



Спецкурс ОСФИ

Лекция 1

16 февраля 2011

# Свет как энергия. Радиометрия. Фотометрия

---

Алексей Игнатенко, к.ф.-м.н.

Лаборатория компьютерной графики и  
мультимедиа ВМК МГУ

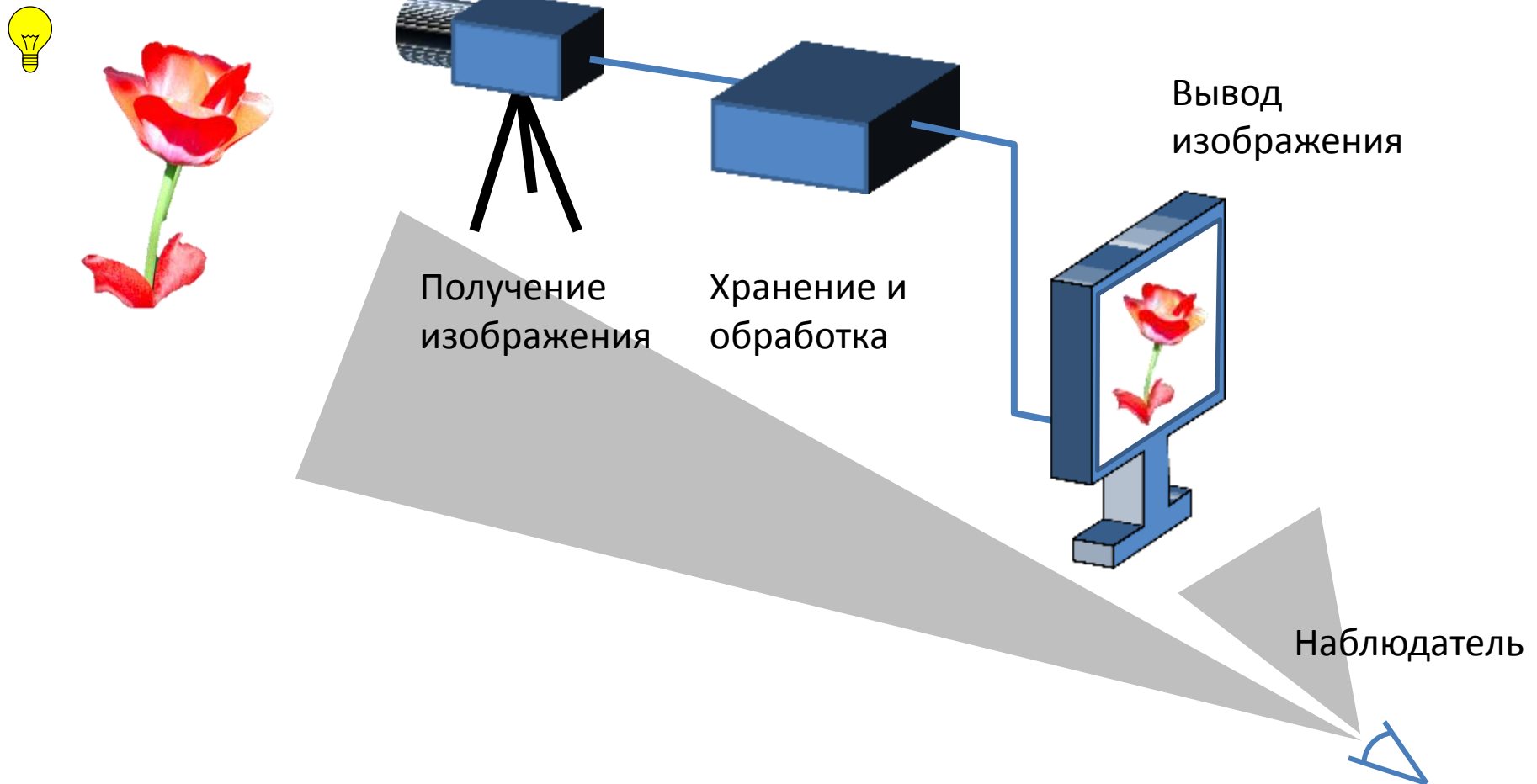
# На лекции: свет, радиометрия, фотометрия

---

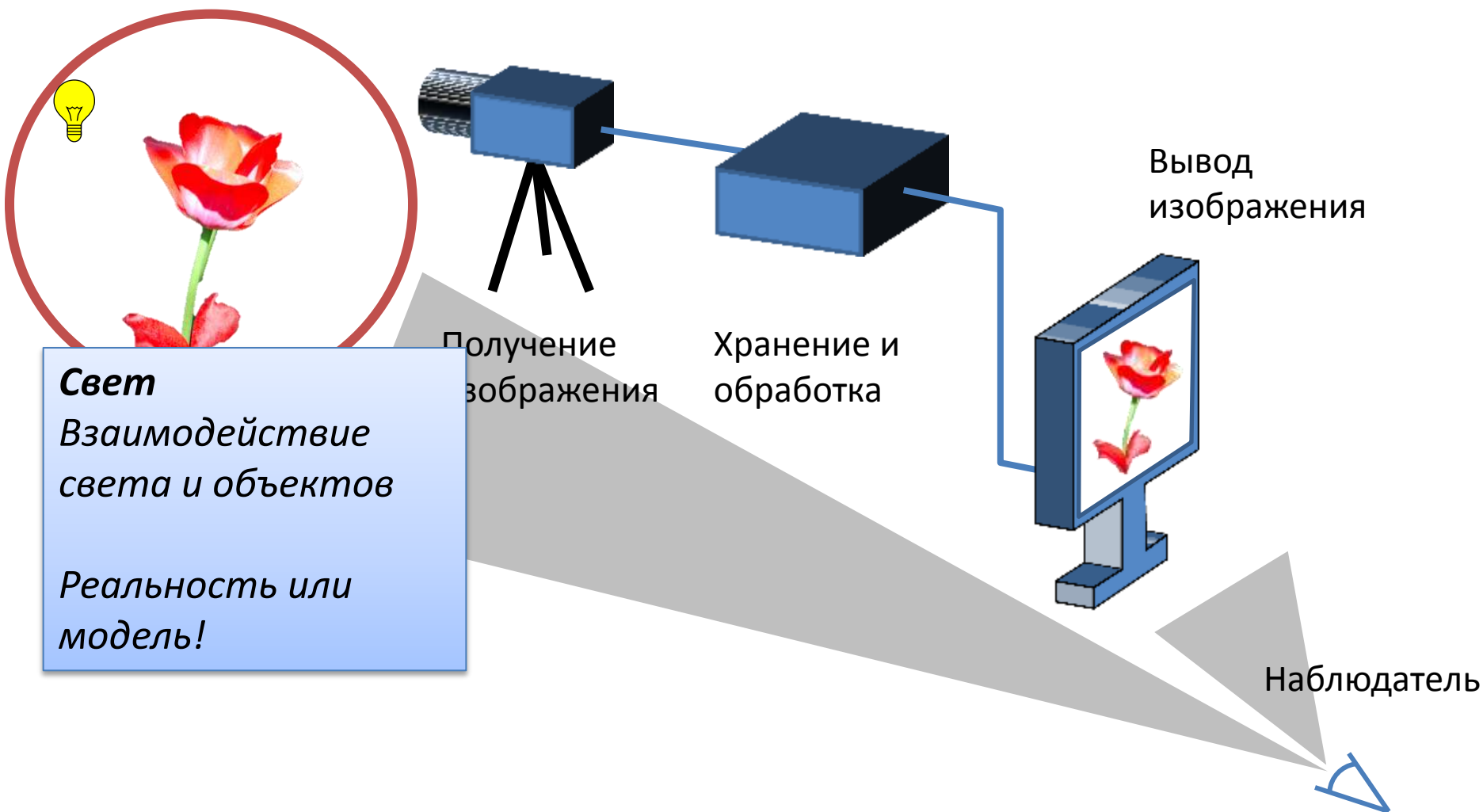
- Свет и волновая природа света
- Радиометрия: основные термины и понятия
- Фотометрия: основные термины и понятия

