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

Лекция 1.1 «Основные понятия и законы геометрической оптики»

ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ И МЕСТО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

Геометрическая оптика представляет собой фундаментальный раздел оптической физики, исследующий законы распространения оптического излучения (света) в прозрачных средах на основе представления о **световом луче** как абстрактной геометрической линии, вдоль которой переносят энергию световые волны.

В иерархии физических дисциплин геометрическая оптика является предельным асимптотическим случаем **волновой оптики** при стремлении длины световой волны к нулю ($\lambda \to 0$). Данный подход предельно правомерен, когда характерные поперечные размеры геометрических препятствий, диафрагм, зеркал и линз D несоизмеримо больше длины волны электромагнитного излучения:

$$\frac{\lambda}{D} \ll 1$$

В этом пределе можно пренебречь волновыми явлениями — дифракцией и интерференцией — при расчете габаритов, траекторий и энергетических характеристик световых пучков в оптических системах. Геометрическая оптика служит теоретической и математической основой расчета и конструирования подавляющего большинства оптических приборов: микроскопов, телескопов, фотографических объективов, волоконно-оптических линий связи, лазерных резонаторов и медицинских офтальмологических систем.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

1.1. Базовый терминологический аппарат

Для построения строгой математической теории геометрической оптики вводятся следующие фундаментальные дефиниции:

- **Оптическая среда:** прозрачное вещество или пространство, характеризующееся в каждой точке определяющим макроскопическим параметром — **показателем преломления** n.
- **Абсолютный показатель преломления (n):** безразмерная физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме $c \approx 2{,}9979 \times 10^8$ м/с к фазовой скорости распространения монохроматической световой волны v в данной среде:

  $$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon\mu}$$

  где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, μ — относительная магнитная проницаемость (для прозрачных немагнитных оптических сред $\mu \approx 1$, следовательно $n = \sqrt{\varepsilon}$).

- **Относительный показатель преломления (n_{21}):** отношение абсолютного показателя преломления второй среды n_2 к абсолютному показателю преломления первой среды n_1:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

- **Оптически более плотная среда:** среда с большим значением абсолютного показателя преломления n.
- **Оптическая однородность:** свойство среды, заключающееся в постоянстве показателя преломления во всем ее объеме ($n(x,y,z) = \text{const}$).
- **Изотропность среды:** независимость показателя преломления n от направления распространения света и ориентации вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$.
- **Световой луч:** ортогональная траектория к волновому фронту (поверхности равной фазы), представляющая собой геометрическую линию, вдоль которой распространяется поток световой энергии.
- **Оптическая длина пути (L):** произведение геометрической длины пути s, пройденного светом в однородной среде, на абсолютный показатель преломления этой среды n:

$$L = n \cdot s$$

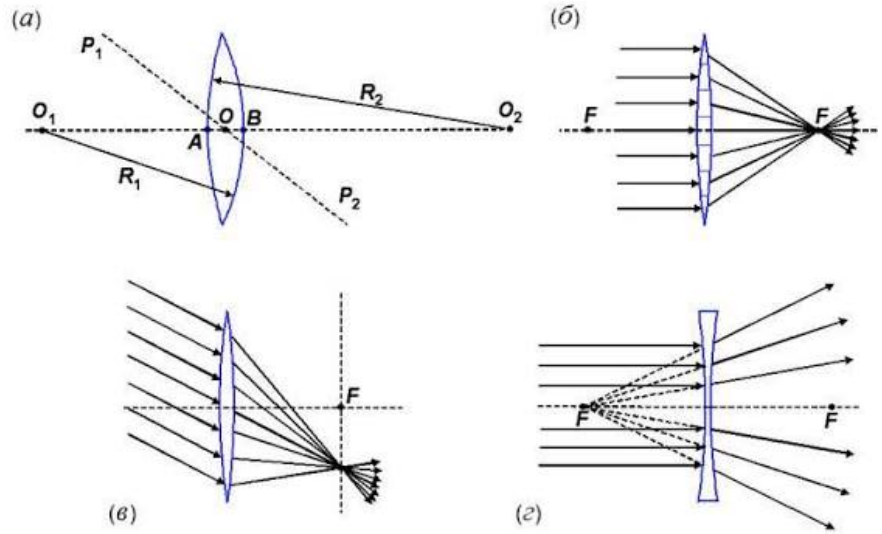
Для неоднородной среды с непрерывно меняющимся $n(s)$ оптическая длина пути определяется интегралом:

$$L = \int_A^B n(s)\, ds$$

1.2. Классификация световых пучков

Световой пучок — это пространственно-ограниченная совокупность световых лучей, распространяющихся от общего источника или сформированных оптической системой.

