

# Пролог – правила учебы:

- Занятия без перерыва, но равные на **10** минут.
- Во время занятий говорю **только я**, или кто-то отвечает на мой вопрос. Выгоню без вопросов и больше не пушу.
- Все продается и все покупается, кроме лаб (хотя в конце года обычно устраивается распродажа), но только на очки.
- ЛР – **10+10**, КП – **100+100**, Зачет – **50**, ТР – **50+50**.
- Остаток определяет оценку за зачет и тем кто дойдет до конца экзамен:  
>**150** – отлично, >**100** – снимаются **1** вопрос, меньше **50** – ничего.
- Не хватает **1** очка – это означает, что не хватает **о**чка и Вы не смеете претендовать на этот пункт.
- Откуда берутся очки? **Их зарабатывают:**
  - ✓ **Задачи** после лекции
  - ✓ **Дополнительные задачи** на лекции
  - ✓ **Дополнительные элементы** в лабораторной работе – приборбасы
  - ✓ По ходу выполнения **КП**
  - ✓ На 1-ой защите КП – распределяются по местам, Первое место = **100**, последнее – ничего
  - ✓ Поощряется любая инициатива, способствующая учебе – **реферат, доклад, ...**



*В добрый час! Очки к сессии считают!*

# Правила оформления домашних заданий 1:

---

[BudakVP@mpei.ru](mailto:BudakVP@mpei.ru) до 24<sup>00</sup> дня лекции

Обязательно тема: *Предмет, задание номер: КГ\_1*

Обращение-приветствие: *Уважаемый Владимир Павлович!*

Суть Вашего письма (угадываю содержимое только двух дам)

Подпись – анонимки не рассматриваю и Вам не рекомендую: *С уважением, Орлов В.М.*

Выполненное задание в файле: *Фамилия(латинскими)\_№-N*, где № - номер задания, N – вариант.

Каждый вариант содержит все решенные задания.

Предыдущий вариант я стираю.

Если решение задачи имеет несколько файлов, то создается директорий с *ФамилияИО\_№*

Если решение состоит из одного файла, то файл имеет имя *Familia\_№*

Все аналитически решенные задачи объединяются в один файл *Фамилия\_№.doc*

Аналитические преобразования в редакторе формул MathType с текстовыми пояснениями

Обозначения в формулах как в книгах: Times New Roman, переменные – курсив, вектора – полужирный, звездочки умножения не ставить, формулы в обычной записи:  $\sin 2x$

Программы перед отправлением проверяется на работу, чтобы загружалось в Matlab

При выполнении задачи аналитически и программа – очки удваиваются

Решения в MathCAD не принимаются!

---

*Готовое задание архивируется WinRar,  
архив имеет имя Фамилия(латинскими)\_№-N*

# Правила оформления домашних заданий 2:

---

1. В задаче обязательно указываются условия (кратко, без условий не рассматриваются) и очки (без указания очков минимум – 5).
2. Выкладки в программе не нужны, но я должен понимать, откуда взялось число, загадочные константы не рассматриваются.
3. Каждая программа начинается в главной форме или подпрограмме с комментариев:  
% ФИО (С) год  
% Задача № (очки)  
% Условия
4. Каждая подпрограмма содержит комментарий цель, входные и выходные переменные.
5. Выравнивание логических структур, отступы по tab.
6. Если нужно, то программа снабжается комментарием по выполнению.

## **Плагат!**

- По ВАК – дословное совпадение абзаца, оператора, формулы, ...
- Проверяю в один день
- Пользоваться, чем угодно, кроме copy – paste
- Первый раз – очки не защитываются, второй раз – больше не играю

---

*Это игра – сильный мужчина любит игру!*

*Претензии не принимаются: не хочешь – по учебному графику.*

---

# Структура изображения



Будак Владимир Павлович,  
НИУ «МЭИ»  
кафедра светотехники

*T. Nishita* (Fukuyama University)  
*E. Nakamae* (Hiroshima Prefectural University)  
**SIGGRAPH'94**

