
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



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

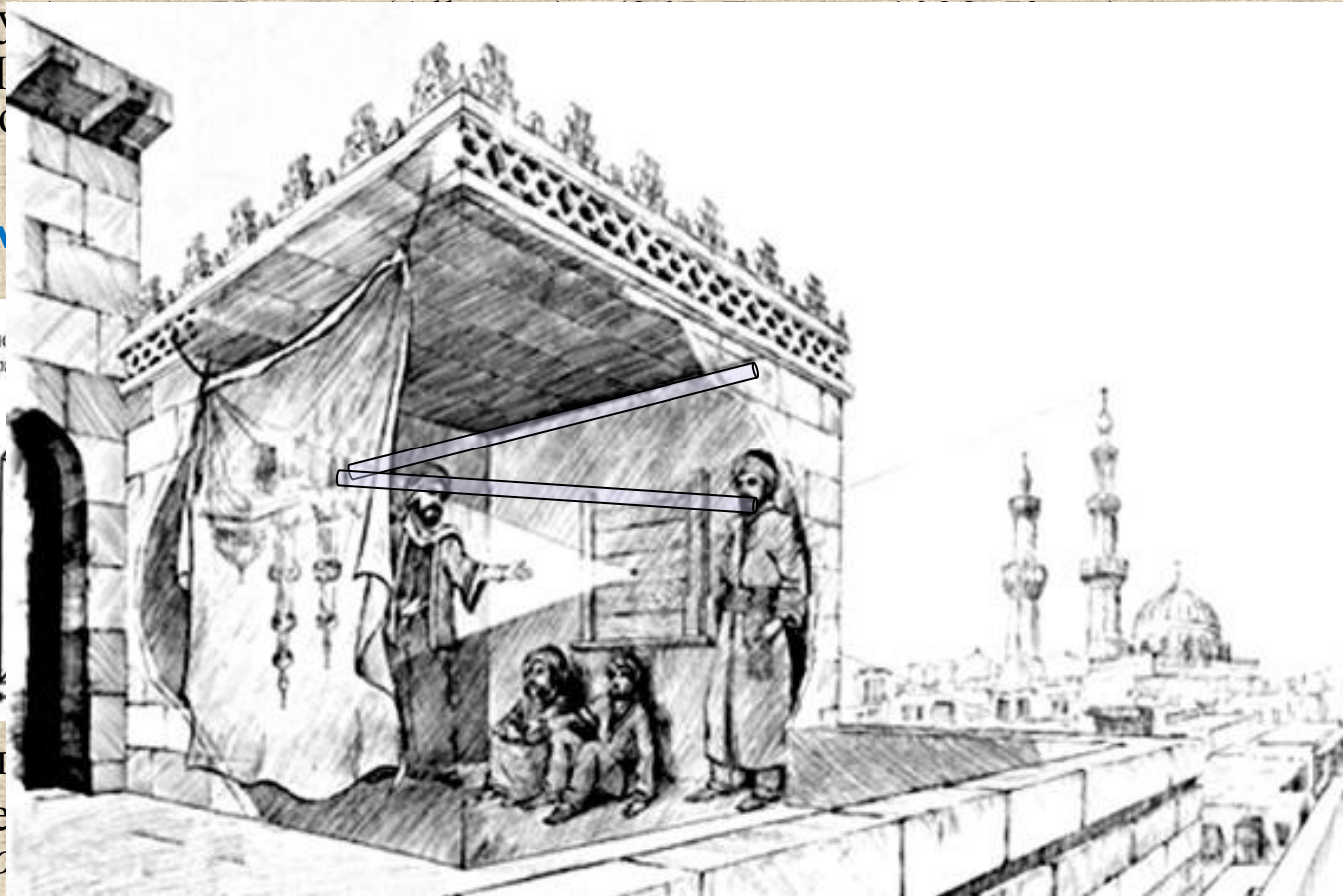
Структура оптического изображения



Абу
ХИ
«С

Кам

Пл
изобр

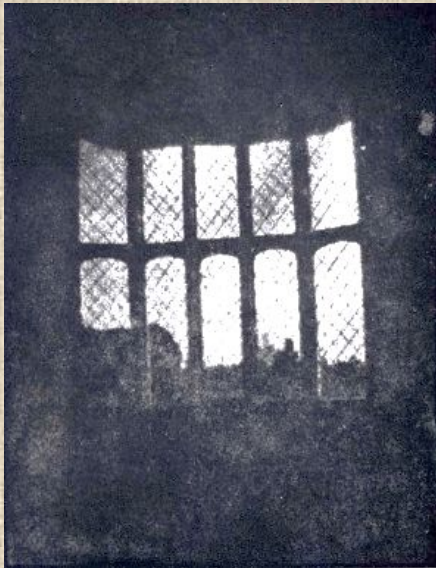


Эразм Вит
Иоганн Ке
(*Ad Vitellio*

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

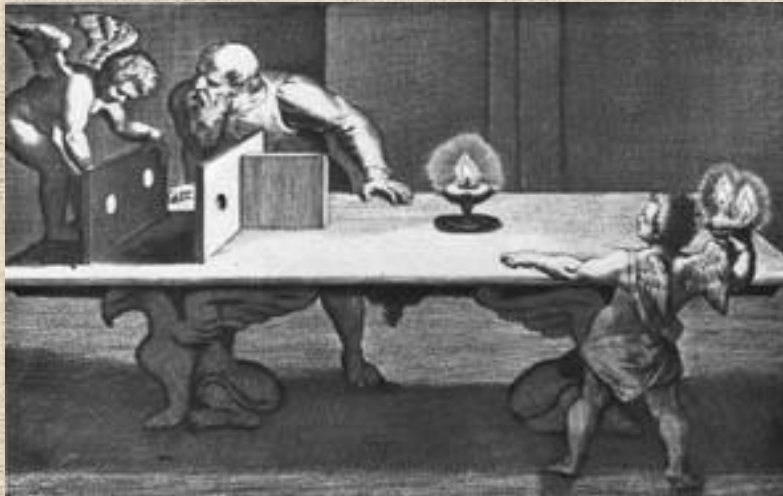
Обработка изображения - кино, телевизионное, цифровое

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

Фотометрия Бугера



- 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
- Определение силы света всех источников через эталон – свечи
- Проведено измерение сил света всех светил
- Свойства материалов – отражение, пропускание
- Шероховатые поверхности
- Закон Bouguer – ослабление по логарифмической кривой

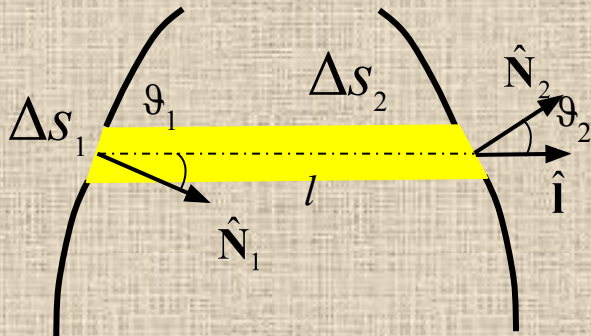
Революция Бугера – силу света можно измерять!