# Свет и цвет в графической системе

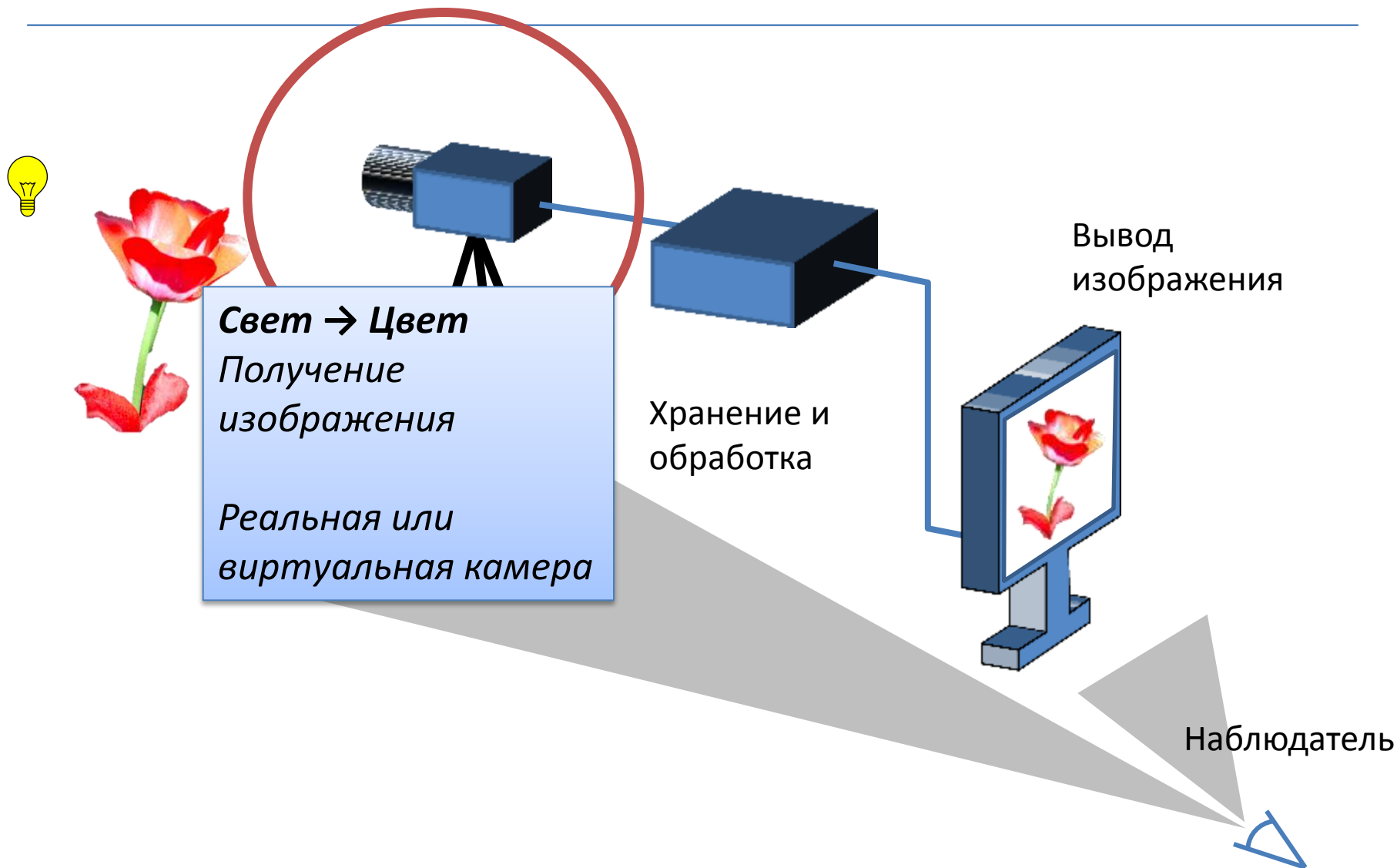
---



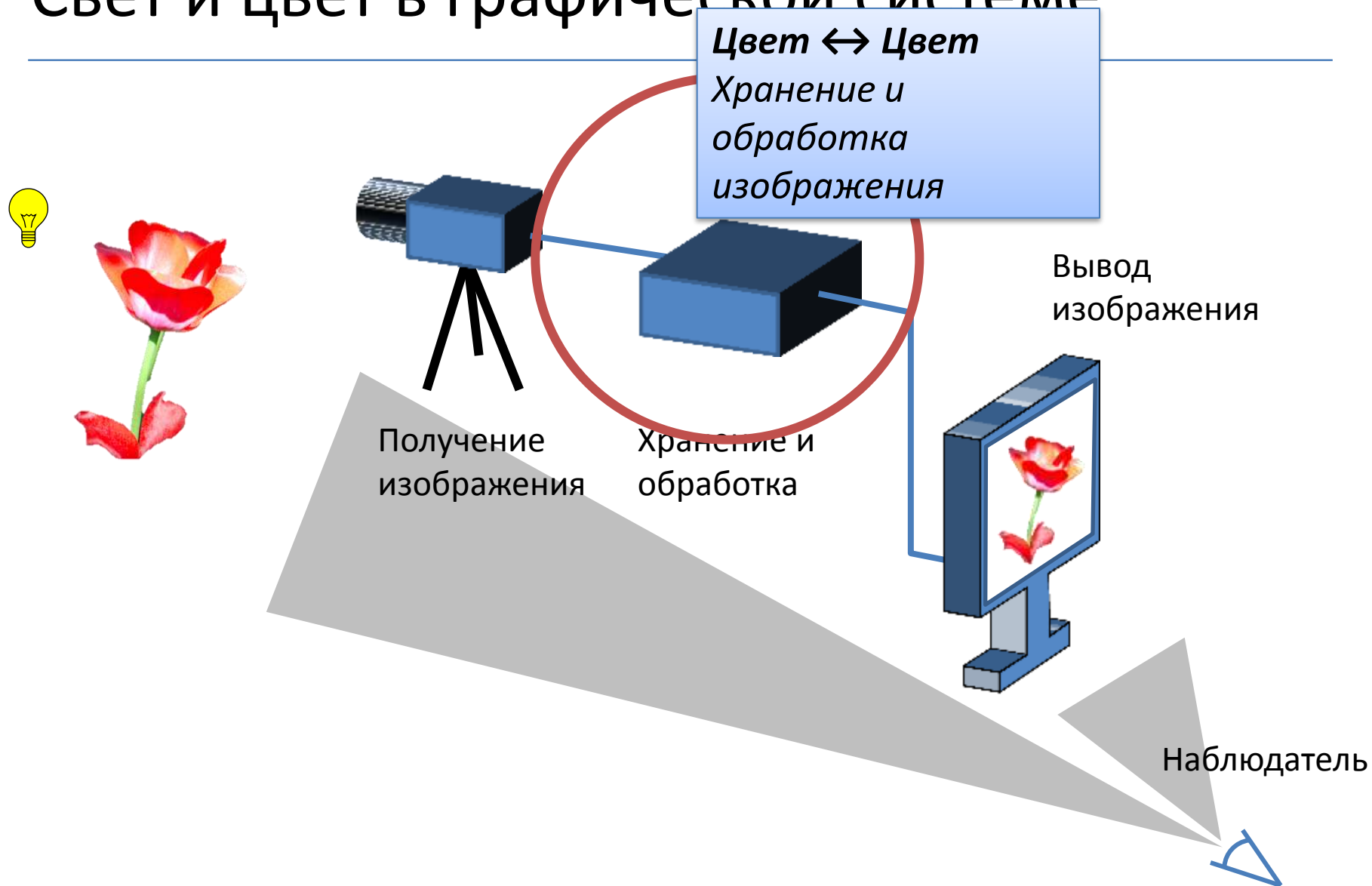
# Свет и цвет в графической системе



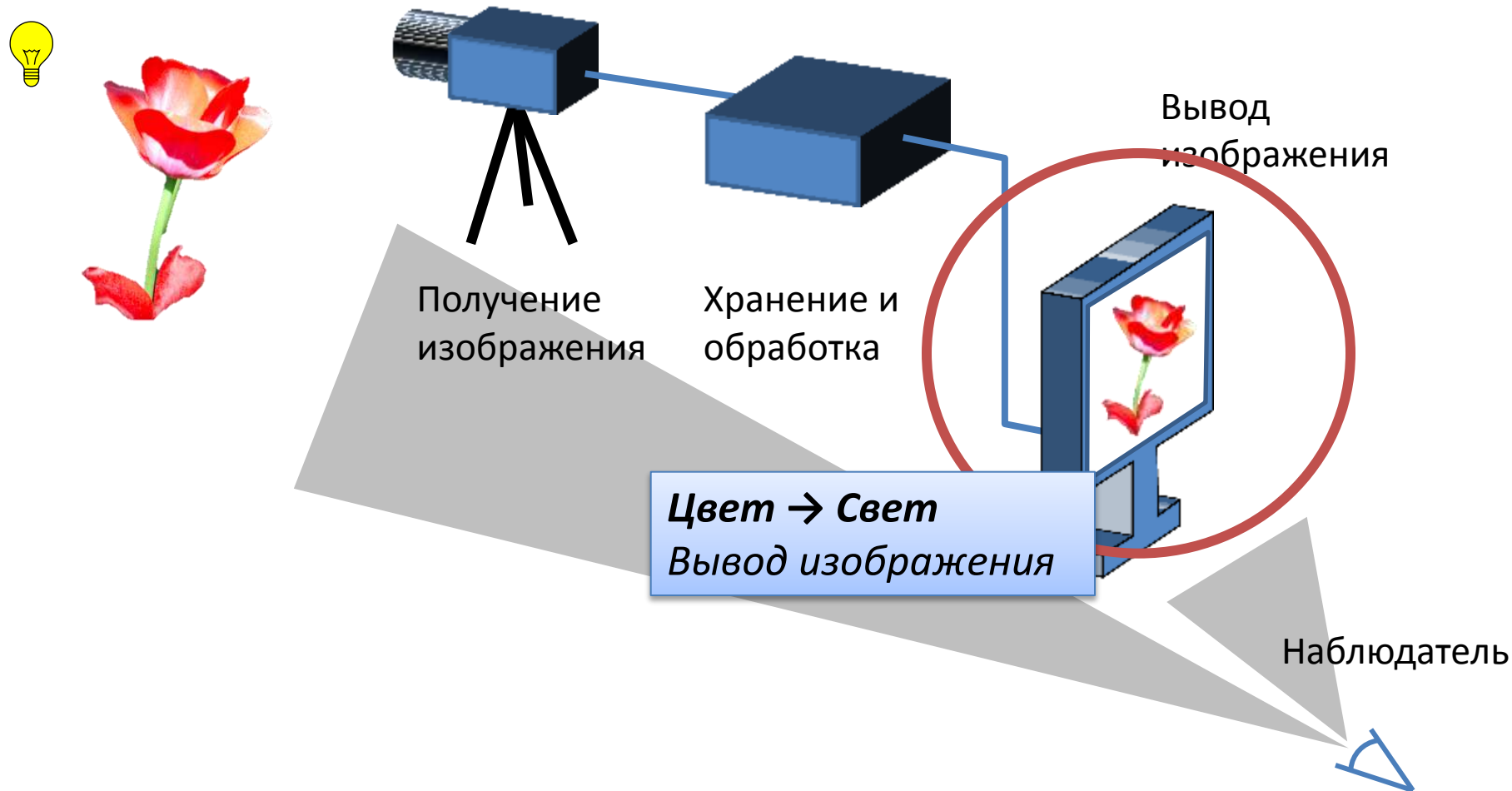
# Свет и цвет в графической системе



# Свет и цвет в графической системе



# Свет и цвет в графической системе



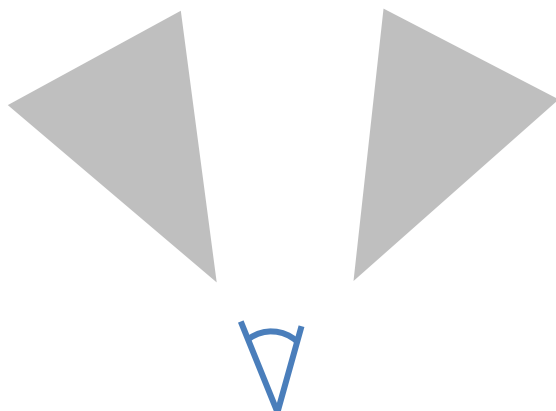
# «Хорошая» система

---

Хотели получить



Получили



Наблюдатель



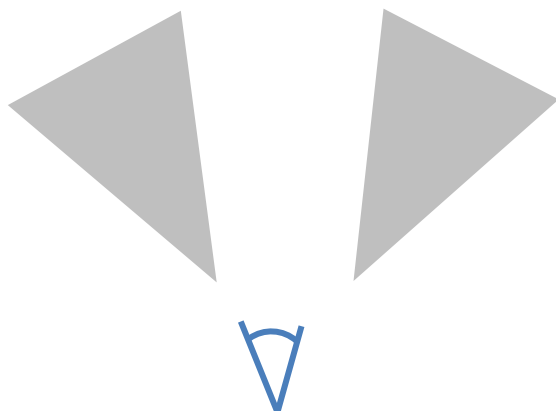
# «Плохая» система

---

Хотели получить

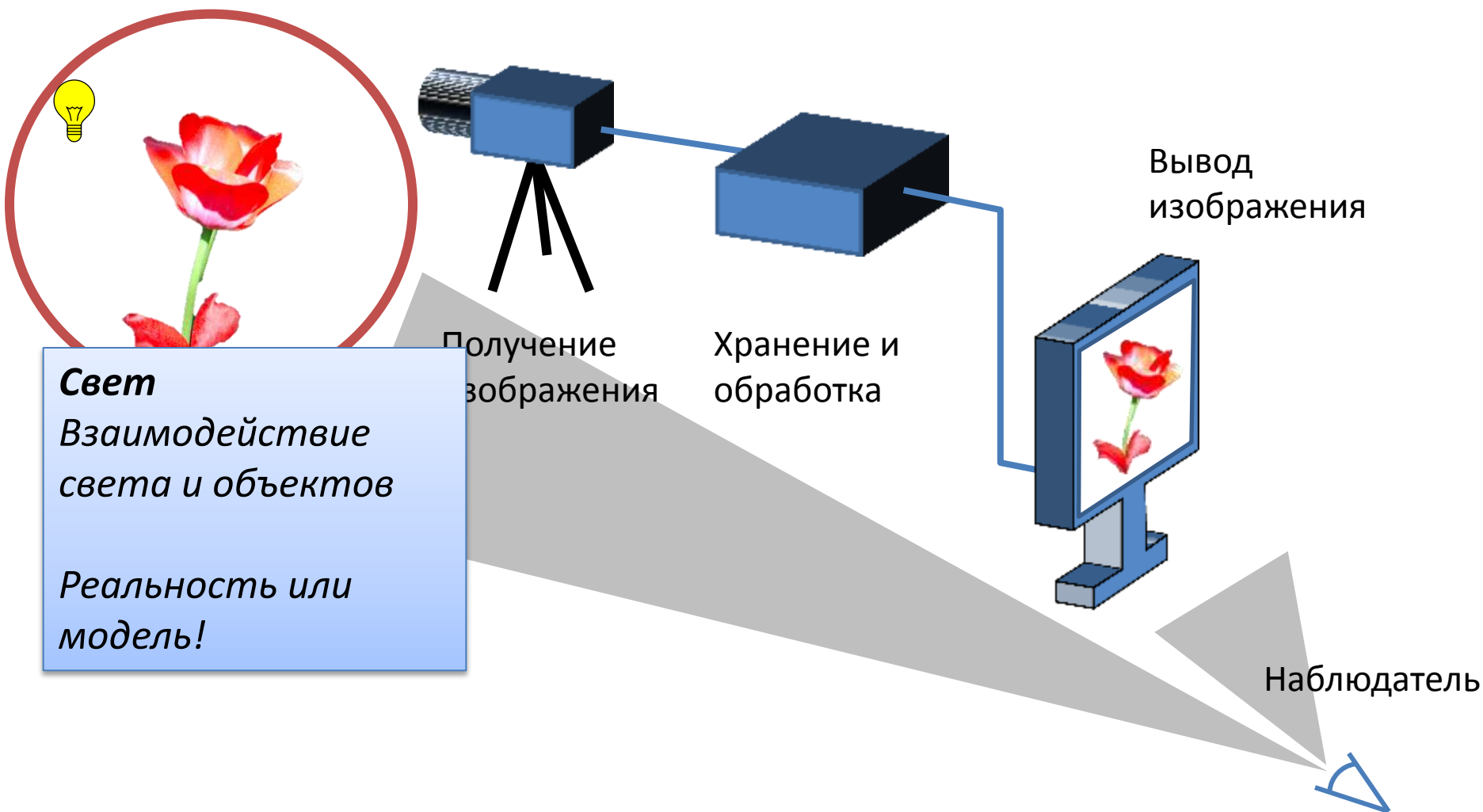


Получили



Наблюдатель

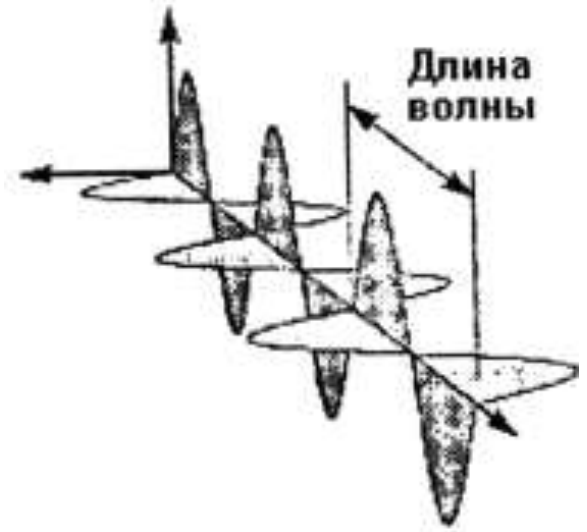