Рис. 1. Эволюция светового пучка: преобразование расходящегося пучка в параллельный и сходящийся посредством оптического элемента.



По геометрической конфигурации и пространственному схождению лучей пучки классифицируются на следующие виды:

1. **Гомоцентрический (центрированный) пучок:** пучок световых лучей, в котором геометрические продолжения всех составляющих лучей пересекаются в одной общей точке — **центре пучка**.
   - Если точка пересечения находится до оптической системы или пучок выходит из реальной светящейся точки, пучок является **расходящимся** (реальный источник).
   - Если лучи направлены к одной точке и пересекаются за оптической системой, пучок является **сходящимся** (формирует действительное изображение).
2. **Параллельный (телецентрический) пучок:** частный случай гомоцентрического пучка, центр которого удален в бесконечность. Все лучи такого пучка строго параллельны друг другу.
3. **Астигматический (астигматичный) пучок:** пучок лучей, не имеющий единой точки пересечения. Лучи такого пучка пересекаются в двух взаимно перпендикулярных фокальных линиях, расположенных на некотором расстоянии друг от друга (астигматическая разность).

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Геометрическая оптика базируется на четырех классических постулатах (законах), сформулированных на основе экспериментальных фактов и строго выводимых из волновая физики и **принципа Ферма**.

2.1. Вариационный принцип Ферма (принцип наименьшего времени)

Принцип Ферма (1662 г.): свет распространяется между двумя произвольными точками пространства A и B по такой траектории, время прохождения по которой является экстремальным (стационарным, чаще всего минимальным) по сравнению со всеми соседними возможными путями.

Математически принцип Ферма выражается равенством нулю первой вариации времени прохождения света t:

$$\delta t = \delta \int_A^B \frac{ds}{v} = \delta \left(\frac{1}{c} \int_A^B n \, ds \right) = \frac{1}{c} \delta L = 0$$

Вариационный принцип Ферма гласит, что **действительный луч света соответствует стационарному значению оптической длины пути**:

$$\delta L = \delta \int_A^B n(s) \, ds = 0$$

Из принципа Ферма строго выводятся все основные законы геометрической оптики.

2.2. Закон прямолинейного распространения света

Формулировка: В оптически однородной и изотропной среде свет распространяется по кратчайшим геометрическим траекториям — прямым линиям.

Физико-математическое доказательство: В однородной среде показатель преломления $n = \text{const}$. Из принципа Ферма:

$$\delta L = n \cdot \delta \int_A^B ds = 0 \Longrightarrow \delta \int_A^B ds = 0$$

Интеграл $\int_A^B ds$ представляет собой геометрическую длину дуги между точками A и B. Из евклидовой геометрии известно, что кратчайшим расстоянием между двумя точками является прямая линия.

2.3. Закон независимости распространения световых пучков

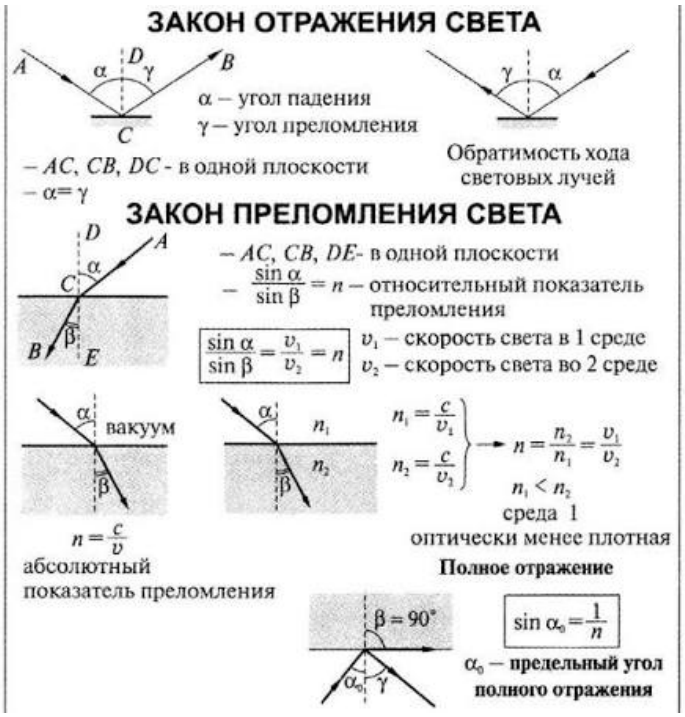
> **Формулировка:** Эффект, производимый каждым отдельным световым пучком, не зависит от того, распространяются ли одновременно с ним другие световые пучки или они перекрыты.

