

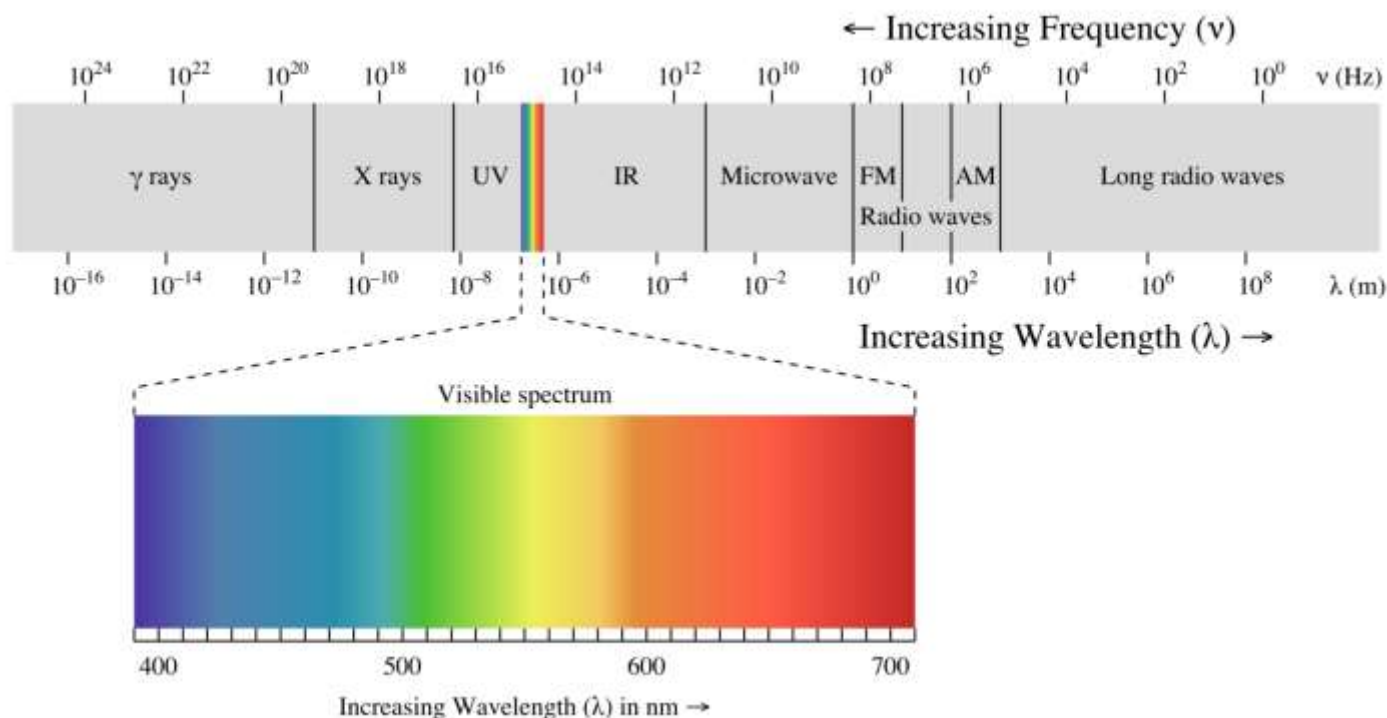
Компьютерная графика

Радиометрия

Алексей Романов

Радиометрия

Изучение и измерение электромагнитного излучения
(произвольного спектра)



Взаимодействие света и сцены – сложная задача

- ▶ Источники света произвольных параметров
- ▶ Изменения условий освещения во времени
- ▶ Тени
- ▶ Отражения
- ▶ Преломления
- ▶ Поверхности различных свойств
- ▶ Неравноплотность среды распространения



Упростим задачу

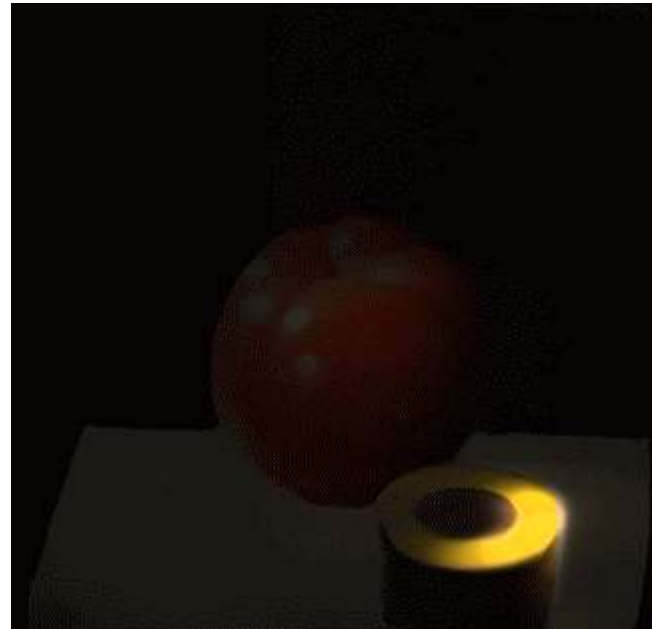
- ▶ Независимость от длины волны, отсутствие взаимодействия между излучениями разных длин волна (отсутствие флюоресценции)
- ▶ Постоянство во времени (отсутствие фосфоресценции)
- ▶ Свет распространяется в вакууме, взаимодействуя с объектами сцены



Radiant energy (энергия излучения)

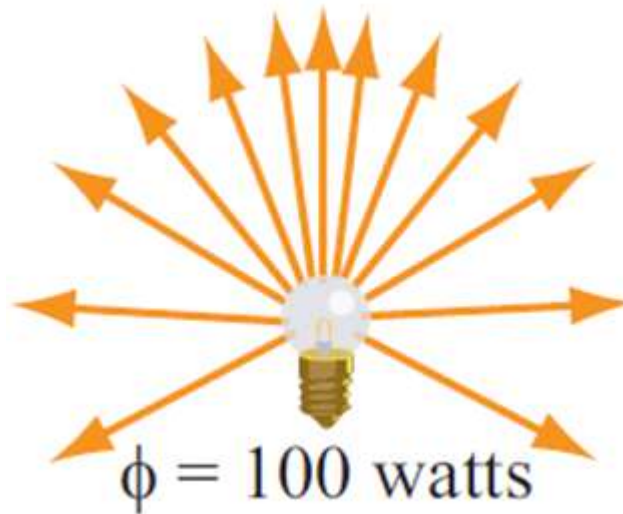
Q, J

Нас будет интересовать только
равновесное состояние



Radiant flux(power), мощность излучения

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}, W = J \cdot s^{-1}$$

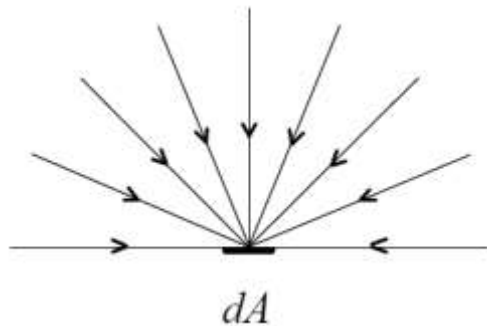


Irradiance, облученность

- ▶ Radiant flux density, поверхностная плотность мощности излучения

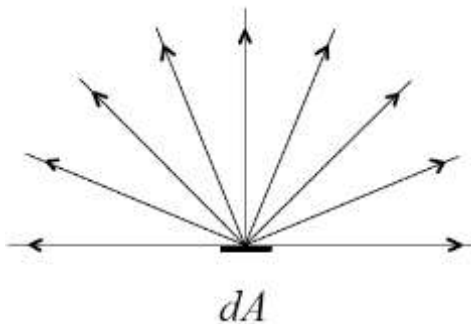
- ▶ $E = \frac{d\Phi}{dA}, W \cdot m^{-2}$

- ▶ Излучение попадает на поверхность



Irradiance

- ▶ Излучение покидает поверхность (отражение/собственное свечение)