# Свет и цвет в графической системе



# Свет: электромагнитные волны или частицы

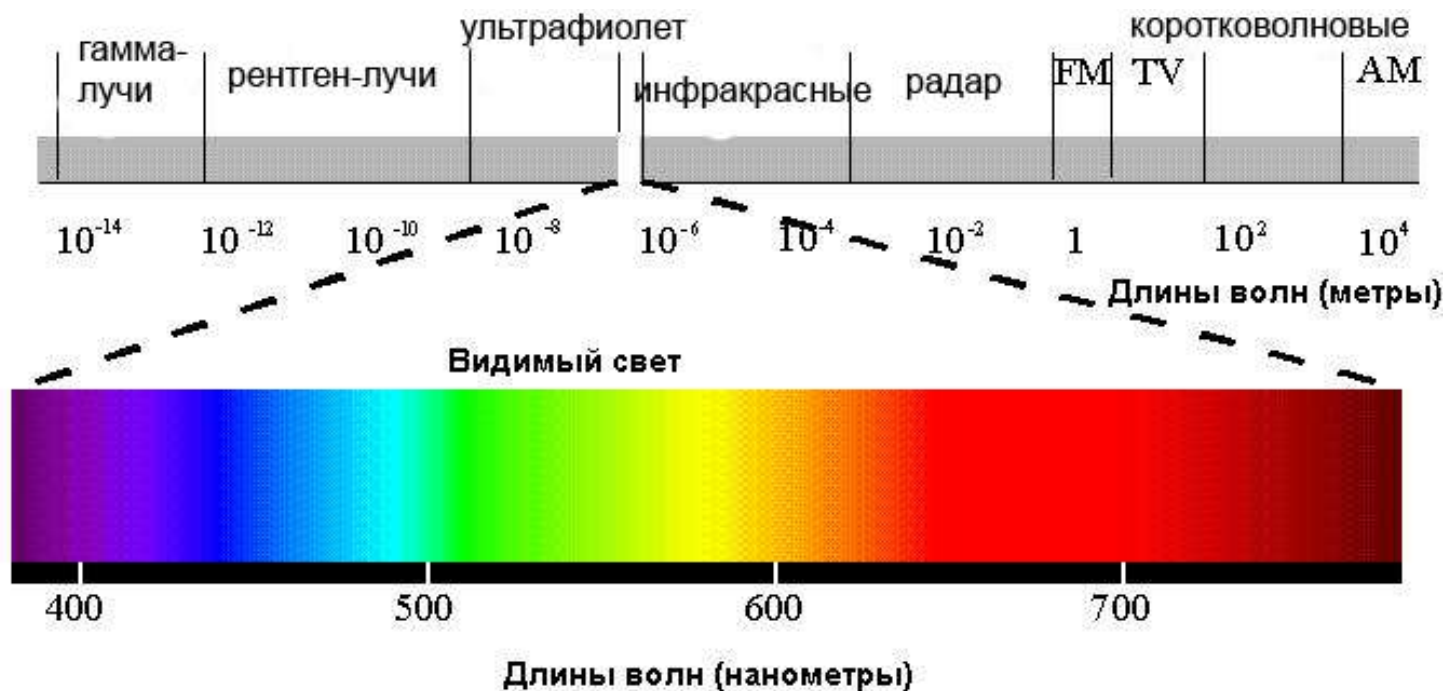
---

- Двойственная природа света
  - Электромагнитные волны
  - Поток частиц
- Атрибуты световой волны: амплитуда, длина волны, поляризация
  - Амплитуда  $\sim$  энергия
  - Измеряется в ваттах ( $\text{Вт} = \text{Дж/Сек}$ )
- Излучается дискретными квантами - фотонами



# Видимые длины волн ~400-700нм

- Видимый свет ~400-700 нанометров
  - 380-470 нм фиолетовый и синий цвет
  - 500-560 нм зеленый
  - 590-760 нм красный
- В более мелких участках этих интервалов цвет излучений соответствует различным оттенкам

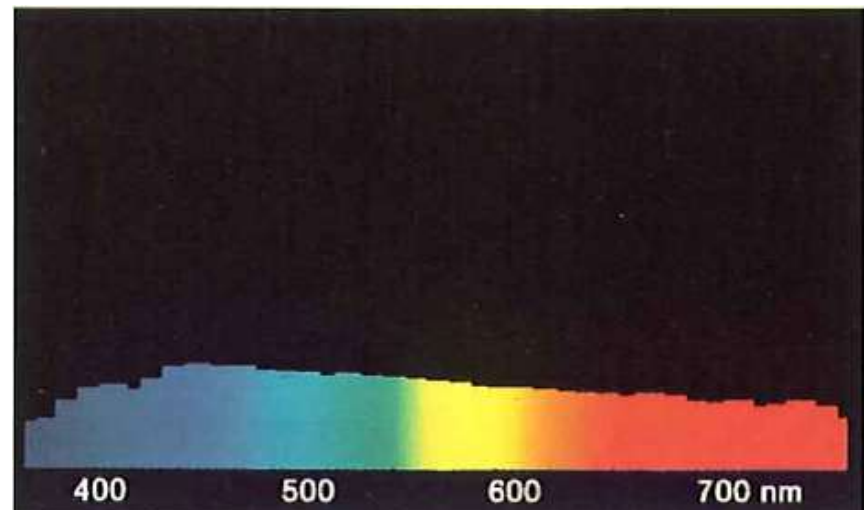
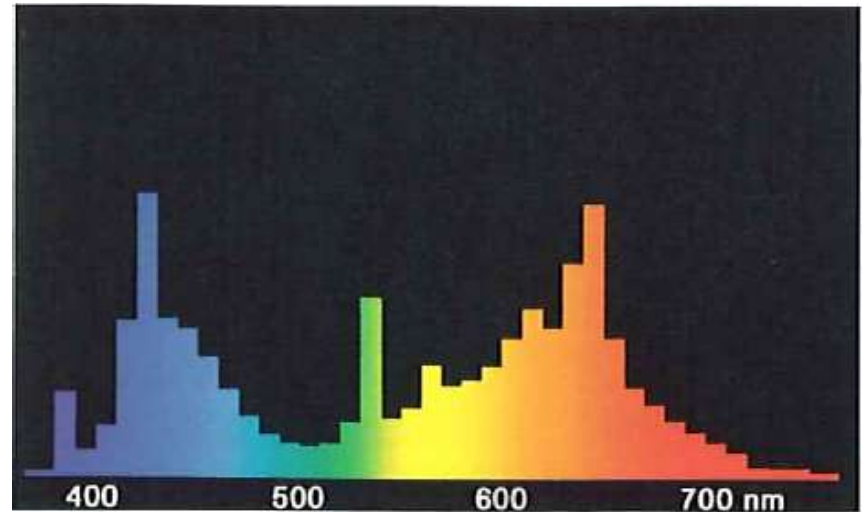