---

☐: +7 (495) 763-5239

[BudakVP@mpei.ru](mailto:BudakVP@mpei.ru)



# Изображение

---

- Изображение от глагола изобразить
  - Предмет, рисунок, картина, изображающие что-то
  - Зрительное воспроизведение чего-то
  - Оптика – олтѣка – взгляд, зрение – наука о зрительном восприятии
  - Оптическое изображение – картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему света от объекта
  - Оптическое изображение с определённой точностью воспроизводит в виде соответствующего распределения света контуры и детали этого объекта
  - Видами изображения являются фотография, киноизображение, телевизионное, цифровое
- 

*Теория изображения берет начало с фотографии*

# Структура оптического изображения



Абу Али аль-Хайсам (Alhazen) - (965, Басра – 1039, Каир)

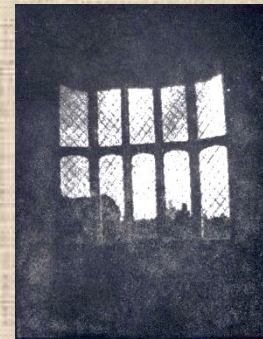
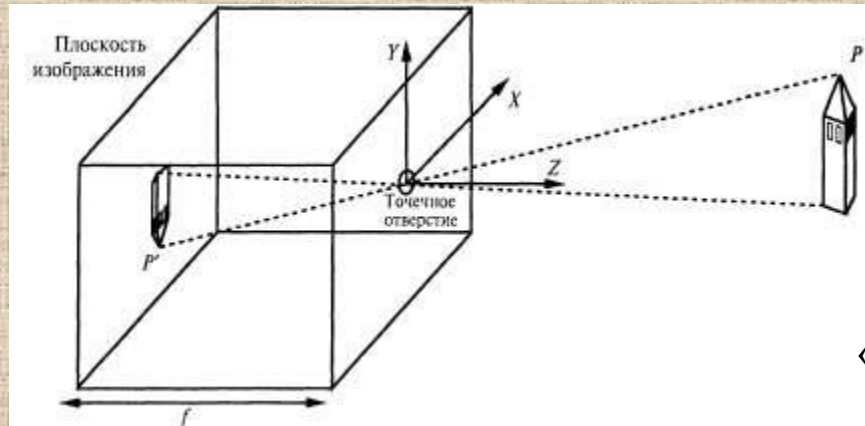
XII веке сочинение было переведено на латинский язык «Сокровище оптики» (*Opticae thesaurus*)

Эразм Витело (Erasmus Witelo, 1220 – 1280) – «*Perspectiva*»

Иоганн Кеплер (Johannes Kepler, 1571 – 1630) – «Дополнения к Вителлию» (*Ad Vitellionem paralipomena*), 1604



**Камера-обскура (camera obscura – тёмная комната)**



«Окно аббатства Лекок»,  
Тальбот, 1835



«Мастерская художника»,  
Дагерр, 1837

*Изображение – перспективная проекция, но как образуются полутона, что такое интенсивность?*

# Фотометрия



- Пьер Бугер (Pierre Bouguer, 1698 – 1758) – Оптический трактат о градации света (L'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière. Paris, 1729)
- 1807 – понятие энергии, Томасом Юнгом (Thomas Young, 1773 – 1829)
- 1842 – закон сохранения энергии, Роберт Майер (Robert Mayer, 1814 – 1878)



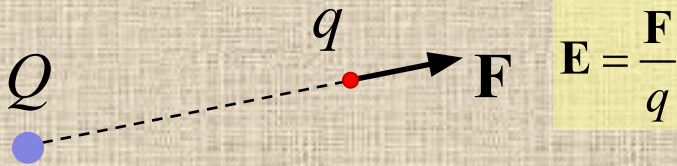
П. Рубенс, 1613

- Схемы измерения, ослабители
- Свойства материалов
- Закон Bouguer – экспоненциального ослабления
- Иоганн Ламберт (Johann Lambert, 1728 – 1777), *Photometria*, 1760
- Август Бер (August Beer, 1825—1863), *Grundriss des photometrischen Calcüles*, 1854
- Джеймс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell, 1831 – 1879), «Трактат об электричестве и магнетизме», *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1873
- Шарль Фабри (Charles Fabry, 1867 - 1945), *Общее введение в фотометрию*, 1927