Фотометрия – Ламберт, Бер



Иоганн Ламберт (Johann Lambert, 1728 – 1777), *Photometria*, 1760

1. Независимость и аддитивность световых пучков
2. Закон обратных квадратов
3. Количество света при тех же условиях пропорционально площадям площадок Δs_1 , Δs_2 и косинусам углов излучения $\cos\theta_1$ и падения $\cos\theta_2$
4. Аналитическое выражение для закона ослабления Бугера



$$-dv = \delta v dx \Rightarrow \ln \frac{1}{v} = -\int \delta dx \Rightarrow v = e^{-\delta x}$$

Август Бер (August Beer, 1825—1863), *Grundriss des photometrischen Calcüles*, 1854

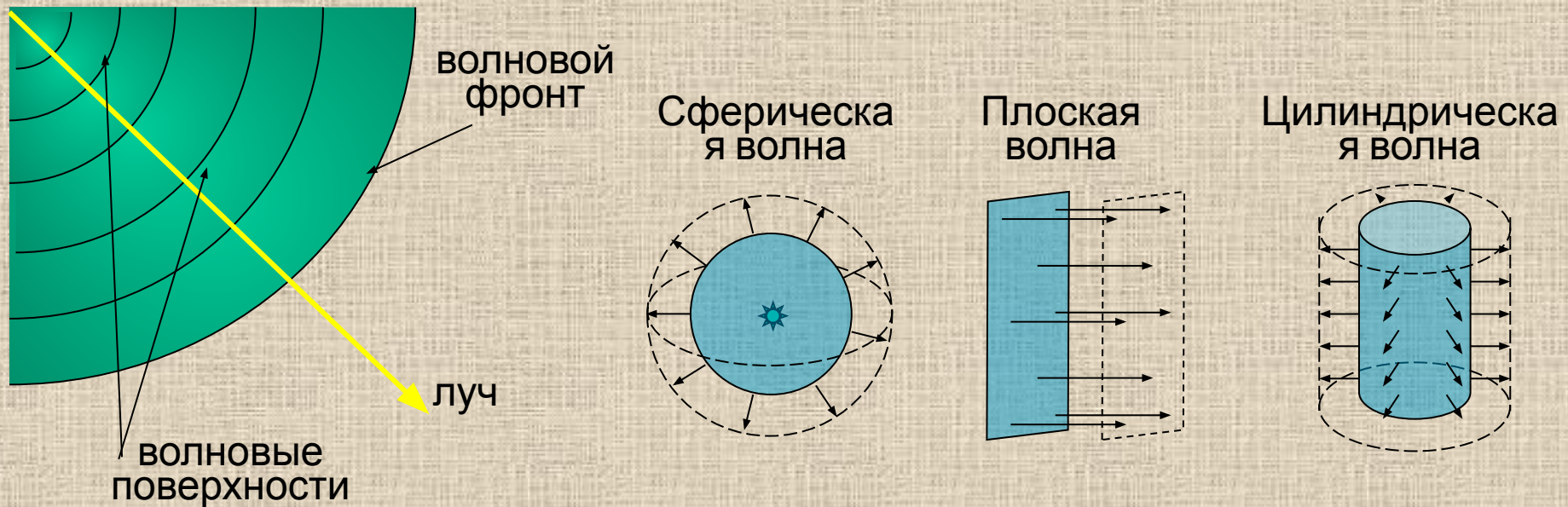


$$\Delta\Phi \approx L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) \frac{\Delta s(\mathbf{r}_1)(\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_1), \hat{\mathbf{i}})\Delta s(\mathbf{r}_2)(\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_2), \hat{\mathbf{i}})}{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2} = L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})\Delta\hat{\mathbf{i}}\Delta\sigma_2,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

Шарль Фабри (Charles Fabry, 1867 - 1945), *Общее введение в фотометрию: Фотометрия – раздел оптики, посвященный энергетике излучений*

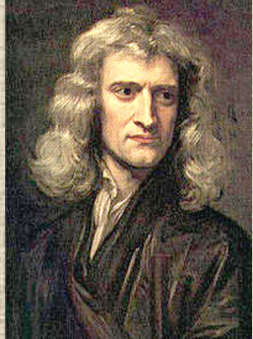
Волновая теория света

- Гримальди Франческо Мария (Francesco Maria Grimaldi, 1618 –1663) «*Physico mathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque annexis libri duo*», 1665 - дифракция
- Роберт Гук (Robert Hooke, 1635 –1703) - «*Micrographia*», 1665 г. – цвета тонких плёнок
- Христиана Гюйгенса (Christiaan Huygens, 1629 –1695) – опыты О. Рёмер (Ole Christensen Rømer, 1644 –1710) измерения скорости света по затмению спутника Ио Юпитера

