

Оптоэлектроника

Лекция 3

**Статические элементы
оптоэлектронных систем**

Краснов В.В., Черёмхин П.А.

Статические элементы оптоэлектронных систем

Линзы

Призмы

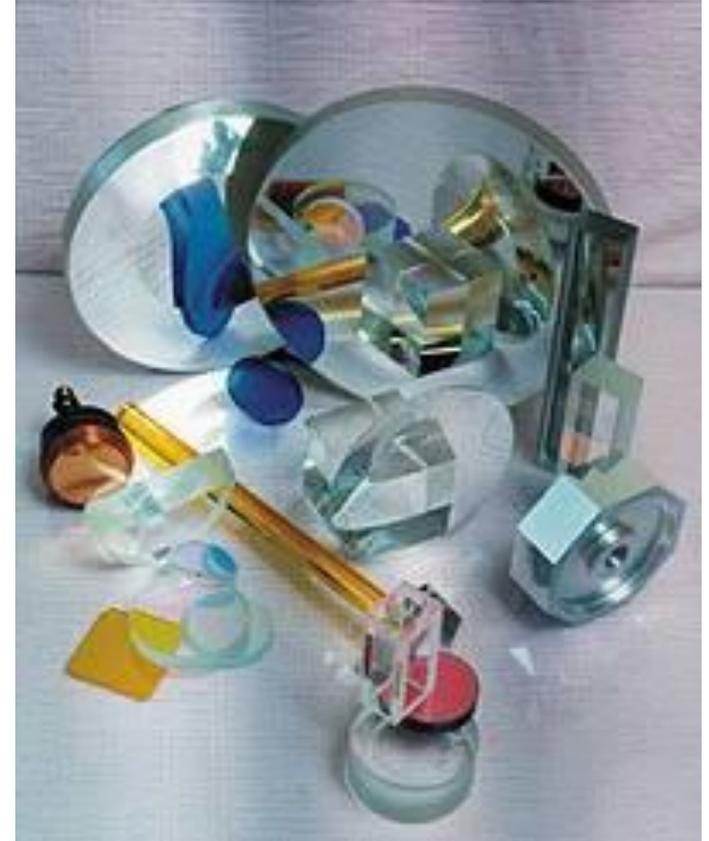
Зеркала

Светофильтры

Поляризаторы

Дифракционные решетки

Голограммы

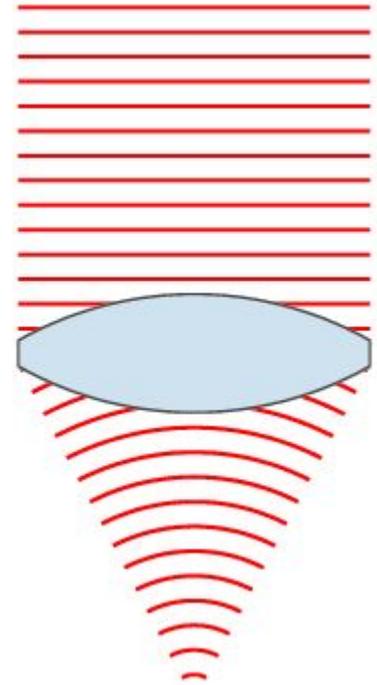


Оптическая система — совокупность оптических элементов, созданная для преобразования световых пучков.

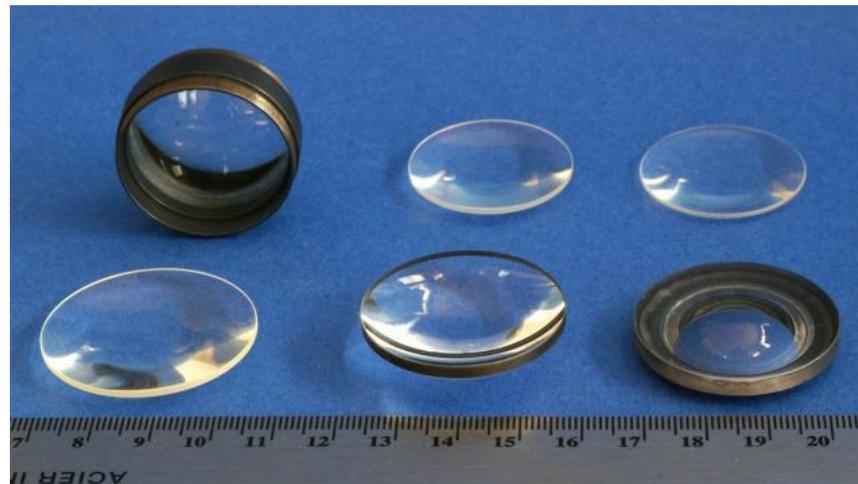
Линзы

Линза (лат. lens — чечевица) — деталь из оптически прозрачного однородного материала, ограниченная двумя полированными преломляющими поверхностями вращения, например, сферическими или плоской и сферической.

В настоящее время всё чаще применяются и «асферические линзы», форма поверхности которых отличается от сферы.



Использование линзы для изменения формы волнового фронта.



История развития линз

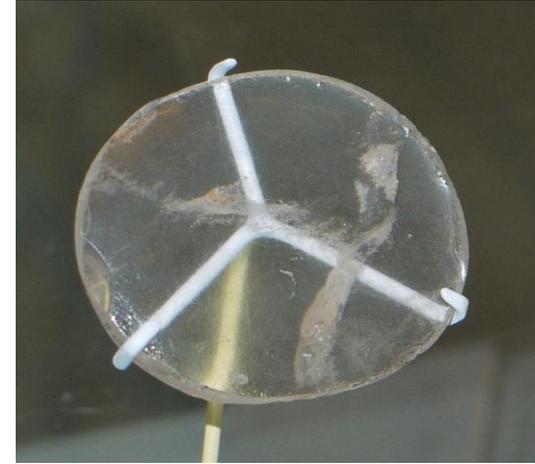
Возраст самой древней линзы – 2700 лет, так называемая линза Нимруда. Линза была найдена при раскопках одной из древних столиц Ассирии в Нимруде Остином Генри Лэйардом в 1853 году.

Первое упоминание о линзах можно найти в древнегреческой пьесе Аристофана «Облака» (424 до н. э.), где с помощью выпуклого стекла и солнечного света добывали огонь.

Из произведений Плиния Старшего (23 – 79 н.э.) следует, что такой способ разжигания огня был известен и в Римской империи — там также описан, возможно, первый случай применения линз для коррекции зрения — известно, что Нерон смотрел гладиаторские бои через вогнутый изумруд для исправления близорукости.

Сенека (3 до н. э. – 65 н.э.) описал увеличительный эффект, который даёт стеклянный шар, заполненный водой.

При раскопках гавани викингов Фрёэль на острове Готланд в Швеции были найдены так называемые линзы Висбю, вырезанные из кристаллов кварца в 11-12 веках н.э.. Линзы имеют асферическую поверхность и по оптическому качеству сравнимы асферическими линзами производившимися в 1950-х.

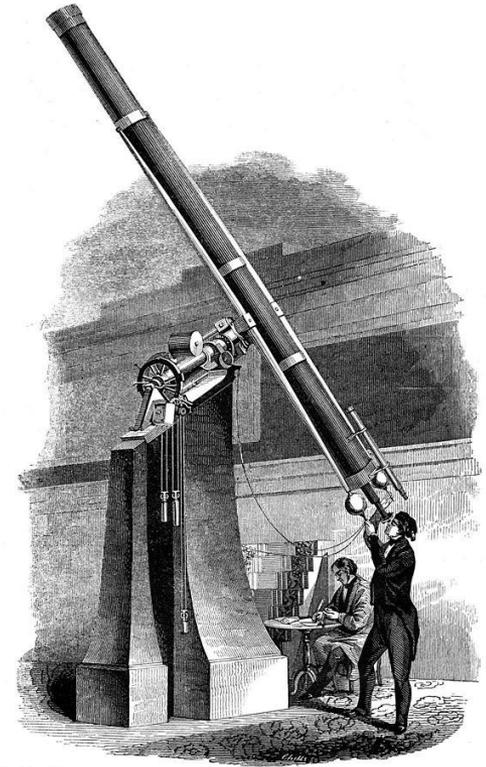


История развития линз

Линзы получили широкое распространение с изобретением очков, вероятно в 1280-х годах в Италии.

На рубеже 16-17 веков в Нидерландах были изобретены линзовые микроскоп и телескоп.

В 1733 в Англии Честер Мур Холл изобретает асферическую линзу.



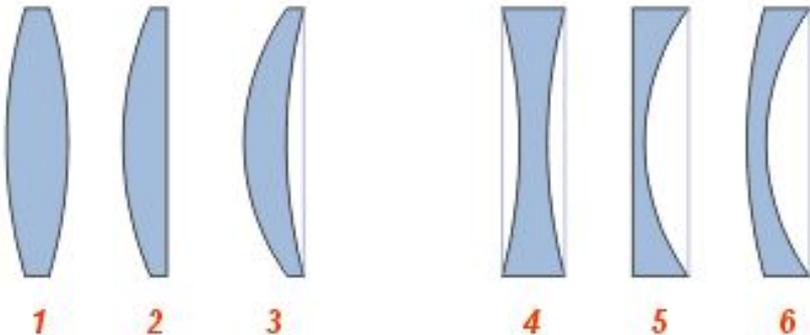
Виды линз

Собирающие:

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

Рассеивающие:

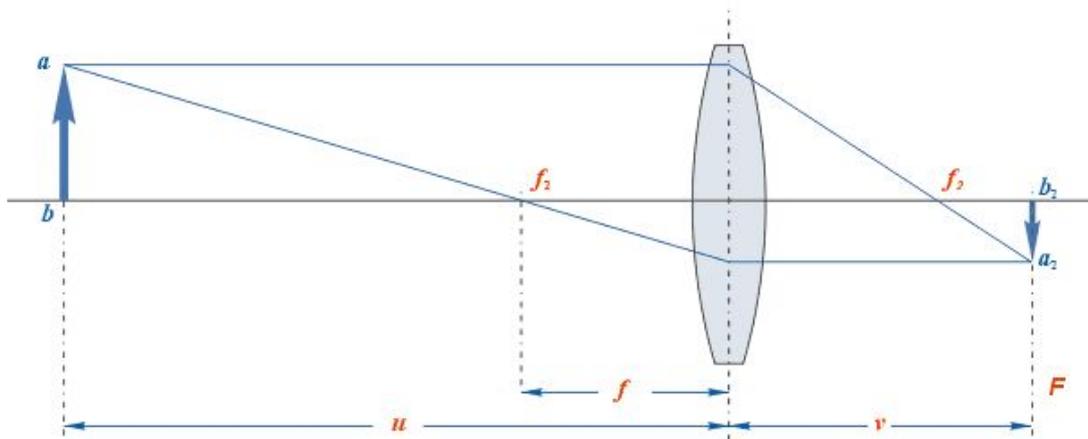
- 4 — двояковогнутая
- 5 — плоско-вогнутая
- 6 — выпукло-вогнутая (отрицательный (вогнутый) мениск)



Построение изображения

ЛИНЗОЙ

Расстояния от точки предмета до центра линзы и от точки изображения до центра линзы называются сопряжёнными фокусными расстояниями.



Эти величины находятся в зависимости между собой и определяются формулой, называемой **формулой тонкой линзы**:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

где u — расстояние от линзы до предмета; v — расстояние от линзы до изображения; f — фокусное расстояние линзы. В случае толстой линзы формула остаётся без изменения с той лишь разницей, что расстояния отсчитываются не от центра линзы, а от главных плоскостей.

