
Оптическая система

Будак Владимир Павлович,
НИУ «МЭИ»
кафедра светотехники



☐: +7 (495) 763-5239

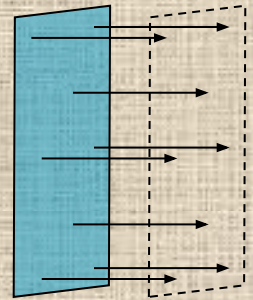
BudakVP@mpei.ru



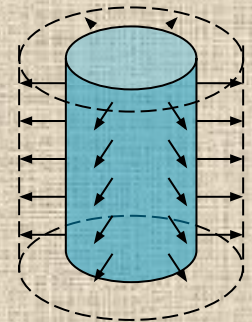
Лучевая и волновая оптика

Форма волновой поверхности определяет тип волны:

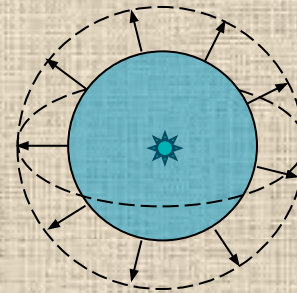
Плоская волна



Цилиндрическая волна



Сферическая волна



волновой фронт

луч

волновые поверхности

Луч всегда перпендикулярен волновому фронту в каждой точке пространства

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

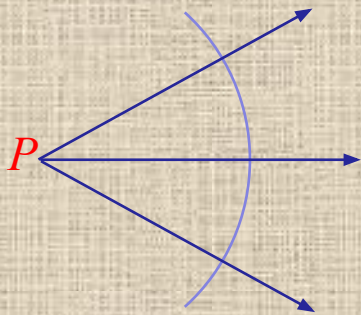
$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0, \quad \left. \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right|_{s=0} = \hat{s} \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + s\hat{s}$$

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

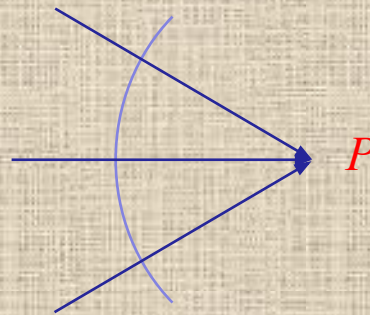
Гомоцентрические пучки

Если в точке P среды с $n(\mathbf{r})$ расположен точечный источник, то из P выходит бесконечное множество лучей.

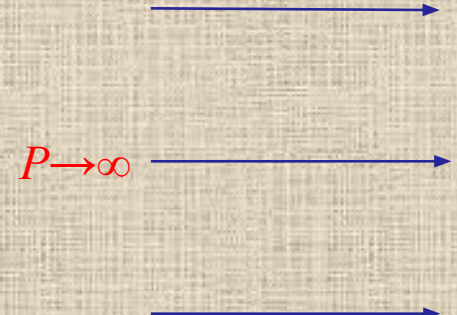
Выходящий из одной точки конический пучок лучей называется **гомоцентрическим**, причем источник P находится в вершине конуса.



