

---

# Световое поле



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 – изобразить: предмет, рисунок, картина, изображающие что-то
  - Зрительное воспроизведение с определенной точностью чего-то
  - Оптика – οπτική – взгляд, зрение – наука о зрительном восприятии
  - Древние греки первыми размышляли о соответствии наших представлений с окружающим миром
  - Зрительные лучи исходят из глаза и ощупывают окружающие объекты
  - Евклид и Птолемей установили законы зрительных лучей, законы их зеркального отражения
- 
- 

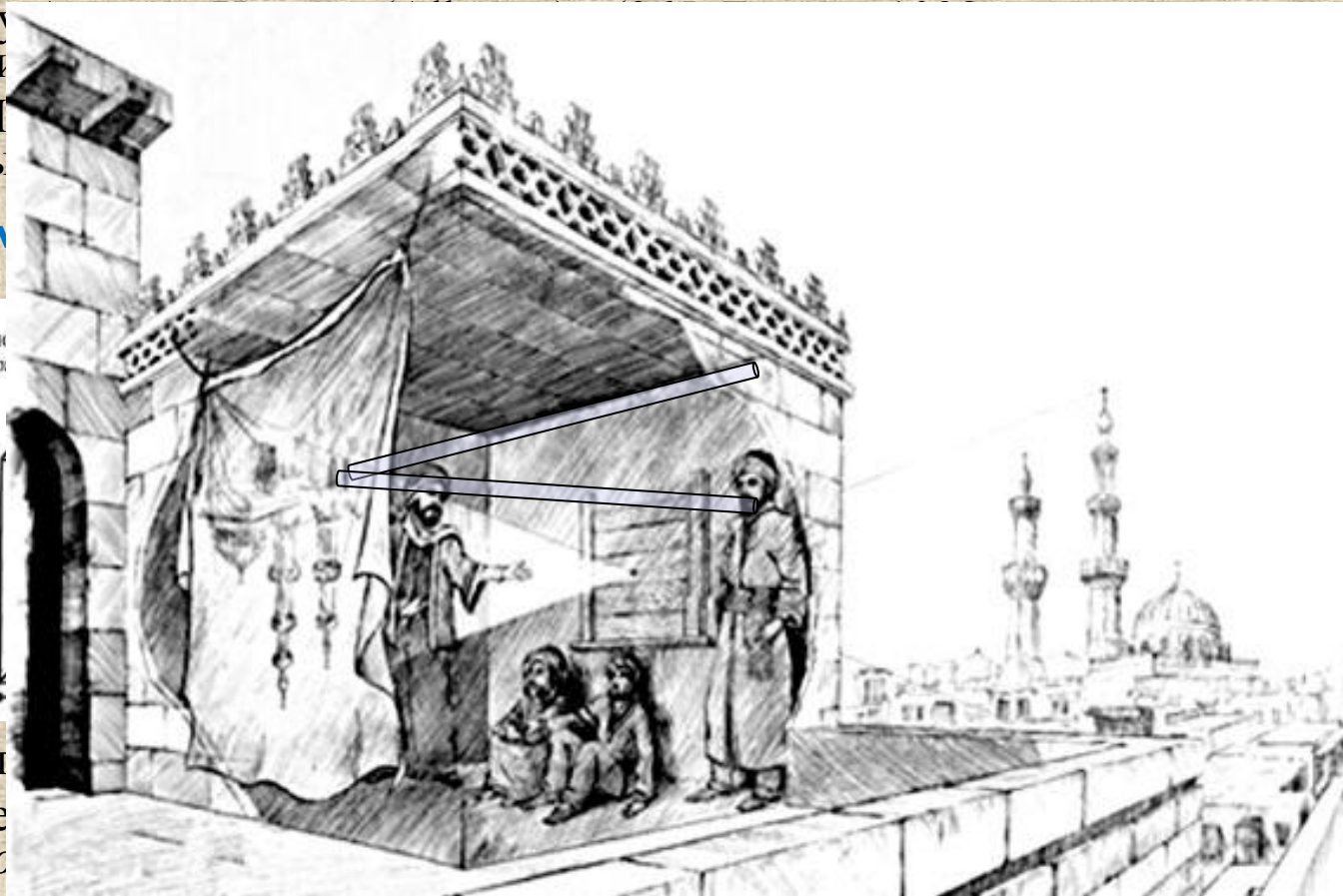
*Теория изображения могла возникнуть только при наличии инструмента, создающего изображение*