При пересечении нескольких световых пучков в пространстве они не искажают друг друга и продолжают распространяться за областью пересечения так, как если бы других пучков не существовало. Волновым обоснованием закона является линейность уравнений Максвелла в вакууме и линейных оптических средах (присутствует принцип суперпозиции электромагнитных полей).

2.4. Законы отражения и преломления света (Закон Снеллиуса)

При падении светового луча на плоскую границу раздела двух прозрачных изотропных сред с показателями преломления n_1 и n_2 происходит разделение энергии падающей волны на два луча: отраженный и преломленный.

Рис. 2. Геометрия отражения и преломления света: нормаль к границе раздела, угол падения θ_1, угол отражения θ_1' и угол преломления θ_2.



Закон отражения света:

1. Падающий луч, отраженный луч и нормаль к границе раздела сред в точке падения лежат в одной плоскости (плоскости падения).
2. Угол падения θ_1 равен углу отражения θ_1':

$$\theta_1 = \theta_1'$$

Закон преломления света (Закон Снелля / Снеллиуса, 1621 г.):

1. Падающий луч, преломленный луч и нормаль к границе раздела сред в точке падения лежат в одной плоскости.
2. Отношение синуса угла падения θ_1 к синусу угла преломления θ_2 есть величина постоянная для данных двух сред и равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

В инвариантной форме закон Снеллиуса записывается как:

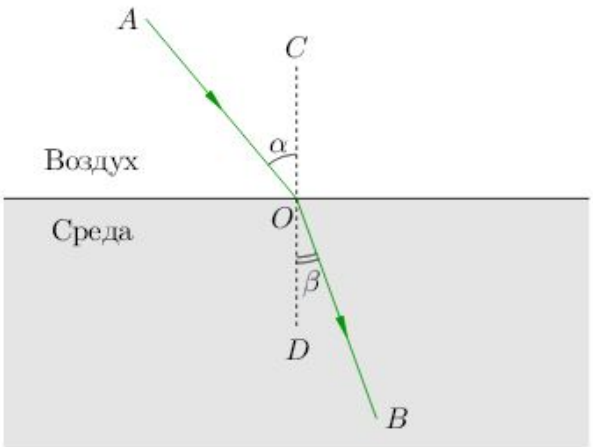
$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

2.5. Эффект полного внутреннего отражения (ПВО)

Если свет распространяется из **оптически более плотной среды** в **оптически менее плотную среду** ($n_1 > n_2$), то угол преломления θ_2 больше угла падения θ_1 ($\theta_2 > \theta_1$).

Увеличение угла падения θ1
↓
Рост угла преломления θ2 (θ2 > θ1)
↓
При θ1 = θ_кр угол преломления θ2 достигает 90°
↓
Преломленный луч скользит вдоль границы раздела
↓
При θ1 > θ_кр преломление отсутствует, 100% энергии отражается во 1-ю среду

Рис. 3. Зависимость хода лучей от угла падения: переход от преломления к предельному углу и полному внутреннему отражению.



При некотором критическом угле падения $\theta_1 = \theta_{кр}$ (предельный угол падения) угол преломления становится равным $\theta_2 = 90^\circ$:

$$n_1 \cdot \sin\theta_{кр} = n_2 \cdot \sin 90^\circ = n_2$$

Отсюда **формула предельного угла полного внутреннего отражения**:

$$\sin\theta_{кр} = \frac{n_2}{n_1}$$

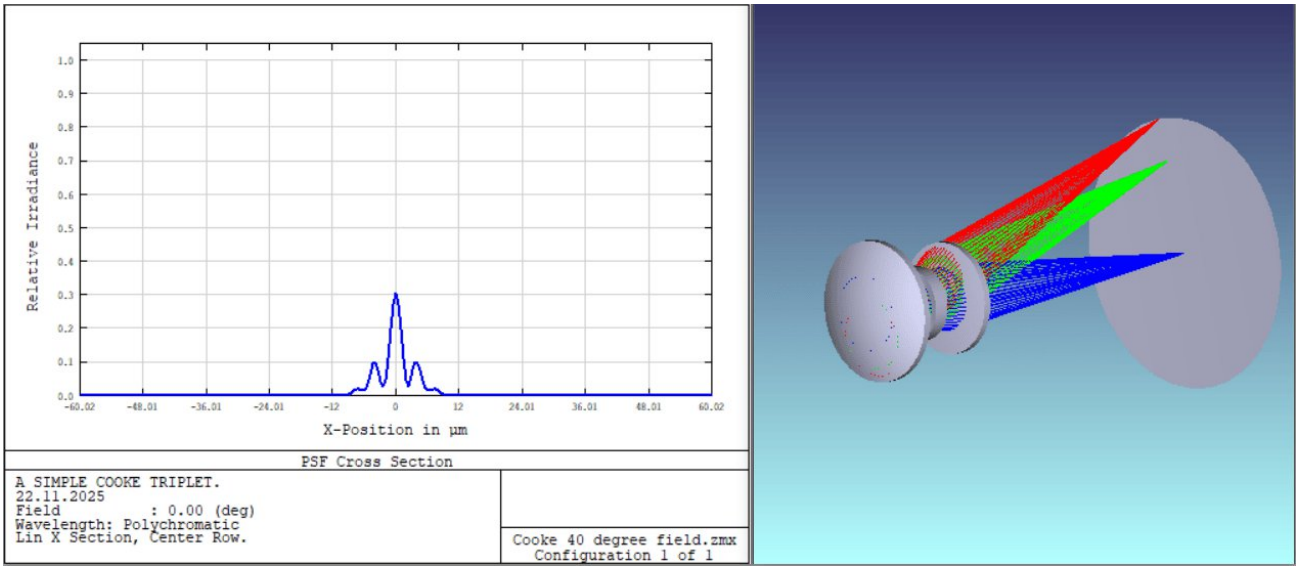
При углах падения $\theta_1 \geq \theta_{кр}$ преломленная волна полностью отсутствует, а коэффициенты отражения по энергии для любой поляризации становятся строго равными единице ($R = 100\%$).

