

---

# Оптическая система

Будак Владимир Павлович,  
НИУ «МЭИ»  
кафедра светотехники



---

☐: +7 (495) 763-5239

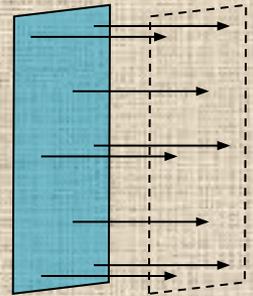
[BudakVP@mpei.ru](mailto:BudakVP@mpei.ru)



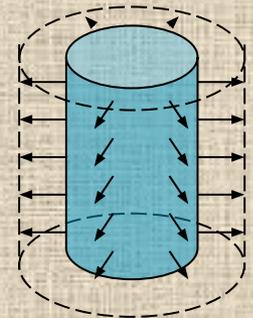
# Лучевая и волновая оптика

Форма волновой поверхности определяет тип волны:

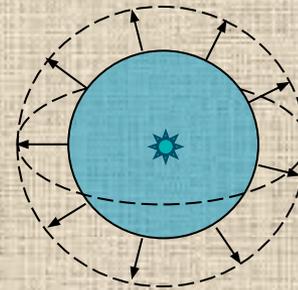
Плоская волна



Цилиндрическая волна



Сферическая волна



волновой фронт

луч

волновые поверхности

*Луч всегда перпендикулярен волновому фронту в каждой точке пространства*

# Траектория луча

---

---

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

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

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

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

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

---

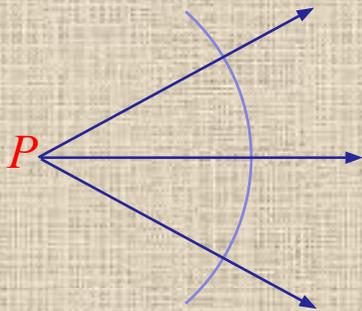
---

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

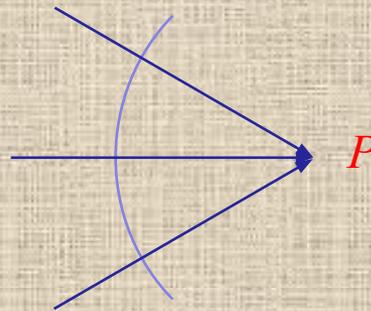
# Гомоцентрические пучки

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

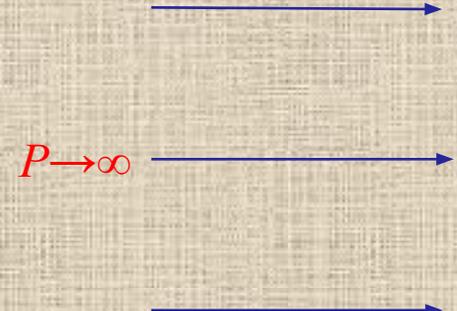
Выходящий из одной точки конический пучок лучей называется **гомоцентрическим**, причем источник  $P$  находится в вершине конуса.