# Структура оптического изображения



Абу  
Кай  
ХИ  
язь  
Кам

Пл  
изобр



Эразм Вит  
Иоганн Ке  
(*Ad Vitellio*

*Альгазен и Кеплер отделили свет от зрения, объяснили зрение, ввели понятие отражения и закон обратных квадратов*

# Обработка оптического изображения

---

Подлинная революция в развитии изображения - фотография



«Окно аббатства Лекок»,  
Тальбот, 1835



«Мастерская художника», Дагерр, 1837

Обработка изображения - кино, телевизионное, цифровое

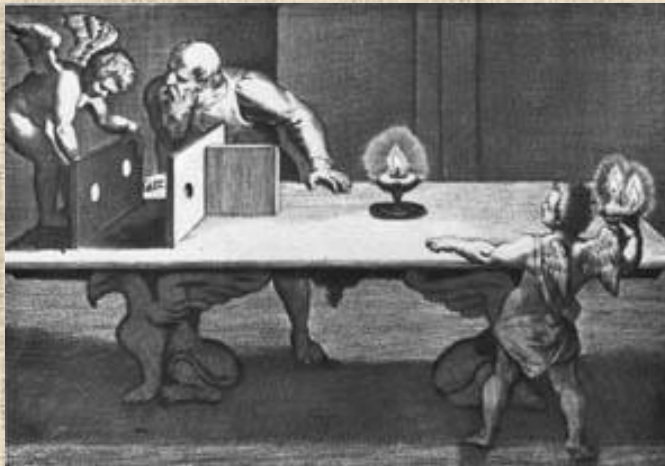
---

*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)



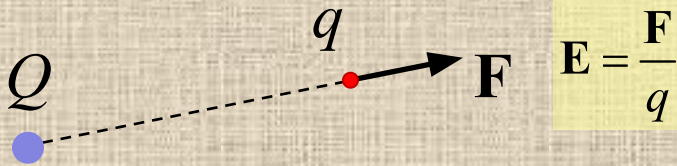
П. Рубенс, 1613

- 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

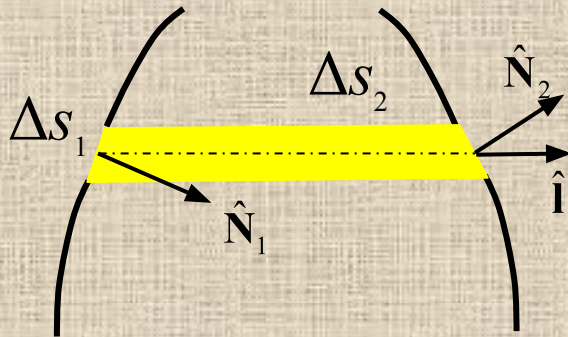
А.А.Гершуна «Световое поле»: световое поле – область пространства, исследуемого с целью изучения процессов переноса световой энергии



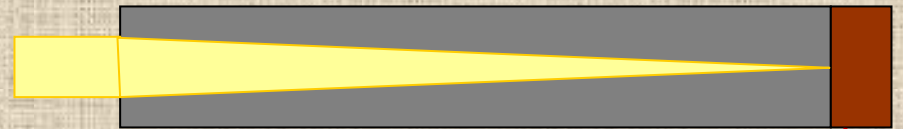
$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

## 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

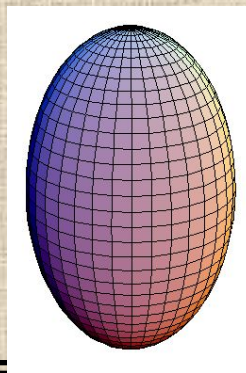
# Лучевая модель светового поля

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

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

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

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  $\nabla n = 0$      $\frac{d^2 \mathbf{r}}{ds^2} = 0$      $\mathbf{r} = \mathbf{a} + s\mathbf{b}$

