
Свет как энергия. Радиометрия. BRDF

Алексей Игнатенко

Лекция 3

30 марта 2009

На прошлой лекции

- Свет vs. Цвет
 - Все видимые цвета могут быть представлены в виде трех чисел
 - Основное цветовое пространство CIE XYZ
 - Построено на основе экспериментов
 - Инструмент – диаграмма тональности
 - Часто используется для анализа передаваемых диапазонов различных пространств
 - Пространство L^*a^*b – однородность
 - Цветовая модель и цветовые пространства RGB
 - Точка белого, цветовая температура
-

На лекции

- Свет и волновая природа света
 - Радиометрия: основные термины и понятия
 - BRDF, BTDF
 - Расчет освещенности в точке
-

Как получить фотореалистичное изображение?

Построить модель сцены

Для каждого пикселя
рассчитать
количество попавшей энергии

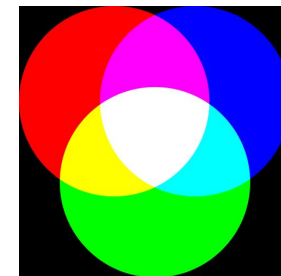
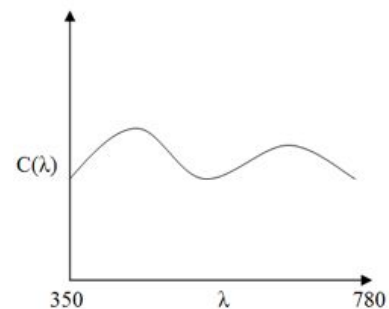
Преобразовать в цвет

Вывести на монитор

Это делать умеем

- Спектральное распределение энергии
- Нет никакого RGB!

А вот здесь RGB!



Моделирование и расчет сцены



- Чтобы рассчитать энергию для каждого пикселя изображения необходимо понимать:
 - Природу света
 - Принципы распространения света
 - Взаимодействие света с материалами

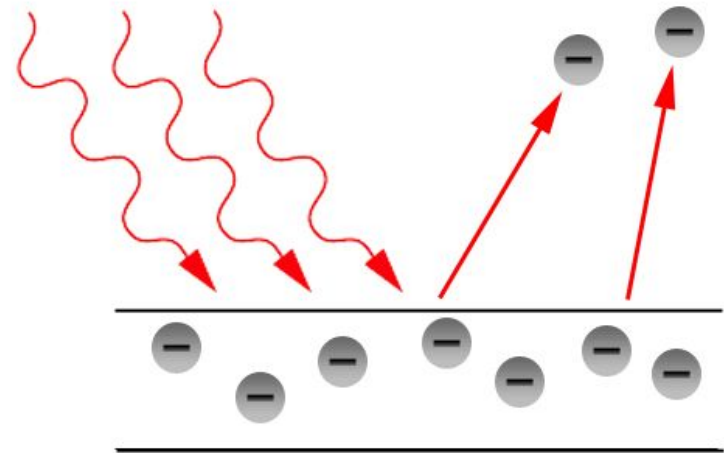
Свет: дуальность

- Электромагнитная волна
 - волновая оптика
 - Поток фотонов
 - геометрическая оптика

 - Причины дуальности
объясняются в квантовой оптике
-

Фотоэлектрический эффект

- Излучение электронов под действием света
- Является одним из обоснований фотонной теории (теории частиц)



Геометрическая оптика

- Закон прямолинейного распространения света
 - Закон независимого распространения лучей
 - Закон отражения света
 - Закон преломления света (Закон Снелла)
 - Закон обратимости светового луча
-

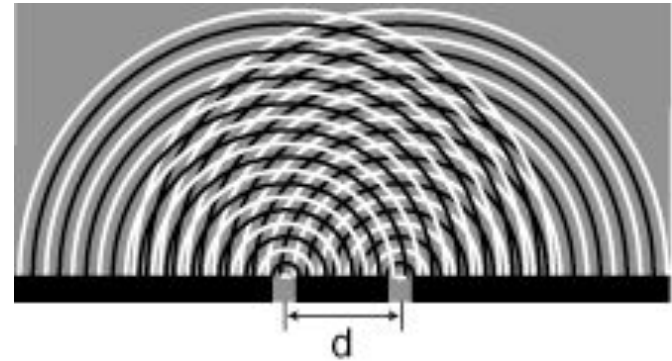
Волновая природа света: явления

- Дифракция и интерференция
- Поляризация



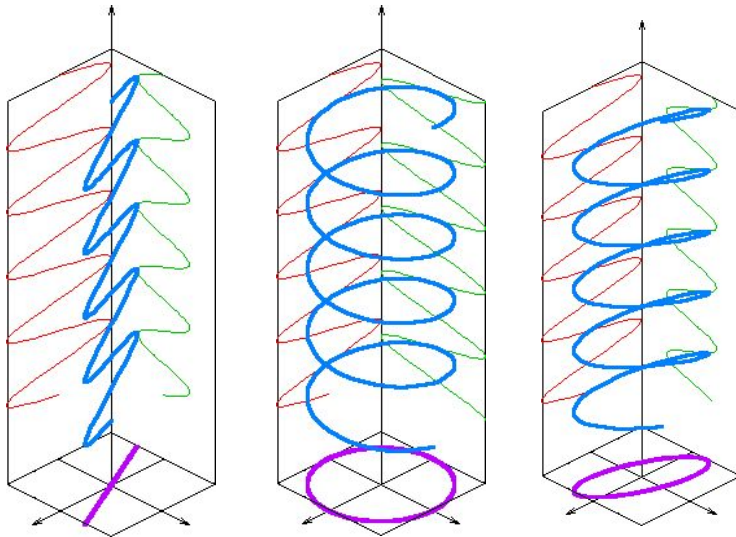
Волновая природа света: дифракция и интерференция

- Явление преобразования распространяющейся в пространстве волны
- Зависит от соотношения между длиной волны и характерным размером неоднородностей среды
- Интерференционный рисунок



