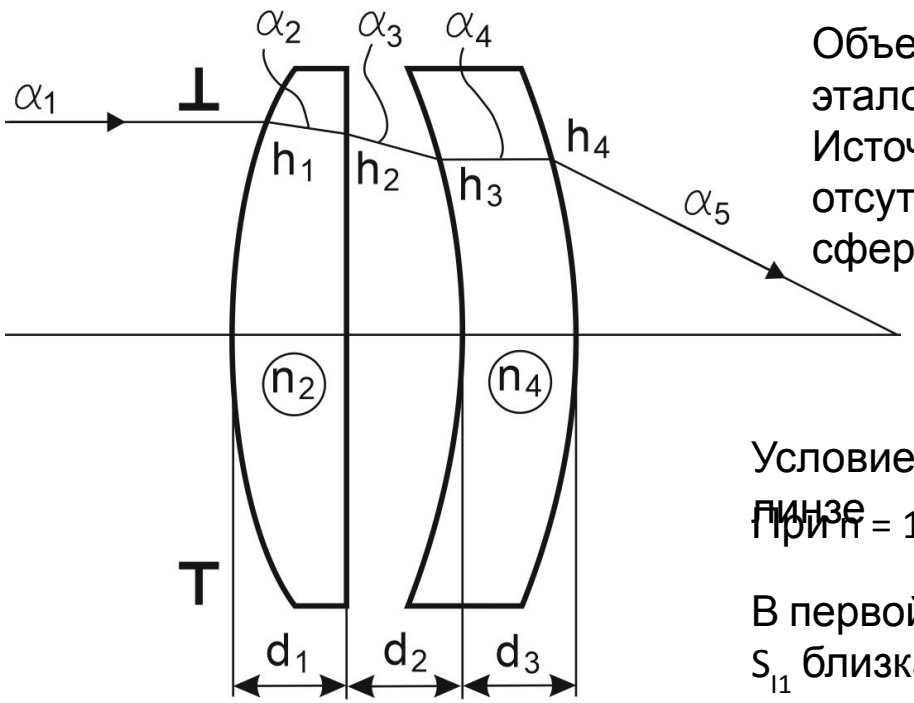
Расчет некоторых оптических систем по теории аберраций третьих порядков

Расчет объектива - монохромата



Объектив – монохромат применяют в интерферометрах для создания эталонного сферического волнового фронта.
Источник излучения – лазер, поэтому лишь одна рабочая длина волны, отсутствуют наклонные пучки лучей. Достаточно исправить лишь сферическую аберрацию.

В оптической системе предусмотрено раздельное исправление сферической аберрации третьего и высших порядков.

Условие минимизации сферической аберрации в одиночной линзе

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{n\cdot(2n-1)-4}{n\cdot(2n+1)}$$

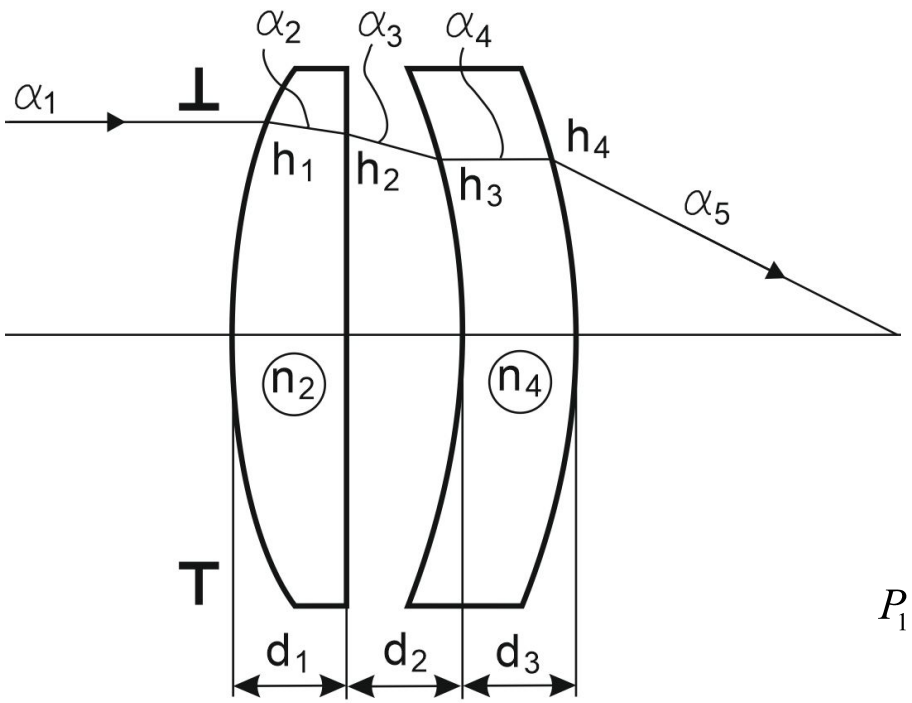
При n = 1.5 r_1/r_2 = -1:6, при n = 1.686 r_1/r_2 = 0

В первой линзе – **в силовом компоненте** – сферическая аберрация III порядка S_{I1} близка к минимальной. Для этого рекомендуется использовать плосковыпуклую линзу.

Корректор аберрации высших порядков – менисковая линза, внутри которой первый вспомогательный луч идет параллельно оптической оси, а значит $S_{I2} = h_3P_3+h_4P_4$ = const вне зависимости от толщины линзы $h_3 = h_4$, d_3.

При этом реальный луч не параллелен оптической оси из-за аберрации высших порядков. Меняя d_3, можно влиять реальные аберрации менисковой линзы.

Расчет объектива - монохромата



Параметры 1-го вспомогательного луча

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2$$

$$\alpha_3 = n_2 \cdot \alpha_2 \qquad h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = f'$$

$$\alpha_4 = 0$$

$$\alpha_5 = 1$$

Поверхностные коэффициенты $P_k = \left(\frac{\delta\alpha_k}{\delta\mu_k}\right)^2 \delta(\alpha_k \mu_k)$

$$P_1 = \frac{n_2 \alpha_2^{\,3}}{(n_2 - 1)^2} \qquad P_2 = n_2\left(n_2^{\,2} - 1\right)\alpha_2^{\,3} \qquad P_3 = -\left(\frac{n_4}{n_4 - 1}\right)^2 n_2^{\,3}\alpha_2^{\,3} \qquad P_4 = \left(\frac{n_4}{n_4 - 1}\right)^2$$

Сумма Зейделя

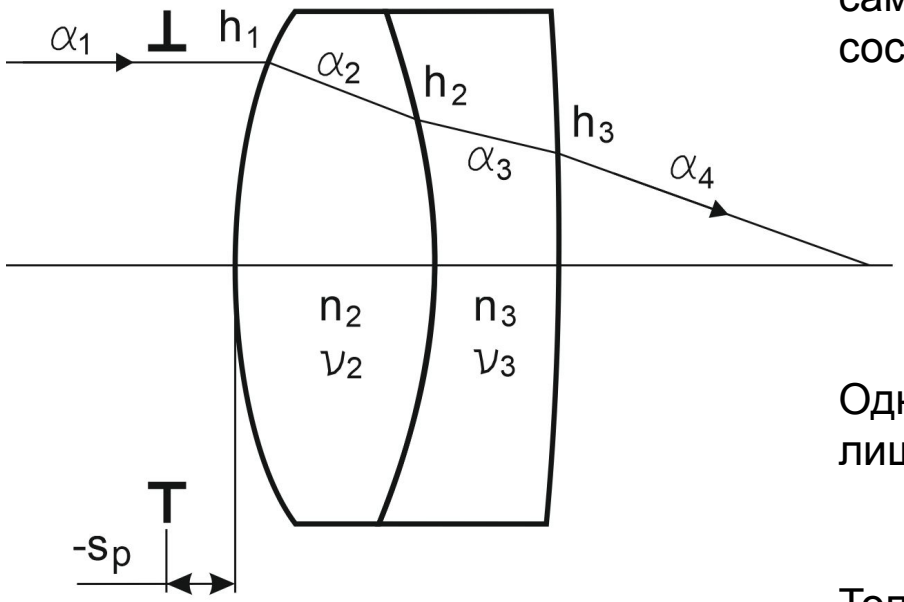
$$S_I = \sum_{k=1}^{4} h_k P_k = \left(P_1 + P_2 + P_3 + P_4\right) f' = 0 \Rightarrow \alpha_2 = n_2 \cdot \sqrt[3]{1 - \left(\frac{n_4 - 1}{n_4(n_2 - 1)}\right)^2 \left((n_2 - 1)^2 + \frac{2 - n_2}{n_2}\right)}$$

Радиусы кривизны поверхностей

$$r_k = h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k \alpha_k}$$

Зиновьев В.С., Пуряев Д.Т. Расчет объектива-монохромата: Уч. пособие по дисциплине «Оптические измерительные приборы» / Под ред. Д.Т. Пуряева. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. 36 с.

Расчет двухлинзового склеенного объектива



Двухлинзовый склеенный объектив широко применяется как самостоятельный объектив с D/f’ до 1:4, либо как базовый компонент в составе более сложных объективов.

Переменными параметрами могут являться:
- радиусы (3 шт.),
- толщины (2 шт.),
- марки стекол (2 шт).

Однако независимых переменные параметров, влияющих на аберрации, лишь три: - радиусы (2 шт.),
- пара стекол (1 комбинация).

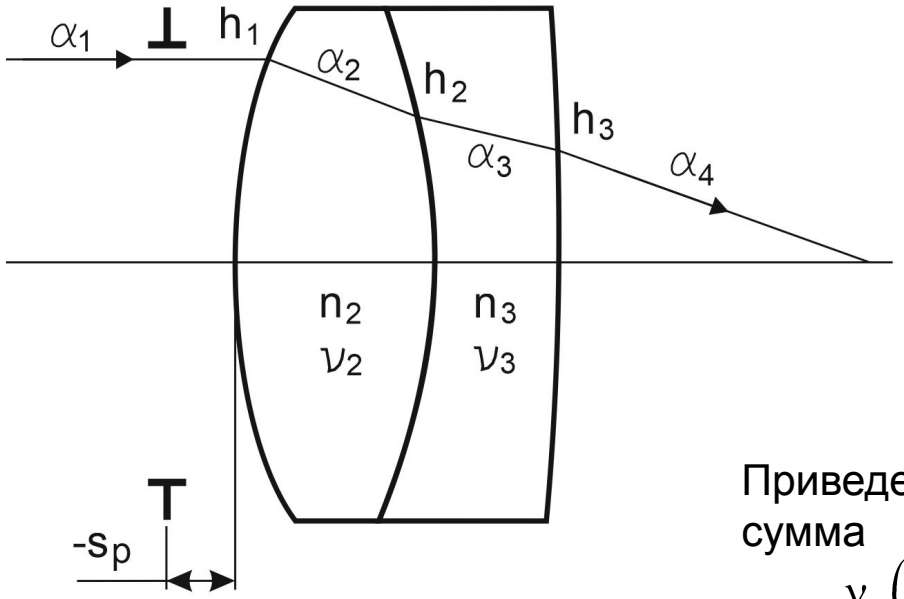
Толщины слабо влияют на аберрации, а r_3 определяется так, чтобы обеспечить требуемое фокусное расстояние f’.

Три независимых параметра позволяют исправить три аберрации. Обычно это
сферическая аберрация, меридиональная кома, хроматизм положения.

Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. 4-е изд., СПб.: Лань, 2008.

Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. - Л.: Машиностроение, 1975. - 640 с.

Расчет двухлинзового склеенного объектива



Условия нормировки

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_4 = 1; \quad h_1 = h_2 = h_3 = f'$$

$$\beta_1 = 1; \quad H_1 = s_P; \quad I = -n_1 f'$$

Принимая толщины равными 0, имеем: $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi$

В относительных (приведенных) величинах: $\varphi_1 + \varphi_2 = 1,$

где $\varphi_1 = \Phi_1 / \Phi = f' / f'_1; \quad \varphi_1 = f' / f'_2$

е

Приведенная первая хроматическая сумма $\overline{\Delta s'_{\lambda 1 \lambda 2}} = \dfrac{\Delta s'_{\lambda 1 \lambda 2}}{f'} = \dfrac{1}{f'}\left(\dfrac{f'_1}{\nu_2} + \dfrac{f'_2}{\nu_3}\right) = \dfrac{\varphi_1}{\nu_2} + \dfrac{\varphi_2}{\nu_3}$

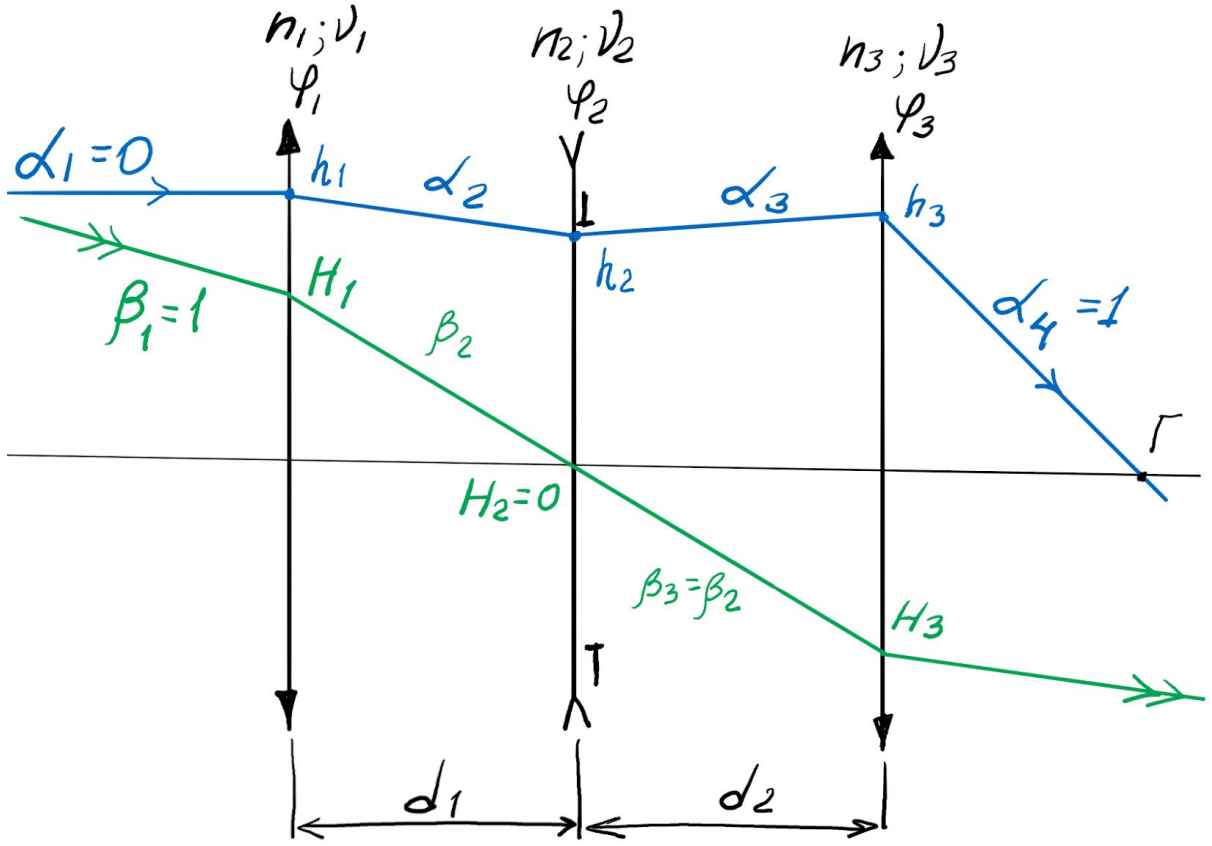
$$\varphi_1 = \frac{\nu_2\left(1 + \nu_3 \overline{\Delta s'_{\lambda 1 \lambda 2}}\right)}{\nu_2 - \nu_3}; \qquad \varphi_2 = 1 - \varphi_1$$

Приведенная первая сумма $\overline{S_I}(\alpha_2, \alpha_3) = \sum_{k=1}^{3} h_k P_k \Big/ f' = P_1(\alpha_2) + P_2(\alpha_2, \alpha_3) + P_3(\alpha_3)$, где $P_k = \left(\dfrac{\delta \alpha_k}{\delta \mu_k}\right)^2 \delta(\alpha_k \mu_k)$

Если стёкла заданы, то углы α_2, α_3 вычисляются.

Можно подобрать комбинацию стекол, при которой кома будет наиболее близка к требуемой.

