



Спецкурс ОСФИ

Лекция 1

29 марта 2015

Структура курса. Свет как энергия. Радиометрия. Фотометрия

Алексей Игнатенко, к.ф.-м.н.

Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа ВМК МГУ

На лекции: структура курса, свет, радиометрия, фотометрия

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

На лекции: структура курса, свет, радиометрия, фотометрия

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

Курс рассматривает основы синтеза реалистичных изображений

О чем курс?

В курсе рассматриваются теоретические и практические основы синтеза фотореалистичных изображений моделей трехмерных объектов и сцен

Для кого курс?

- Для студентов 2-5 курсов
- Часть магистерской программы
- Для желающих распределиться в лабораторию компьютерной графики и мультимедиа (зав. Ю.М. Баяковский)

Курс связан, но не дублирует поточный курс по компьютерной графике

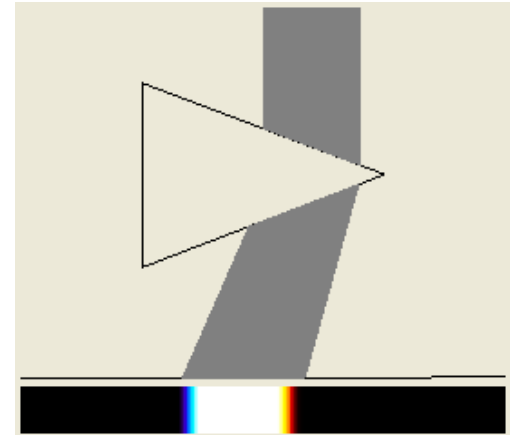
- Выбраны темы, не освещаемые широко в основном курсе компьютерной графики
- Более «продвинутое» и детальное рассмотрение
- Не требует знаний из поточного курса

Лекционная часть: 7 лекций, март-апрель

1	06.03	Свет как энергия. Радиометрия. Фотометрия.
2	13.03	Цвет. Цветовые пространства. Гамма-коррекция.
3	20.03	Изображения широкого динамического диапазона (HDR).
4	27.03	Взаимодействие света и материала. ДФО. Модели освещения
5	03.04	Методы расчета интеграла освещенности. Синтез изображений методом классической излучательности.
6	10.04	Трассировка лучей. Основы оптики. Алгоритмы поиска пересечений.
7	17.04	Трассировка фотонов.

Практическая часть курса состоит из двух заданий (программ)

1. Цвет, синтез HDR и Tone Mapping
06.03-27.03 (3н)
2. Трассировка фотонов
27.03-24.04 (4н)



Курс рассчитан из 60 баллов на пятерку

- Баллы:
 - Посещение лекции: 2 балла (максимум 14 баллов)
 - Задание 1: 10-30 баллов
 - Задание 2: 15-40 баллов
 - Экзамен: 20 баллов
- Итоговые оценки:
 - 5 - 60 баллов и выше
 - 4 – 45-59 баллов
 - 3 – 30-44 баллов
- **Все оценки действительны только при посещении минимум трех лекций!**

Общение идет через вебсайт курса

<http://courses.graphics.cs.msu.ru/course/view.php?id=11>

На сайте:

- Новости
- Выкладываются лекции
 - .pdf с презентациями + доп. материалы
- Выкладываются задания
- Сдача практических заданий и оценки
- Форум (после регистрации)

Необходимо зарегистрироваться на курс!

Кодовая фраза – записать!

(внимание, в опубликованной презентации кодовой фразы не будет)

Реалистичные изображения и реальность



<http://massimorighi.com/portfolio/green-frog/>

Фотореаличные изображения

- Разработка алгоритмов синтеза изображений = разработка способов коммуникации с помощью изображений
- В: Что такое синтез фотореалистичных изображений?
- О: Синтез «убедительных» изображений, неотличимых от восприятия реальности
- Фотореалистичные и реалистичные – есть разница!



Одно из приложений - виртуальная реальность

Синтез фотореалистичных изображений необходим для создания приложений виртуальной реальности

Типичные применения:

- Симуляторы
- Моделирование
- Психология
- Игры



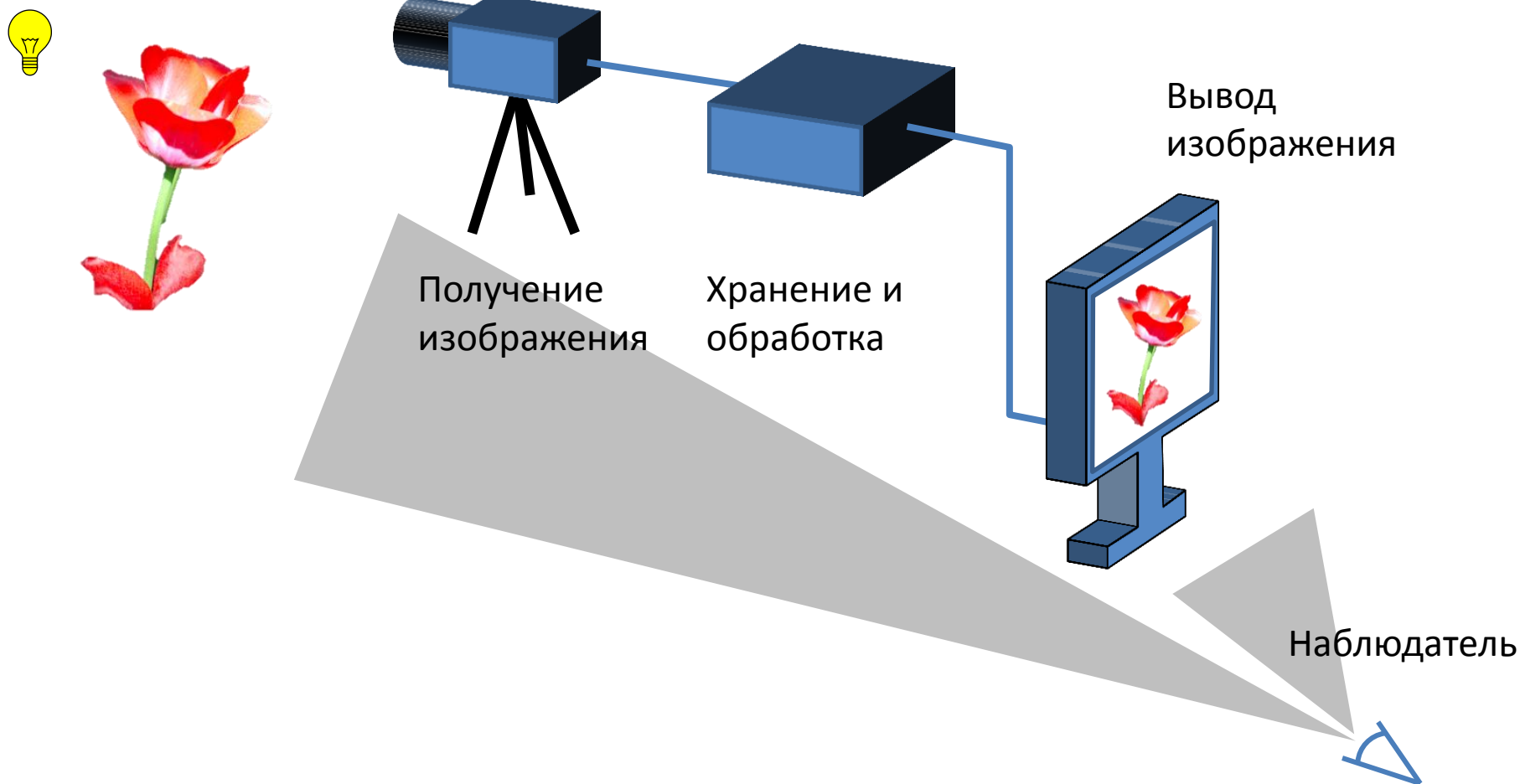
Возможности моделирования ограничены

- ✗ Невозможно передать всю полноту физических законов, по которым происходит перенос световой энергии в мире
- ✓ Возможно моделировать только ключевые и существенные эффекты

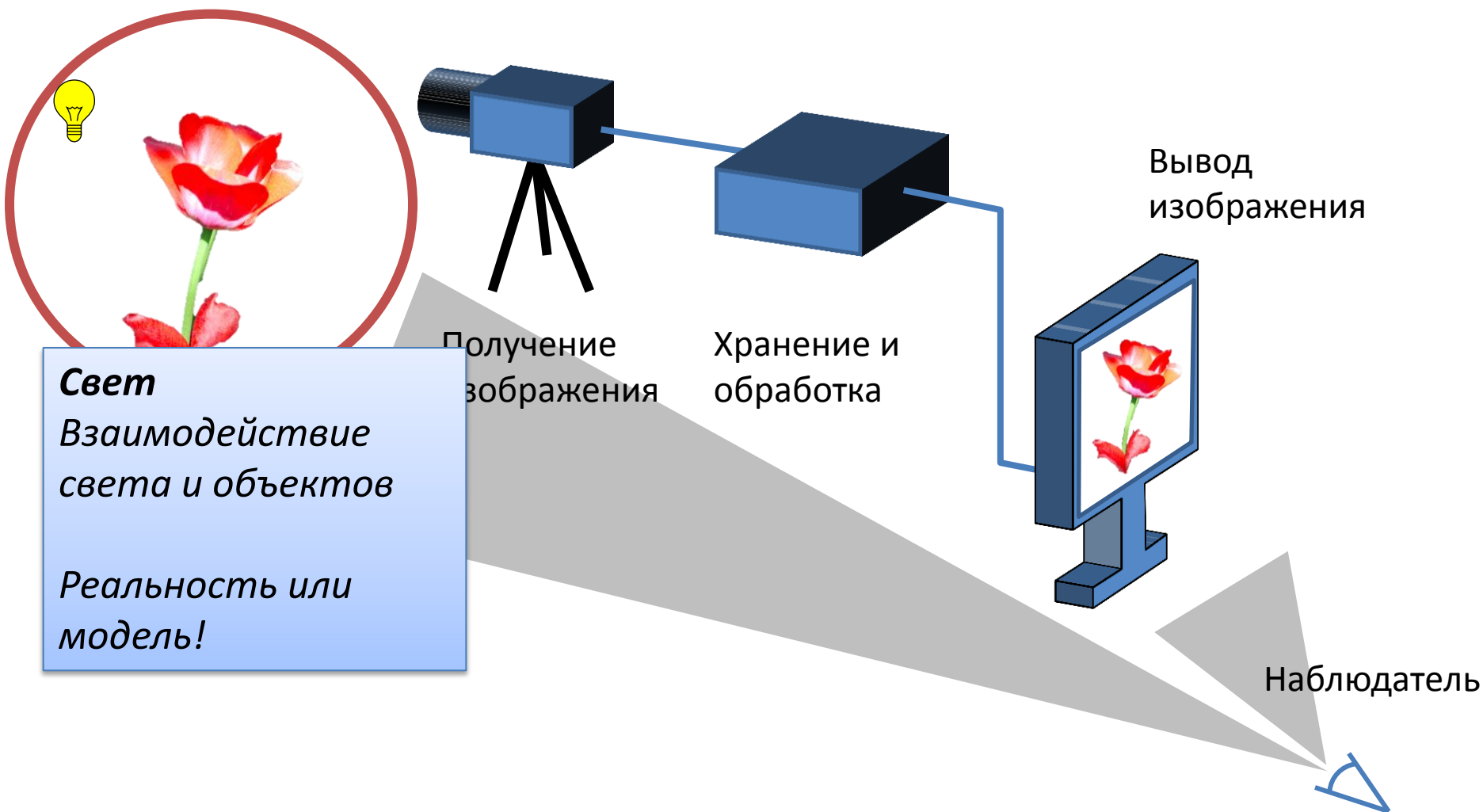
На лекции: структура курса, свет, радиометрия, фотометрия