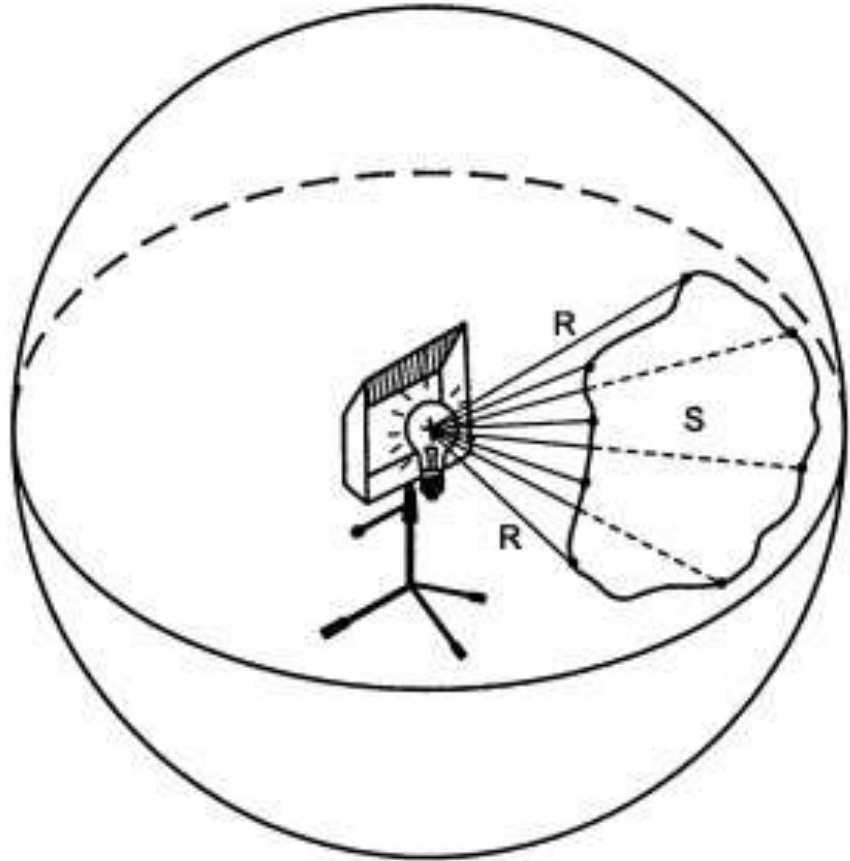


$$M = \frac{d\Phi}{dA}$$

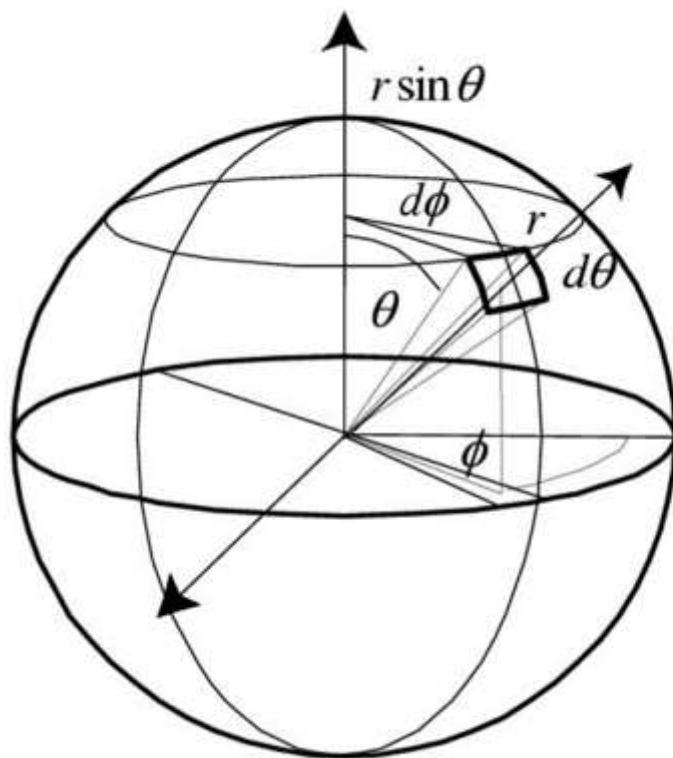
Radiant exitance

Телесный угол

► $\omega = \frac{S}{R^2}$



Интегрирование по поверхности сферы



$$\begin{aligned}dA &= (r d\theta)(r \sin \theta d\phi) \\ &= r^2 \sin \theta d\theta d\phi\end{aligned}$$

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi$$

$$S = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta d\phi = 4\pi$$

Radiant intensity, сила излучения

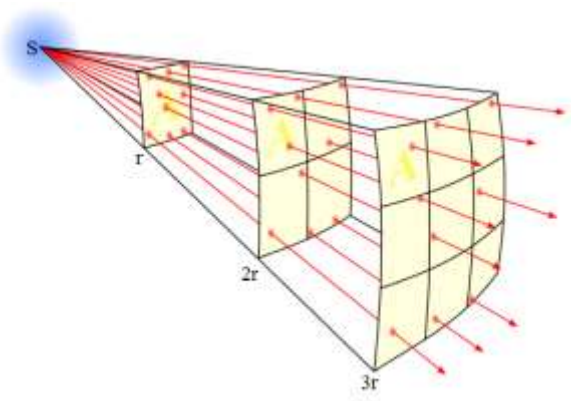
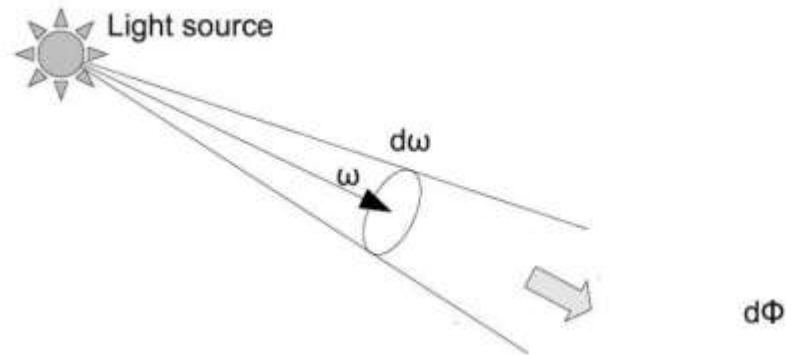
- ▶ Мощность излучения, излучаемого в определённом направлении

- ▶ $I = \frac{d\Phi}{d\omega}, W \cdot sr^{-1}$

- ▶ $d\omega = \frac{dA}{r^2}$

- ▶ $E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d\Phi}{r^2 d\omega} = \frac{I}{r^2}$

- ▶ В общем случае: $E = \frac{I \cos\theta}{d^2}$

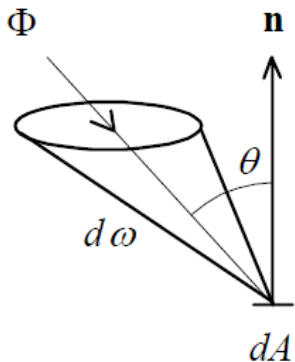
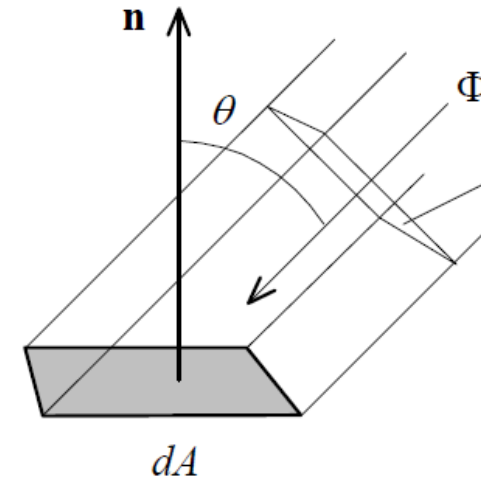


Radiance, энергетическая яркость

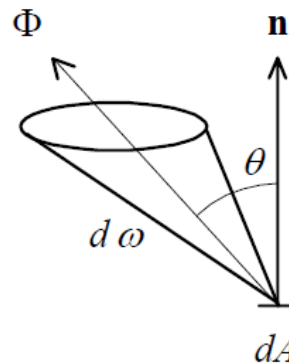
- ▶ Irradiance одного луча света

- ▶
$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\omega \cos\theta}, W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$$

$$L = \frac{dI}{dA \cos\theta}$$



Radiance, приходящая



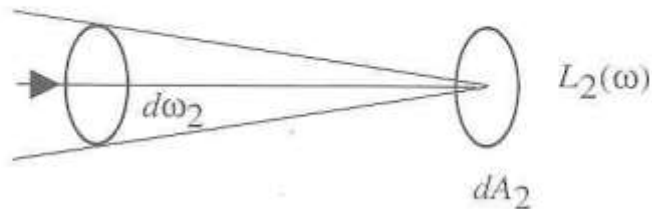
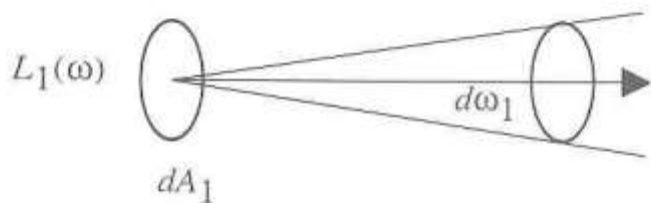
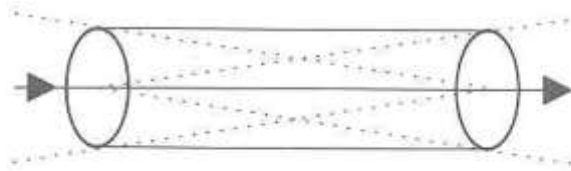
Radiance, исходящая

$$d\Phi_1 = L_1 d\omega_1 dA_1 = L_2 d\omega_2 dA_2 = d\Phi_2$$

$$d\omega_1 = dA_2 / r^2 \quad d\omega_2 = dA_1 / r^2$$

$$d\omega_1 dA_1 = \frac{dA_1 dA_2}{r^2} = d\omega_2 dA_2$$

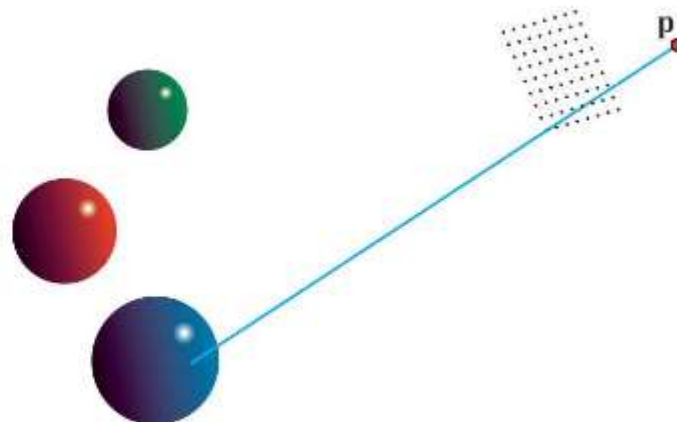
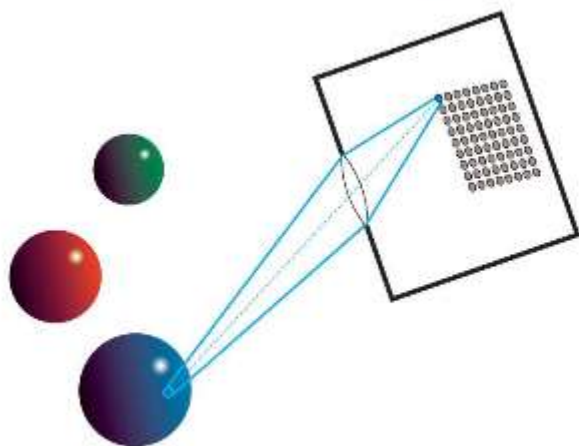
$$\therefore L_1 = L_2$$

