную яркость точки  $O$ , получаем:

$$dL_o(p, \omega_o) = f_r(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

Проинтегрировав данное уравнение по всему телесным углу от источника, получаем:

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

Данное уравнение называется *уравнением рендеринга (в полусферической форме)* и его можно считать основным уравнением для расчета. Здесь приведена одна из самых простых записей данного уравнения. Практически все алгоритмы визуализации различных объектов так или иначе решают задачу о решении данного уравнения.

Нас будет интересовать функция  $f_r(p, \omega_o, \omega_i)$  под интегралом, олицетворяющая модель материала.

## Расчет излучения точки поверхности. Уравнение рендеринга (дискретный случай)

Перейдем к дискретному случаю. Будем считать, что в нашей сцене находится  $n$  источников света и мы игнорируем переотражения. При таком рассмотрении каждая точка сцены становится освещенной только данными источниками света. Таким образом, суммарная яркость точки будет равна сумме по источникам света. Пусть  $L_i^j$  – яркость  $j$ -го источника света в  $i$ -том направлении,  $\theta_i^j$  – соответствующий данному источнику угол с нормалью к поверхности,  $\omega_i^j$  – направление на  $j$ -й источник света,  $f_r(p, \omega_o, \omega_i^j)$  – двулучевая функция отражения поверхности. Тогда яркость  $L(p, \omega_o)$  точки  $O$  будет вычисляться по следующей формуле:

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

## Ограничения модели Двулучевой Функции Отражения

Описанная модель Двулучевой Функции Отражения присутствуют во многих графических движках, но неприменима для целого ряда задач. Описанный подход реализован в графическом конвейере библиотеки OpenGL. Данная библиотека включает простейший вариант моделей ДФО, а именно модель Фонга. В данной модели мы игнорируем переотражения света и считаем, что свет сразу попадает на аповерхность, освещаемой напрямую источником света. Подытожим, что нас ограничивает в данной модели:

- 1) Не учитывается дифракция, интерференция и другие волновые эффекты. Также отсутствует поляризация.

Данные недостатки легко исправить. Например, можно рассчитывать изображение на каждой длине волны, а затем сложить (грубо говоря) все синтезированные изображения для получения финального изображения.

- 2) Отсутствует подповерхностное рассеивание.

Чтобы исправить данный недостаток, от модели дфо нам понадобится перейти к функции объемного рассеивания, которая позволит нам учитывать данный эффект. Данный подход значительно усложняет написание трассировщика, зато благодаря нему повышается реалистичность для ряда материалов.

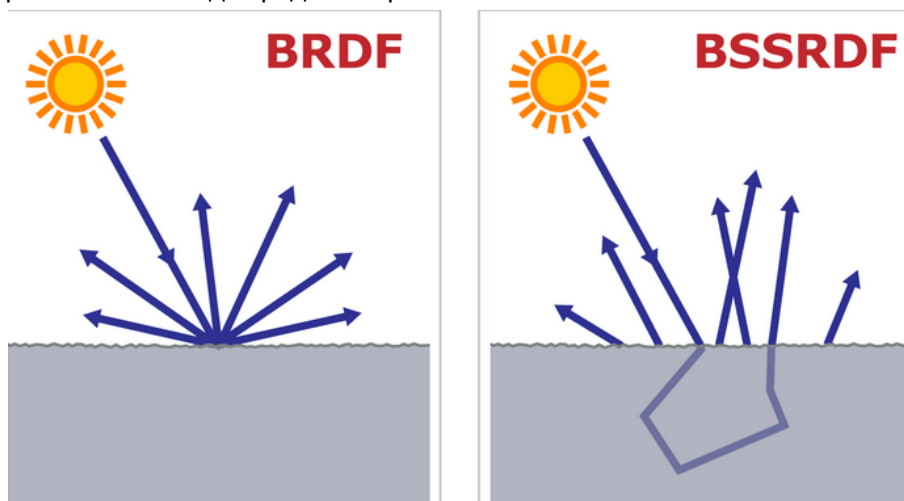


Рис. Слева – простая отражающая поверхность, справа – подповерхность с эффектом подповерхностного рассеивания.

3) Отсутствует флюоресценция и фосфоресценция.

Предложенная модель Двухлучевой Функции Отражения не принимает во внимание поверхности, излучающие не на той длине волны, которой они освещаются, а также поверхности, отдающие полученную энергию не сразу, а постепенно.

Перечисленные ограничения не являются критическими и введенной модели будет вполне достаточно для большинства сцен реального мира. В то же время, если требуется визуализация сложных волновых эффектов, нужно рассматривать более сложные модели, чем модели материалов на основе Двухлучевой Функции Отражения.

## Модель освещения

### Процесс тонирования изображения

В процессе синтеза изображения мы оперируем в некотором разрешении с точками на поверхности объектов виртуальной сцены. Пиксель изображения, в свою очередь, является проекцией некоторой точки нашей виртуальной сцены. Для получения результирующего изображения нужно вычислить цвет данной точки. Этот процесс и будет называться процессом тонирования.

*Тонирование изображения* – вычисление цвета пикселя изображения.

Модель тонирования (модель освещения) – это некоторые функции, характеризующие зависимость количества исходящей энергии (энергии, попавшей на поверхность) от количества входящей энергии (энергии, покидающей поверхность). Для данной модели характерен ряд противоречивых требований, которые предъявляются к ним в разных задачах:

- точность,
- выразительность,
- скорость.

К сожалению, эти требования тянут нашу задачу в разные стороны.

Если наша цель – промоделировать модель тонирования с наибольшей **точностью**, нужно решать задачу физического моделирования реальных сцен с численной площадью и полностью физическими значениями. Для точного отображения цвета объектов нужно будет задать особую функцию. Данная функция должна будет полностью отражать все распределение по спектру, а также абсолютно точно учитывать геометрию моделируемой сцены (т.е. полностью соответствовать направлениям падающего и исходящего лучей). Недостатки данного подхода – низкая скорость. Синтез физически корректного и реалистичного изображения требует корректного моделирования, что означает достаточно большое количество расчетов, если захотим смоделировать реальные спектры отражения и реальные измеренные (например, табличные) значения Двухлучевой Функции Отражения материала.

