ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Лекция 2.1 «Оптические детали с плоскими преломляющими и отражающими поверхностями. Сферические зеркала»

ВВЕДЕНИЕ. МЕСТО ПЛОСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Современное оптическое и оптико-электронное приборостроение базируется на синтезе оптических систем из элементарных функциональных компонентов — **оптических деталей**. Оптическая деталь представляет собой физическое тело из оптически прозрачного однородного материала (оптического стекла, кварца, кристаллов, оптических полимеров) либо зеркальный элемент, ограниченный полированными поверхностями определенной геометрической формы.

По геометрии рабочих поверхностей оптические детали разделяются на два фундаментальных класса:

1. **Детали с плоскими поверхностями:** плоские зеркала, плоскопараллельные пластинки, оптические клинья, отражательные и дисперсионные призмы. Главная функциональная роль данных элементов заключается в пространственной трансформации оптической оси, оборачивании и смещении изображения, спектральном разделении излучения и сканировании световых пучков без изменения их фокальной сходимости в параксиальном приближении.
2. **Детали со сферическими поверхностями:** сферические зеркала и сферические линзы. Эти элементы обладают ненулевой оптической силой ($D \neq 0$), искривляют волновой фронт и служат непосредственно для фокусировки излучения и масштабирования (построения) оптических изображений.

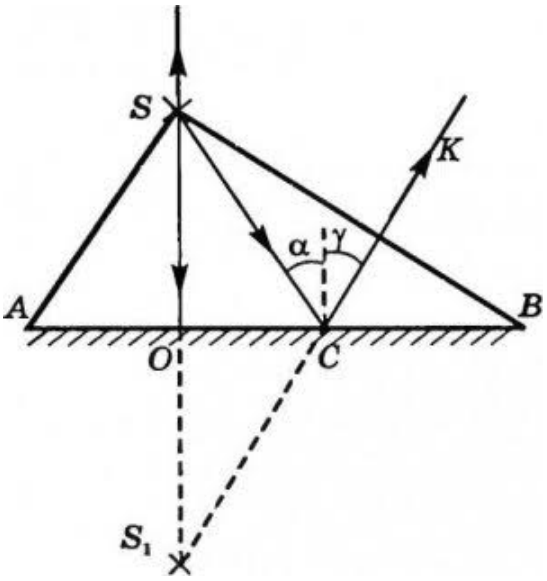
Настоящая лекция посвящена строгому математическому и физическому анализу хода лучей через плоские и сферические оптические поверхности, выводу законов катоптрики (зеркальной оптики), расчетным соотношениям плоскопараллельных пластинок и призм, а также сравнительной оценке диоптрических, катоптрических и катадиоптрических систем.

1. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ С ПЛОСКИМИ ОТРАЖАЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ (ПЛОСКИЕ ЗЕРКАЛА)

1.1. Плоское зеркало: принцип действия и идеальная стигматичность

Плоское зеркало представляет собой плоскую полированную поверхность, обладающую высоким коэффициентом зеркального отражения света ($R \to 1$). В оптическом приборостроении зеркала изготавливаются путем прецизионного полирования стеклянных или ситалловых подложек с последующим термическим или магнетронным напылением металлического (алюминий Al, серебро Ag, золото Au) или многослойного диэлектрического интерференционного покрытия на переднюю поверхность (**зеркала с внешним отражением**).

Рис. 1. Геометрия отражения от плоского зеркала: равенство сопряженных расстояний $s' = -s$, формирование мнимого стигматического изображения.



1.1.1. Физико-математическое доказательство стигматичности

Плоское зеркало является **единственной оптической системой, обладающей строгой стигматичностью для пучков лучей сколь угодно широкой апертуры**.

Пусть точечный источник света A находится на нормальном расстоянии s перед отражающей плоскостью. Рассмотрим произвольный световой луч, падающий на зеркало в точке M под углом падения i. Согласно фундаментальному закону отражения:

1. Падающий луч AM, отраженный луч MB и нормаль MN к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости;
2. Угол падения равен углу отражения: $i = i'$.

Продолжим отраженный луч MB за плоскость зеркала до пересечения с перпендикуляром, опущенным из точки A на плоскость зеркала (точка A'). Из равенства углов падения и отражения следует конгруэнтность прямоугольных треугольников $\triangle AMO$ и $\triangle A'MO$ (общий катет MO, равные острые углы $\angle AMO = \angle A'MO = 90^\circ - i$).

Следовательно:

$$OA' = OA \Longrightarrow |s'| = |s|$$

Поскольку положение точки A' совершенно не зависит от угла падения i и положения точки падения M, **все отраженные лучи независимо от апертуры пучка своим продолжением строго пересекаются в единой точке** A'.