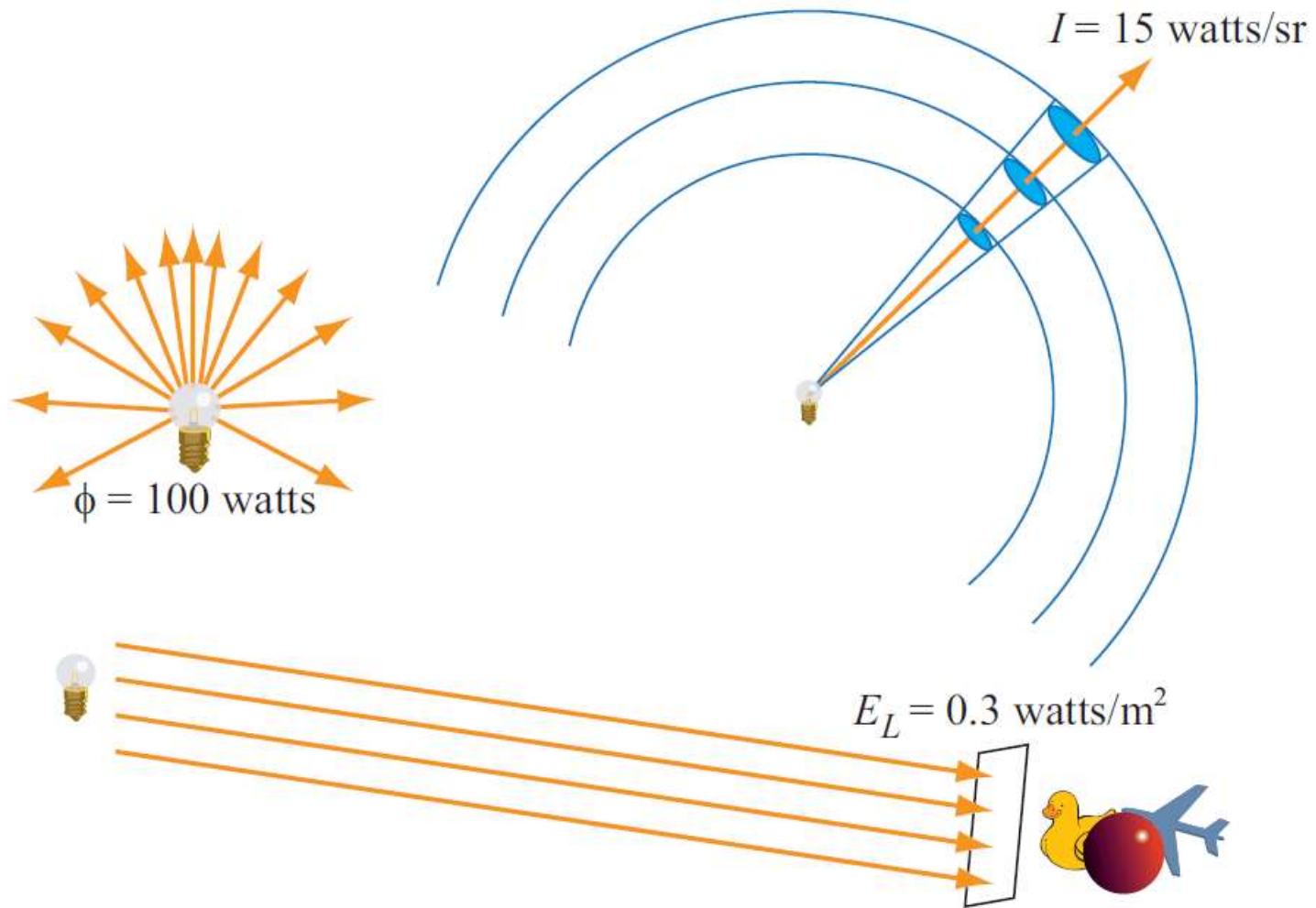


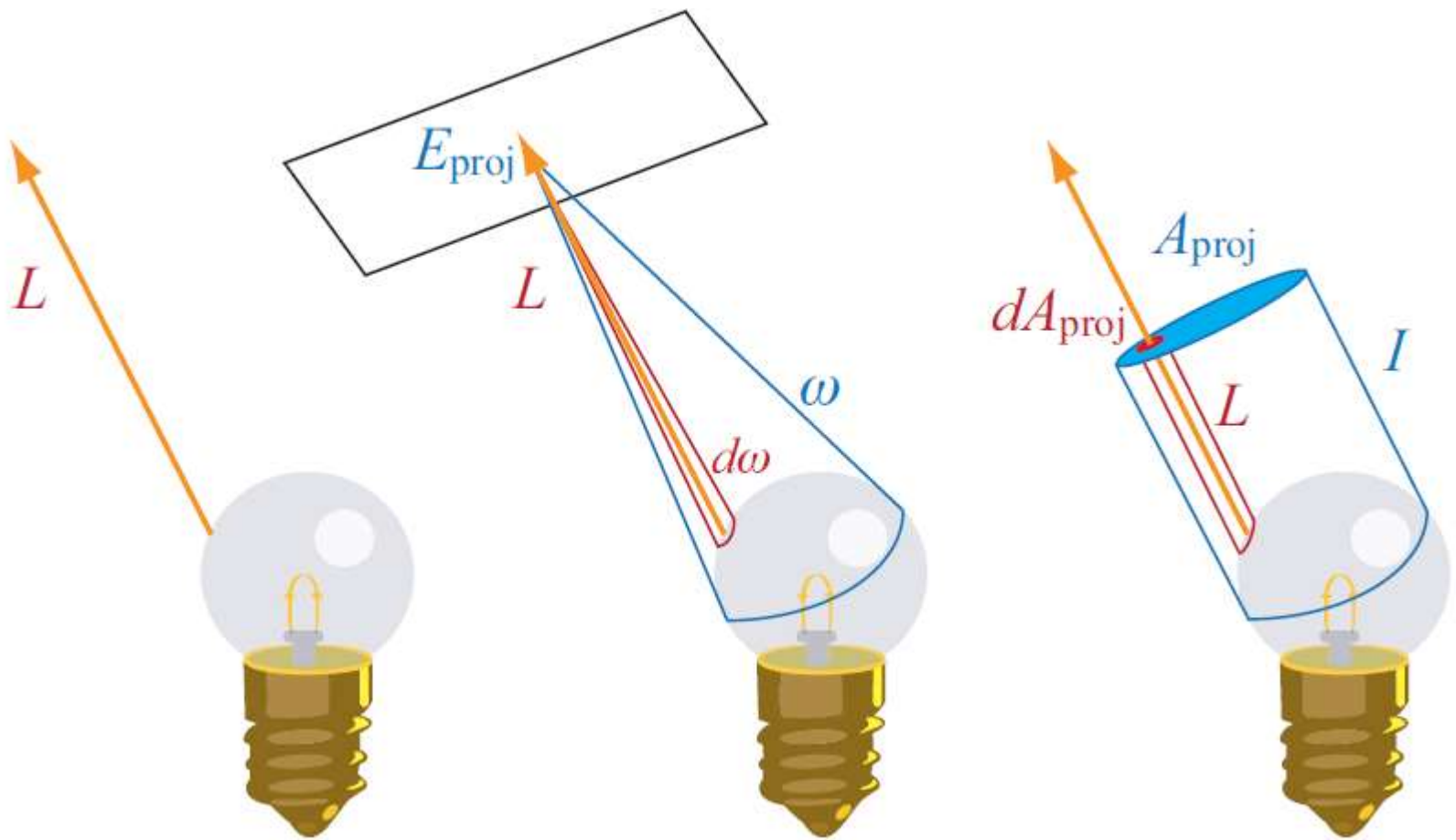
Radiance

Ключевая величина для компьютерной графики

- ▶ То, что детектируется сенсором
- ▶ Не зависит от расстояния
- ▶ Результат синтеза системами построения изображений - цвет пикселя
- ▶ Инвариант для прямых