Фотометрия – раздел оптики, посвященный энергетике излучений

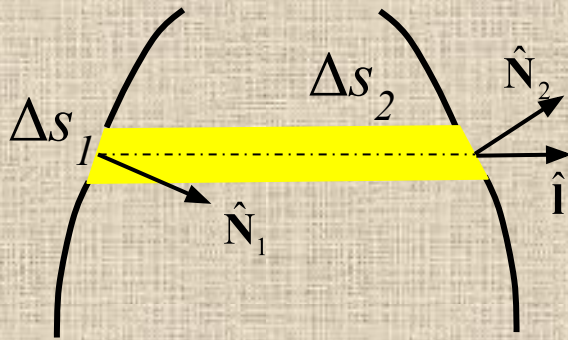
# Световое поле

А.А.Гершуна «Световое поле»: световое поле – область пространства, исследуемого с целью изучения процессов переноса световой энергии

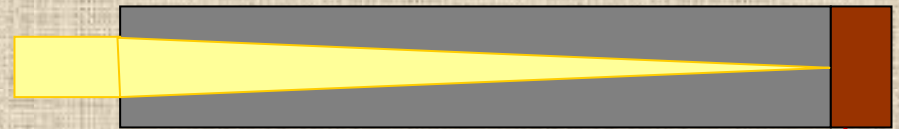


## Оптический приемник:

- квадратичный относительно поля
- размеры  $\gg \lambda$
- постоянная времени  $\gg T$



$$\Delta\Phi \approx L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) \frac{\Delta s(\mathbf{r}_1)(\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_1), \hat{\mathbf{i}})\Delta s(\mathbf{r}_2)(\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_2), \hat{\mathbf{i}})}{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2} = L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})\Delta\hat{\mathbf{i}}\Delta\sigma_2, \quad \hat{\mathbf{i}} = \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$



$$\Delta E_2(\mathbf{r}) = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma_2} = \int_{\Delta\Omega_1} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}})d\hat{\mathbf{i}} \xrightarrow{\Delta\Omega_1 \rightarrow 0} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}})\Delta\Omega_1 \Rightarrow L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) \approx \frac{\Delta E_{2N}(\mathbf{r})}{\Delta\Omega_1}$$



Графически в каждой точке поля можно изобразить некоторую поверхность значений яркости от направлений – тело яркости



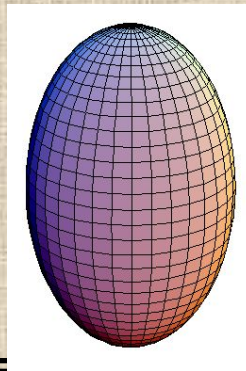
# Лучевая модель светового поля

- Поле состоит из лучей, как вещество из атомов
- Вдоль луча перетекает световая энергия с мощностью  $L(\mathbf{r}, \mathbf{l})$

$$\begin{aligned} H_N(\mathbf{r}) &= \oint L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}} \\ &= \int_{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) \geq 0} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}} - \int_{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) < 0} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})|(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}})| d\hat{\mathbf{l}} \\ &\equiv E_+(\mathbf{r}) - E_-(\mathbf{r}) = |\mathbf{E}(\mathbf{r})| \end{aligned}$$

$$E_0(\mathbf{r}) \equiv cu(\mathbf{r}) = \oint L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}}$$

Тело яркости



*Процесс переноса энергии в модели светового поля происходит в пятимерном фазовом пространстве  $(\mathbf{r}, \mathbf{l})$*

# Иерархия физических моделей света

Квантовая  
электродинамика

Язык операторов рождения и уничтожения фотонов –  
общая теория, наиболее удаленная от эксперимента

Количество фотонов  $\gg 1$

Волновая  
оптика

Напряженности и индукции электрического и  
магнитного полей – уравнения Maxwell +  
материальные уравнения = волновое уравнение

