

---

# Свет как энергия. Радиометрия. BRDF

---

Алексей Игнатенко

Лекция 3

30 марта 2009

---

# На прошлой лекции

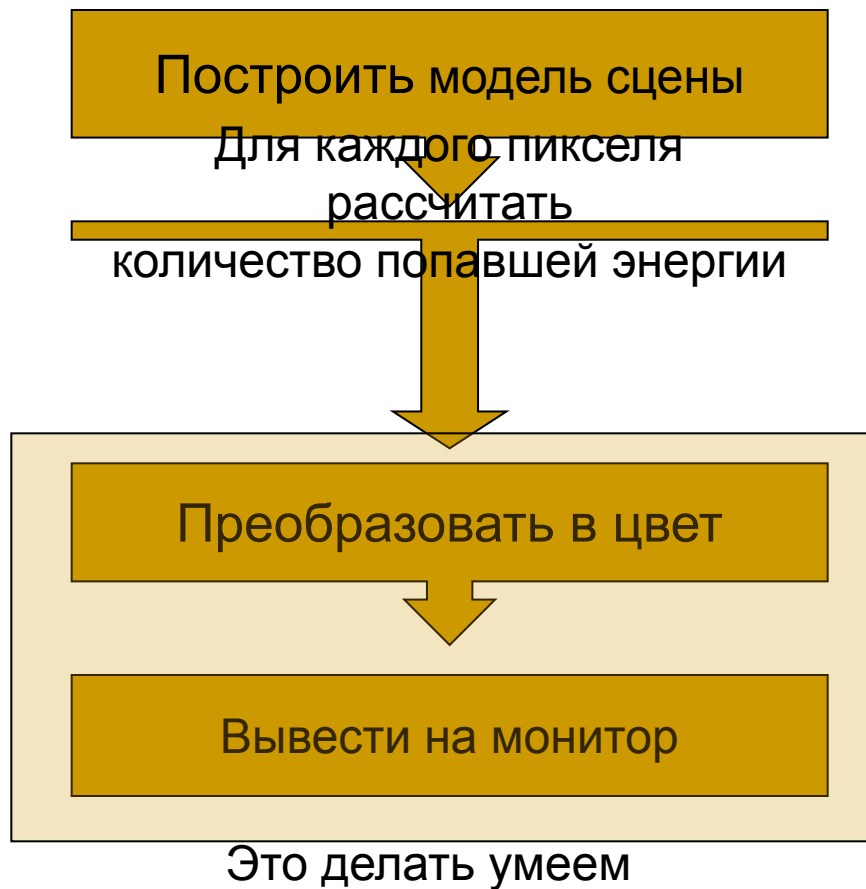
- Свет vs. Цвет
  - Все видимые цвета могут быть представлены в виде трех чисел
  - Основное цветовое пространство CIE XYZ
    - Построено на основе экспериментов
  - Инструмент – диаграмма тональности
    - Часто используется для анализа передаваемых диапазонов различных пространств
  - Пространство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

---

# На лекции

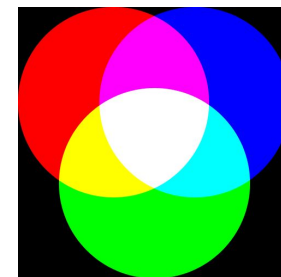
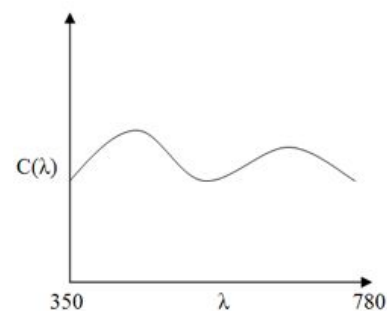
- Свет и волновая природа света
  - Радиометрия: основные термины и понятия
  - BRDF, BTDF
  - Расчет освещенности в точке
-