Свойства изображения в плоском зеркале:

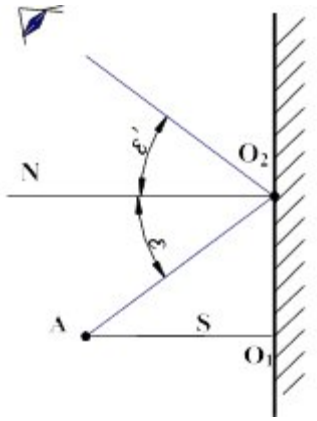
- **Мнимое:** образовано не самими отраженными световыми волнами, а геометрическими продолжениями лучей;
- **Симметричное:** расположено за плоскостью зеркала на таком же расстоянии, на каком предмет находится перед ним ($s' = -s$);

- **Равное по величине:** линейное поперечное и продольное увеличение строго равно единице ($\beta = +1, \alpha = +1$);
- **Энантиоморфное (хиральное):** плоское зеркало не переворачивает верх и низ, но меняет правую систему координат на левую (правая рука отражается как левая, явление зеркальной энантиоморфии).

1.2. Оптические свойства вращающегося плоского зеркала

В оптико-механических сканирующих приборах, спектрометрах и лазерных дефлекторах широко применяется вращение плоского зеркала вокруг оси, параллельной его рабочей грани.

Рис. 2. Поворот отраженного луча на угол 2α при угловом смещении зеркала на α.



Пусть узкий параллельный световой луч падает на плоское зеркало в неизменном направлении.

1. В исходном положении нормаль к зеркалу образует угол падения i. Угол отклонения луча от первоначального направления составляет:
$$\theta_1 = 180^\circ - 2i$$
2. При повороте зеркала на угол α нормаль к нему также поворачивается на угол α. Новый угол падения равен $i_2 = i \pm \alpha$.
3. Соответственно, новый угол отражения равен $i'_2 = i \pm \alpha$.
4. Суммарный угол поворота отраженного луча $\Delta\theta$ равен разности углов отклонения:
$$\Delta\theta = \left|(180^\circ - 2(i+\alpha)) - (180^\circ - 2i)\right| = 2\alpha$$

Теорема оптического рычага: При повороте плоского зеркала на угол α вокруг оси, параллельной отражающей плоскости, отраженный луч поворачивается в том же направлении на **удвоенный угол** 2α.
Угловая скорость сканирования светового луча вдвое превышает угловую скорость вращения зеркала: $\omega_{\text{луча}} = 2\omega_{\text{зеркала}}$.

1.3. Системы плоских зеркал

- **Параллельные зеркала (0°):** создают бесконечный ряд мнимых сопряженных изображений, эквидистантно смещающихся вдоль оси нормали.

- **Зеркала, расположенные под углом α:** формируют замкнутую круговую группу изображений. Если угол $\alpha = \frac{360^\circ}{m}$ (где m — целое число), число формируемых изображений равно $N = m - 1$.
- **Уголковый отражатель (ортогональный двугранный угол 90°):** луч, испытавший последовательное отражение от двух взаимно перпендикулярных зеркал в плоскости, перпендикулярной линии их ребра, меняет направление на строго противоположное ($\Delta\theta = 180^\circ$) независимо от угла падения.
- **Трипельпризма (тетраэдрический уголковый отражатель $90^\circ \times 90^\circ \times 90^\circ$):** трехмерная система трех взаимно ортогональных зеркал, отражающая падающий световой пучок строго назад параллельно самому себе в трехмерном пространстве ($\vec{k}' = -\vec{k}$). Применяется в лазерной локации Луны и геодезических световозвращателях (катафотах).

2. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ С ПЛОСКИМИ ПРЕЛОМЛЯЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

2.1. Преломление на одиночной плоской границе раздела

Плоская преломляющая граница раздела двух оптических сред с показателями преломления n и n' представляет собой предельный случай сферической поверхности бесконечного радиуса кривизны ($r = \infty$).

Рис. 3. Преломление расходящегося пучка света на границе вода-воздух: образование каустики и кажущаяся глубина s'.

При падении гомоцентрического расходящегося пучка на плоскую границу раздела закон Снеллиуса дает:

$$n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i'$$

Тангенсы углов связаны с расстояниями соотношением:

$$h = -s \cdot \tan i = -s' \cdot \tan i' \Longrightarrow s' = s \cdot \frac{\tan i}{\tan i'}$$

Поскольку отношение $\frac{\tan i}{\tan i'} = \frac{\sin i}{\sin i'} \cdot \frac{\cos i'}{\cos i} = \frac{n'}{n} \cdot \frac{\sqrt{1-\sin^2 i'}}{\sqrt{1-\sin^2 i}}$ зависит от угла падения i, **плоская преломляющая поверхность нарушает гомоцентричность широкого пучка лучей**. Широкий пучок становится астигматическим, а геометрические продолжения преломленных лучей огибают сложную фокальную кривую — **каустику**.

Параксиальное приближение плоской границы:

Для узких пучков лучей, распространяющихся под малыми углами к нормали ($i \to 0, i' \to 0$), $\tan i \approx \sin i$, и нелинейность исчезает:

$$s' = s \cdot \frac{n'}{n}$$

Пример (кажущаяся глубина): Наблюдатель смотрит из воздуха ($n' = 1$) вертикально вниз на объект, погруженный в воду ($n = 1{,}333$) на глубину $s = -1{,}0$ м. Кажущаяся глубина составит:

$$s' = -1{,}0 \cdot \frac{1}{1{,}333} = -0{,}75 \text{ м}$$

Объект кажется приближенным к границе раздела на 25% своей реальной глубины.