Расходящийся пучок



Сходящийся пучок

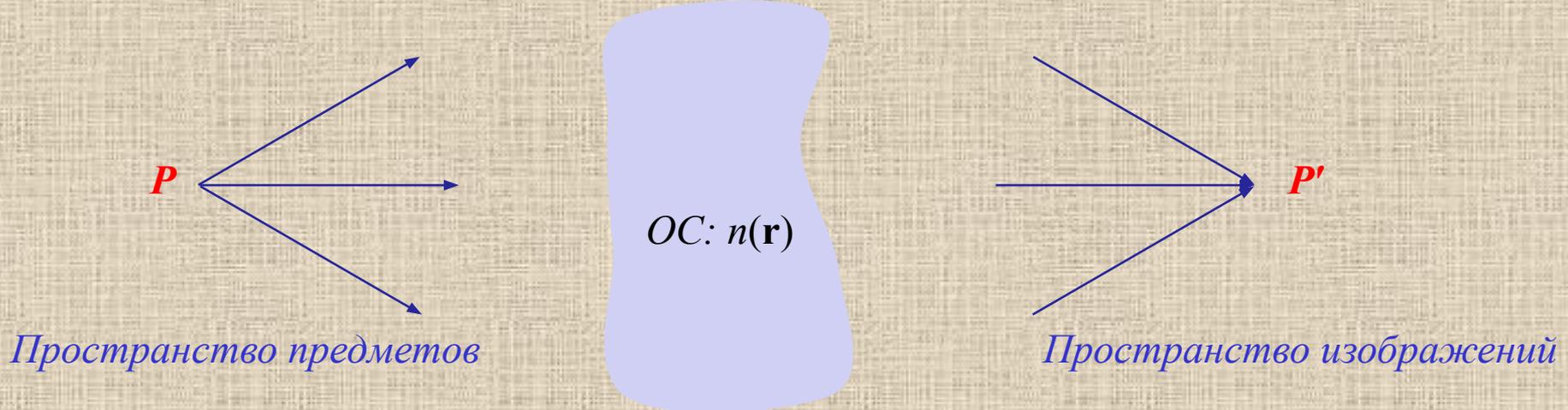


Параллельный пучок

*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*

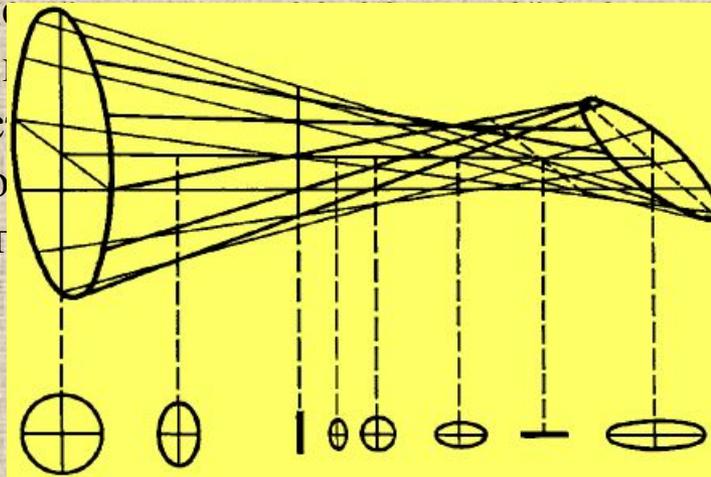


- Не все лучи, выходящие из  $P$  достигают  $P'$
- Лучи достигшие пространства предметов, лежат в *поле зрения* прибора
- Все лучи из  $P$ , попавшие в поле зрения прибора, обязательно попадут на  $P'$
- Лучи пересекаются в точке стигматического изображения – *действительное изображение*, если на продолжении 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 только в меридиональной плоскости
- Реальная ОС нарушает идеальность, т.е. не все лучи собираются в одной точке. Оптические пучки