# Как получить фотореалистичное изображение?

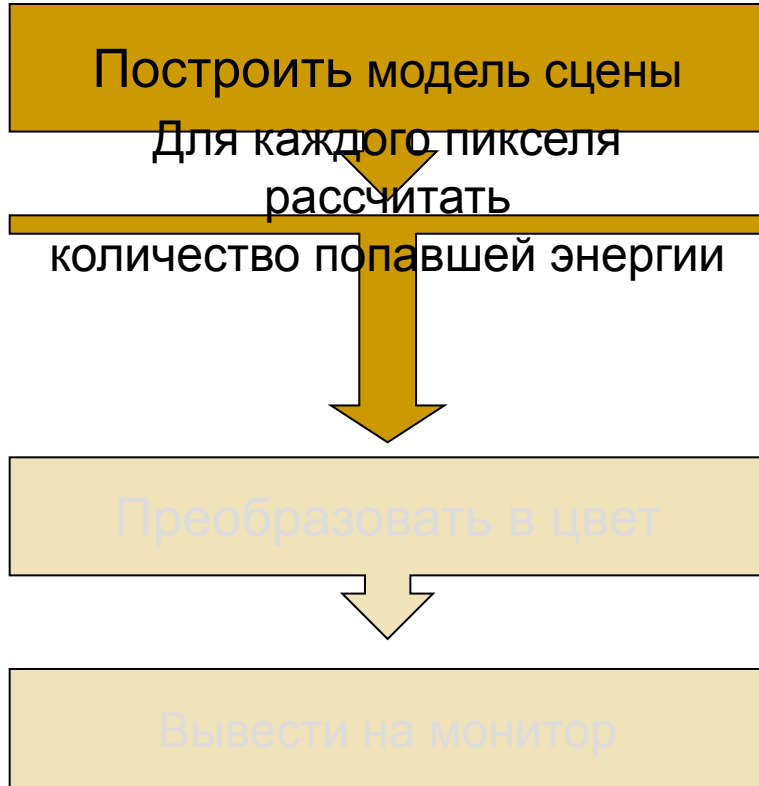


- Спектральное распределение энергии
- Нет никакого RGB

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

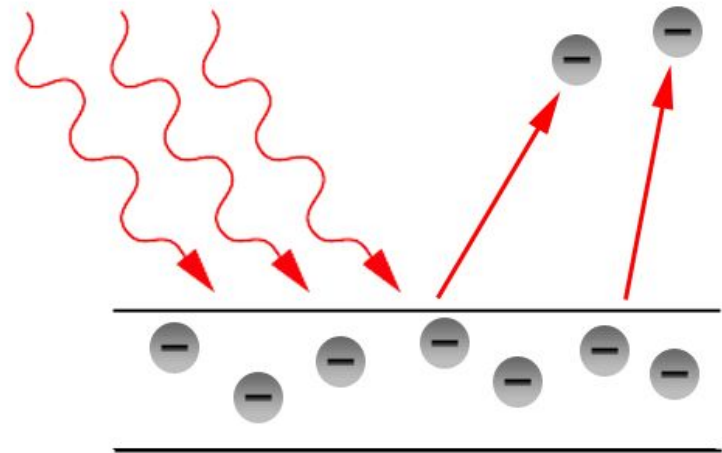
---

# 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
-



---

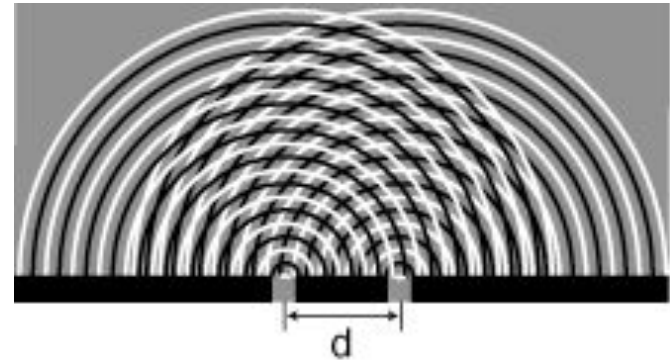
# Волновая природа света: явления

- Дифракция и интерференция
- Поляризация



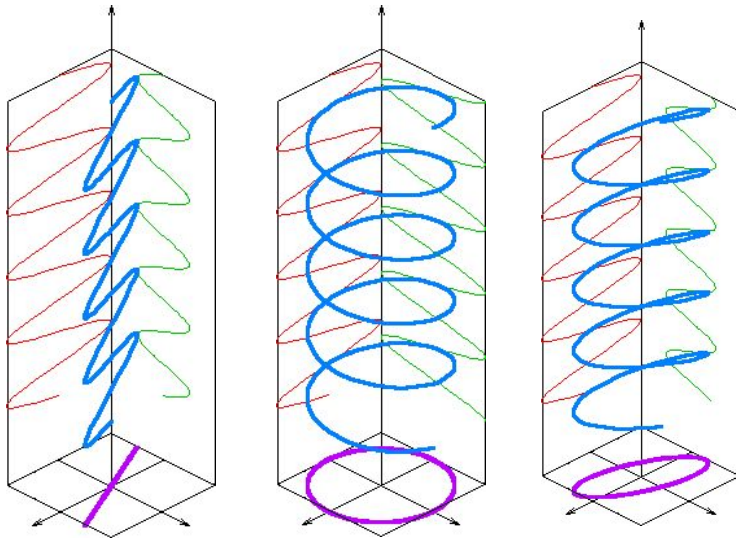
# Волновая природа света: дифракция и интерференция

- 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

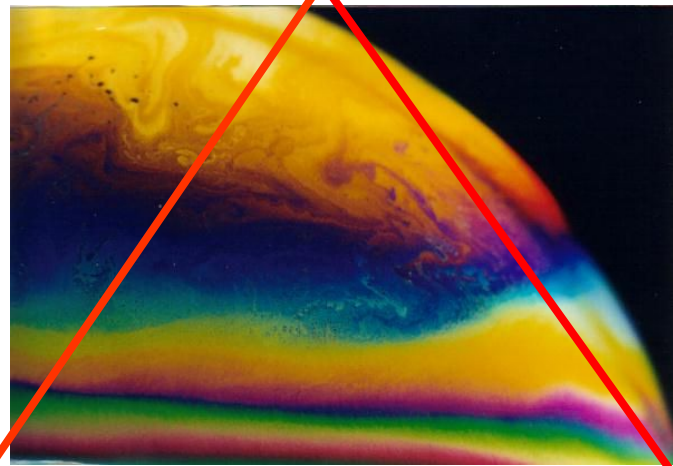


# Поляризация: пример



# 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

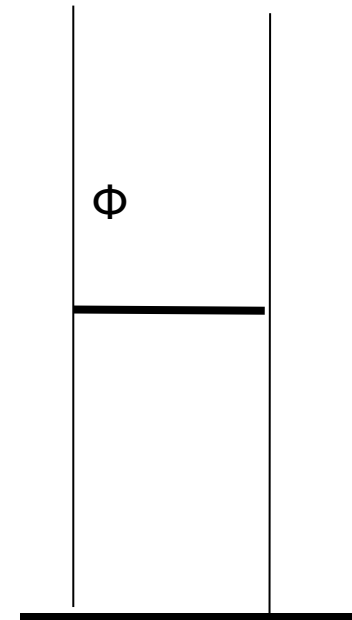
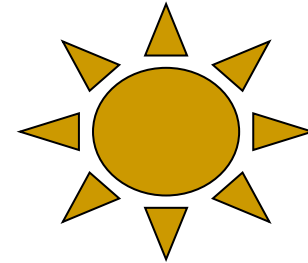
---

# Световая энергия (radiant energy)

- Обозначение:  $Q$
  - Единица измерения: Дж
  
  - Плохо подходит для наших задач
  - Необходимо выразить энергию, переносимую светом!
-

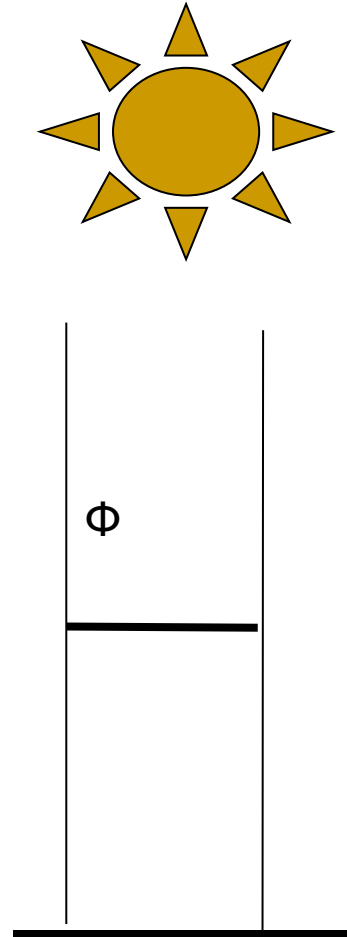
# Световой поток (flux)