Волновая природа света: поляризация

- Световая волна – поперечная волна
- Волновой вектор и вектор амплитуды

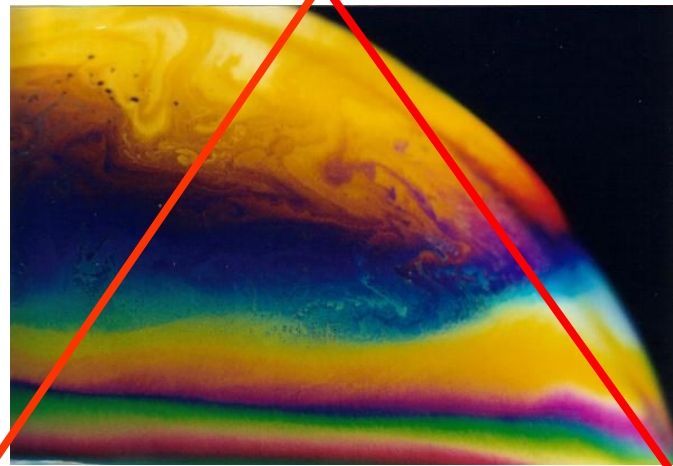


Поляризация: пример



Геометрическая оптика: итоги

- Далее мы будем рассматривать свет как поток частиц
- 👍 Гораздо проще для алгоритмов!
- 👎 Сразу отбрасываем явления
 - ❑ Дифракции
 - ❑ Интерференции
 - ❑ Поляризации



Радиометрия

- Радиометрия – наука об измерении электромагнитного излучения
 - Включая видимый свет
 - В отличие от колориметрии (и фотометрии), радиометрия не учитывает особенностей человеческого восприятия
-

Радиометрия: особенности

- Основана на излучении как потоке частиц (геометрическая оптика)
 - Тем не менее, возможно включать элементы волновой оптики
-

Радиометрия: предположения

- Линейность
 - Суммарный эффект двух входных сигналов всегда равен сумме эффектов каждого сигнала по отдельности
- Сохранение энергии
 - Рассеиваемый свет не может выдавать больше энергии, чем было изначально
- Отсутствие поляризации
 - Единственное свойство света – распределение по длинам волн (частоте)
- Отсутствие флюоресценции и фосфоресценции
 - Поведение света на одной частоте не зависит от поведения на другой
- Устойчивость состояния
 - Распределение световой энергии не зависит от времени

Радиометрия: недостатки

- Не передаются физические эффекты:
 - Дифракция
 - Интерференция
 - Поляризация
 - Флюоресценция
 - Фосфоресценция
 - Последние три легко добавить
-

Радиометрия: основные термины

- Световая энергия (radiant energy)
- Световой поток (radiant flux)
- Энергетическая сила света (intensity)
- Энергетическая освещенность (irradiance)
- Энергетическая светимость (radiant exitance)
- Энергетическая яркость (radiance)
 - = излучение

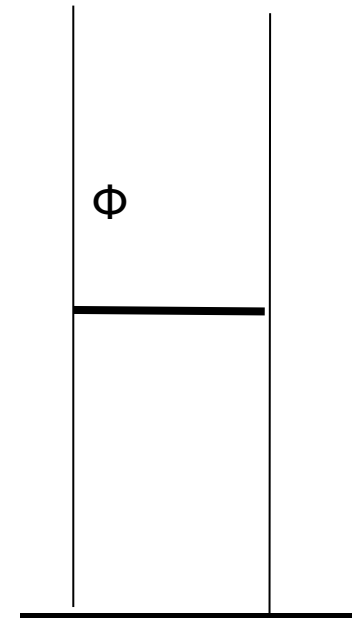
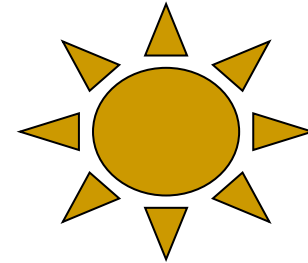
Световая энергия (radiant energy)

- Обозначение: Q
 - Единица измерения: Дж

 - Плохо подходит для наших задач
 - Необходимо выразить энергию, переносимую светом!
-

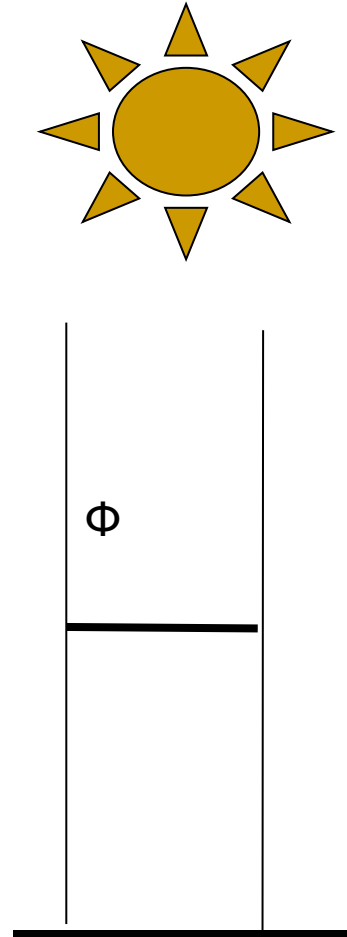
Световой поток (flux)

- Нужно описывать перемещение энергии
- Поток: энергия, излучаемая в единицу времени
 - для заданной поверхности
- Обозначение: Φ .
- $\Phi = dQ / dt$
- Единицы измерения - Вт (ватт = Дж/с).



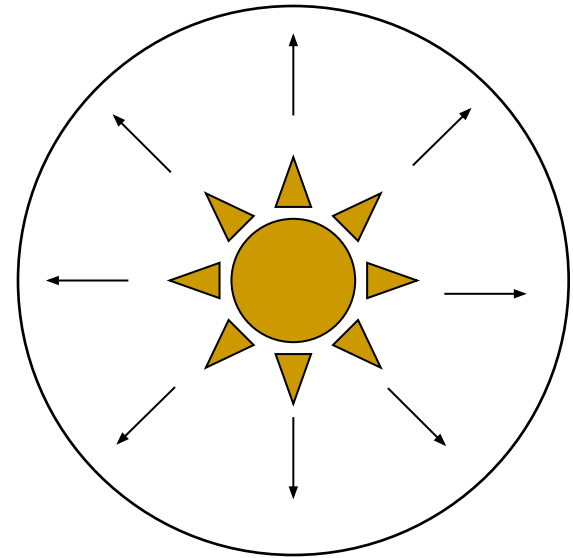
Световой поток (flux): как измерить?