2.2. Плоскопараллельная пластинка (ППП)

Плоскопараллельная пластинка (ППП) — оптическая деталь из прозрачного изотропного материала с показателем преломления n, ограниченная двумя строго параллельными плоскими полированными гранями, отстоящими друг от друга на геометрическую толщину d.

Рис. 4. Преломление луча в ППП: параллельный сдвиг луча на величину Δy и продольное смещение точки Δs.



2.2.1. Поперечный параллельный сдвиг параллельного пучка (Δy)

Световой луч падает из воздуха ($n_1 = 1$) на первую грань пластинки толщиной d с показателем преломления n под углом i.

1. На первой грани луч преломляется под углом i':
$$\sin i = n \cdot \sin i'$$
2. На второй грани угол падения равен углу преломления на первой грани (в силу параллельности граней). Закон Снеллиуса для второй грани:
$$n \cdot \sin i' = 1 \cdot \sin i_2' \Longrightarrow \sin i_2' = \sin i \Longrightarrow i_2' = i$$

Фундаментальное свойство ППП: Луч света, прошедший через плоскопараллельную пластинку, выходит в окружающую среду **строго параллельно своему первоначальному направлению**, испытывая лишь боковое (поперечное) смещение Δy. Угловое отклонение луча тождественно равно нулю ($\delta = 0$).

Величина поперечного смещения Δy луча определяется из геометрии прямоугольных треугольников внутри пластинки: Отрезок пути луча внутри пластинки равен $AB = \frac{d}{\cos i'}$. Смещение Δy есть катет в $\triangle ABC$:

$$\Delta y = AB \cdot \sin(i - i') = d \cdot \frac{\sin(i - i')}{\cos i'}$$

Раскрывая синус разности $\sin(i - i') = \sin i \cos i' - \cos i \sin i'$:

$$\Delta y = d \cdot \sin i \left(1 - \frac{\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}\right)$$

Для малых параксиальных углов падения ($\sin i \approx i, \cos i \approx 1$):

$$\Delta y \approx d \cdot i \left(1 - \frac{1}{n}\right) = d \cdot i \cdot \frac{n - 1}{n}$$

2.2.2. Продольное смещение изображения в гомоцентрическом пучке (Δs)

Если плоскопараллельная пластинка помещена в сходящийся или расходящийся световой пучок, то преломление лучей приводит к смещению точки схождения лучей вдоль оптической оси в направлении распространения света на величину Δs.

В параксиальном приближении продольное смещение точки изображения вычисляется строго:

$$\Delta s = s' - s = d\left(1 - \frac{1}{n}\right) = d \cdot \frac{n - 1}{n}$$

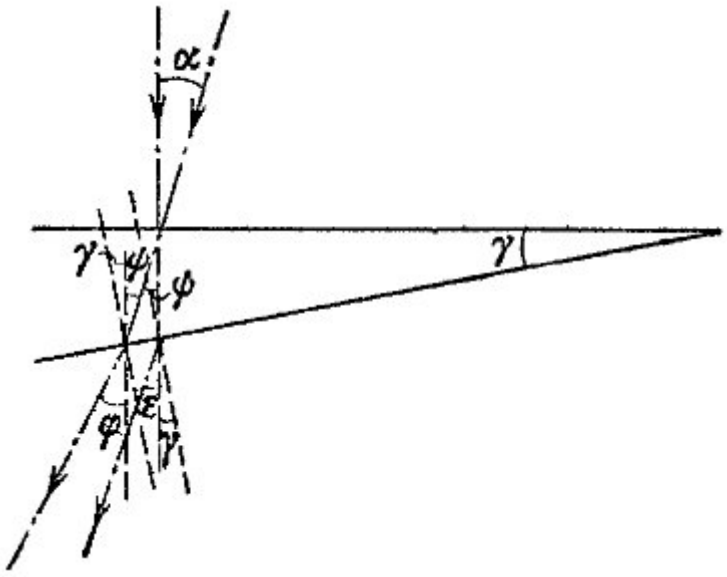
- **Эквивалентная воздушная толщина ППП ($d_{\text{возд}}$):**
  С оптической точки зрения введение пластинки толщиной d с показателем n эквивалентно воздушному промежутку меньшей геометрической длины:
  $$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}$$
  Разница между физической толщиной и эквивалентной воздушной толщиной в точности равна величине продольного смещения:
  $$d - d_{\text{возд}} = d - \frac{d}{n} = \Delta s$$

Клинико-инженерное следствие: Установка защитных стекол, фильтров или призм в сходящиеся пучки объективов удлиняет задний вершинный отрезок системы и вносит монохроматические аберрации (продольную сферическую аберрацию и астигматизм), а также продольный хроматизм, требующий специальной ахроматической коррекции.