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



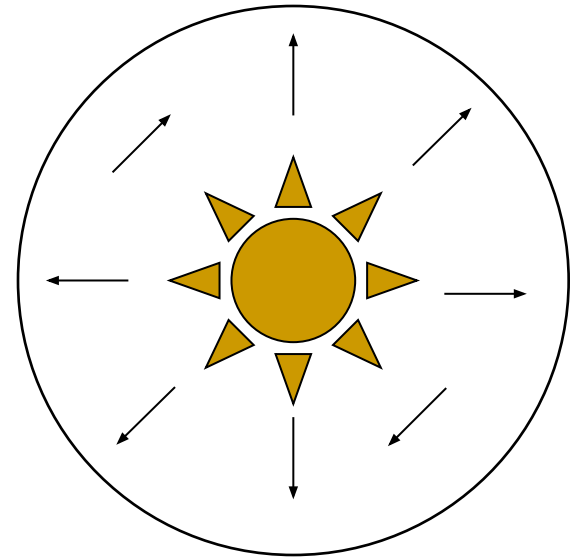
# Световой поток (flux): как измерить?

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



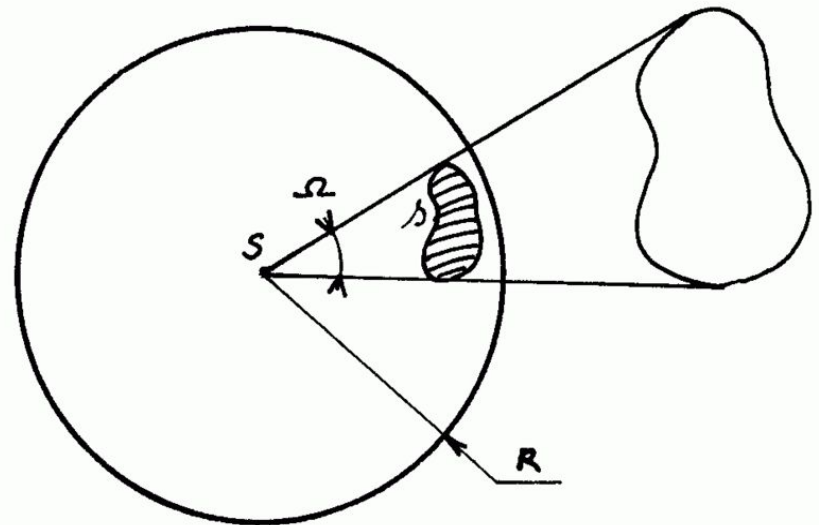
# Полный световой поток

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



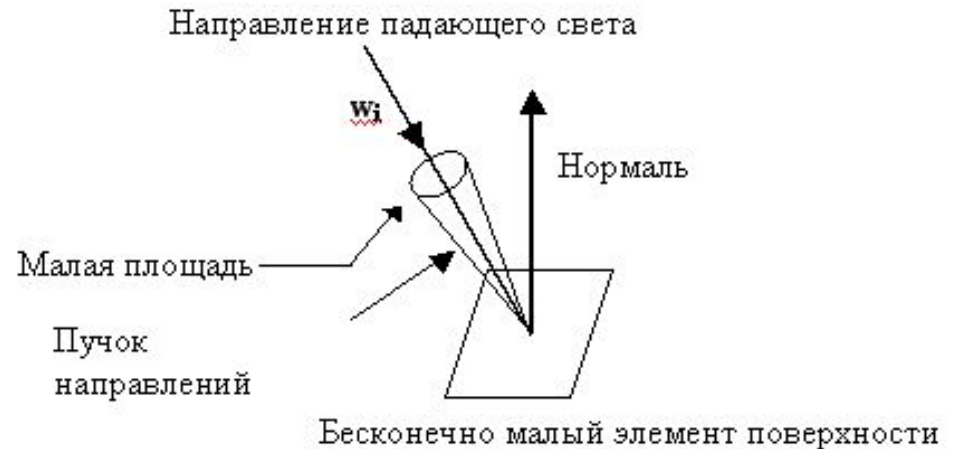
# Телесный угол

- 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 =  $4\pi \cdot I$



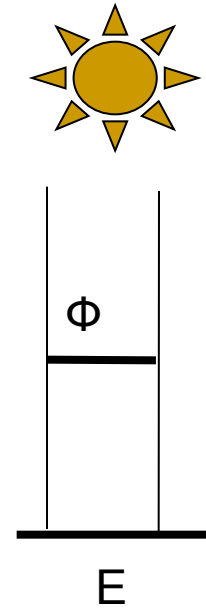
# Освещенность и светимость

- 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)