Применение ПВО: Волоконная оптика (световоды с жилой n_1 и оболочкой $n_2 < n_1$), оборачивающие призмы в биноклях и перископах (призмы Порро, Аббе), рефрактометрия (рефрактометр Аббе).

3. СТАНДАРТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРАВИЛ ЗНАКОВ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ГОСТ 7427-78)

Для проведения однозначных расчетных и проектно-конструкторских операций в оптическом приборостроении применяется единая система координат и правил знаков, нормированная государственными и международными стандартами (**ГОСТ 7427-78** и **ISO 10110**).

Рис. 4. Ориентация оси Z вдоль оптической оси, направления отсчета высот y, отрезков s,s' и радиусов кривизны r.



3.1. Базовые правила знаков для отрезков и координат

1. **Направление распространения света:** Свет всегда распространяется **слева направо** вдоль главной оптической оси системы.

2. **Оптическая ось (Z):** Главная оптическая ось совмещается с горизонтальной осью координат Z, а за начало отсчета продольных расстояний принимается **вершина преломляющей поверхности** S.
3. **Продольные отрезки (s,s',f,f',r):**
   - Расстояния, откладываемые **вправо** от вершины поверхности по ходу луча (в область изображений), считаются **положительными (>0)**.
   - Расстояния, откладываемые **влево** от вершины поверхности против хода луча (в область предметов), считаются **отрицательными (<0)**.
4. **Радиус кривизны поверхности (r):**
   - Выпуклая вправо поверхность имеет центр кривизны C, расположенный справа от вершины $S \Longrightarrow r > 0$.
   - Вогнутая вправо (выпуклая влево) поверхность имеет центр кривизны C, расположенный слева от вершины $S \Longrightarrow r < 0$.
5. **Поперечные отрезки (высоты y,y'):**
   - Высоты предметов и изображений, откладываемые **вверх** от оптической оси, считаются **положительными ($y > 0$)**.
   - Высоты, откладываемые **вниз** от оптической оси, считаются **отрицательными ($y < 0$)**.

3.2. Правила знаков для углов

1. **Углы между лучами и оптической осью (σ,σ'):** Угол считается **положительным**, если для совмещения оптической оси с лучом по наименьшему углу ось нужно повернуть **по часовой стрелке**.
2. **Углы падения и преломления (i,i'):** Угол между нормалью к поверхности и лучом считается **положительным**, если для совмещения нормали с лучом нормаль нужно повернуть **по часовой стрелке**.
3. **Углы наклона поверхностей (α):** Угол между оптической осью и нормалью считается положительным при повороте оси к нормали по часовой стрелке.

3.3. Представление оптических систем через конструктивные параметры

Любая центрированная оптическая система (состоящая из сферических или плоских поверхностей) в расчетах исчерпывающе задается набором своих **конструктивных параметров**:

1. **Радиусы кривизны поверхностей:** $r_1,r_2,r_3,\ldots,r_m$ (плоская поверхность имеет $r = \infty$).
2. **Осевые расстояния (толщины и воздушные промежутки):** $d_1,d_2,\ldots,d_{m-1}$, где d_i — расстояние по оптической оси между вершинами i-й и $(i+1)$-й поверхностей.
3. **Показатели преломления сред:** $n_1,n_2,n_3,\ldots,n_m,n'_m$ для расчетной длины волны (обычно жёлтая линия гелия d: $\lambda_d = 587{,}56$ нм или линия d натрия $\lambda = 589{,}3$ нм).
4. **Световые диаметры поверхностей:** $D_{\text{св}1},D_{\text{св}2},\ldots,D_{\text{св}m}$.