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

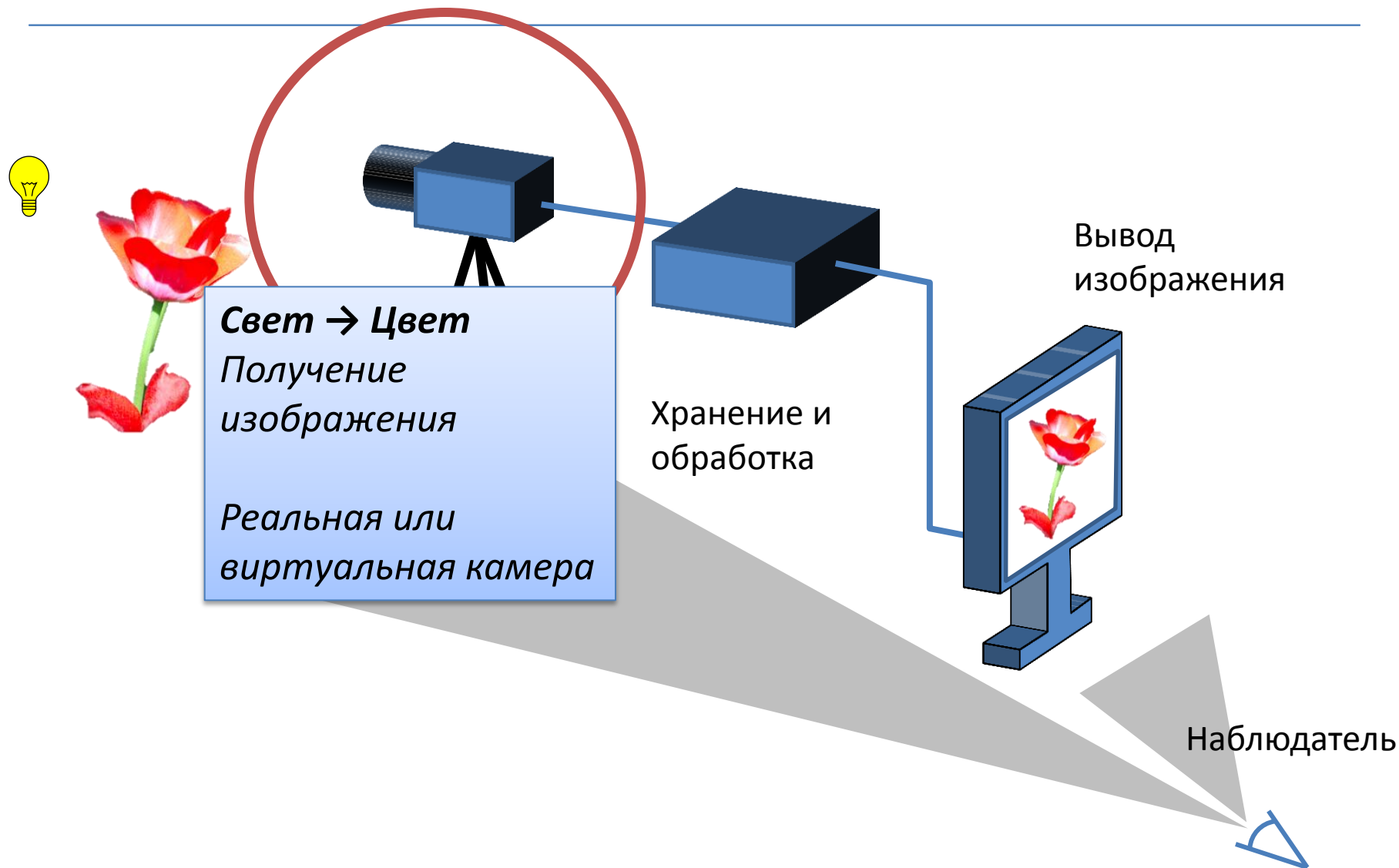
Свет и цвет в графической системе



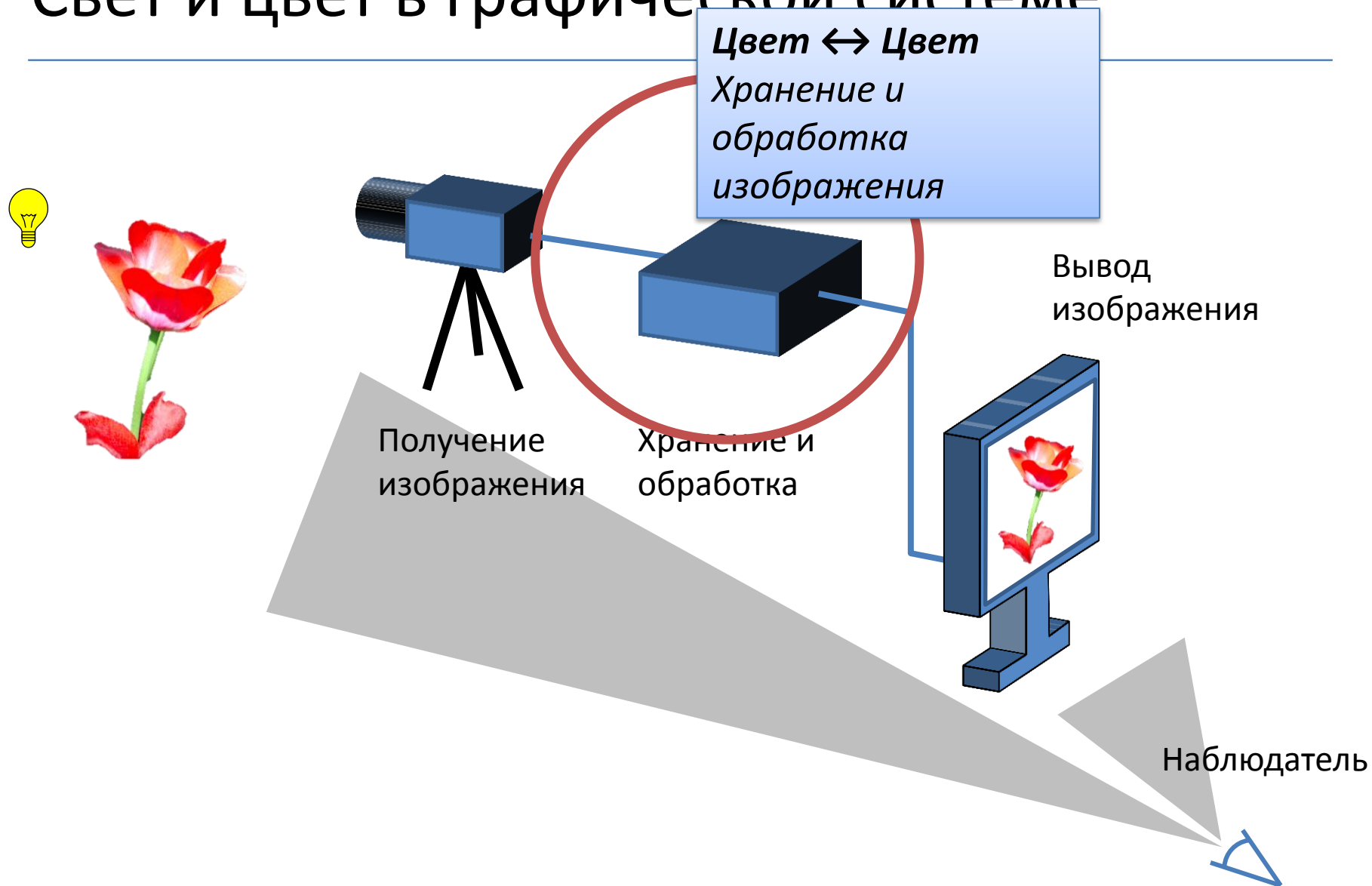
Свет и цвет в графической системе



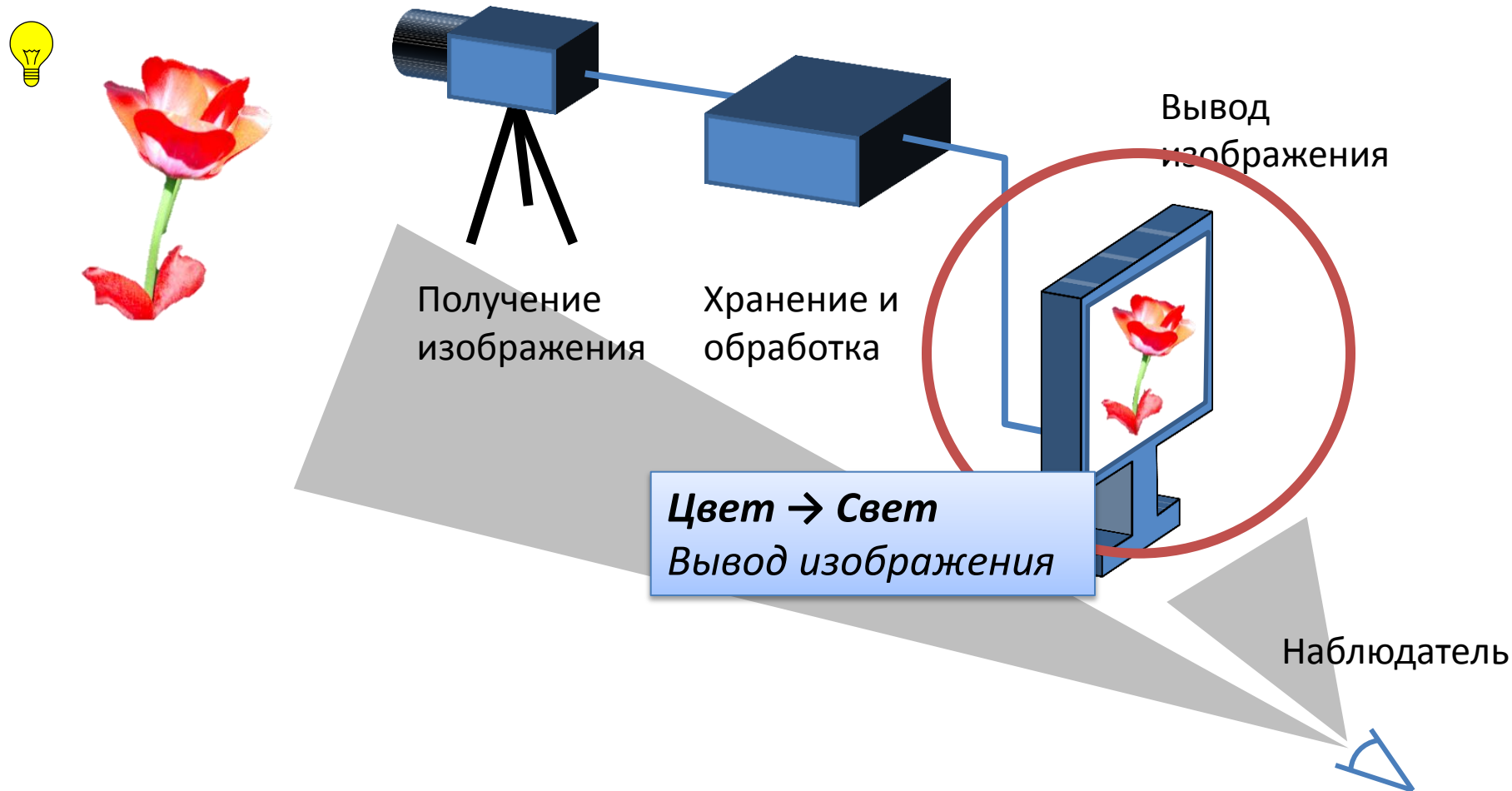
Свет и цвет в графической системе



Свет и цвет в графической системе



Свет и цвет в графической системе

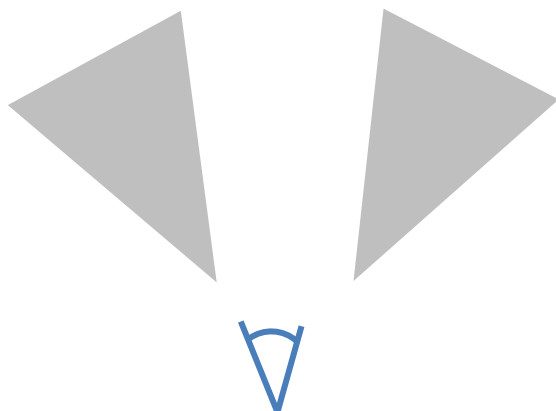


«Хорошая» система

Хотели получить



Получили



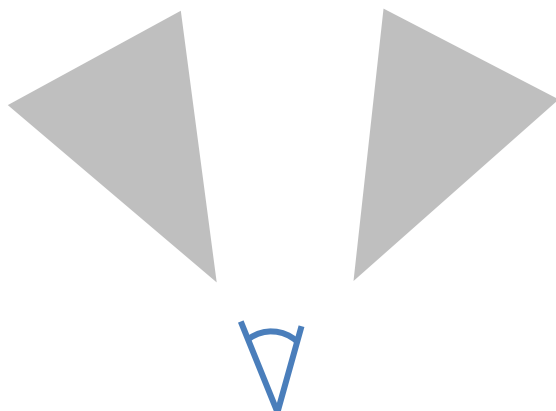
Наблюдатель

«Плохая» система

Хотели получить

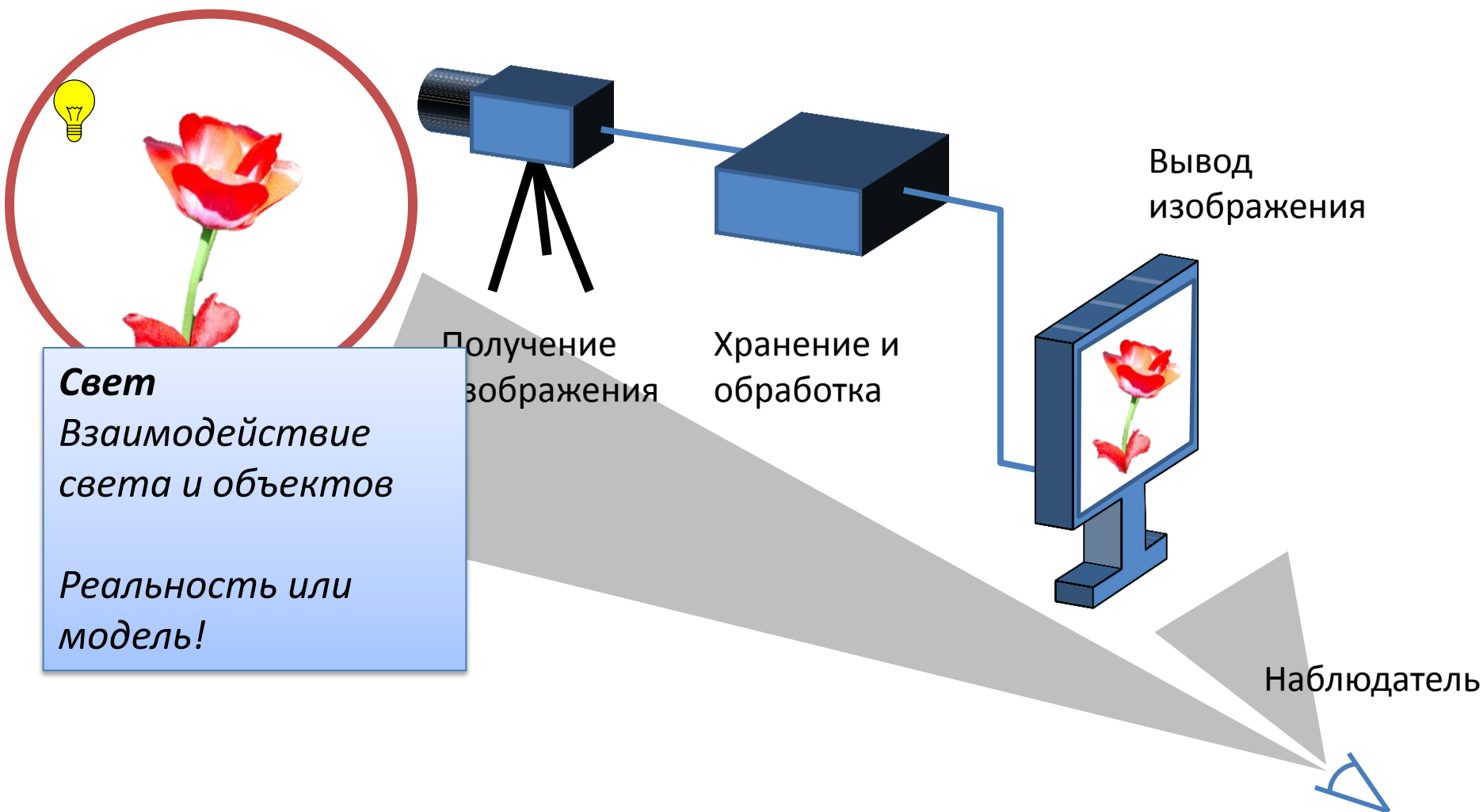


Получили