Если наша цель – наибольшая **выразительность** синтезированного изображения, то в этом случае точные модели тонирования могут не подойти. Объекты виртуальной сцены не могут выглядеть так как мы хотим, если мы будем рассчитывать учитывая требования точности, т.к. в этом случае

они будут выглядеть так, как они выглядят в реальном мире☺. Реализм важен с точки зрения правдоподобности, но совершенно может быть не связан с тем, как объект выглядит в реальности.

**Скорость** также является достаточно важным требованием, предъявляемым к модели тонирования изображения. Любая модель освещения для синтеза изображений в реальном времени должна быть быстрой. В любой ситуации удобно иметь возможность хорошего ручного контроля, который позволял бы уменьшить количество операций при моделировании. Для того, чтобы данный контроль в принципе был возможен, можно осуществлять тонирование следующим образом: например, для расчета цвета пикселя в сцене как правило требуется посчитать, сколько энергии попадает в соответствующую точку поверхности, а для уточнения данного цвета нужно рассчитать, сколько энергии попало соответственно в эту точку (для этого, соответственно, надо знать модель освещения другой поверхности, с которой пришел падающей луч). Таким образом, можно использовать те модели освещения (тонирования), при которых известен *инвертивный алгоритм просчета*.

## Физически обоснованные и эмпирические модели освещения

Модели освещения можно разделить на *физически обоснованные и эмпирические*.

### Физически обоснованные модели материалов

Физически обоснованные модели стараются аппроксимировать свойства некоторого реального материала, Двухлучевая Функция Отражения в таких моделях является приближенной к физически корректной. Часто такие модели учитывают особенности поверхности материала, например слои материала (моделирование кожи или тонких пленок) или же поведение частиц материала (моделирование снега, песка, различных жидкостей).

### Эмпирические модели материалов

Эмпирические модели устроены несколько иначе, чем физически обоснованные. Как правило, данные модели подразумевают некий набор параметров, не имеющих физической интерпретации, но позволяющих с помощью подгона получить нужный вид конечной модели. Иногда такие модели дают более качественный результат за счет БОльшого контроля за выразительностью, чем за точностью. Примеры эмпирических моделей: модель Ламберта, модель Фонга.

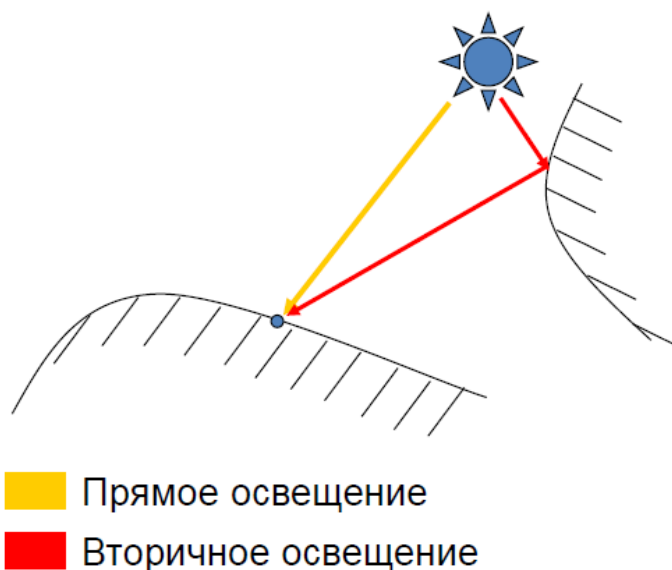
Стоит отметить, что данное деление моделей освещения является весьма условным. Для ряда эмпирических моделей можно придумать и некоторый физический смысл параметров, которые мы задействуем, а физически обоснованные модели могут «обходить» некоторые физические особенности моделирования материала (для увеличения простоты и скорости работы).

## Первичное и вторичное освещение

Рассматривая модель освещения в общем случае, глобально (т.е. рассматривая расчет не в одной точке, а более широко), частично заходя в область синтеза изображений, можно делить модели тонирования на те, что учитывают только прямое освещение, и на модели, учитывающие также и вторичное освещение.



Рассмотрим некоторый источник света. Под источником света мы понимаем некий объект, который светится по причине самоизлучения энергии, а не потому, что его отразили – например, по причине теплового нагрева или различных физических или химических процессов. Под *прямым освещением* некоторой точки объекта подразумевается освещение данной точки напрямую из источника света. Вторичное освещение, таким образом, это освещение, которое хотя бы один раз было отражено или преломлено.



*Рис. Первичное и вторичное освещение.*

Такое деление произошло при переходе между рекурсивным и нерекурсивным вычислением интеграла освещенности.

Большая часть освещения вокруг нас – это освещение вторичное. Например, в закрытой комнате источник света, как правило, только один – окно или лампа на потолке. Большая часть света отражается от стен, пола и потолка, благодаря чему мы видим комнату светлой.

Если не учитывать вторичное освещение в процессе синтеза изображения, можно сильно потерять в реалистичности. Однако в этом случае мы резко повышаем скорость работы алгоритма синтеза.

## Сфера как удобное представление освещения

Для многих процессов освещения (как двулучевой функции отражения, так и некоторых других связанных функций) существует представление данных функций в виде сферы (т.н. «трехмерной кляксы»).

Пусть мы рассматриваем некоторую точку, в которой требуется рассчитать значение некоторой функции: освещенности, яркости или двулучевой функции отражения. Сама сфера (скорее трехмерная клякса), по которой мы интегрируем, или же верхняя или нижняя полусфера (если мы имеем дело исключительно с отражением или преломлением) хранит в себе значения нужной функции по всем возможным направлениям. Иначе говоря, мы рассматриваем искомую нами единицу по соответствующему направлению и радиусом нашего объекта в данной точке (точнее, в

точке сферы, соответствующих сферических углах) указываем относительное численное значение данного параметра.



*Рис. Представление функции освещения в виде «Трехмерной кляксы».*

Таким образом, мы можем визуально оценить значение того или иного параметра по его сферическим координатам.