Расчет объектива триплета



Условия нормировки

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_4 = 1; \quad \overline{h}_1 = 1$$

$$\beta_1 = 1; \quad \overline{H}_2 = 0; \quad \overline{I} = -1$$

1. Задаем материалы: $n_1, n_2, n_3; \quad \nu_1, \nu_2, \nu_3$

2. Из условий

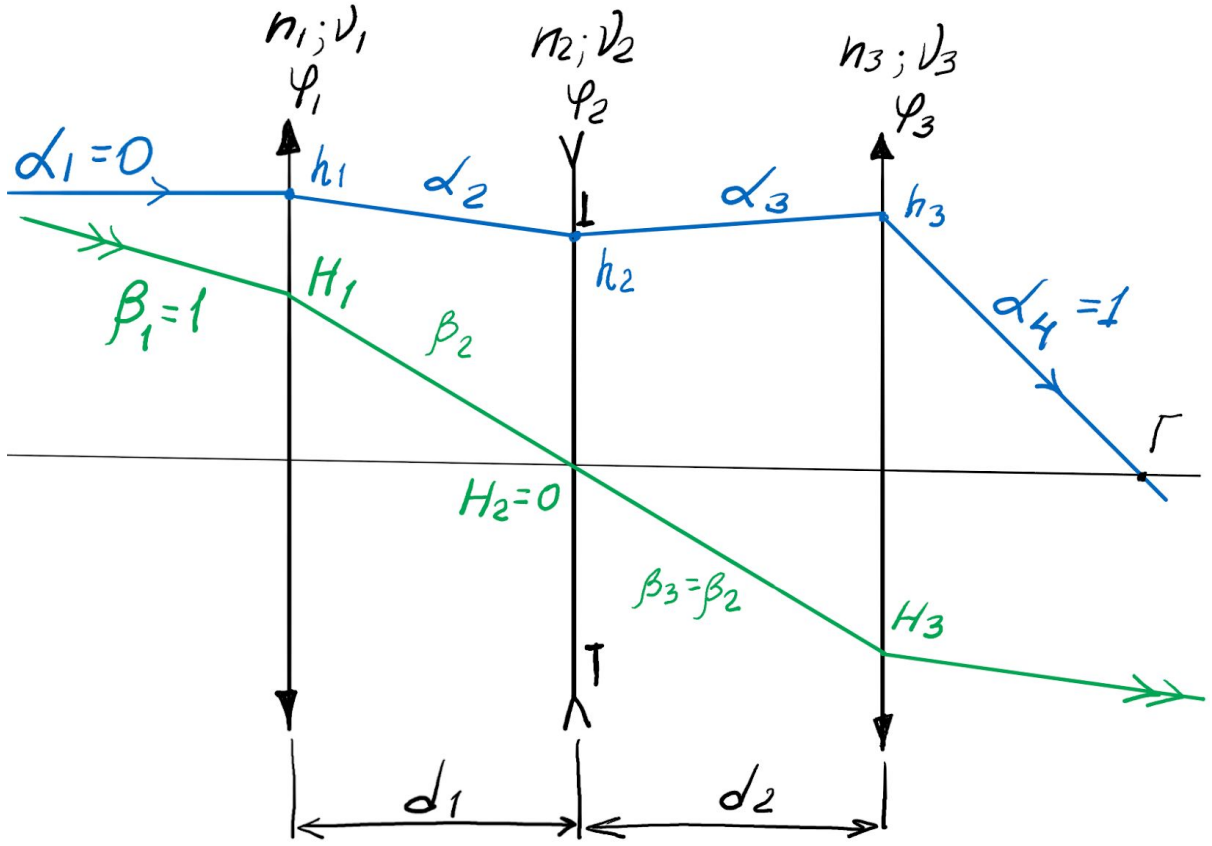
- масштаба $\varphi_1 + \overline{h}_2\varphi_2 + \overline{h}_3\varphi_3 = 1,$
- исправления кривизны $\overline{S}_{IV} = \dfrac{\varphi_1}{n_1} + \dfrac{\varphi_2}{n_2} + \dfrac{\varphi_3}{n_3},$
- ахроматизации $\overline{S}_{Ixp} = -\left(\dfrac{\varphi_1}{\nu_1} + \overline{h}_2^{\,2}\dfrac{\varphi_2}{\nu_2} + \overline{h}_3^{\,2}\dfrac{\varphi_3}{\nu_3}\right)$

находим приведенные силы и высоты

$$\overline{h}_1, \overline{h}_2, \overline{h}_3; \quad \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$$

Уравнений меньше, чем переменных, поэтому решений может быть много. Изначально кроме материалов задают r_1, r_2

Расчет объектива триплета



Условия нормировки

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_4 = 1; \quad \bar{h}_1 = 1$$

$$\beta_1 = 1; \quad \bar{H}_2 = 0; \quad \bar{I} = -1$$

3. По формулам углов и высот находим

(ф. углов) $\alpha_2 = \alpha_1 + \bar{h}_1\varphi_1 = \varphi_1$

(ф. углов) $\beta_2 = \beta_1 + \bar{H}_1\varphi_1 = 1 + d_1\beta_2\varphi_1$

$$\left.\begin{aligned} &\beta_2 = \frac{1}{1 - d_1\varphi_1} \\ &\bar{h}_2 = \bar{h}_1 - d_1\alpha_1 = 1 - d_1\varphi_1 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \beta_2 = \frac{1}{\bar{h}_2}$$

(ф. высот)

(ф. высот) $\bar{H}_1 = \frac{d_1}{\bar{h}_2}; \bar{H}_3 = -\frac{d_2}{\bar{h}_2}$

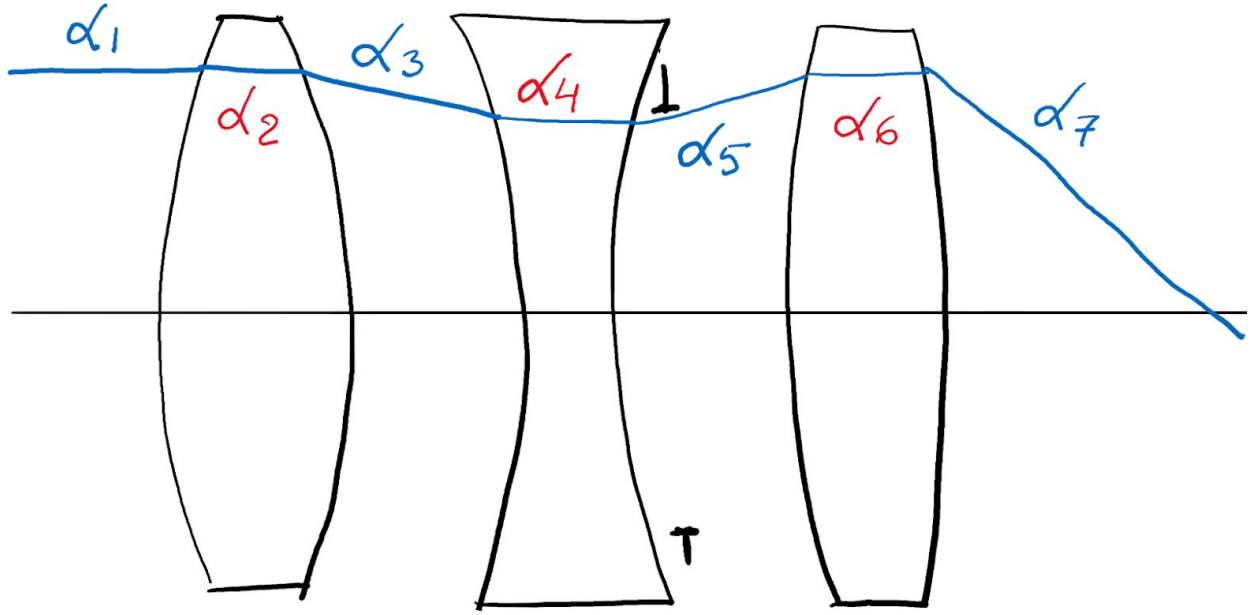
$$\bar{h}_3 = \bar{h}_2 - d_2\alpha_3 = \bar{h}_2 - d_2\left(\alpha_2 + \bar{h}_2\varphi_2\right) = 1 - d_1\varphi_1 - d_2\left(\varphi_1 + \varphi_2 - d_1\varphi_1\varphi_2\right)$$

Из всего этого находим $d_1, d_2;\ \bar{H}_1, \bar{H}_3$

4. Вычисляем $\bar{S}_{IIxp} = -\left(\bar{H}_1\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \bar{H}_3 \cdot \bar{h}_3\frac{\varphi_3}{\nu_3}\right)$

Если $\bar{S}_{IIxp}$ не удовлетворительна, то меняем исходные данные: материалы или приведенные силы φ_1, φ_2

Расчет объектива триплета



5. Определяем внутренние углы из условий:

$$\overline{S_I} = P_1 + \overline{h_2}P_2 + \overline{h_3}P_3$$

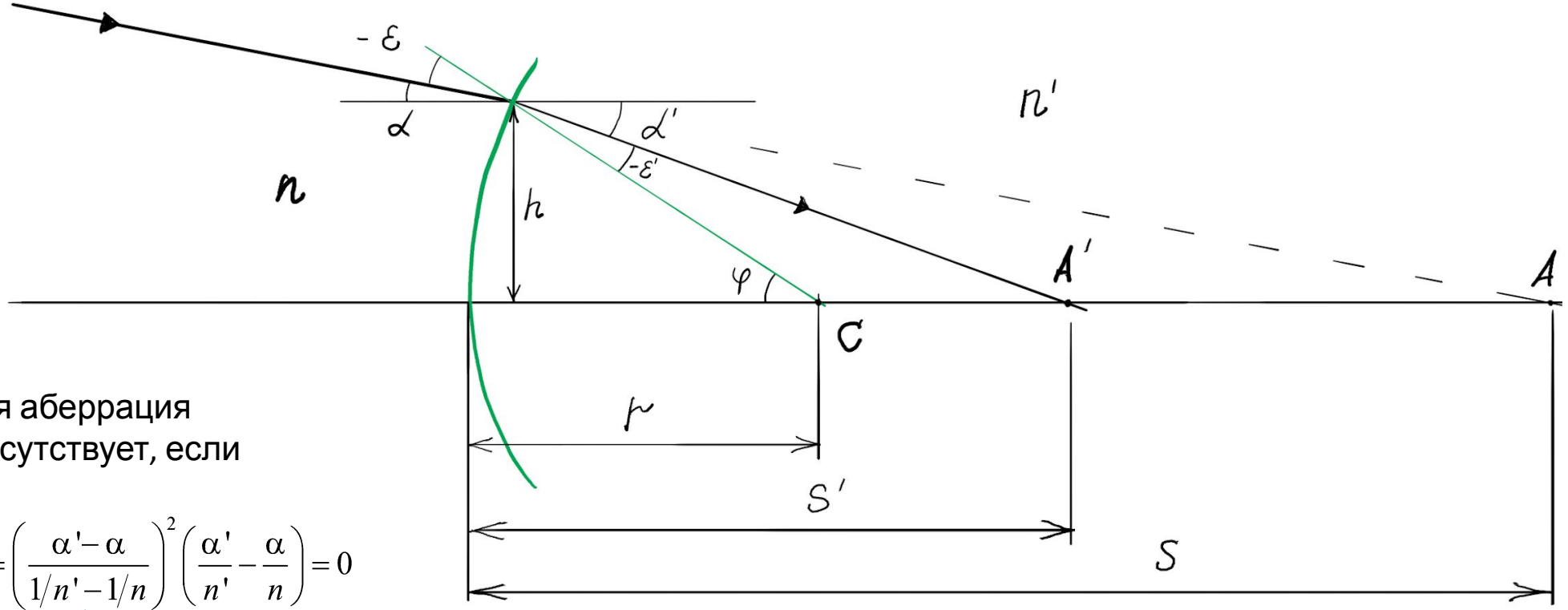
$$\overline{S_{II}} = \overline{H_1}P_1 + W_1 + W_2 + \overline{H_3}P_3 + W_3$$

$$\overline{S_{III}} = \overline{H_1}^2 P_1 + 2\overline{H_1}W_1 + \varphi_1 + \varphi_2 + \left(\overline{H_3}^2 / \overline{h_3}\right)P_1 + 2\left(\overline{H_3}/\overline{h_3}\right)W_3 + \varphi_3$$

Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. 4-е изд., СПб.: Лань, 2008.

Некоторые оптические элементы с особыми аберрационными свойствами

Апланатические поверхности



Сферическая аберрация III порядка отсутствует, если

$$P=\left(\frac{\delta\alpha}{\delta\mu}\right)^2\delta(\alpha\mu)=\left(\frac{\alpha'-\alpha}{1/n'-1/n}\right)^2\left(\frac{\alpha'}{n'}-\frac{\alpha}{n}\right)=0$$

$$\alpha'=\alpha \qquad n\cdot\alpha'=n'\cdot\alpha$$

Из геометрических соображений

$$-\varepsilon+\alpha=\varphi,\quad -\varepsilon'+\alpha'=\varphi,\quad \alpha=\frac{h}{s},\quad \alpha'=\frac{h}{s'},\quad \varphi=\frac{h}{r}$$

Закон преломления $n\cdot\varepsilon=n'\cdot\varepsilon'$

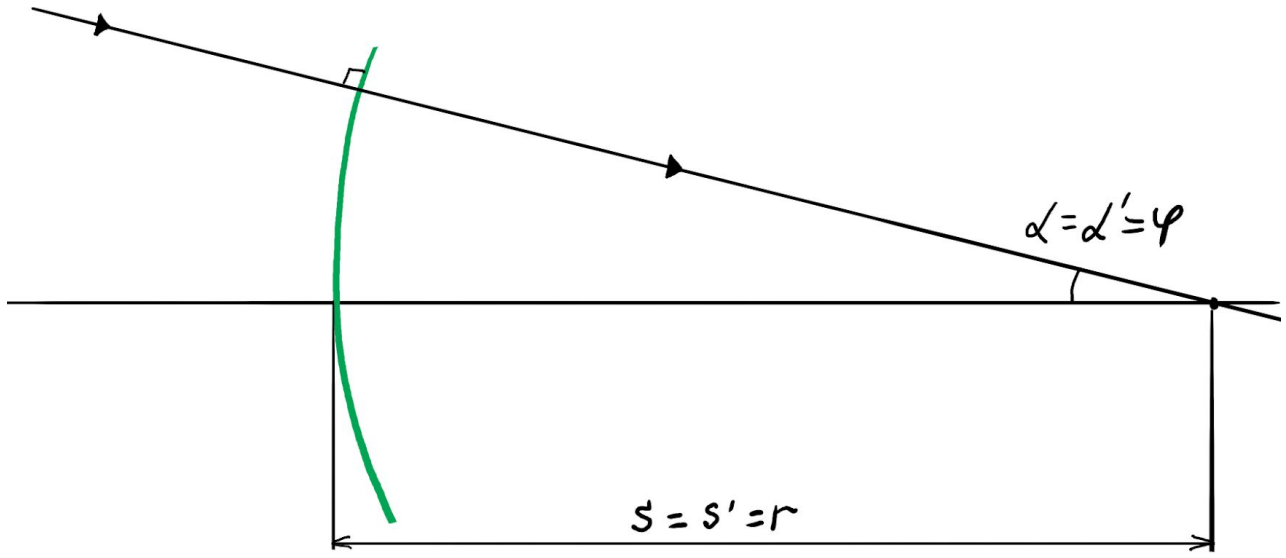
Для апланатической поверхности 1-го рода $n\cdot s=n'\cdot s'=(n+n')r$