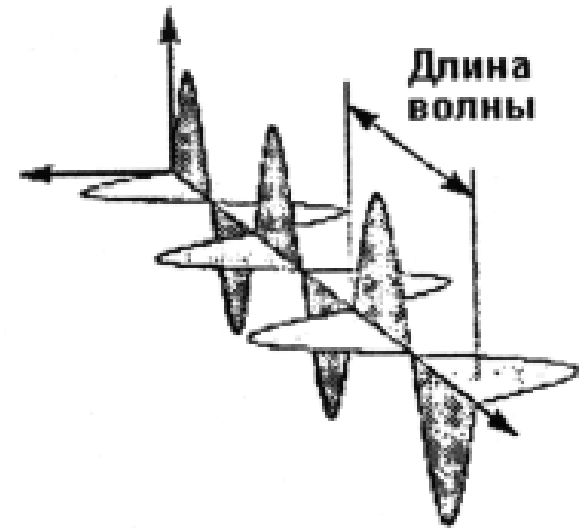
Наблюдатель

Свет и цвет в графической системе



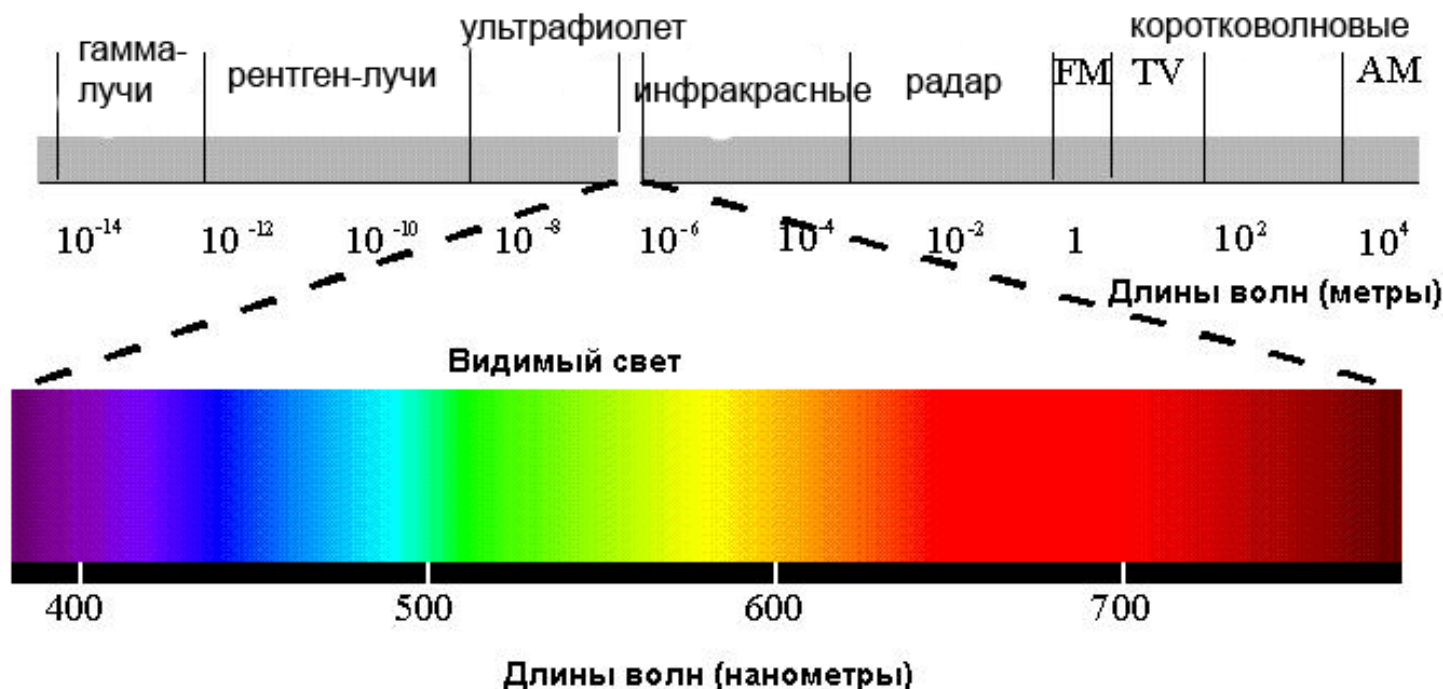
Свет: электромагнитные волны или частицы

- 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

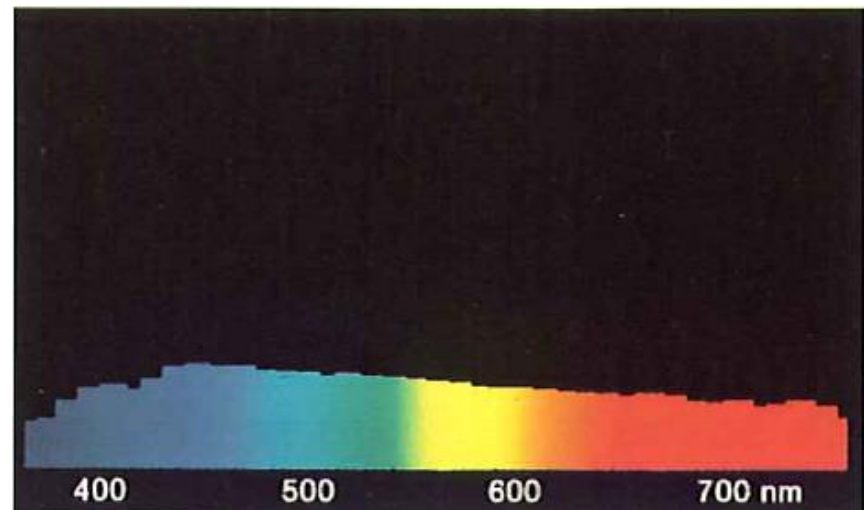
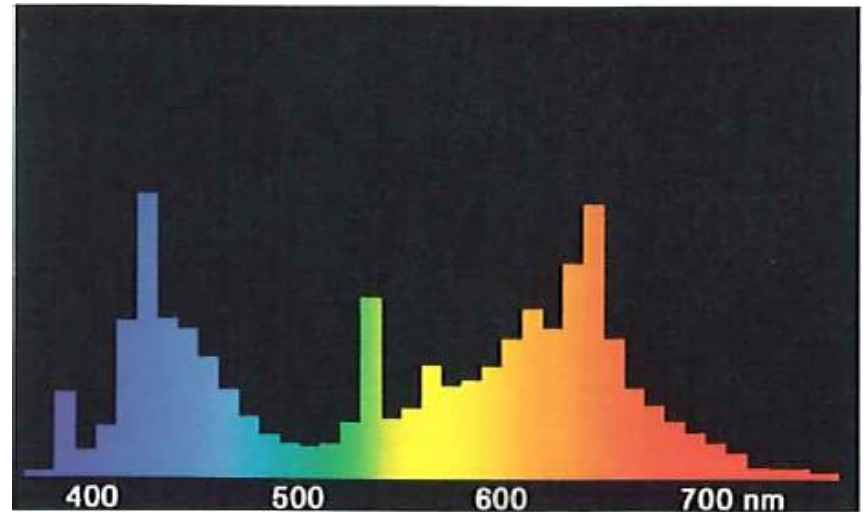
- Видимый свет ~400-700 нанометров
 - 380-470 нм фиолетовый и синий цвет
 - 500-560 нм зеленый
 - 590-760 нм красный
- В более мелких участках этих интервалов цвет излучений соответствует различным оттенкам



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

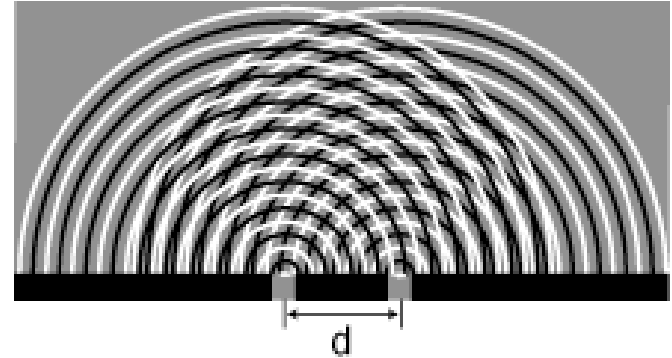
