

# Локальные и глобальные модели освещения. Модель Фонга. Закраска Фонга и Гуро

Алексей Викторович Игнатенко  
Лаборатория компьютерной графики и  
мультимедиа  
ВМК МГУ

# Графический процесс: типовая последовательность применения алгоритмов



# Модель освещения используется для вычисления интенсивности света для данной точки на поверхности модели

---

Фотореализм включает в себя два элемента:

- Качественная геометрическая модель
- Хорошая физическая модель освещения

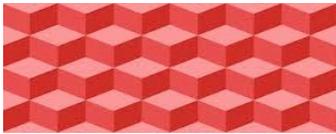
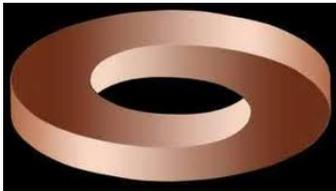


Модель освещения включает в себя отражения, преломления света, тени, текстуры и т.п.



# Моделировать освещение очень важно, т.к. на основе освещения мы воспринимаем форму объектов

Глаз воспринимает освещение и «реконструирует» трехмерную форму



**Моделирование  
освещения –  
ключевой элемент  
фотореализма**



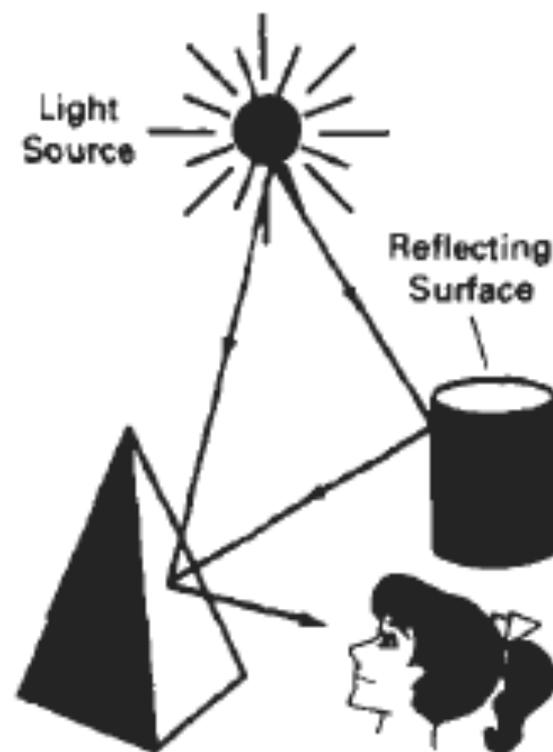
# Источники света: первичные и вторичные

Полный отраженный свет = сумма вклада от источников света и других поверхностей сцены

Две категории:

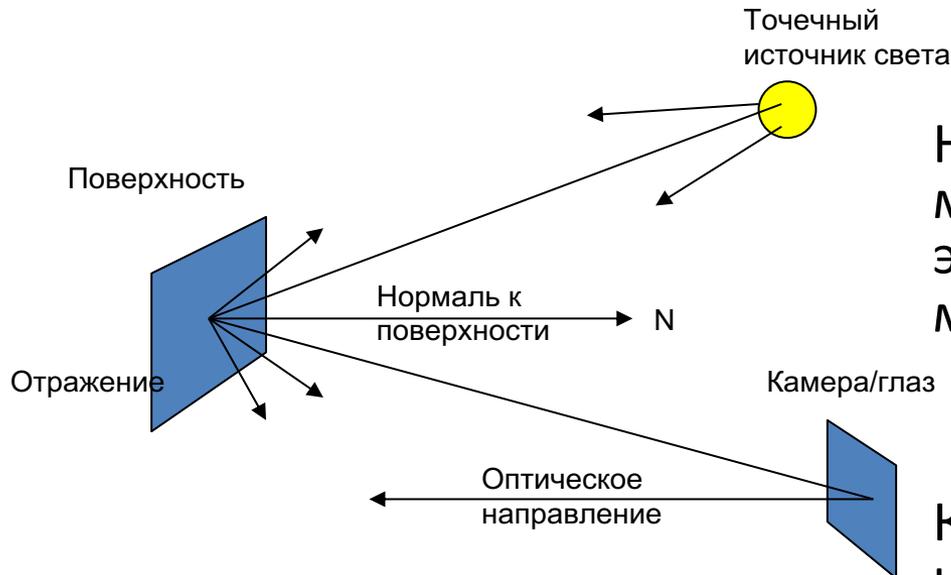
- Светоиспускающие источники = первичные источники
- Светотражающие источники = вторичные источники

Поверхность, не освещаемая источником света, все равно может быть видима!



# Суть задачи: моделирование переноса световой энергии

Моделирование процессов из физики и физиологии



Необходимо разработать модель передачи электромагнитной энергии между объектами

Как только свет достигает наших глаз, запускается процесс восприятия

- определяет, что мы «видим» в сцене

# Нужно рассчитать количество и распределение энергии на чувствительных элементах

---

В реальном мире видимый цвет определяется количеством энергии видимого спектра, которая попадает на чувствительные элементы сетчатки глаза

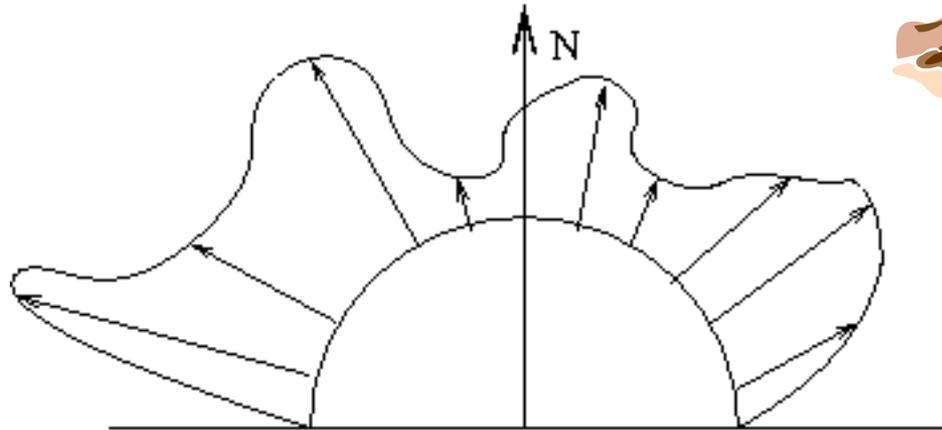
Как правило, мы видим отраженный свет

Отражающие характеристики поверхности определяются отражающими способностями по отношению к волнам различной длины

# Более формально: источник, наблюдатель, рассчитать отражение

---

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

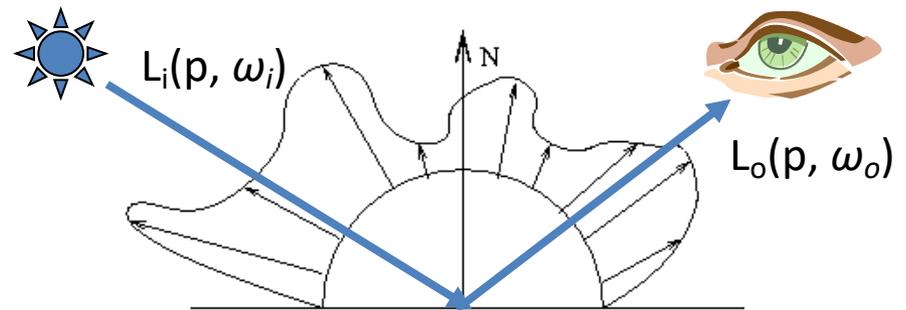


# Двулучевая Функция Отражения (ДФО): определение

Чему равно излучение поверхности  $L_o(p, \omega_o)$  в направлении  $\omega_o$  при условии излучения по направлению  $\omega_i$ , равной  $L_i(p, \omega_i)$  ?