# Свет – это поток волн с различными длинами, амплитудами, поляризацией

---

**Свет:** поток волн с различными длинами и различными амплитудами

- Можно рассматривать как сумму монохроматических излучений



# Свет: дуальность

---

Электромагнитная волна

— волновая оптика

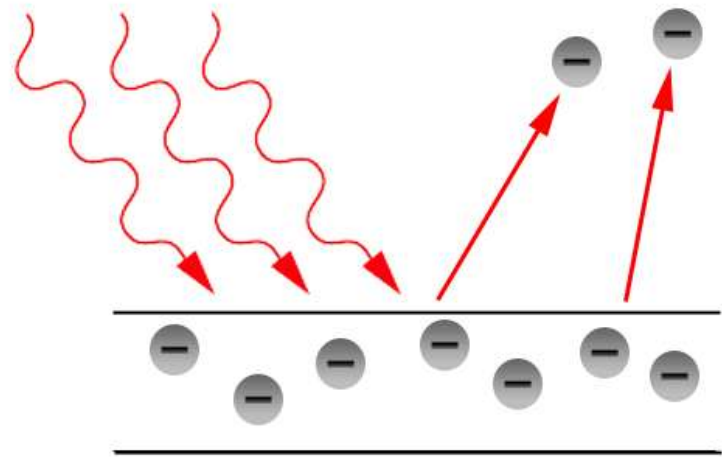
Поток частиц

— геометрическая оптика

Причины дуальности объясняются в квантовой оптике

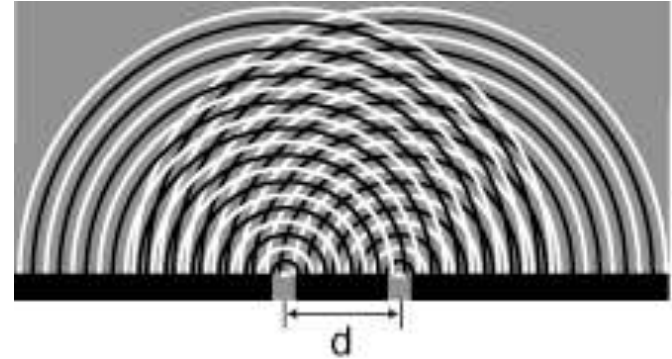
# Фотоэлектрический эффект

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



# Волновая природа света: дифракция и интерференция

- Явление преобразования распространяющейся в пространстве волны
- Возникает при сравнимых размерах длины волны и размеров неоднородности среды
- При размерах неоднородностей, на 3-4 порядка превышающих длину волны, дифракцией можно пренебречь





# Геометрическая оптика

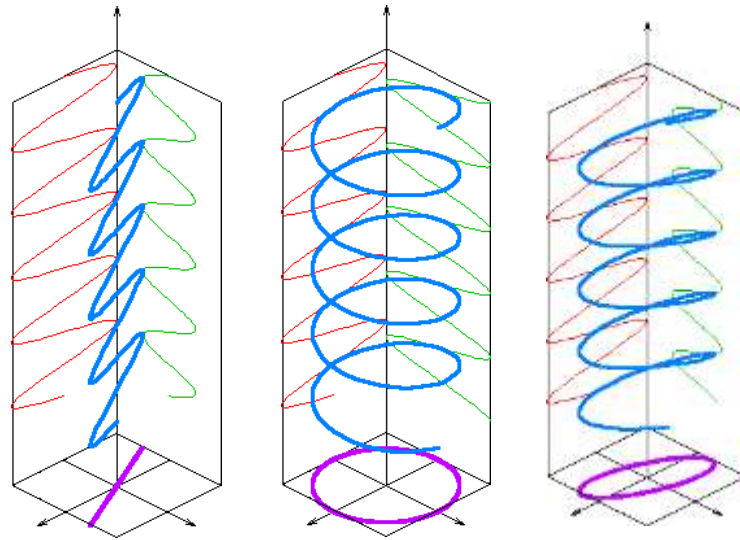
---

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

# Волновая природа света: поляризация

---

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



# Поляризация: пример

---

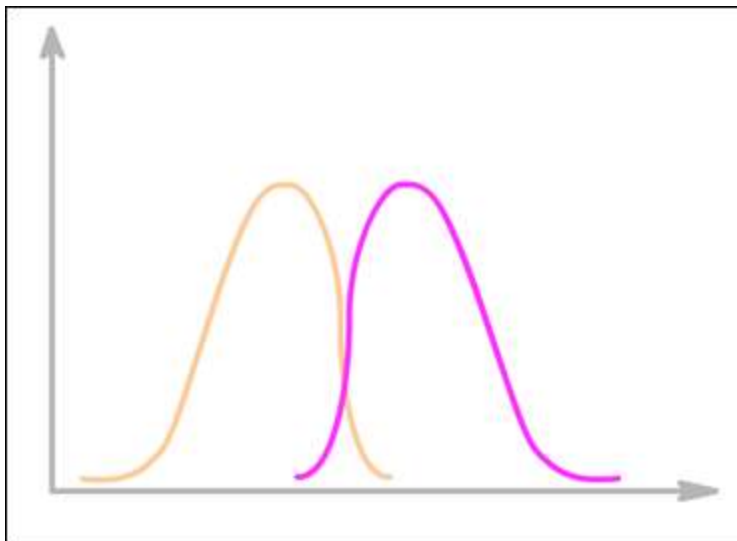


# Флюоресценция, фосфоресценция и другие нетепловые свечения вещества

---

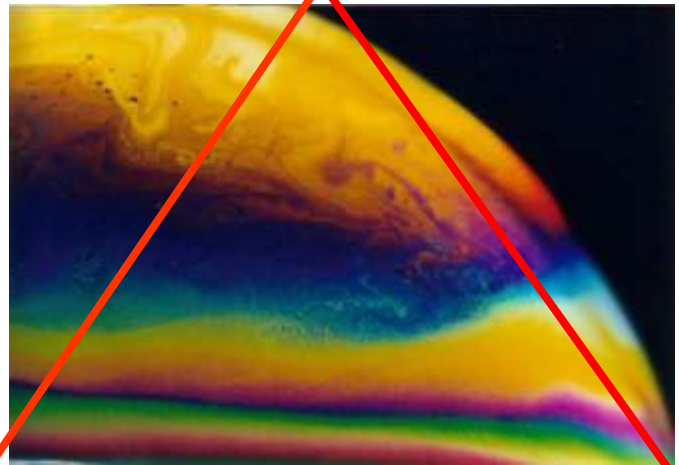
Фотолюминесценция — свечение под действием света (видимого и УФ-диапазона)

- флуоресценция
- фосфоресценция



# Геометрическая оптика: итоги

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

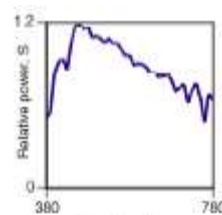


# На лекции: свет, радиометрия, фотометрия

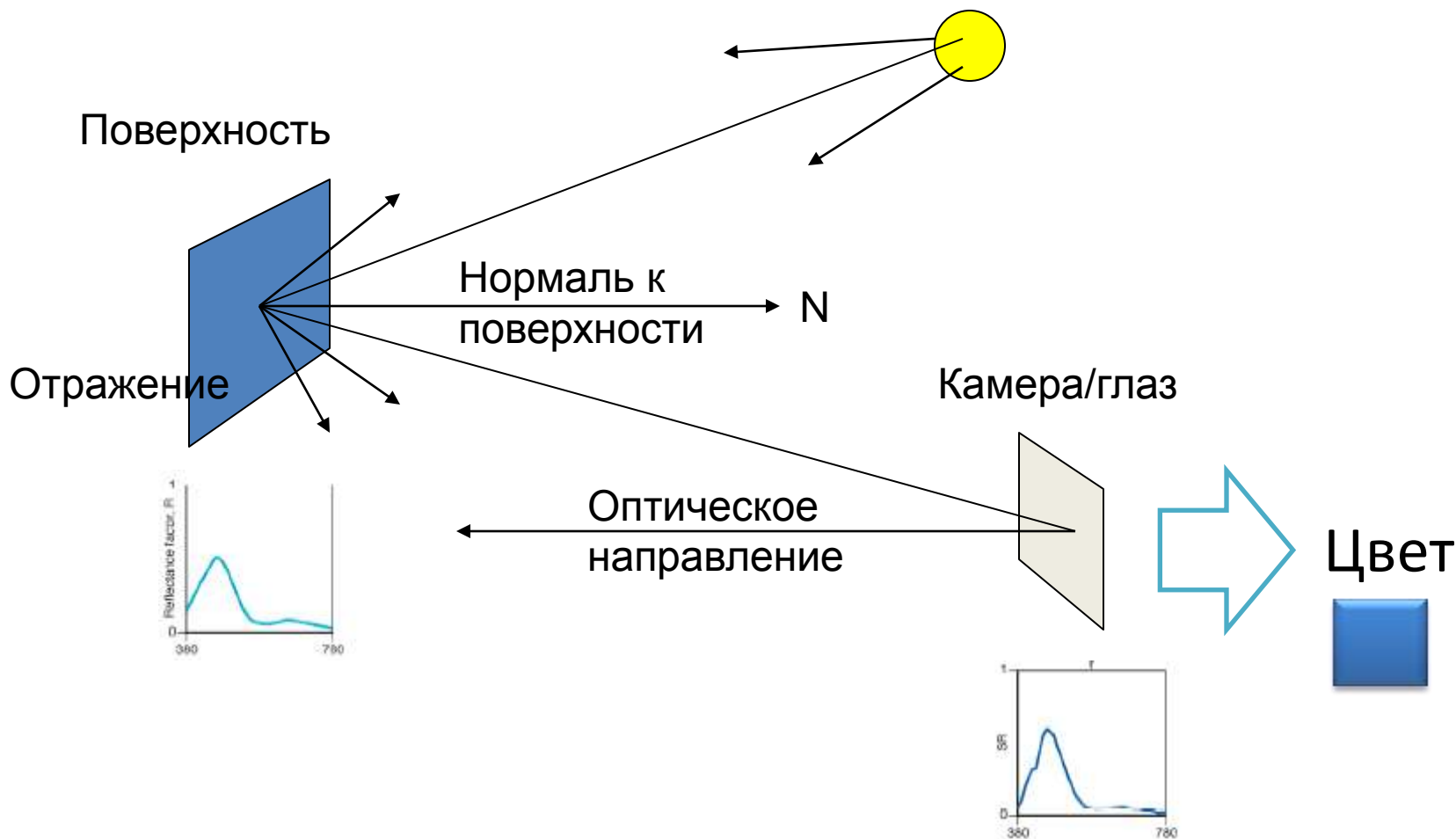
---

- Свет и волновая природа света
- **Радиометрия: основные термины и понятия**
- Фотометрия: основные термины и понятия