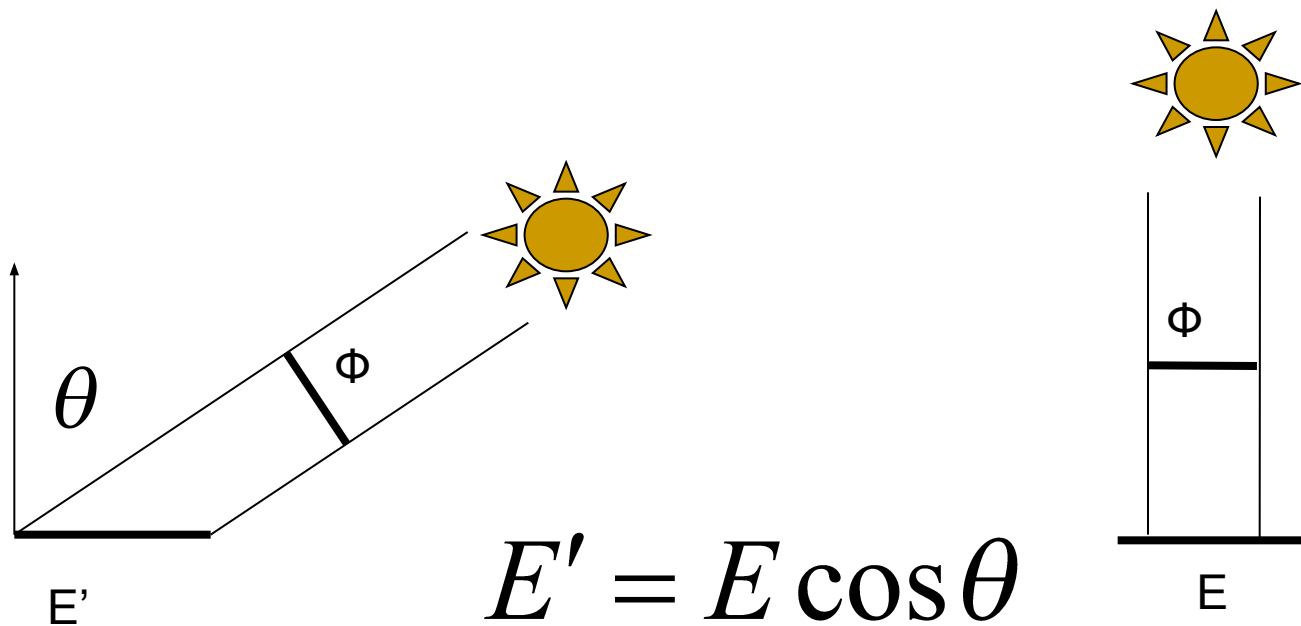
- Обозначение:  $E$
- Единицы измерения:  $\text{Вт}/\text{м}^2$

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



# Связь освещенности и «косинуса»

- Во многих моделях освещения встречается  $\cos$  в качестве множителя



# Энергетическая светимость (radiant exitance)

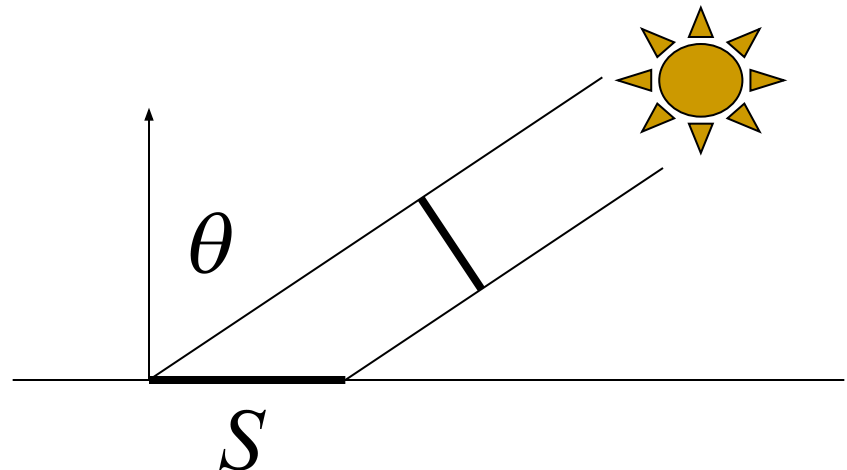
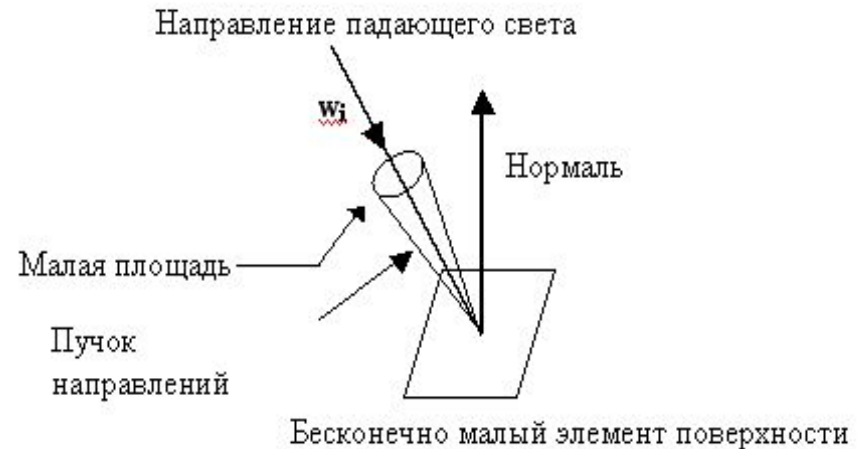
- Обозначение:  $M$
- Единицы измерения: Вт/м<sup>2</sup>
- В компьютерной графике еще называют **radiosity**

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

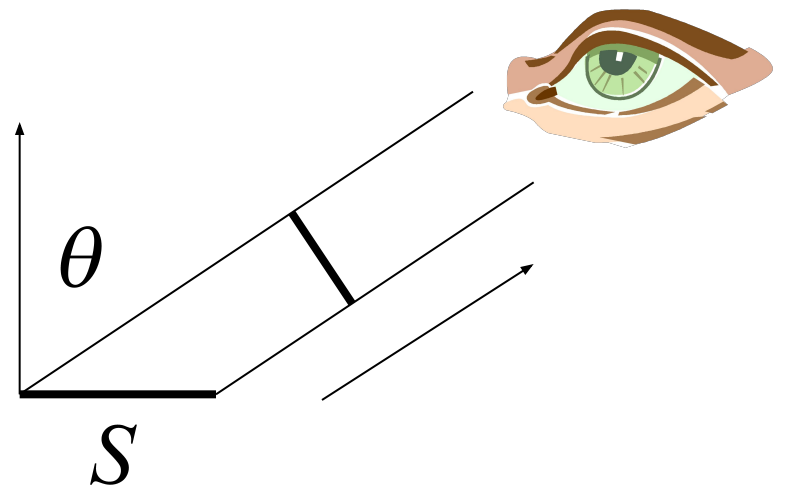
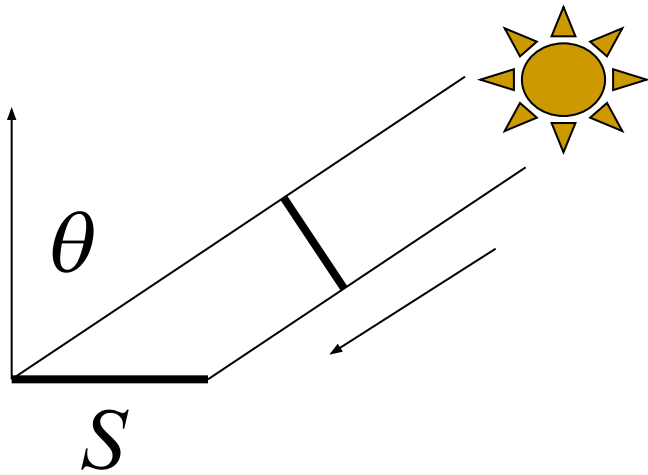
# Яркость (radiance)