*Отклонения свойств реальной ОС от свойств идеальной носят название аберраций*

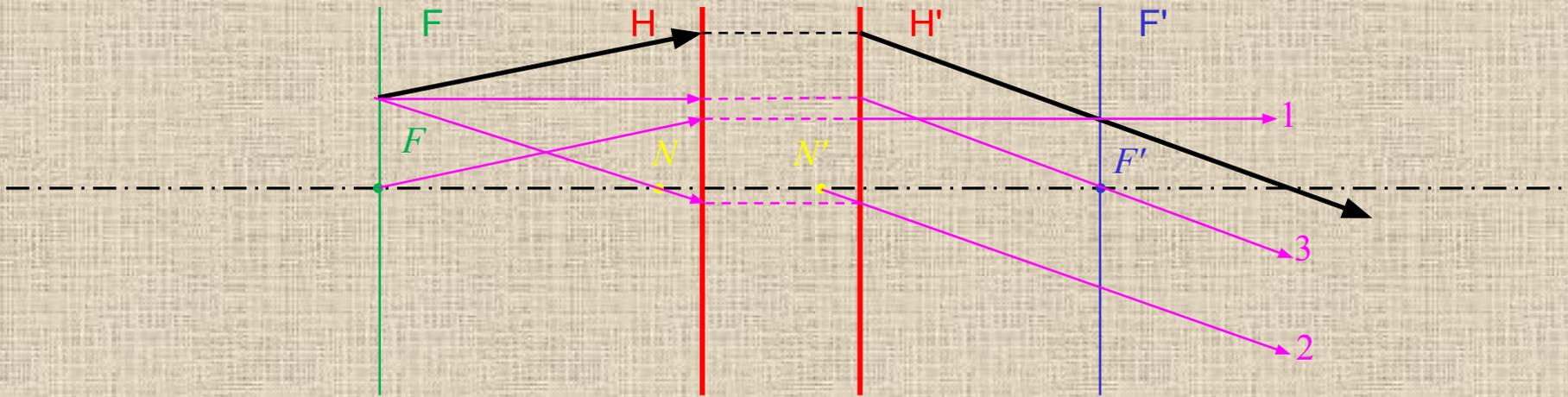
# Кардинальные точки ИОС



- 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

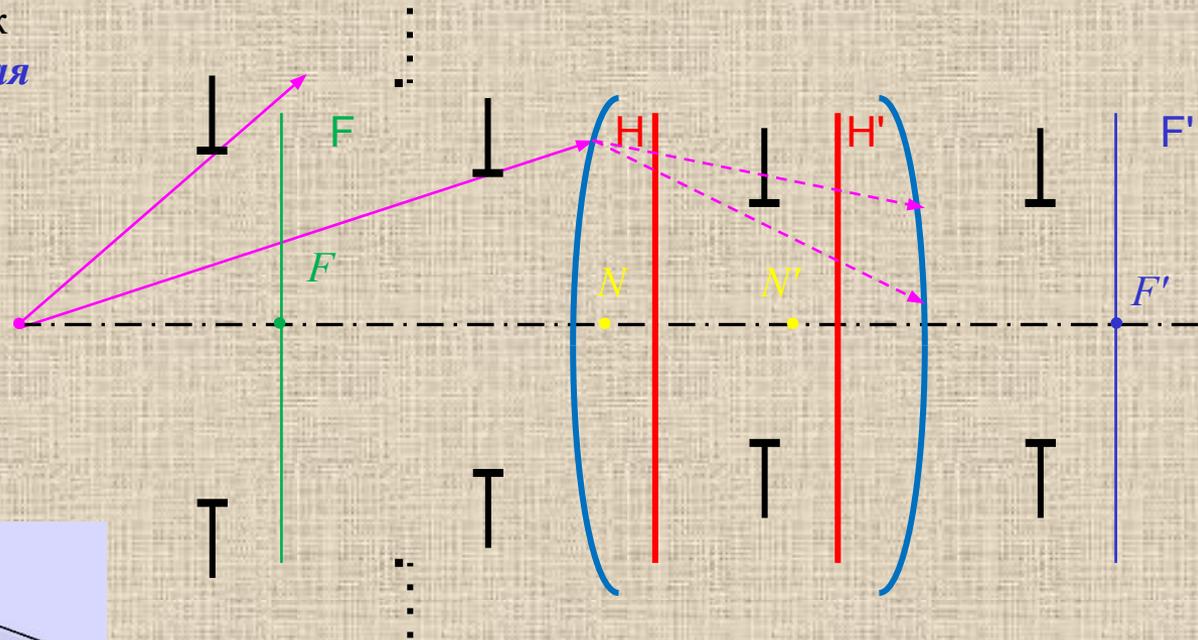
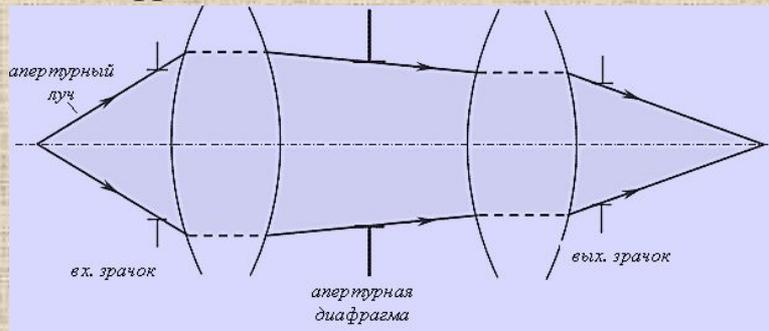
*Свойства ИОС полностью определяются заданием кардинальных точек*