# Распространение света

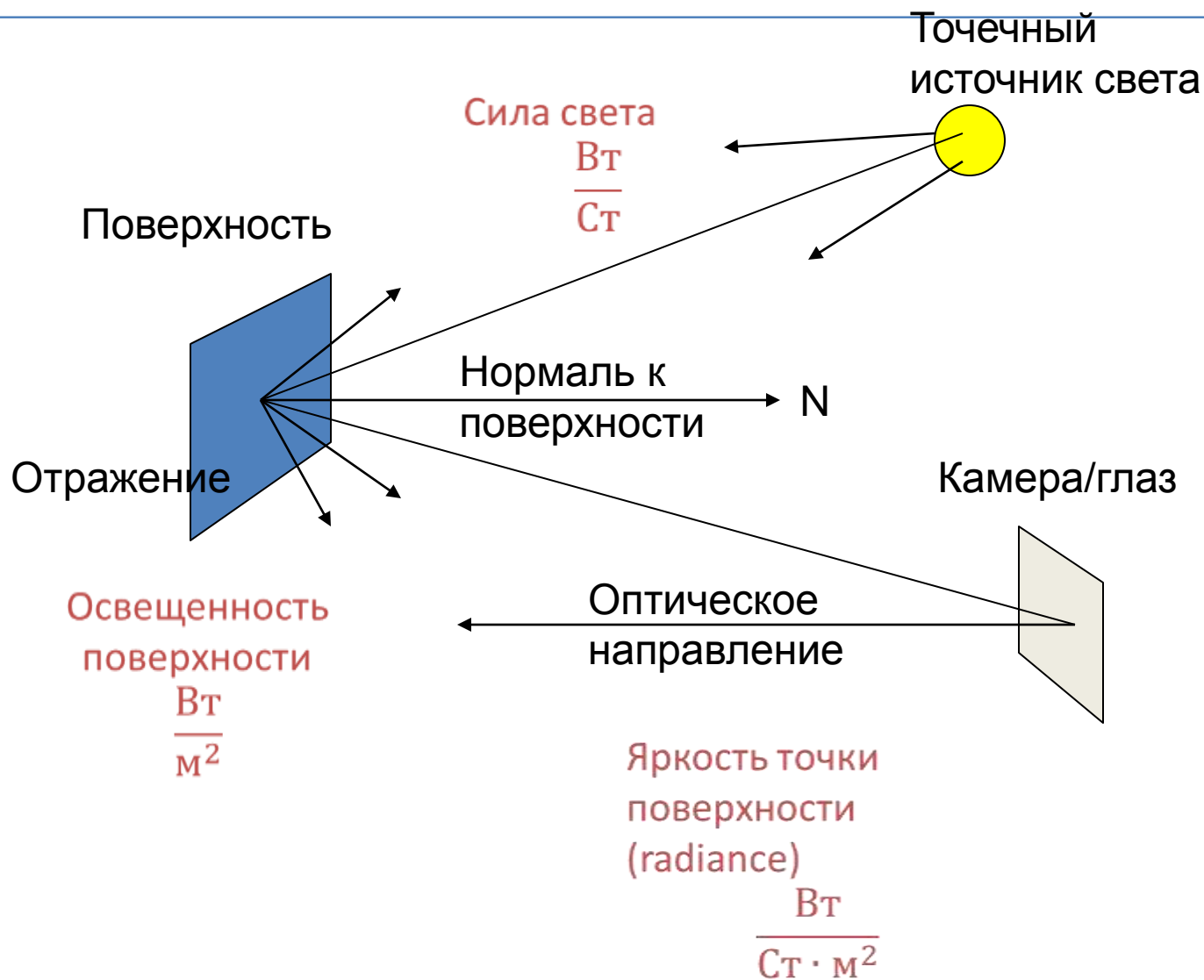


Точечный  
источник света



# Единицы измерения света (радиометрические)

Полный поток  
источника света  
Вт





# Радиометрия

---

- Радиометрия – наука об измерении электромагнитного излучения
  - Включая видимый свет
- Радиометрия не учитывает особенностей человеческого восприятия
- 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**

Рассеиваемая энергия 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

---

Невозможно измерить физические эффекты:

- Дифракция
- Интерференция
- Поляризация
- Флюоресценция
- Фосфоресценция

(Последние три легко добавить)

# Стоп. Зачем это нужно?

---

Измерение света нужно для создания  
фотореалистичных изображений виртуальных  
трехмерных сцен





# Почему важно знать спектральное распределение энергии?

---

- Очень важно для компьютерной графики, т.к. **оптические свойства материалов** зависят от длины волны
  - Отражение, поглощение, пропускание
- Свойства материалов также моделируются спектральным распределением

# Световая энергия (radiant energy) – сама по себе не подходит для наших задач

---

Обозначение: **Q**

Единица измерения: **Дж**

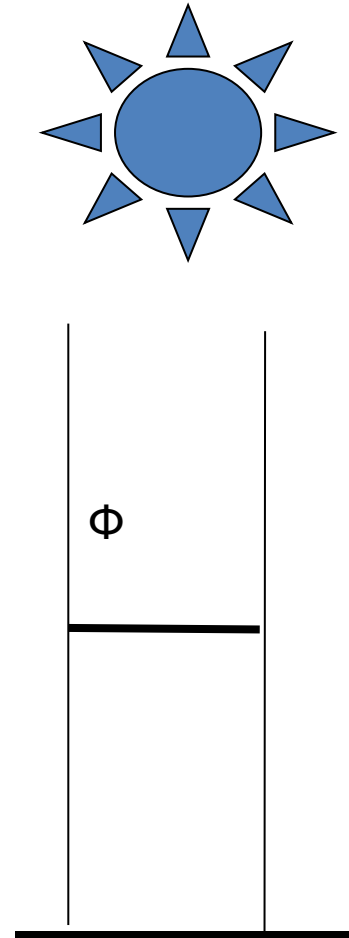
- Плохо подходит для наших задач
- Т.к. необходимо выразить излучаемую телом энергию! (например, при нагреве)
- Т.е. нужно описать свойства потока энергии
  - Скорость
  - Направление
  - Концентрированность (плотность)



# Световой поток (flux)

Поток: энергия, излучаемая в единицу времени для заданной поверхности

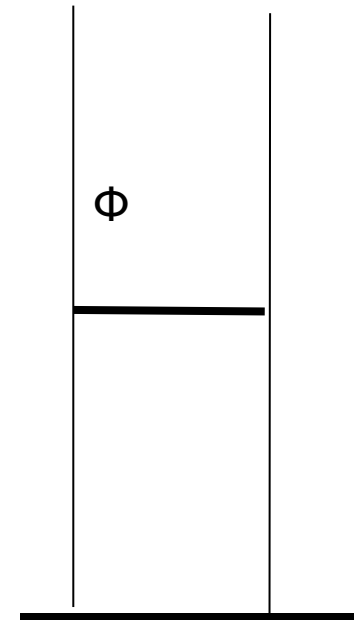
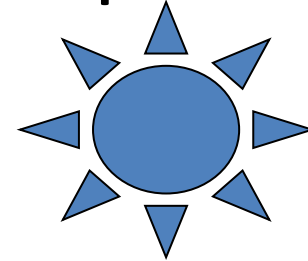
- Обозначение:  $\Phi$
- $\Phi = dQ / dt$
- Единицы измерения: **Вт**  
(ватт = Дж/с)
- Стационарный процесс!



# Световой поток (flux): как измерить?

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

$$Q=mc\Delta T$$

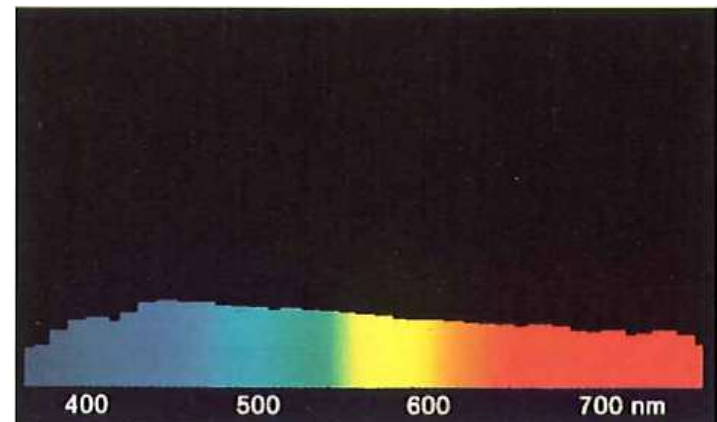
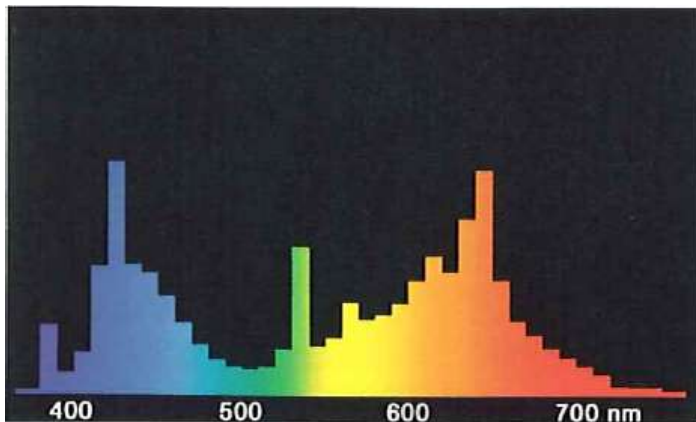


# Спектральный поток

---

- $\Phi$  задает суммарную характеристику по всем длинам волн
- $\Phi_\lambda$  задает поток на данной длине волны