Определяется с помощью ДФО

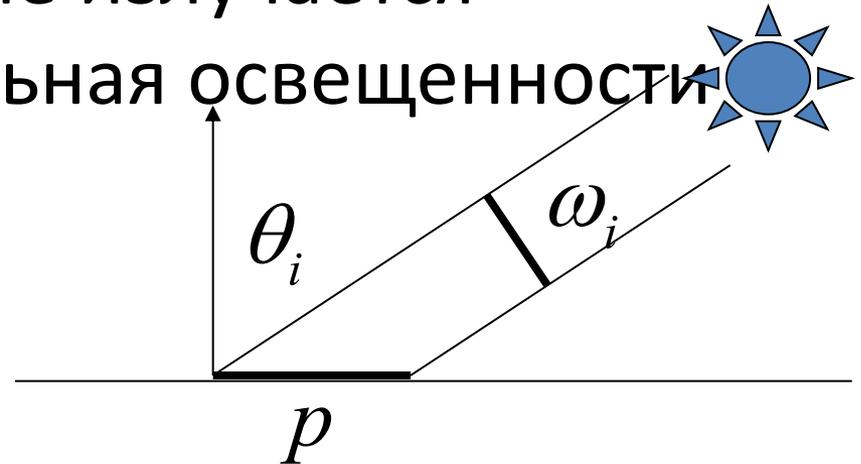
- BRDF = Bidirectional Reflection Distribution Function
- ДФО = Двулучевая функция отражения



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

В заданном направлении излучается энергия, пропорциональная освещенности

Рассмотрим освещенность поверхности в малой окрестности точки  $p$ :



$$E(p, \omega_i) = L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

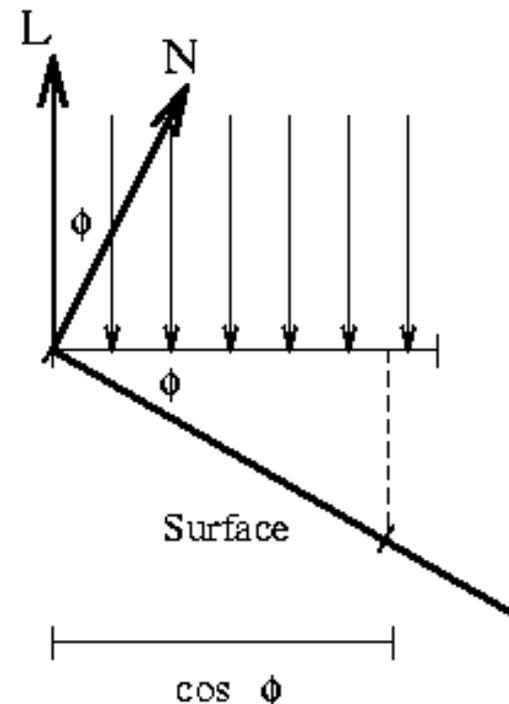
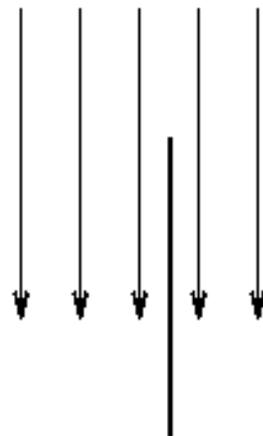
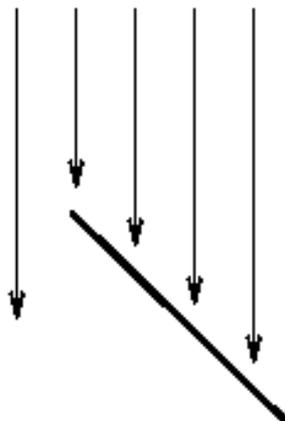
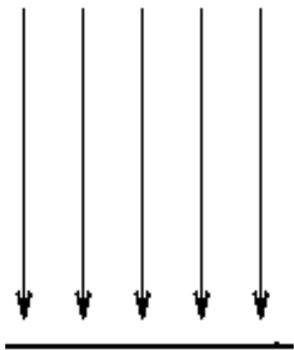
В направлении  $\omega_0$  будет излучаться

$$L_o(p, \omega_0) \propto E(p, \omega_i)$$

Из предположения линейности и сохранения энергии

# Освещенность пропорциональна площади распределения потока света от источника

---



Появляется косинус!

Вывод определения ДФО: фактически отношение падающего и исходящего света с учетом направления падения

---

$$E(p, \omega_i) = L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

$$L_o(p, \omega_o) \propto E(p, \omega_i)$$



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

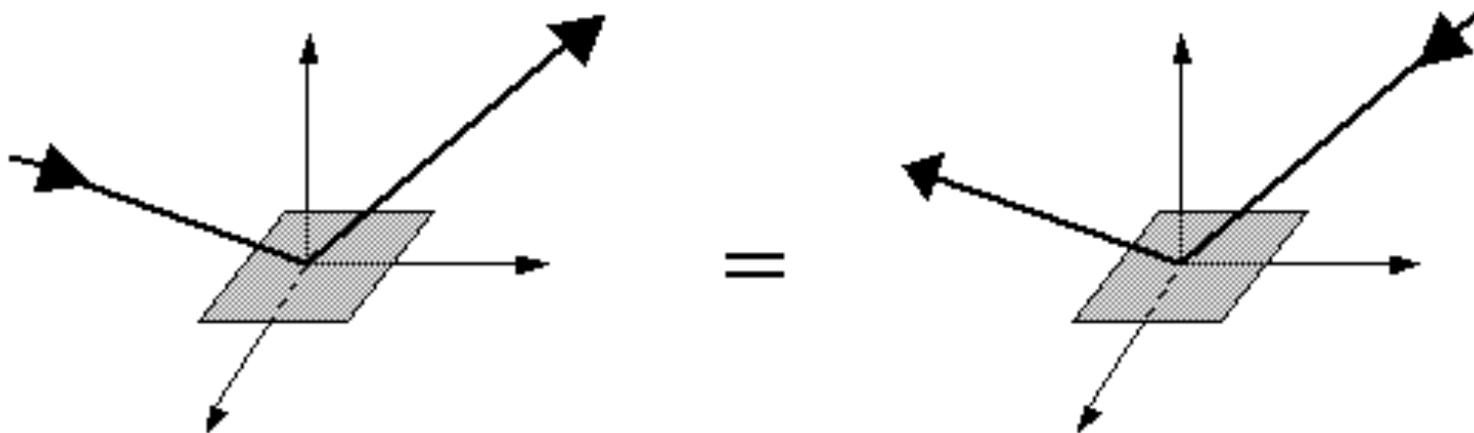


ДФО

# Свойство ДФО: обратимость

---

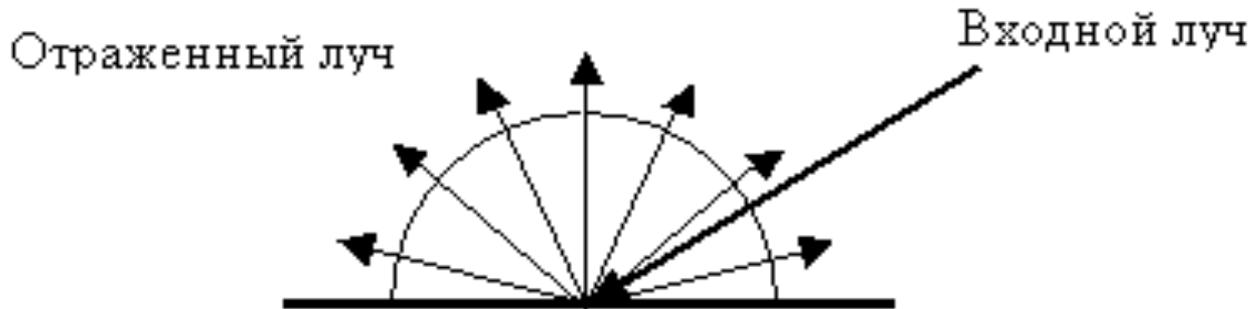
$$\forall \omega_o, \omega_i \ f_r(p, \omega_o, \omega_i) = f_r(p, \omega_i, \omega_o)$$



# Свойство ДФО: сохранение энергии

---

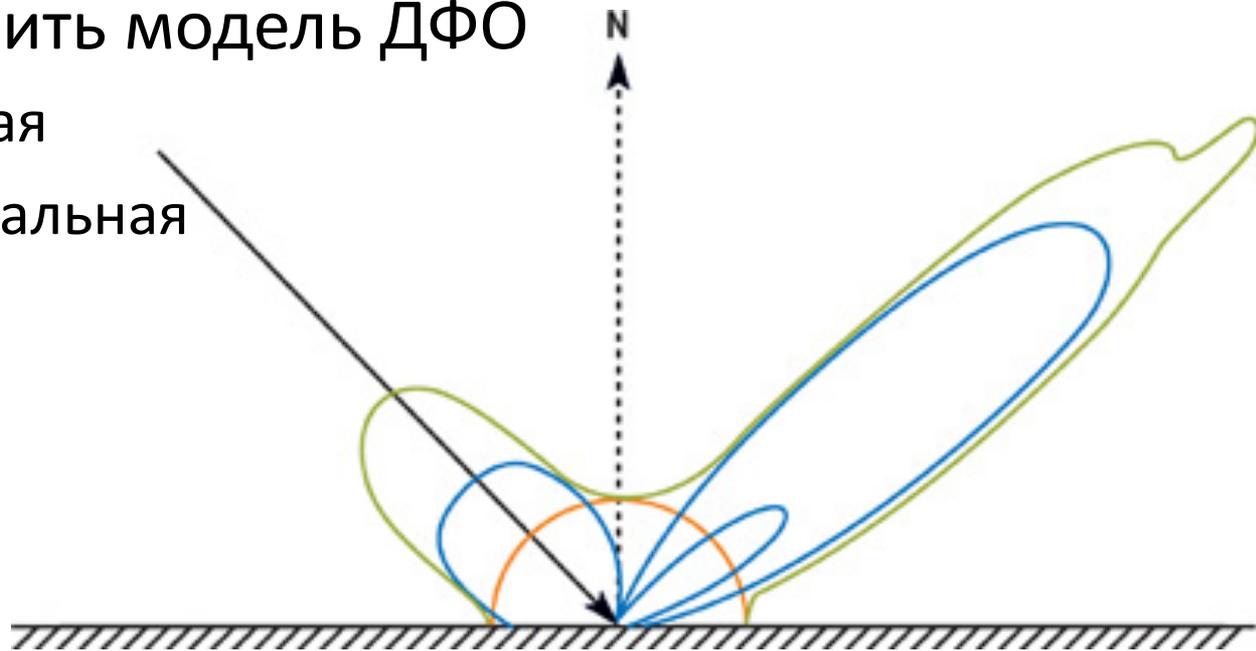
$$\int f_r(p, \omega_i, \omega') \cos \theta' d\omega' \leq 1$$