Расходящийся пучок



Сходящийся пучок

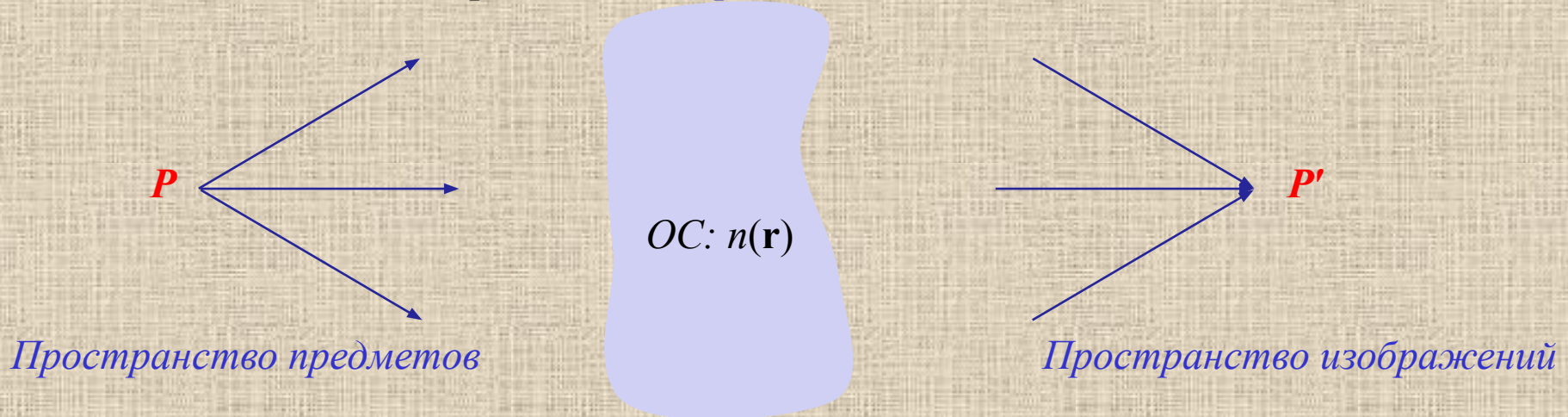


Параллельный пучок

Среда $n(\mathbf{r})$ такая, что наряду с расходящимся гомоцентрическим пучком существуют сходящийся пучок в P' – стигматическое изображение точки P

Оптический прибор (система, ОС)

- называется область пространства с таким распределением $n(\mathbf{r})$, что каждой точке P , находящейся в центре расходящегося гомоцентрического пучка, соответствует точка P' ее стигматического изображения – *сопряженные точки*

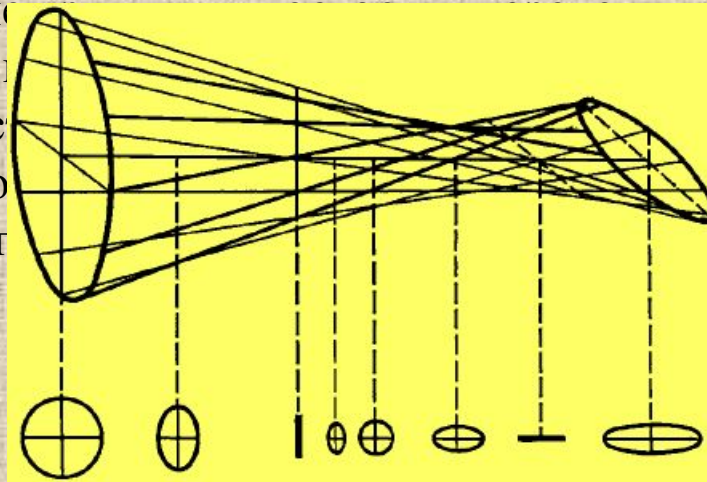


- Не все лучи, выходящие из P достигают P'
- Лучи достигшие пространства предметов, лежат в *поле зрения* прибора
- Все лучи из P , попавшие в поле зрения прибора, обязательно попадут на P'
- Лучи пересекаются в точке стигматического изображения – *действительное изображение*, если на продолжении лучей – *мнимое изображение*.