Апланатические поверхности

Для апланатической поверхности 2-го рода

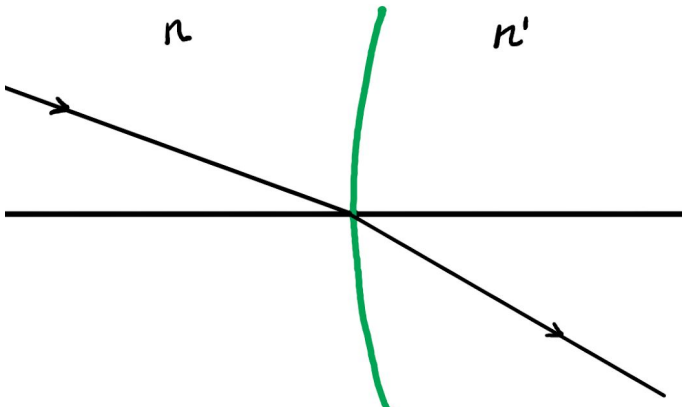
$$P=\left(\frac{\delta\alpha}{\delta\mu}\right)^2\delta(\alpha\mu)=\left(\frac{\alpha'-\alpha}{1/n'-1/n}\right)^2\left(\frac{\alpha'}{n'}-\frac{\alpha}{n}\right)=0$$

$$\alpha'=\alpha \longrightarrow s=s'=r$$

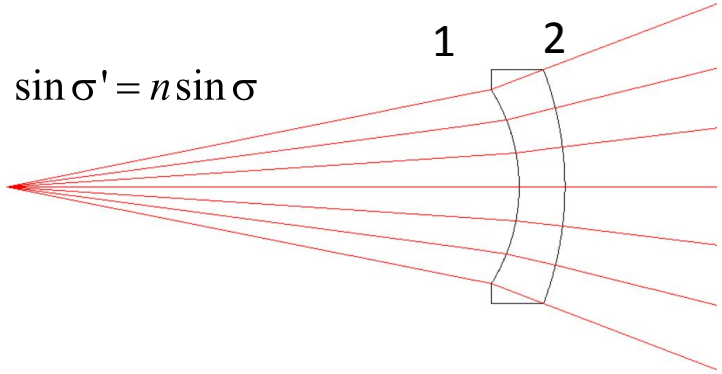


Для апланатической поверхности 3-го рода

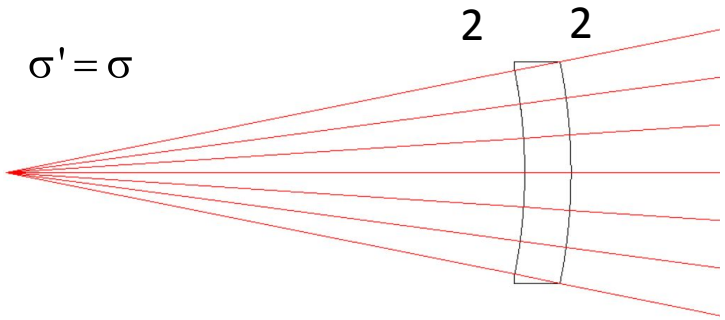
$$s=s'=0$$



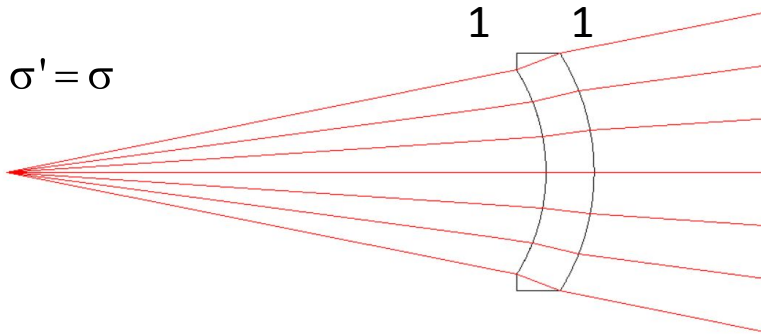
Апланатические мениски



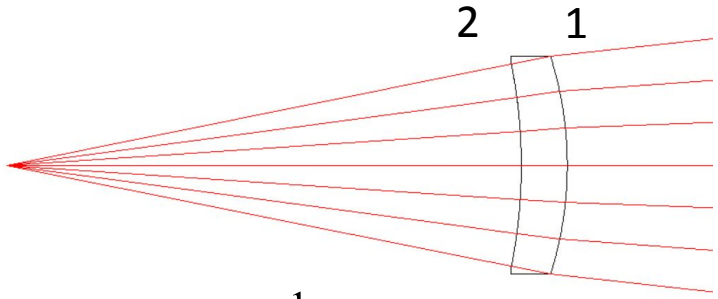
$$\sin\sigma' = n\sin\sigma$$



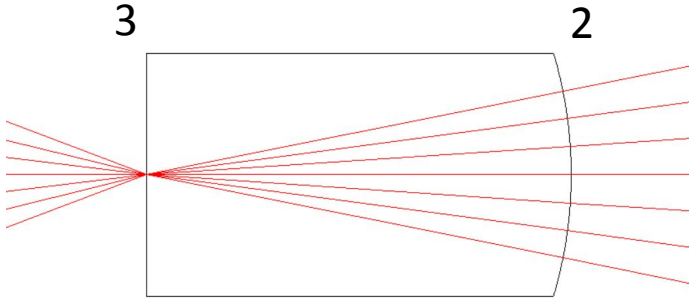
$$\sigma' = \sigma$$



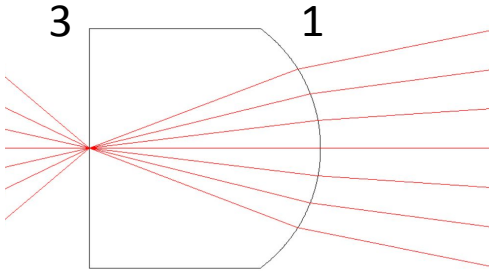
$$\sigma' = \sigma$$



$$\sin\sigma' = \frac{1}{n}\sin\sigma$$



$$\sin\sigma' = \frac{1}{n}\sin\sigma$$



$$\sin\sigma' = \frac{1}{n^2}\sin\sigma$$

Объектив – монохромат (D/f’ = 1:5, λ = 633 нм, W_{max} = 0,01 λ)

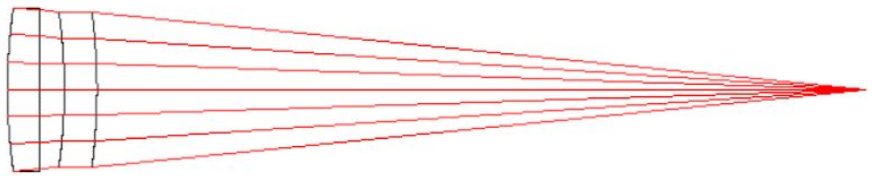
Lens Data Editor

Edit Solves View Help

	Surf:Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diame..	
	Standard	Infinity	Infinity		0.0000	
	Standard	Infinity	0.0000		10.0000	U
2	Standard	68.7100	4.0000	TF5	10.0000	
3	Standard	Infinity	3.0000		9.7945	
4	Standard	-65.6100	4.0000	TF5	9.5402	
5	Standard	-71.7800	94.3668		9.5432	
	Standard	Infinity	-		6.7E-004	

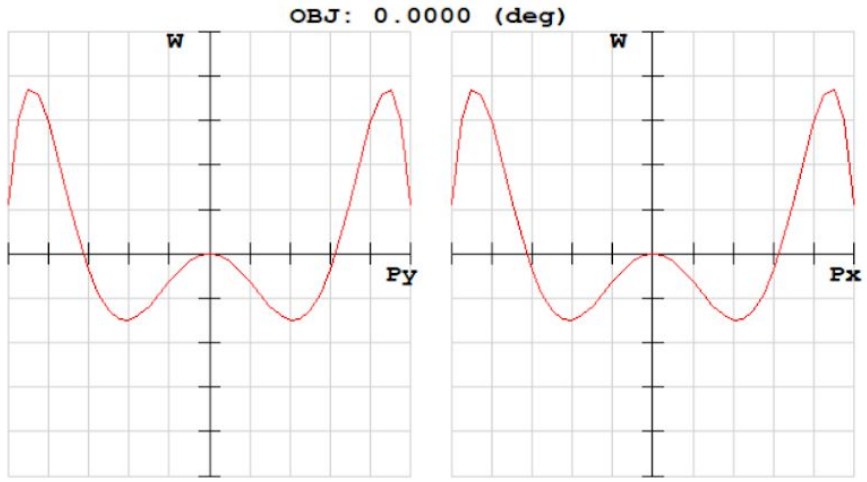
1: 3D Layout

Update Settings Print Window Text Zoom



3: OPD Fan

Update Settings Print Window Text Zoom



Optical Path Difference

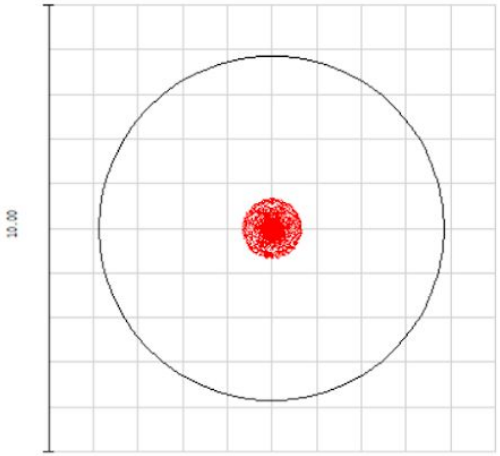
25.11.2020
Maximum Scale: ± 0.010 Waves.
0.633

Surface: Image

ob-monoxp.ZMX
Configuration 1 of 1

2: Spot Diagram

Update Settings Print Window Text Zoom



Spot Diagram

25.11.2020 Units are µm.
Field : 1
RMS radius : 0.223
GEO radius : 0.667
Scale bar : 10

Airy Radius: 3.864 µm

Reference : Middle

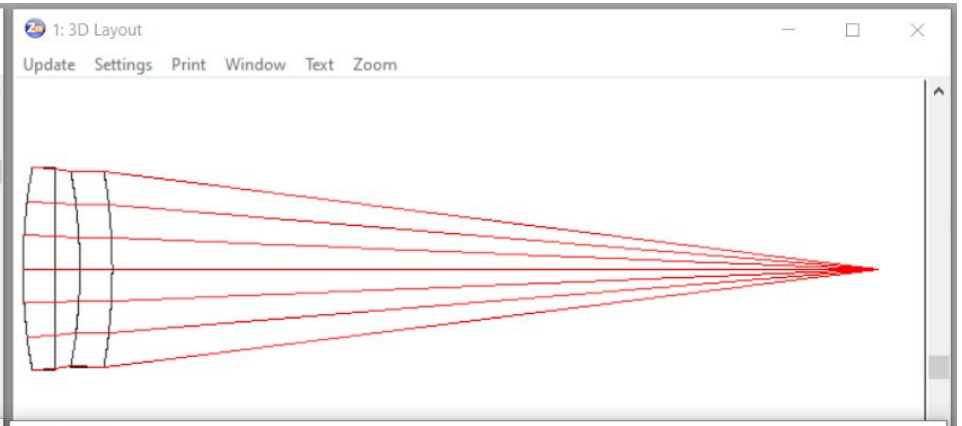
ob-monoxp.ZMX
Configuration 1 of 1

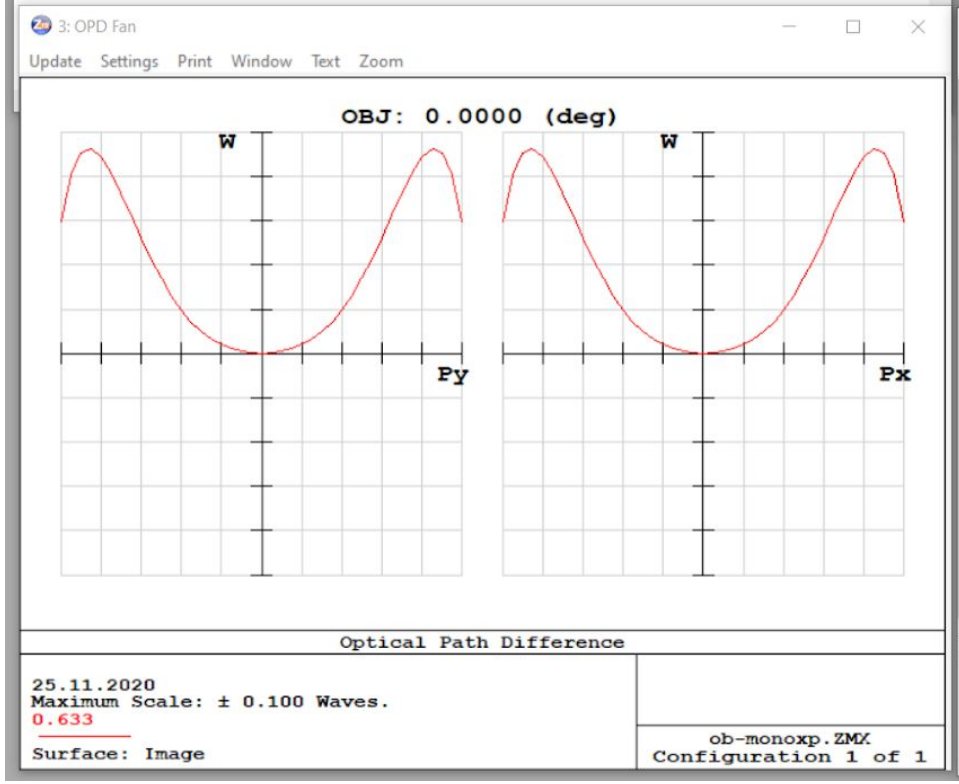
Объектив – монохромат (D/f’ = 1:4, λ = 633 нм, W_{max} = 0,1 λ)

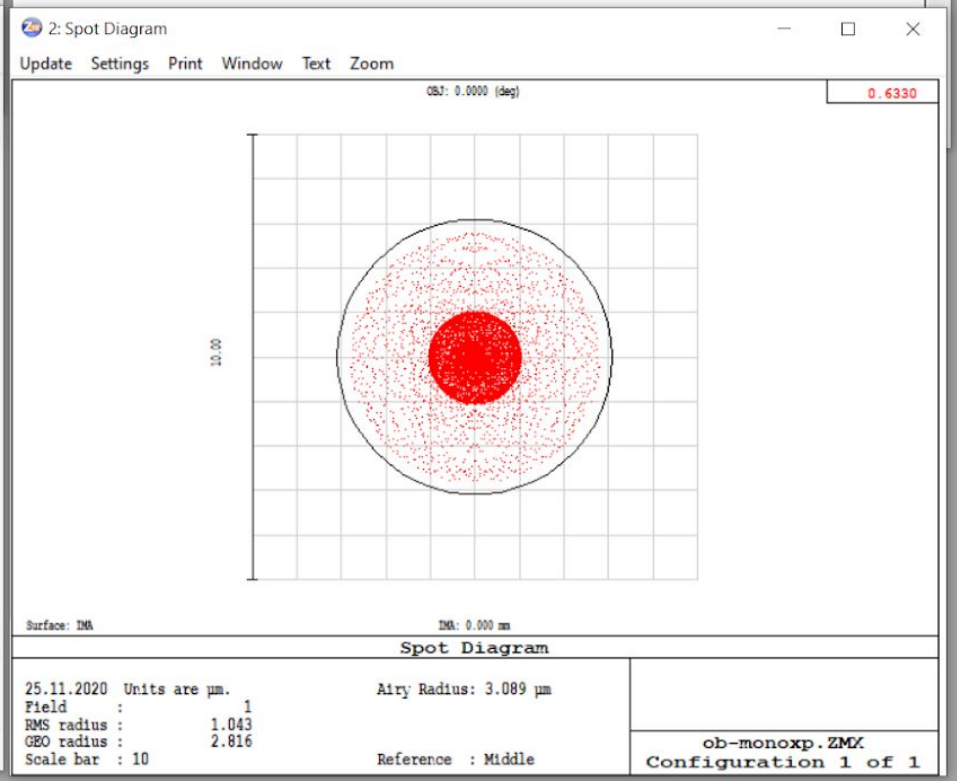
Lens Data Editor

Edit Solves View Help

	Surf:Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diame..	
	Standard	Infinity	Infinity		0.0000	
	Standard	Infinity	0.0000		10.0000	U
2	Standard	54.9680	3.2000	TF5	10.0000	
3	Standard	Infinity	2.4000		9.8198	
4	Standard	-52.4880	3.2000	TF5	9.6095	
5	Standard	-57.4240	75.5045		9.6164	
	Standard	Infinity	-		2.8E-003	