Поток частиц

— геометрическая оптика

Причины дуальности объясняются в квантовой оптике

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

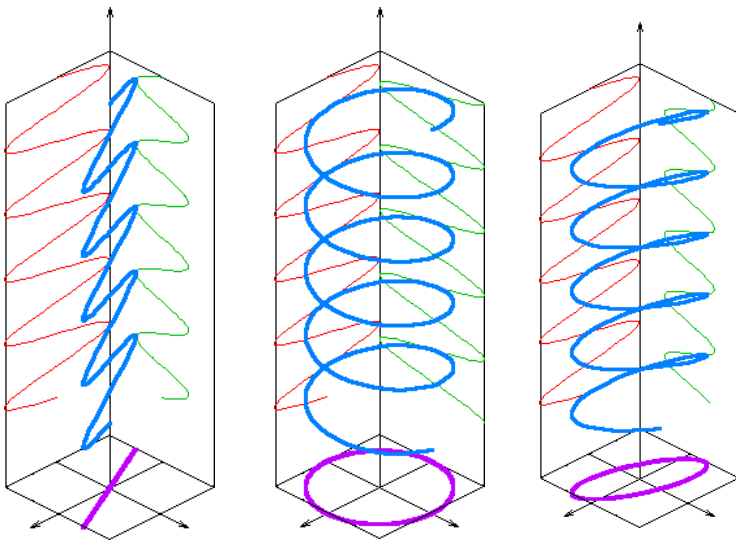


Геометрическая оптика

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

Волновая природа света: поляризация

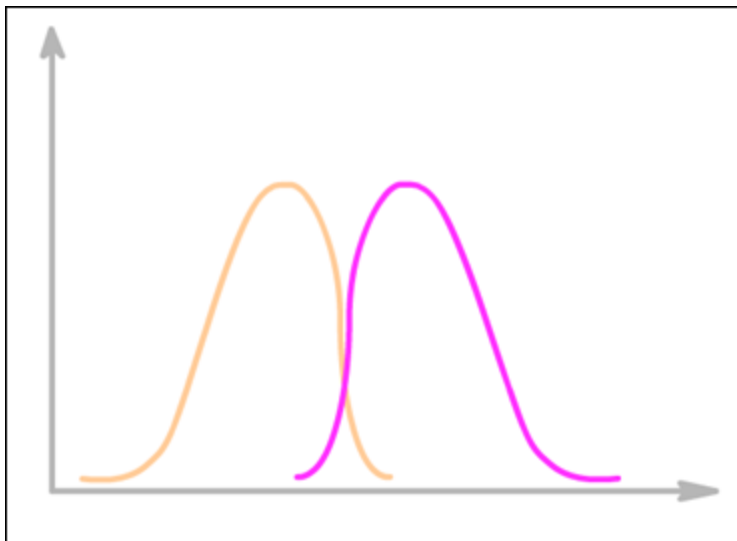
- Световая волна – поперечная волна
- Волновой вектор и вектор амплитуды



Флюоресценция, фосфоресценция и другие нетепловые свечения вещества

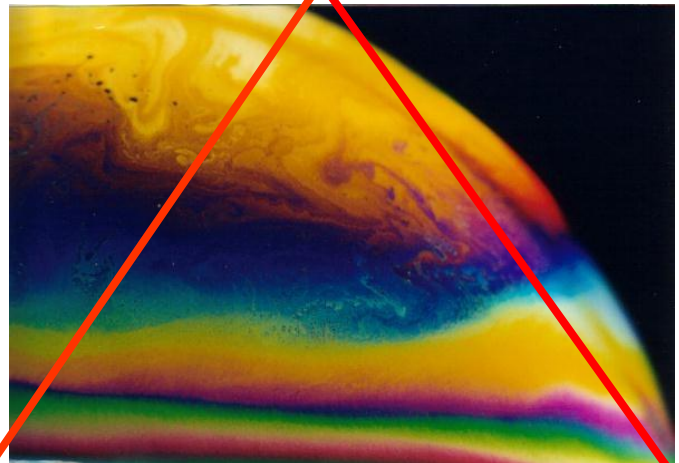
Фотолюминесценция — свечение под действием света (видимого и УФ-диапазона)