Паспорт центрированной линзовой системы (Пример):

№ поверхн. (i)	Радиус кривизны r_i, мм	Толщина / Промежуток d_i, мм	Показатель преломления n_d	Марка оптического стекла

№ поверхн. (i)	Радиус кривизны r_i, мм	Толщина / Промежуток d_i, мм	Показатель преломления n_d	Марка оптического стекла
1	+ 50,0	8,0	1,5163	К8 (Крон)
2	− 35,0	2,5	1,6128	Ф1 (Флинт)
3	− 120,0	—	1,0000	Воздух

4. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ЕЕ КАРДИНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТЕОРИЯ АББЕ — ГАУССА)

4.1. Концепция идеальной (параксиальной) оптической системы

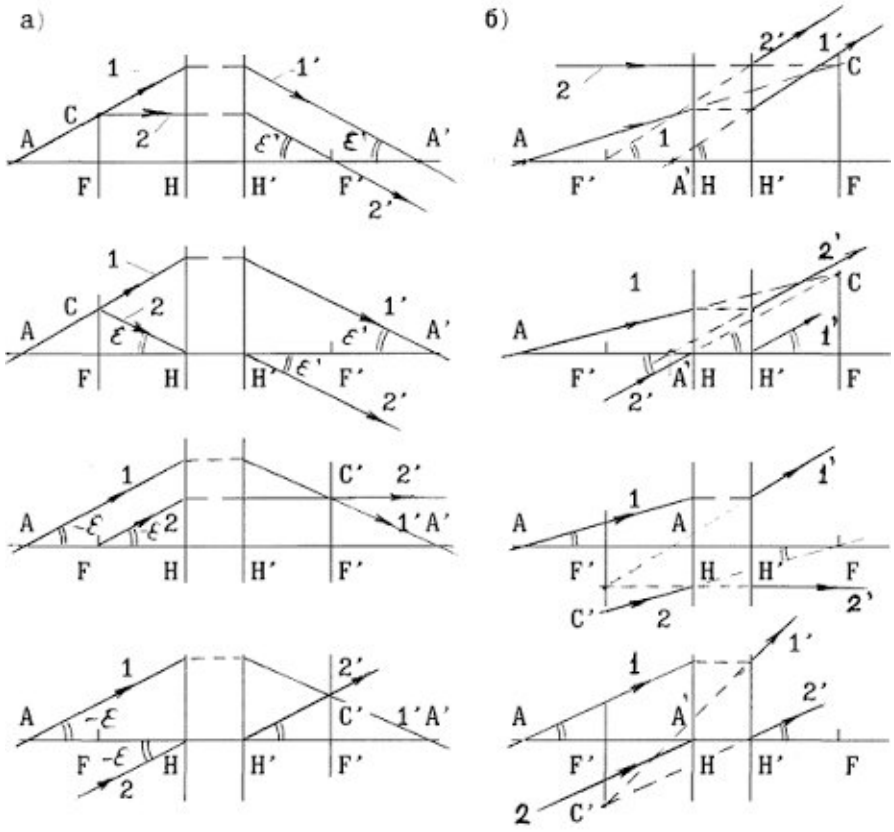
Оптическая система называется **идеальной (стигматической)**, если она отображает каждую точку пространства предметов в точку пространства изображений, каждую прямую линию — в прямую линию, а любую плоскую фигуру — в подобную плоскую фигуру.

В реальных оптических системах стигматическое отображение строго выполняется только в **параксиальной области** (области Гаусса) — бесконечно узком пространстве, непосредственно прилегающем к оптической оси, где углы наклона лучей σ и углы падения i настолько малы, что с высокой точностью справедливо приближение:

$$\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx \alpha \quad \text{(в радианах)}$$

Согласно теории Карла Фридриха Гаусса и Эрнста Аббе, свойства любой сложной центрированной оптической системы параксиальной области полностью определяются положением ее **шести кардинальных элементов**.

Рис. 5. Кардинальные точки и плоскости оптической системы: передний и задний фокусы F,F′, главные точки P,P′ (H,H′), узловые точки N,N′.



4.2. Характеристика шести кардинальных элементов

1. Передний фокус (F) и Задний фокус (F′)

- **Передний (предметный) фокус (*F*):** Точка на оптической оси в пространстве предметов, лучи из которой после прохождения через оптическую систему выходят параллельно ее оптической оси.
- **Задний (изобразительный) фокус (*F′*):** Точка на оптической оси в пространстве изображений, в которой пересекаются лучи, падающие на оптическую систему параллельно ее оптической оси.