# 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

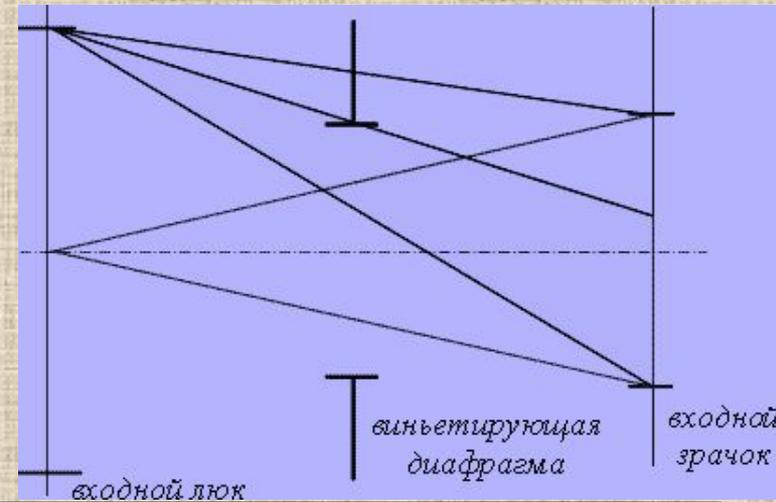


- Изображение в предшествующей части ОС – входной зрачок системы
- последующей части ОС – выходной зрачок

*Апертурная диафрагма определяет облученность в изображении*

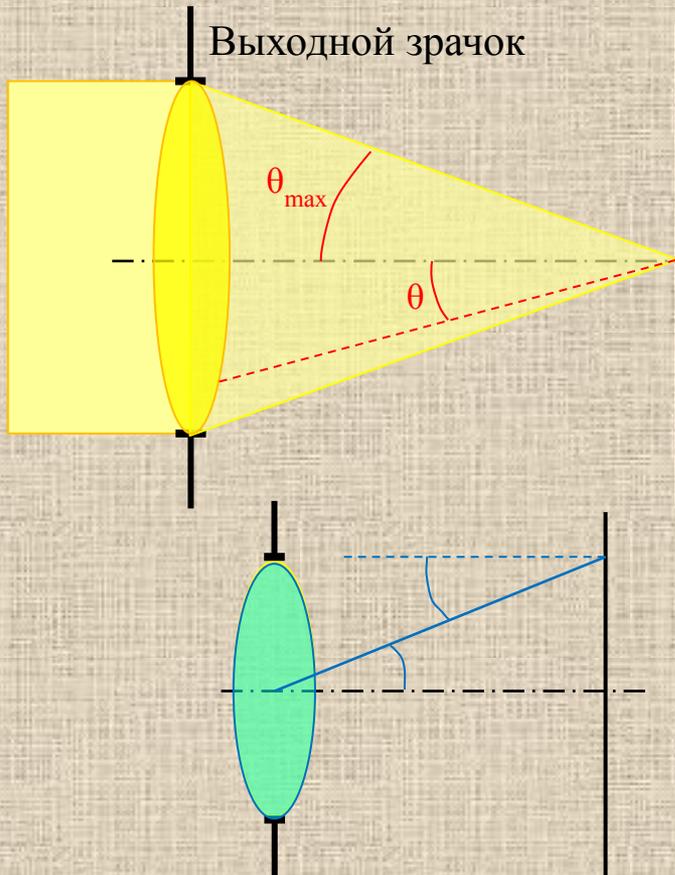
# Виньетирование

- **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



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

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

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

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*