# Вычисление яркости точки

---

- $f_r = \frac{L}{E}$
- $L_o = f_r E = f_r L_i \cos \theta_i d\omega_i$
- Нужно построить модель ДФО
  - Аналитическая
  - Экспериментальная



# Расчет излучения точки поверхности через интегрирование по всем входящим направлениям

Для каждой длины волны!

Здесь учитываем только отражение

$$L(p, \omega_o) = \int L_{oduetoi}(p, \omega_o, \omega_i)$$

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

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

# Расчет излучения точки поверхности: дискретный случай

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



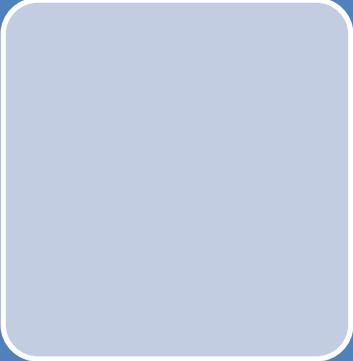
$$L(p, \omega_o) = \sum_{j=0}^{n-1} f_r(p, \omega_o, \omega_i^j) L_i^j \cos \theta_i^j$$

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

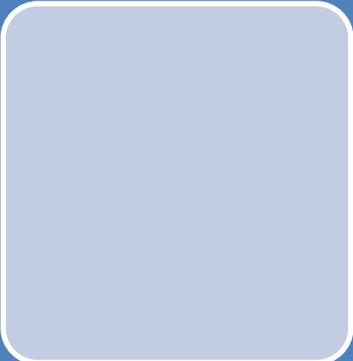
$\theta_i^j$  - Угол между направлением на j-й источник и нормалью к поверхности

# Лекция посвящена моделированию освещения

---



Моделирование  
освещения. ДФО



Локальные и глобальные  
модели. Модель Фонг

Локальные модели учитывают только первичные источники света, глобальные – все источники

---

Источниками энергии могут быть не только источники света, но и другие отражающие объекты



Такие взаимоотношения сложно учитывать



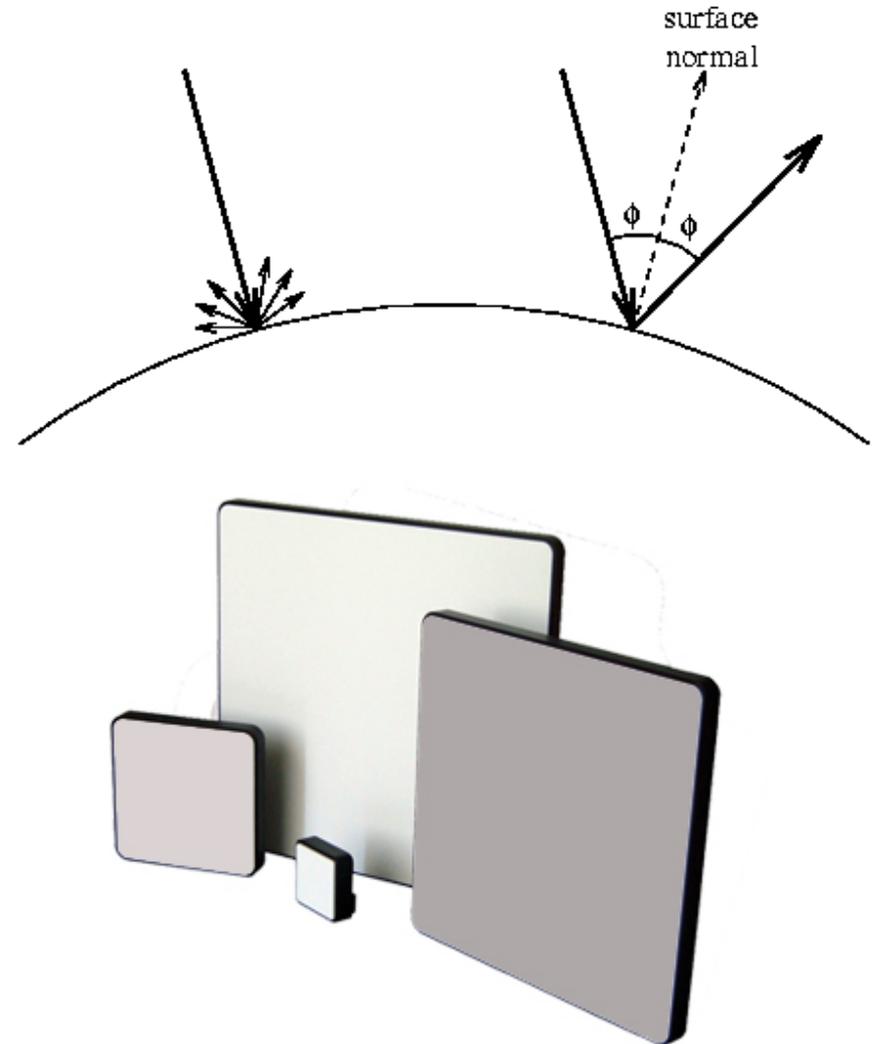
Выделяют локальные и глобальные модели освещения

Локальные модели при вычислении освещения в данной точке учитывают только положение этой точки относительно первичных источников света

# Можно упростить расчет модели, ограничив передаваемые свойства материалов

---

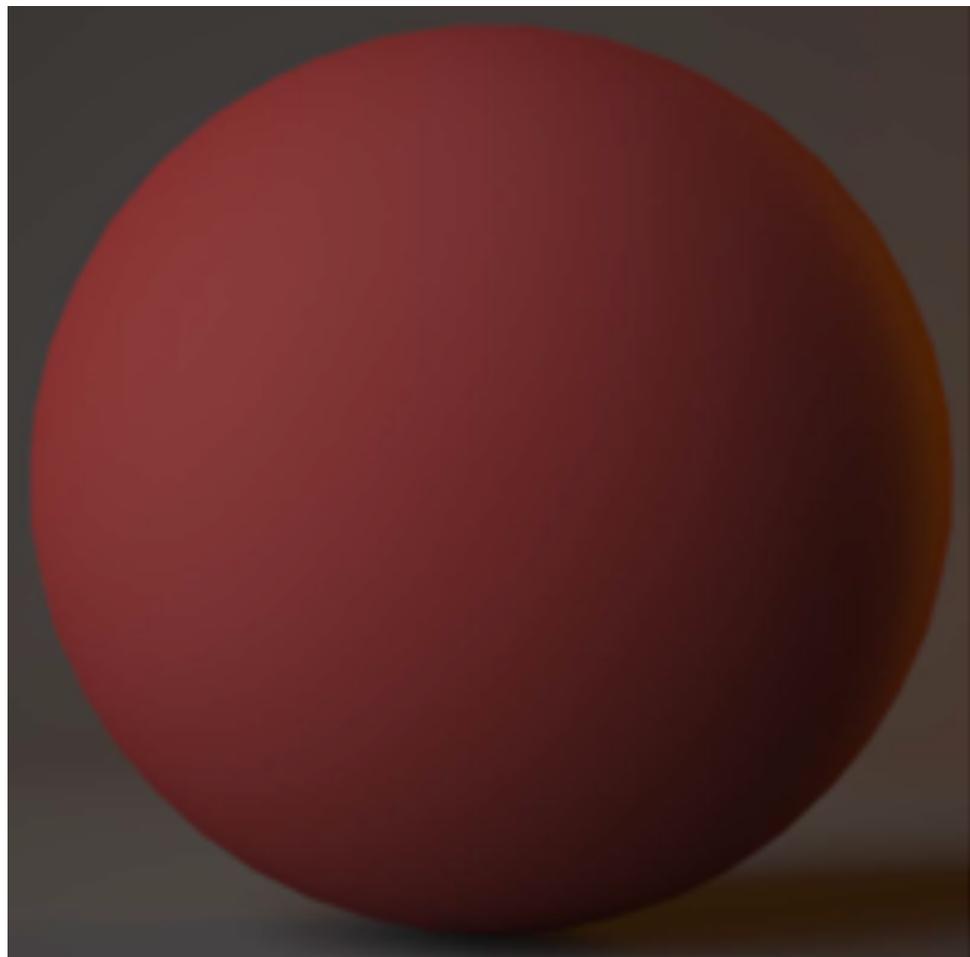
- Диффузное отражение
  - матовый пластик, дерево и т.п.
  - модель Ламберта
- Идеально зеркальное отражение
  - зеркало
  - модель отражения
- Зеркальное отражение
  - блики на объекте
  - модели Фонга и Блинна