- Поставить источник света
- Замерить изменение температуры площадки за заданное время



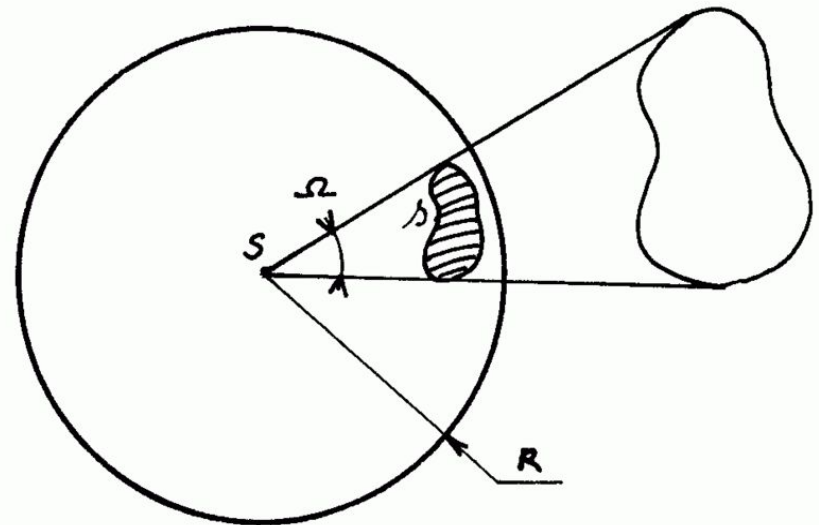
Полный световой поток

- Часто бывает нужно замерить полное излучение источника света
- Полный световой поток



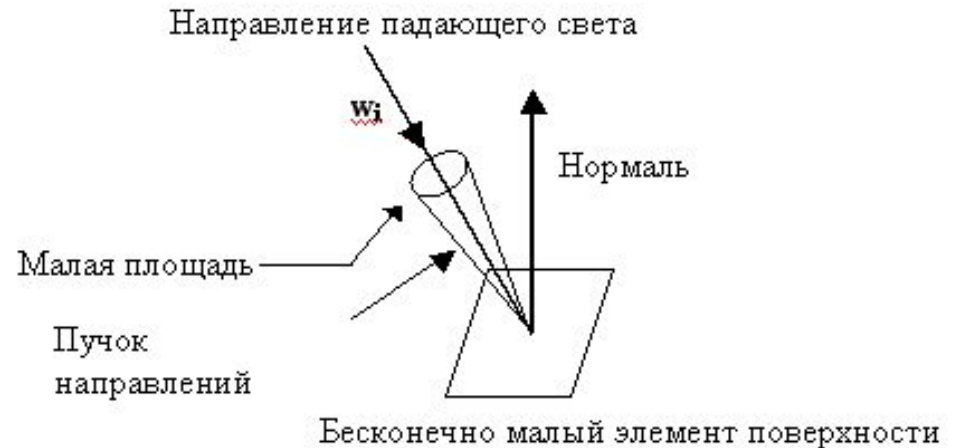
Телесный угол

- Часть пространства
 - Является объединением всех лучей, выходящих из данной точки
 - Пересекающих некоторую поверхность
- Измеряется отношением площади части сферы с центром в вершине угла, которая вырезается этим телесным углом, к квадрату радиуса сферы
- Единица – стерадиан
- Стерадиан равен телесному углу, вырезающему из сферы единичного радиуса поверхность с площадью в 1 квадратную единицу



Сила света (intensity)

- Предыдущие определения зависели от площади
- Но для точечных источников понятия площади нет
 - А нам часто придется рассматривать точки на поверхности
 - Или точечные источники света
- Плотность потока света, проходящего через телесный угол
- Единицы измерения:
Вт / Ст



$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Полный поток = $4\pi \cdot I$

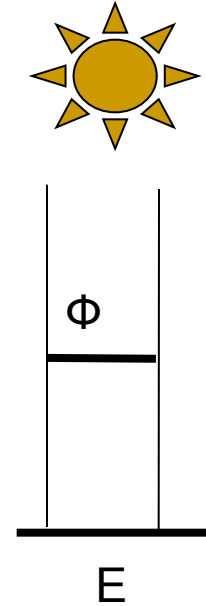
Освещенность и светимость

- Нужны единицы для описания потока излучения, попадающего на поверхность или исходящего с поверхности
- Плотность потока света, проходящего через заданную площадку
- Не знаем направления, поэтому два симметричных термина
 - освещенность
 - светимость

Энергетическая освещенность (irradiance)

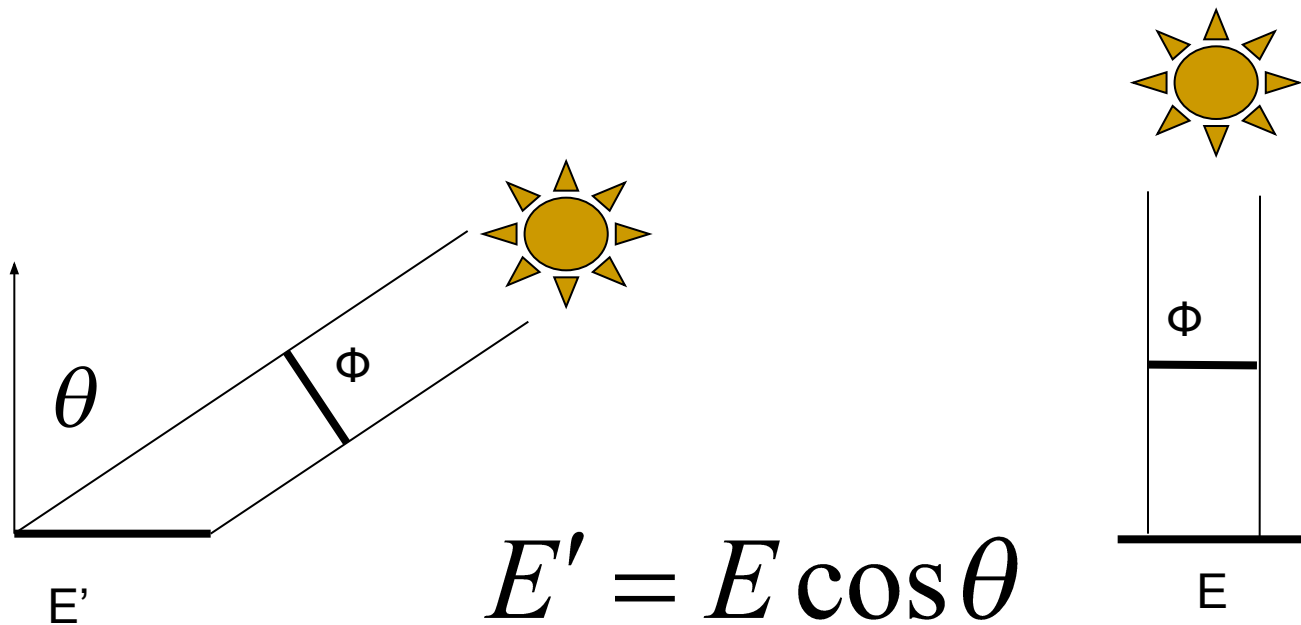
- Обозначение: E
- Единицы измерения: $\text{Вт}/\text{м}^2$