Существуют различные типы сфер освещения:

- 1) Сфера освещения.  
Данное представление используется для расчета освещения точки объекта по заданному направлению.
- 2) Сфера Двухлучевой Функции Отражения  
Сфера непосредственно хранит значения Двухлучевой Функции Отражения (или Преломления) по заданному направлению в виде радиуса
- 3) Сфера излучения  
Комбинация сферы освещения и сферы ДФО.
- 4) Сфера свечения.  
Некоторые материалы не только отражают свет, но и светятся сами. Сфера свечения хранит свечение материалов по всем направлениям.

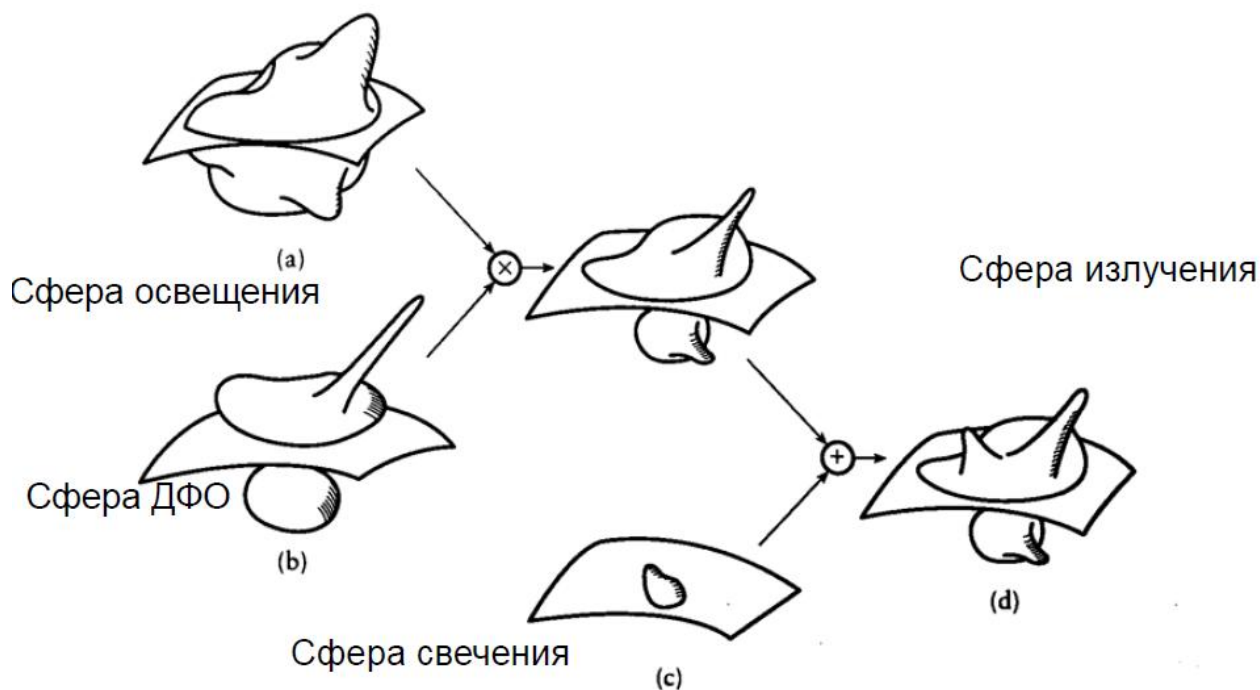


Рис. Процесс тонирования изображения: различные виды сфер освещения.

Процесс тонирования с использованием сферического представления освещения заключается в следующем: для данной точки условно говоря строится сферу освещения, т.е. мы для каждого направления получаем входящую яркость по данному направлению. Будем считать, что мы находимся в вакууме, или просто не учитываем распространения в атмосфере, и что яркость при распространении вдоль луча сохраняется. Полученный результат мы комбинируем со значением радиуса сферы Двухлучевой Функции Отражения (или Пропускания - в зависимости от направления), после чего мы можем найти излучения для любого направления. В случае, если мы работаем с флуоресцентной поверхностью, на данном шаге нужно учесть соответствующее значение сферы свечения. Понятно, что на практике нас интересуют не все возможные направления, а какие-то конкретные. Поэтому все шаги выполняются необязательно полностью и не обязательно в этом порядке.

Сферическое представление параметров освещения может быть удобным в случае, если нужно проиллюстрировать или промоделировать определенные свойства объекта. Например, всплеск на сфере может указывать на некоторую зеркальную составляющую отражения.

Двумерный аналог сферического представления крайне удобен для часто встречающихся симметричных материалов.

Мы можем использовать наши знания о форме Двухлучевой Функции Отражательной Способности для того, чтобы не семплировать нашу сферу по всем углам с одинаковой частотой. В областях где функция имеет резкие изменения – например, пик, нужно семплировать ее достаточно часто, в то время как в других областях, где отражение меняется редко, количество сэмплов может быть значительно меньшим, а в промежуточных точках функция будет интерполироваться (например, полиномом или каким-либо еще способом). Априорные знания о материалах часто могут использоваться для дискретизации сфер освещения по наиболее важным направлениям.

В качестве примера можно привести сферу Двухлучевой Функции Отражательной способности зеркального материала.

## Локальные и глобальные модели освещения

Все модели освещения можно разделить на *локальные* и *глобальные*. Локальные модели учитывают только первичные источники света, в то время как в глобальных моделях учитывается и первичное, и вторичное освещение. Данное деление весьма условное: одна и та же формула может использоваться и в глобальной, и в локальной модели в различных алгоритмах синтеза изображений.

Чтобы компенсировать отсутствие вторичного освещения, локальные модели часто используют такую компоненту, как *рассеянное освещение*. Рассеянное освещение точки суммируется с освещением, которое получается при расчете ее освещения от первичных источников. Также в локальных моделях некоторых материалов используется так называемое *фоновое освещение*. В некоторых моделях фоновое освещение учитывает геометрию (значение фона, например, в углах может быть темнее). Физически корректным данный подход, конечно же, не является.