# Модель Ламберта

---

- Ламбертова (идеально диффузная) поверхность выглядит одинаково яркой со всех направлений
- В природе не существует, но есть близкие приближения
- Пример: бумага



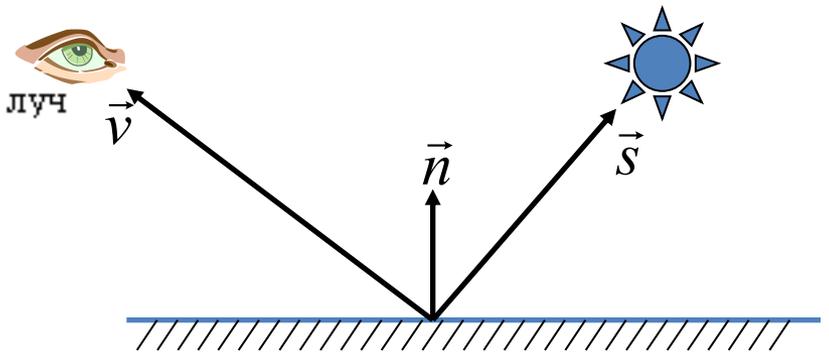
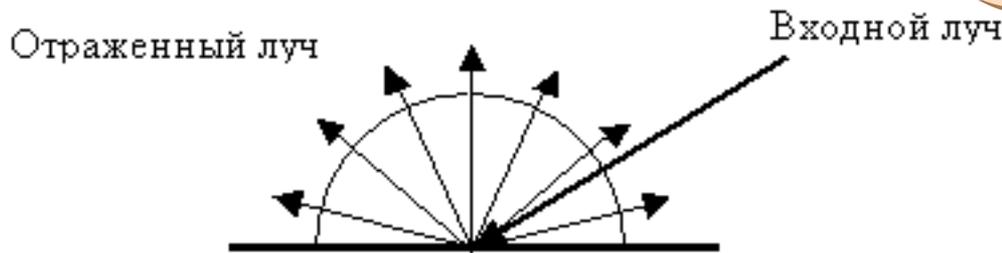
# Модель Ламберта учитывает только идеальное рассеивание света

Для одного источника света

ДФО константна =  $C/P_i$

–  $C$  определяет процент отражения для данной длины волны

$$L_o = L_i k_d \underbrace{(\vec{s} \cdot \vec{n})}_{\cos \omega_i}$$



# Идеально зеркальное отражение

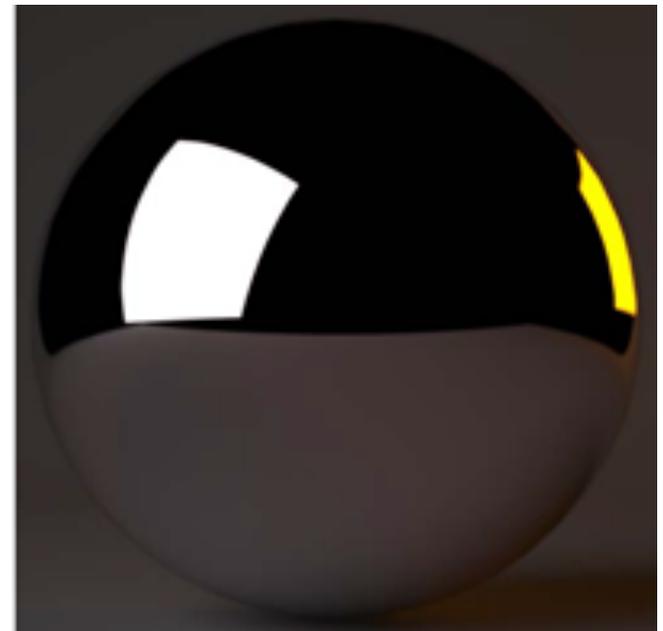
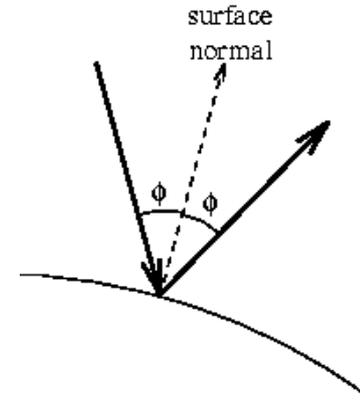
ДФО равно нулю везде, кроме

$$- \theta_o = \theta_i$$

$$- \phi_o = \phi_i + \pi$$

- Дельта-функция от направления идеального отражения

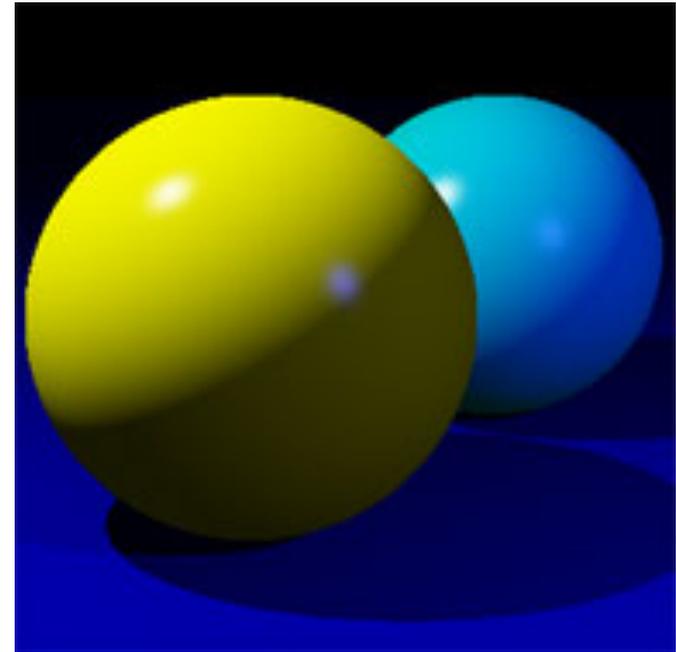
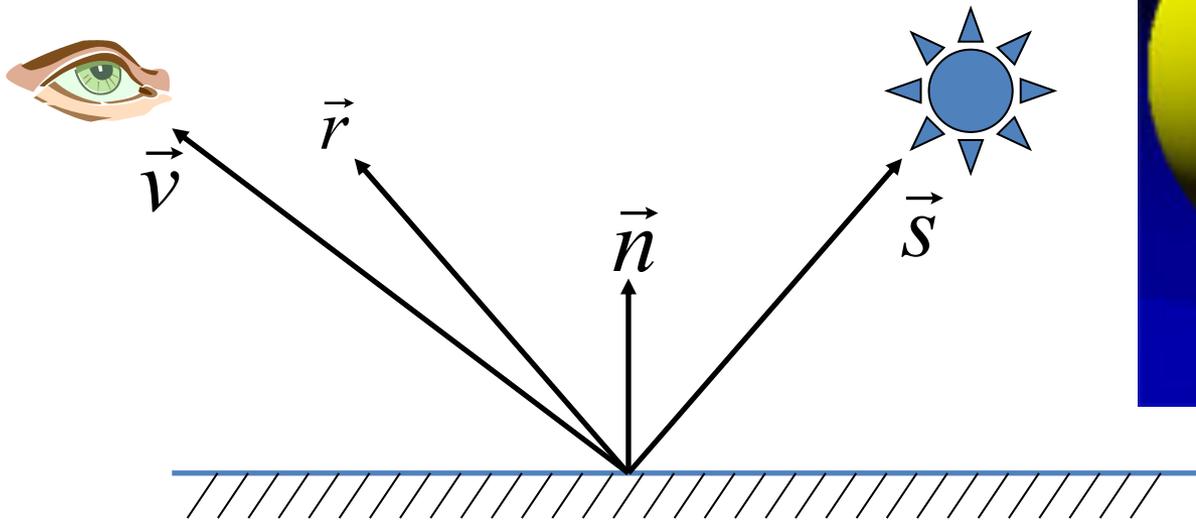
$$f_{mirror} = \frac{\delta(\theta_i - \theta_o)\delta(\phi_i - \phi_o)}{\cos(\theta_i)}$$