Фотометрия

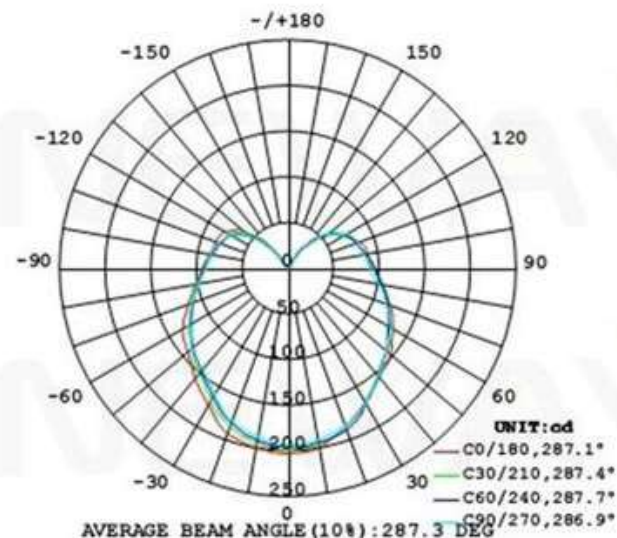
- ▶ Изучение электромагнитного излучения, воспринимаемого человеческим зрением
- ▶ Ватт в радиометрии и люмен в фотометрии
- ▶ $1\text{ W} = 683\text{ lm}$ для монохромного излучения $\lambda = 555\text{ nm}$
- ▶ Для упомянутых радиометрических величин есть фотометрические аналоги

| | Радиометрические величины | | Фотометрические величины |
|---|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| Величина | Обозначение | Единицы | Единицы |
| Длина волны | λ | nm | nm |
| Radian & luminous energy / Энергия излучения, световая энергия | Q | $J = W \cdot s$ | талбот, $T = lm \cdot s$ |
| Radian & luminous flux (power) / мощность излучения, световой поток | $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ | Ватт, W | люмен, lm |
| Irradiance & illuminance / облученность, освещенность | $E = \frac{d\Phi}{dA}$ | $W \cdot m^{-2}$ | люкс, $lx, = lm \cdot m^{-2}$ |
| Radiance & luminance / энергетическая яркость, яркость | $L = \frac{d^2\Phi}{dAd\omega \cos \theta}$ | $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ | нит, $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| Radiant & luminous intensity / сила излучения, сила света | $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$ | $W \cdot sr^{-1}$ | кандела, $cd = lm \cdot sr^{-1}$ |

- ▶ Люмены – мощность излучения источников света, например лампочек
- ▶ Люкс – освещенность поверхности (используется, как характеристика освещения от небосвода)
- ▶ Кандела – распределение по углу
- ▶ Нит – характеристика “яркости” дисплеев

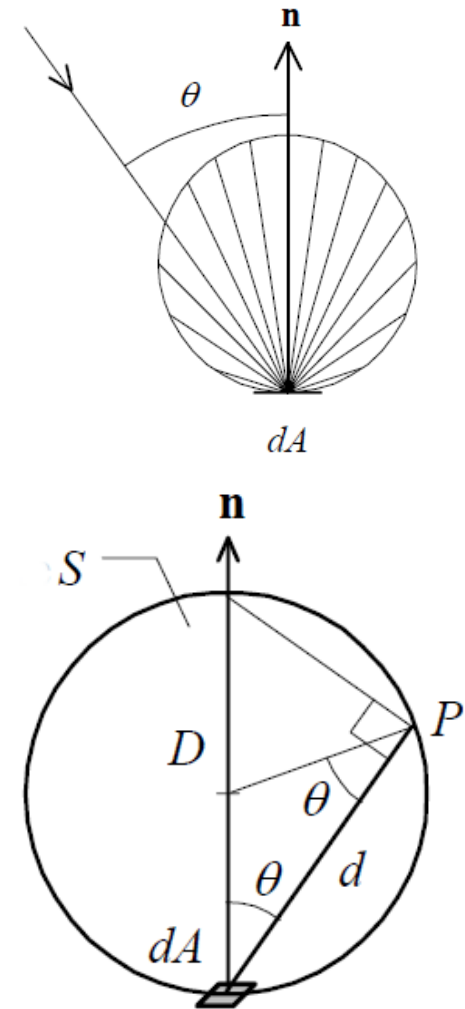
Display Brightness: Maximum and Minimum
Nits [higher is better]

tom's **HARDWARE**



Ламбертова поверхность

- ▶ Поверхность, обладающая постоянной энергетической яркостью - яркостью, независимой от угла обзора
- ▶ Идеально рассеивающая поверхность
- ▶ $I_\theta = I_n \cos \theta$ - закон Ламберта
- ▶ $L = \frac{dI}{dA \cos \theta} = \frac{dI_n}{dA}$
- ▶ Связь между облученностью и энергетической яркостью:
 $M = \pi L$
- ▶ $E = \frac{I_\theta \cos \theta}{(D \cos \theta)^2} = \frac{I_\theta}{D^2 \cos \theta} = \frac{I_n}{D^2}$ - облученность постоянна
- ▶ $\Phi = EA = \frac{I_n}{D^2} \pi D^2 = \pi I_n$
- ▶ $M = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{\pi dI_n}{dA} = \pi L$



Ламбертова поверхность

$$L(\theta, \phi, \vec{x}) = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos \theta},$$

$$M(\vec{x}) = \frac{d\Phi}{dA},$$

$$I(\theta, \phi) = \frac{d\phi}{d\Omega},$$

$$L(\theta, \phi, \vec{x}) = \frac{dM(\vec{x})}{d\Omega \cos \theta}$$

$$M(\vec{x}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta, \phi, \vec{x}) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

$$I(\theta, \phi) = I(0, 0) \cos(\theta)$$

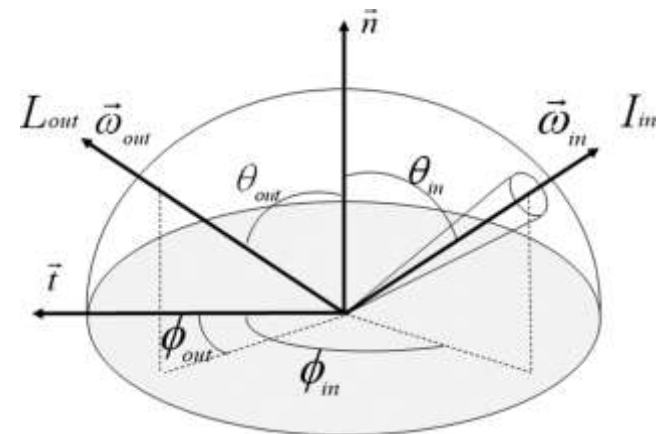
$$L(\theta, \phi, \vec{x}) = \frac{dI(\theta, \phi)}{dA \cos \theta},$$

$$L(\theta, \phi, \vec{x}) = \frac{dI(0, 0) \cos \theta}{dA \cos \theta} = \frac{dI(0, 0)}{dA},$$

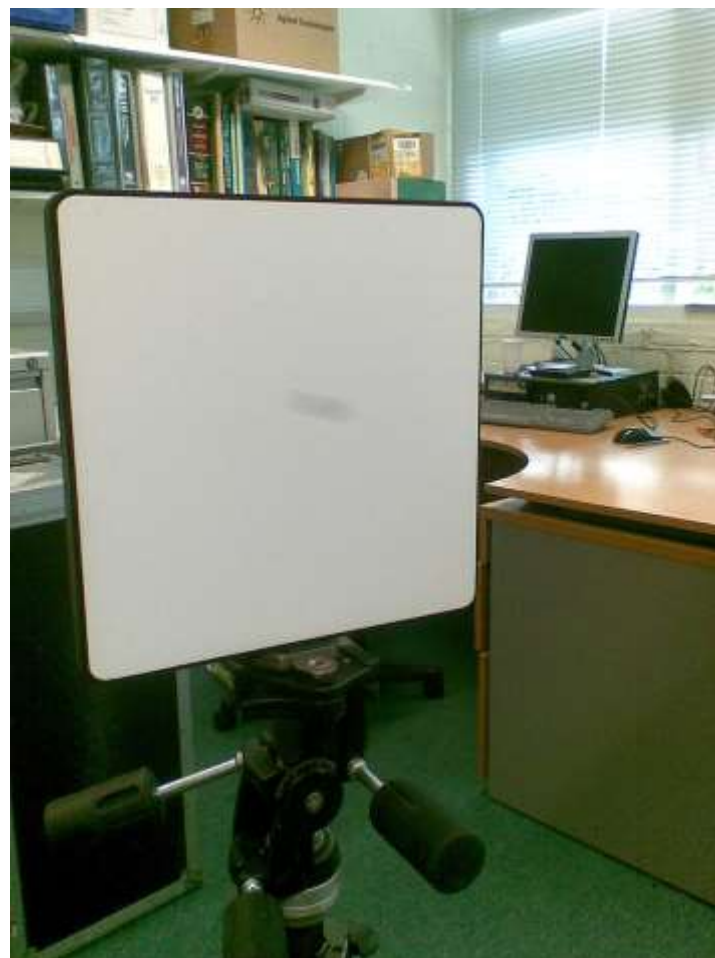
$$L(\theta, \phi, \vec{x}) = L(0, 0, \vec{x}) = L(\vec{x}).$$

$$M(\vec{x}) = 2\pi L(\vec{x}) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta$$