ОС осуществляет отображение пространства предметов в пространство изображений

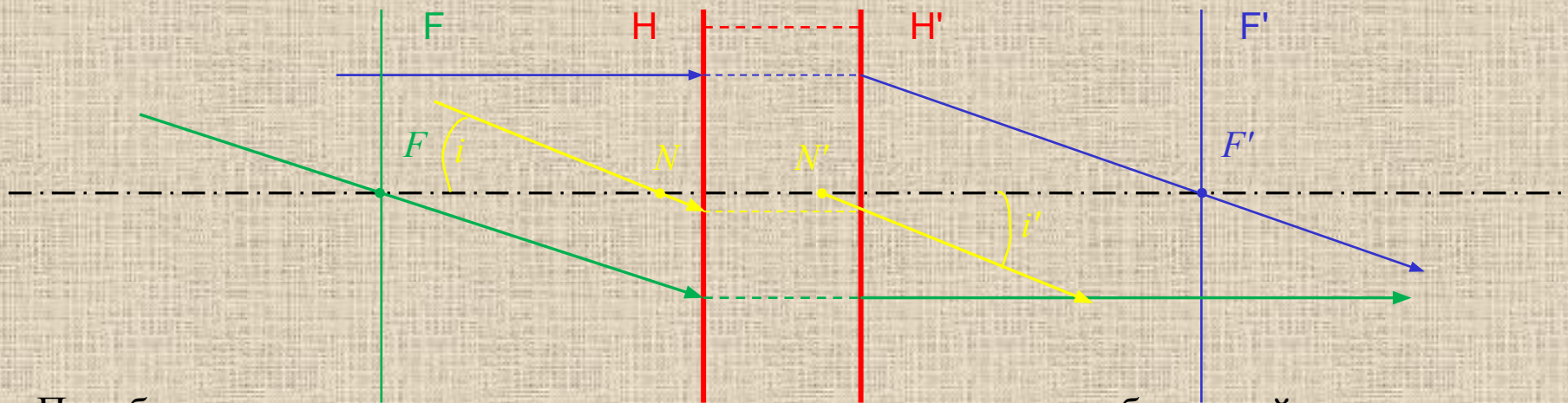
Идеальная ОС

- В ОС произвольная кривая C отображается в кривую C' - сопряженные кривые
- Если кривая C' подобна кривой C , то изображение называется идеальным
- ОС, создающая идеальное изображение трехмерного пространства, называется совершенной или абсолютной
- Если в ОС системе существует ось круговой симметрии (оптическая ось), когда при вращении всей системы вокруг этой оси положение и характер изображения не изменяется, то система называется центрированной
- Идеальная ОС – подобие
- Любая плоскость в ОС, перпендикулярная оптической оси, называется меридиональной
- Для исследования свойств идеальной ОС достаточно рассмотреть лучи, лежащие в меридиональной плоскости
- Реальная ОС нарушает идеальность изображения оптические пучки



Отклонения свойств реальной ОС от свойств идеальной носят название аберраций

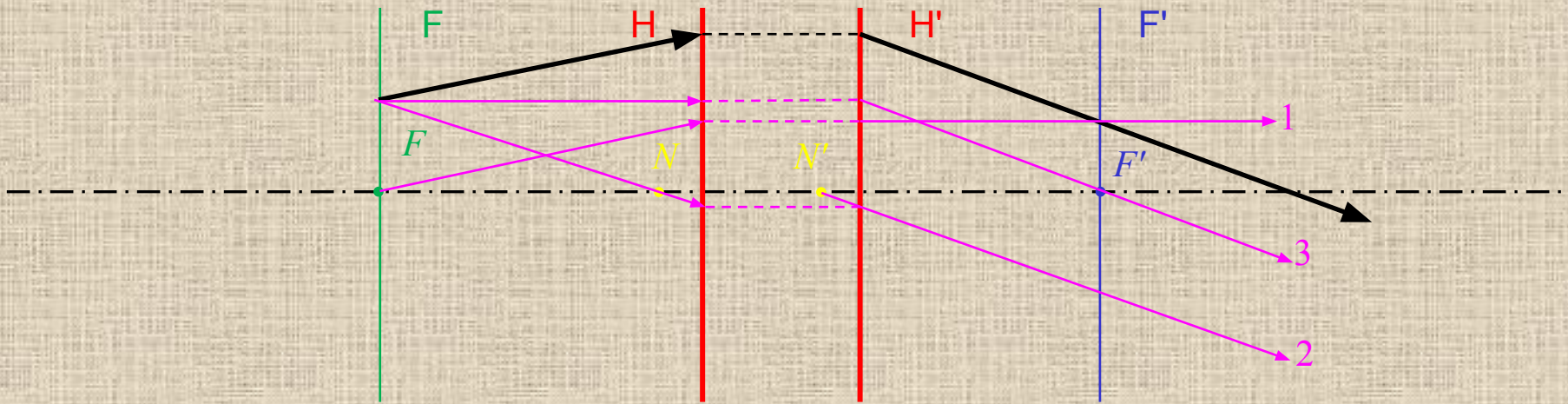
Кардинальные точки ИОС



- Преобразование пространства предметов в пространство изображений, при котором все сопряженные кривые в плоскостях, перпендикулярных оптической оси, подобны, называется **коллинеация**
- При коллинеации всегда существует пара сопряженных плоскостей, поперечное увеличение между которыми $\beta \equiv Y'/Y=1$ – **главные плоскости H**
- Плоскость, сопряженная бесконечно удаленной, называется **фокальной**
- Сопряженные точки, угловое увеличение между которыми лучей $\beta \equiv \text{tgi}'/\text{tgi}=1$ – **узловые точки**

Задание кардинальных точек определяет все свойства ИОС

Построение изображения в идеальной ИОС



1. Параллельно заданному лучу через передний фокус
2. Из точки пересечения заданного луча с передней фокальной плоскости и через переднюю узловую точку
3. Из точки пересечения заданного луча с передней фокальной плоскости параллельно оптической оси