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

---

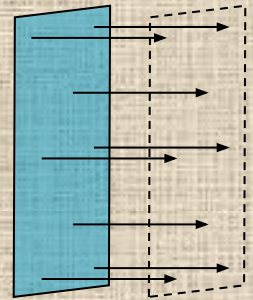
---

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

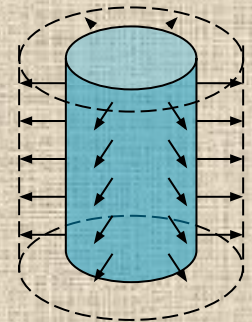
# Лучевая и волновая оптика

Форма волновой поверхности определяет тип волны:

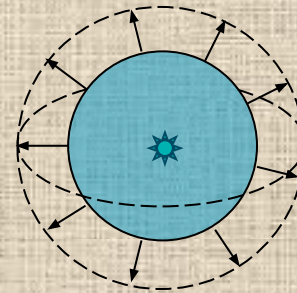
Плоская волна



Цилиндрическая волна



Сферическая волна



волновой фронт

луч

волновые поверхности

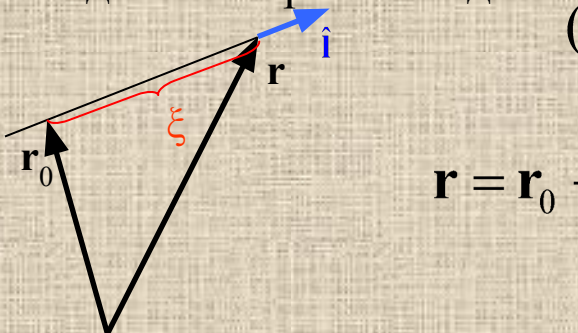
*Луч всегда перпендикулярен волновому фронту в каждой точке пространства*

# Уравнение переноса излучения (УПИ)

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

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

Тогда УПИ примет вид



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

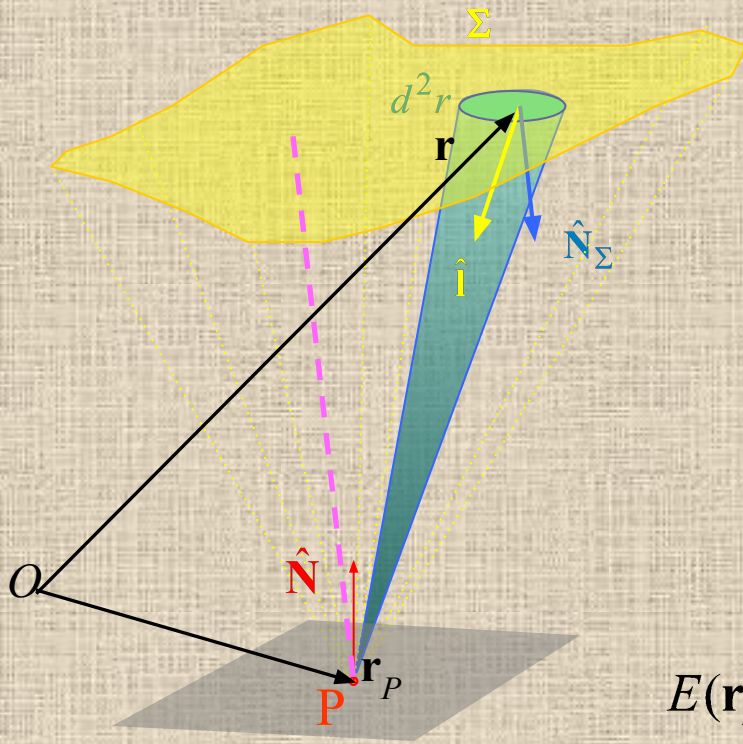
Откуда имеем закон Bouguer

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  $I$

# Краткий итог

---

- Анализ формирования изображения в оптической системе привел к концепции светового поля: лучевое (световое), волновое, квантовое
  - Вопрос: какое оно же оно на самом деле? – теряет значение: поле описывает взаимодействие, поэтому важен приемник
  - В этом смысле мы возвращаемся к наивным, но прозорливым представлениям древних греков
  - Два характерных масштаба: длина волны и квант действия
  - В большинстве экспериментов поле выступает как лучевое
  - Световое (лучевое) поле состоит из лучей, по которым переносится энергия излучения
  - Плотность мощности энергии в пучке лучей – яркость  $L(\mathbf{r}, \mathbf{l})$ , которая удовлетворяет УПИ
- 

*В однородном пространстве без поглощения лучи прямые линии, вдоль которых яркость не меняется*