$$L(\vec{x}) = \frac{M(\vec{x})}{\pi}$$



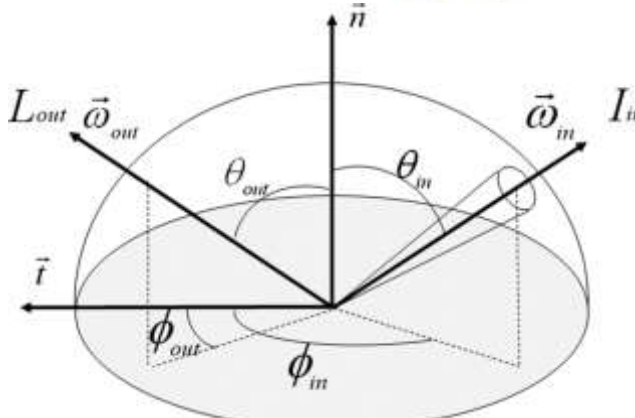
Ламбертова поверхность



Spectralon

Bidirectional Reflectance Distribution Function

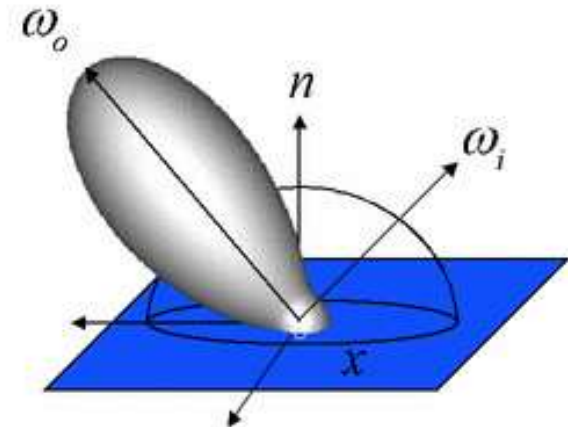
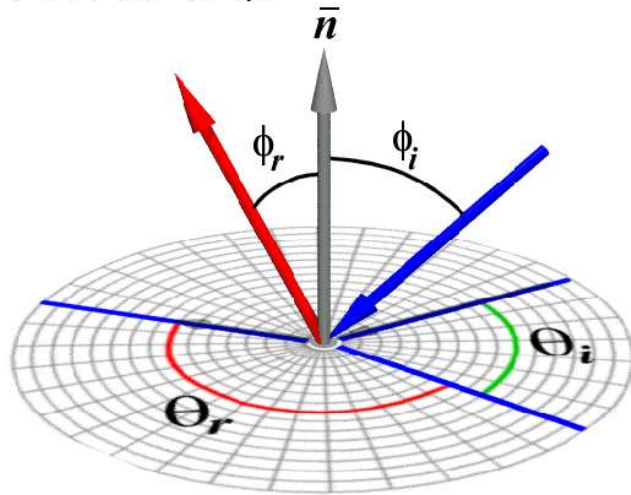
- Хотим определить внешний вид поверхности, рассчитав отраженный от поверхности свет

$$L_{\text{outgoing}}(\omega) = L_{\text{emitted}}(\omega) + \int_{\Omega} L_{\text{incoming}}(\omega') f_{\text{BRDF}}(\omega, \omega') (n \cdot \omega') d\omega'$$

$$dL = L_{\text{incoming}} f_{\text{BRDF}} (n \cdot \omega') d\omega'$$
$$dL = f_{\text{BRDF}} dE$$

$$f_{\text{BRDF}} = \frac{dL}{dE}$$

BRDF

$$\rho(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$$



The Rendering Equation

- ▶ $L(x, \omega_0) = L_e(x, \omega_0) + \int_s f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_0) L(x', \omega_i) G(x, x') V(x, x') d\omega_i$
- ▶ $L(x, \omega_0)$ - интенсивность, отраженная от точки x вдоль направления ω_0
- ▶ $L_e(x, \omega_0)$ - собственное испускание света
- ▶ $f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_0)$ - *BRDF, bidirectional reflectance distribution function*
- ▶ $L(x', \omega_i)$ - интенсивность из x' по направлению ω_i
- ▶ $G(x, x')$ - геометрические характеристики между точками
- ▶ $V(x, x')$ - функция видимости x и x'

Energy conservation

- ▶ Ламбертова поверхность

$$L_o = C_d L_i (\vec{N} \cdot \vec{L})$$

- ▶ Суммарный отраженный свет не должен превосходить величину облучения

$$\int_{\Omega} \rho(\vec{x}, \phi, \theta) L_i \cos \theta \delta \omega \leq L_i$$

$$\int_{\Omega} C_d L_i \cos \theta \delta \omega \leq L_i$$

$$C_d \int_{\Omega} \cos \theta \delta \omega \leq 1$$

$$C_d \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta \delta \theta \delta \phi \leq 1$$

$$\pi C_d \leq 1$$

BRDF

- ▶ $f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{dL_o(\mathbf{v})}{dE(\mathbf{l})}$
- ▶ Для точечных источников света: $f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{L_o(\mathbf{v})}{E_L \cos \theta_i}$
- ▶ $L_o(\mathbf{v}) = \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{c_{diff}}{\pi} + \frac{m+8}{\pi} \cos^m \theta_{h_k} c_{spec} \right) E_{L_k} \cos \theta_{i_k} \right)$