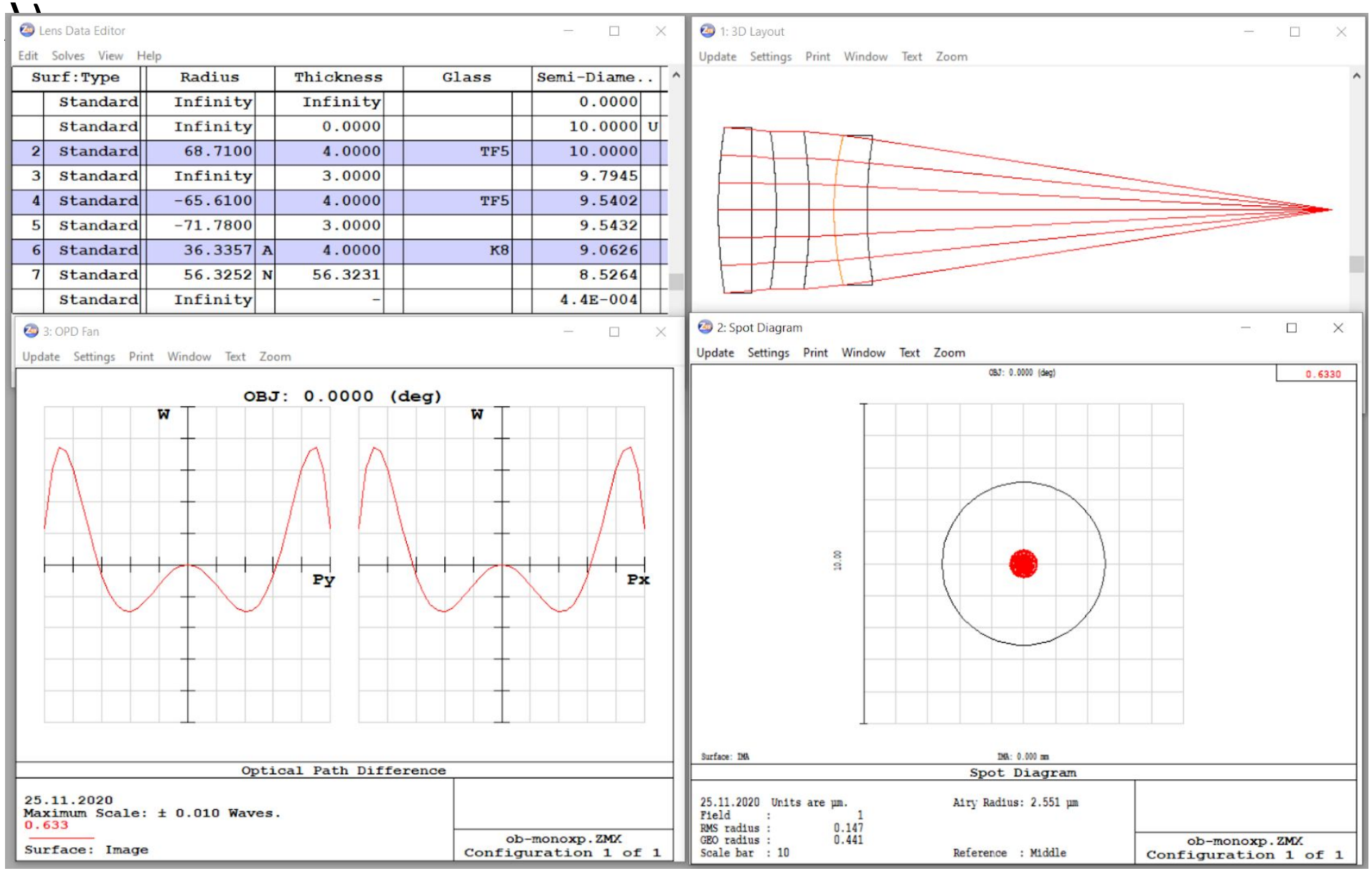






Объектив масштабирован с коэффициентом 0.8, диаметр входного зрачка не изменился. Относительное отверстие выросло с 1:5 до 1:4, но волновая аберрация увеличилась в 10 раз

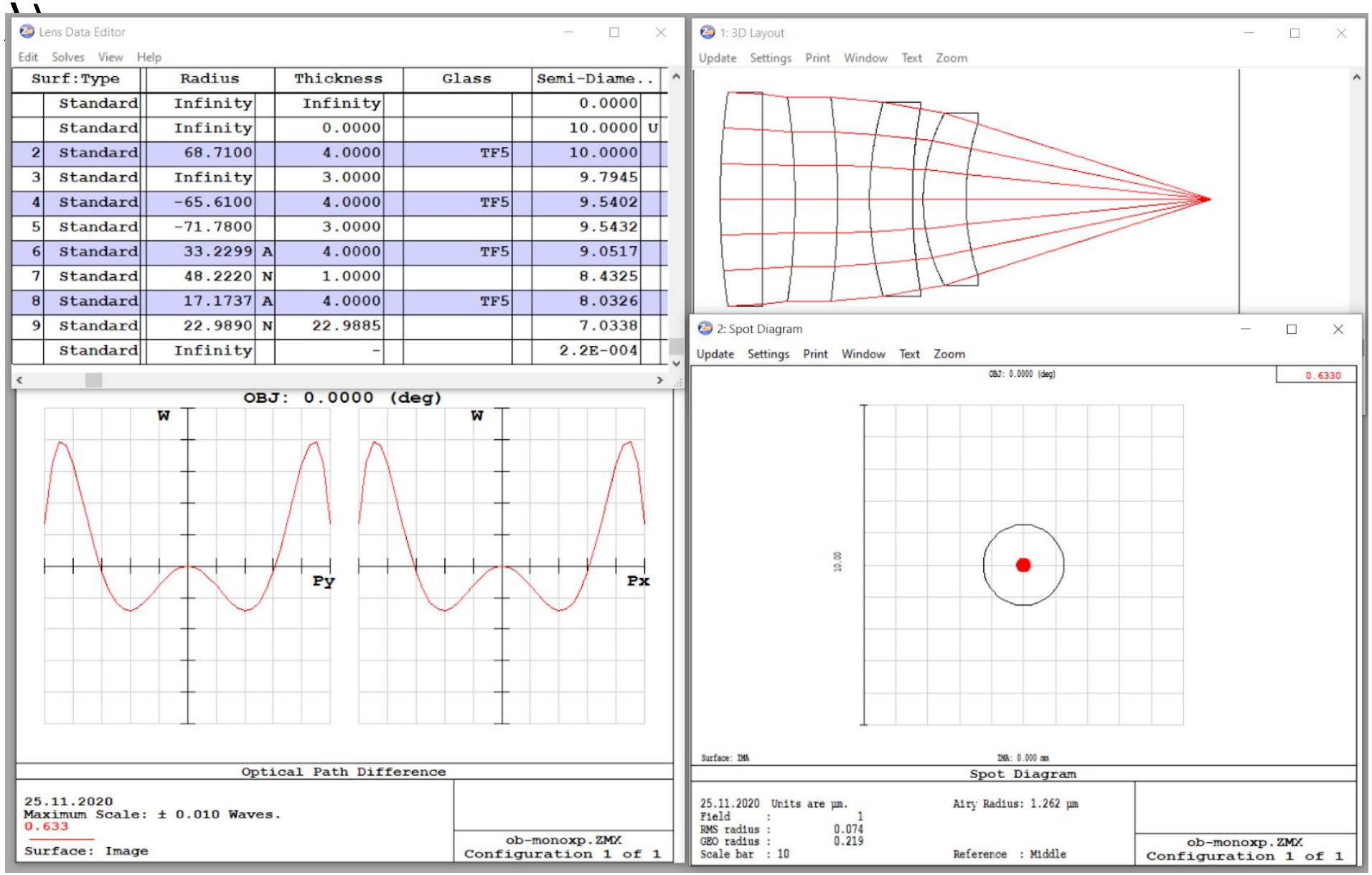
Объектив – монохромат (D/f’ = 1:3, λ = 633 нм, W_{max} = 0,01 λ)



Surf:Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diame..
Standard	Infinity	Infinity		0.0000
Standard	Infinity	0.0000		10.0000 U
2 Standard	68.7100	4.0000	TF5	10.0000
3 Standard	Infinity	3.0000		9.7945
4 Standard	-65.6100	4.0000	TF5	9.5402
5 Standard	-71.7800	3.0000		9.5432
6 Standard	36.3357 A	4.0000	K8	9.0626
7 Standard	56.3252 N	56.3231		8.5264
Standard	Infinity	-		4.4E-004

К исходному объективу добавлен апланатический мениск. Относительное отверстие выросло с 1:5 до 1:3, волновая аберрация не изменилась

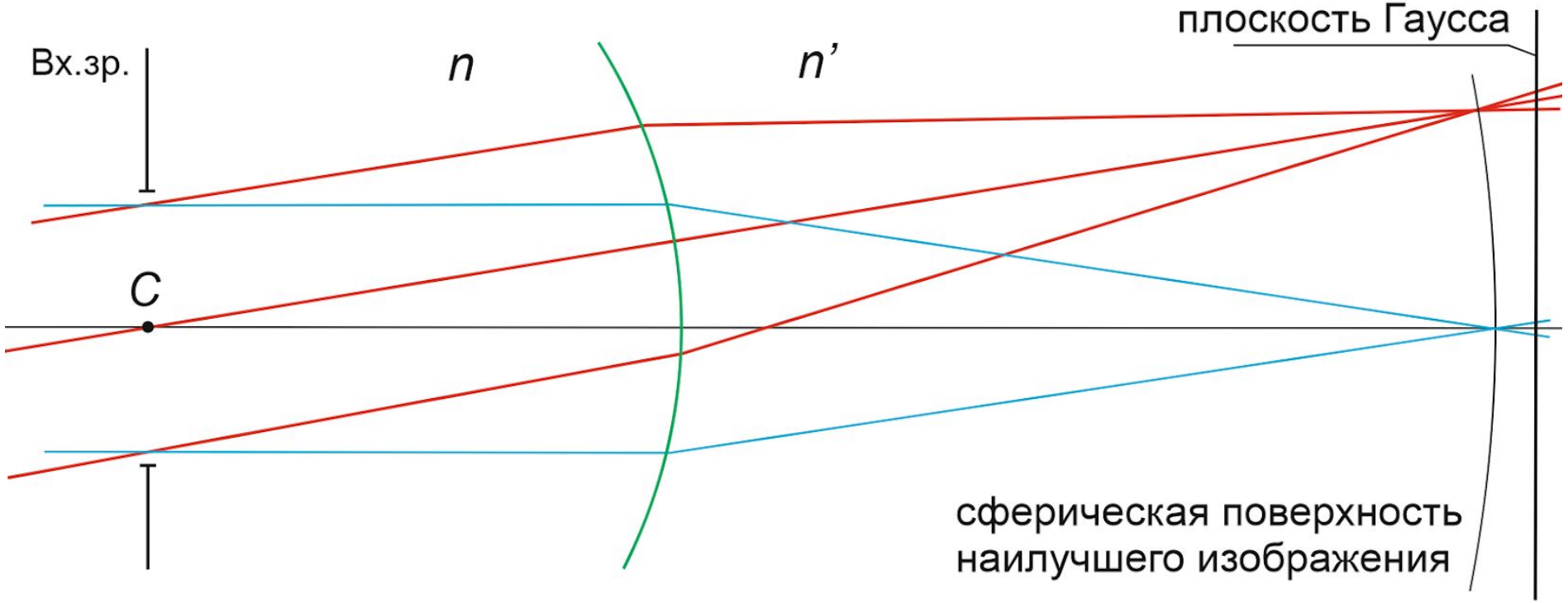
Объектив – монохромат (D/f’ = 1:1.6, λ = 633 нм, W_{max} = 0,01 λ)



Surf:Type		Radius		Thickness	Glass	Semi-Diame..	
	Standard	Infinity		Infinity		0.0000	
	Standard	Infinity		0.0000		10.0000	U
2	Standard	68.7100		4.0000	TF5	10.0000	
3	Standard	Infinity		3.0000		9.7945	
4	Standard	-65.6100		4.0000	TF5	9.5402	
5	Standard	-71.7800		3.0000		9.5432	
6	Standard	33.2299	A	4.0000	TF5	9.0517	
7	Standard	48.2220	N	1.0000		8.4325	
8	Standard	17.1737	A	4.0000	TF5	8.0326	
9	Standard	22.9890	N	22.9885		7.0338	
	Standard	Infinity		-		2.2E-004	

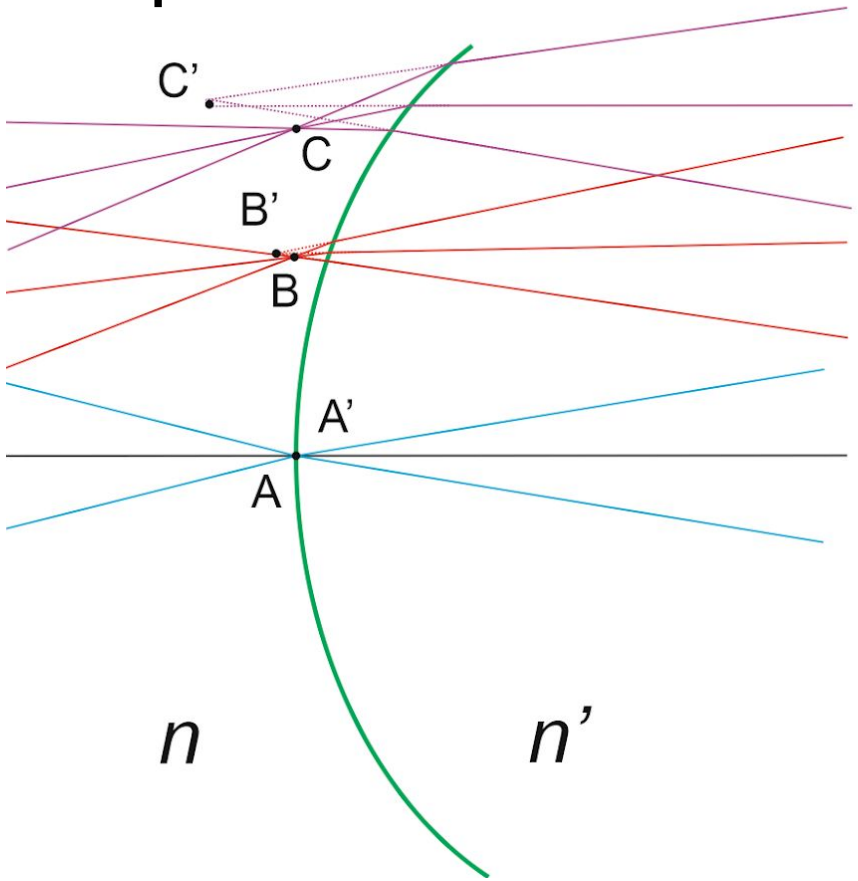
Добавление нескольких апланатических менисков не меняет волновую аберрацию, но развивает (увеличивает) относительное отверстие.
Справедливо лишь для осевого пучка лучей

Поверхность, концентричная зрачку



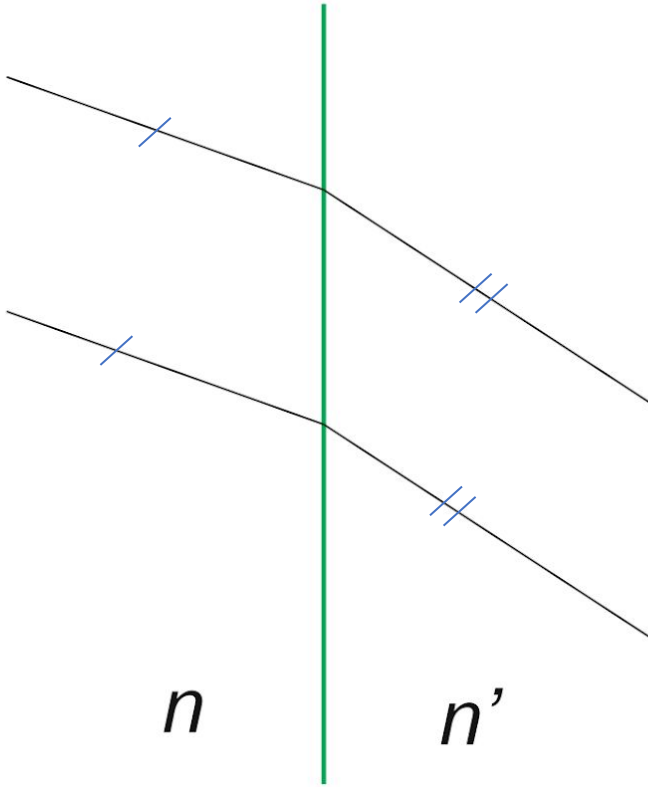
Главный луч проходит через центр кривизны *C* и совпадает с осью симметрии сферической поверхности.
Симметрия наклонного пучка сохраняется, поэтому аберрации кома и астигматизм отсутствуют.

Близфокальная поверхность



Если точка предмета лежит на поверхности, то с ней
совпадает ее безаберрационное изображение.
Чем ближе предмет к поверхности, тем меньше аберрации в его изображении.

Плоская поверхность в параллельном ходе лучей



Пучок лучей после преломления остается параллельным

Композиционный метод расчета оптических систем
(предложен М.М. Русиновым)

Оптическая система представляется в виде композиции базовых (силовых) и коррекционных компонентов.

Комбинируя следующие поверхности:
- апланатические (а),
- близфокальные (б),
- концентричные зрачку (к),
- плоские поверхности в параллельных пучках (о),

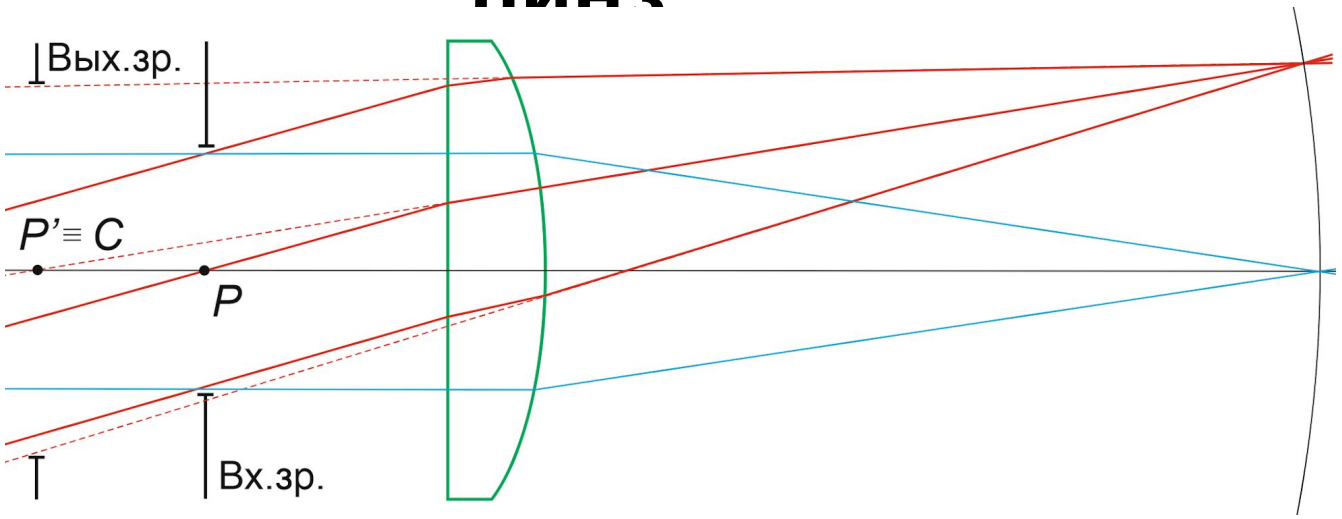
можно сформировать оптические элементы с малыми аберрациями – **базовые линзы (Б)**, т.е. основные элементы, создающие оптическую силу системы.