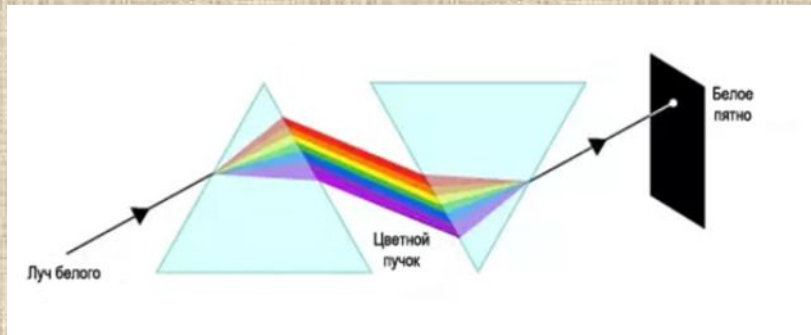


Гюйгенс, 1678 году: каждая точка фронта волны является вторичным источником сферических волн

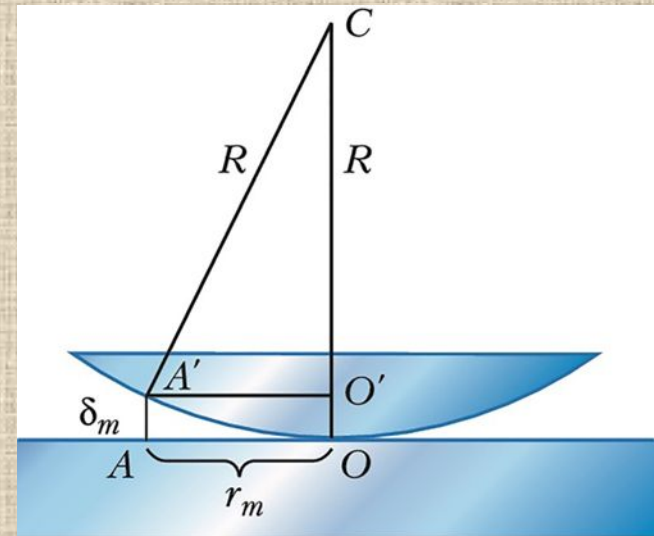
Оптика Ньютона



- Исаак Ньютон (Isaac Newton, 4.01.1643, Вулсторп, Англия – 31.03.1727, Лондон)
- Ян Марек Марци (Jan Marek Marci 1595 –1667) – «*Thaumantias liber de arcu caelesti*» (1648, «Ирис – книга небесной радуги», Ирис – богиня радуги, иначе Таумантиас – дочь морского Бога Таумаса)



Свету свойственна периодичность

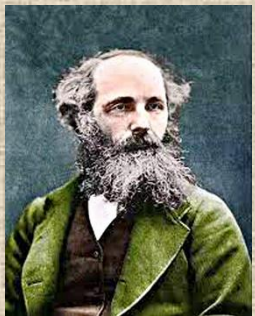
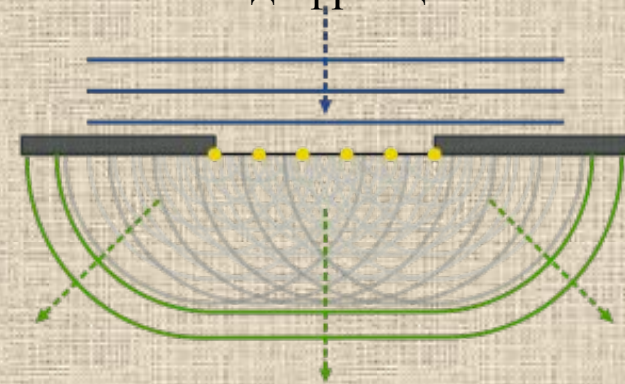
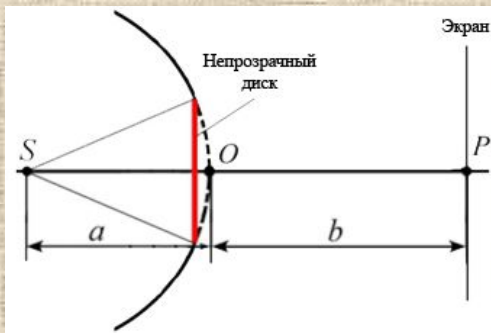