## Эмпирические модели освещения

Пусть нас интересует некоторая точка на поверхности,  $n$  – нормаль к поверхности в данной точке,  $v$  – вектор, направленный от точки поверхности к наблюдателю,  $s$  – вектор, направленный из точки поверхности на источник света.

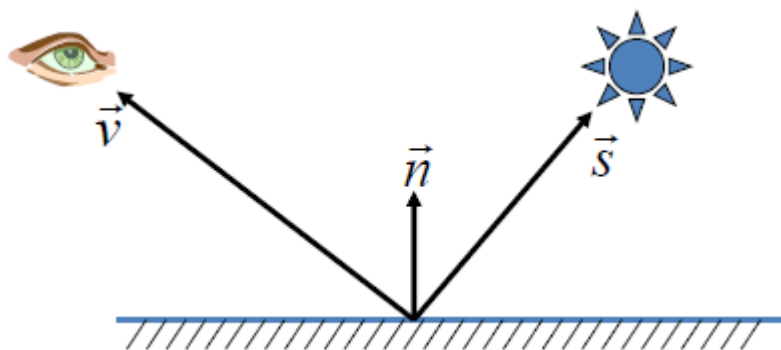


Рис. Обозначения: нормаль к поверхности, вектор на камеру, вектор на источник света.

Рассмотрим некоторые эмпирические модели освещения.

### Модель Ламберта

Модель освещения Ламберта позволяет корректно вычислять двухлучевую функцию отражения для ламбертовых поверхностей (или ламбертовых материалов). Данная модель является базовой для большинства остальных моделей.

Модель Ламберта моделирует идеальное диффузное освещение. Считается, что свет падающий в точку, одинаково рассеивается по всем направлениям полупространства.

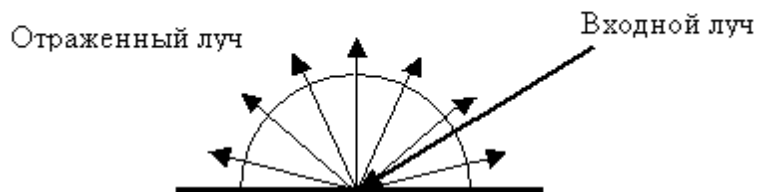


Рис. Рассеивание света по модели Ламберта.

Таким образом, освещенность в точке определяется только плотностью света в точке поверхности, а она линейно зависит от косинуса угла падения.

Двулучевая функция отражения модели Ламберта постоянна и равна  $\frac{C}{\pi}$ , где константа  $C$  определяет процент отражения для данной длины волны. Яркость точки  $O$  по модели Ламберта для одного источника света вычисляется по следующей формуле:

$$L_O = L_i k_d(s, n)$$

где  $L_O$  – исходящая яркость,  $L_i$  – падающая яркость,  $k_d$  – двулучевая функция отражения поверхности, равная  $\frac{C}{\pi}$ ,  $(s, n)$  – скалярное произведение между нормалью в данной точке и направлением на источник света (т.е. косинус угла между нормалью и направлением на источник света из точки  $O$ ).

Модель Ламберта является одной из самых простых моделей освещения. Данная модель очень часто используется в комбинации других моделей, практически в любой другой модели освещения можно выделить диффузную составляющую. Более-менее равномерная часть освещения (без присутствия какого-либо всплеска) как правило будет представляться моделью Ламберта с определенными характеристиками. Данная модель может быть очень удобна для анализа свойств других моделей (за счет того, что ее легко выделить из любой модели и анализировать оставшиеся составляющие).

## Модель Фонга

Модель Фонга – классическая модель освещения.

Модель представляет собой комбинацию *диффузной составляющей* (модели Ламберта) и *зеркальной составляющей* и работает таким образом, что кроме равномерного освещения на материале может еще появляться блик. Местонахождение блика на объекте, освещенном по модели Фонга, определяется из закона равенства углов падения и отражения. Если наблюдатель находится вблизи углов отражения, яркость соответствующей точки повышается. Если объект является идеальным зеркалом, то это будет единственное направление, где мы повышаем яркость.

Некоторые реализации модели Фонга предполагают также наличие *фоновой составляющей* (некоторой константы), которая моделирует цвет объекта в отсутствие освещения (в полной тени).

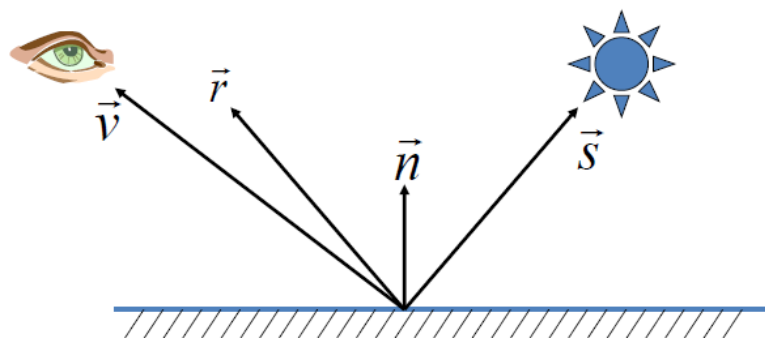


Рис. Вектора для вычисления модели Фонга.

Поскольку нам хотелось бы промоделировать объекты, которые являются просто блестящими, а не исключительно зеркальными, то в зеркальной составляющей модели Фонга мы работаем не с идеально зеркальным объектом, а с объектом, отражающим свет в некотором конусе (это необходимо для получения блика). Дельта функция заменяется на некоторую функцию, плавно спадающую к нулю по некоторому закону при удалении луча от некоторого заданного конуса. Формула для вычисления яркости в точке О выглядит следующим образом:

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

где  $L_O$  – исходящая яркость,  $L_i$  – падающая яркость,  $k_d$  – диффузный коэффициент отражения поверхности,  $(s, n)$  – скалярное произведение между нормалью в данной точке и направлением на источник света (т.е. косинус угла между нормалью и направлением на источник света из точки О),  $k_s$  – зеркальный коэффициент отражения поверхности,  $(r, v)$  – угол между идеально отраженным лучом  $r$  и вектором на наблюдателя  $v$ ,  $k_l$  – некоторый коэффициент, характеризующий величину блика (чем он больше, тем меньше блик).