Недостатки простой линзы

Изображение, даваемое простой линзой, имеет ряд искажений. Устранение большинства достигается подбором ряда линз в центрированную оптическую систему — объектив.

Искажения в оптических систем называются аберрациями, которые делятся на следующие виды:

Геометрические аберрации

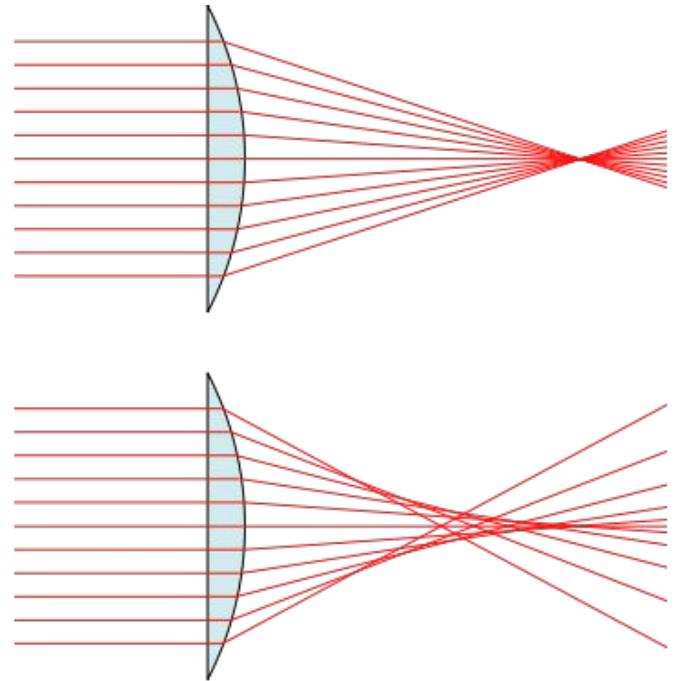
- Сферическая аберрация
- Кома
- Астигматизм
- Дисторсия
- Кривизна поля изображения

Хроматические аберрации

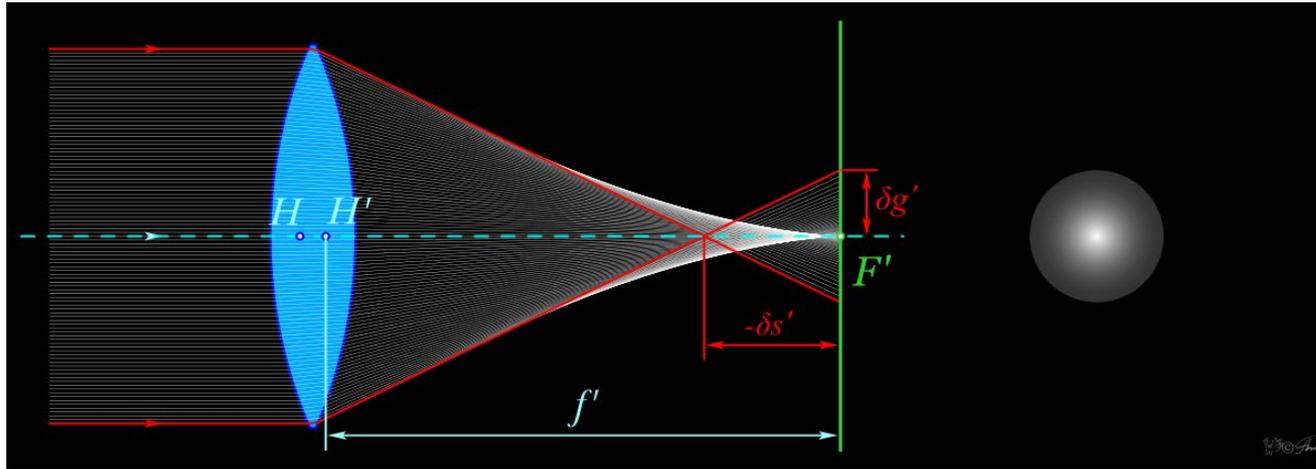
Дифракционные аберрации

Сферические aberrации

- Сферическая aberrация — aberrация оптических систем из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси.
- Приводит к нарушению гомоцентричности пучков лучей от точечного источника, без нарушения симметрии строения этих пучков (в отличие от комы и астигматизма).
- Хотя эта aberrация и называется *сферической*, она характерна не только для сферических поверхностей.



Продольные и поперечные сферические aberrации



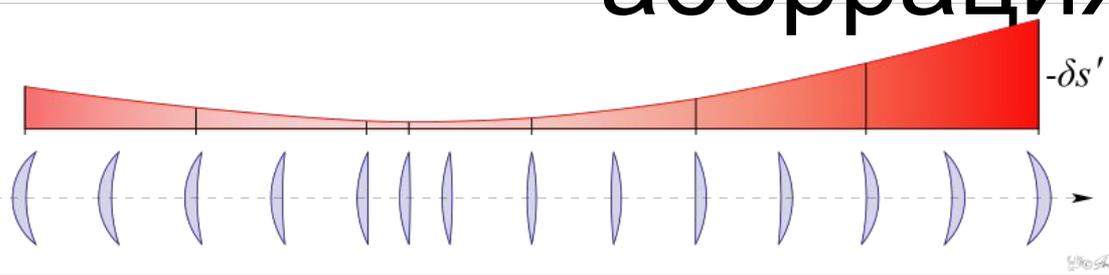
H, H' — положения главных плоскостей;
F' — задняя фокальная плоскость;
f' — заднее фокусное расстояние;
 $\delta s'$ — продольная сферическая aberrация;
 $\delta g'$ — поперечная сферическая aberrация.

Как видно из схемы, величина поперечной aberrации $\delta g'$ связана с величиной продольной $\delta s'$:

$$\delta g' = \frac{2h_1 \delta s'}{a'}$$

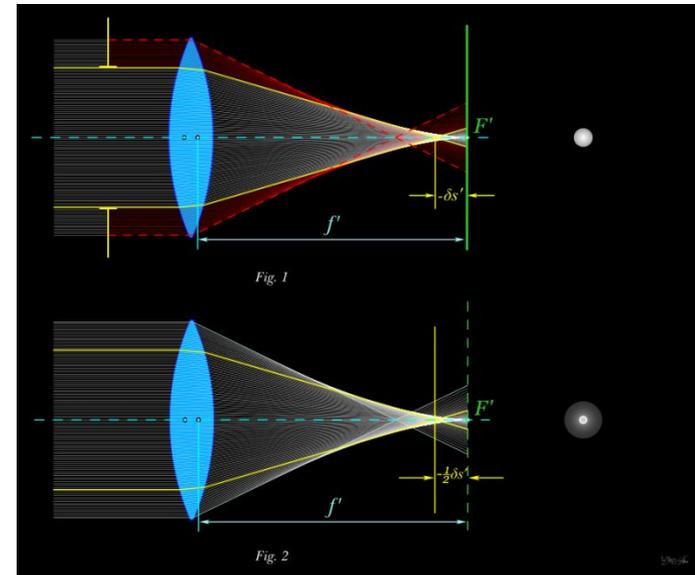
где $2h_1$ — диаметр отверстия системы;
 a' — расстояние от системы до точки изображения (для объектов на бесконечности это фокусное расстояние f');
 $\delta s'$ — продольная aberrация.

Борьба со сферическими абберациями



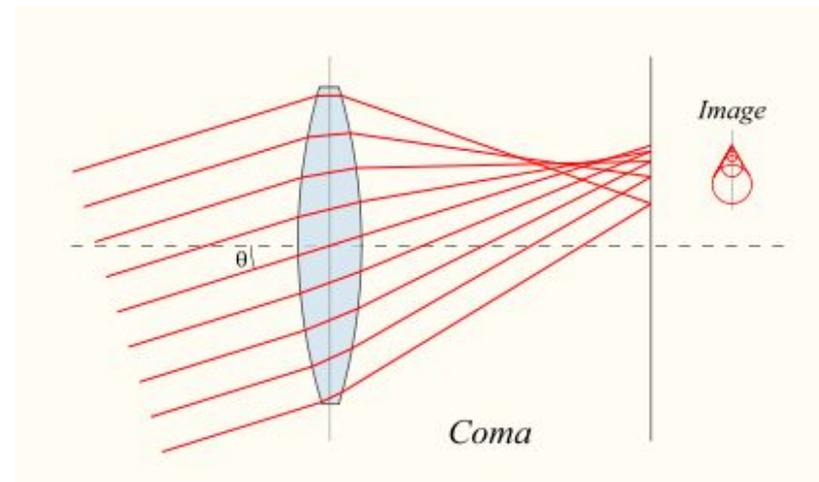
Зависимость величины продольной сферической абберации ($\delta s'$) от формы линзы.

- Применение оптических стёкол с высокими показателями преломления позволяют уменьшить сферическую абберацию, посредством увеличения радиусов поверхностей линзы при сохранении её оптической силы.
- Заметное влияние на сферическую абберацию оказывает диафрагмирование, так как при этом отсекаются краевые лучи широкого пучка.
- В отдельных случаях небольшая величина сферической абберации третьего порядка может быть исправлена за счёт некоторой дефокусировки. При этом плоскость изображения смещается к, так называемой, «плоскости лучшей установки», находящейся, как правило, посередине, между пересечением осевых и крайних лучей, и не совпадающей с самым узким местом пересечения всех лучей широкого пучка (диском наименьшего рассеяния)



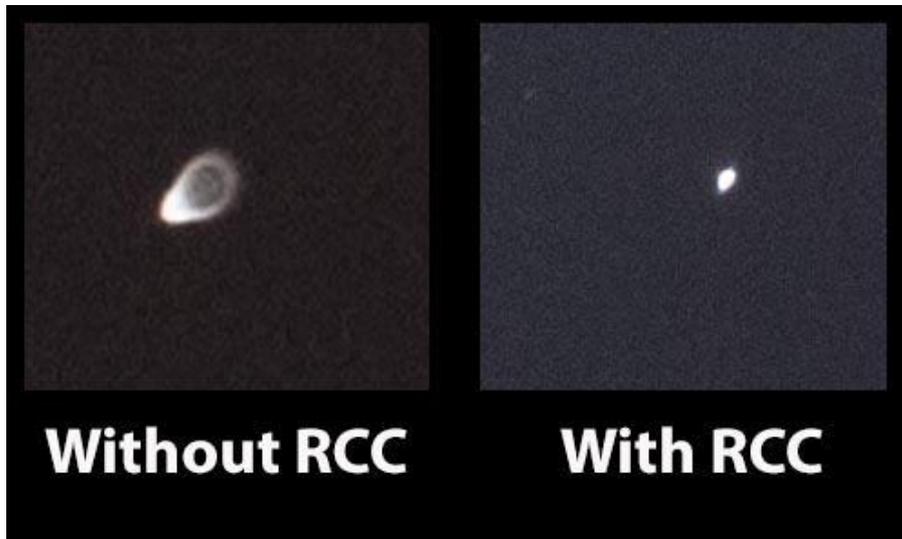
Коматические aberrации

Коматическая aberrация или Кома (от др.-греч. κόμη — волосы) — одна из пяти aberrаций Зейделя оптических систем, приводящая к нарушению гомоцентричности широких световых пучков, входящих в систему под углом к оптической оси.