- флуоресценция
- фосфоресценция



Геометрическая оптика: итоги

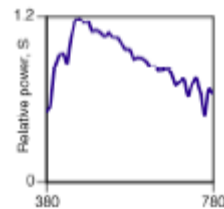
- Далее (**в основном**) мы будем рассматривать свет как поток частиц с разной «длиной волны»
- 👍 Гораздо проще для алгоритмов!
- 🙅 Сразу отбрасываем явления
 - Дифракции
 - Интерференции
 - Поляризации
 - Люминесценции



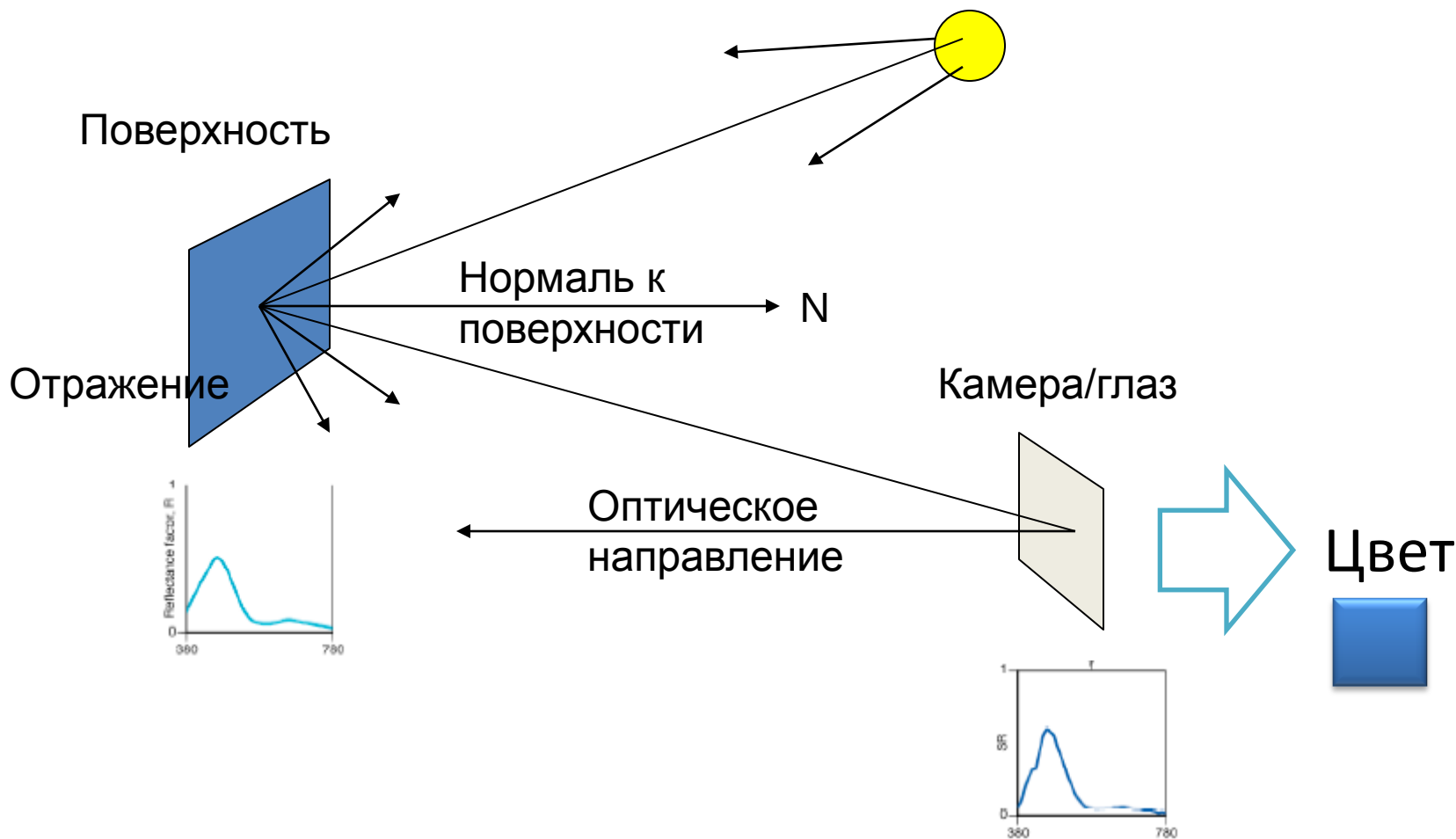
На лекции: структура курса, свет, радиометрия, фотометрия

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

Распространение света

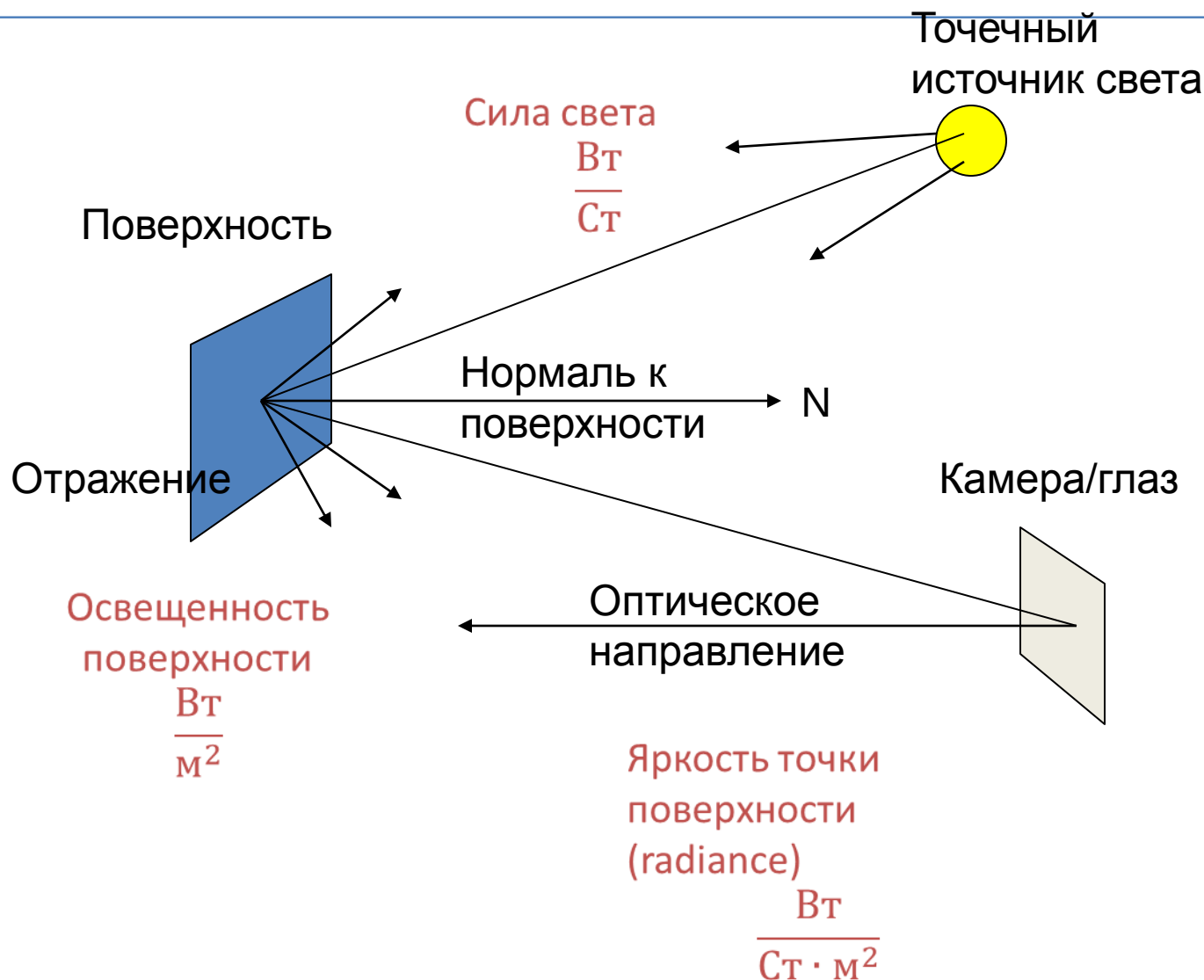


Точечный
источник света



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
(фото)реалистичных изображений виртуальных
трехмерных сцен

Проблемы «лишнего π », «забытого косинуса»...



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**

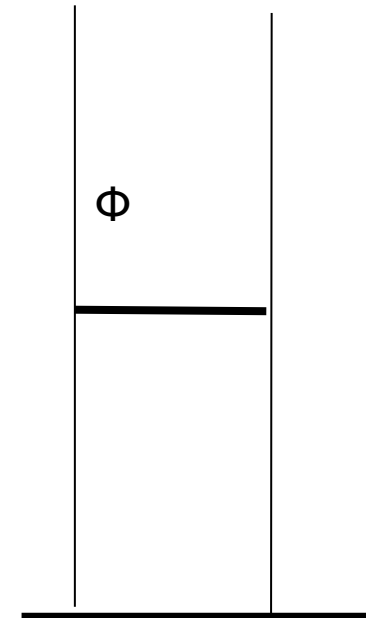
Плохо подходит для наших задач:

- Необходимо выразить излучаемую телом энергию! (например, при нагреве)
- Нужно описать свойства потока энергии
 - Скорость
 - Направление
 - Концентрированность (плотность)

Световой поток (flux)

Поток: энергия, излучаемая в единицу времени для заданной поверхности

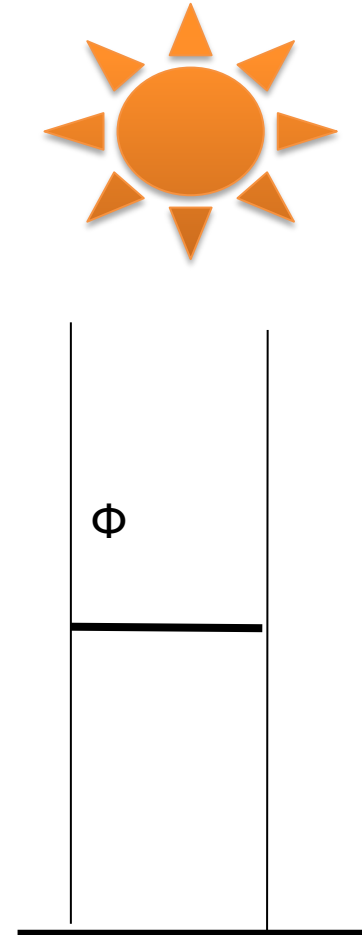
- Обозначение: Φ
- $\Phi = dQ / dt$
- Единицы измерения: **Вт**
(ватт = Дж/с)
- Стационарный процесс!