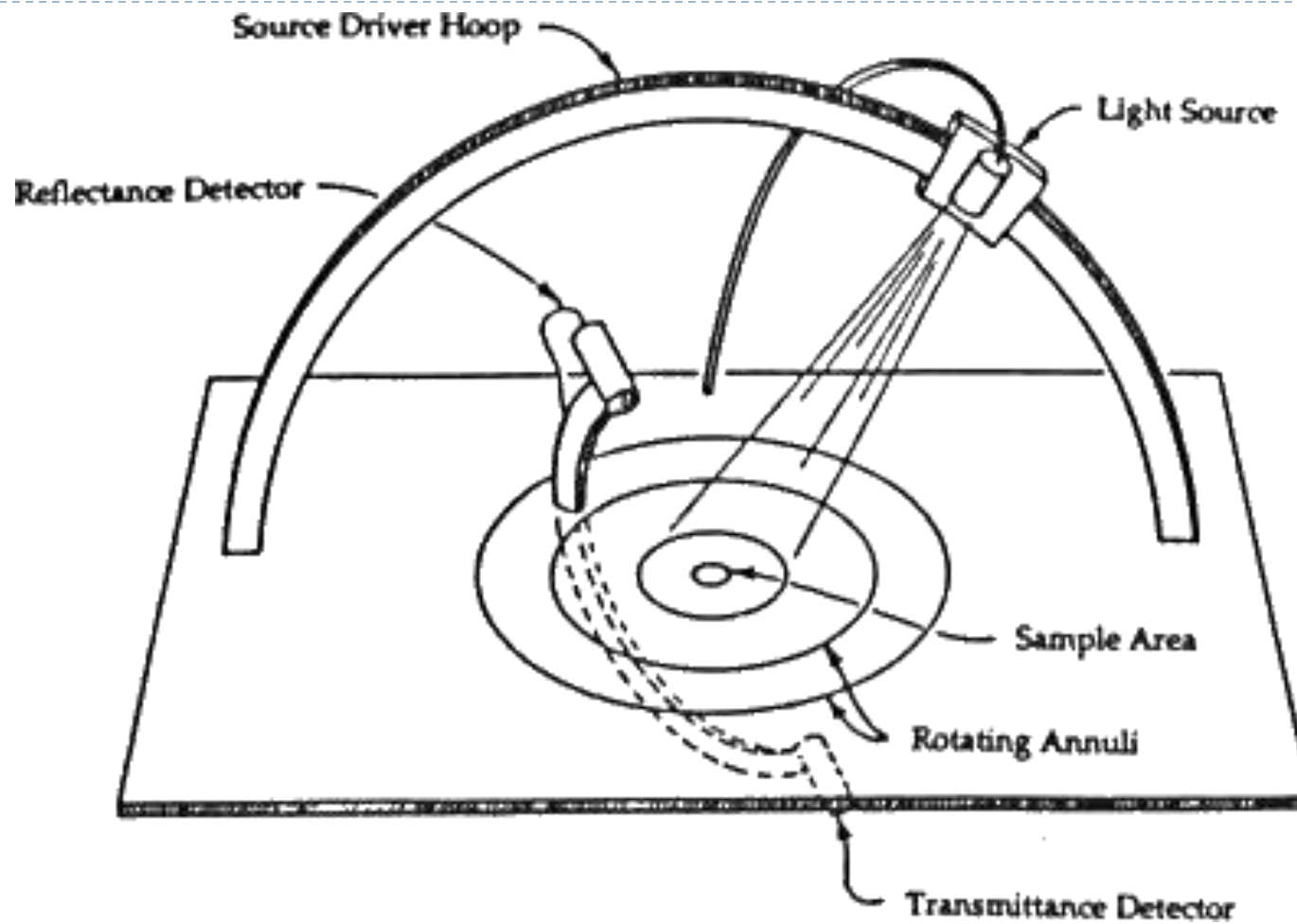


Обычный Фонг

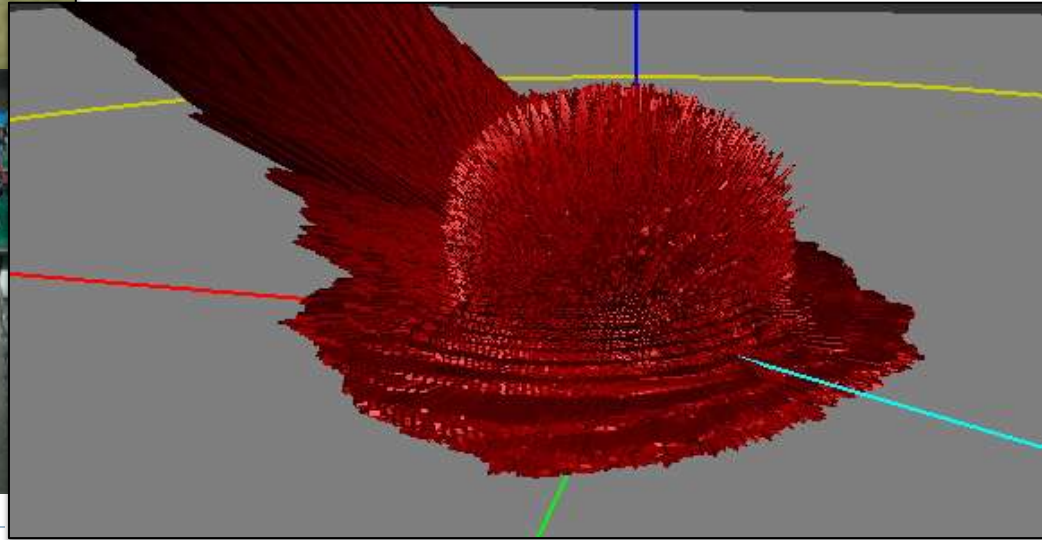
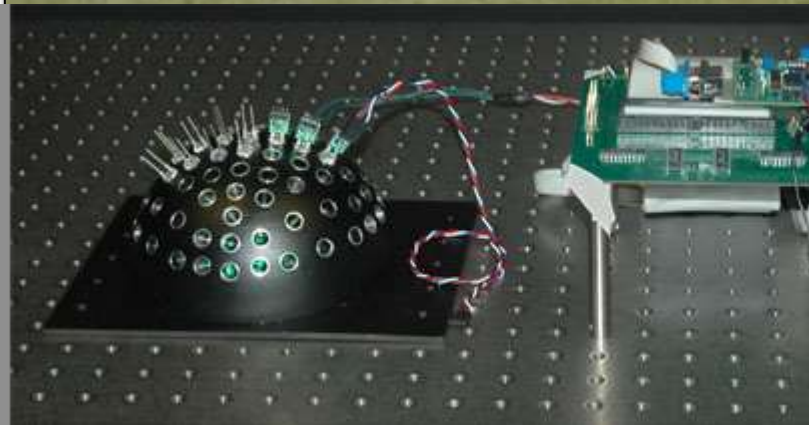


Фонг с
сохранением
энергии

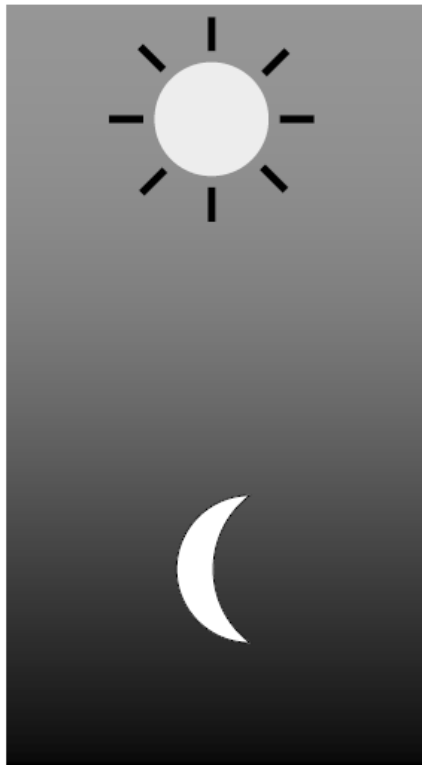
Измерение BRDF



Измерение BRDF



The range of lighting

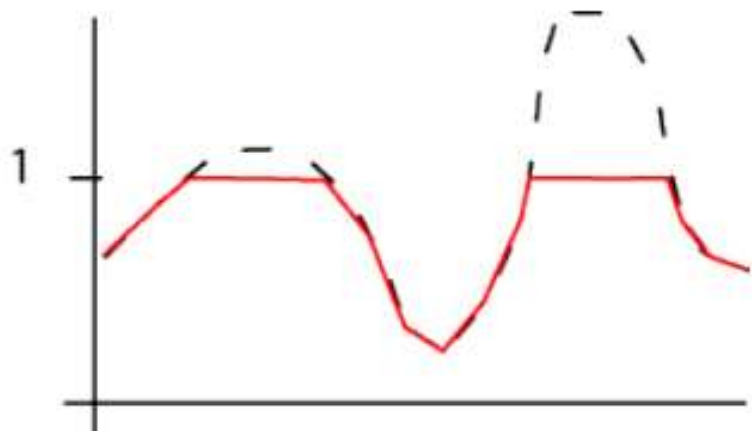


| | |
|-----------------------|-------------|
| Direct sun | 100'000 Lux |
| Sunny day | 50'000 Lux |
| Cloudy day | 5'000 Lux |
| Office | 400 Lux |
| Home lighting | 10 Lux |
| Street lamps | 1 Lux |
| Full moon | 0.1 Lux |
| Quarter moon | 0.01 Lux |
| Clear moonless night | 0.001 Lux |
| Cloudy moonless night | 0.0001 Lux |

Electronic imagers
Total lighting range

HDR/tone mapping

- ▶ Отрисовка выполняется в энергетических величинах
- ▶ Результат может выходить за рамки диапазона $[0;1]$
- ▶ Изображение получается пересвеченным



Пересвеченное изображение



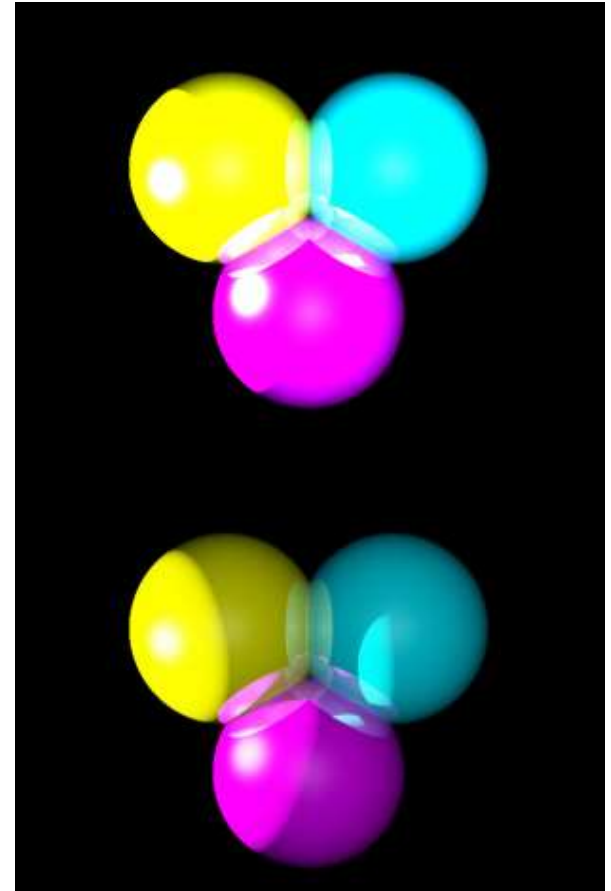
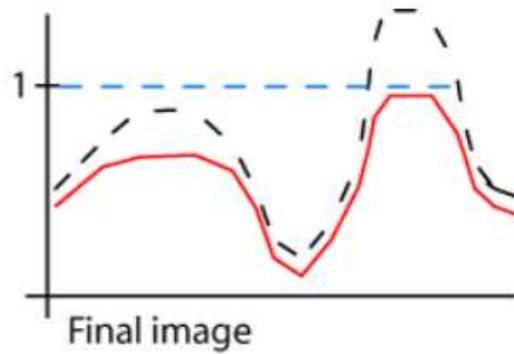
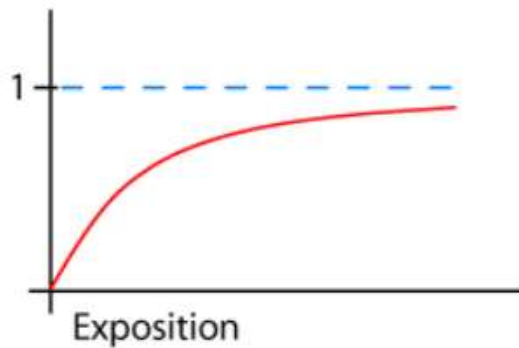
Цвета преобразованы в диапазон $[0;1]$

HDR

- ▶ Отрисовка в экран ограничена форматами *RGBA8*
- ▶ Вся отрисовка идет во внеэкранную текстуру
 - ▶ *RGBA16F* – half
 - ▶ *RGBA32F* – float

Exponential mapping

► $clr_{out} = 1 - e^{clr_{in} * exposure}$



Влияние “выдержки” на результат



Reinhard

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp \left(\sum_{x,y} \log (\delta + L_w(x, y)) \right)$$

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x, y)$$

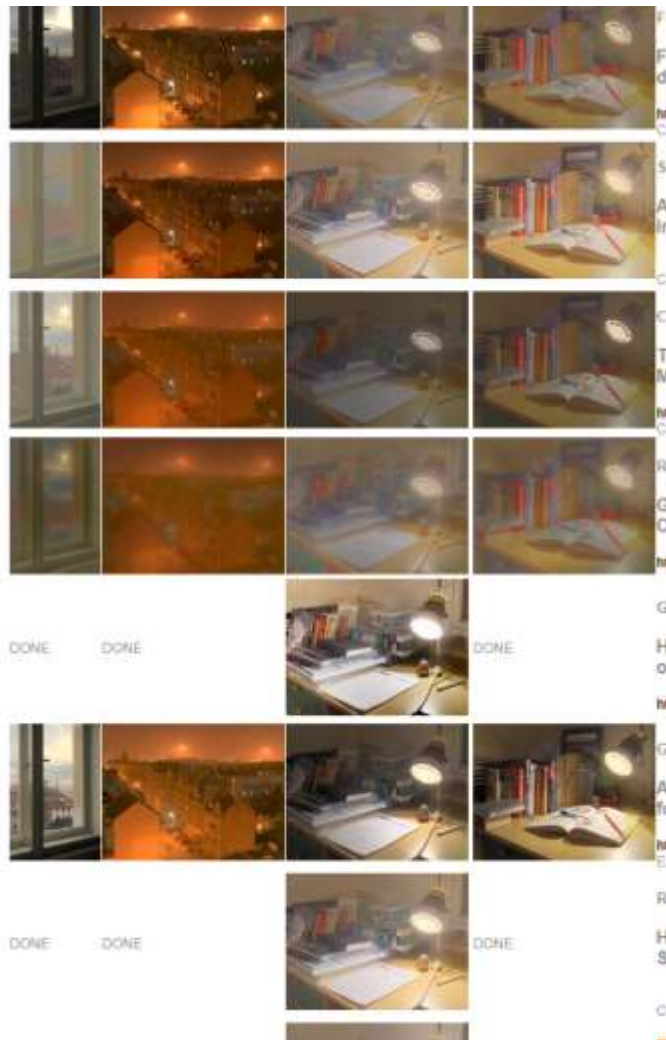
$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)}$$

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{\text{white}}^2} \right)}{1 + L(x, y)}$$



Radiance map courtesy of Cornell Program of Computer Graphics

Tone mapping...