# Модель Фонга добавляет в модель Ламберта зеркальное отражение

Добавляет эмпирический косинус для моделирования отражений (блеска)

$$f_{rphong} = \frac{k_d(s \cdot n) + k_s(r \cdot v)^k}{\cos\theta_i}$$

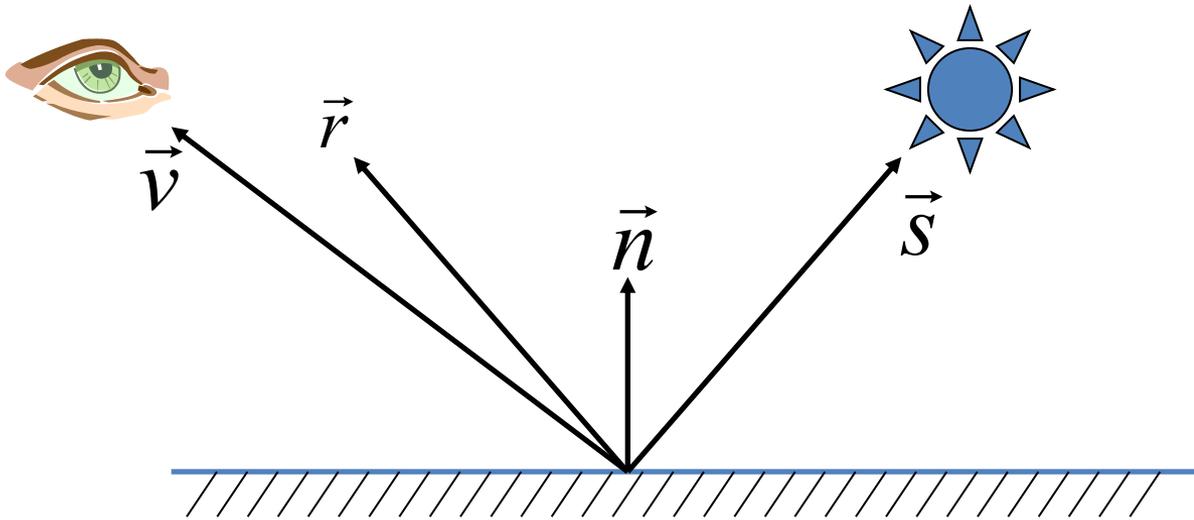


# Модель Фонга добавляет в модель Ламберта зеркальное отражение

---

Добавляет эмпирический косинус для моделирования отражений (блеска)

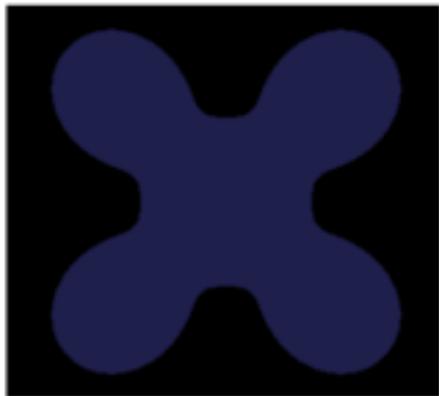
$$L_o = k_a L_a + L_i (k_d (\vec{s} \cdot \vec{n}) + k_s (\vec{r} \cdot \vec{v})^{k_e})$$



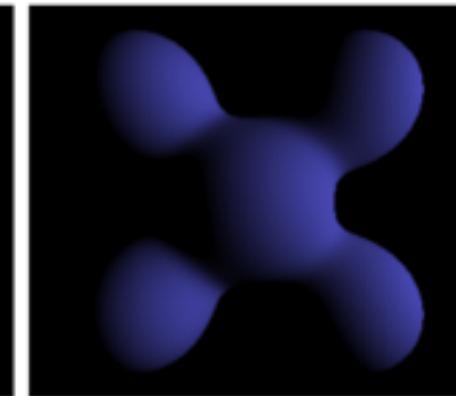
# Модель Фонга: пример

---

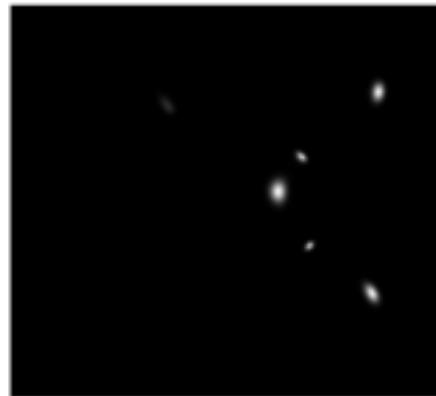
$$L_o = k_a L_a + L_i (k_d (\vec{s} \cdot \vec{n}) + k_s (\vec{r} \cdot \vec{v})^{k_e})$$



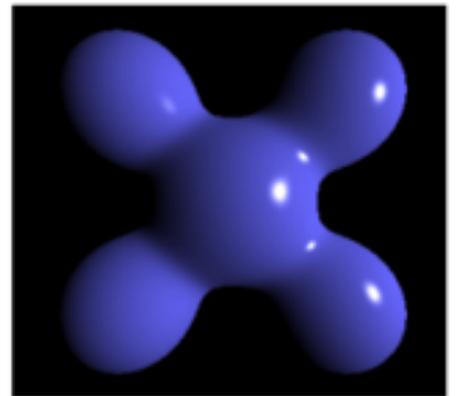
Ambient



Diffuse



Specular



= Phong Reflection

Модель Фонга имеет неприятные особенности, но все равно очень широко применяется

---

- Не является обратимой
- Не сохраняет энергию

# Зеркальная и диффузная составляющие BRDF – это оправдано?

---

Описывает материалы, содержащие отражающие и диффузные частицы

Пропорции частиц задают коэффициенты  $k_s$ ,  $k_d$

# Microfacet BRDF

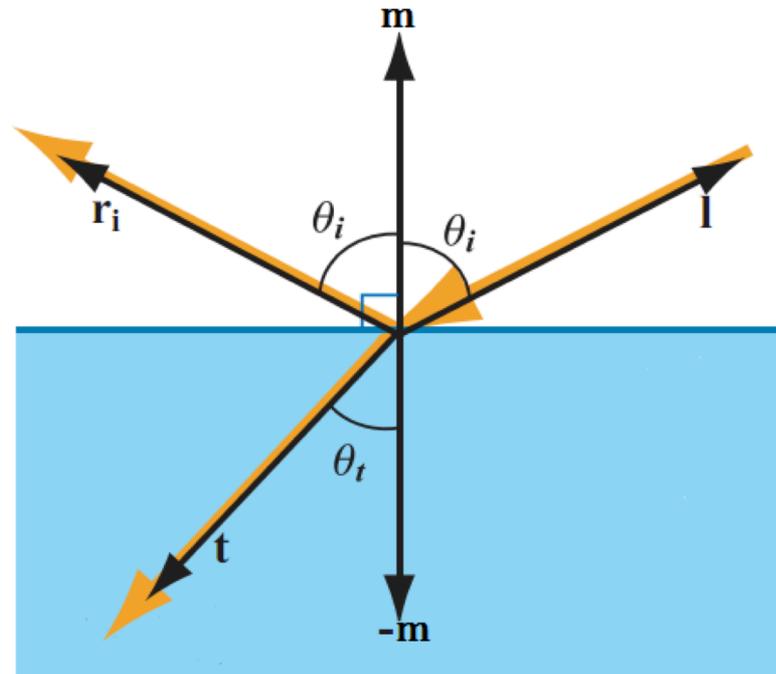
---

- BRDF derived for surface reflection from general (non-optically flat) surfaces
- Assumes surface is composed of many microfacets – individual optically flat surfaces too small to be seen