2.3. Оптический клин

Оптический клин — прозрачное тело, ограниченное двумя плоскими полированными гранями, сходящимися под малым двугранным углом θ ($\theta \ll 1$ рад, обычно от нескольких угловых минут до 1–5°). Угол θ называется **преломляющим углом клина**, а линия пересечения граней — **ребром клина**.

Рис. 5. Прохождение луча через оптический клин: отклонение луча к основанию на угол $\delta = (n-1)\,\theta$.



Рассмотрим нормальное или квазинормальное падение луча на первую грань тонкого клина. Угол преломления на второй грани составляет $i_2 = \theta$. По закону преломления:

$$\sin i'_2 = n \cdot \sin\theta$$

В силу малости углов $\sin\theta \approx \theta$ и $\sin i'_2 \approx i'_2 \approx n\theta$.
Угол отклонения луча от первоначальной траектории δ:

$$\delta = i'_2 - \theta = n\theta - \theta = (n-1)\,\theta$$

> **Закон тонкого клина:** Оптический клин с малым преломляющим углом θ отклоняет проходящие световые лучи **к своему основанию** на постоянный угол δ, не зависящий от угла падения (в параксиальном приближении):
>
> $$\delta = (n-1)\,\theta$$

Применение оптических клиньев:

1. **Клиновые компенсаторы:** пара встречно установленных клиньев равного угла θ. При их относительном вращении или встречном поступательном смещении суммарный угол отклонения плавно варьируется от 0 до $2\delta_{\max}$ (призмы Рисли). Используется в офтальмологических фороптерах и юстировочных узлах лазеров.
2. **Оптические микрометры:** плоскопараллельная пластинка при повороте на малый угол ведет себя как эквивалентный оптический клин переменного линейного смещения шкалы.

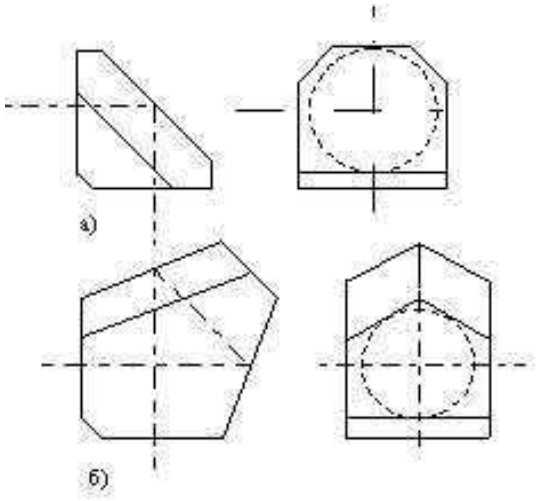
2.4. Оптические призмы

Оптическая призма — деталь из оптического стекла, ограниченная плоскими полированными гранями, действующая как преломляющий или отражающий оптический элемент. По назначению призмы строго делятся на две категории: **призмы полного внутреннего отражения** и **дисперсионные (спектральные) призмы**.

2.4.1. Призмы полного внутреннего отражения (ПВО)

Призмы ПВО служат для изменения направления оптической оси, оборачивания изображения (смены зеркальности) и сокращения продольных габаритов оптических трактов. Отражение внутри них происходит от внутренних полированных граней за счет эффекта **полного внутреннего отражения** ($n\sin i \geq 1$), что обеспечивает идеальный теоретический коэффициент отражения $R = 100\%$ без энергетических потерь на поглощение в металле.

Рис. 6. Схемы хода лучей в призмах: А — прямоугольная призма с поворотом оси на 90°; Б — призма Порро I рода; В — оборачивающая призма Дове; Г — пентапризма.



Классические конструкции призм ПВО:

1. **Прямоугольная призма с поворотом на** 90° **(**АкР - 90°**):** луч падает по нормали к катету, испытывает ПВО на гипотенузе под углом 45° ($45° > \theta_{кр} \approx 41{,}8°$ для стекла К8) и выходит по нормали через второй катет. Дает зеркальное изображение.
2. **Призма Порро I рода (**АКР - 180°**):** прямоугольная равнобедренная призма, отражающая свет последовательно от двух катетов. Поворачивает ось на 180° со смещением. Система из двух скрещенных призм Порро (бинокли Порро) полностью оборачивает изображение во всех плоскостях, трансформируя перевернутое изображение объектива в прямое изображение.
3. **Призма Дове (**АР - 0°**):** трапециевидная призма. При прохождении луча параллельно основанию изображение оборачивается зеркально. При повороте призмы Дове вокруг продольной оси на угол φ выходящее изображение поворачивается на угол 2φ.
4. **Пентапризма (**БП - 90°**):** пятигранная призма с двумя отражающими гранями под углом 45°. Отклоняет оптическую ось строго на 90° **независимо от погрешности установки и угла падения луча** (принцип неизменности двойного зеркала). Применяется в оптических видоискателях зеркальных фотоаппаратов и геодезических нивелирах.