Световой поток (flux): как измерить?

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

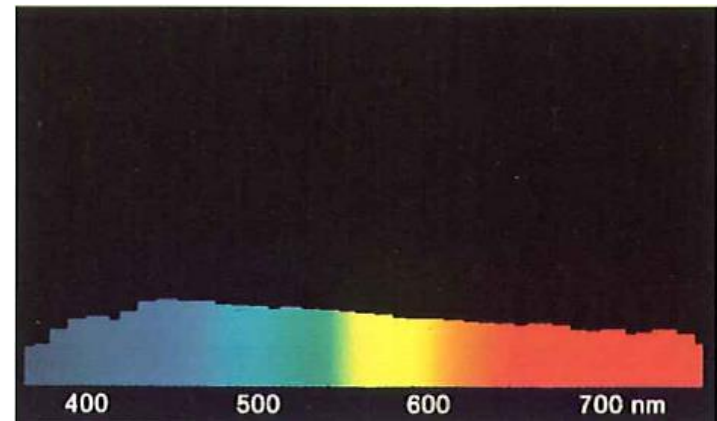
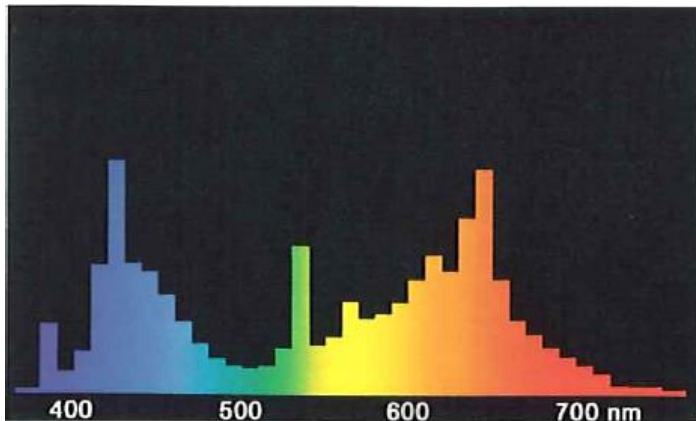
$$Q=mc\Delta T$$



Спектральный поток

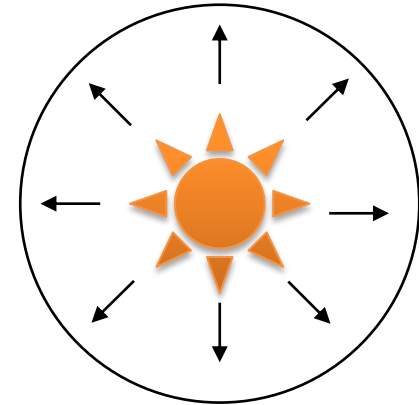
- Φ задает суммарную характеристику по всем длинам волн
- Φ_λ задает поток на данной длине волны

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



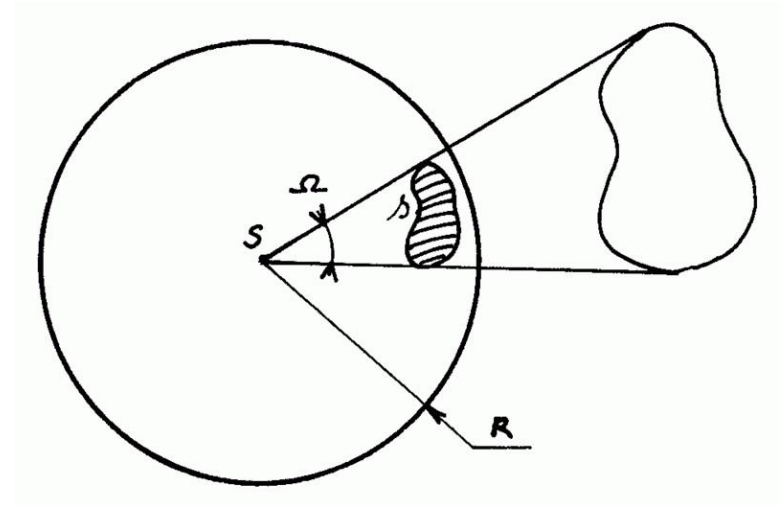
Полный энергетический поток (total radiant flux)

- 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



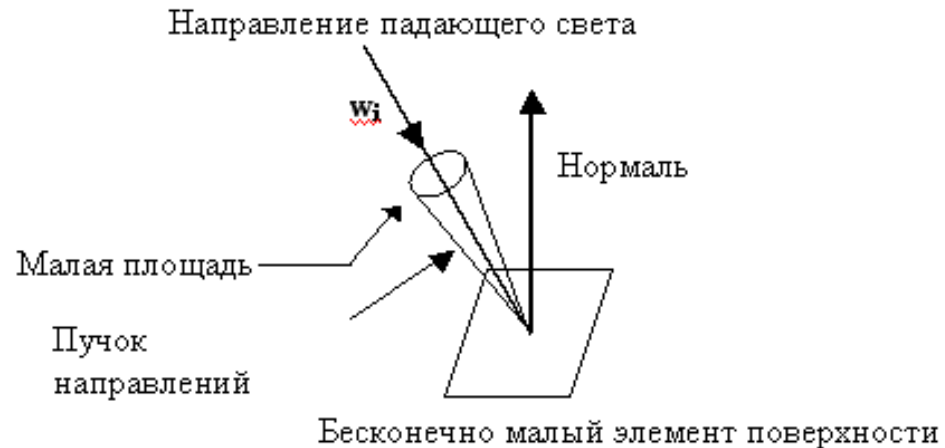
Телесный угол

- 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 $\frac{S}{R^2}$
- 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 $I =$
- Плотность потока света, проходящего через телесный угол
- Единицы измерения:
Вт / Ст



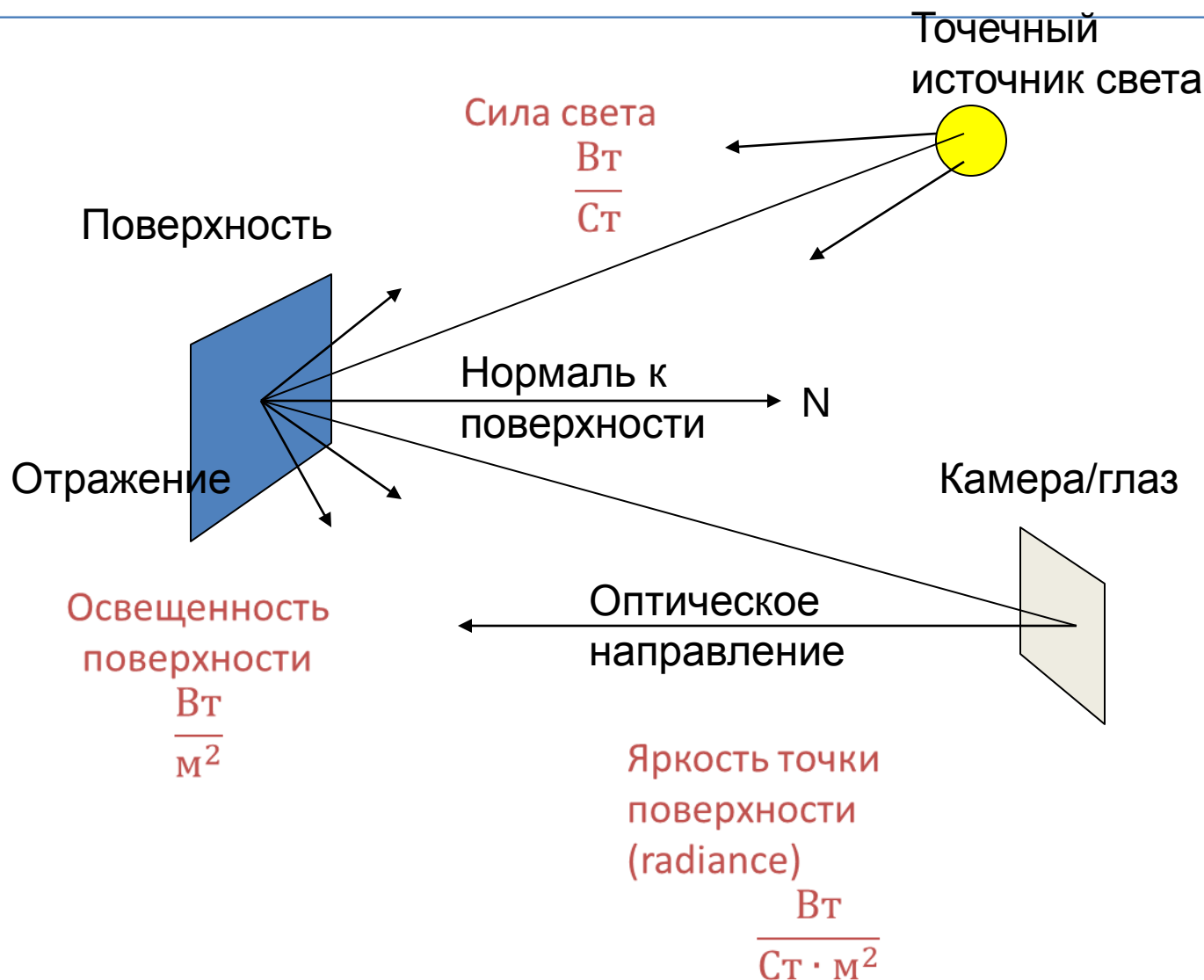
Связь полного потока и силы излучения

$$\Phi = 4\pi I$$

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

Единицы измерения света (радиометрические)