Длина волны  $\lambda \rightarrow 0$

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Лучевое  
приближение

$$(\nabla \phi)^2 = n^2 \Rightarrow \frac{d}{ds} (n \hat{\mathbf{l}}) = \nabla n \quad - \text{уравнения эйконала и луча}$$

$$(\hat{\mathbf{l}}, \nabla) L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \varepsilon L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = \frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \oint x(\hat{\mathbf{l}}', \hat{\mathbf{l}}) L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}') d\hat{\mathbf{l}}' + Q(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) \quad - \text{УПИ}$$

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = \frac{(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{N}})}{\lambda^2} \int \Gamma(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) e^{ik\hat{\mathbf{l}}\boldsymbol{\rho}} d^2\rho, \quad \Gamma(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) = \left\langle E(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}) E^*(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}) \right\rangle$$

# Траектория луча

---

Уравнение эйконала:  $\nabla\phi = \hat{s}n$      $\hat{s} = \frac{d\mathbf{r}}{ds}$      $n \frac{d\mathbf{r}}{ds} = \nabla\phi$      $\frac{d}{ds} \left( n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \frac{d}{ds} \nabla\phi$

$$\frac{d}{ds} \nabla\phi = (\hat{s}, \nabla) \nabla\phi = \left( \frac{\nabla\phi}{n}, \nabla \right) \nabla\phi = \frac{1}{2n} \nabla (\nabla\phi)^2 = \frac{1}{2n} \nabla n^2 = \nabla n$$

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla n$$

Однородная среда:  $n \neq n(\mathbf{r})$  или  $\nabla n = 0$      $\frac{d^2 \mathbf{r}}{ds^2} = 0$      $\mathbf{r} = \mathbf{a} + s\mathbf{b}$

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0, \quad \left. \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right|_{s=0} = \hat{s} \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + s\hat{s}$$

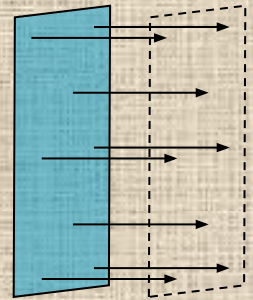
---

*Исследование структуры поля в этом случае сводится к построениям прямых линий с помощью линейки – приближение геометрической оптики*

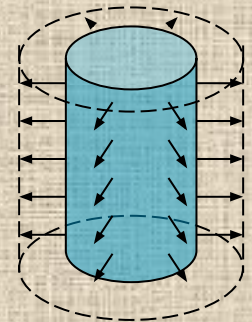
# Лучевая и волновая оптика

Форма волновой поверхности определяет тип волны:

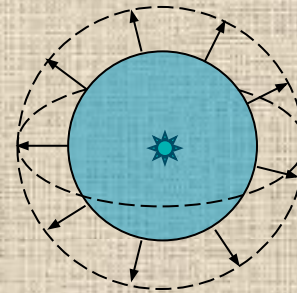
Плоская волна



Цилиндрическая волна



Сферическая волна



волновой фронт

луч

волновые поверхности

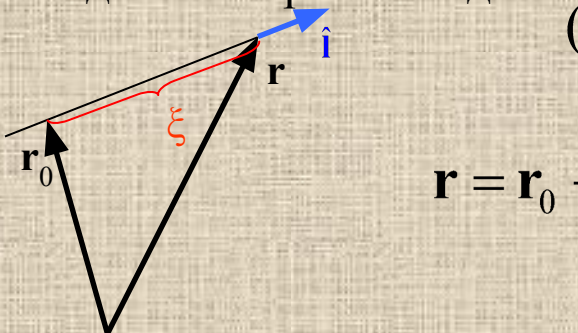
*Луч всегда перпендикулярен волновому фронту в каждой точке пространства*

# Уравнение переноса излучения (УПИ)

$$(\hat{\mathbf{l}}, \nabla)L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = -\varepsilon L + \frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \oint x(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}') d\hat{\mathbf{l}}' + Q(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}), \quad \frac{d}{dl} = (\hat{\mathbf{l}}, \nabla), \quad \Lambda = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Среда чисто поглощающая ( $\Lambda=0$ ,  $\varepsilon=\kappa$ ) и без источников излучения  $Q(\mathbf{r})=0$ .