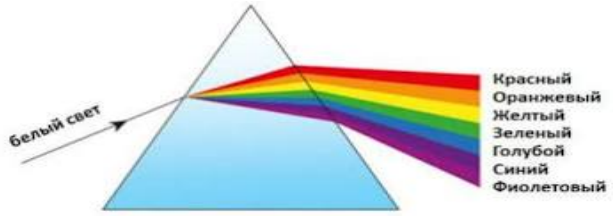
Развертка призмы в плоскопараллельную пластинку: Любая призма ПВО может быть мысленно развернута вдоль оптической оси в эквивалентную плоскопараллельную пластинку толщиной $d_{экв}$, что позволяет рассчитывать ее габариты и аберрации по формулам ППП.

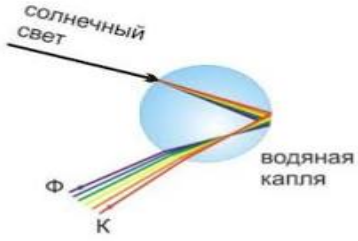
2.4.2. Дисперсионные призмы

Дисперсионные призмы предназначены для пространственного разделения сложного полихроматического оптического излучения в непрерывный спектр на основе физического явления **дисперсии света** — зависимости показателя преломления вещества от длины волны:

$$n = f(\lambda), \qquad \frac{dn}{d\lambda} < 0 \quad \text{(для нормальной дисперсии)}$$

Рис. 7. Спектральное разложение белого света треугольной призмой: коротковолновое фиолетовое излучение преломляется сильнее длинноволнового красного.





Пусть полихроматический световой луч падает на треугольную призму с преломляющим углом α. Суммарный угол отклонения луча δ определяется зависимостью:

$$\delta = i_1 + i'_2 - \alpha$$

где i_1 — угол падения на первую грань, i'_2 — угол преломления на второй грани.

Угол наименьшего отклонения (δ_{min}):

Симметричный ход луча внутри призмы ($i_1 = i'_2, i'_1 = i_2 = \frac{\alpha}{2}$) соответствует **минимуму угла отклонения**:

$$\delta_{\min} = 2i_1 - \alpha \Longrightarrow i_1 = \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}$$

Подставляя это значение в закон преломления Снеллиуса на первой грани ($\sin i_1 = n \sin i'_1$):

$$\sin\left(\frac{\alpha+\delta_{\min}}{2}\right)=n\cdot\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Отсюда выводится классическая **формула Фраунгофера для прецизионного измерения показателя преломления**:

$$n=\frac{\sin\left(\frac{\alpha+\delta_{\min}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Поскольку для прозрачных оптических сред $n_{\text{фиол}} > n_{\text{красн}}$, угол наименьшего отклонения для фиолетового края спектра больше, чем для красного ($\delta_{\text{фиол}} > \delta_{\text{красн}}$), что вызывает пространственное спектральное разложение белого пучка.

3. СФЕРИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛА (КАТОПТРИКА)

Сферическое зеркало — оптическая деталь, отражающая поверхность которой представляет собой сегмент сферы радиуса кривизны r.

По знаку кривизны и направлению отражающей поверхности зеркала классифицируются на:

- **Вогнутые сферические зеркала:** центр кривизны C находится перед зеркальной поверхностью со стороны падения света ($r < 0$ по ГОСТ 7427-78). Являются **собирающими** оптическими элементами.
- **Выпуклые сферические зеркала:** центр кривизны C расположен за зеркальной поверхностью ($r > 0$ по ГОСТ 7427-78). Являются **рассеивающими** элементами.

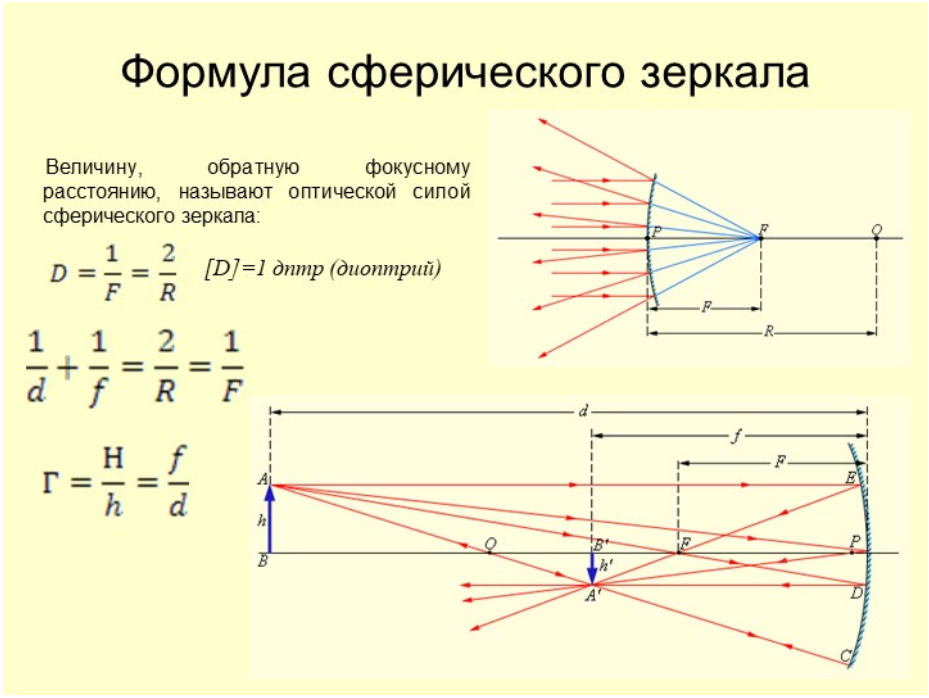
Геометрическими элементами сферического зеркала являются:

- **Полюс (вершина) зеркала (S):** геометрический центр отражающей сферической поверхности;
- **Оптический центр (C):** геометрический центр сферы, сегментом которой является зеркало;
- **Главная оптическая ось:** прямая линия, проходящая через полюс S и оптический центр C.

3.1. Вывод основной формулы сферического зеркала

Выведем аналитическую связь между сопряженными расстояниями предмета s и изображения s' в параксиальной области.

Рис. 8. Ход параксиального луча в вогнутом сферическом зеркале: вывод формулы зеркала через углы треугольников.



Пусть светящаяся точка A лежит на главной оптической оси вогнутого зеркала радиуса кривизны r на расстоянии $s = SA$. Произвольный луч AM падает на зеркало в точке M на высоте h под углом падения i. Радиус $CM = r$, проведенный в точку падения, является геометрической нормалью к сфере.

Согласно закону отражения, луч отражается под тем же углом $i' = i$ и пересекает оптическую ось в точке A' на расстоянии $s' = SA'$.

Обозначим углы, образуемые лучами и нормалью с оптической осью:

- $\angle MAS = \sigma$ (угол наклона падающего луча);
- $\angle MCS = \theta$ (угол наклона нормали к оси);
- $\angle MA'S = \sigma'$ (угол наклона отраженного луча).

Из рассмотрения треугольников $\triangle AMC$ и $\triangle CMA'$ на основе теоремы о внешнем угле треугольника:

$$\theta = \sigma + i \Longrightarrow i = \theta - \sigma$$

$$\sigma' = \theta + i \Longrightarrow i = \sigma' - \theta$$

Приравнивая выражения для угла i:

$$\theta - \sigma = \sigma' - \theta \Longrightarrow \sigma + \sigma' = 2\theta$$

В параксиальной области углы малы, стрелка сферического сегмента пренебрежимо мала, и углы в радианах выражаются через высоту падения h:

$$\sigma \approx \frac{h}{-s}, \qquad \sigma' \approx \frac{h}{-s'}, \qquad \theta \approx \frac{h}{-r}$$

Подставляя углы в полученное равенство и сокращая высоту h:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}$$

Каноническая формула сферического зеркала:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$$

3.2. Кардинальные элементы сферического зеркала

1. **Фокус сферического зеркала (F):**
   Если предмет удален в бесконечность ($s \to -\infty$), лучи падают параллельно оптической оси. Из формулы зеркала:
   $$\frac{1}{s'} + 0 = \frac{2}{r} \Longrightarrow s'_F = f' = \frac{r}{2}$$
   Точка, в которой собираются лучи, параллельные главной оптической оси, называется **фокусом зеркала**. Фокус сферического зеркала расположен **строго посередине между полюсом S и центром кривизны C**:
   $$f = f' = \frac{r}{2}$$
2. **Оптическая сила сферического зеркала (D):**
   $$D = -\frac{2}{r} = -\frac{1}{f'}$$
   Для вогнутого зеркала ($r < 0$): $f' < 0 \Longrightarrow D > 0$ (собирающее действие).
   Для выпуклого зеркала ($r > 0$): $f' > 0 \Longrightarrow D < 0$ (рассеивающее действие).
3. **Формула зеркала в фокальной форме Гаусса:**
   $$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$
4. **Формула Ньютона для сферического зеркала:**
   Отсчитывая координаты предмета x и изображения x' от главного фокуса ($x = s - f, x' = s' - f'$):
   $$x \cdot x' = f^2$$

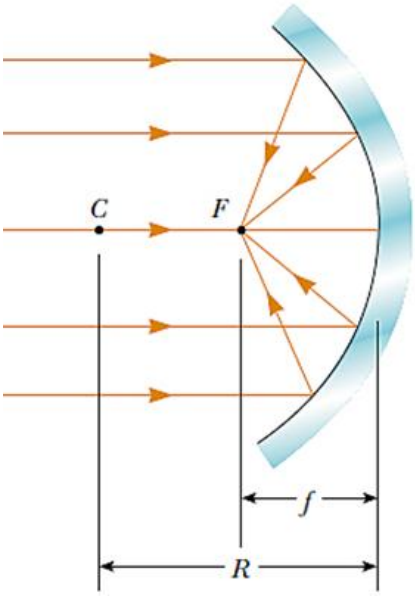
3.3. Масштабы отображения (Увеличение)