Полный поток
источника света
Вт



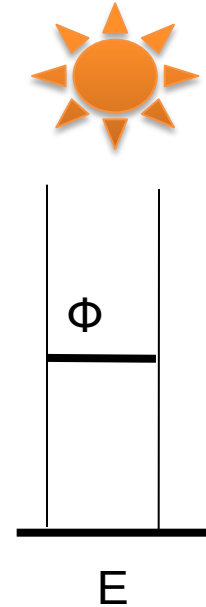
Освещенность и светимость

- 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)

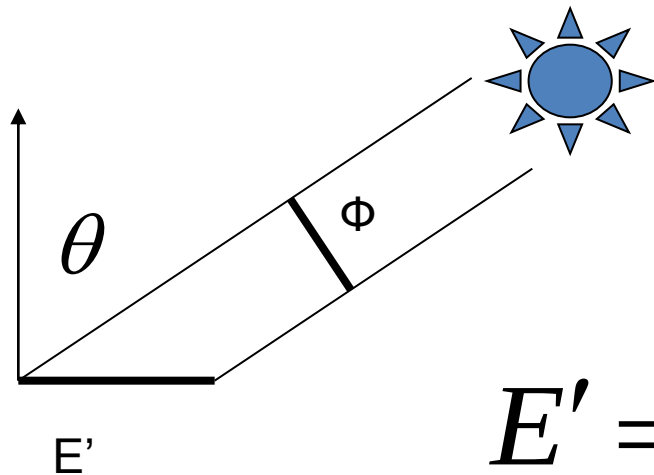
- Обозначение: **E**
- Единицы измерения: **Вт/м²**

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

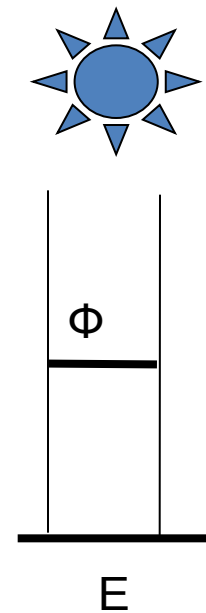


Связь освещенности и «косинуса»

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

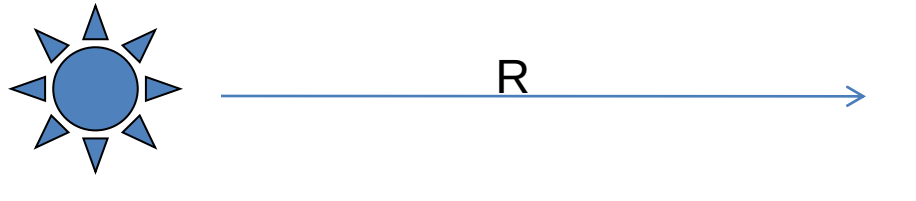


$$E' = E \cos \theta$$



Освещенность и сила света: закон обратных квадратов

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

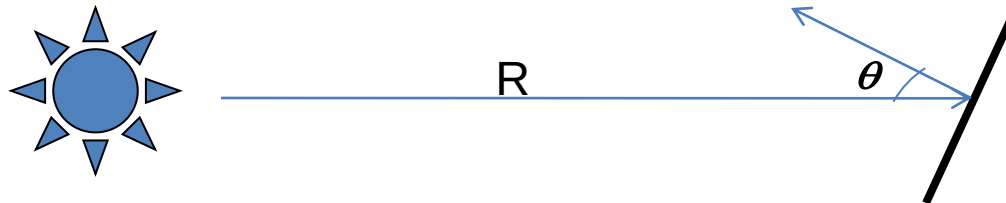


$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I d\omega}{dA} = \frac{I dA}{R^2 dA} = \frac{I}{R^2}$$

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

Закон обратных квадратов (наклонная площадка)

- Пусть площадка с площадью A освещена точечным источником света на расстоянии R
- Под углом θ



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

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

Энергетическая светимость (radiant exitance)

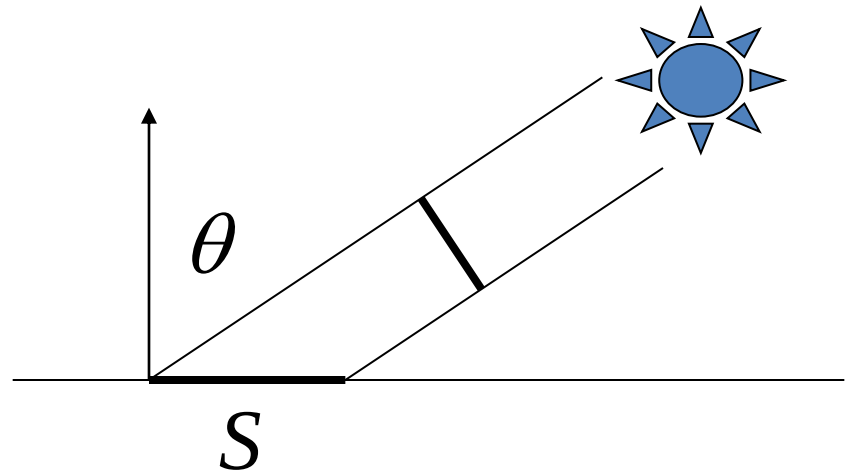
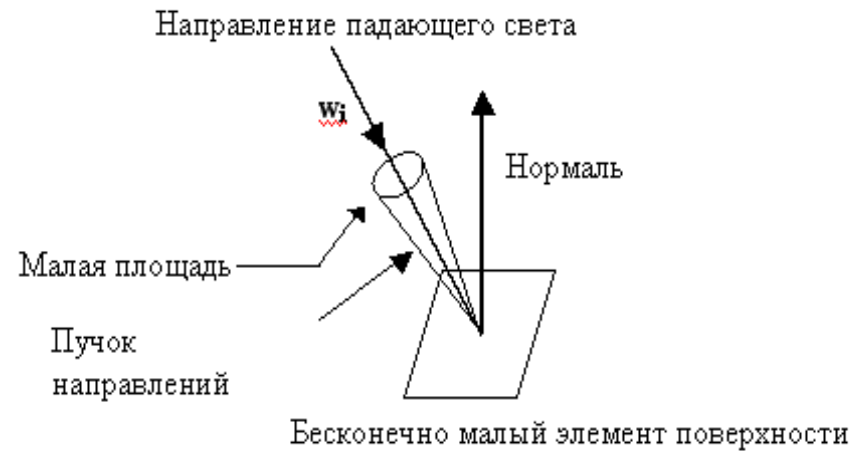
- Обозначение: **M**
- Единицы измерения: **$\text{Вт}/\text{м}^2$**
- В компьютерной графике еще называют **radiosity**

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

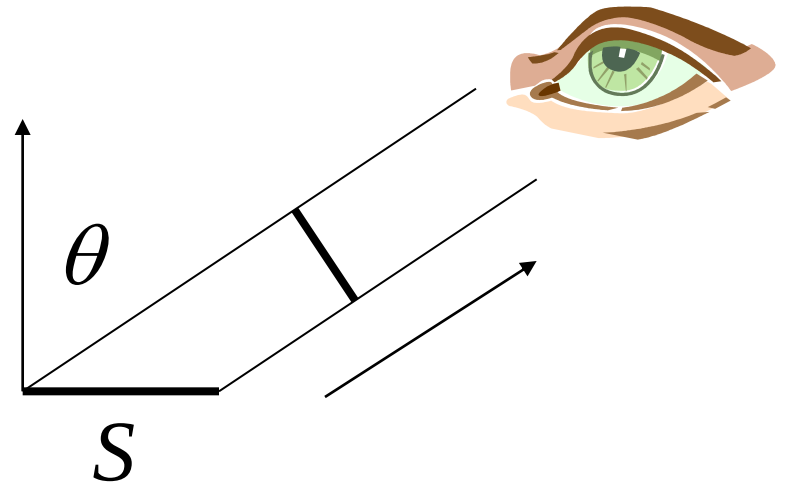
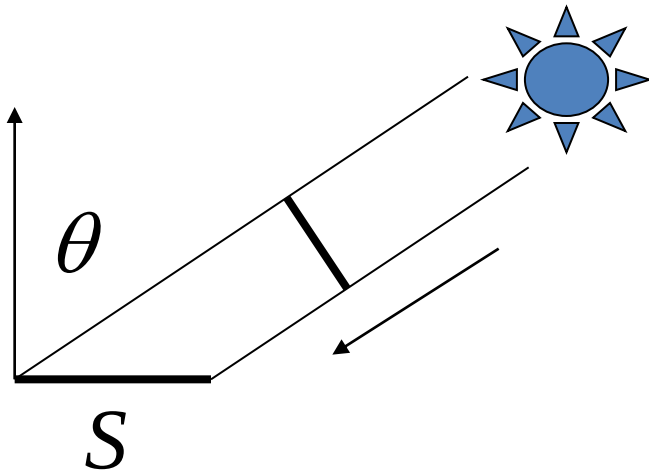
Яркость (radiance)