2. Главные точки (P,P′) и Главные плоскости (H,H′)

- **Главные плоскости (передняя *H* и задняя *H′*):** Сопряженные сопрягаемые плоскости, перпендикулярные оптической оси, для которых линейное увеличение системы строго равно плюс единице ($\beta = +1$).
- **Передняя главная точка (*P* или *H*):** Точка пересечения передней главной плоскости с оптической осью.
- **Задняя главная точка (*P′* или *H′*):** Точка пересечения задней главной плоскости с оптической осью.

3. Узловые точки (N,N′) и Узловые плоскости

- **Узловые точки (передняя *N* и задняя *N′*):** Пара сопряженных точек на оптической оси, обладающих тем свойством, что любой луч, проходящий через передний узел *N* под углом σ к оси, выходит из заднего узла *N′* строго параллельно своему первоначальному направлению ($\sigma' = \sigma$). Угловое увеличение в узловых точках равно плюс единице ($\gamma = +1$).

- *Важное свойство:* Если показатели преломления среды до и после оптической системы одинаковы ($n = n'$), то узловые точки **совпадают с главными точками** ($N \equiv P$, $N' \equiv P'$).

4. Фокусные расстояния (f, f')

- **Переднее фокусное расстояние (f):** Отрезок, откладываемый от передней главной точки P до переднего фокуса F:
$$f = PF = s_F - s_P$$
- **Заднее фокусное расстояние (f'):** Отрезок, откладываемый от задней главной точки P' до заднего фокуса F':
$$f' = P'F' = s'_{F'} - s'_{P'}$$

Фокусные расстояния связаны с показателями преломления сред соотношением:

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$$

Если с обеих сторон системы находится воздух ($n = n' = 1$), то переднее и заднее фокусные расстояния **равны по абсолютной величине и противоположны по знаку**:

$$f' = -f$$

4.3. Оптическая сила системы (D)

Оптическая сила (D): фундаментальная величина, характеризующая преломляющую способность оптической системы. Определяется как отношение показателя преломления среды пространства изображений к заднему фокусному расстоянию:

$$D = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

Единицей измерения оптической силы в СИ является **диоптрия (дптр,** м^{-1}**)**. 1 диоптрия — это оптическая сила системы с фокусным расстоянием $f' = 1$ м, находящейся в воздухе ($n' = 1$).

5. АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИНЗ

5.1. Аналитические формулы идеальной оптической системы

1. Формула Гаусса (связь через координаты от главных плоскостей)

Если положение предмета z и изображения z' отсчитываются от соответствующих главных точек P и P' ($z = PF$, $z' = P'F'$), то сопряженные расстояния связаны соотношением:

$$\frac{n'}{z'} - \frac{n}{z} = \frac{n'}{f'} = D$$

Для центрированной системы в воздухе ($n = n' = 1, f' = -f$):

$$\frac{1}{z'} - \frac{1}{z} = \frac{1}{f'}$$

Применяя стандартные обозначения для отрезков s (расстояние от предмета до вершины/главной точки) и s' (расстояние до изображения), учитывая правило знаков ($s < 0$ для действительного предмета, $s' > 0$ для действительного изображения):

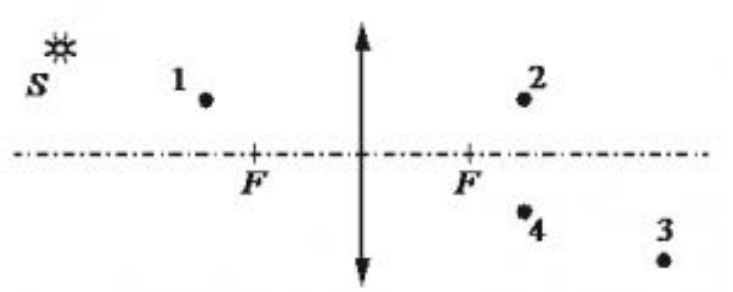
$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$

2. Формула Ньютона (связь через координаты от фокусов)

Если положения предмета x и изображения x' отсчитываются от соответствующих фокусов F и F' ($x = FA$, $x' = F'A'$):

- $x < 0$, если предмет расположен слева от переднего фокуса F;
- $x' > 0$, если изображение расположено справа от заднего фокуса F'.

Рис. 6. Вычисление координат предмета и изображения по формуле Ньютона от фокальных точек F и F'.