- Наиболее важная единица
- Источник не точечный
- Плотность потока, попадающего на площадку единичной площади, проходя через единичный телесный угол
- Обозначение:  $L$
- Единицы измерения:  
 $\text{Вт} / (\text{Ст} * \text{м}^2)$

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

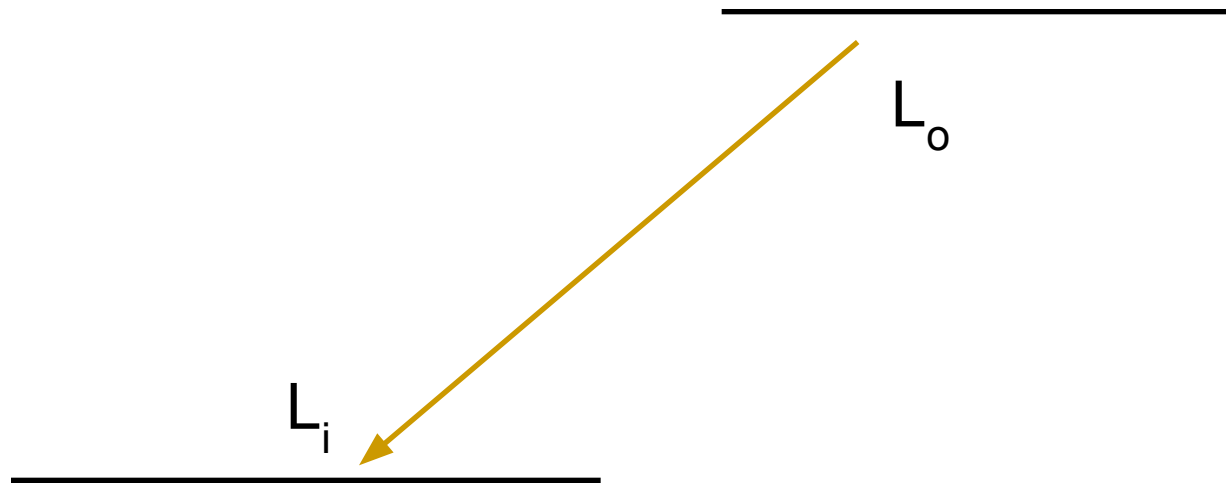


# Исходящее и входящее излучение



# Свойства излучения

- Передается в вакууме без потерь!



- Фотокамера записывает именно яркость
- Глаз реагирует на яркость

# Выражение излучения через другие единицы

Сила света                      Освещенность                      Светимость

↓                                      ↓                                      ↓

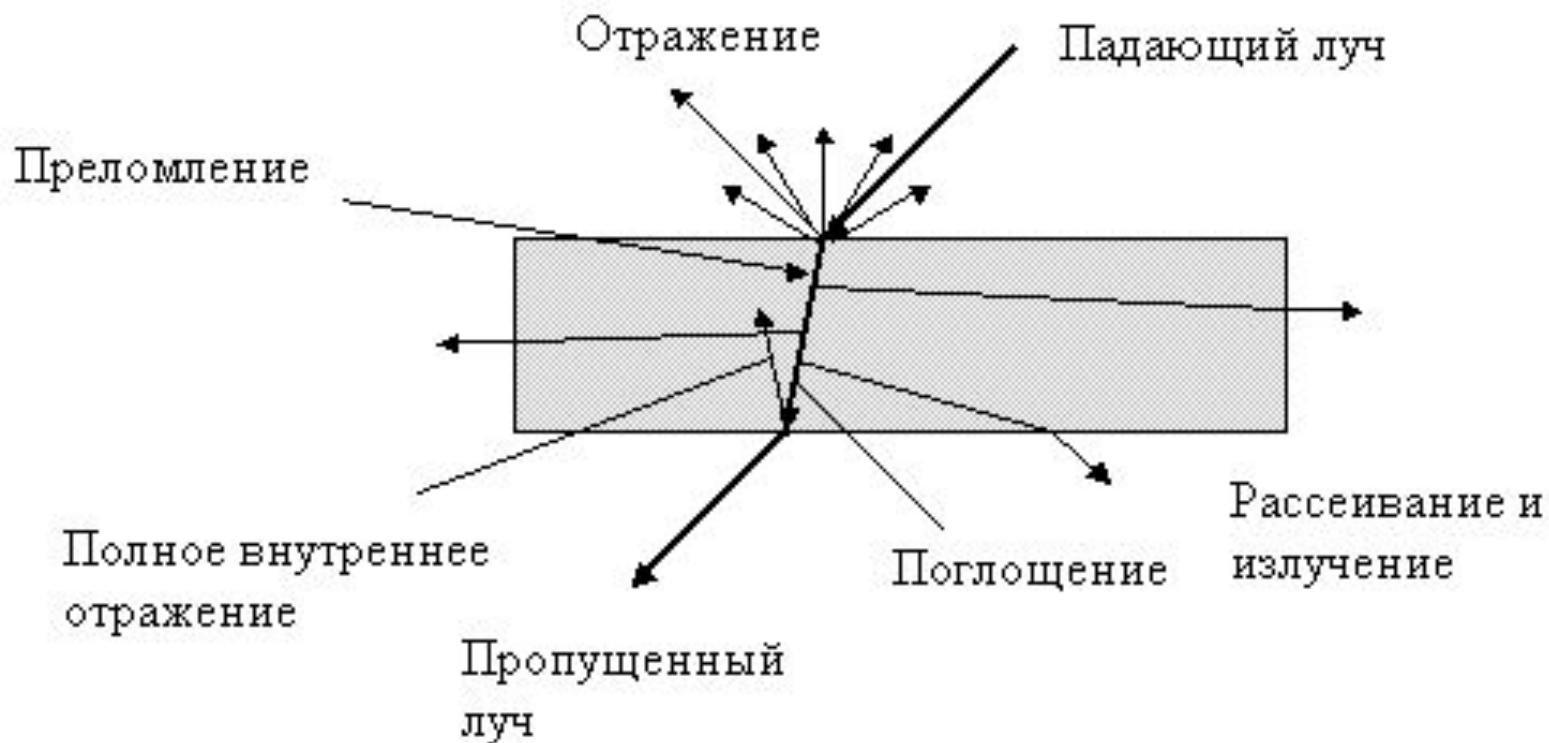
$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{dE}{d\omega \cos \theta} = \frac{dM}{d\omega \cos \theta}$$