Bloom effect

Ореол/эффект свечения областей повышенной яркости



Выделение областей пересвета

- ▶ Маркировка/выделение областей повышенной яркости
- ▶ Фильтрация этих областей
 - ▶ Box
 - ▶ Gauss
 - ▶ Kawase



(a)



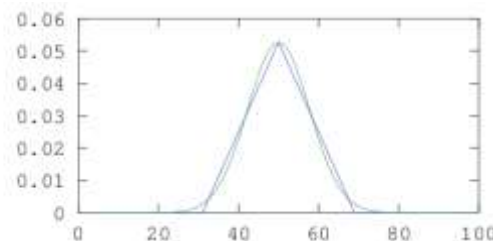
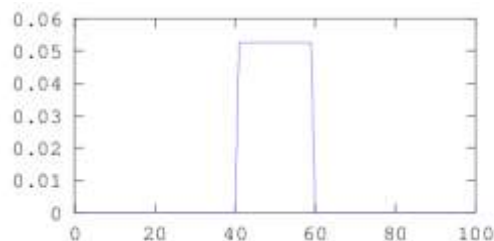
(b)



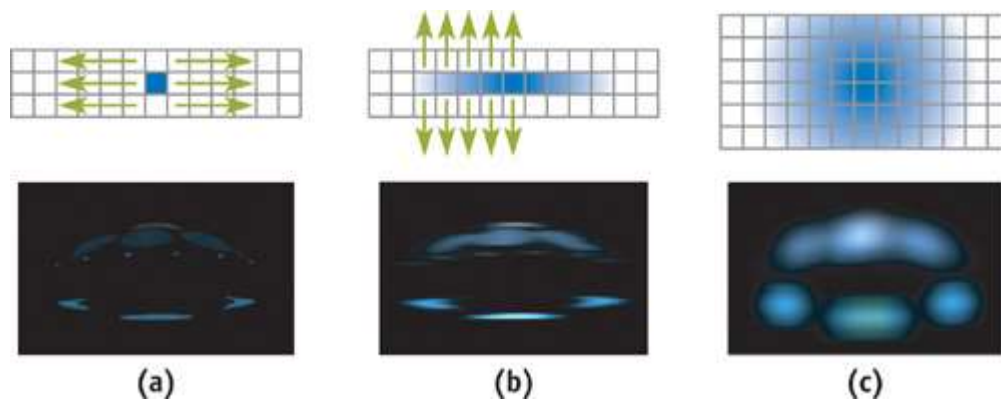
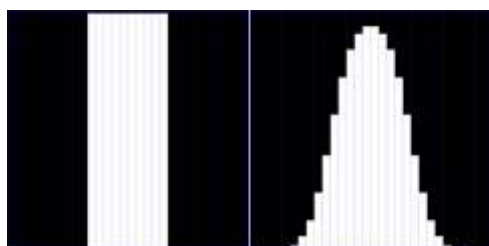
(c)