Лучи проходящие под углом к оптической оси собираются не в одной точке

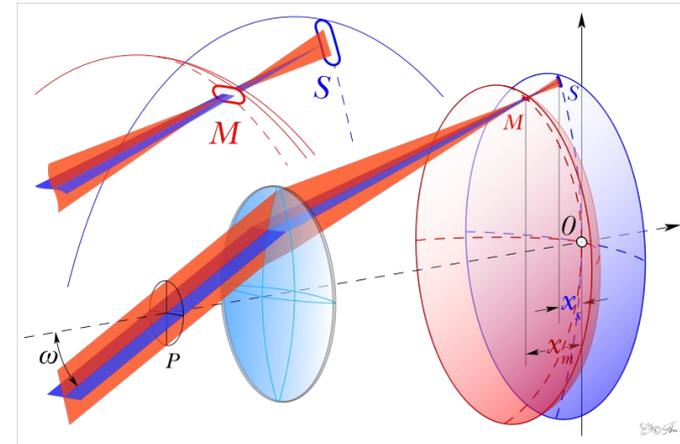
Размеры пятна пропорциональны квадрату угловой апертуры системы и удалению точки-объекта от оси оптической системы



Изображение точки полученное линзой без (слева) и с (справа) коррекцией комы

Астигматизм

- Астигматизм — aberrация, при которой изображение точки, находящейся вне оси, и образуемое узким пучком лучей, представляет собой два отрезка прямой, расположенных перпендикулярно друг другу на разных расстояниях от плоскости безабберационного фокуса.
- Так как отдельные лучи наклонного пучка падают на преломляющую поверхность под разными углами, то и преломляются на разные углы, пересекаясь на разном же расстоянии от преломляющей поверхности.
- Можно найти такое положение для поверхности изображения, когда все лучи пучка расположенные в одной из плоскостей (меридиональной или сагиттальной) пересекутся на этой поверхности.
- Астигматический пучок формирует изображение точки в виде двух астигматических фокальных линий, на соответствующих фокальных поверхностях, которые имеют форму поверхностей вращения кривых с различными параметрами, и касаются одна другой в точке оси системы.
- Если положения этих поверхностей, для некоторой точки поля, не совпадают, то говорят о наличии астигматизма, понимая под этим астигматическую разность меридионального и сагиттального фокусов.



Примеры астигматизма

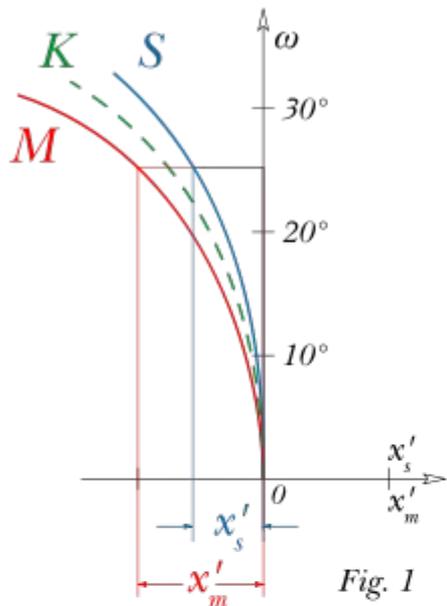


Fig. 1

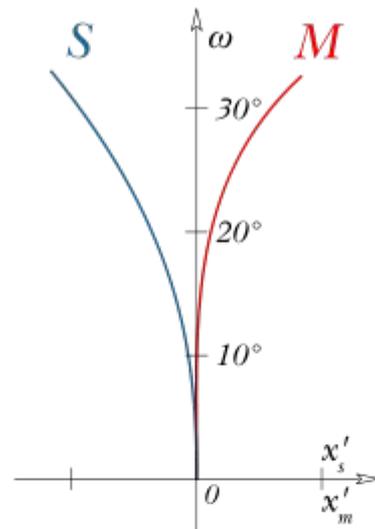


Fig. 2

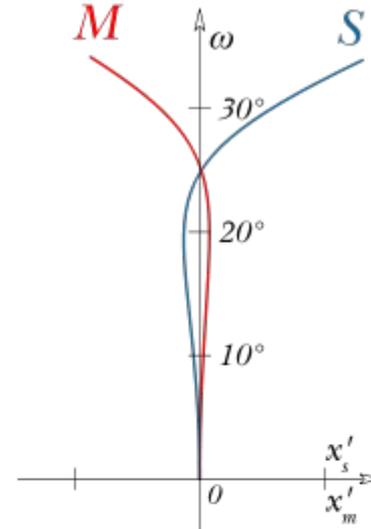
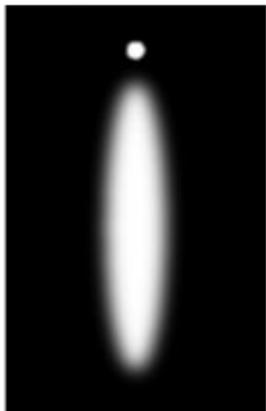


Fig. 3

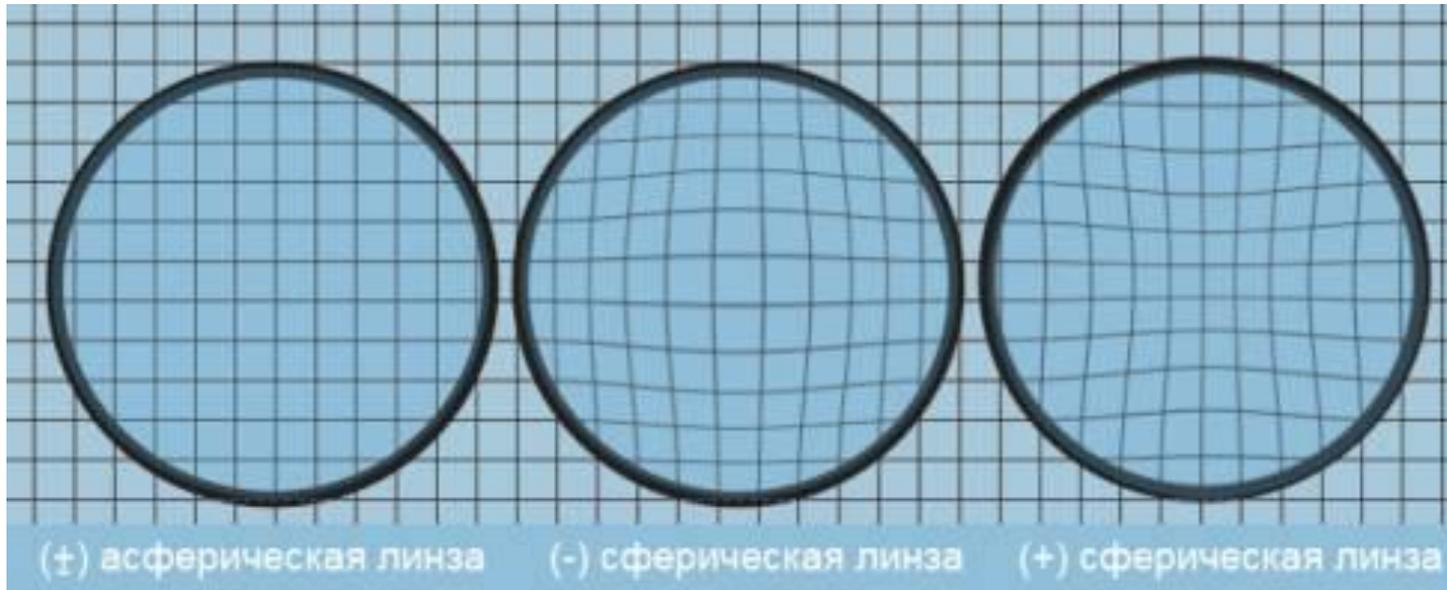
Некоторые примеры графиков астигматизма и соответствующих им фигур рассеяния, для осевого и наклонного (25°) пучков лучей:

1. — одиночная двояковыпуклая линза,
2. — симметричный объектив типа апланат,
3. — анастигмат



Examples of astigmatism

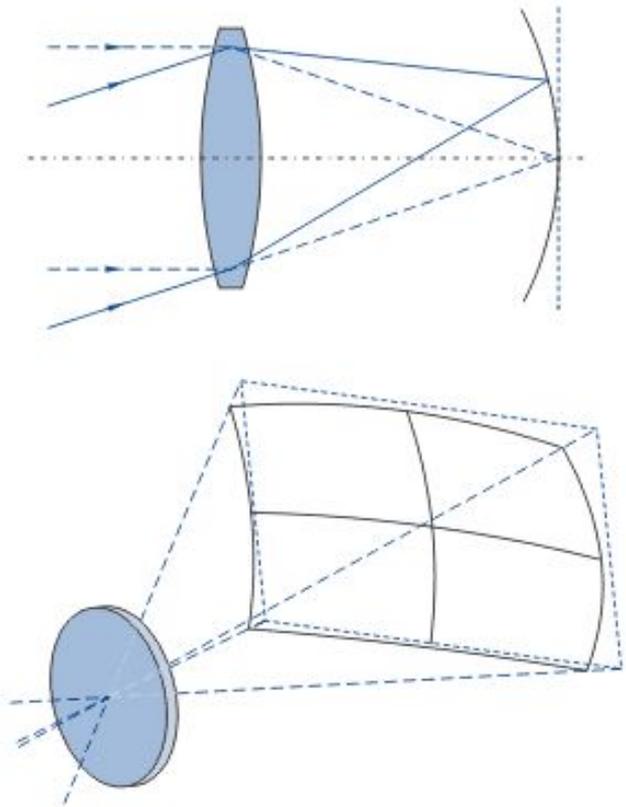
Дисторсия



- Дисторсия (от лат. distortio — искривление) — aberrация оптических систем, при которой линейное увеличение изменяется по полю зрения.
- Причина дисторсии, как и сферической aberrации, заключается в более сильном отклонении лучей периферийными зонами положительной линзы по сравнению с ее центральной частью. Чем дальше от центра линзы проходит луч, тем сильнее он отклоняется.

Кривизна поля изображения

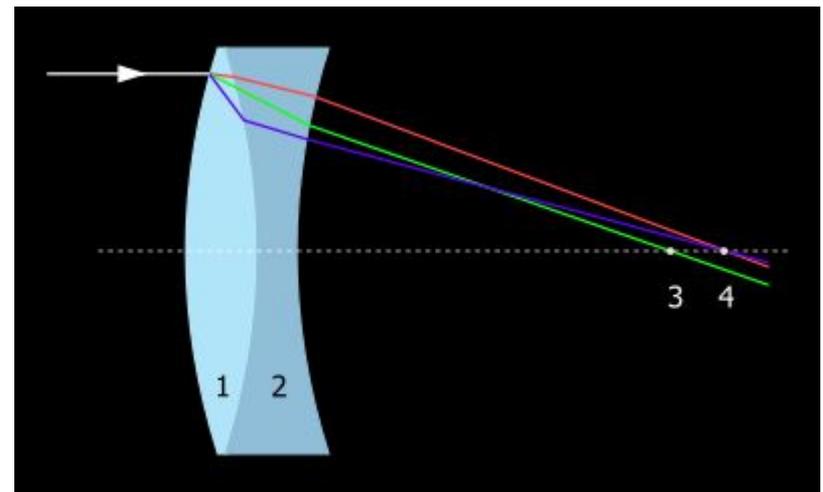
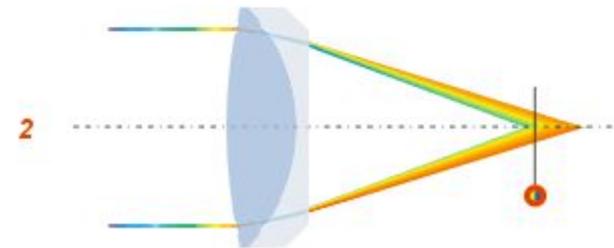
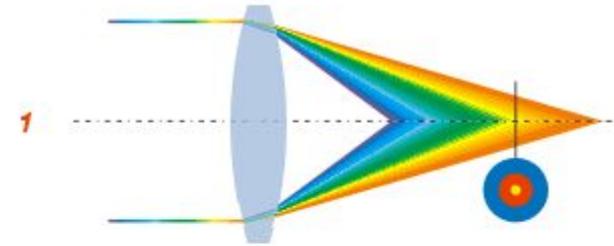
- Кривизна́ поля изображе́ния — абберация, в результате которой изображение плоского объекта, перпендикулярного к оптической оси объектива, лежит на поверхности, вогнутой либо выпуклой к объективу.
- Эта абберация вызывает неравномерную резкость по полю изображения. Поэтому, когда центральная часть изображения фокусирована резко, то его края будут лежать не в фокусе и изображаться нерезко.