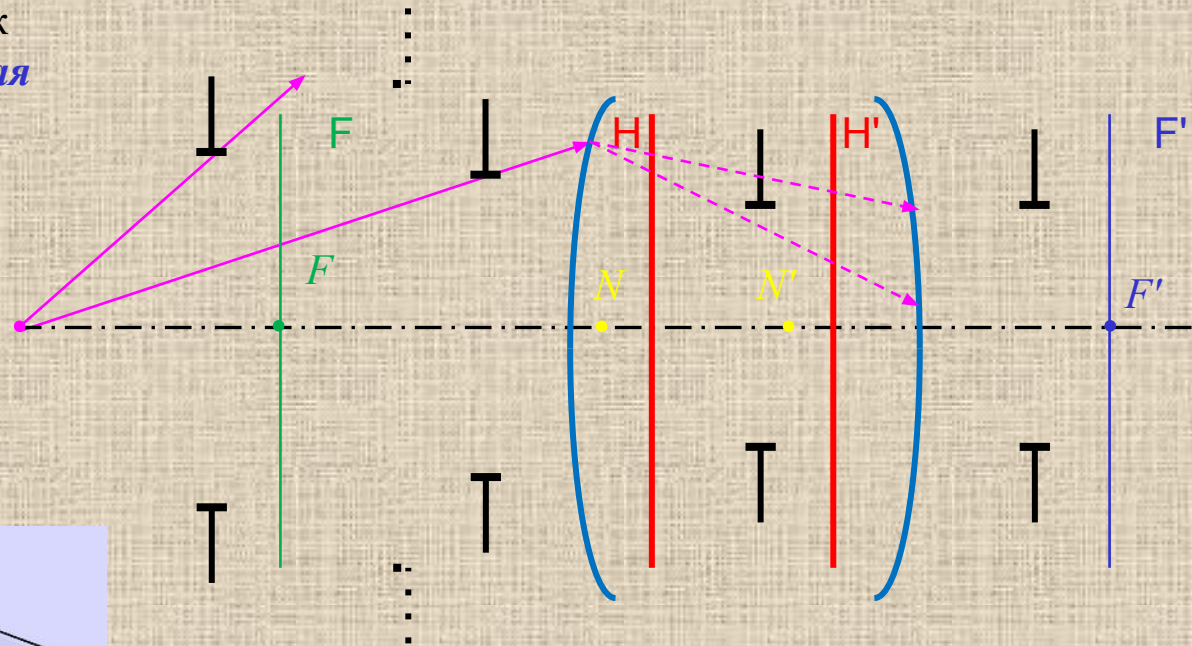
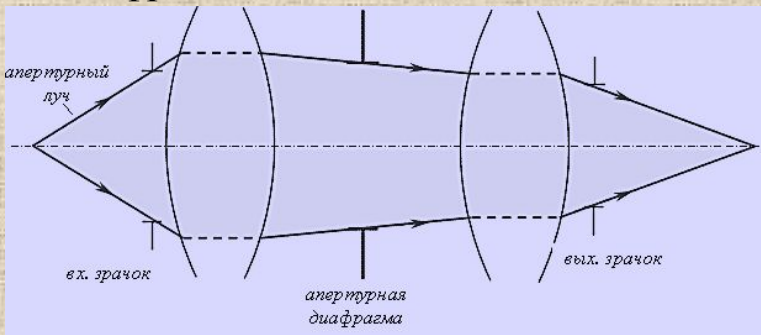
Свойства ИОС полностью определяются заданием кардинальных точек

Ограничение пучков диафрагмами ОС

В реальной ОС всегда существуют диафрагмы – оправы оптических элементов

Диафрагма ограничивающая пучок лучей из точки на оси – **апертурная диафрагма**

1. Изображения всех диафрагм в предшествующей части ОС
2. Проводятся лучи из точки на оси к краю изображения каждой диафрагмы
3. Наименьший угол у апертурной диафрагмы