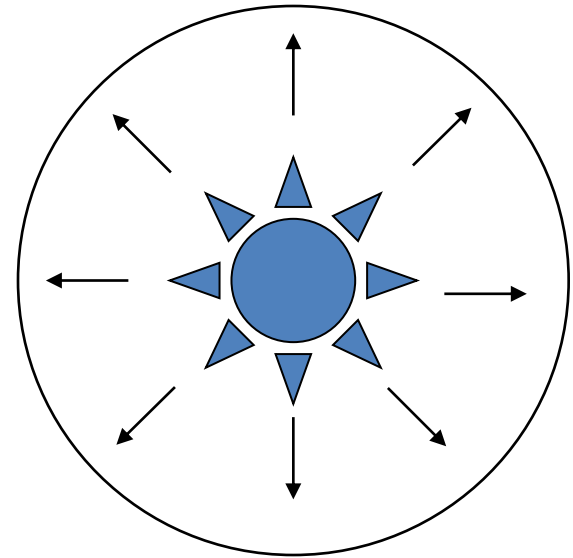
$$\Phi = \int \Phi_\lambda d\lambda$$



# Полный энергетический поток (total radiant flux)

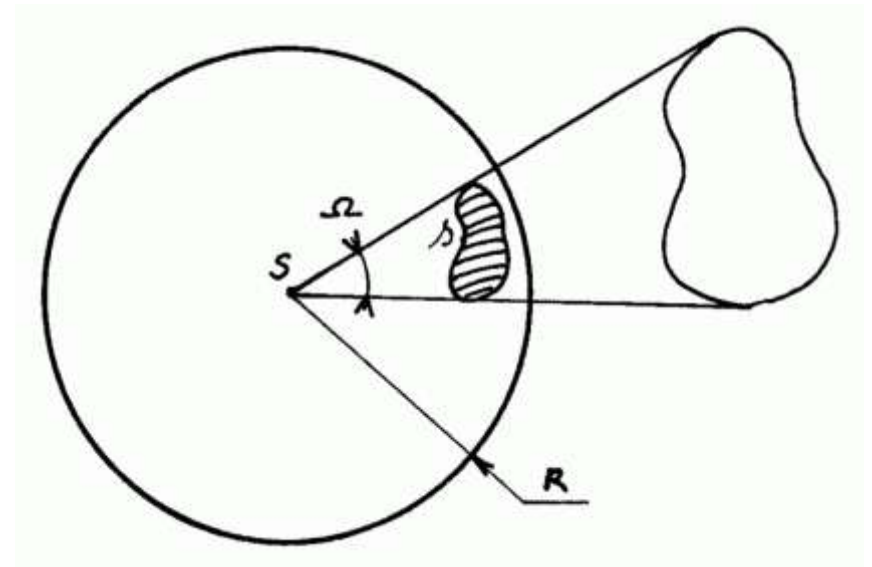
---

- Часто бывает нужно замерить полное излучение источника света
- Весь объем энергии, излучаемый телом за промежуток времени
- Характеризует источник света, нельзя увеличить, только сконцентрировать
- Нужны более детальные величины
  - Распределение по площади
  - Распределение по направлению



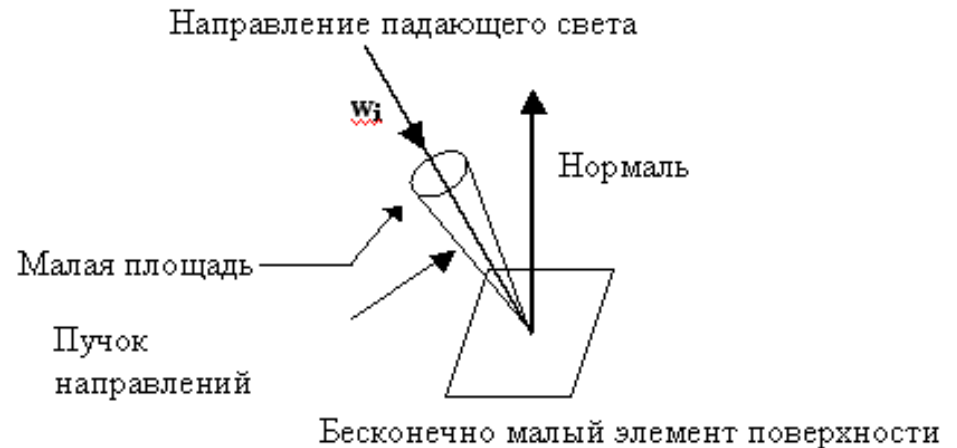
# Телесный угол

- Часть пространства
  - Является объединением всех лучей, выходящих из данной точки
  - Пересекающих некоторую поверхность
- Равен площади сегмента единичной сферы, соответствующему проекции кривой на эту сферу
- Для сферы радиуса  $R$  и площади проекции  $S$ , угол равен  $S/R^2$
- Единица – стерадиан (безразмерная)



# Сила излучения (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



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

# Связь полного потока и силы излучения

---

$$\Phi = 4\pi * I$$

$$\Phi = \int I \, d\omega = I \int d\omega = 4\pi I$$

# 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

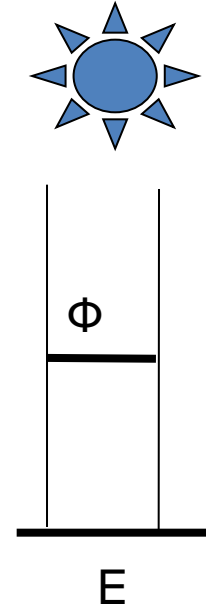


# Энергетическая освещенность (irradiance)

---

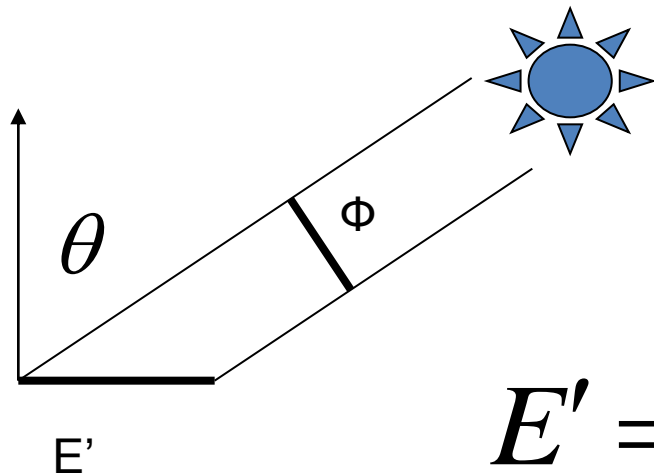
- Обозначение: **E**
- Единицы измерения: **Вт/м²**

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

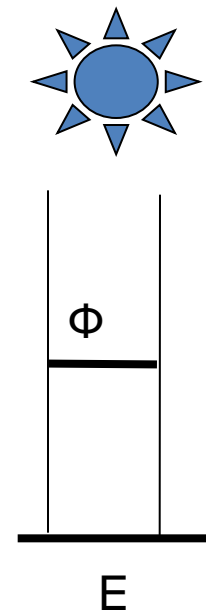


# Связь освещенности и «косинуса»

- Во многих моделях освещения встречается  $\cos$  в качестве множителя
- Верно для параллельных пучков



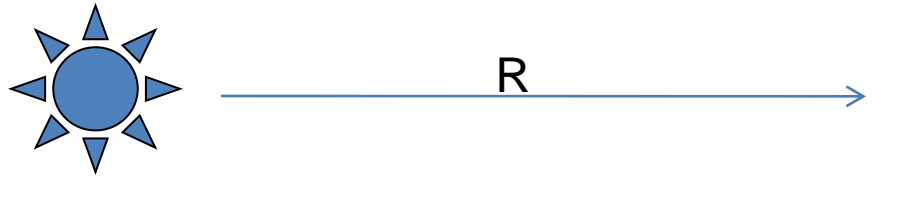
$$E' = E \cos \theta$$



# Освещенность и сила света: закон обратных квадратов

---

Пусть площадка с площадью  $A$  освещена точечным источником света на расстоянии  $R$



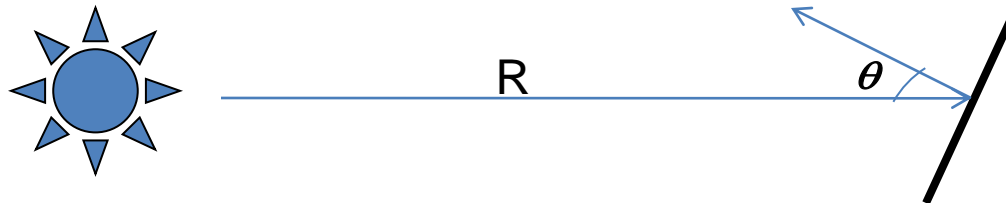
$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I d\omega}{dA} = \frac{I dA}{R^2 dA} = \frac{I}{R^2}$$

$$d\omega = \frac{dA}{R^2}$$

# Закон обратных квадратов (наклонная площадка)

---

- Пусть площадка с площадью  $A$  освещена точечным источником света на расстоянии  $R$
- Под углом  $\theta$



$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I d\omega}{dA} = \frac{I dA \cos \theta}{R^2 dA} = \frac{I \cos \theta}{R^2}$$

$$d\omega = \frac{dA \cos \theta}{R^2}$$

# Энергетическая светимость (radiant exitance)

---

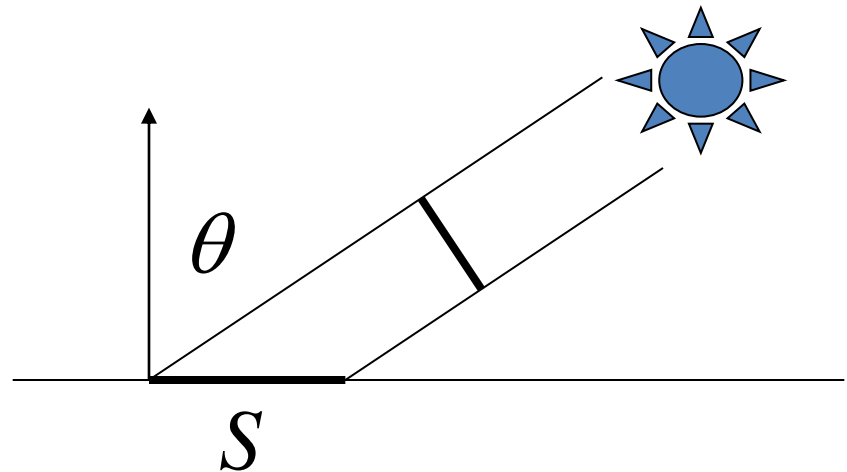
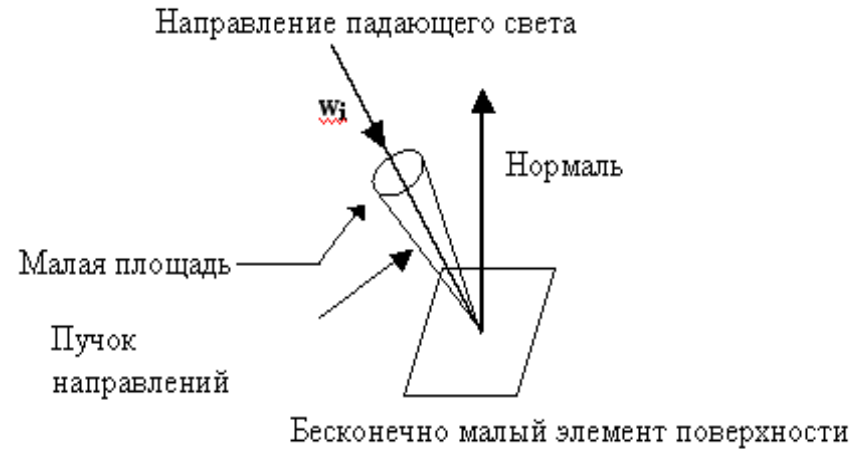
- Обозначение: **M**
- Единицы измерения: **Вт/м²**
- В компьютерной графике еще называют **radiosity**