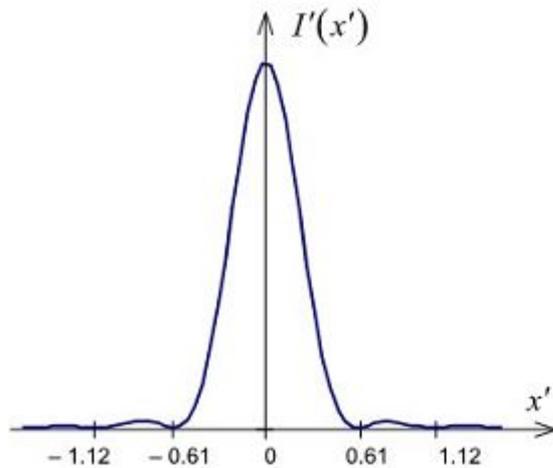
Хроматические aberrации

- Хроматическая aberrация — разновидность aberrаций оптических систем, обусловленная различием показателя преломления прозрачных сред от длины волны проходящего излучения.

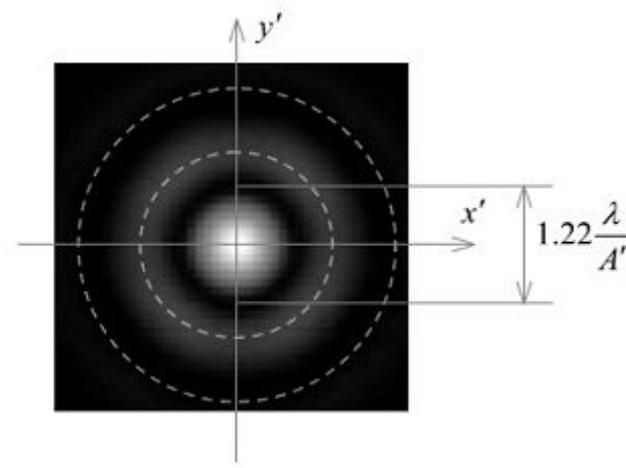
Хроматизм положения (1) и его уменьшение с помощью ахроматической линзы (2)



Дифракционные aberrации



а) сечение



б) распределение интенсивности

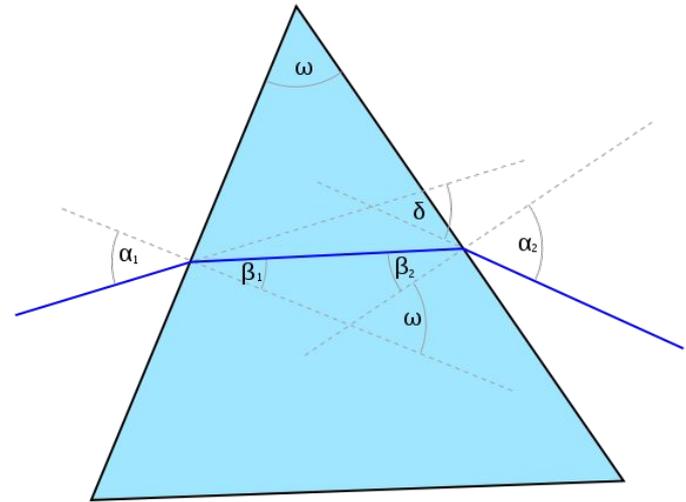
- Дифракционная aberrация обусловлена волновой природой света, и следовательно — носит фундаментальный характер, и поэтому принципиально не устранима.
- Возникает вследствие дифракции света на конечной апертуре.
- Задаёт предельно возможное угловое разрешение оптической системы:

$$\Delta = 1.22 \frac{\lambda}{A'}$$

где λ — длина волны, а A' — апертура.

Призмы

- Призма — оптический элемент из прозрачного материала в форме геометрического тела — призмы, имеющий плоские полированные грани, через которые входит и выходит свет.
- Свет в призме преломляется. Важнейшей характеристикой призмы является показатель преломления материала, из которого она изготовлена.



Разновидности призм:

- Дисперсионные
- Отражательные
- Поляризационные

Дисперсионные призмы

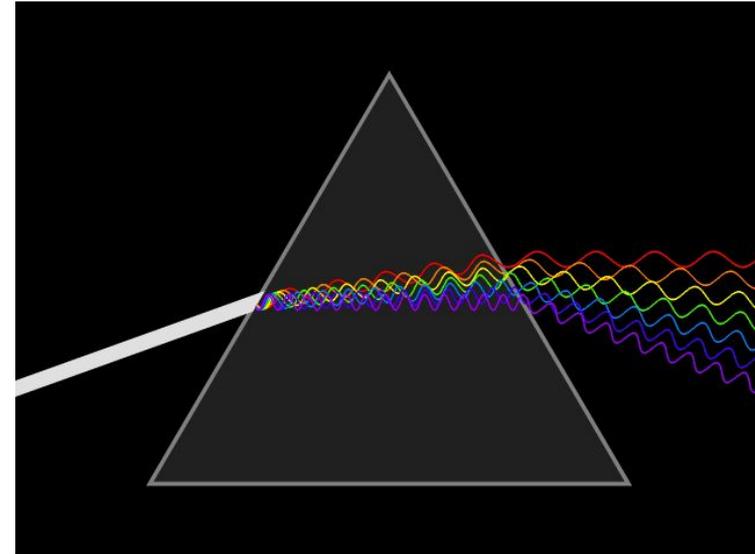
Дисперсионные призмы используют в спектральных приборах для пространственного разделения излучений различных длин волн.

Простая трехгранная призма

Дисперсионная призма Аббе

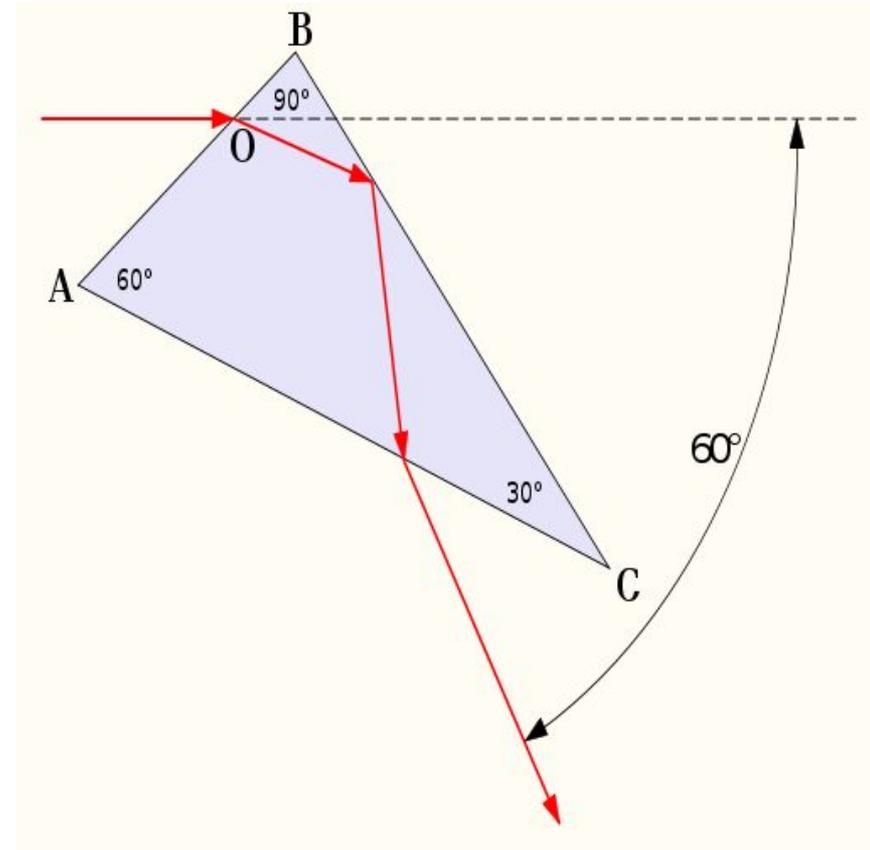
Призма Пеллин-Брока

Призма Амичи
(призма прямого зрения)



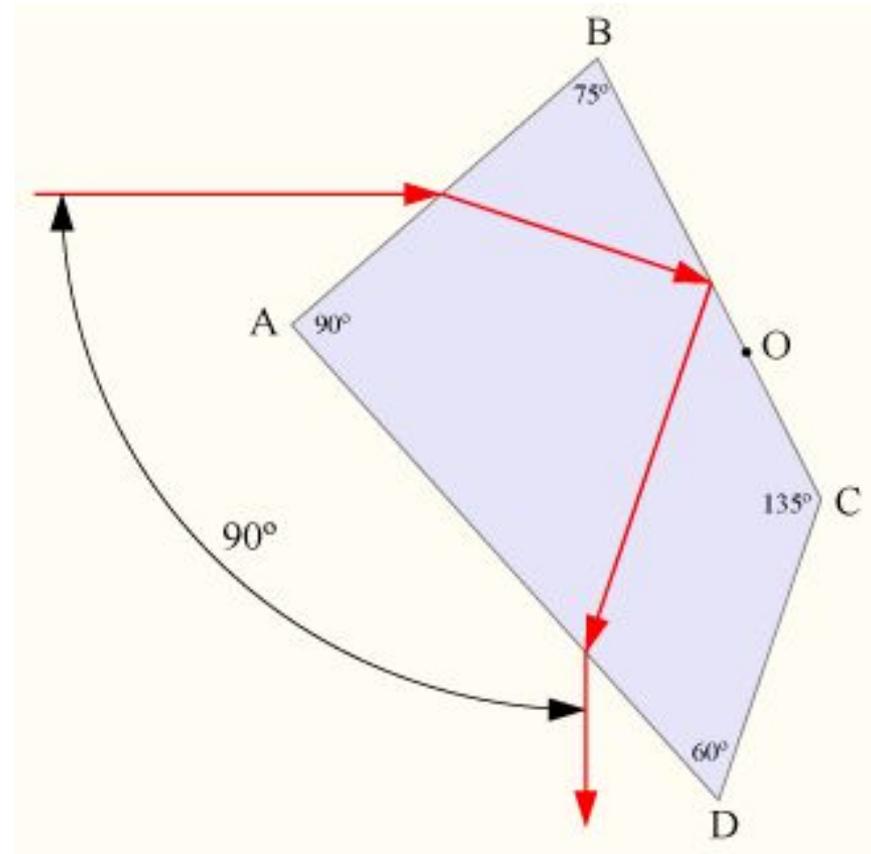
Призма Аббе

- Призма Аббе изготавливается из стекла, так, что в её основе находится треугольник с углами 30° - 60° - 90° . Когда луч света входит в сторону треугольника АВ, он преломляется и испытывает полное внутреннее отражение от стороны ВС, после чего преломившись во второй раз выходит из стороны АС. Для призмы подбирается такой материал, чтобы на луч с заданной длиной волны выходил из неё под углом 60° по отношению к первоначальному направлению.
- Так называемая призма Аббе типа А используется для того, чтобы перевернуть изображение без отклонения от линии взгляда на объект.