Коррекционные линзы (К) исправляют остаточные аберрации базовых элементов, слабо влияя на оптическую силу системы.

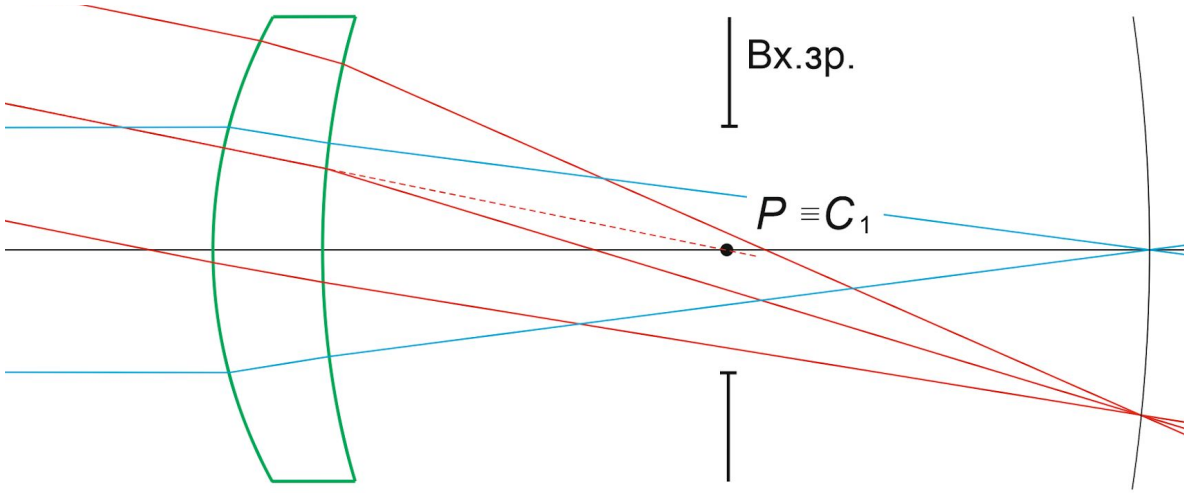
Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.

Русинов М.М. Техническая оптика: Учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1979.

Примеры базовых линз



Б
(ок)



Б
(ка)

Пример коррекционной линзы

Рисунок 1

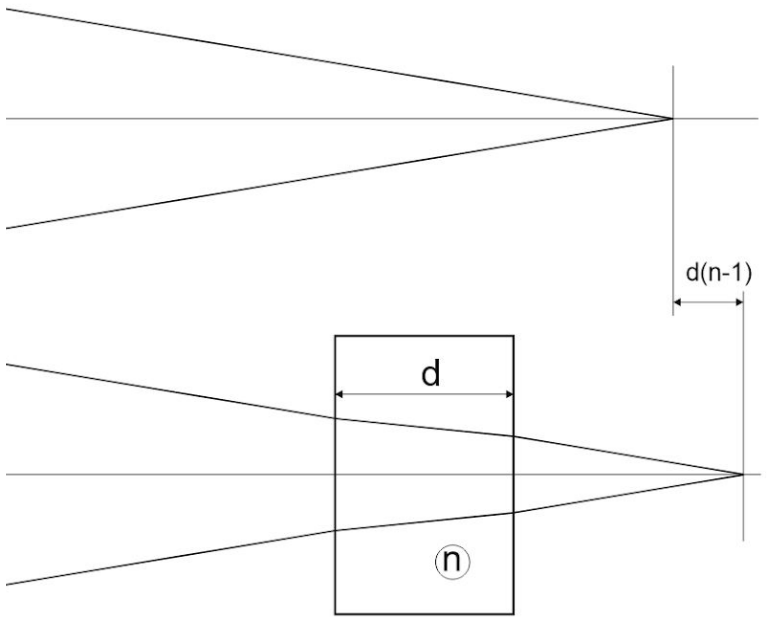


Рисунок 2

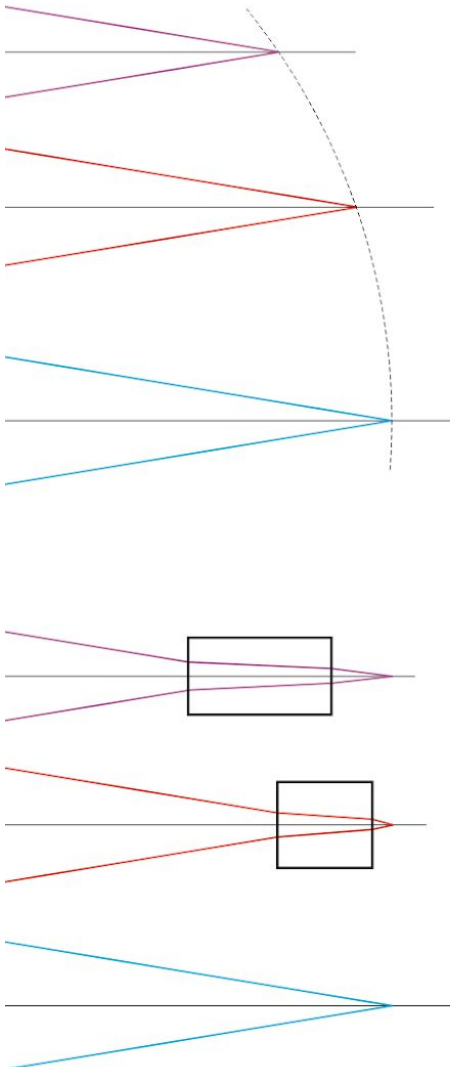
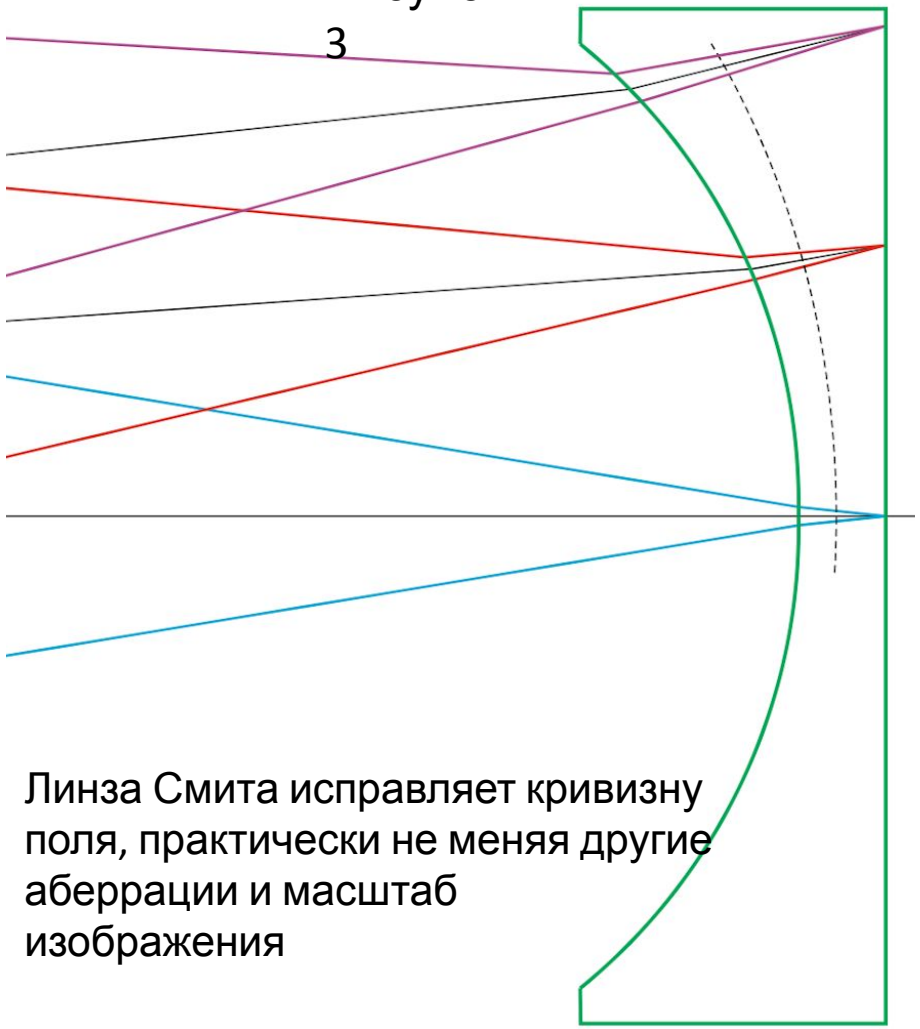


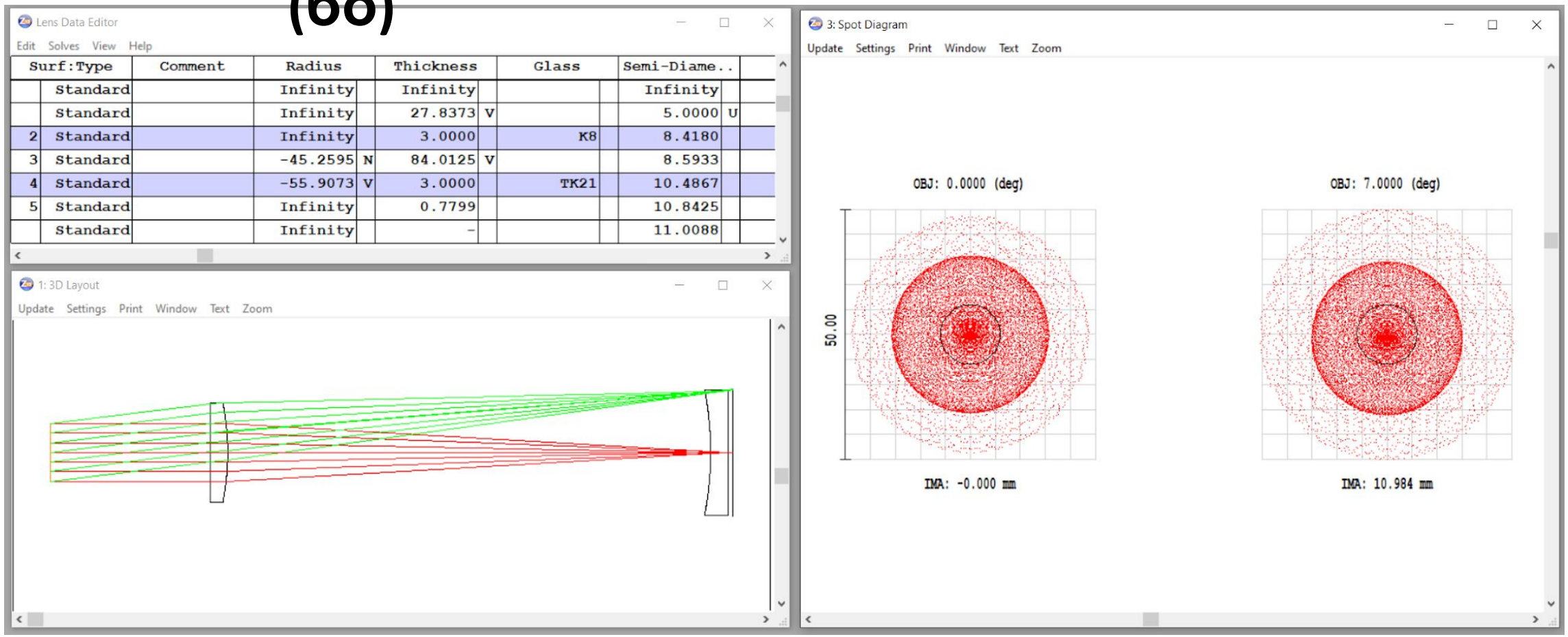
Рисунок 3



Линза Смита исправляет кривизну поля, практически не меняя другие аберрации и масштаб изображения

По классификации Русинова – К (бо)

Пример расчета: объектив Б(ок)+К (бо)



	Surf:Type	Comment	Radius		Thickness		Glass		Semi-Diame..	
	Standard		Infinity		Infinity				Infinity	
	Standard		Infinity		27.8373	V			5.0000	U
2	Standard		Infinity		3.0000		K8		8.4180	
3	Standard		-45.2595	N	84.0125	V			8.5933	
4	Standard		-55.9073	V	3.0000		TK21		10.4867	
5	Standard		Infinity		0.7799				10.8425	
	Standard		Infinity		-				11.0088	

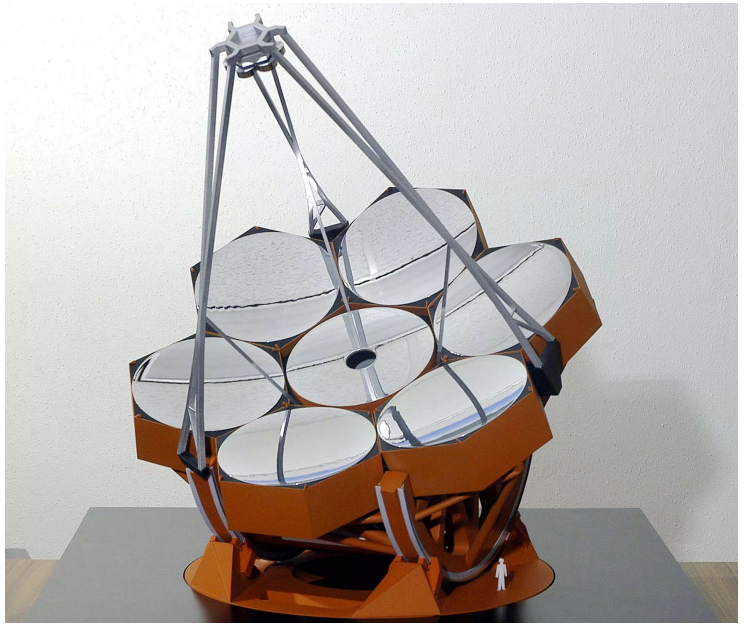
f’ = 90 мм, D = 10 мм

Зеркальные оптические системы

Микрообъективы

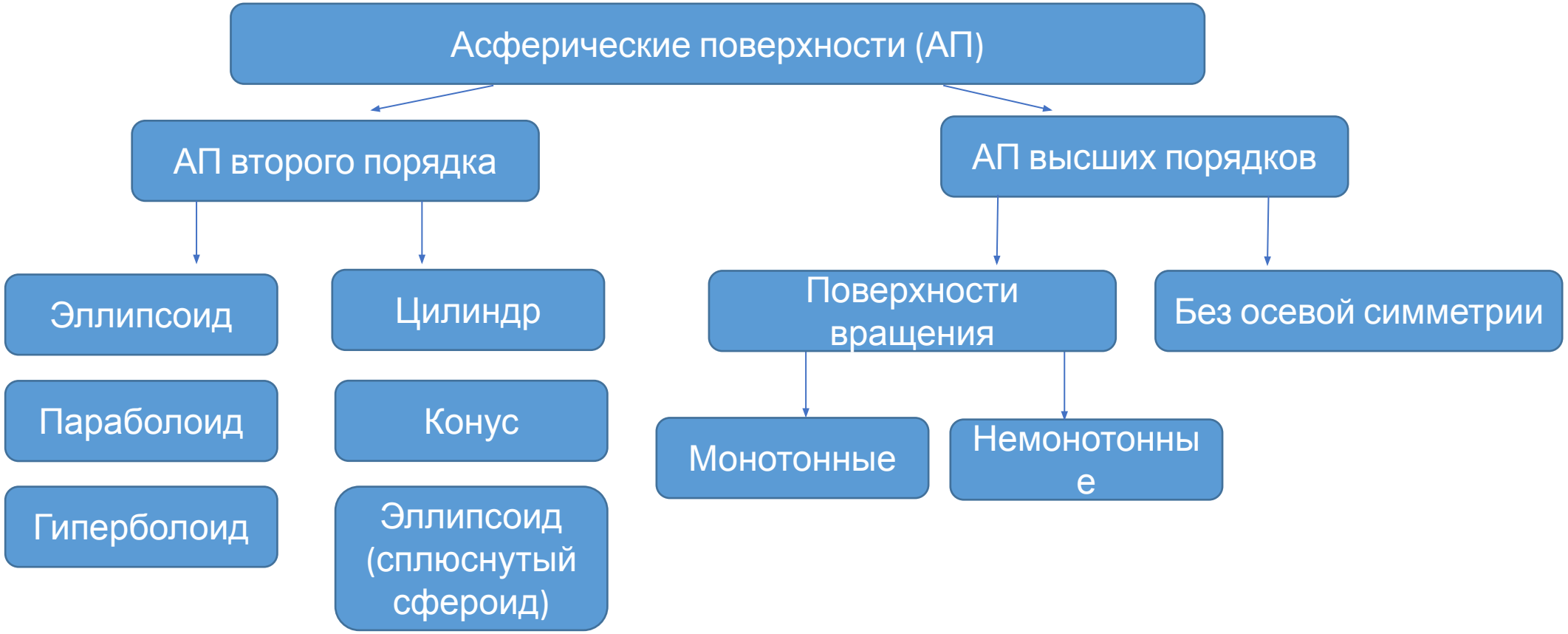
Фотообъективы

Астрономические объективы



Оптические системы космических и наземных телескопов

Классификация асферических поверхностей (АП)