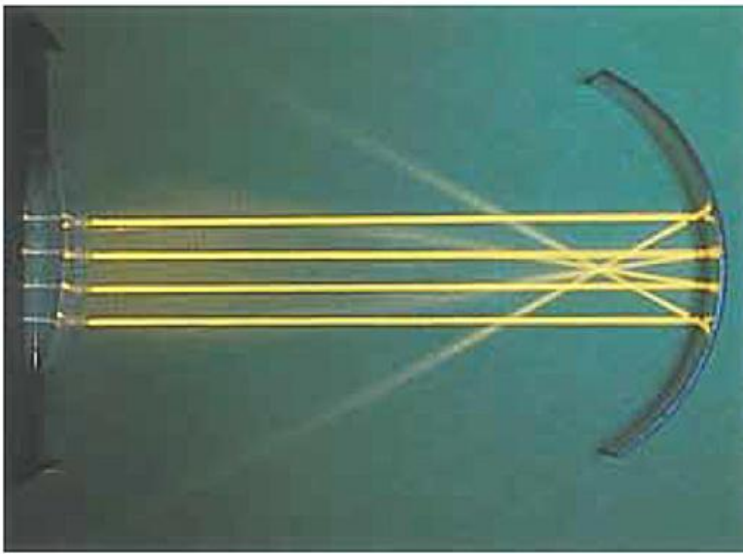
1. **Поперечное (линейное) увеличение (β):**
   Из подобия прямоугольных треугольников, образованных вершинами предмета и изображения с полюсом зеркала:
   $$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f}$$
   - Если $\beta > 0$, изображение прямое;
   - Если $\beta < 0$, изображение перевернутое.
2. **Продольное увеличение (α):**
   Дифференцируя формулу зеркала $\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \text{const}$:
   $$-\frac{ds'}{s'^2} - \frac{ds}{s^2} = 0 \Longrightarrow \alpha = \frac{ds'}{ds} = -\left(\frac{s'}{s}\right)^2 = -\beta^2$$
   В катоптрических системах продольное увеличение всегда строго отрицательно ($\alpha = -\beta^2 < 0$), поскольку свет меняет направление распространения на противоположное при отражении.

3.4. Графические методы построения изображений в сферических зеркалах

Для построения изображения точки в сферическом зеркале используют любые два из **четырех замечательных катоптрических лучей**:

Рис. 9. Четыре замечательных луча вогнутого сферического зеркала при различном удалении предмета.





1. **Параллельный луч:** Падает параллельно главной оптической оси $\Longrightarrow$ после отражения проходит через главный фокус F (или его продолжение проходит через F);
2. **Фокальный луч:** Проходит через фокус $F \Longrightarrow$ после отражения идет параллельно главной оптической оси;
3. **Центральный луч:** Проходит через оптический центр $C \Longrightarrow$ падает по нормали к поверхности ($i = 0$) и отражается строго обратно по той же прямой через точку C;
4. **Вершинный луч:** Падает в полюс зеркала $S \Longrightarrow$ отражается симметрично относительно главной оптической оси под тем же углом ($i\prime = -i$).

Сводная таблица 1. Катоптрические зоны вогнутого сферического зеркала ($r < 0, f < 0$)

Положение предмета (s)	Положение изображения ($s\prime$)	Тип изображения	Направление	Масштаб (β)
В бесконечности ($s = -\infty$)	В фокусе ($s\prime = f$)	Действительное	Точка	$\beta = 0$
За центром кривизны ($	s	> 2	f	$)
В центре кривизны ($s = 2f = r$)	В центре кривизны ($s\prime = 2f = r$)	Действительное	Перевернутое	Равное ($
Между центром и фокусом ($2f < s < f$)	За центром кривизны ($s\prime < 2f$)	Действительное	Перевернутое	Увеличенное ($

Положение предмета (s)	Положение изображения (s')	Тип изображения	Направление	Масштаб (β)
В фокусе ($s = f$)	В бесконечности ($s' = \infty$)	— (параллельный пучок)	—	$\beta = \infty$
Ближе фокуса ($	s	<	f	$)

В **выпуклом сферическом зеркале ($r > 0$)** при любом реальном положении предмета изображение всегда является **мнимым, прямым и уменьшенным** ($0 < \beta < +1$), располагаясь за зеркалом между полюсом S и мнимым фокусом F.

3.5. Аберрации сферических зеркал и асферизация поверхностей

При выходе из параксиальной области сферическое зеркало демонстрирует выраженную **сферическую аберрацию**: краевые (апертурные) лучи пересекают оптическую ось ближе к вершине зеркала, чем параксиальные лучи. Отраженные лучи формируют светящуюся каустическую огибающую.