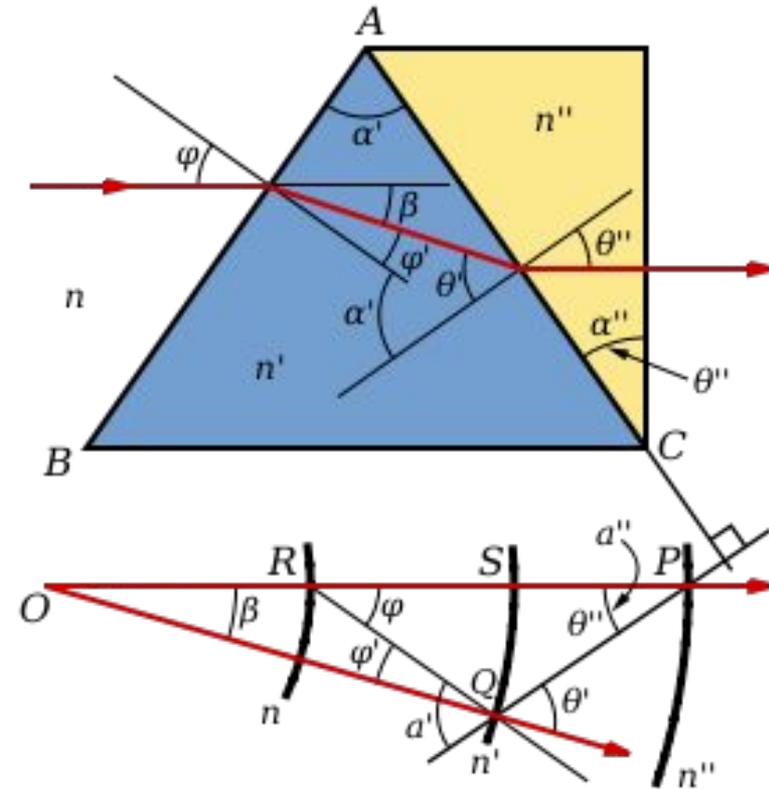
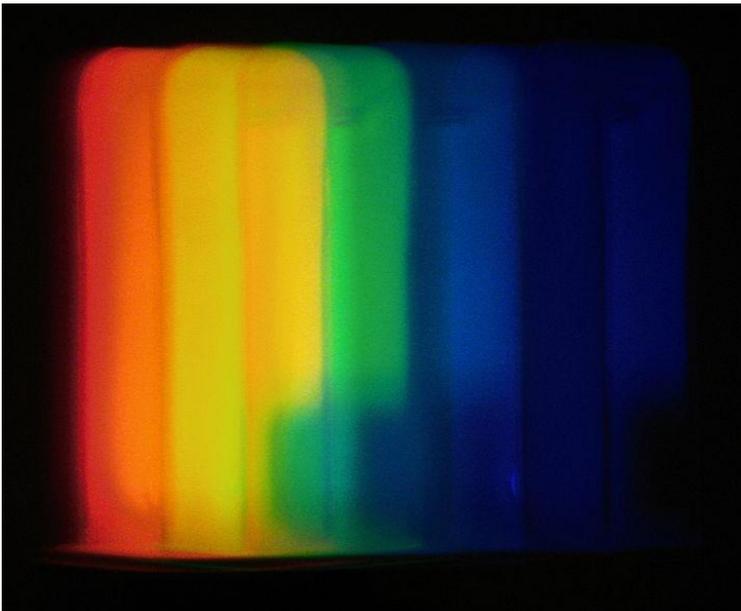
Призма Пеллин-Брока

- Четырехгранная призма с углами 90° , 75° , 135° и 60° .
- Луч света входит в сторону AB, испытывает полное внутреннее отражение от стороны BC и выходит через сторону AD. В результате преломления света только одна длина волны выходит под углом в 90° .
- Поворотом призмы вокруг оси O достигается изменение длины волны выходящего под 90° луча. При этом геометрия и положение входного и выходного пучков не изменяется.
- Используется для выделения конкретной длины волны из широко-спектрального излучения.



Призма Амичи

Пользуясь различием в дисперсии для разных сред, можно построить сложную призму так, что для какой-либо длины волны отклонение практически будет отсутствовать. Тогда можно получить спектр в прямом направлении. Такие призмы называют призмами прямого видения (призмами прямого зрения).



Изображение флуоресцентной лампы. Полученное через призму Амичи

Отражательные призмы

Отражательные призмы используют для изменения хода лучей, изменения направления оптической оси, изменения направления линии визирования, для уменьшения габаритных размеров приборов.

Призма Аббе

Призма Аббе-Порро

Призма Аббе-Кёнига

Призма дихроидная

Призма Дове

Призма Пехана-Шмидта

Призма Лемана

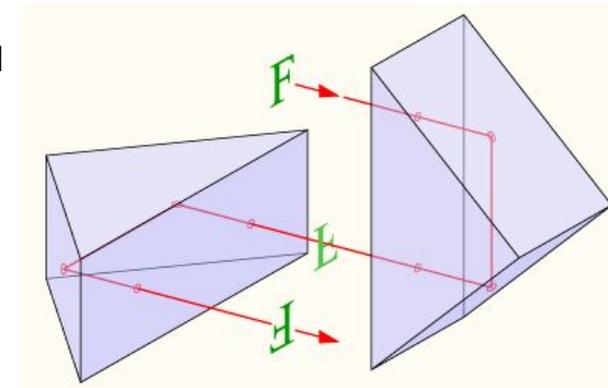
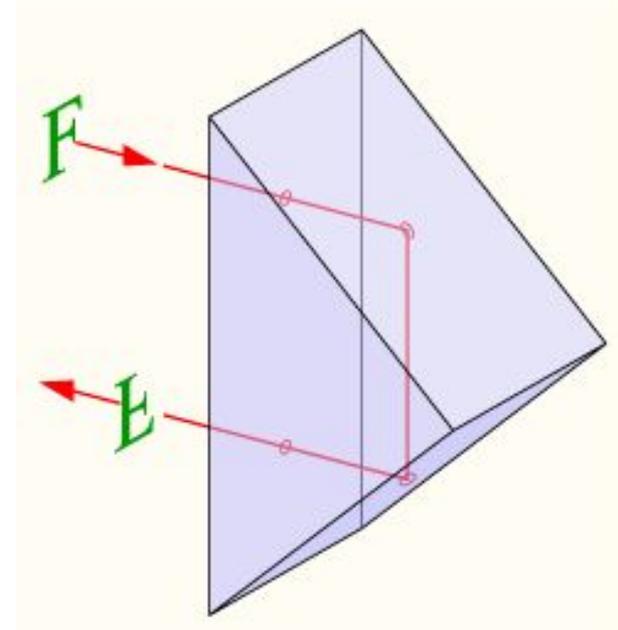
Пентапризма

Призма Порро

Призма Шмидта-Пехана

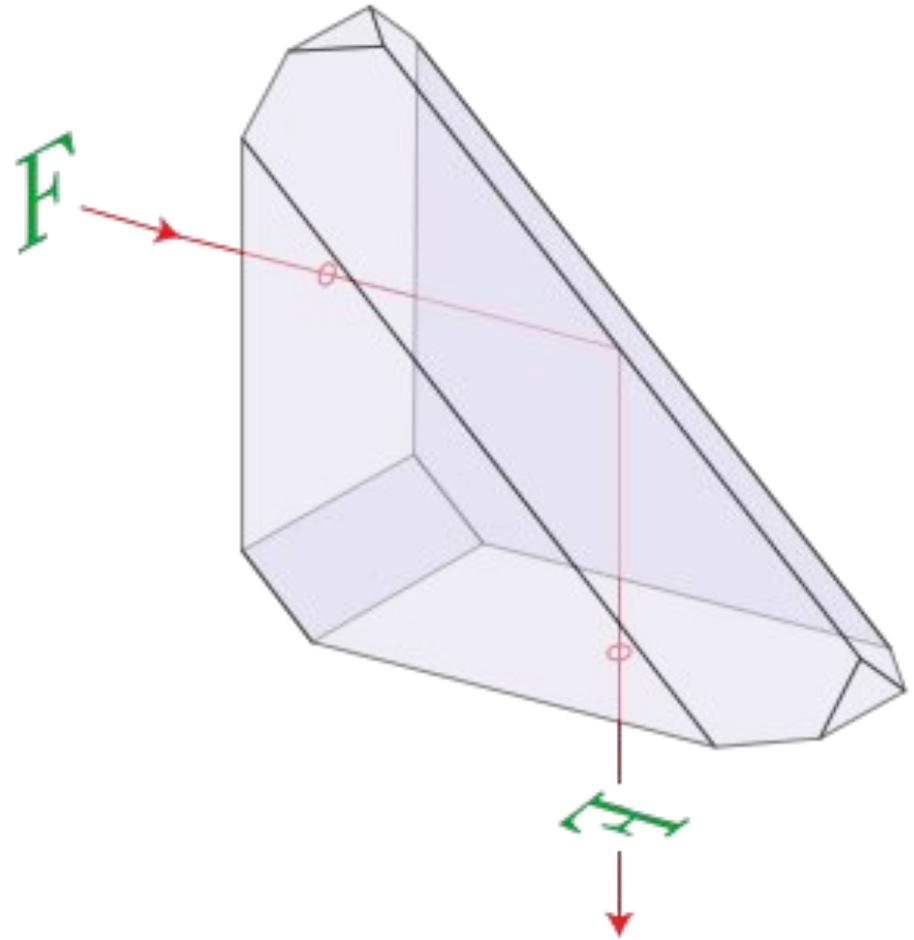
Призма Порро

- Представляет собой изделие из стекла в форме прямой призмы с равнобедренным прямоугольным треугольником в основании. Луч входит со стороны широкой прямоугольной стороны призмы, дважды испытывает полное внутреннее отражение от малых прямоугольных сторон и выходит через широкую прямоугольную сторону.
- Изображение при прохождении призмы отражается зеркально относительно плоскости симметрии, перпендикулярной основанию. Направление хода луча меняется на 180° .
- Призмы Порро часто используются парами, образуя **двойную призму Порро**. Вторая призма, повернутая на 90° относительно первой, устанавливается таким образом, чтобы луч попадал в нее после выхода из первой призмы. В этом случае изображение, дважды отраженное зеркально относительно двух перпендикулярных плоскостей, оказывается в итоге перевернутым на 180° относительно исходного.