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



Связь освещенности и «косинуса»

- Во многих моделях освещения встречается \cos в качестве множителя



Энергетическая светимость (radiant exitance)

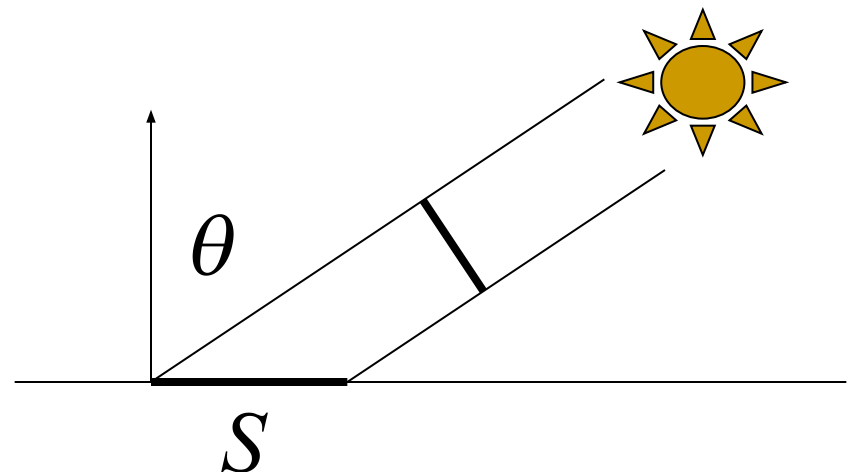
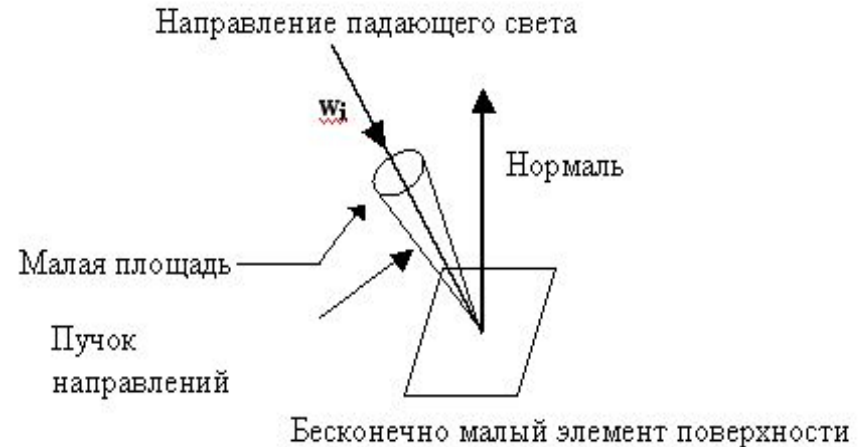
- Обозначение: M
- Единицы измерения: Вт/м²
- В компьютерной графике еще называют **radiosity**

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

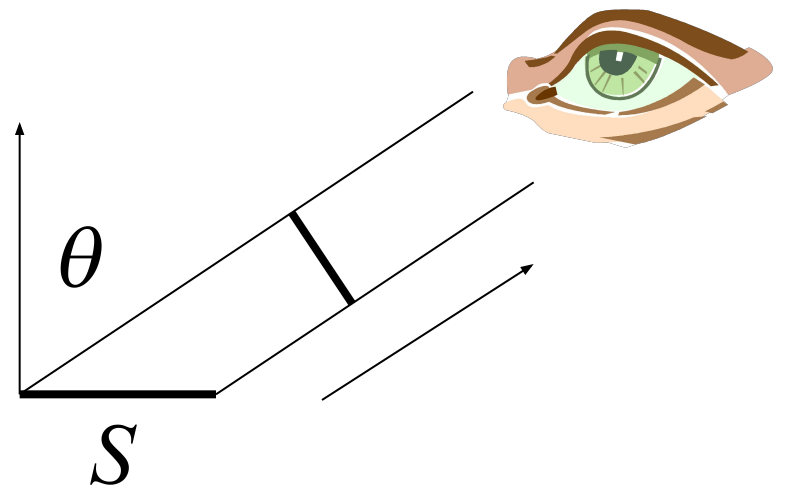
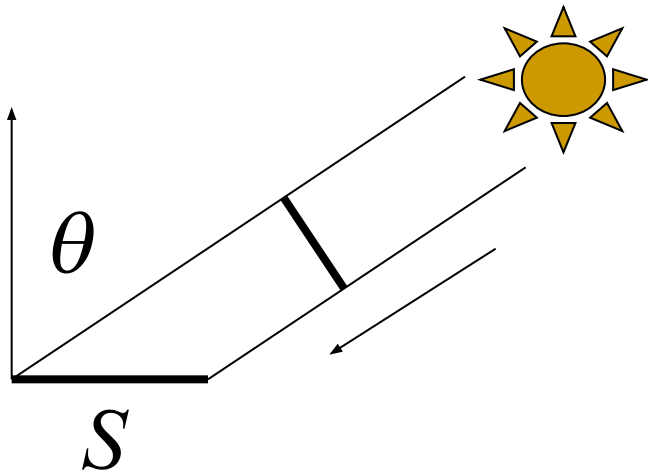
Яркость (radiance)

- Наиболее важная единица
- Источник не точечный
- Плотность потока, попадающего на площадку единичной площади, проходя через единичный телесный угол
- Обозначение: L
- Единицы измерения: Вт / (Ст * м²)