Для полного устранения сферической аберрации в оптическом приборостроении осуществляют переход от сферы к каноническим **асферическим поверхностям вращения 2-го порядка**:

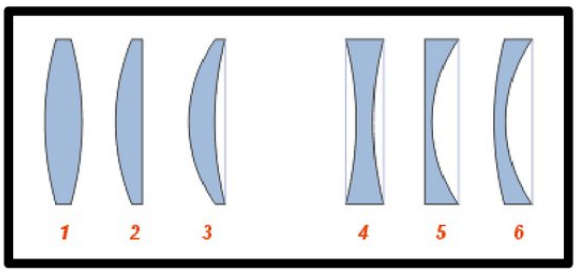
- **Параболическое зеркало ($y^2 = 2px$):** обладает строгой апланатической фокусировкой для бесконечно удаленного осевого источника ($s = -\infty$). Параллельный пучок любой апертуры собирается в фокусе строго стигматически без сферической аберрации. Применяется в зеркальных телескопах (рефлекторах Ньютона), автомобильных фарах и прожекторах.
- **Эллиптическое зеркало:** обладает двумя действительными геометрическими фокусами F_1 и F_2. Пучок, выходящий из одного фокуса, абсолютно стигматически собирается во втором фокусе.
- **Гиперболическое зеркало:** преобразует сходящийся пучок в расходящийся с общим сопряженным мнимым фокусом. Применяется во вторичных зеркалах телескопов схемы Кассегрена и Ричи — Кретьена.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СХЕМЫ СФЕРИЧЕСКИХ ЛИНЗ

Оптические системы разделяются на три фундаментальных класса:

1. **Диоптрические системы (линзовые):** содержат только преломляющие сферические и асферические поверхности.
2. **Катоптрические системы (зеркальные):** построены исключительно на отражающих поверхностях.
3. **Катадиоптрические системы (зеркально-линзовые):** содержат комбинацию зеркал и корректирующих тонких линз (менисков, пластин Шмидта).

Рис. 10. Геометрические типы сферических линз: двояковыпуклая, плосковыпуклая, положительный мениск, двояковогнутая, плосковогнутая, отрицательный мениск.



Виды линз:

Собирательные:
1 — двояковыпуклая
2 — плоско-выпуклая
3 — вогнуто-выпуклая (положительный мениск)

Рассеивающие:
4 — двояковогнутая
5 — плоско-вогнутая
6 — выпукло-вогнутая

(отрицательный мениск)

- Линзы характеризуются, как правило, своей оптической силой (измеряется в диоптриях), или фокусным расстоянием, а также апертурой.
- Отличительным свойством собирательной линзы является способность собирать падающие на её поверхность лучи в одной точке, расположенной по другую сторону линзы.

Таблица 2. Сравнительный анализ свойств диоптрических и катоптрических систем

Физический параметр / Свойство	Диоптрические элементы (Сферические линзы)	Катоптрические элементы (Сферические зеркала)
Хроматическая аберрация (хроматизм)	**Присутствует всегда.** Вследствие дисперсии $n(\lambda)$ фокусное расстояние зависит от длины волны: $f'(\lambda)$. Требуется сложная склейка крон-флинт (ахроматы, апохроматы).	**Полностью отсутствует.** Закон отражения $i = i'$ строго инвариантен к длине волны λ. Зеркало абсолютно ахроматично от вакуумного ультрафиолета до дальнего ИК-диапазона.
Поглощение оптического излучения	Присутствует в толще стекла (ограничивает спектральный диапазон пропускания).	Отсутствует в объеме (отражение от передней поверхности).
Масса и прогиб деталей	Блоки линз тяжелые, удерживаются только по внешнему контуру оправы (деформации под собственной тяжестью при $D > 1$ м).	Зеркало может иметь массивную разгрузочную опору по всей задней поверхности подложки.
Сферическая аберрация	Присутствует для сферических поверхностей.	Присутствует у сферы, но полностью устраняется параболизацией поверхности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

1. **Абсолютная стигматичность плоского отражения:** Плоское зеркало представляет собой единственную физическую систему, свободную от геометрических и хроматических аберраций при произвольной апертуре светового пучка. Оно осуществляет строгое коллинеарное преобразование с сохранением единичного масштаба ($\beta = +1$) и энантиоморфным обращением хиральности волнового фронта.
2. **Аберрационный дуализм плоскопараллельных преломляющих элементов:** Плоскопараллельная пластинка и оптические призмы не изменяют параллельности проходящих световых пучков, но при внесении в сходящиеся гомоцентрические тракты вызывают продольный сдвиг $\Delta s = d\,(1 - 1/n)$ и генерируют аберрации высших порядков, требующие обязательной компенсации в высокоапертурных приборах.
3. **Универсальность катоптрических соотношений:** Сферическое зеркало подчиняется фундаментальному закону $\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$. Фокусное расстояние зеркала зависит исключительно от геометрического радиуса кривизны ($f' = r/2$) и не зависит от показателя преломления среды, что гарантирует **абсолютный ахроматизм** катоптрических систем во всем электромагнитном спектре.
4. **Прикладное значение в современном приборостроении:** Комплексирование оптических деталей с плоскими поверхностями (сканирующие зеркала, фазосдвигающие призмы ПВО, клинья Рисли) и асферических зеркальных компонентов составляет основу проектирования космических телескопов сверхвысокого разрешения (James Webb, Hubble), лазерных гироскопов, интерферометров гравитационных волн (LIGO) и современной микрохирургической офтальмологической аппаратуры.