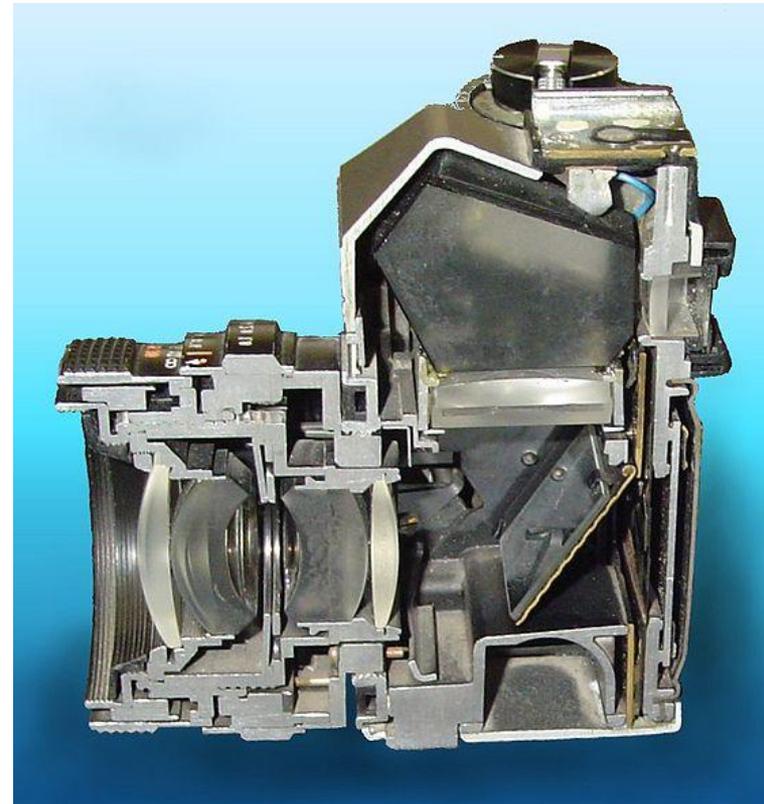
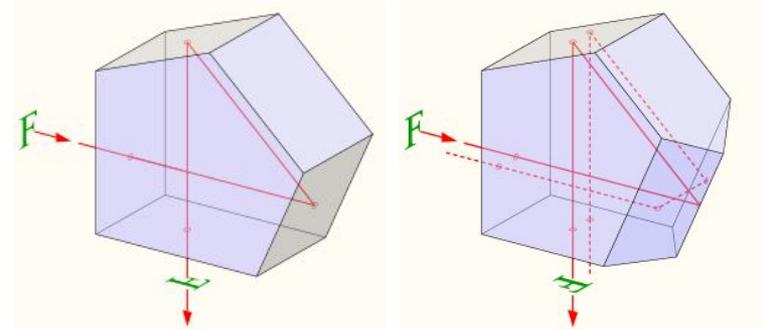
Призма Амичи с «крышей»

- Представляет собой обычную прямоугольную призму с дополнительной «крышей» грани которой сходятся под 90° , на гранях которой происходит полное внутренне отражение.
- Луч входящий в призму поворачивается на 90° , а изображение зеркально переворачивается.
- Часто используется в окулярах телескопов



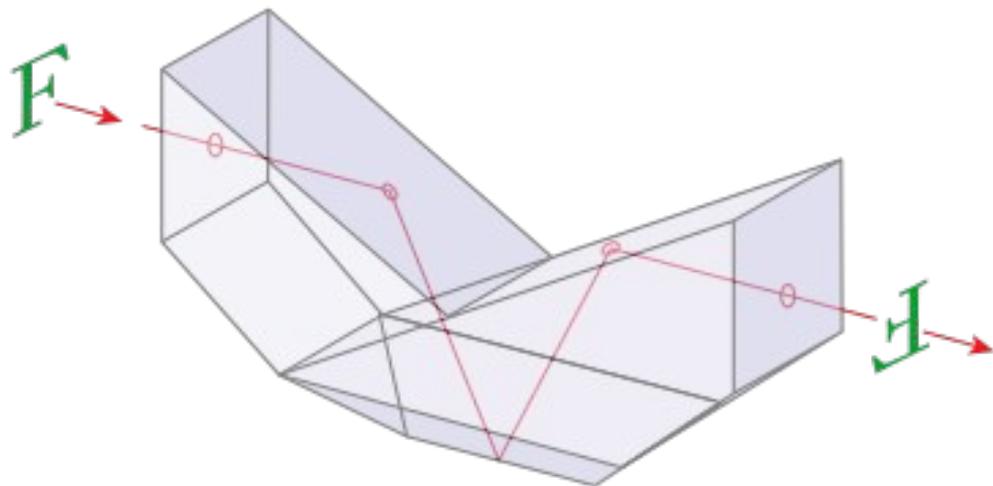
Пентапризма

- Пентапризма — отражательная призма, имеющая в сечении, перпендикулярном рабочим граням, вид пятиугольника. Две грани пентапризмы отражающие, две — преломляющие и одна — нерабочая.
- При замене одной из отражающих граней двумя, расположенными под углом 90° друг к другу, получается крышеобразная пентапризма или **пентапризма с крышей**.
- В отличие от простой пентапризмы, дающей прямое изображение, крышеобразная его зеркально переворачивает.
- Крышеобразная пентапризма широко применяется в качестве оборачивающей системы видоискателя однообъективных зеркальных фотоаппаратов.



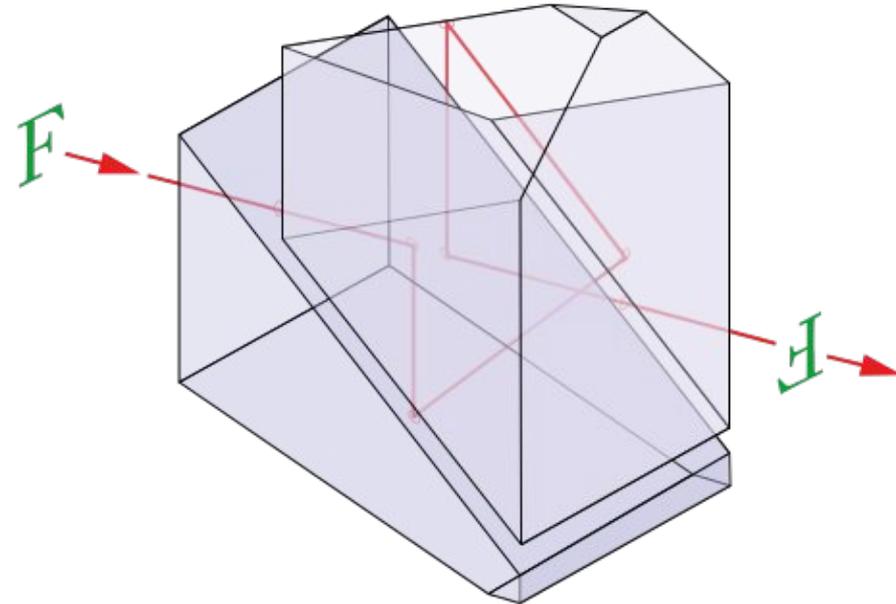
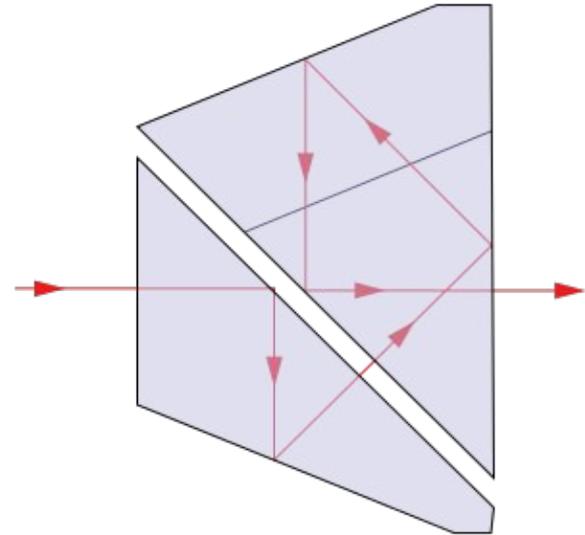
Призма Аббе-Кёнига

- Центральный луч отражается от скошенной под 30° гранью, затем от «крыши» и третий раз от второй скошенной под 30° грани.
- Входной и выходной лучи лежат на одной прямой.
- Изображение переворачивается на 180°



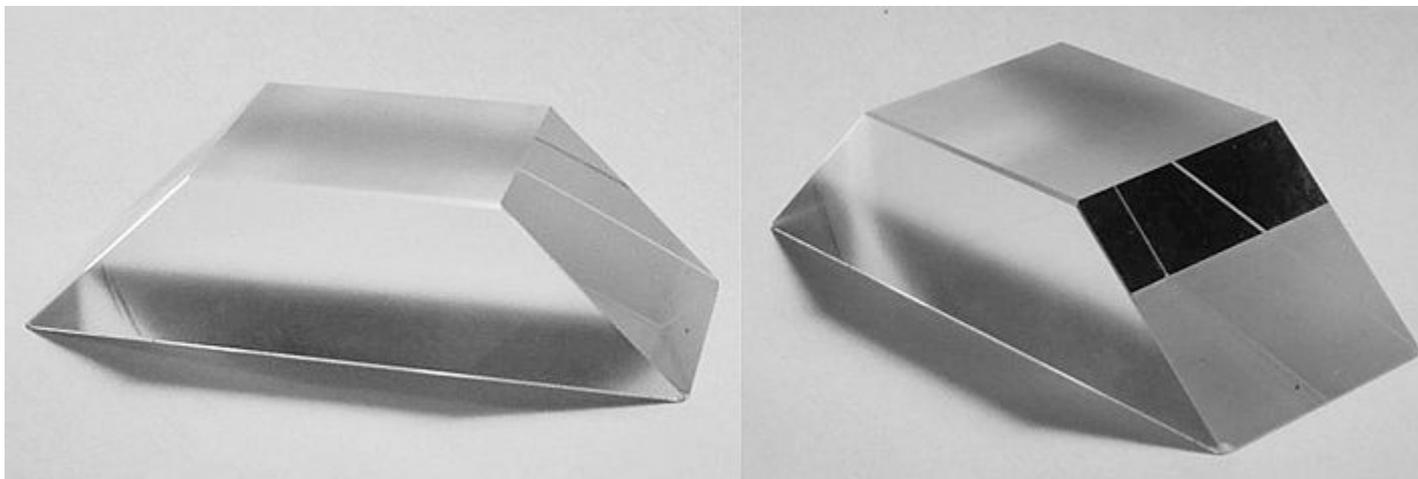
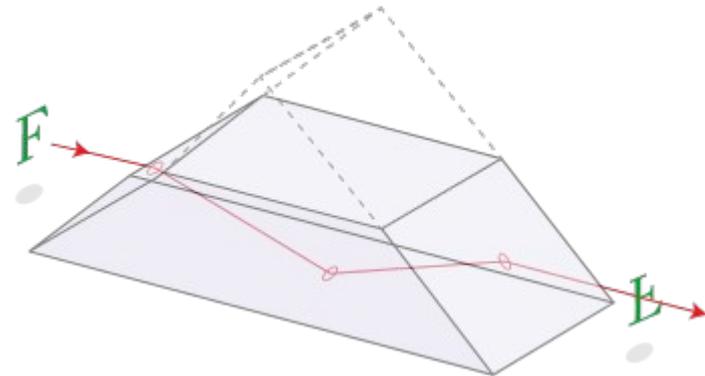
Призма Шмидта-Пехана

- Центральный луч испытывает 5 внутренних отражений, причем 1 из них под углами меньше критических.
- Требуется дополнительное отражающее покрытие.
- Входной и выходной лучи лежат на одной прямой.
- Изображение переворачивается на 180° .