# Фотометрия и фотометрические единицы

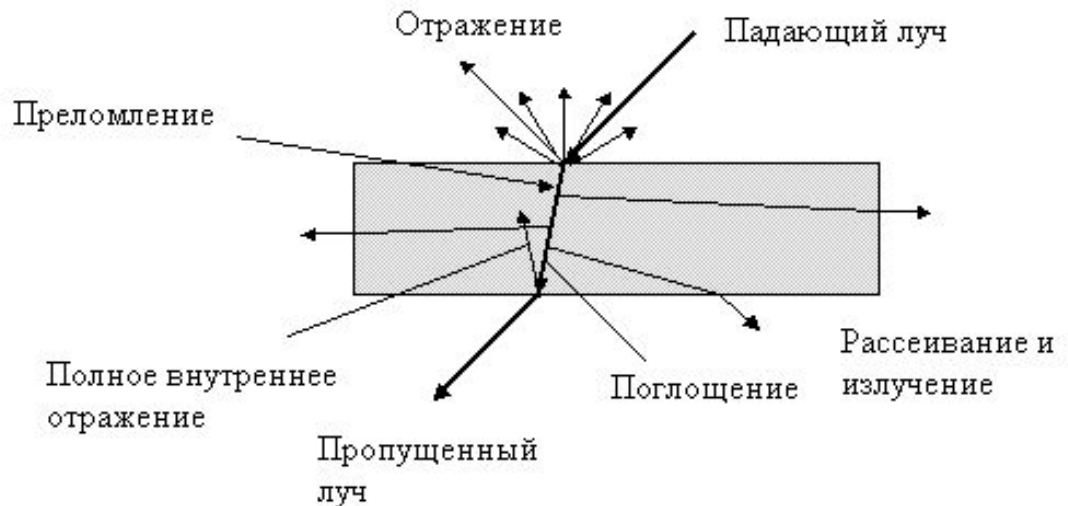
- Световой поток - (люмен – ватт)
  - поток лучистой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению
  - Поток, взвешенный стандартным наблюдателем
  - Поток внутрь телесного угла 1ср.
  - Если 1кд по любому направлению, то полный поток  $4\pi$  лм
- Сила света - кандела (кд) (ватт на стерадиан)
  - до платинового эталона была "международная свеча"
- Освещенность - люкс (1 люмен по площади  $1\text{м}^2$  - ватт /  $\text{M}^2$ )
- Яркость - (кандела на квм - ватт / стерадиан /  $\text{м}^2$ ) = нит.
  - Luminance

# Взаимодействие света и материала



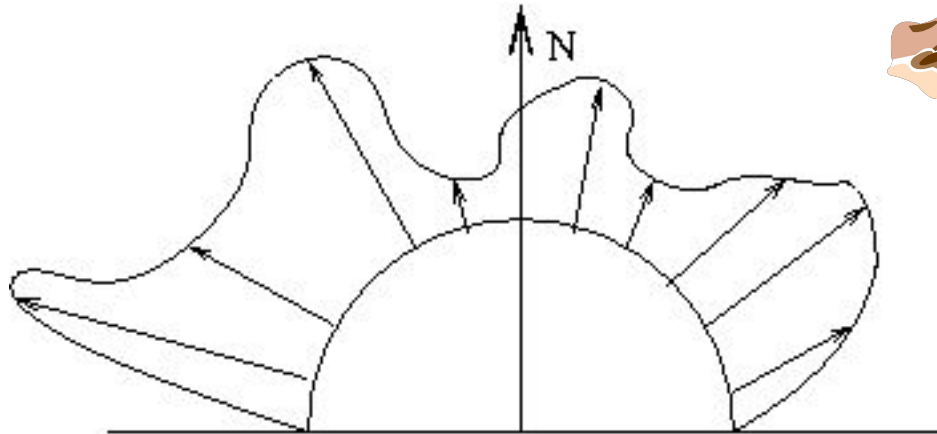
# Типы взаимодействия света и материала

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



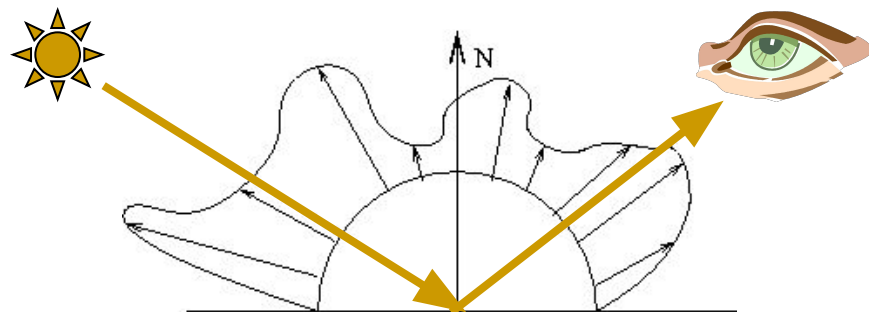
# Отражение и ДФО

- 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  $\omega_o$
- При условии излучения по направлению  $\omega_i$ , 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)