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dS \cos\theta}$$

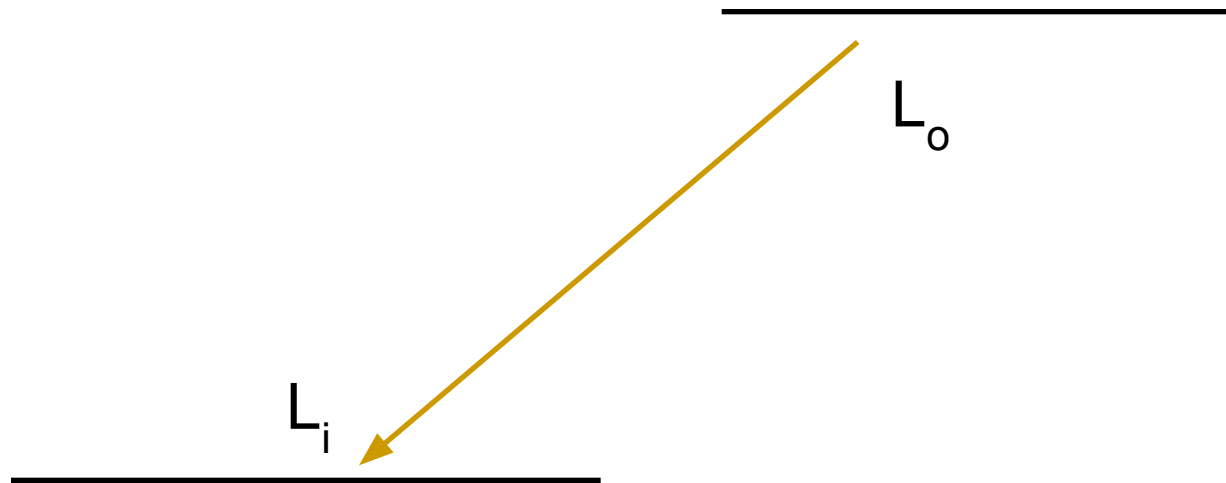


Исходящее и входящее излучение



Свойства излучения

- Передается в вакууме без потерь!



- Фотокамера записывает именно яркость
- Глаз реагирует на яркость

Выражение излучения через другие единицы

Сила света Освещенность Светимость

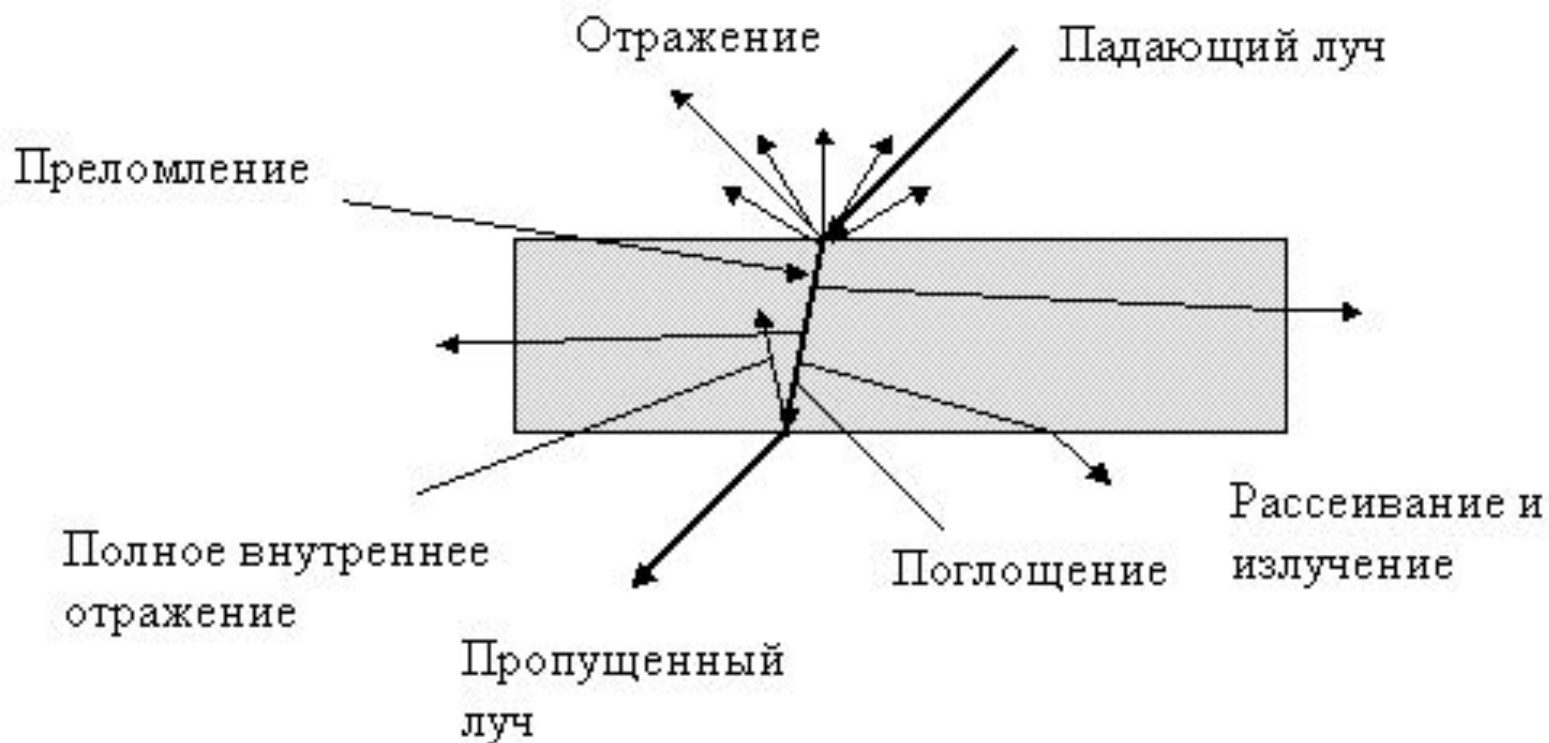
↓ ↓ ↓

$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{dE}{d\omega \cos \theta} = \frac{dM}{d\omega \cos \theta}$$