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

# Яркость (radiance)

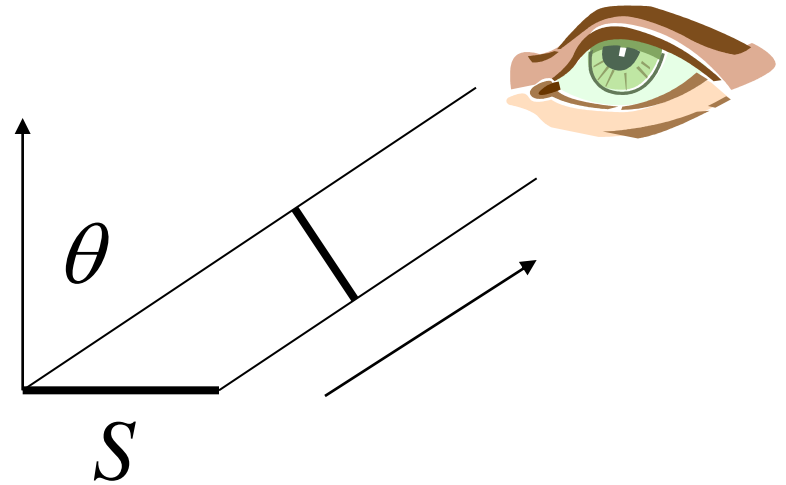
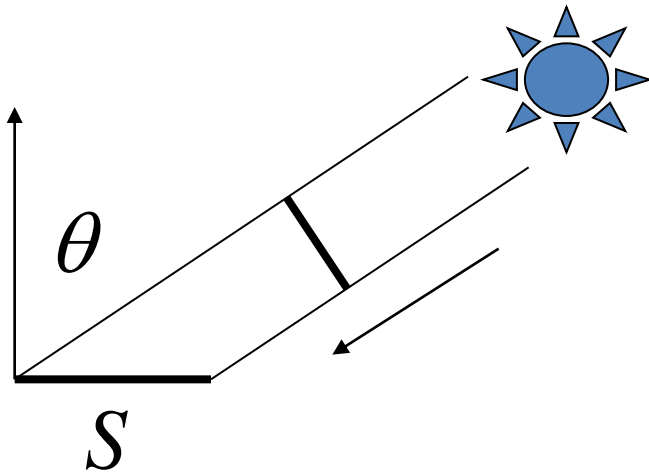
- Наиболее важная единица
- Источник не точечный
- Плотность потока, попадающего на площадку единичной площади, проходя через единичный телесный угол
- Обозначение:  $L$
- Единицы измерения:  
 $\text{Вт} / (\text{Ст} * \text{м}^2)$

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



# Исходящее и входящее излучение (яркость)

---



# Выражение излучения через другие единицы

---

Сила света



Освещенность



Светимость



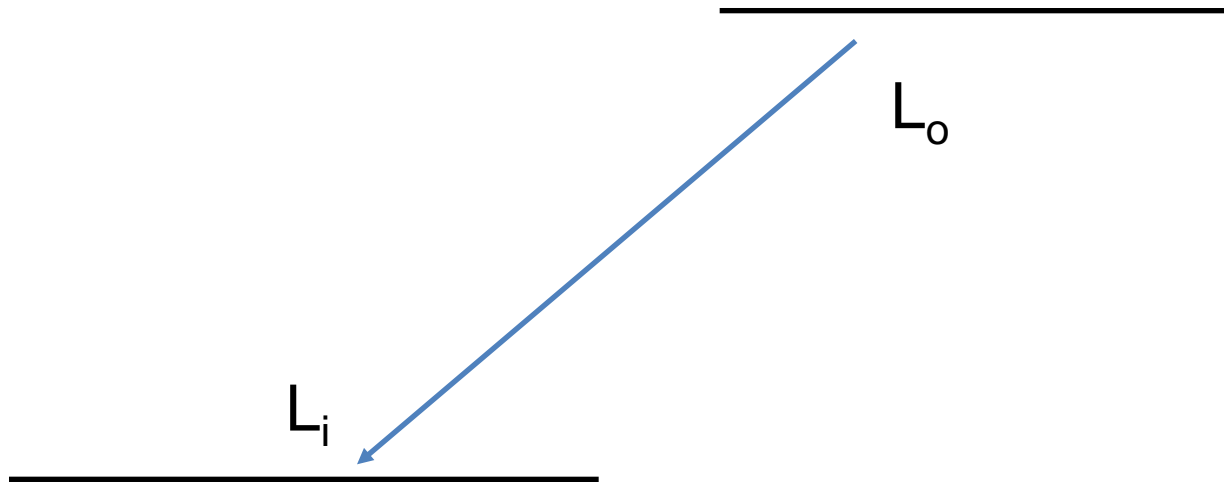
$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{dE}{d\omega \cos \theta} = \frac{dM}{d\omega \cos \theta}$$



# Свойства излучения

---

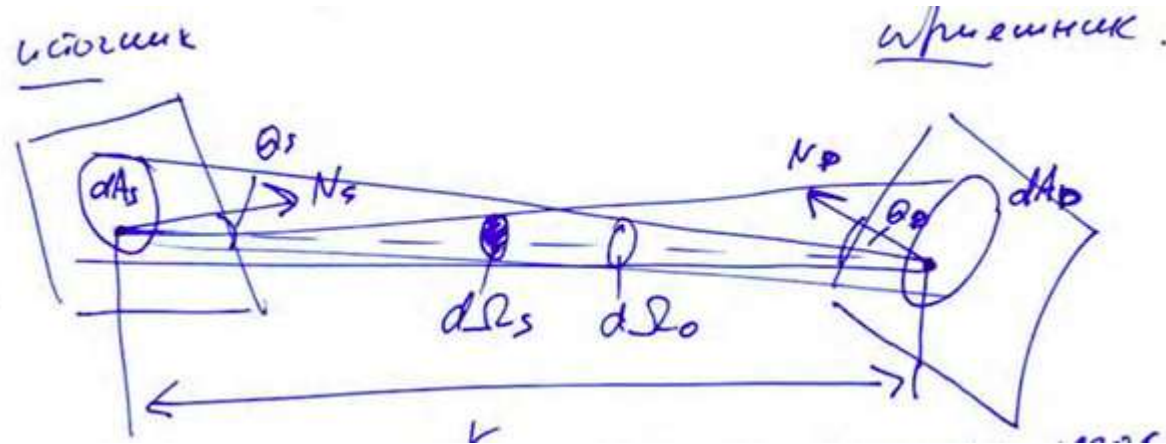
- Передается в вакууме без потерь!



- Фотокамера записывает именно яркость
- Глаз реагирует на яркость

# Почему передается без потерь? Закон сохранения яркости

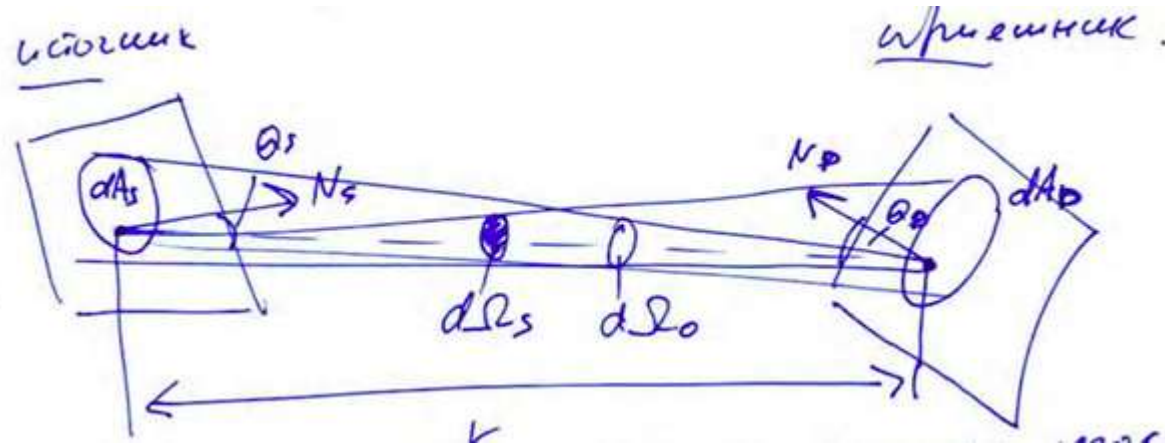
---



$$d\omega_s = \frac{dA_d \cos\theta_d}{r^2} \quad d\omega_d = \frac{dA_s \cos\theta_s}{r^2}$$

$$d^2G = dA_s \cos\theta_s d\omega_s = \frac{dA_s \cos\theta_s dA_d \cos\theta_d}{r^2} = dA_d \cos\theta_d d\omega_d$$

# Почему передается без потерь? Закон сохранения яркости (2)



$$d^2 G = dA_s \cos \theta_s d\omega_s = \frac{dA_s \cos \theta_s dA_d \cos \theta_d}{r^2} = dA_d \cos \theta_d d\omega_d$$

$$L_s = \frac{d^2 \Phi_s}{\cos \theta_s d\omega_s dA_s} = \frac{d^2 \Phi_s}{d^2 G} \quad L_d = \frac{d^2 \Phi_d}{\cos \theta_d d\omega_d dA_d} = \frac{d^2 \Phi_d}{d^2 G}$$

# Ламбертовы источники и их свойства

---

- Ламбертов источник  $L = \text{const}$
- Т.е. со всех сторон одинаково ярким выглядит
- Свойства:
  - $I = I_0 * \cos(\theta)$
  - $M = \pi * L$
  - Светящийся плоский диск неотличим от полусферы
    - Солнце – ламбертов источник!