Уравнения поверхностей вращения

1

$$y^2 + x^2 = a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \ldots + a_n z^n$$

$$a_1 = 2r_0, \quad a_2 = e^2 - 1$$

r_0 – радиус при вершине,

e - эксцентриситет

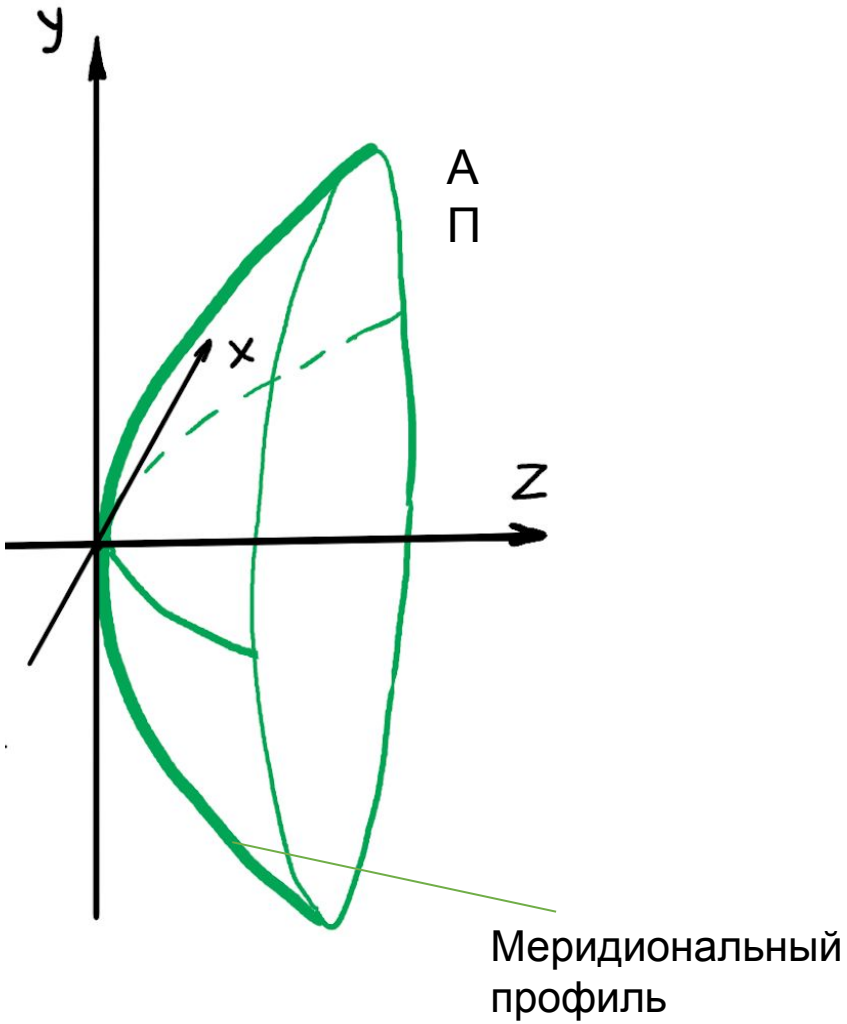
2

$$z = A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + A_3\rho^6 + \ldots + A_n\rho^{2n}$$

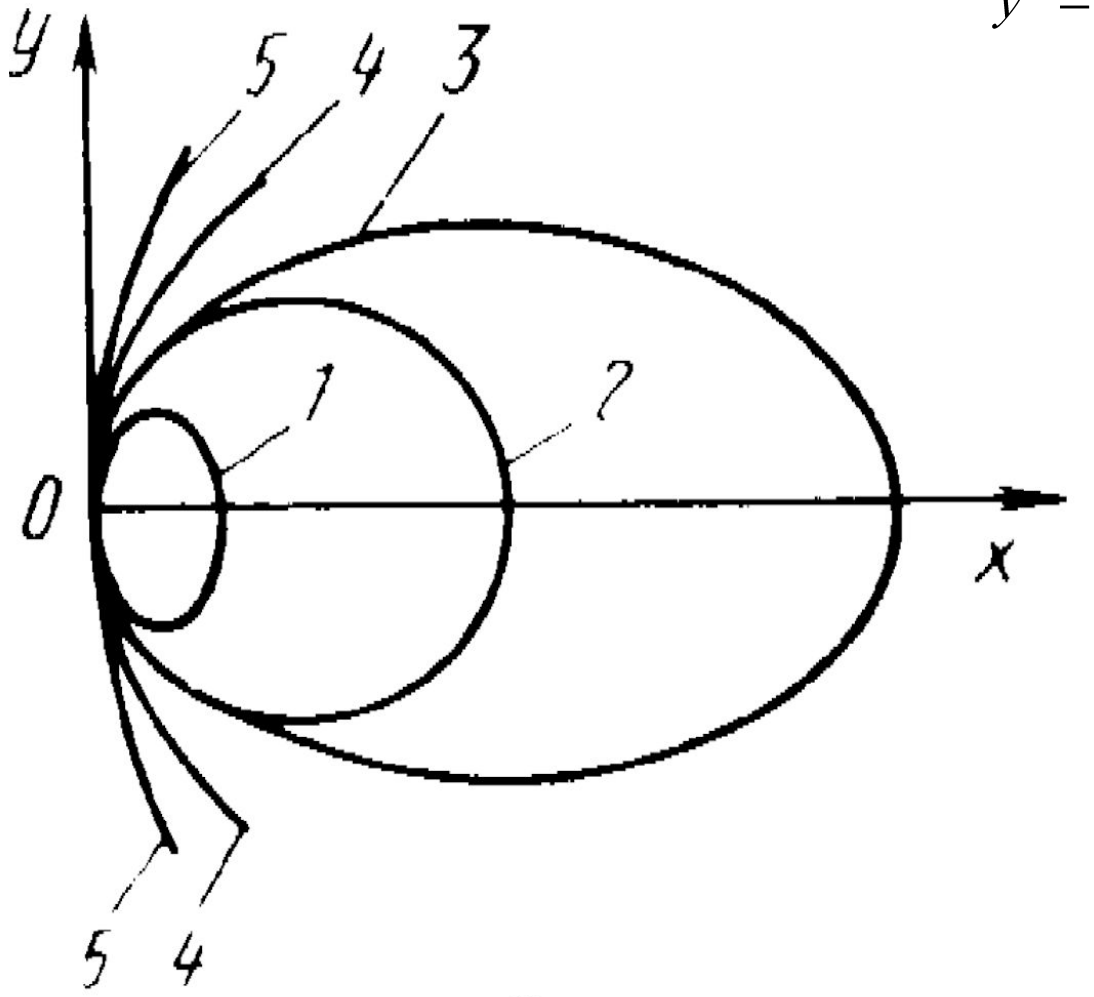
$$A_1 = 1/2r_0, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$

3

$$z = \frac{\rho^2/r}{1 + \sqrt{1 + \left(e^2 - 1\right)\rho^2/r^2}} + \alpha_1\rho^2 + \ldots + \alpha_n\rho^{2n}$$



Свойства АП второго порядка

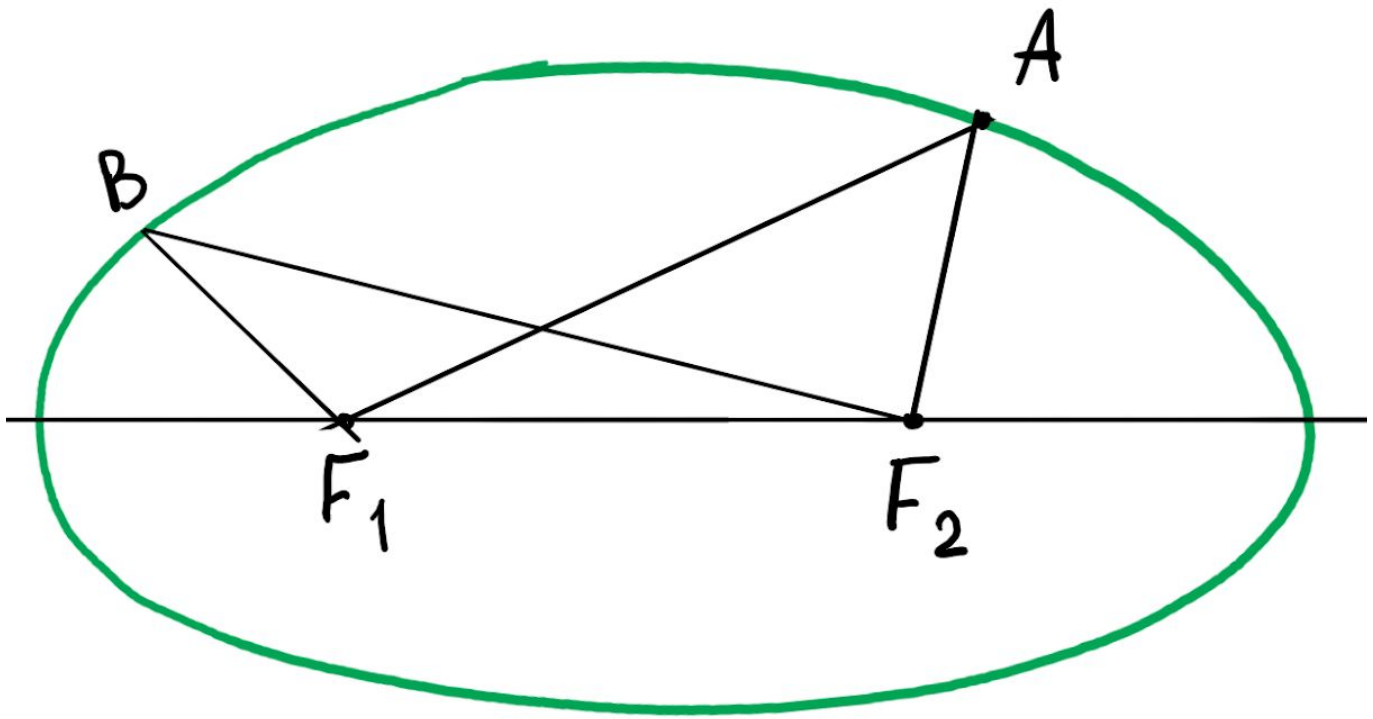


$$y^2 = 2r_0 z + \left(e^2 - 1\right) z^2$$

$$z = \frac{y^2 / r}{1 + \sqrt{1 + \left(e^2 - 1\right) y^2 / r^2}}$$

1. $e^2 < 0$ – эллипсоид (сплюснутый сфероид)
2. $e^2 = 0$ – сфера
3. $0 < e^2 < 1$ – эллипсоид
4. $e^2 = 1$ – параболоид
5. $e^2 > 1$ – гиперболоид

Свойства АП второго порядка. Эллипсоид



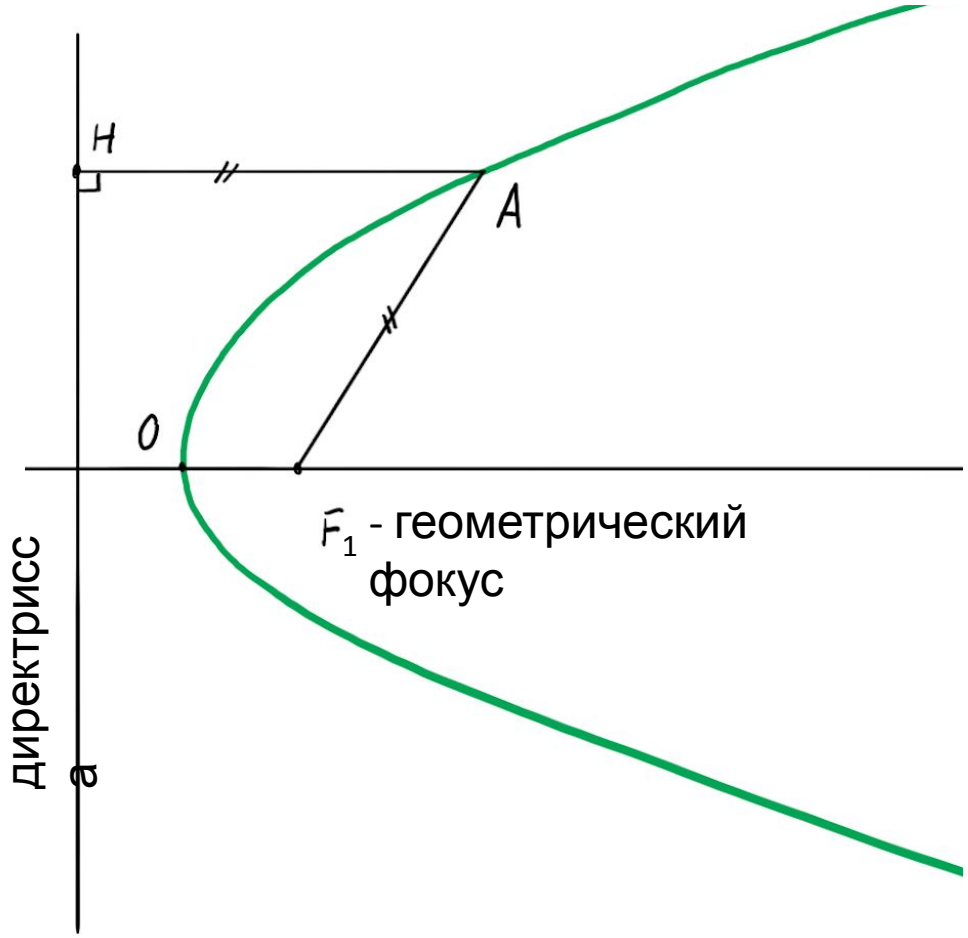
F_1, F_2 – геометрические фокусы

Эллипсоид – геометрическое место точек,
сумма расстояний от которых до геометрических фокусов постоянна

$AF_1 + AF_2 = BF_1 + BF_2$

Оптические длины всех лучей, идущих из F_1 в F_2, одинаковые, значит, сферическая аберрация в осевом пучке отсутствует.