Фотометрия и фотометрические единицы

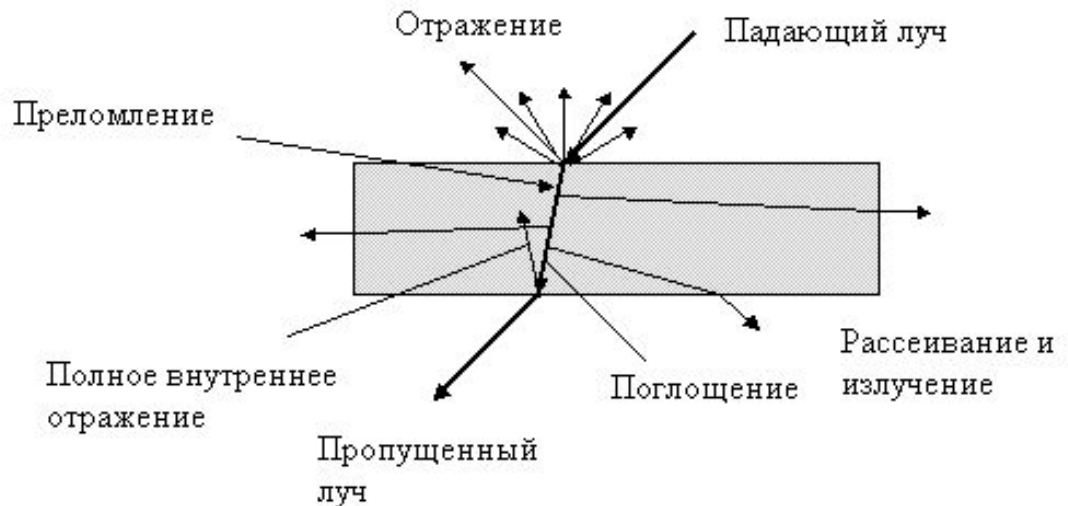
- Световой поток - (люмен – ватт)
 - поток лучистой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению
 - Поток, взвешенный стандартным наблюдателем
 - Поток внутрь телесного угла 1ср.
 - Если 1кд по любому направлению, то полный поток 4π лм
- Сила света - кандела (кд) (ватт на стерадиан)
 - до платинового эталона была "международная свеча"
- Освещенность - люкс (1 люмен по площади 1м² - ватт / М²)
- Яркость - (кандела на квм - ватт / стерадиан / м²) = нит.
 - Luminance

Взаимодействие света и материала



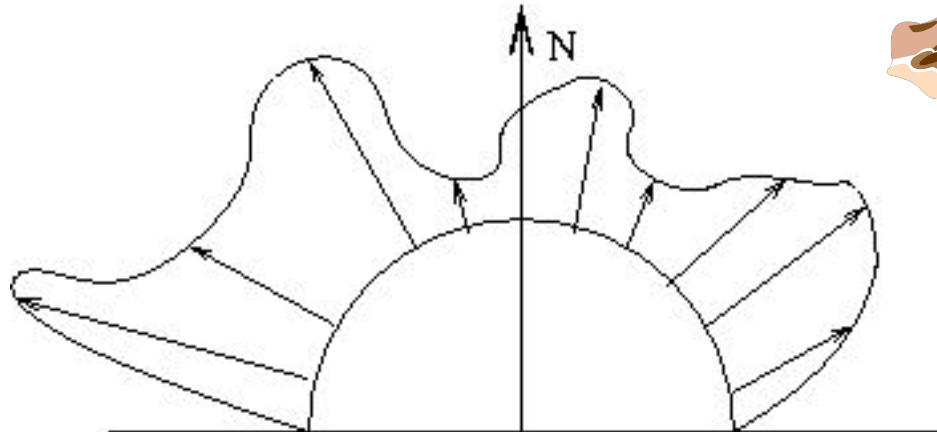
Типы взаимодействия света и материала

- Отражение
 - Зеркальное
 - Диффузное
 - Смешанное
 - Ретро-зеркальное
 - Блеск
- Преломление (пропускание)
 - Зеркальное
 - Диффузное
 - Смешанное



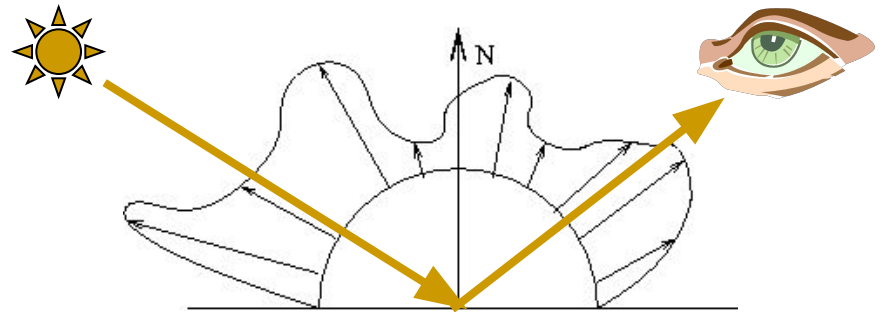
Отражение и ДФО

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



ДФО: определение

- Чему равна $L_o(p, \omega_o)$ - излучение поверхности в направлении ω_o
- При условии излучения по направлению ω_i , равной $L_i(p, \omega_i)$
- BRDF – Bidirectional Reflection Distribution Function
- ДФО = Двухнаправленная Функция Отражения



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

ДФО (2)

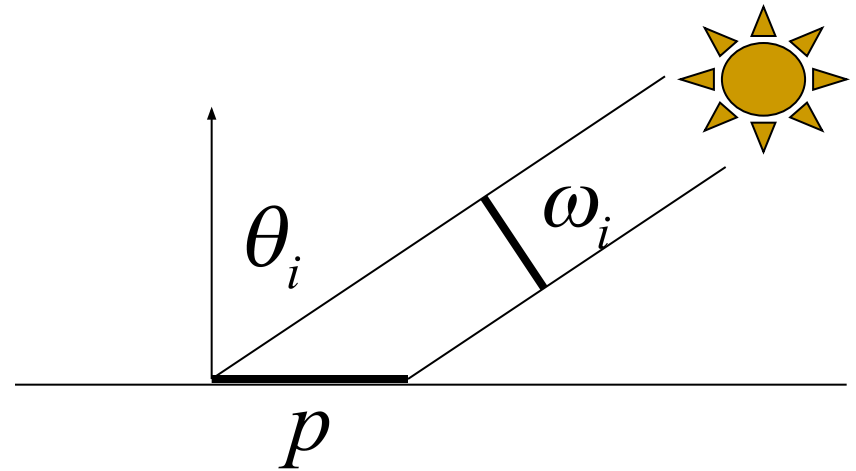
- Рассмотрим дифференциальную освещенность поверхности в точке p в зависимости от яркости:

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

- В направление ω_0 будет излучаться

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

Из предположения линейности и сохранения энергии



ДФО (3)

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

ДФО

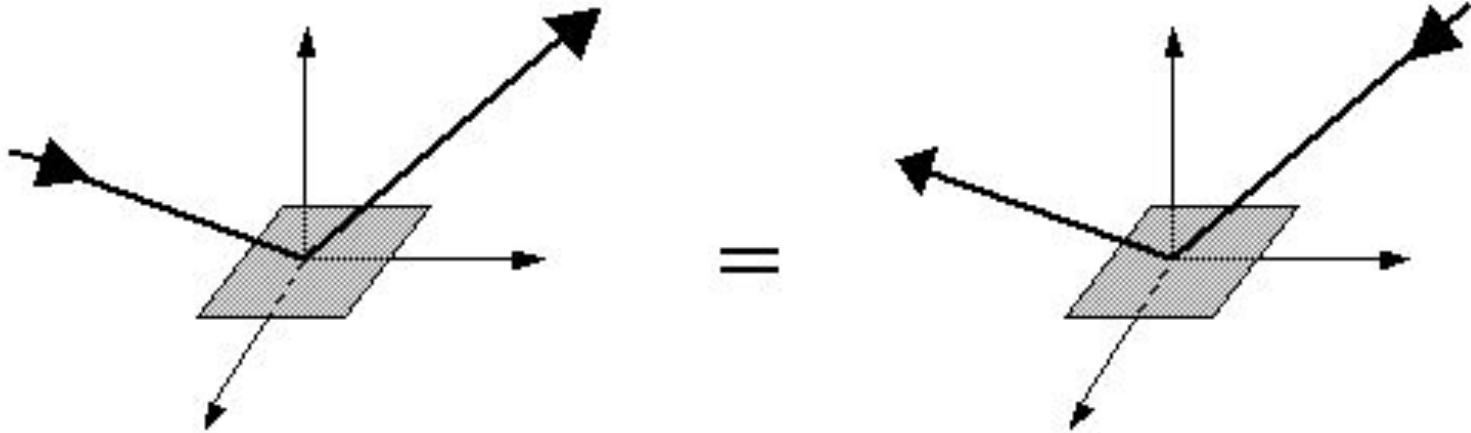


Свойства ДФО

- Обратимость
 - Сохранение энергии
-

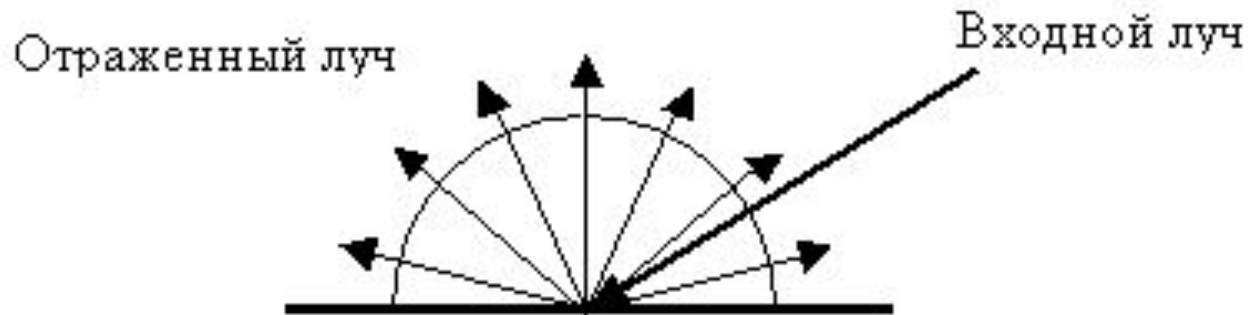
Свойства ДФО: обратимость

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



Свойства ДФО: сохранение энергии

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

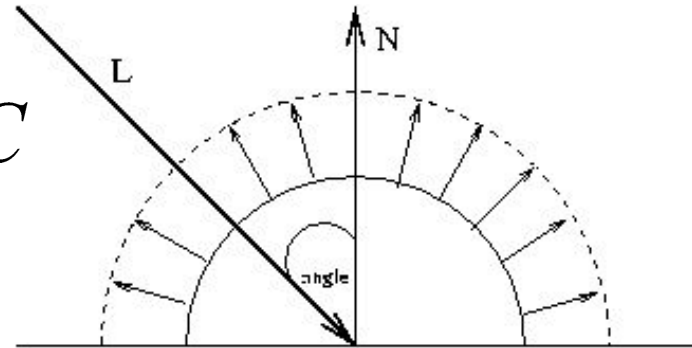


Примеры ДФО: диффузное отражение

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

Для идеального диффузного отражения

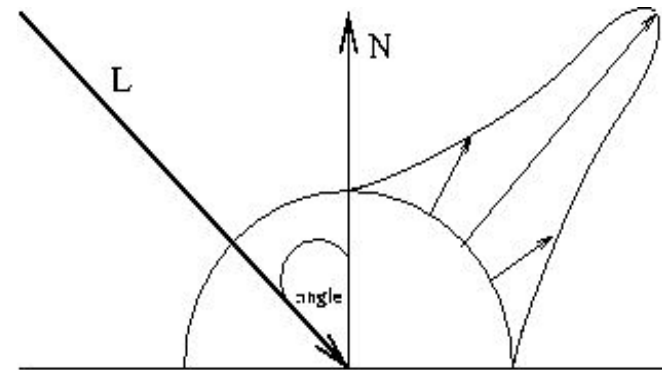
$$f_{r,d}(p, \omega_i) = \frac{1}{\pi}$$