Формула Ньютона:

$$x \cdot x' = f \cdot f'$$

Если среда с обеих сторон одинакова ($n = n'$, $f \cdot f' = -f'^2$):

$$x \cdot x' = -(f')^2$$

5.2. Виды оптического увеличения

Качество и масштаб сформированного изображения характеризуются тремя видами оптического увеличения:

1. Поперечное (линейное) увеличение (β)

Отношение линейного размера изображения y', перпендикулярного оптической оси, к линейному размеру предмета y:

$$\beta = \frac{y'}{y}$$

- Если $\beta > 0$, изображение **прямое**.
- Если $\beta < 0$, изображение **перевернутое**.
- Если $|\beta| > 1$, изображение **увеличенное**.
- Если $|\beta| < 1$, изображение **уменьшенное**.

Связь линейного увеличения с фокусными расстояниями и координатами:

$$\beta = \frac{n \cdot z'}{n' \cdot z} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$$

2. Продольное увеличение (α)

Отношение бесконечно малого смещения изображения dz' вдоль оптической оси к вызвавшему его смещению предмета dz:

$$\alpha = \frac{dz'}{dz} = \frac{dx'}{dx}$$

Связь между продольным и поперечным увеличением:

$$\alpha = \frac{n'}{n} \cdot \beta^2$$

Для системы в однородной среде ($n = n'$):

$$\alpha = \beta^2$$

Продольное увеличение всегда положительно ($\alpha > 0$), что означает: при смещении предмета вдоль оси вправо изображение также смещается вправо.

3. Угловое увеличение (γ)

Отношение тангенса угла наклона сопряженного луча в пространстве изображений σ' к тангенсу угла наклона того же луча в пространстве предметов σ:

$$\gamma = \frac{\tan\sigma'}{\tan\sigma}$$

Теорема (Инвариант) Лагранжа — Гельмгольца:

Для любого светового луча в параксиальной области произведение показателя преломления среды, размера предмета и угла наклона луча есть величина постоянная:

$$n \cdot y \cdot \tan\sigma = n' \cdot y' \cdot \tan\sigma' = \text{inv}$$

Отсюда вытекает фундаментальное соотношение между всеми видами увеличения:

$$\beta \cdot \gamma = \frac{n}{n'}$$

5.3. Формула тонкой линзы

Тонкая линза — это линза, толщина которой по оптической оси d пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ее сферических поверхностей r_1 и r_2 ($d \ll |r_1|, |r_2|$). В тонкой линзе передняя и задняя главные плоскости сливаются в одну совмещенную плоскость, проходящую через оптический центр линзы O.

Оптическая сила тонкой линзы с показатель преломления $n_{\text{д}}$, находящейся в среде с показателем преломления $n_{\text{ср}}$, выражается **формулой шлифовщика линз**:

$$D = \frac{1}{f'} = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1\right)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

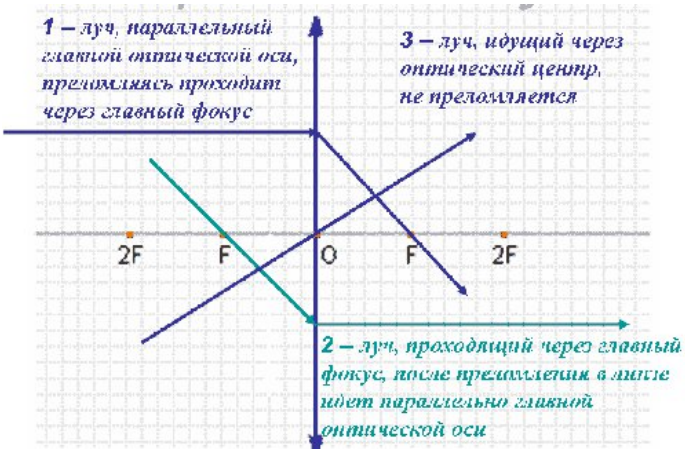
где r_1 и r_2 подставляются строго с учетом правила знаков ГОСТ 7427-78:

- Для двояковыпуклой линзы: $r_1 > 0, r_2 < 0 \Longrightarrow \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) > 0.$
- Для двояковогнутой линзы: $r_1 < 0, r_2 > 0 \Longrightarrow \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) < 0.$

5.4. Графические методы построения изображений

Для графического построения изображения произвольной точки A в тонкой линзе или идеальной оптической системе используют свойства трех **«замечательных» лучей**:

Рис. 7. Построение изображения предмета трех замечательных лучей в собирающей линзе.



1. **Параллельный луч (1):** Луч, падающий на систему параллельно главной оптической оси, после преломления проходит через задний фокус F' (или его продолжение пересекает F').
2. **Фокальный луч (2):** Луч, проходящий через передний фокус F (или направленный на него), после преломления выходит параллельно главной оптической оси.
3. **Центральный луч (3):** Луч, проходящий через оптический центр тонкой линзы O (или через узловые точки системы), не испытывает углового отклонения.