Лучевая теория – оптика здравого смысла, объясняла простейшее явление: прямолинейное распространение света

Синтез Максвелла



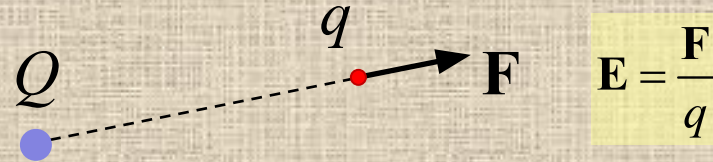
- Огюстен Жан Френель (Augustin-Jean Fresnel, 1788 – 1827): 15 июля 1816 г. представил Академии наук научный труд объяснения дифракции



- Джеймс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell, 1831 – 1879) - «*Treatise on Electricity and Magnetism*», 1873
- Андре-Мари Ампер (André-Marie Ampère, 1775 - 1836) – магнитные свойства токов
- Майкл Фарадей (Michael Faraday, 1791 – 1867) – электромагнитная индукция
- магнитная энергия – кинетическая энергия среды, электрическая энергия – энергия натяжения этой сред: эфир как упругое твердое тело

Для объяснения явлений стремительно развивающейся физики эфиру приписывались новые, противоречивые атрибуты – поле

Электромагнитное поле



- Теория эфира – объяснение всех явлений поведением дискретных тел: их положениями, их скоростями и их взаимодействиями
- Теория поля – переход с идентификации (та же скорость, то же ускорение, та же масса и т.д.) на нетождественность, на то особенное, что отличает данную точку пространства от других и тем самым превращает пространство в поле
- В основе определения поля – возможность сделать пробный заряд сколь угодно малым
- Квантовая механика показала принципиальную роль приемника

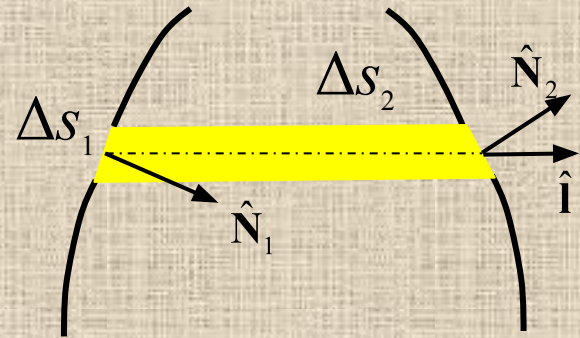
Световое поле – поле реакций оптического приемника

Световое поле

Оптический приемник:

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

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



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

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



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

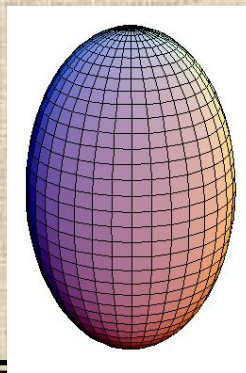
Лучевая модель светового поля

- 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})

Связь с волновой теорией

Волновое уравнение: $\Delta V(\mathbf{r}, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 V(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0$

$$\Delta U(\mathbf{r}, \omega) + n^2 k^2 U(\mathbf{r}, \omega) = 0, \quad k = 2\pi/\lambda$$