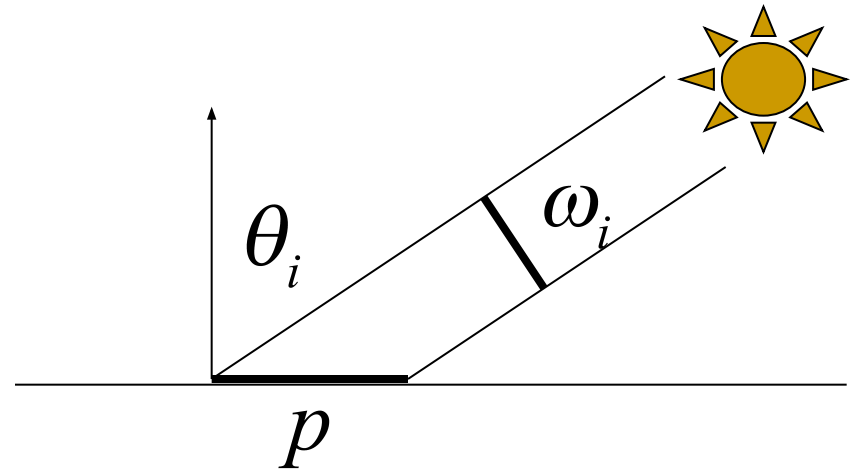
- Рассмотрим дифференциальную освещенность поверхности в точке  $p$  в зависимости от яркости:

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

- В направление  $\omega_0$  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