Из формулы очевидно, что второе слагаемое в формулу будет максимальным, если наблюдатель находится по направлению отражения света. Однако исходная формула не позволяет задавать размер этого отражения, т.е. то, насколько материал будет рассеивать отражения данного источника. Для этого была добавлена степень  $k_l$ , изменяя которую можно изменять ширину конуса и, соответственно, параметры блика. Зеркальный коэффициент отражения поверхности  $k_s$  позволяет менять интенсивность зеркального отражения, в сочетании с величиной диффузного коэффициента  $k_d$  он позволяет менять соотношение диффузного или зеркального отражения.

Тем не менее, это эмпирическая модель и мы не знаем, существуют ли в природе материалы, ей соответствующие. В общем случае модель Фонга не явл физически корректной и не удовлетворяет закону сохранения энергии.. Ее можно модифицировать, чтобы она стала физ корректной, но сама по себе она таковой не является.

Модель Фонга является полностью эмпирической и не используется в серьезных движках для синтеза изображений. Данной модели присущи эмпиричность и полное отсутствие физической корректности. Реализацию модели Фонга можно найти в библиотеке OpenGL.

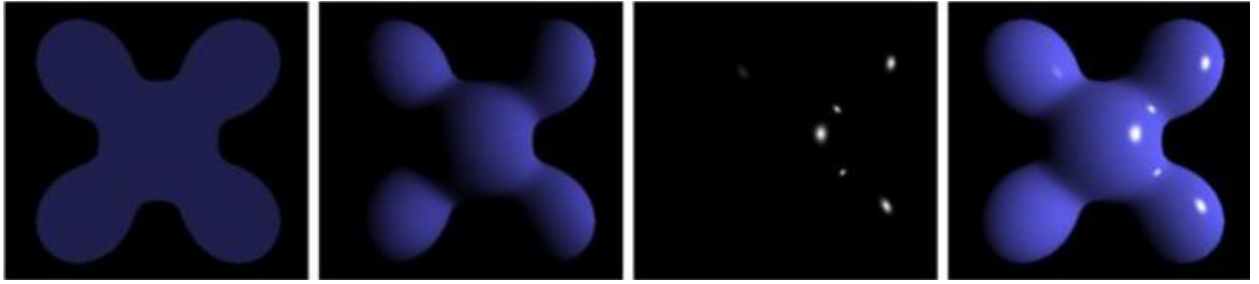


Рис. Слева направо: теневая, диффузная и бликовая (зеркальная) составляющие модели Фонга.  
Справа – сумма всех составляющих.

Один из главных недостатков модели Фонга заключается в том, что она не сохраняет энергию и не является обратимой (чтобы убедиться в последнем, достаточно в приведенной формуле для модели Фонга поменять местами вектора  $v$  и  $s$ ), и в этом есть ряд проблем.

### Модель Блинна-Фонга

Модель Блинна-Фонг – это унификация модели Фонга, принципиальной разницы между двумя этими моделями нет.

Формула для вычисления интенсивности по модели Блинна-Фонга выглядит так:

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

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

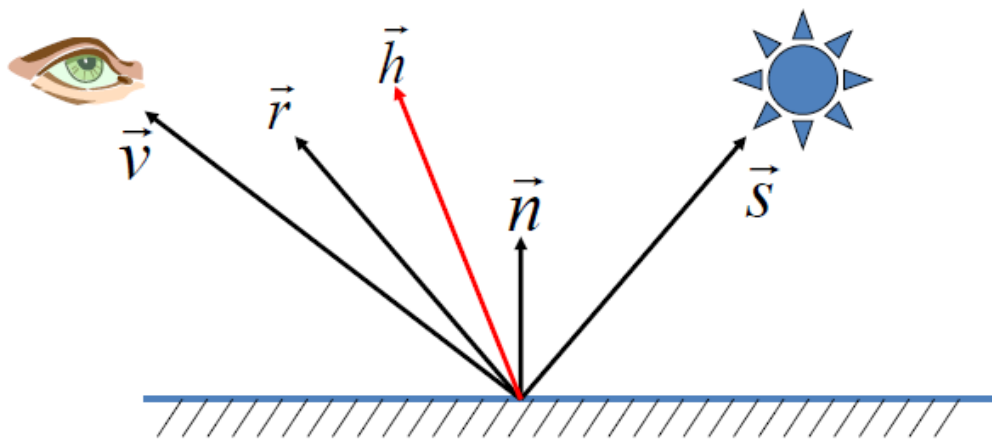


Рис. Вектора, необходимые для расчета освещенности по модели Блинна-Фонга: вектор на источник света  $s$ , вектор на наблюдателя  $v$ , отраженный вектор от источника  $r$ , средний вектор между отраженным вектором и нормалью  $h$ .

Главное отличие модели Блинна-Фонга от модели Фонга заключается в том, что вычисление косинуса между направлением на наблюдателя и направлением отраженного луча заменяется на вычисление косинуса угла между нормалью к поверхности и вектором, средним между направлением на наблюдателя и направлением на источник света. Данная аппроксимация позволяет в ряде случаев упростить вычисления.

Из рисунка видно, что применение модели освещения Блинна-Фонга вместо модели Фонга не принципиально изменяет результат.