переход к пределу $\lambda \rightarrow 0$ или, что эквивалентно, $k \rightarrow \infty$:

$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{ik\phi(\mathbf{r})} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m(\mathbf{r})}{(ik)^m} e^{ik\phi(\mathbf{r})}$$

$$m = 2: \quad A_0 \left((\nabla\phi)^2 - n^2 \right) = 0 \Rightarrow (\nabla\phi)^2 = n^2 \Rightarrow \nabla\phi = \hat{\mathbf{s}}n$$

$$m = 1: \quad A_0 \Delta\phi + A_1 \left((\nabla\phi)^2 - n^2 \right) + 2\nabla\phi \nabla A_0 = 0$$

$$A_0 \Delta\phi + 2\nabla\phi \nabla A_0 = 0 \Rightarrow A_0^2 \Delta\phi + 2A_0 \nabla\phi \nabla A_0 = 0$$

$$\operatorname{div} \left(A_0^2 \nabla\phi \right) = 0 \Rightarrow \operatorname{div} \left(A_0^2 n \hat{\mathbf{s}} \right) = 0 \Rightarrow (\hat{\mathbf{s}}, \nabla) I = 0$$

Квазиоднородность волнового поля – малое изменение поля в масштабе длины волны, лучевое приближение: уравнение эйконала и УПИ

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

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

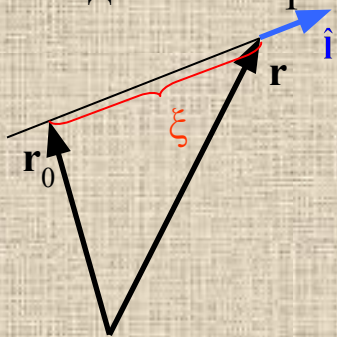
Исследование структуры поля в этом случае сводится к построениям прямых линий с помощью линейки – приближение геометрической оптики

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

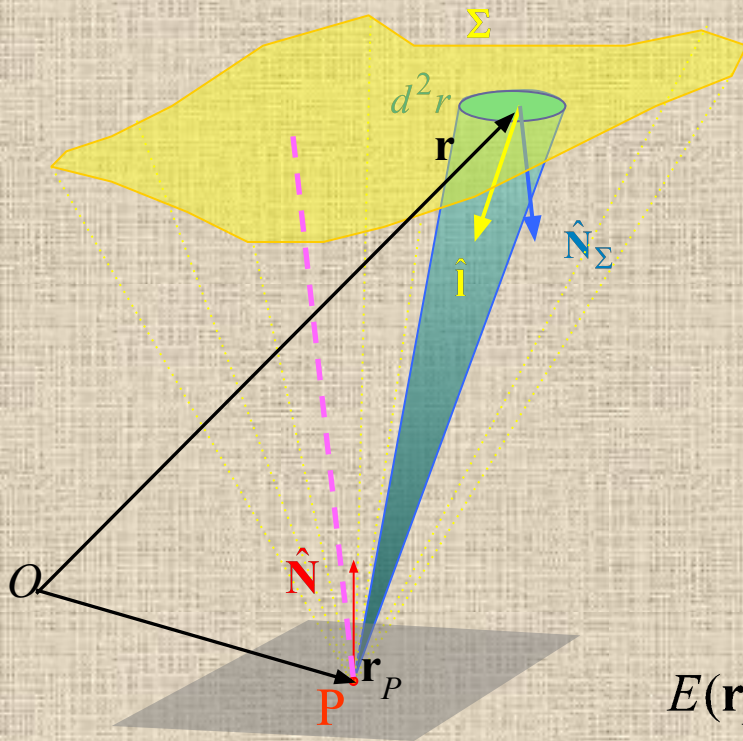
$$\left\{ -\int_0^\xi \kappa(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}) d\xi \right\}$$

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

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