# Microfacets Are Optically Flat

---

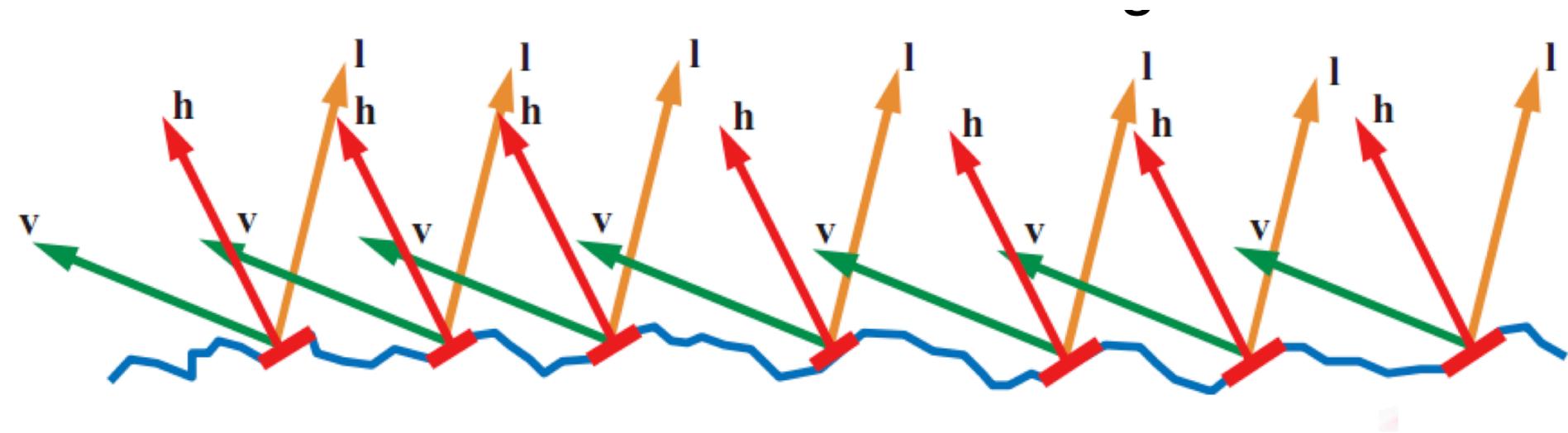
- Each one reflects an incoming ray of light in only one outgoing direction



# The Half Vector

---

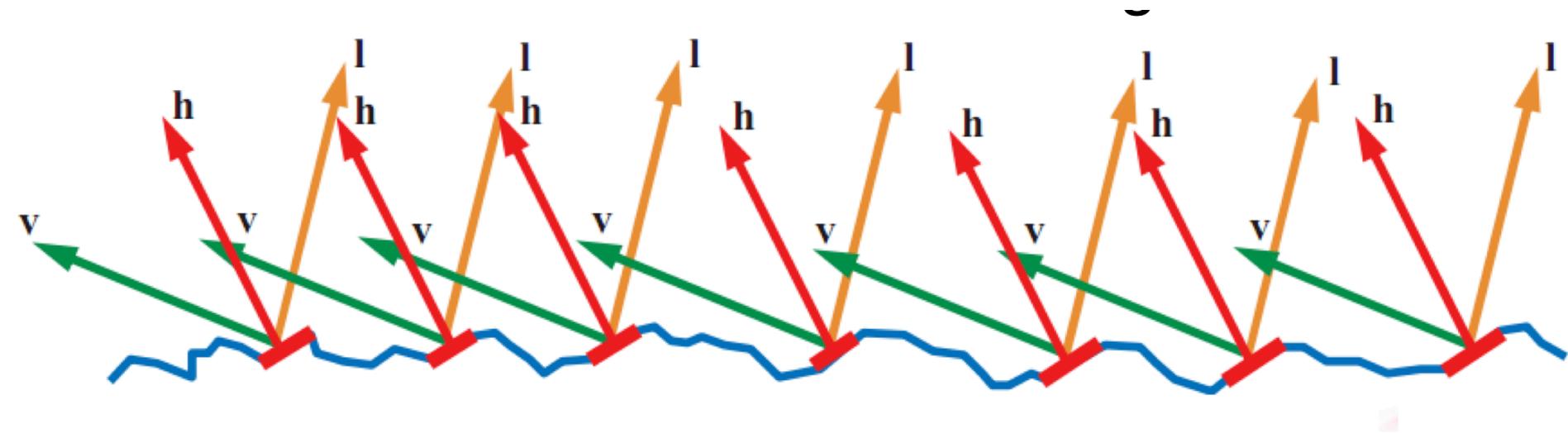
- Only those microfacets which happen to have their surface normal  $m$  oriented exactly halfway between  $l$  and  $v$  will reflect visible light



# The Half Vector

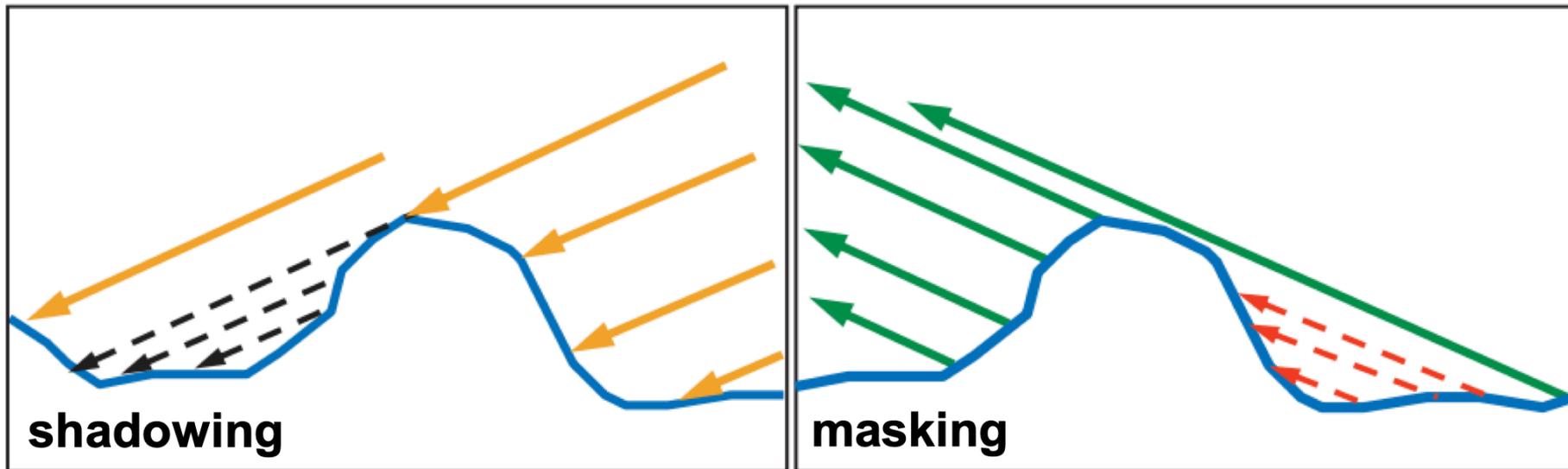
---

- This vector which is halfway between  $l$  and  $v$ , is called the half-vector (or half-angle vector)  $h$



# Shadowing and Masking

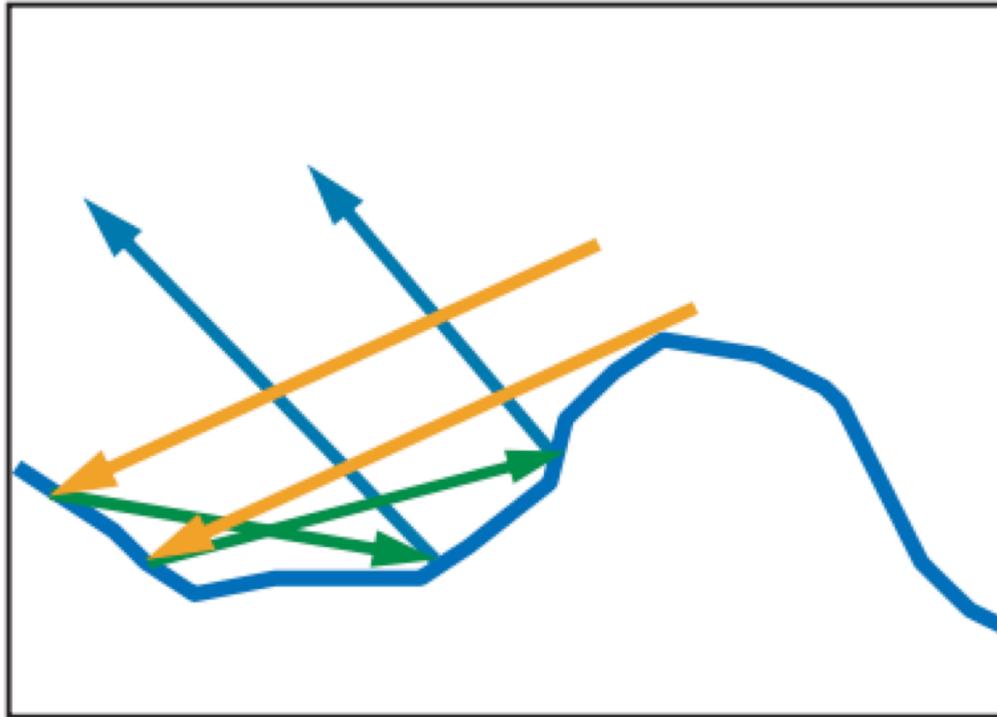
- Not all microfacets with  $m = h$  will contribute
  - Some will be blocked by other microfacets from either  $l$  (shadowing) or  $v$  (masking)