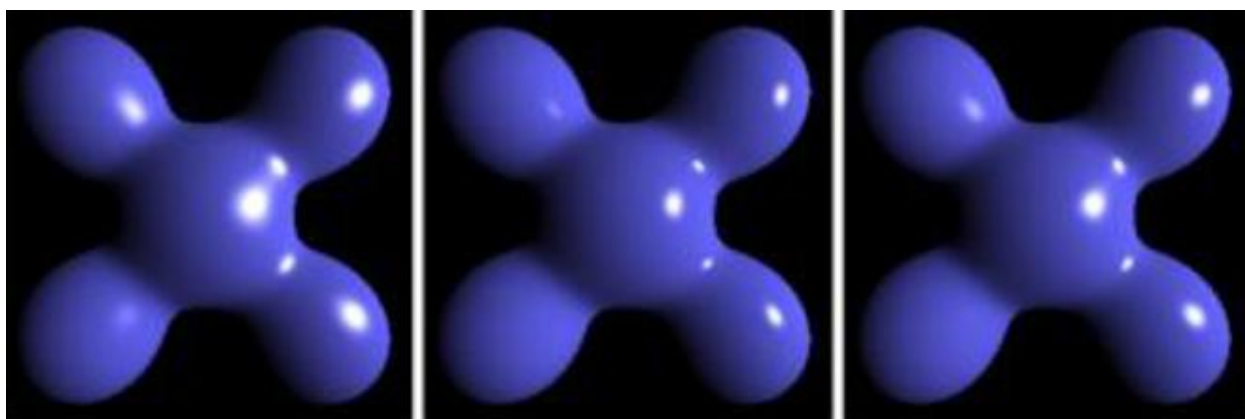


Рис. Слева – результат применения модели Блинна-Фонга, посередине – результат применения модели Фонга, справа – модель Блинна-Фонга с меньшей, чем у левого изображения, экспонентой.

### Разделение зеркальной и диффузной составляющей модели освещения

Насколько оправдано, и имеет ли какие-либо физические основы тот факт, что мы отдельно считаем зеркальную и диффузную составляющие? Концептуально да, можно считать что с помощью модели Фонга мы описываем материалы, обладающей как отражающими зеркальными, так и диффузными частицами. Все эти частицы ориентированы либо одинаково, либо ориентированы определенным образом. В случае, если частицы ориентированы случайным образом, все лучи в среднем будут равномерно отражаться по всем направлениям. В этом случае объект будет матовый. Если все частицы будут ориентированы одинаково, то сам объект будет чисто зеркальным. Пропорции, в которых мы наблюдаем вероятность зеркального или диффузного отражения, можно задать при помощи коэффициентов  $k_s$  и  $k_d$ .

### Модель Лафортюна

Модель Лафортюна концептуально основана на модели Фонга. Модель была разработана специально. Целью разработки модели была возможность оптимизации записи различных сложных ДФО, т.е. чтобы можно было с помощью оптимизации ряда параметров подгонять измеренные ДФО под ДФО, задаваемые формулами с наименьшим количеством параметров.

ДФО, помимо длины волны, обладает рядом параметров (4 параметра на одной длине волны). При численном расчете это значительного размера таблица, работать с которой достаточно тяжело. Поэтому если материал обладает гладкой ДФО, было бы удобнее получить ее формульное представление, т.е. фактически аппроксимировать материал с некоторой достаточной точностью при помощи некоторых моделей.

Для такой задачи стоит рассматривать специальные модели. Рассматриваемая модель представляет собой в специальном виде комбинацию диффузной составляющей и суммы фонговских отражений (с той разницей, что таких отражений много и все они различны). Т.е. материал, задаваемый моделью отражения Лафортюна, настолько сложен, что допускает не один блик, а много бликов, которые, накладываясь друг на друга, позволяют создать один, но более хитрой формы.

Основная формула для вычисления освещения по модели Лафортюна выглядит так:



$$f_r(\mathbf{p}|\omega_o, \omega_i) = \frac{k_d}{\pi} + \sum_{i=1}^{nlobes} (\omega_o(o_{ix}\omega_{ix}, o_{iy}\omega_{iy}, o_{iz}\omega_{iz}))^{e_i}$$

Рассмотрим следующий пример. Предположим, мы работаем с некоторым шаром и наша цель – наиболее точно смоделировать двулучевую функцию отражения материала его поверхности. Шар был сфотографирован при некотором освещении. С помощью зеркального шарика аналогичного размера была получена панорама. Таким образом, для каждого направления мы узнали соответствующую ему яркость излучения. После этого был применен ряд моделей, чтобы смоделировать дфо и при помощи некоторого метода синтеза получить картинку, наиболее близкую к исходной фотографии. На рисунке приведены наилучшие результаты аппроксимации при помощи модели Блинна-Фонга (посередине) и при помощи модели Фонга (справа). Блики на объекте получились слишком сглаженными, но в целом результат похож на фотографию.



Рис. Аппроксимация фотографии при помощи эмпирических моделей. Слева: исходное фото, посередине и справа: синтез изображения с использованием модели Блинна-Фонга и Фонга.

На этом мы заканчиваем рассмотрение эмпирических моделей освещения и переходим к рассмотрению физических моделей освещения.

## Физические модели освещения

### Законы Френеля

Законы Френеля определяют амплитуды и интенсивности преломлённой и отражённой электромагнитной волны при прохождении через плоскую границу раздела двух сред с разными **показателями преломления**.

Формулы Френеля справедливы в том случае, когда граница раздела двух сред гладкая, среды изотропны, угол отражения равняется углу падения, а угол преломления определяется **законом Снеллиуса**. В случае неровной поверхности, особенно когда характерные размеры неровностей одного порядка с **длиной волны**, большое значение имеет диффузное рассеяние света на поверхности.

При переходе к физически обоснованным моделям освещения необходимо в явном виде использовать закон Френеля. Формулы Френеля определяют, какой у процент энергии был отражен, а какой – преломлен внутрь объекта.

Зная, под каким углом луч падает на поверхность, из законов Френеля можно вычислить, сколько света будет отражено и преломлено. При заданном угле  $\theta_i$  между нормалью к поверхности и направлением на источник света и заданном угле преломленного луча  $\theta_t$ , а также известных

показателях преломления сред  $n_1$  и  $n_2$  доля отраженной энергии  $R_s$  и доля пропущенной энергии  $R_p$  вычисляются по формулам:

$$R_s = \left[ \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right]^2$$

$$R_p = \left[ \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right]^2$$

Пусть мы рассматриваем свет, который идет из воздуха, например, в воду. На графике описан угол между нормалью и направлением падения, а по оси ординат показан процент отраженной световой энергии. Видно, что процент отраженной энергии света велик при почти перпендикулярном падении светового луча.