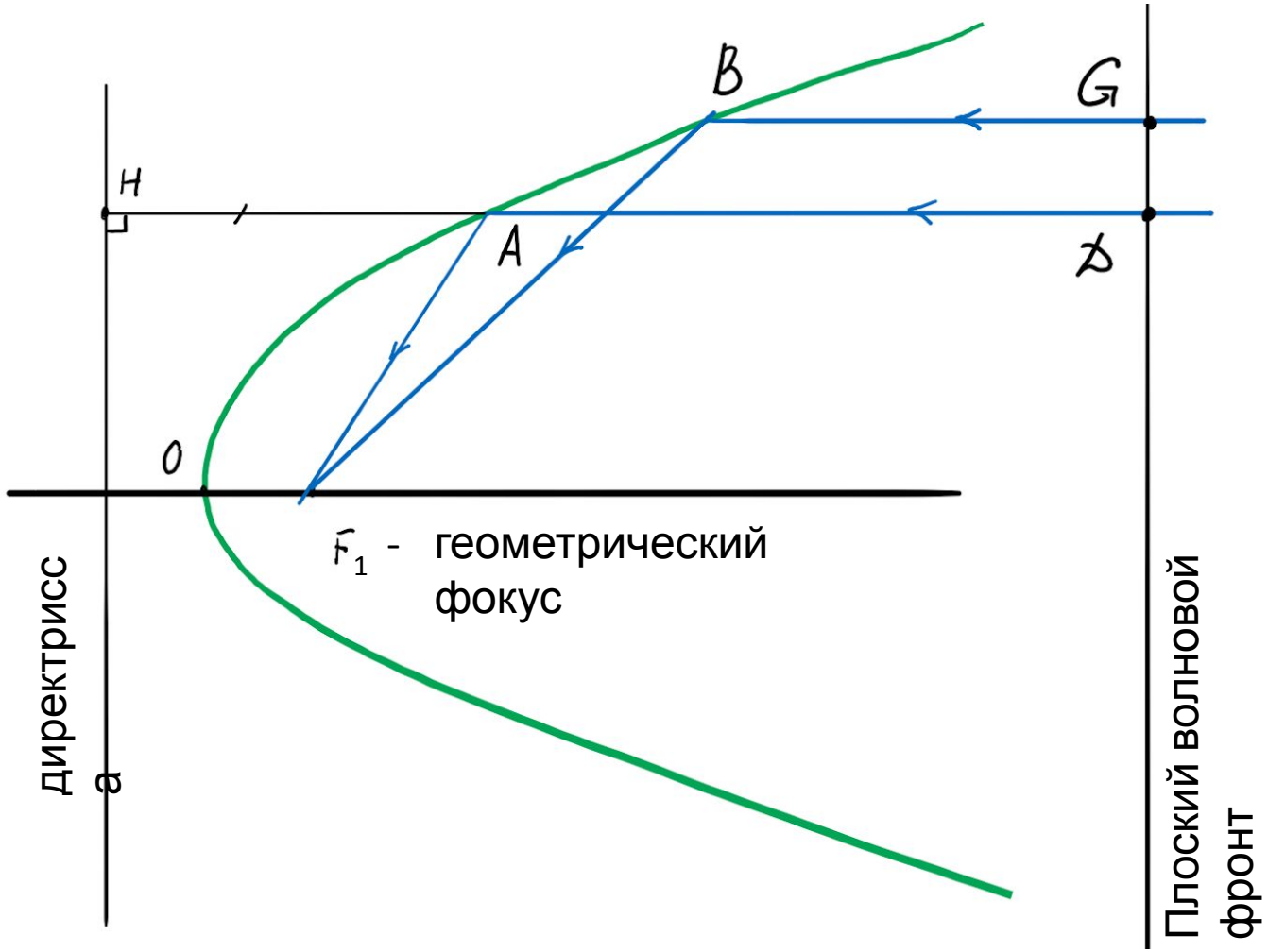
Свойства АП второго порядка. Параболоид



Парабола – геометрическое место точек, равноудаленных от прямой (дирекстриссы)
и точки (геометрического фокуса)

AH = AF

Свойства АП второго порядка. Параболоид

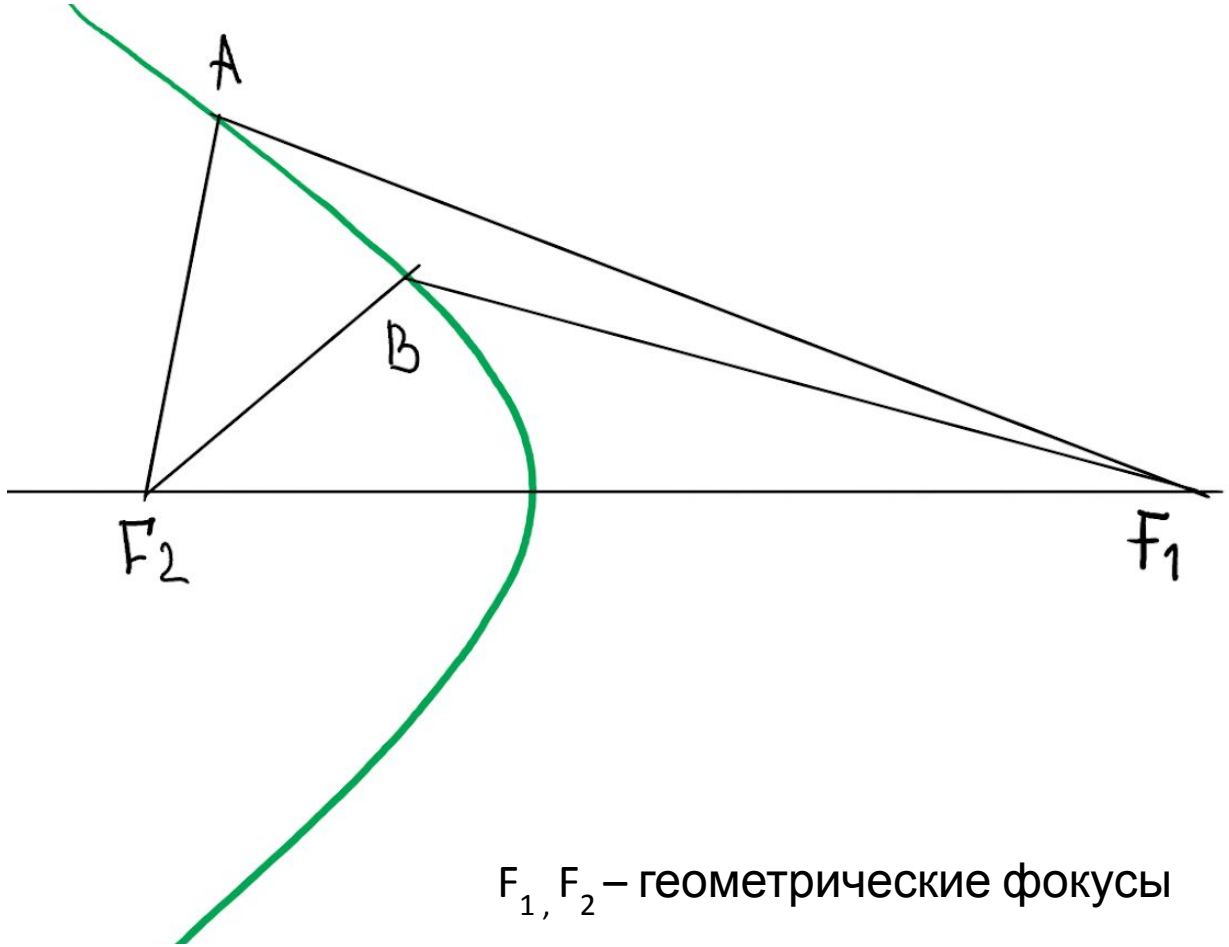


$AD + AF_1 = BG + BF_1$

Оптические длины всех лучей, идущих из бесконечно удаленной осевой точки предмета, одинаковые, значит, сферическая аберрация в осевом пучке отсутствует.

F_1, F_2 – геометрические фокусы, F_2 в бесконечности

Свойства АП второго порядка. Гиперболоид



F_1, F_2 – геометрические фокусы

Эллипсоид – геометрическое место точек,
разность расстояний от которых до геометрических фокусов постоянна

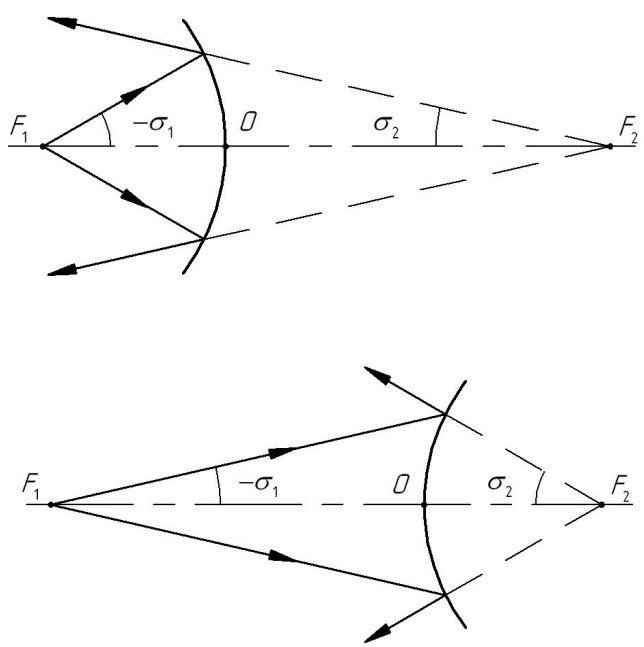
$AF_1 - AF_2 = BF_1 - BF_2$

Оптические длины всех лучей, направленных в F_1 и отраженных в F_2, одинаковые, значит, сферическая аберрация в осевом пучке отсутствует.

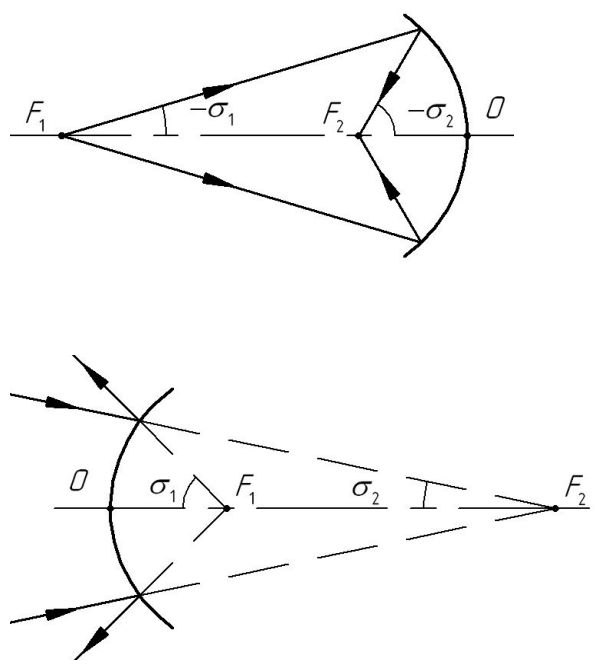
Свойства АП второго порядка

Отражающие асферические поверхности, образованные вращением кривой второго порядка вокруг оси, соединяющей их геометрические фокусы, имеют замечательное оптическое свойство: геометрические фокусы этих АП являются оптически сопряженными анаберрационными точками.