Фильтрация областей

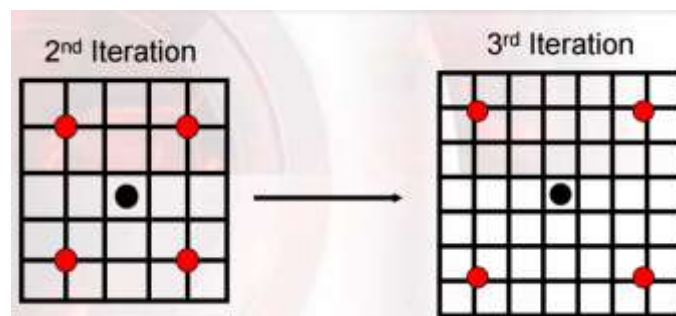
► Box



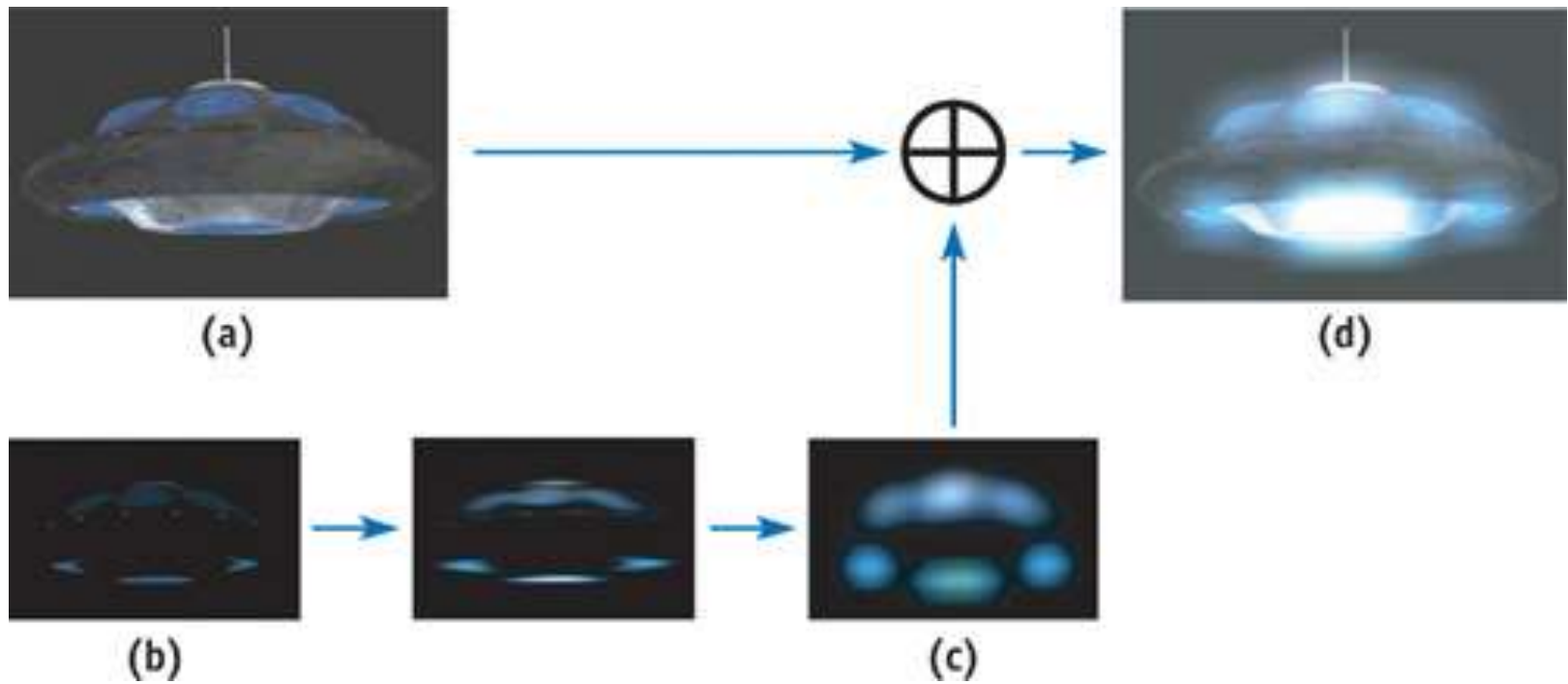
► Gauss



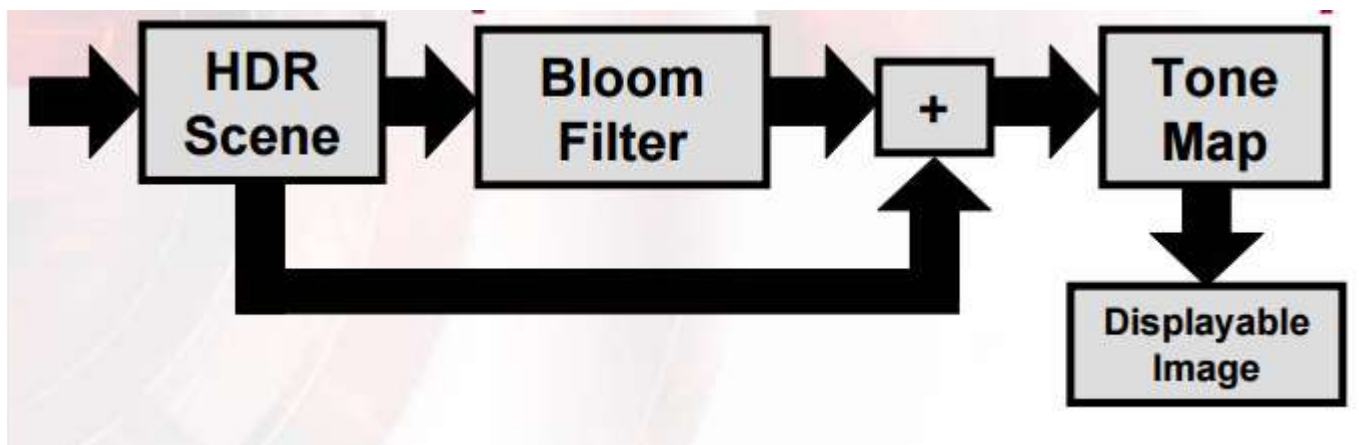
► Kawase



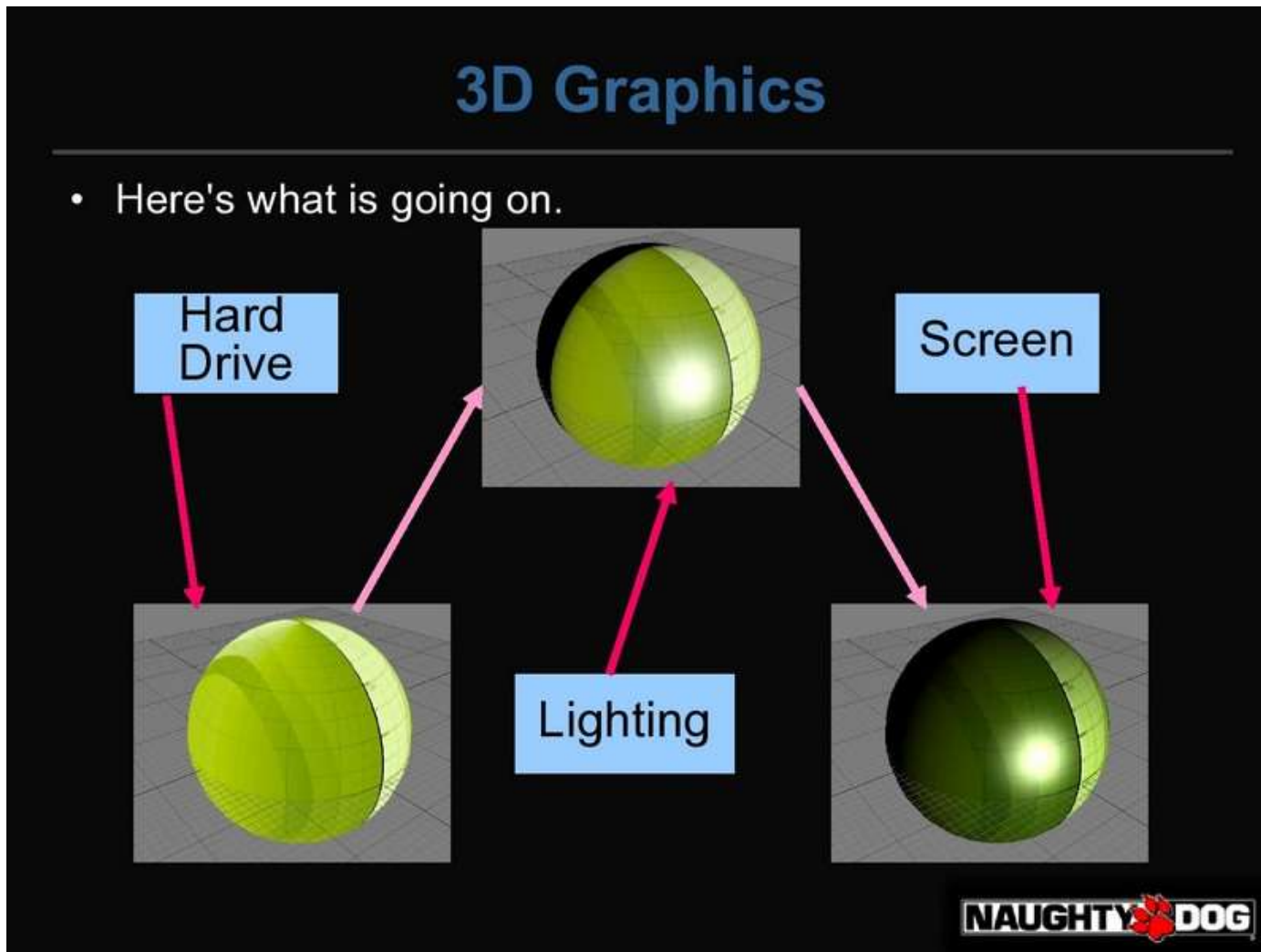
Bloom



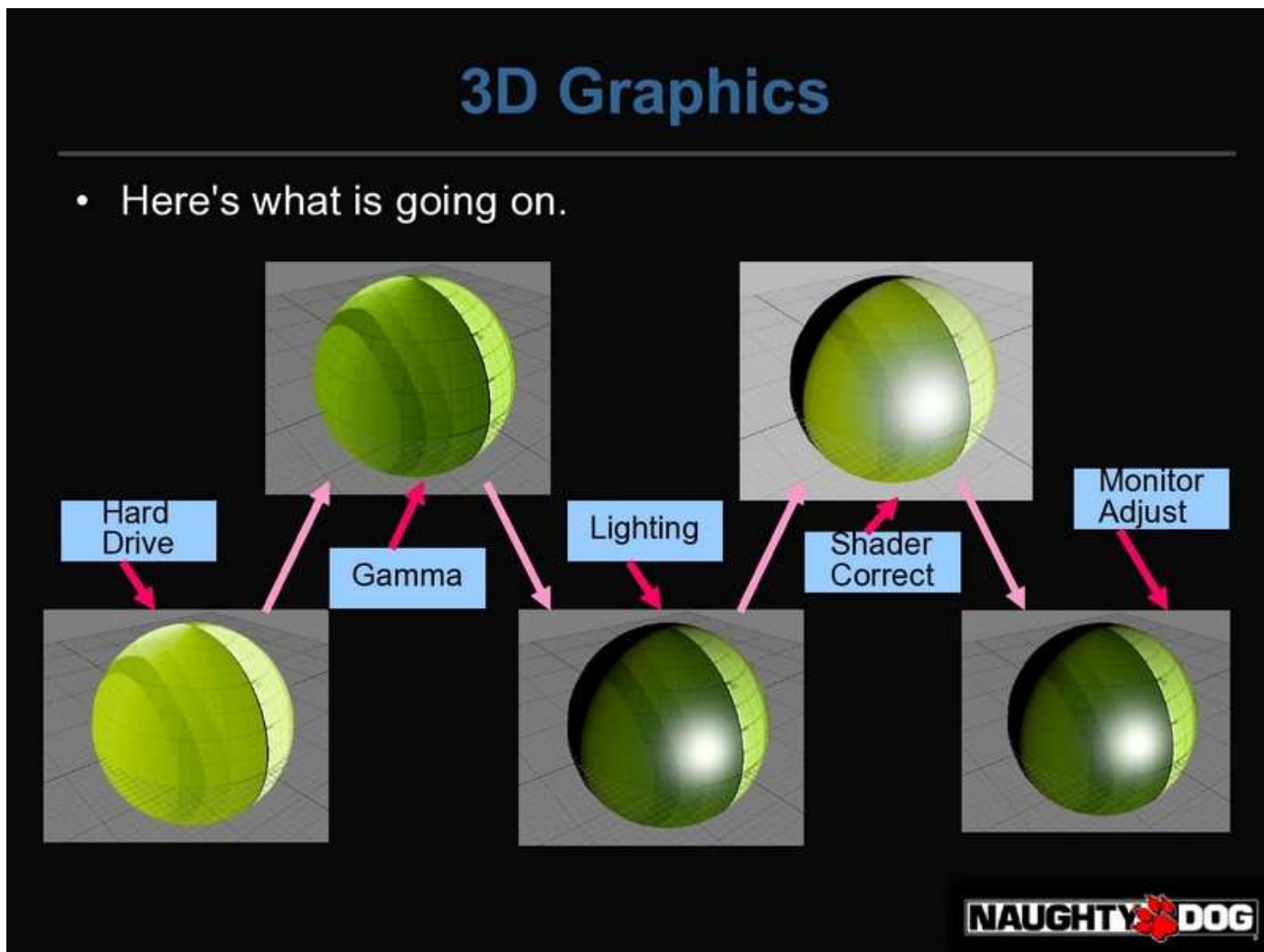
Pipeline применения bloom фильтра



Не забываем про гамму коррекцию



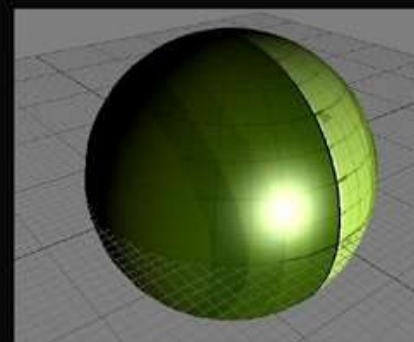
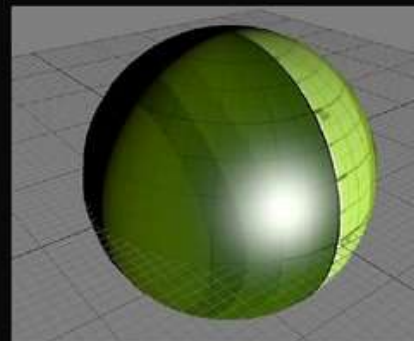
Еще раз о гамма коррекции



Еще раз о гамма коррекции

3D Graphics

- What does the real world look like?
 - Notice the harsh line.



NAUGHTY DOG

Вопросы