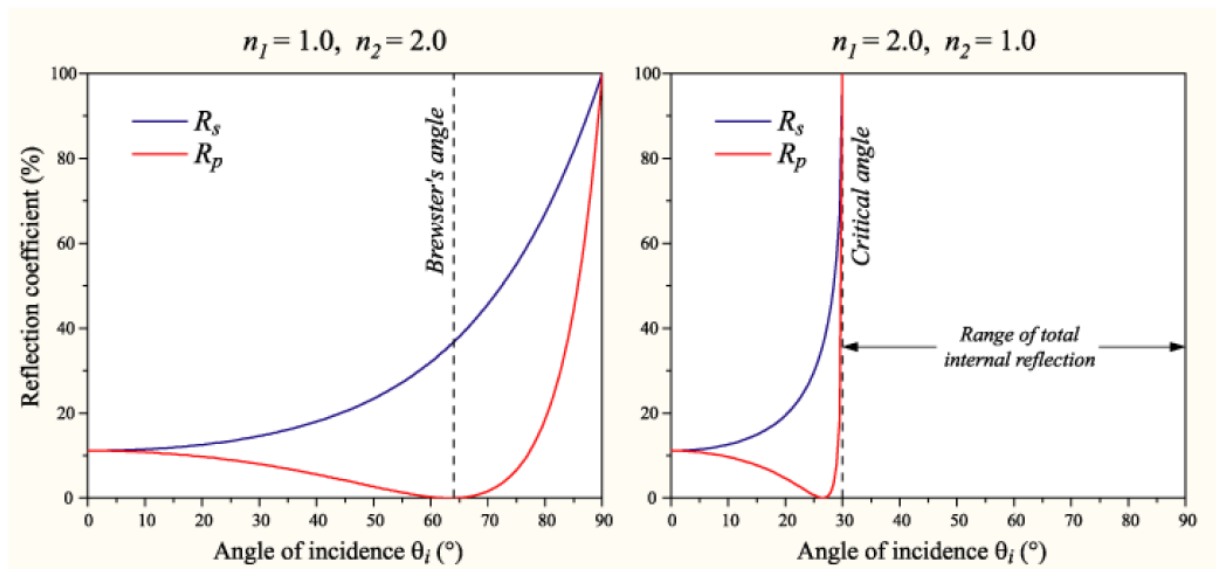


Рис. Коэффициенты Френеля в зависимости от угла, образуемого лучом с поверхностью объекта.

При переходе из более преломляющей среды в менее преломляющую у нас возникает понятие *критического угла* – если угол больше критического, то он не будет выходить наружу. Данный эффект называют *полным внутренним отражением*.

### Микрофасетные модели. Модель Кука-Торранса

Микрофасетные модели освещения в явном виде предполагают некоторое распределение небольших частиц (подплощадок) сложных поверхностей. Для задания подобной микрофасетной модели понадобится некоторое статистическое распределение микрофасетов, которое по сути будет являться распределением нормалей на рассматриваемой поверхности (данный аспект важен с точки зрения алгоритма). В том случае, если нормали к поверхности распределены по ней случайным образом, падающий свет будет отражен зеркально и диффузно под некоторыми углами. Блестящая поверхность будет характеризоваться тем, что распределение нормалей ее микрофасетов будет близко к основному направлению нормали к поверхности. Диффузная или матовая поверхность, напротив, будет характеризоваться сильным разбросом нормалей, которое необходимо для равномерного рассеивания световых лучей в различных направлениях.

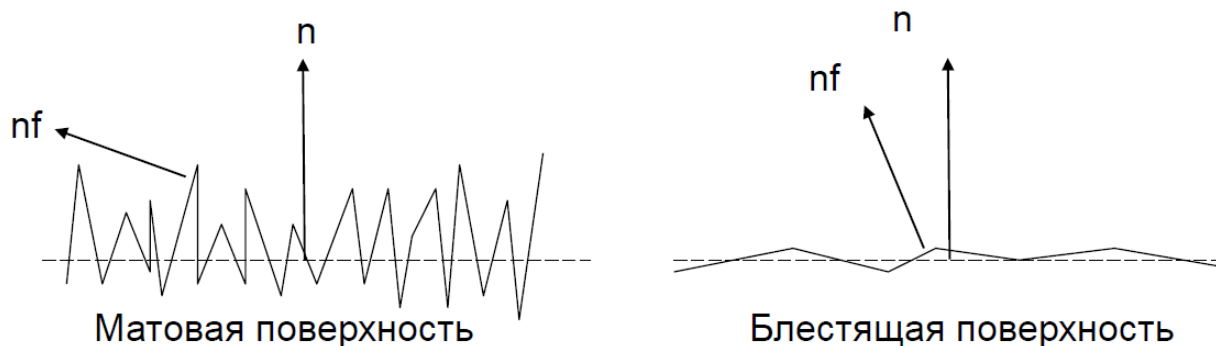


Рис. Сравнение микрофасетной структуры поверхностей разного типа.

Двулучевая функция отражения каждого микрофасета является достаточно простой, т.к. вся сложность итоговой модели достигается за счет распределения нормалей микрофасетов. Существует ряд аппроксимаций реальных материалов моделями, подобными микрофасетным, все они отличаются разной точностью и сложностью, а также применимостью для разных задач. Рассмотрим, какие характерные эффекты возникают в микрофасетных моделях, и что нам нужно учесть, чтобы эти эффекты приближались к моделированию реальных материалов.

Первый эффект называют эффектом *маскирование*. Если мы рассматриваем некоторую микрофасетку, освещенную источником света так, что другие характеристики либо другие микрофасеты перекрыли данную микрофасетку, то наблюдатель может этого не увидеть (луч от микрофасета не придет в камеру) и тем самым поверхность объекта станет темнее.

Второй эффект называют эффектом *затенения*. Данный эффект похожий на маскирование и заключается в том, что мы не всегда можем увидеть отражение от данного источника света от микрофасета из-за того, что он был перекрыт каким-то другим микрофасетом.

Еще один эффект – *переотражение*. Переотражение - это вероятность того, что мы увидим не просто значение света данного фасета, а ее переотражение.



Рис. Возможные эффекты в микрофасетных моделях.