# Multiple Surface Bounces

---

- In reality, blocked light continues to bounce; some will eventually contribute to the BRDF
- Microfacet BRDFs ignore this – blocked light is lost



# Микрофасетная ДФО

---

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{l}, \mathbf{h})G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}$$

# Френелевское отражение

---

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{l}, \mathbf{h})G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}$$

Value range: 0 to 1, spectral (RGB)

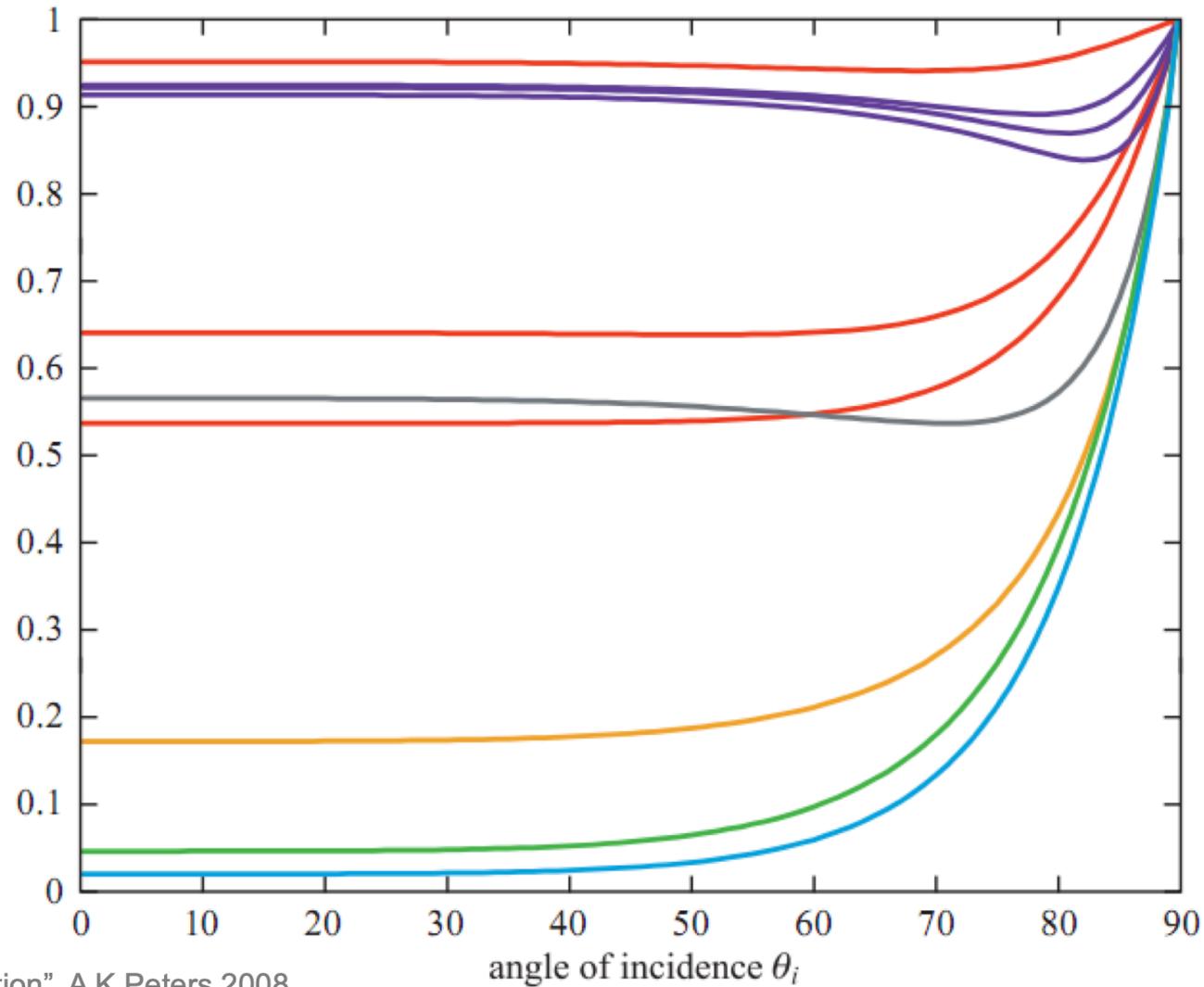
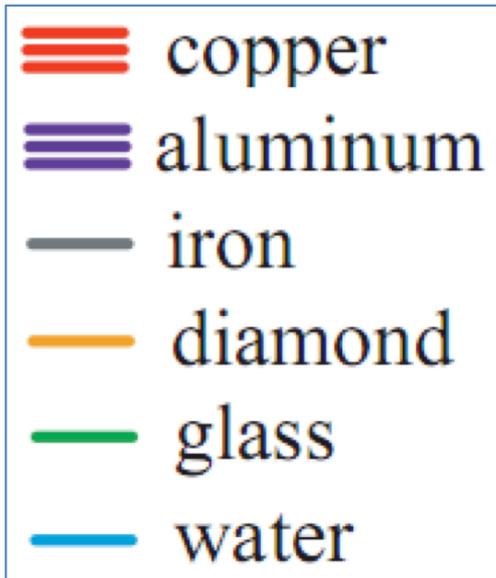
Fraction of light reflected (vs. refracted) from optically flat surface given light direction  $\mathbf{l}$  and surface normal  $\mathbf{h}$  ( $\mathbf{m} = \mathbf{h}$  for participating facets)

# Френелевское отражение

---

- Depends on refraction index (in other words, the substance of the object) and light angle
- As angle increases, at first the reflectance barely changes, then for very glancing angles goes to 1 at all wavelengths