Алгоритм определения характера изображения:

Положение предмета относительно фокуса

Собирающая линза (f' > 0)
- |s| > 2f → Действительное, уменьшенное, перевернутое
- |s| = 2f → Действительное, равное (β = -1), перевернутое
- f' < |s| < 2f → Действительное, увеличенное, перевернутое
- |s| = f → Изображение в бесконечности (β = ∞)
- |s| < f → Мнимое, увеличенное, прямое

Рассеивающая линза (f' < 0)
- При любом s: Мнимое, уменьшенное, прямое

5.5. Экспериментальные методы измерения фокусных расстояний линз

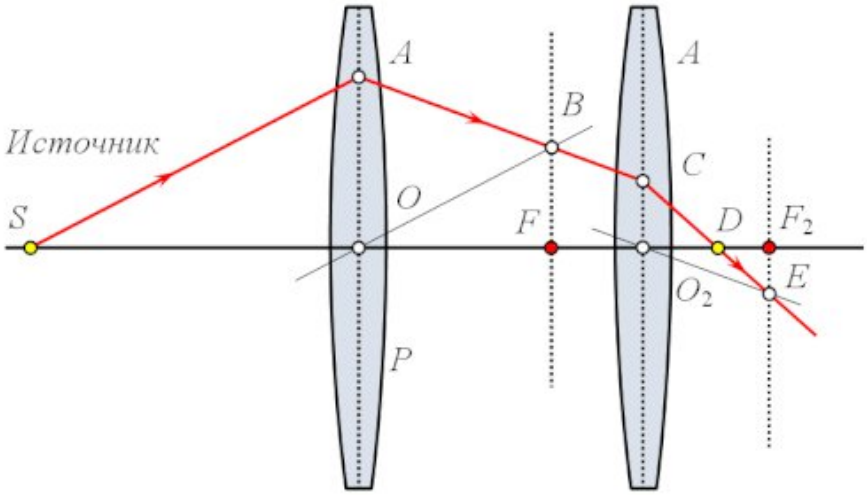
В лаборантской и исследовательской практике для точного определения фокусного расстояния f' собирающих и рассеивающих линз применяются классические физические методы:

1. Метод Бесселя (для собирающих линз)

Предмет (сетка) и экран устанавливаются на фиксированном расстоянии L друг от друга, превышающем четыре фокусных расстояния линзы ($L > 4f'$). Перемещением линзы между предметом и экраном находят два положения линзы, при которых на экране получаются четкие изображения:

- В первом положении — увеличенное изображение;
- Во втором положении — уменьшенное изображение.

Рис. 8. Оптическая схема метода Бесселя: фиксированное расстояние L и смещение линзы e.



Если расстояние между двумя положениями линзы равно e, то искомое фокусное расстояние расчетно определяется без измерения расстояний до главных плоскостей по **формуле Бесселя**:

$$f' = \frac{L^2 - e^2}{4L}$$

Метод Бесселя обладает высокой точностью, так как устраняет систематическую погрешность, связанную с измерением толщины линзы и незивестным положением главных плоскостей.

2. Метод Аббе (для сложных оптических систем)

Метод основан на измерении поперечного увеличения β_1 и β_2 при двух различных положениях предмета, смещенного вдоль оси на известное расстояние Δx. Фокусное расстояние рассчитывается по соотношению:

$$f' = \frac{\Delta x}{\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_1}}$$

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

1. **Асимптотический статус геометрической оптики:** Геометрическая оптика представляет собой строго доказанный физический предел волновой оптики при $\lambda \to 0$. Ее законы выводятся из вариационного принципа Ферма, отражая фундаментальное свойство светового поля — минимальность оптической длины пути.
2. **Практическая мощность аппарата правила знаков (ГОСТ 7427-78):** Применение стандартизированной системы координат и правила знаков преобразует сложные геометрические построения в строгие матричные алгоритмы, позволяющие проводить автоматизированный сквозной габаритный и аберрационный расчет оптических приборов любой степени сложности.
3. **Единство теории кардинальных элементов Гаусса:** Независимо от количества преломляющих и отражающих поверхностей, внутренних толщин и марок оптических стекол, центрированная система параксиальной области полностью описывается положением трех пар кардинальных точек (фокусов, главных и узловых точек), что существенно упрощает интеграцию линзовых блоков.
4. **Прикладное значение:** Законы геометрической оптики, эффект полного внутреннего отражения и методики измерения параметров линз составляют инженерно-технологический базис современного приборостроения — от проектирования волоконно-оптических гироскопов и квантовых усилителей до разработки лапароскопических эндпоскопов и космических телескопов.