- 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



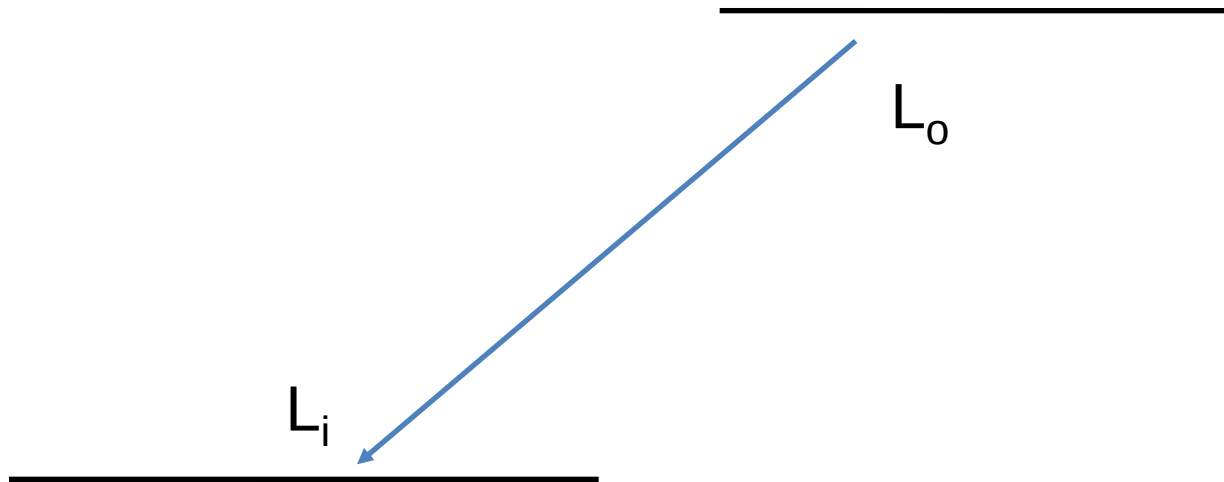
Светимость



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

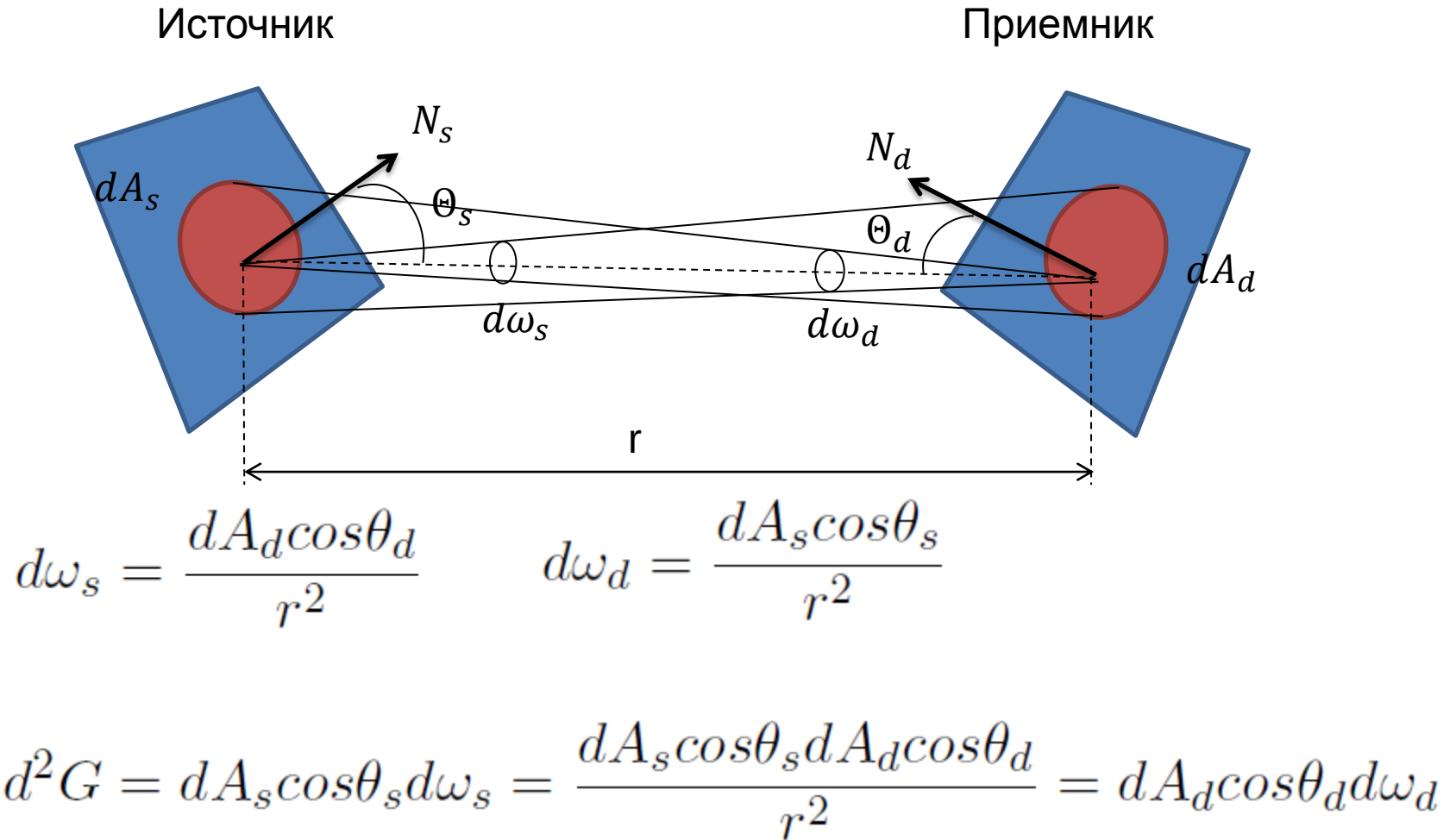
Свойства излучения

- “Передается” в вакууме без потерь!

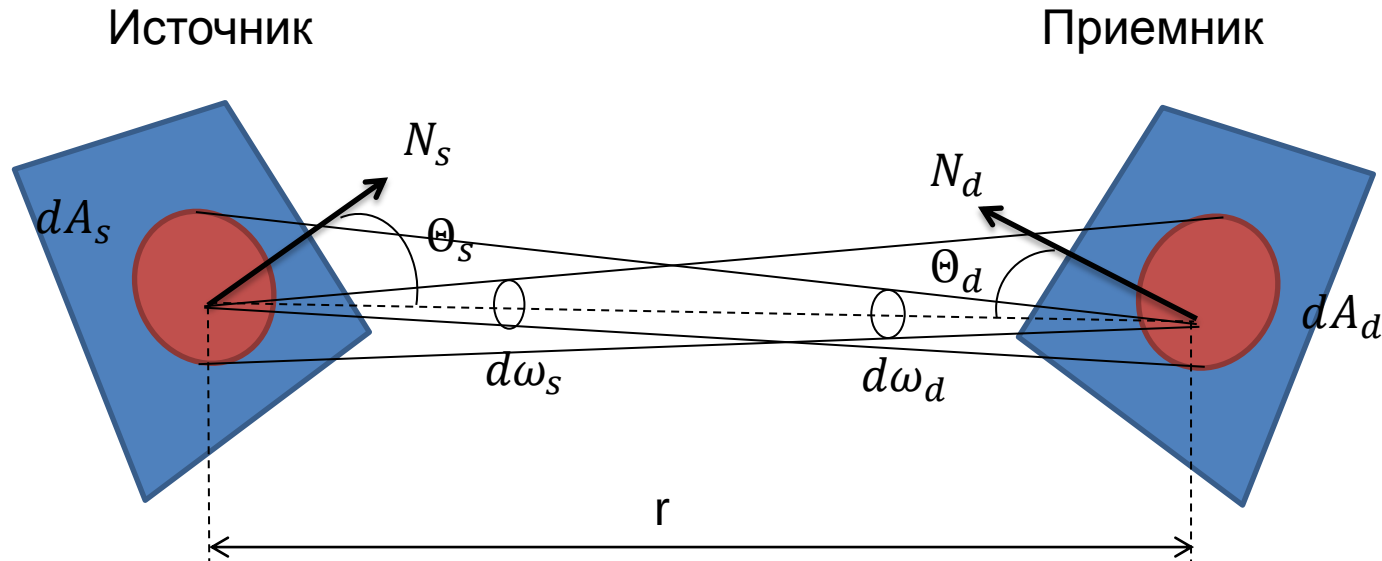


- Фотокамера записывает именно яркость
- Глаз реагирует на яркость

Почему передается без потерь? Закон сохранения яркости



Почему передается без потерь? Закон сохранения яркости (2)



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

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

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 ²
Земная прямая солнечная освещенность, чистое небо, зима, юго-восток США, полдень	852 Вт/м ²
Земная полная (полусферическая) освещенность, чистое небо, зима, юго-восток США, полдень	686 Вт/м ²
Яркость солнца на поверхности	$2,3 \times 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ ст}^{-1}$
Видимая яркость солнца с Земли	$1,4 \times 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ ст}^{-1}$

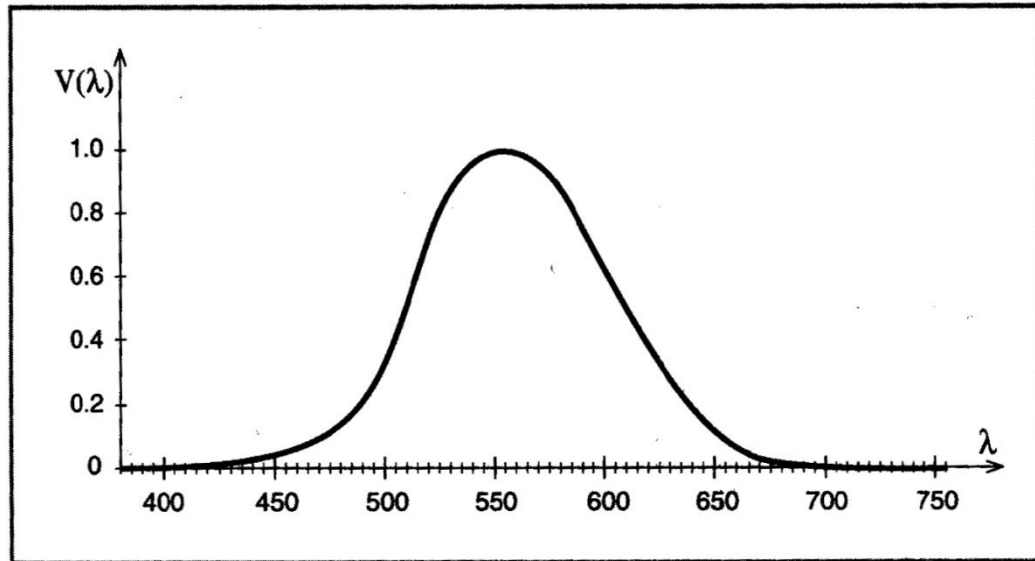
На лекции: свет, радиометрия, фотометрия

- 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

Преобразование между радиометрическими и фотометрическими единицами



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

Q_v – одна из единиц Φ, I, E, M, L

Радиометрические и фотометрические единицы

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

Световой поток

Световой поток - (люмен – ватт)

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



1000 lumens



800 lumens



1700 lumens

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 1м^2 -
ватт / М^2)

Яркость

- Яркость - (кандела на квм - ватт / стерадиан / м²)
= НИТ.
 - Luminance

Литература

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