Тогда УПИ примет вид



$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}} \Rightarrow \frac{dL(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}})}{d\xi} = -\kappa(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}) L(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}})$$

Откуда имеем закон Bouguer

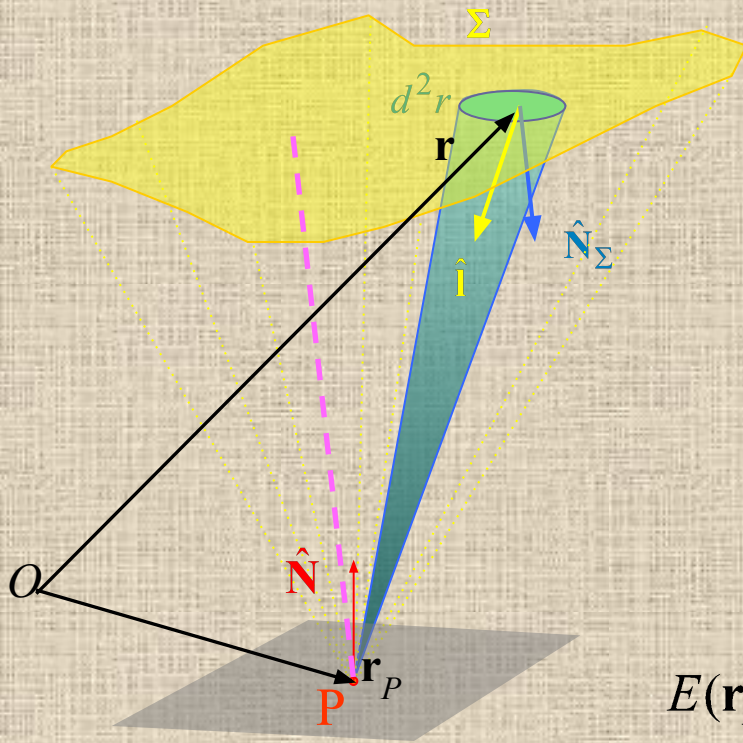
$$\left\{ -\int_0^{\xi} \kappa(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}) d\xi \right\}$$

Если среда однородная  $\kappa \neq \kappa(\mathbf{r})$ , то закон Bouguer принимает вид

$$L(\mathbf{r}_0 + \zeta \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}) = L(\mathbf{r}_0, \hat{\mathbf{l}}) e^{-\kappa \zeta} \xrightarrow{\kappa=0} L(\mathbf{r}_0, \hat{\mathbf{l}})$$

*Возьми три зеркала, и два сначала Равно отставь, а третье вдаль попять, Чтобы твой взгляд оно меж них встречало... Хоть по количеству не столь обилен Далекий блеск, он яркостью своей Другим, как ты увидишь, равносилен. (Д.Алигьери «Божественная комедия», Рай, Песнь 2: 97)*

# Расчет освещенности от поверхности



$$E(\mathbf{r}_P) = \int_{(\Omega)} L(\mathbf{r}_P, \hat{\mathbf{l}}) (\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}}$$

$$d\hat{\mathbf{l}} = \frac{(\hat{\mathbf{N}}_\Sigma, \hat{\mathbf{l}}) d^2 r}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_P)^2}$$

$$E(\mathbf{r}_P) = \int_{(\Sigma)} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) \frac{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) (\hat{\mathbf{N}}_\Sigma, \hat{\mathbf{l}})}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_P)^2} d^2 r$$

$$E(\mathbf{r}_P) \approx \frac{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{R}})}{R^2} \int_{(\Sigma)} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{R}}) (\hat{\mathbf{N}}_\Sigma, \hat{\mathbf{R}}) d^2 r \equiv \frac{I(\hat{\mathbf{R}})}{R^2} (\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{R}})$$

Для малоразмерных (точечных) объектов возможно введение понятия силы света  $I$