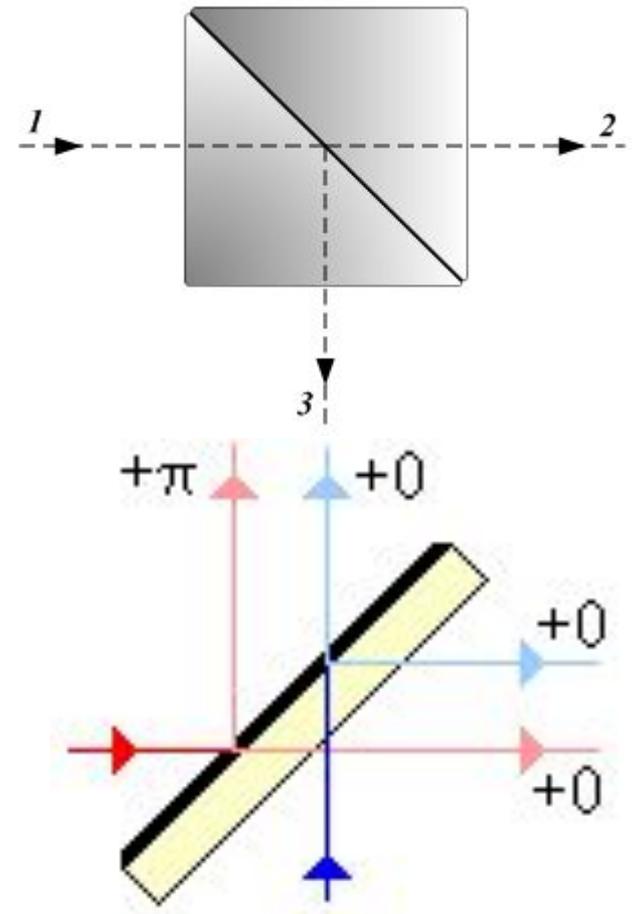
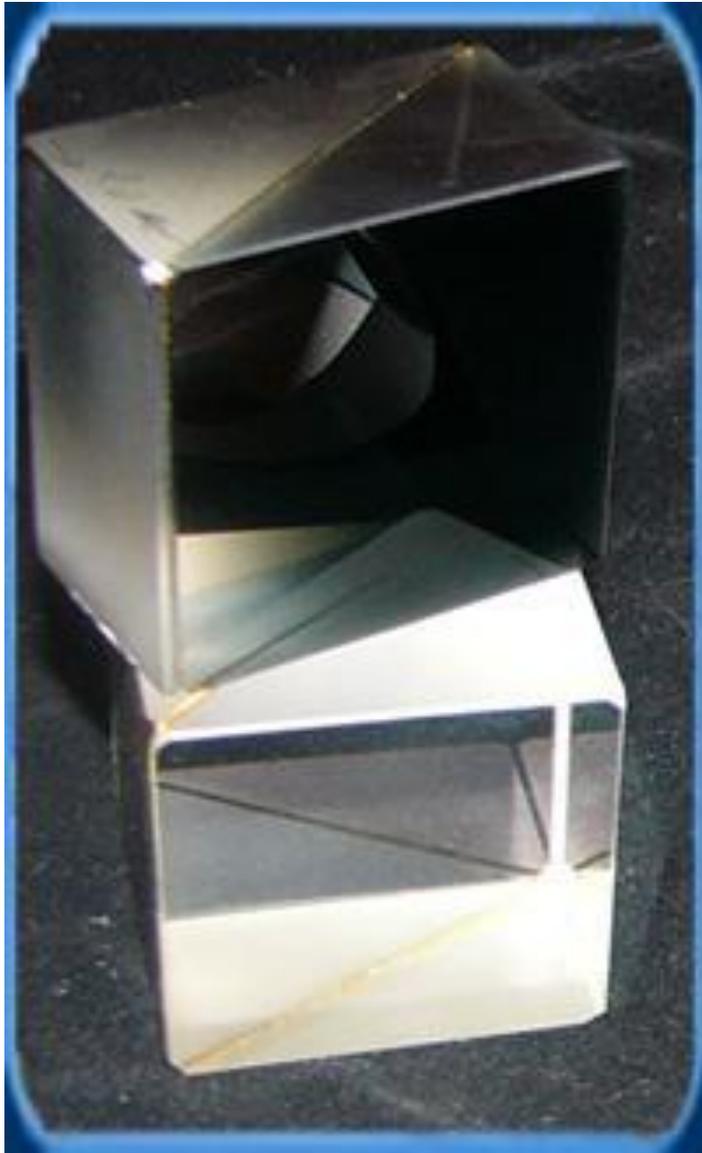


Призма Дове

Призма Дове – это оборачивающая призма. Не меняя направления проходящего через неё параллельного пучка лучей, призма Дове даёт зеркальное изображение предмета.

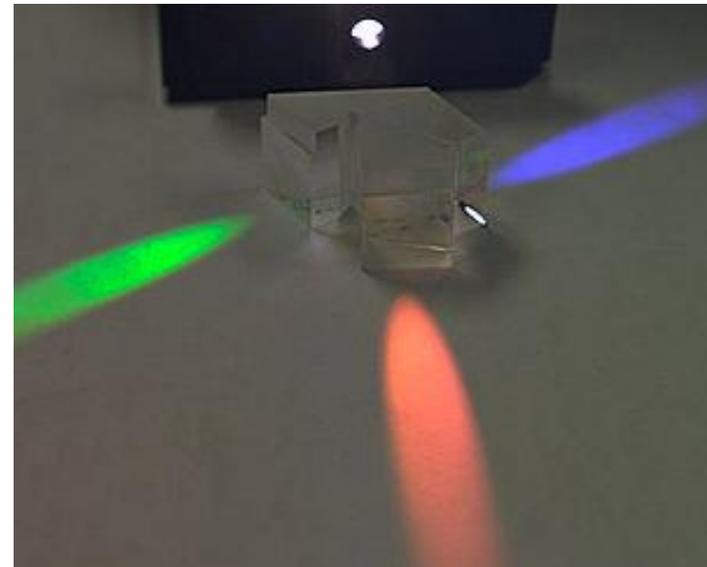
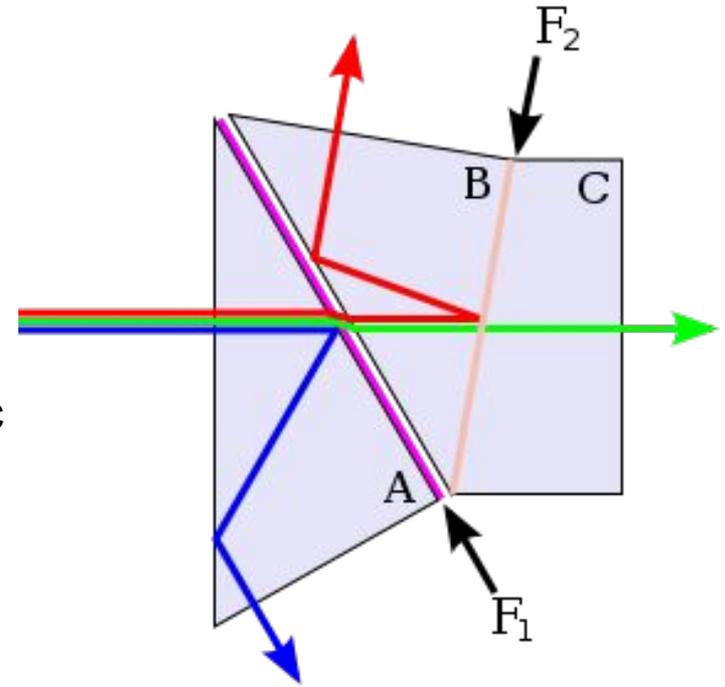


Светоделительный куб



Дихроидная призма

- Дихроидная призма — устройство, разделяющее падающий на него световой поток на несколько с различными диапазонами длин волн. Используются в трёхматричных видеокамерах и фотокамерах, а также в проекторах для разделения изображения на RGB составляющие.
- Строятся из одной или более стеклянных призм с дихроидными оптическими покрытиями, которые выборочно отражают или пропускают свет в зависимости от длины волны лучей света. Таким образом, определённые поверхности в пределах призмы действуют как дихроичные фильтры.
- Способность дихроидных призм разделять или соединять компоненты луча света широко используется в видео—фотоаппаратуре. Например, в видеокамерах это даёт возможность применять 3 фотосенсора с изображением, разделённым на три монохромных изображения R, G, B на каждом фотосенсоре.



Поляризационные призмы

Поляризационные призмы разделяют луч на компоненты с различной поляризацией.