Отметим, что наша цель – построить не геометрическое распределение микрофасетов, а некоторое вероятностное распределение. Основная задача при подборе параметров микрофасетной модели для моделирования той или иной поверхности – найти данное распределение при «интегральном» наблюдении за данной поверхностью.

*Модель Кука-Торранса* – одна из первых моделей на основе микрофасетов – изначально предназначалась для моделирования металлических поверхностей. В частности поэтому был сделан вывод о том, что каждый микрофасет был идеально зеркальным. Поверхность описывается распределением  $\tau$ , которое дает вероятность того, что конкретный микрофасет имеет ориентацию  $\omega_o$  (ориентация задает ориентацию плоскости нашего микрофасета). Только фасеты с ориентацией  $\omega_h$  могут дать идеально зеркальное отражение. Поверхность описывается некоторым вероятностным распределением  $D(\omega_h)$ . Нас будет интересовать лишь процент микрофасетов, ориентированных таким образом.

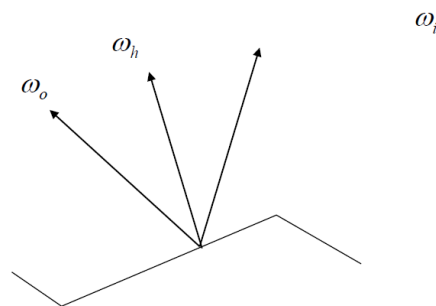


Рис. Ориентация микрофасетов.

Двулучевая функция отражения для модели Кука-Торранса выглядит следующим образом:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{D(\omega_h)G(\omega_o, \omega_i)F_r(\omega_o)}{4 \cos \theta_o \cos \theta_i}$$

где  $G(\omega_o, \omega_i)$  – вероятность маскирования или затенения,  $F_r(\omega_o)$  – коэффициент френелевского отражения. Косинусы обеспечивают физическую корректность модели.



*Рис. Слева – реальное изображение, справа – синтезированное с использованием модели Кука-Торранса.*

Подытоживая рассказ о различных моделях освещения, нужно отметить следующий факт: каждой модели освещения соответствует некоторый определенный класс материалов. Он может быть шире, уже или вовсе отсутствовать (например, для эмпирической модели Фонга в реальной жизни не существует идеально соответствующих ей поверхностей). Универсальной модели не существует, т.к. всегда надо выбирать между скоростью, точностью и выразительностью модели.

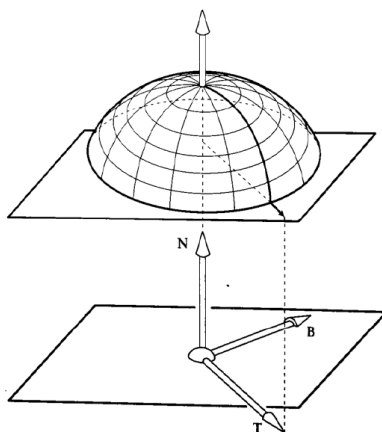
## Табличное представление Двулучевой Функции Отражения

### Табличное представление ДФО

Двулучевую функцию отражения можно представить не только в виде некоторой эмпирической или физической модели (т.е. фактически в виде формулы и ее коэффициентов), но и в виде таблицы значений функции на некоторой сетке. Имея конкретный образец материала, можно численно померить данные значения яркости при различных значениях параметров функции. Для этого мы должны некоторым образом параметризовать пространство значений параметров нашей функции (углы пространства и спектральное распределение длин волн), и некоторым образом измерить ее значения при помощи специального оборудования.

Для подобной цели существуют специальные практические установки, в которых помещается образец материала и под разными углами (эти углы должны соответствовать шагу нашей полусфере), в зависимости от того, как освещена точка, замеряем отраженную от материала энергию – в одном направлении, или же сразу в нескольких. При таком подходе измерения значений Двулучевой функции отражения реализуются на основе развития аппаратных методов: при проведении измерений используются специальные сложные калиброванные источники света, сепараторы, позволяющие выделить конкретные длины волн, и различные приемники.

Другой возможный подход к получению значений Двулучевой функции отражения при различных заданных углах позволяет использовать для этой цели фотографии объекта из изучаемого материала (возможно, со специальными фильтрами). При таком оборудовании оборудование, используемое для расчета табличного представления, будет значительно дешевле, однако и точность измерений также снизится.



*Рис. Сетка для создания таблицы значений Двулучевой функции отражения.*

## Хранение табличного представления ДФО

Основная проблема табличного представления ДФО состоит в том, что таблица, получаемая при построении значений, очень велика. В памяти подобные таблицы могут занимать сотни мегабайт или гигабайт (в зависимости от требуемой точности табличного представления, т.е. дискретизации параметризованного пространства). Поэтому полученную при измерениях таблицу необходимо каким-то образом мы сжать по размеру.

Перечислим некоторые возможные подходы к сжатию табличного представления ДФО:

- На основе некоторых предположений относительно формы ДФО, с которой мы работаем, можно найти более компактное формульное представление получившихся значений, и в зависимости от него репараметризовать нашу таблицу.
- Возможно отдельное рассмотрение различных составляющих функции (например, диффузной и зеркальной составляющей).
- В некоторых случаях имеет смысл применить перевод табличной ДФО в другие пространства для того, чтобы компактно представить функцию, заданную, например, в сферической системе координат.
- Можно выбрать другую, достаточно сложную модель отражения, и подобрать параметры этой модели таким образом, чтобы она максимально соответствовала измеренной нами ДФО. Данный подход мог бы сильно упростить процесс визуализации.

Табличную ДФО можно хранить в памяти и в необработанном (несжатом виде) в некотором разрешении (возможно, небольшом). В этом случае в процессе рендеринга можно напрямую использовать значения измеренной табличную ДФО. Вычислять соответствующее значение ДФО по формуле не потребуется, нам просто нужно будет взять нужное значение функции из таблицы и, возможно, останется только проинтерполировать два или чуть больше значений. При таком подходе работа с ДФО при визуализации сводится от задаче поиска модели к задаче выборки значения из базы данных.

При более основательном подходе можно хранить в базе данных интенсивности лучей, распространяемых в пространстве.