# Fresnel Reflectance

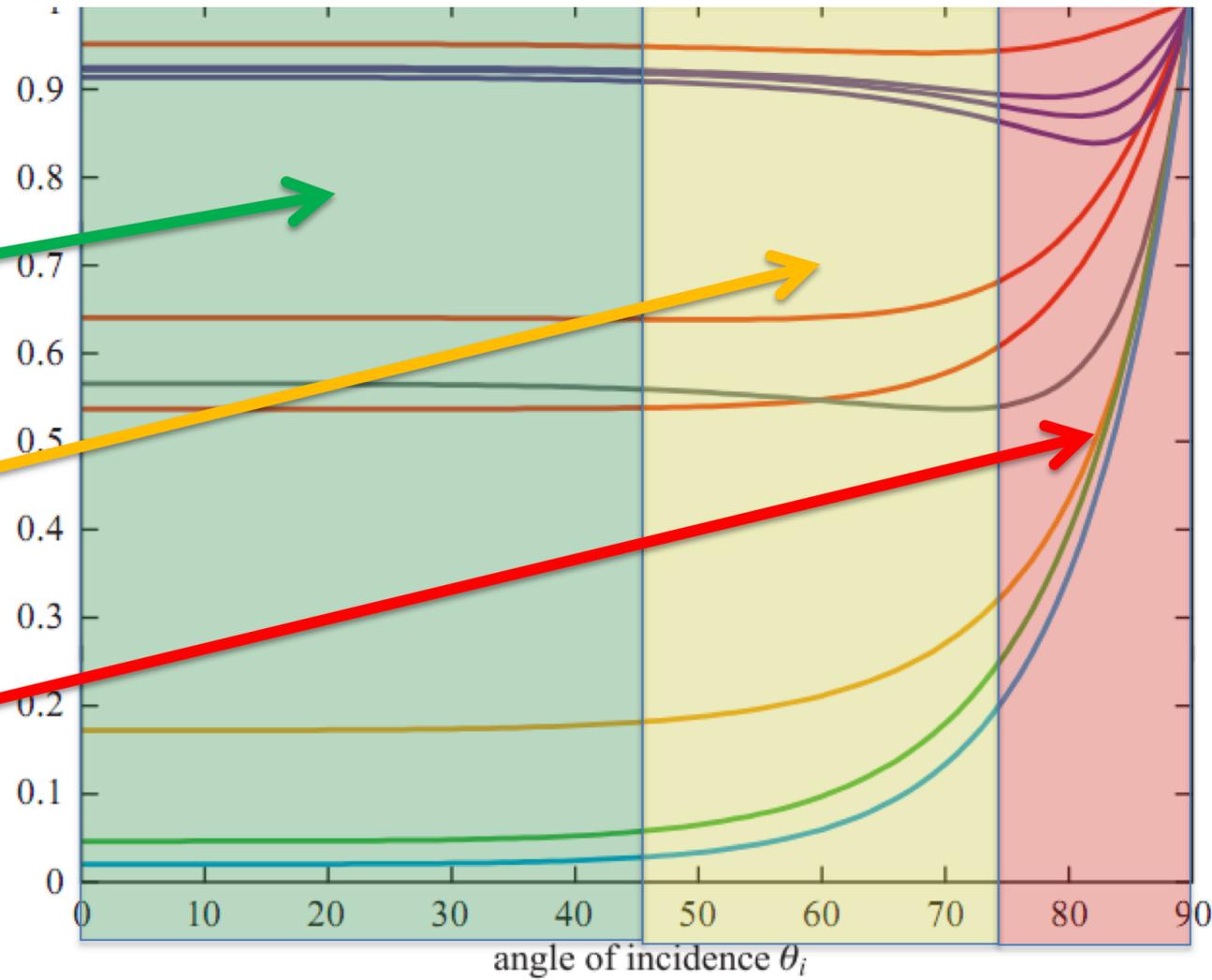


# Fresnel Reflectance

barely changes

changes somewhat

goes rapidly to 1





- No subsurface term; this is only source of color

Metal	$F(0^\circ)$ (Linear)	$F(0^\circ)$ (sRGB)	Color
Gold	1.00,0.71,0.29	1.00,0.86,0.57	
Silver	0.95,0.93,0.88	0.98,0.97,0.95	
Copper	0.95,0.64,0.54	0.98,0.82,0.76	
Iron	0.56,0.57,0.58	0.77,0.78,0.78	
Aluminum	0.91,0.92,0.92	0.96,0.96,0.97	

Table from "Real-Time Rendering, 3rd Edition", A K Peters 2008

# Normal-Incidence Fresnel for Non-Metals

- Subsurface term (diffuse) usually also present in addition to this Fresnel reflectance

Insulator	$F(0^\circ)$ (Linear)	$F(0^\circ)$ (sRGB)	Color
Water	0.02,0.02,0.02	0.15,0.15,0.15	
Plastic / Glass (Low)	0.03,0.03,0.03	0.21,0.21,0.21	
Plastic High	0.05,0.05,0.05	0.24,0.24,0.24	
Glass (High) / Ruby	0.08,0.08,0.08	0.31,0.31,0.31	
Diamond	0.17,0.17,0.17	0.45,0.45,0.45	

---

## The Schlick Approximation to Fresnel

- Pretty accurate, cheap, parameterized by  $c_{\text{spec}}$

$$F_{\text{Schlick}}(\mathbf{c}_{\text{spec}}, \mathbf{l}, \mathbf{n}) = \mathbf{c}_{\text{spec}} + (1 - \mathbf{c}_{\text{spec}})(1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}))^5$$

- For microfacet BRDFs ( $\mathbf{m} = \mathbf{h}$ ):

$$F_{\text{Schlick}}(\mathbf{c}_{\text{spec}}, \mathbf{l}, \mathbf{h}) = \mathbf{c}_{\text{spec}} + (1 - \mathbf{c}_{\text{spec}})(1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{h}))^5$$



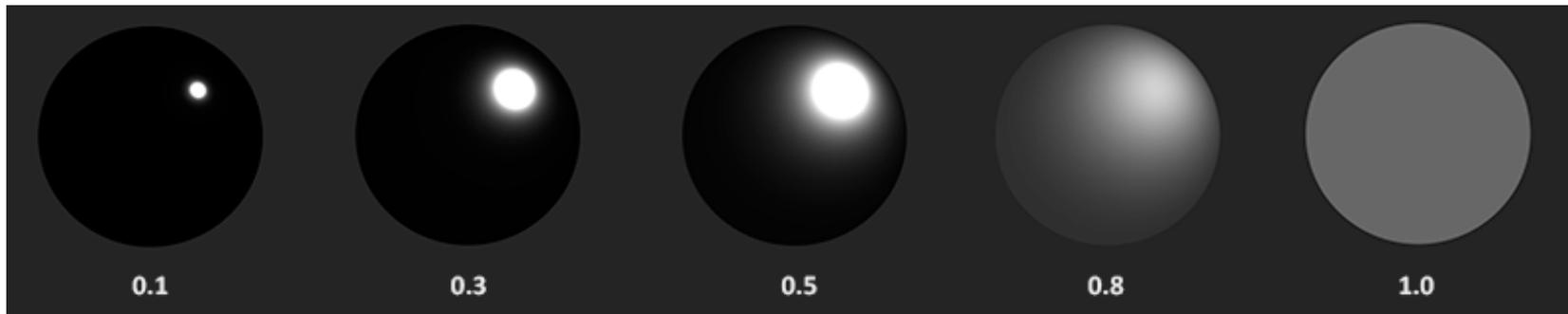
## Microfacet Normal Distribution

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{l}, \mathbf{h})G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}$$

- Value range: unbounded, scalar
  - $D(\mathbf{m})$ : concentration of microfacets with normal  $\mathbf{m}$
  - $D(\mathbf{h})$ : concentration of microfacets with normal  $\mathbf{h}$



- 
- Determines the size and shape of the highlight
  - Several (Gaussian-like) functions available
  - All have some kind of “roughness” or variance parameter (anisotropic ones have two)
  - As roughness decreases, concentration of microfacets around  $n$  increases; values of  $D()$  can get very high for smooth surfaces



---

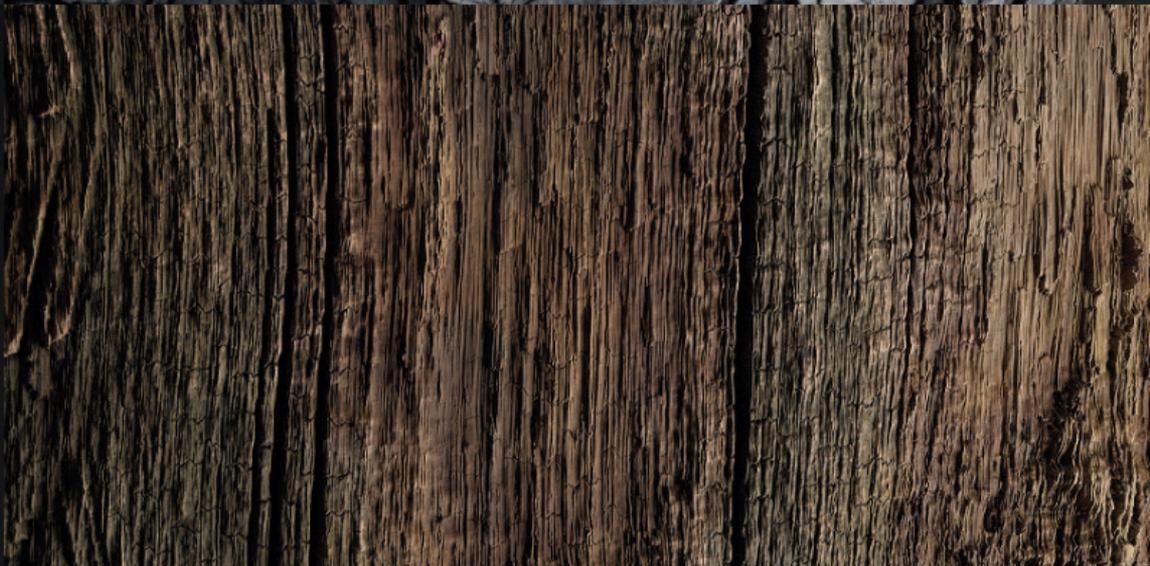
$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{l}, \mathbf{h})G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}$$

- Value range: 0 to 1, scalar
- – Chance that a microfacet of the given orientation is shadowed and/or masked
- – Various functions available in the literature; typically have no parameters or use the  $D()$  roughness

# Compact Parameterization

---

- Once distribution & geometry functions chosen, most microfacet BRDFs have just 2 parameters:
  - $F(0^\circ) = c_{\text{spec}}$ : (RGB)
  - Roughness: 1 scalar (2 for anisotropic)
- However, this only describes surface reflection...



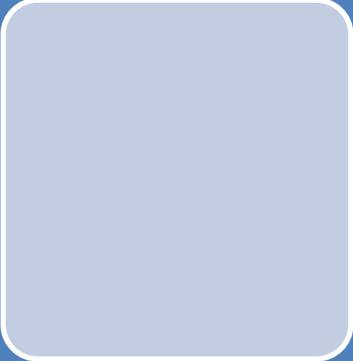
# Примеры

---

- <http://simonstechblog.blogspot.com/2011/12/microfacet-brdf.html>
- <https://learnopengl.com/PBR/Theory>

# Лекция посвящена моделированию освещения

---



Моделирование  
освещения. ДФО



Локальные и глобальные  
модели. Модель Фонга