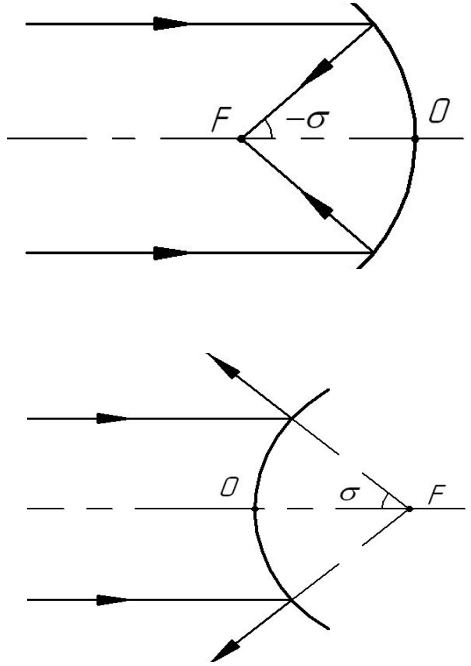
Гиперболоид



Эллипсоид

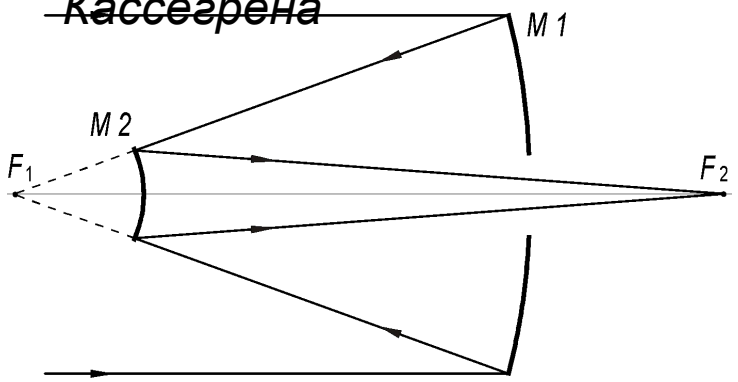


Параболоид

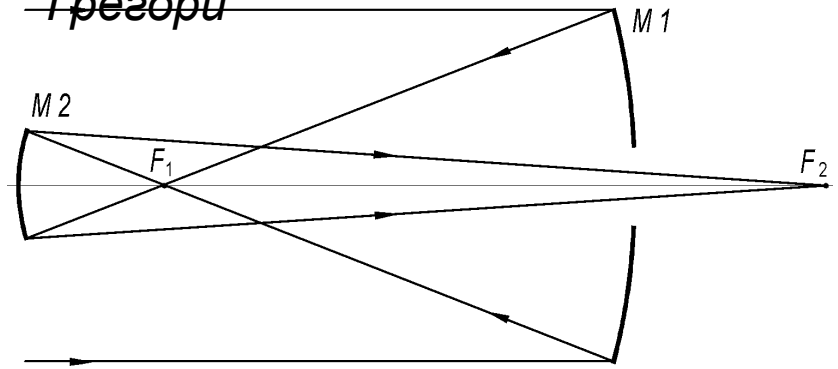


Зеркальные оптические системы

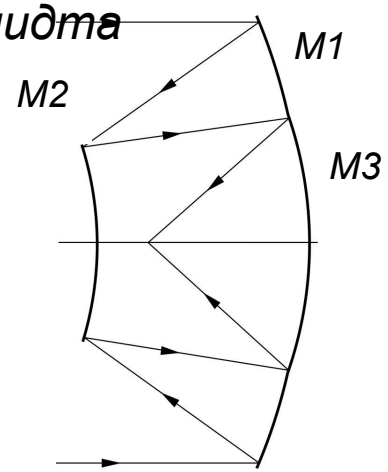
Система Кассегрена

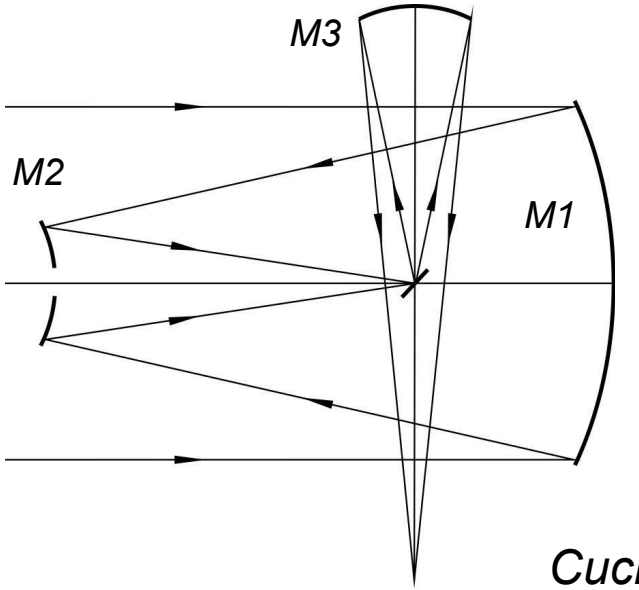


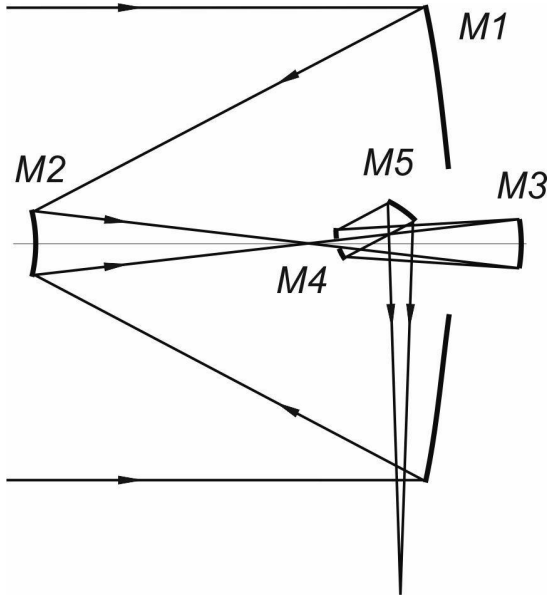
Система Грегори



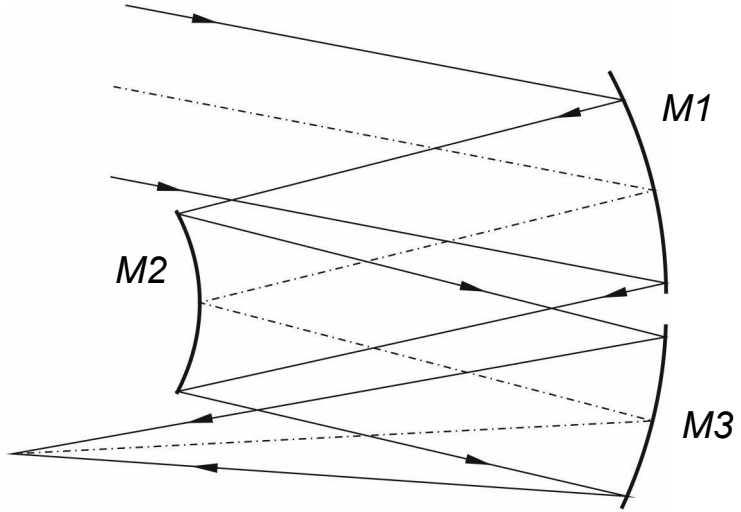
Система Мерсена-Шмидта







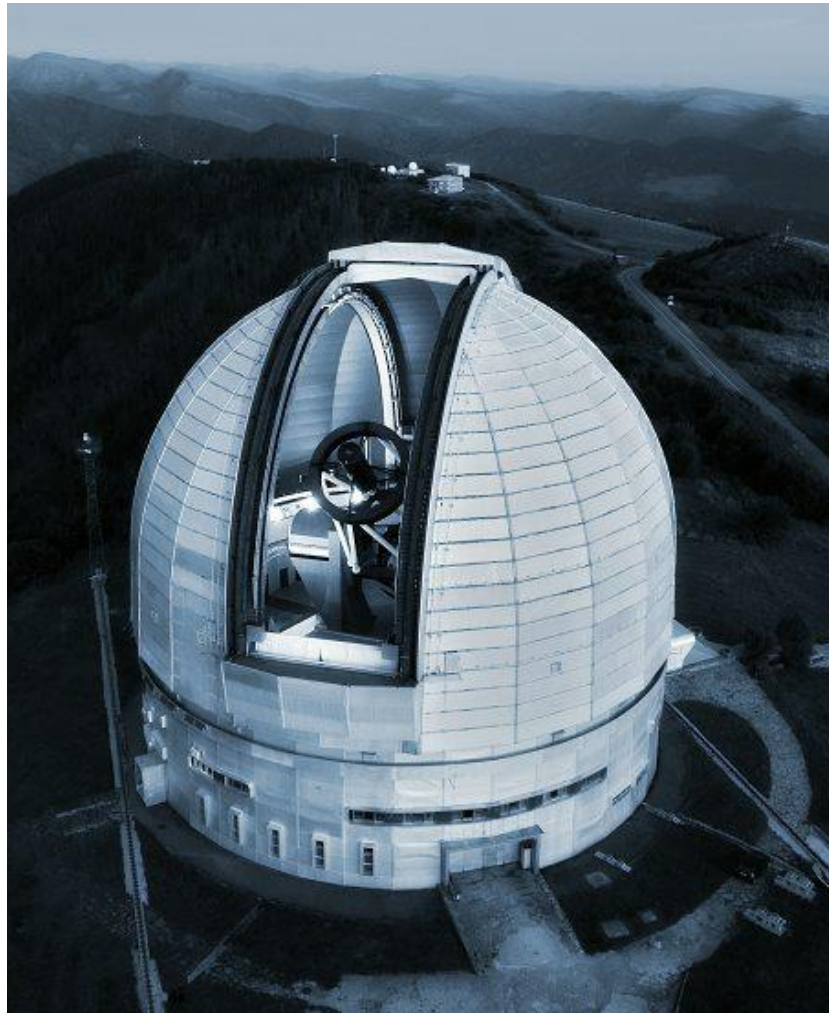
Системы Корша

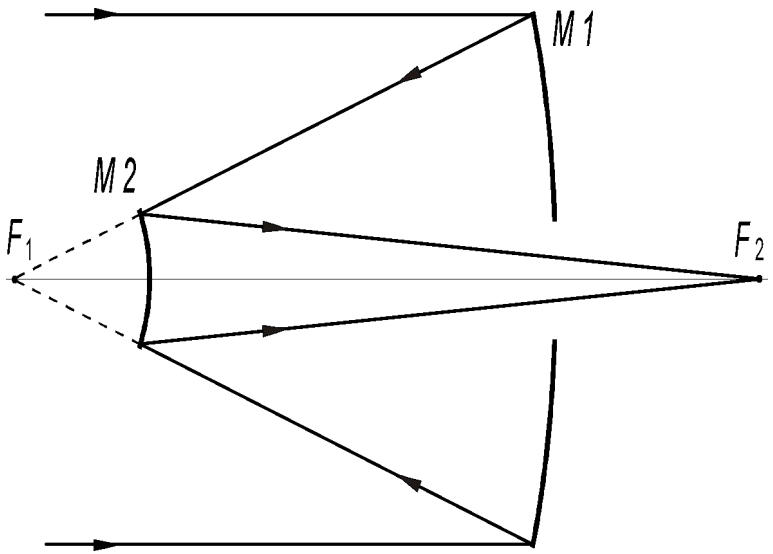


Триплет Кука

Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: Физматлит, 1995. 333 с.

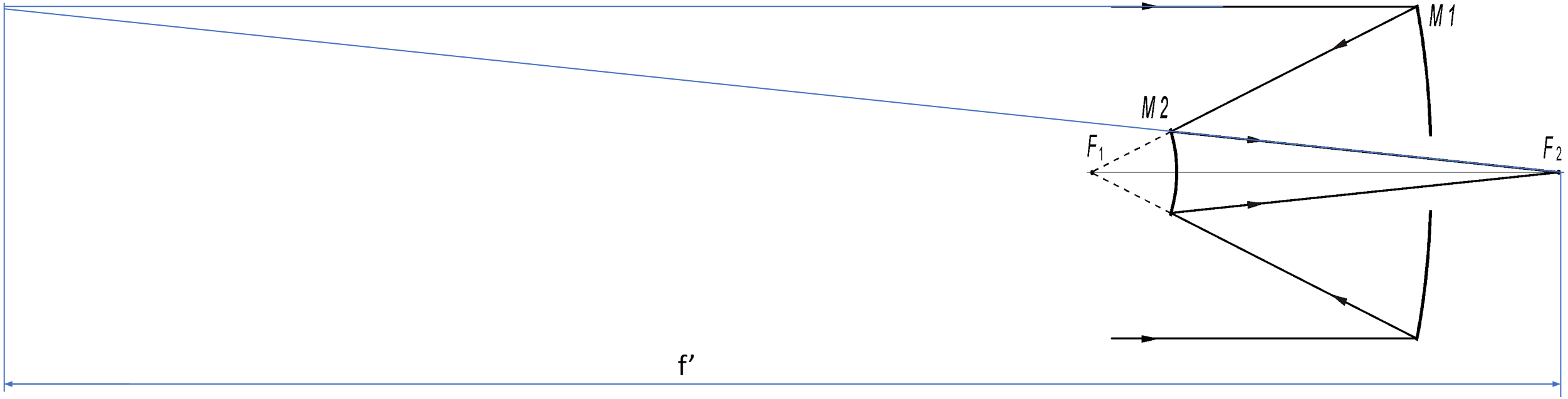
Система Кассегрена



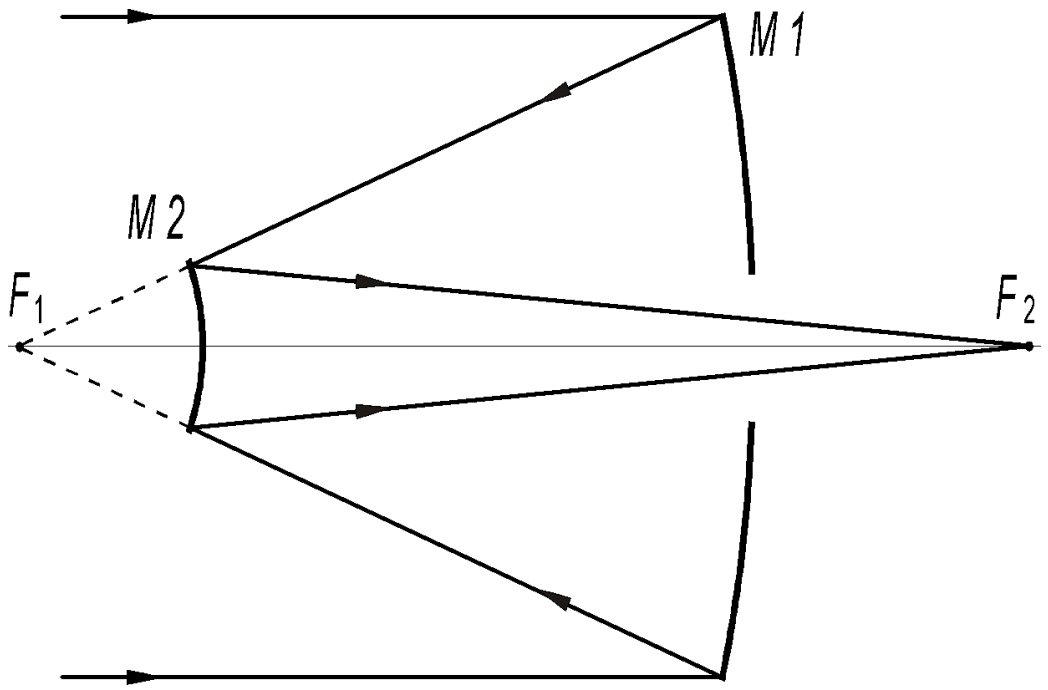


Телескоп БТА

Система Кассегрена



Система Кассегрена



Отсутствуют только аберрации осевого пучка лучей и хроматические аберрации.

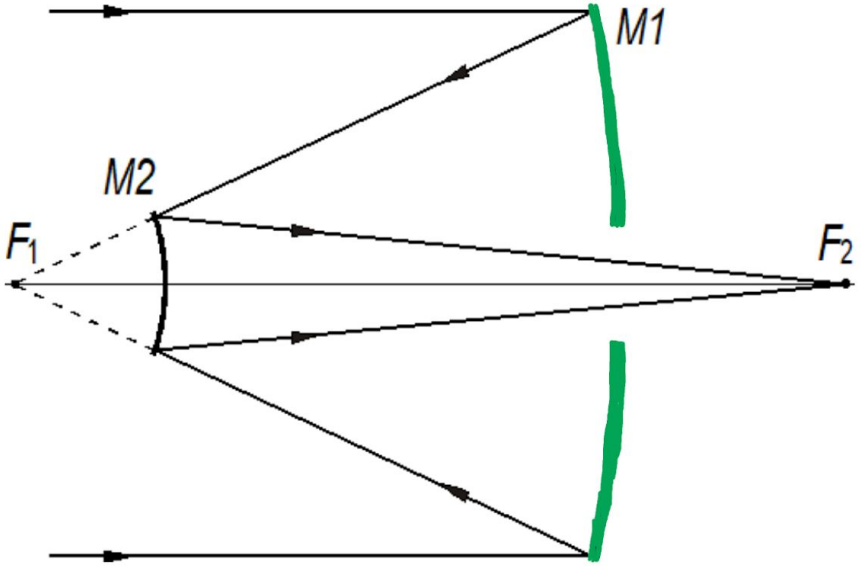
Полевые аберрации – кома, астигматизм, кривизна и дисторсия – присутствуют.

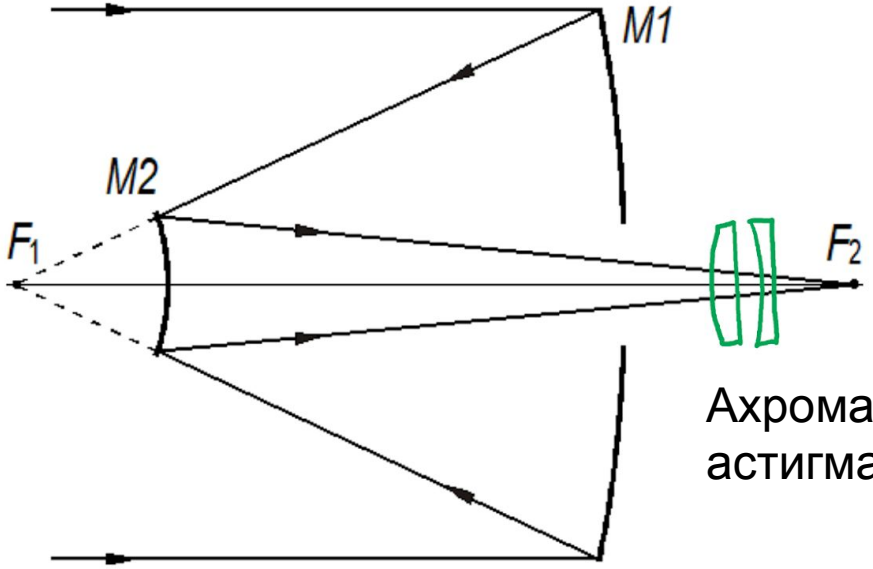
Типичные характеристики:
D/f’ до 1:8,
2ω не более 1 градуса,
коэффициент экранирования менее 0.4

M1 – параболоид
M2 – гиперболоид

Методы коррекции полевых аберраций

Меридиональная кома исправлена в системе Ричи-Кретьена,
которая отличается от системы Кассегрена формой главного зеркала:
M1 – гиперболоид,
M2 – гиперболоид

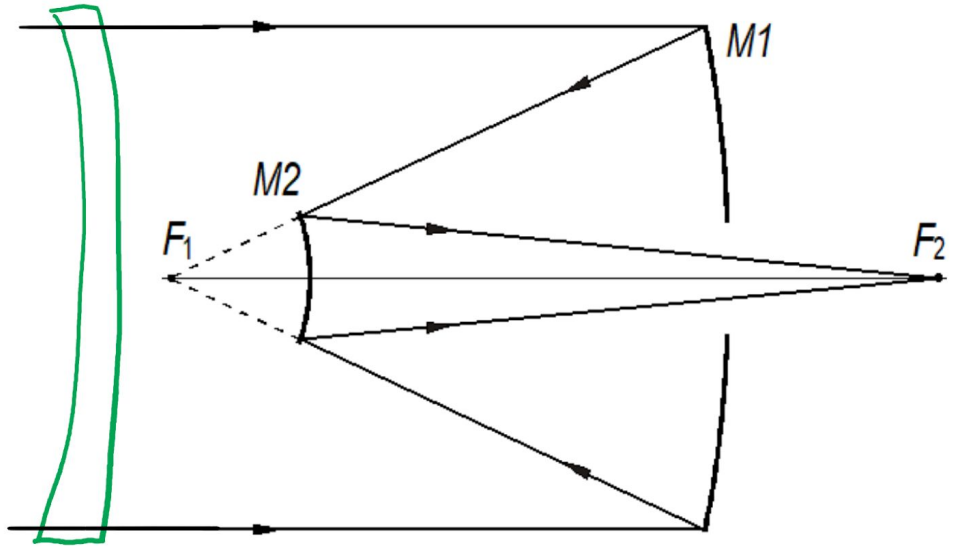


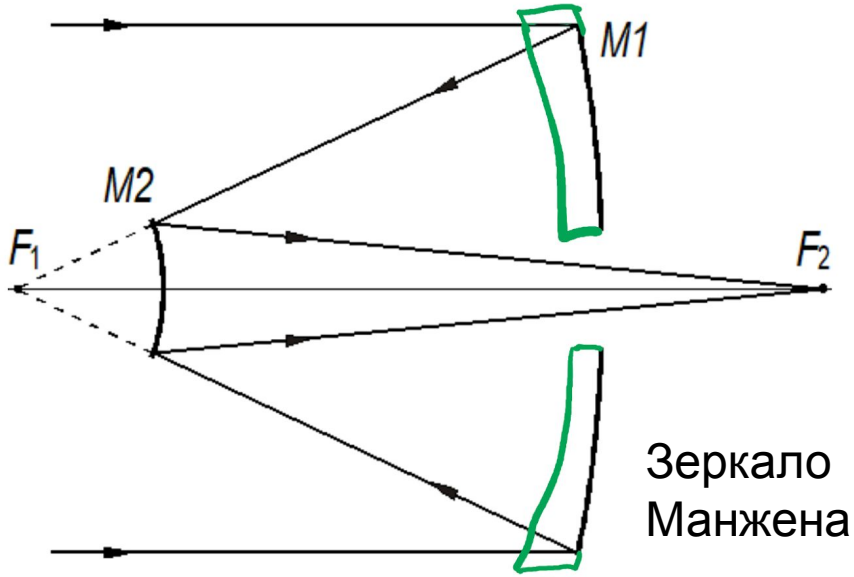
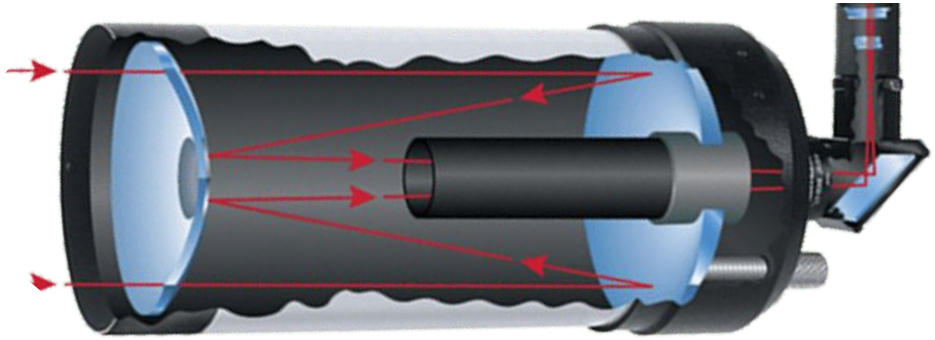


Ахроматический афокальный корректор кома и астигматизма

Методы коррекции полевых аберраций

Мениск Максутова





Зеркало Манжена