---

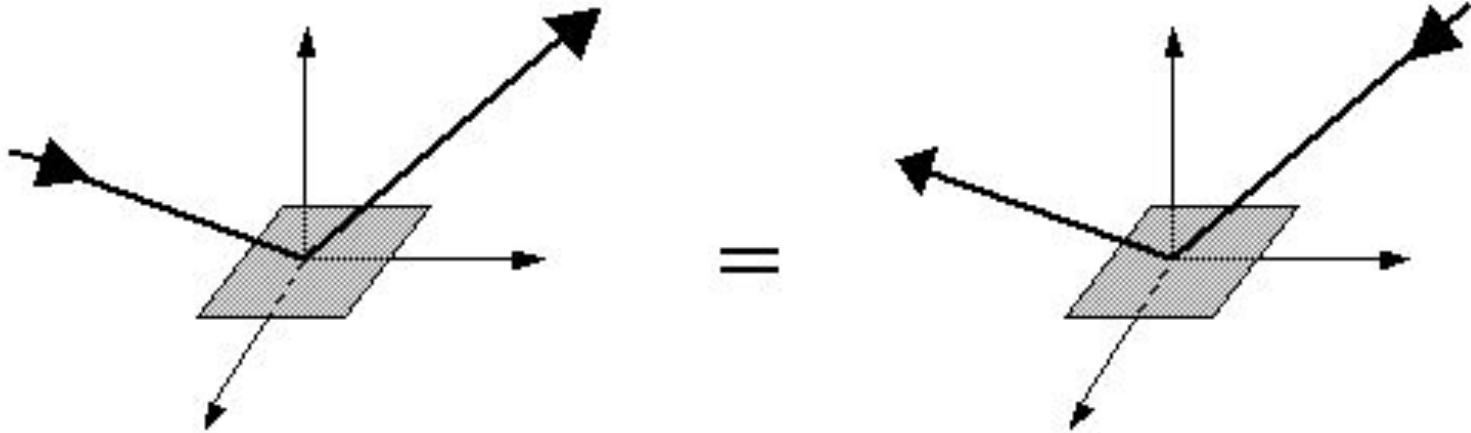
# Свойства ДФО

- Обратимость
  - Сохранение энергии
-



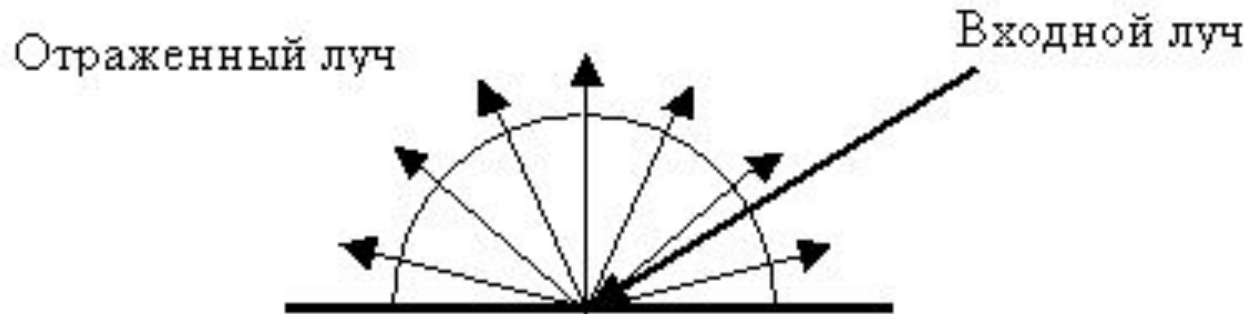
# Свойства ДФО: обратимость

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



# Свойства ДФО: сохранение энергии

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

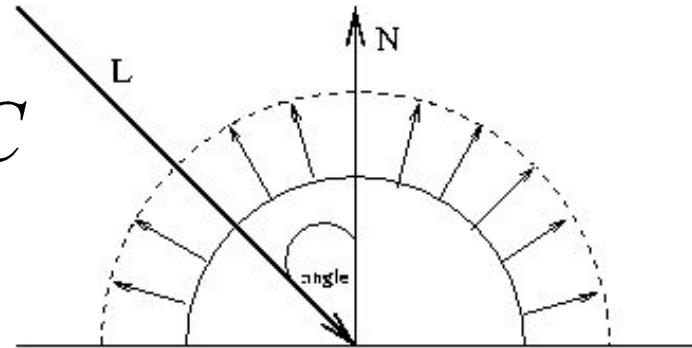


# Примеры ДФО: диффузное отражение

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

Для идеального диффузного отражения

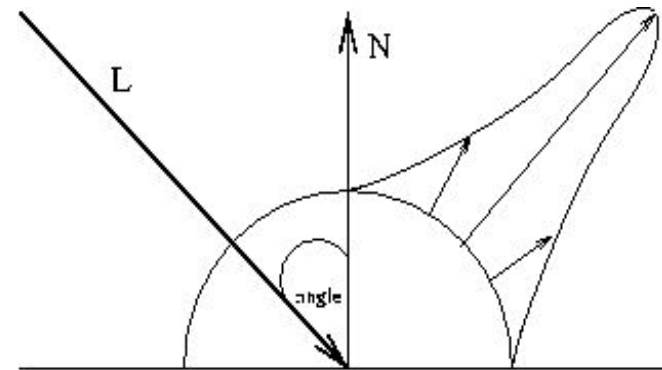
$$f_{r,d}(p, \omega_i) = \frac{1}{\pi}$$



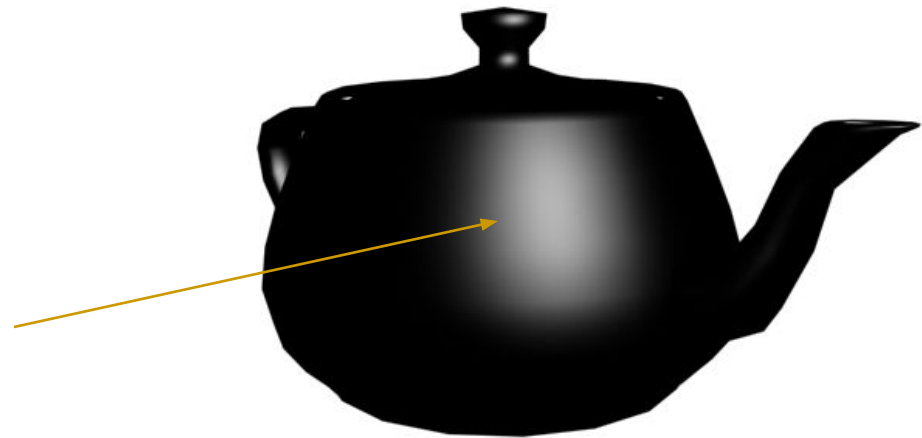
# Примеры ДФО: зеркальное отражение

- Идеальное зеркальное отражение

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



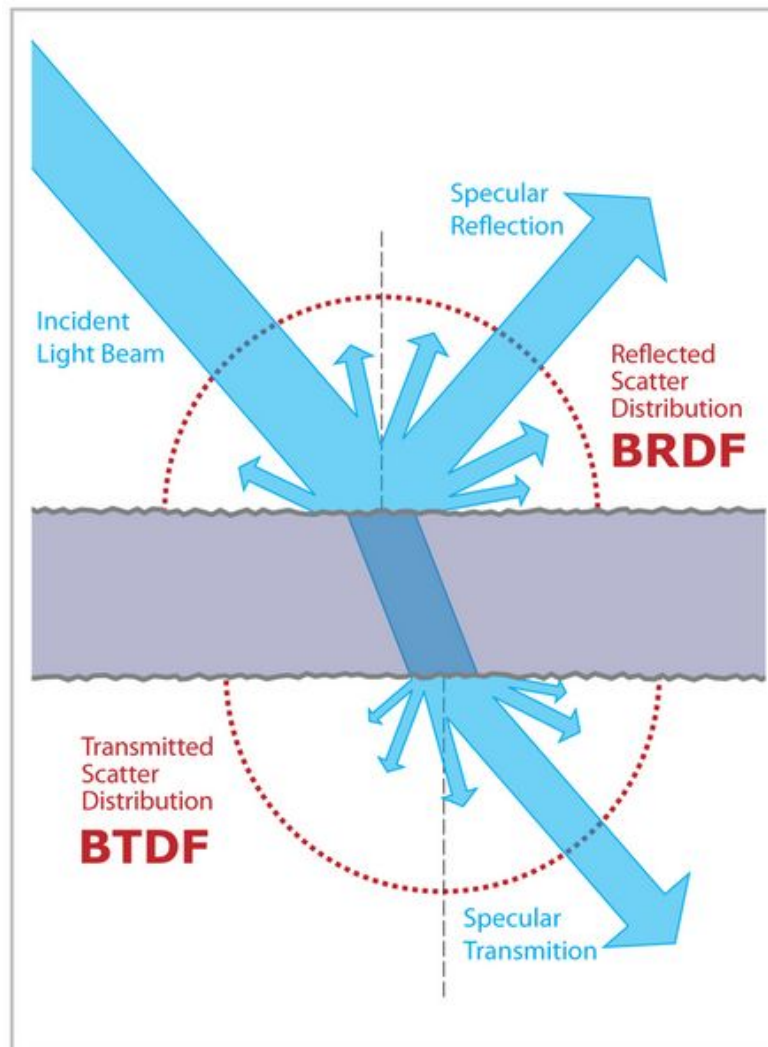
«Блеск»  
(glossiness)



# 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

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

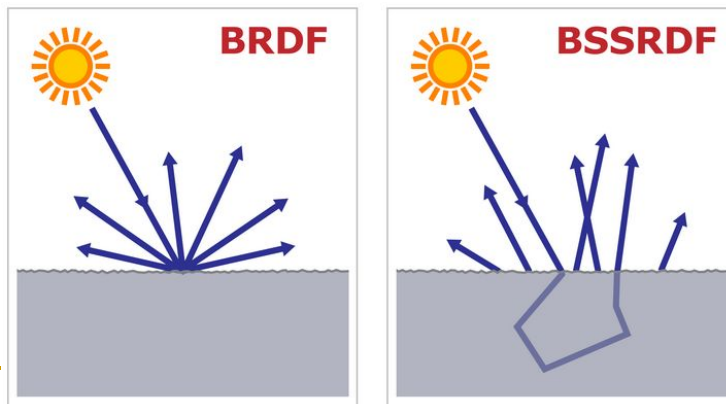
$\omega_i^j$  - Направление на j-й источник света

$\theta_i^j$  - 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