Призма Аренса

Призма Волластона

Призма Глазбрука

Призма Глана-Тейлора

Призма Глана-Томпсона

Призма Глана-Фуко

Призма Николя

Призма Номарски

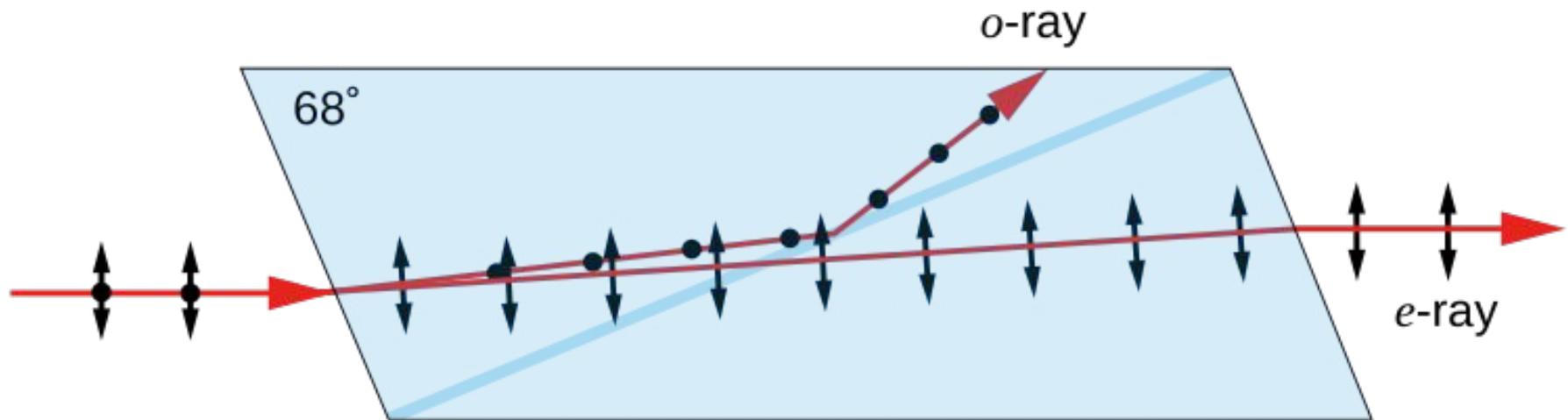
Призма Рошона

Призма Сенармонта

Призма Фуко

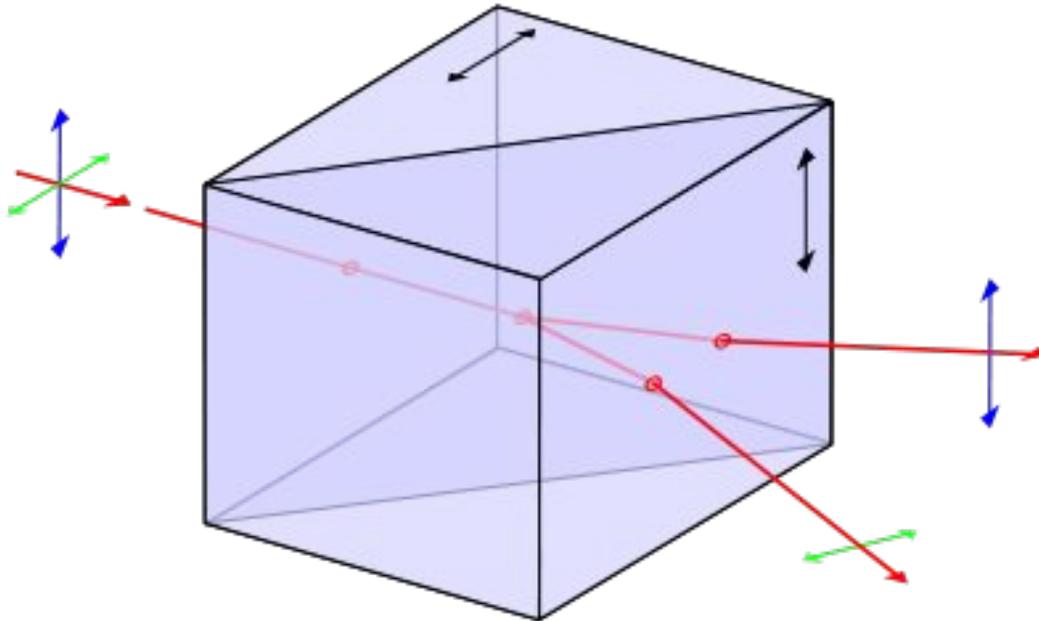
Параллелепипед Френеля

Призма Николя



Свет с произвольной поляризацией, проходя через торец призмы испытывает двойное лучепреломление, расщепляясь на два луча — обыкновенный, имеющий горизонтальную плоскость поляризации и необыкновенный, с вертикальной плоскостью поляризации. После чего обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение от плоскости склеивания и выходит через боковую поверхность. Необыкновенный беспрепятственно выходит через противоположный торец призмы.

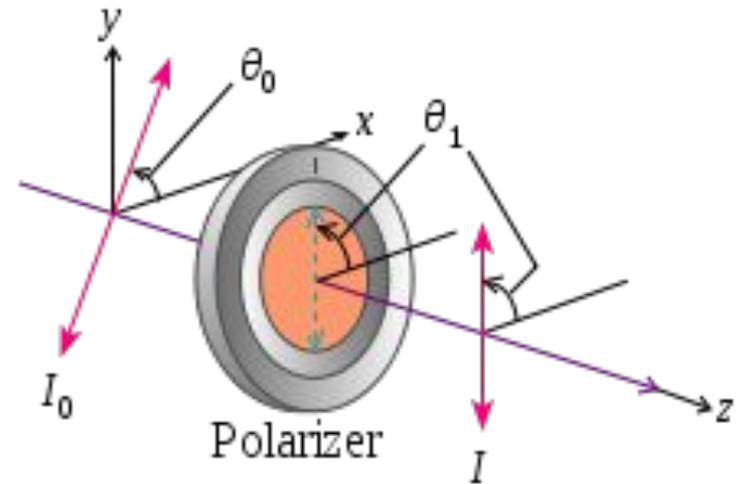
Призма Волластона



- Разделяет луч на два с ортогональными линейными поляризациями.
- Угол между лучами варьируется в диапазоне 15° - 45° .

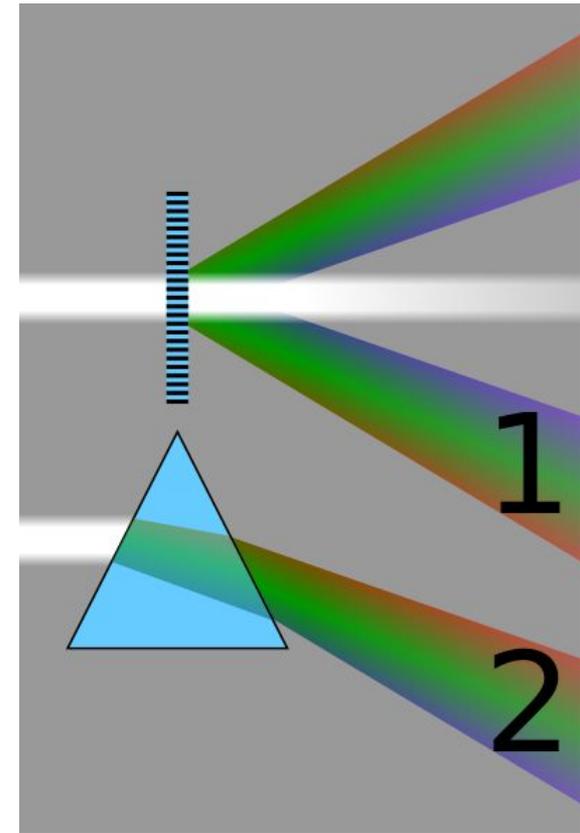
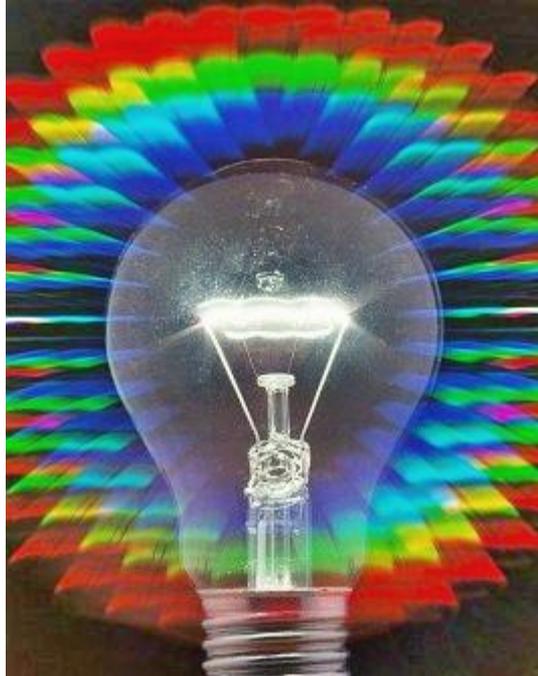
Поляризатор

- Для большинства практических применений поляризационный фильтр изготавливают в виде двух стеклянных пластинок с находящейся между ними поляроидной плёнкой, обладающей линейным дихроизмом.
- Поляроидная плёнка представляет собой слой ацетилцеллюлозы, содержащий большое количество мелких кристаллов герпатита (иодистое соединение сернокислого хинина). Применяются также иодно-поливиниловые плёнки с одинаково ориентированными полимерными цепями.
- Идентичность ориентации кристаллов достигается с помощью электрического поля, а полимерные цепи ориентируют механическим растяжением.



Дифракционная решетка

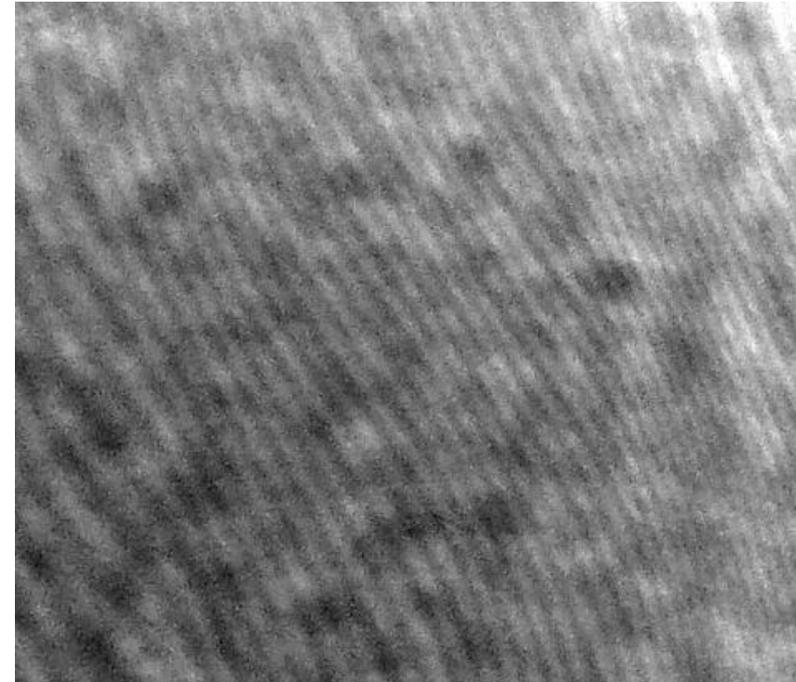
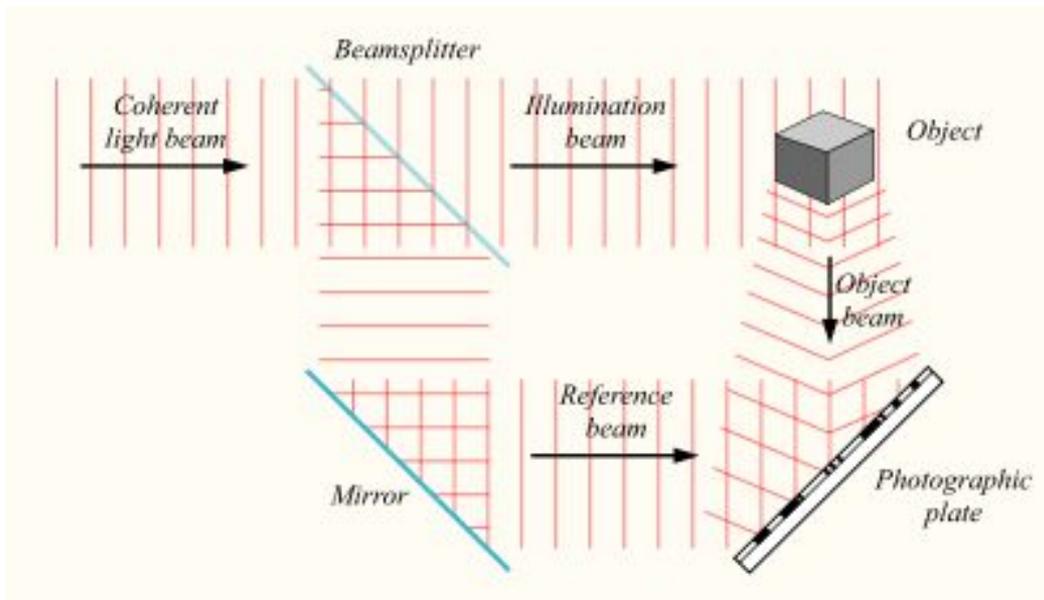
- Дифракционная решётка — оптический прибор, действие которого основано на использовании явления дифракции света.
- Представляет собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесённых на некоторую поверхность.



Распространение света через дифракционную решетку (1) и призму (2)

Голограммы

- Голограмма – записанная картина интерференции излучений от объекта и опорного.
- Позволяет восстановить излучение шедшее от объекта посредством освещения голограммы когерентным светом.



Увеличенный фрагмент голограммы

Спасибо за внимание!