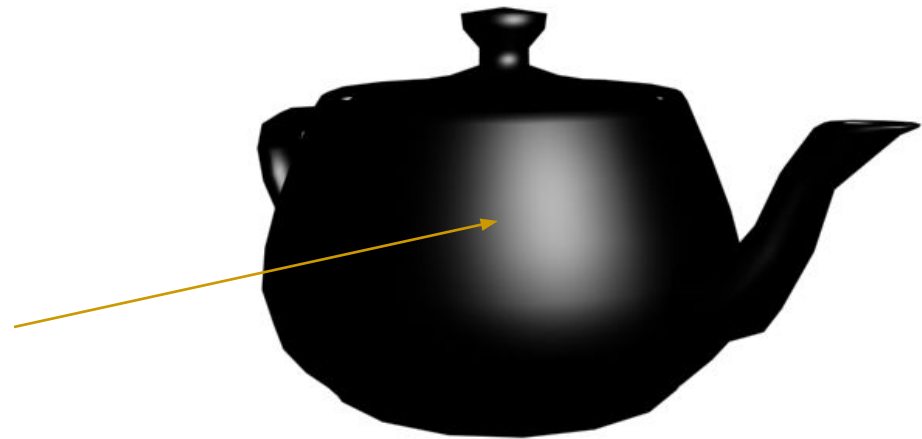
Примеры ДФО: зеркальное отражение

- Идеальное зеркальное отражение

$$f_{r,s}(p, \omega_i, \omega_o) = f_{r,d}(p, \omega_i)$$



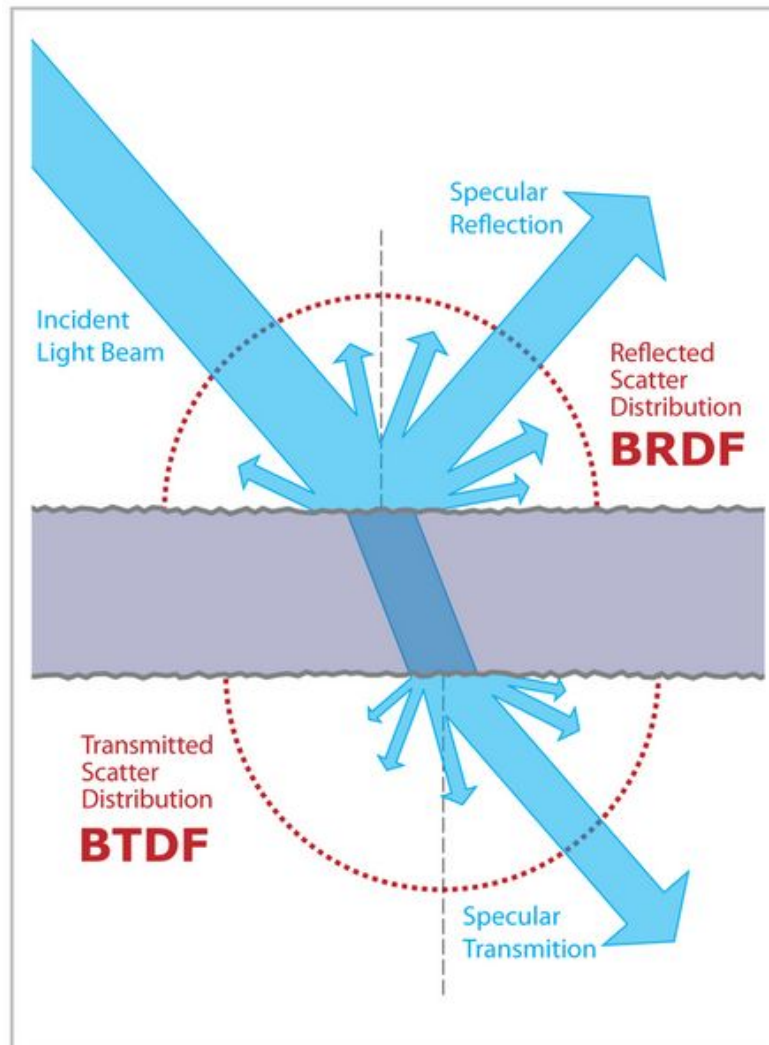
«Блеск»
(glossiness)



ДФП

- BTDF – Bidirectional Transmittance Distribution Function
 - ДФП = Двухнаправленная Функция Преломления
 - Определение аналогично ДФО, но для другой стороны поверхности
-

$$D\Phi_R = D\Phi_O + D\Phi_T$$



Расчет излучения точки поверхности

- Для каждой длины волны!
- Здесь учитываем только отражение

$$L(p, \omega_o) = \int_{\Omega} L_{\text{отражение}}(p, \omega_o, \omega_i) d\omega_i$$

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

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

Расчет излучения точки поверхности: дискретный случай

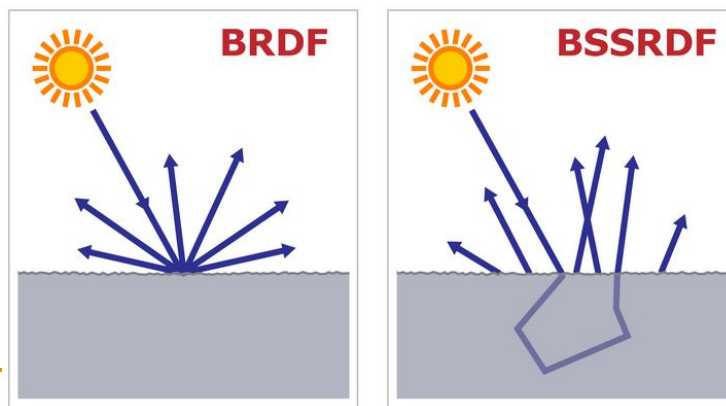
$$L(p, \omega_o) = \sum_{j=0}^{n-1} f_r(p, \omega_o, \omega_i^j) L_i^j \cos \theta_i^j$$

ω_i^j - Направление на j-й источник света

θ_i^j - Угол между направлением на j-й источник и нормалью к поверхности

Ограничения модели ДФР

- Отсутствие дифракции, интерференции
- Отсутствие поляризации
- Отсутствие флюоресценции и фосфоресценции
- Отсутствие поверхностного рассеивания
 - Surface scattering
 - Задачу решает ФОР (Функция Объемного Рассеивания) – обобщение модели ДФР



ИТОГИ

- Для синтеза изображений моделируем свет как поток частиц (геометрическая оптика)
 - Трудно моделировать дифракцию, поляризацию
- Для измерения света используем радиометрию
 - Основное понятие - излучение
- Для расчет излучения точки поверхности используется характеристика материала поверхности в виде ДФР или ФОР

Задание 1