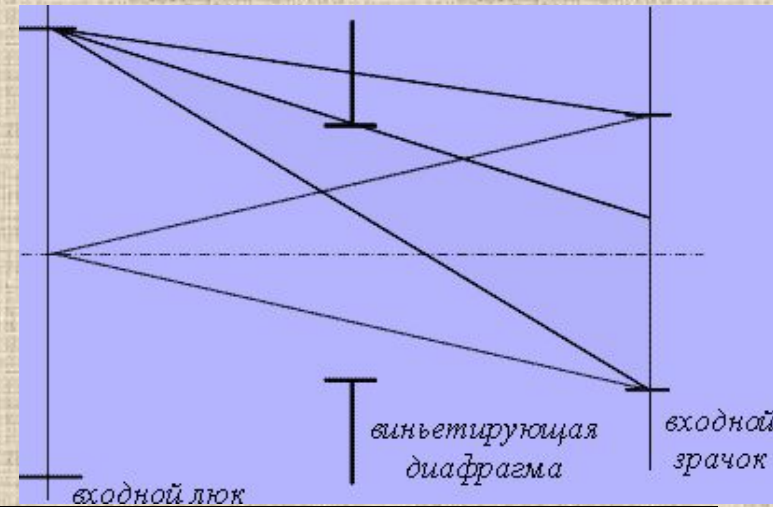


- Изображение в предшествующей части ОС – входной зрачок системы
- последующей части ОС – выходной зрачок

Апертурная диафрагма определяет облученность в изображении

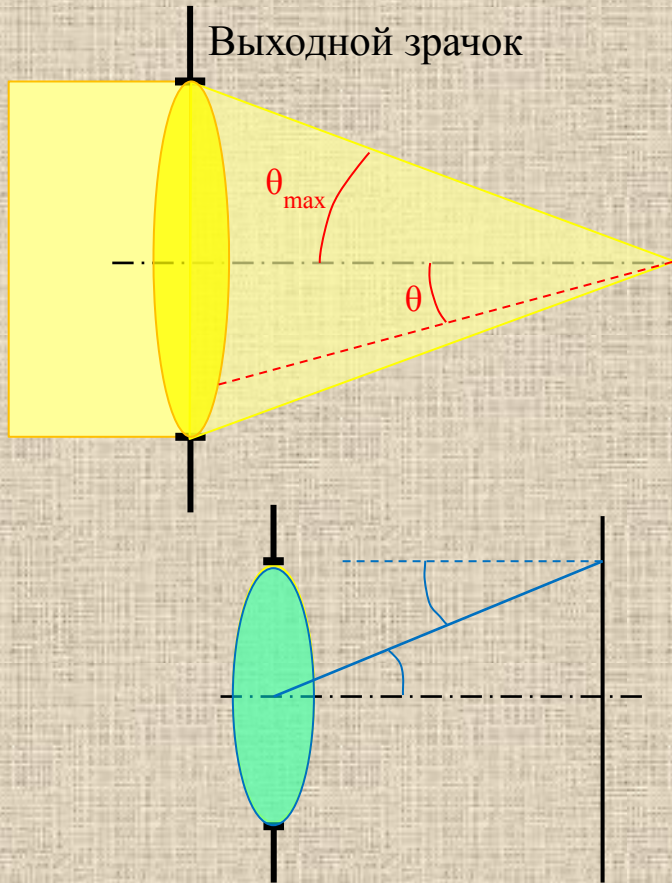
Виньетирование

- **Полевая диафрагма** – непрозрачная преграда, ограничивающая линейное поле оптической системы в пространстве предметов или в пространстве изображений
- Полевая диафрагма располагается в плоскости сопряженной плоскости предмета или анализа
- Определяет, какая часть пространства может быть изображена ОС
- Проявляется в резком очерчивании края изображения
- Все диафрагмы, не являющиеся апертурной или полевой, называются **виньетирующими**
- **Виньетирование** – затемнение изображения по краям кадра: фр. *vignette* – заставка
- Постепенное падение яркости изображения от центра к краям
- **Коэффициент виньетирования** – величина, характеризующая падение освещённости изображения, создаваемого оптической системой



Виньетирование является негативным эффектом, однако часто используется в художественных целях

Облученность точек изображения



Плоскость
анализа

$$E(\mathbf{r}_P) = \int_{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}}) \geq 0} L(\mathbf{r}_P, \hat{\mathbf{i}}) (\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}}) d\hat{\mathbf{i}}$$

$$= 2\pi L \int_0^{\alpha_{\max}} \cos \theta \sin \theta d\theta \Big|_{v=\sin \theta}$$

$$= 2\pi L \int_0^{\sin \alpha_{\max}} v dv = \pi L \sin^2 \alpha_{\max} \approx \pi L \left(\frac{D'}{2f'} \right)^2 = \frac{\pi O^2}{4} L$$

1. Изменение площади $\sim \cos \theta$
2. Изменение расстояния до выходного зрачка $\sim \cos^2 \theta$
3. Изменение угла падения $\sim \cos \theta$

$$E(\theta) = E_0 \cos^4 \theta$$



Визуализация – отображение углового распределения яркости светового поля по углам визирования камеры