# Некоторые радиометрические значения

---

Описание	Значение
Полный поток 100 Вт газонаполненной вольфрамовой лампы накаливания	82 Вт
Поток типичного гелиум-неонного лазера средней мощности, на частоте 632,8 нм	5 мВт
Поток 40 Вт лампы дневного света	23,2 Вт
Заотмосферная освещенность на средней земной орбите	1367 Вт/м <sup>2</sup>
Земная прямая солнечная освещенность, чистое небо, зима, юго-восток США, полдень	852 Вт/м <sup>2</sup>
Земная полная (полусферическая) освещенность, чистое небо, зима, юго-восток США, полдень	686 Вт/м <sup>2</sup>
Яркость солнца на поверхности	$2,3 \times 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ ст}^{-1}$
Видимая яркость солнца с Земли	$1,4 \times 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ ст}^{-1}$

# На лекции: свет, радиометрия, фотометрия

---

- Свет и волновая природа света
- Радиометрия: основные термины и понятия
- **Фотометрия: основные термины и понятия**

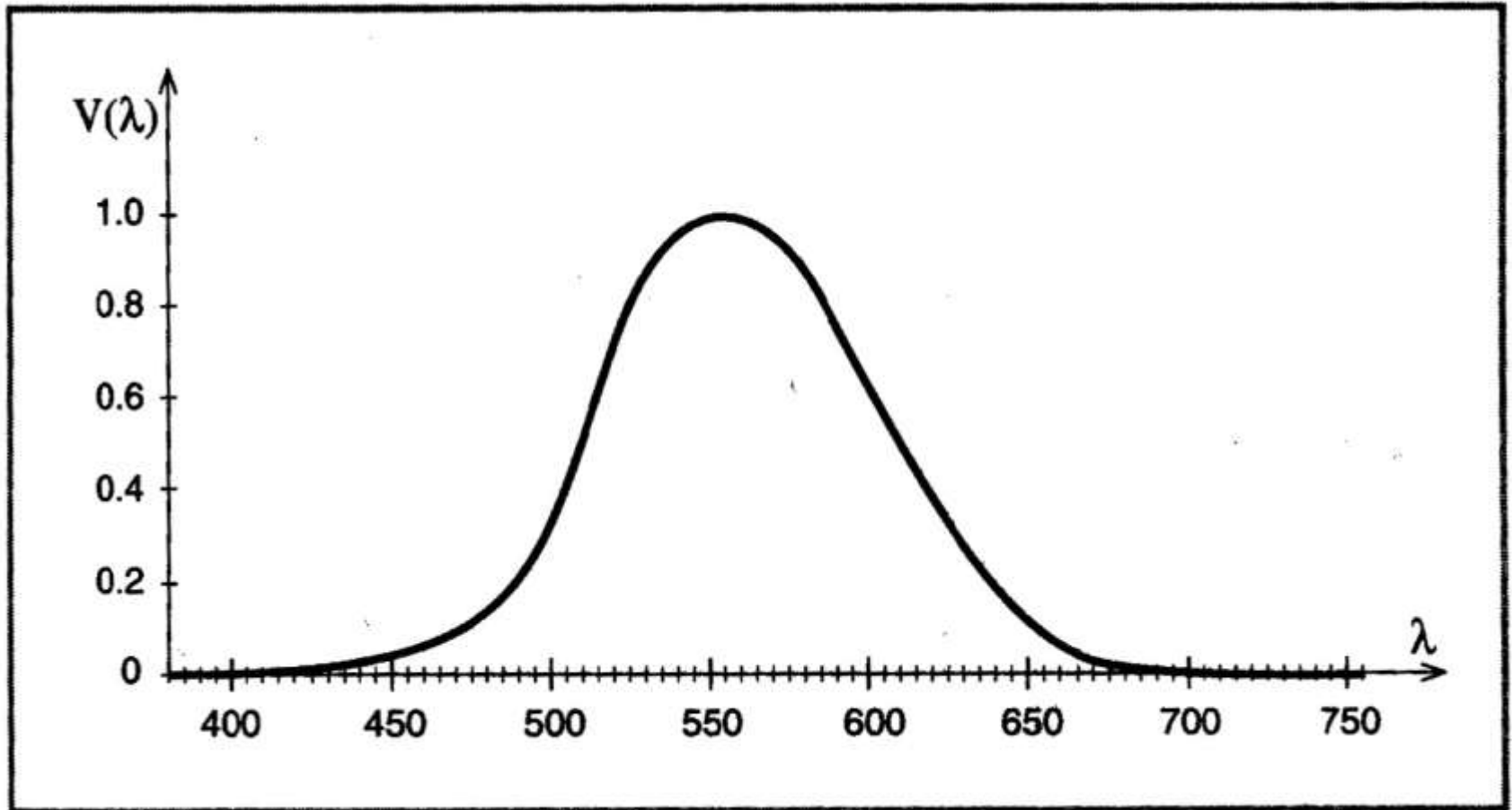
# Фотометрия

---

- Фотометрия может рассматриваться как подмножество радиометрии, в котором все радиометрические единицы были изменены с учетом чувствительности человеческого глаза

# Функция спектральной световой эффективности $V(\lambda)$

---





# Преобразование между радиометрическими и фотометрическими единицами

---

$$Q_v = 683 \int_{380}^{780} Q_\lambda V(\lambda) d\lambda$$

$Q_v$  – одна из единиц  $\Phi, I, E, M, L$

# Радиометрические и фотометрические единицы

Радиометрические единицы	Обозн.	Фотометрические единицы	Обозн.
Энергетический поток (radiant flux)	Вт	Световой поток (luminous flux)	<b>Люмен</b>
Энергетическая сила излучения (radiant intensity)	Вт/ст	Сила света (luminous intensity)	<b>Кандела</b> = Люмен/ст
Энергетическая освещенность (irradiance)	Вт/м <sup>2</sup>	Световая освещенность (illuminance)	<b>Люкс</b> = Люмен/м <sup>2</sup>
Энергическая яркость (radiance)	Вт/м <sup>2</sup> /ст	Световая яркость (luminance)	<b>Нит</b> = Кандел/м <sup>2</sup>

# Световой поток

---

- Световой поток - (люмен – ватт)
  - поток лучистой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению
  - Поток, взвешенный функцией световой эффективности
  - Поток внутрь телесного угла  $1\text{ ст}$
  - Если  $1\text{ кд}$  по любому направлению, то полный поток  $4\pi\text{ лм}$

# Сила света

---

- Сила света - кандела (кд) (ватт на стерадиан)
  - до платинового эталона была "международная свеча"
- Коэффициент 683 идет именно из определения канделы, так, чтобы 1 кандела была приблизительно равна силе света свечи

# Освещенность

---

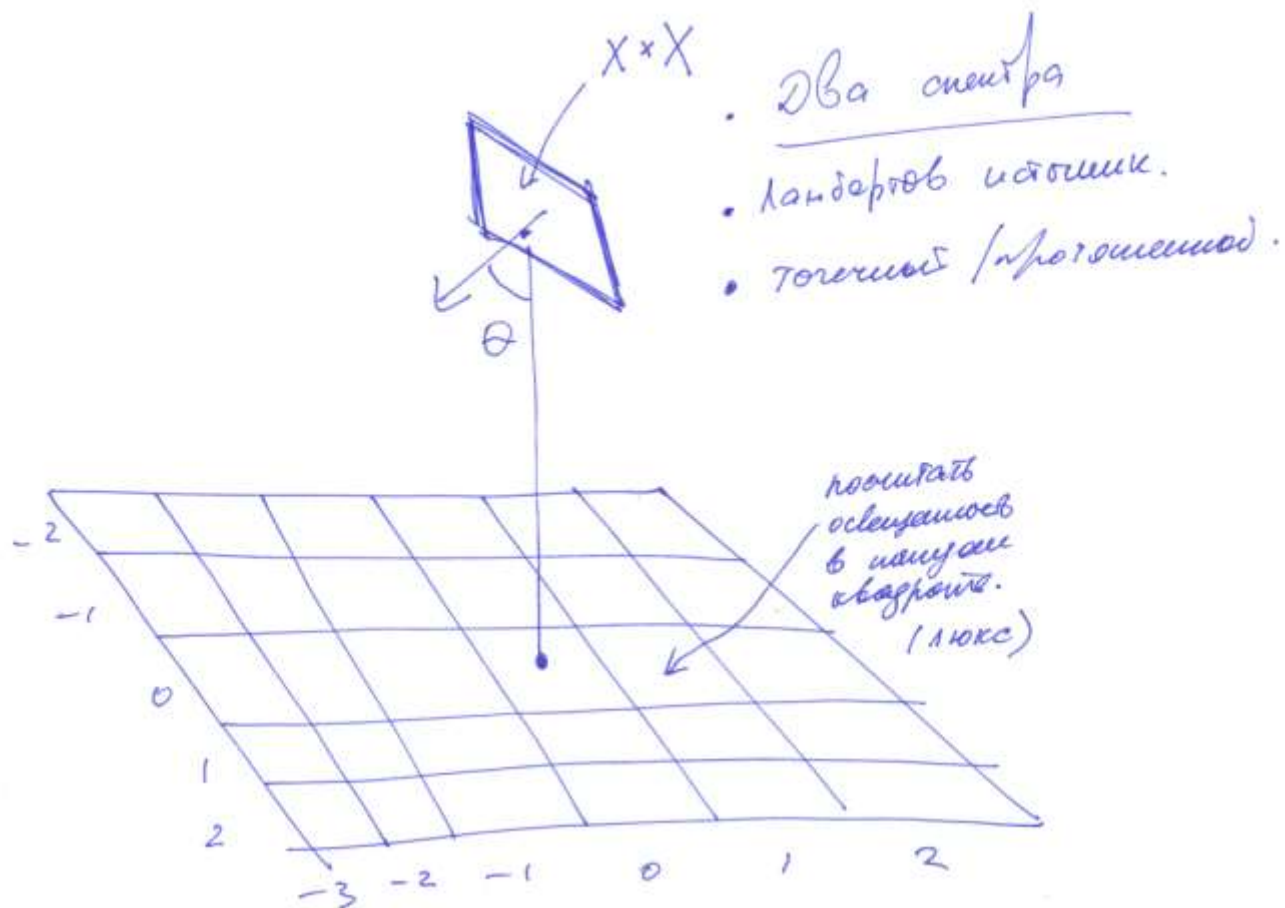
- Освещенность - люкс (1 люмен по площади  $1\text{ м}^2$  - ватт /  $\text{М}^2$ )

# Яркость

---

- Яркость - (кандела на квм - ватт / стерадиан / м<sup>2</sup>)  
= НИТ.
  - Luminance

# Задание



# Литература

---

- DeCusatis, C., "Handbook of Applied Photometry." AIP Press (1997)
- McCluney, W. R., "Introduction to Radiometry and Photometry", Artech House (1994)