



ABERRACIONES

Seminario de Ingeniería óptica
Óptica geométrica

Aberraciones

- La **aproximación paraxial** es válida sólo para ángulos pequeños. Cuando los sistemas ópticos trabajan con aberturas grandes se rompe la aproximación paraxial, y aparecen las aberraciones. En este sentido, se definen las aberraciones como desviaciones de la aproximación paraxial
- Coloquialmente, son los **defectos** de un sistema óptico. Las aberraciones producen distorsiones en las imágenes que empobrecen su calidad por lo que en general, deben tratar de reducirse
- Las aberraciones se han observado desde que aparecieron los primeros instrumentos ópticos como microscopios y telescopios en los siglos XVII y XVIII y, por supuesto, han tratado de corregirse
- Al estudio y modelado de las aberraciones han contribuido: Erns Abbe (1840-1905) que trabajo para la Zeiss, P. von Seidel (óptica geométrica), F. Zernike (O. ondulatoria), etc

Aberraciones de Seidel

- Las **aberraciones monocromáticas** más importantes son las que se deben al segundo término del desarrollo en serie de Taylor del seno, y se denominan aberraciones de tercer orden o de Seidel

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \dots$$

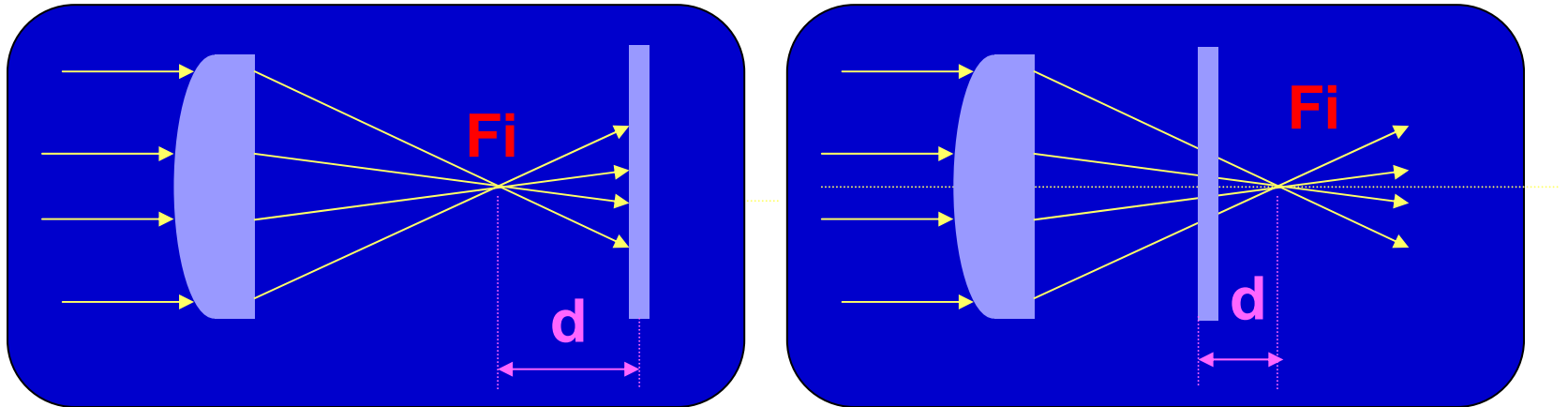
- La **aberración cromática** tiene como origen la dependencia de índice de refracción del vidrio con λ : $n(\lambda)$.

Aberraciones monocromáticas

- **Aberraciones de punto:** la imagen de punto se encuentra en la posición predicha por la óptica paraxial pero, en lugar de un punto, es una “mancha”:
 - Aberración esférica
 - Coma
 - Astigmatismo
- **Aberraciones de forma:** la imagen de un punto es un punto pero su posición es distinta de la establecida por la aproximación paraxial:
 - Distorsión
 - Curvatura de campo

Desenfoque

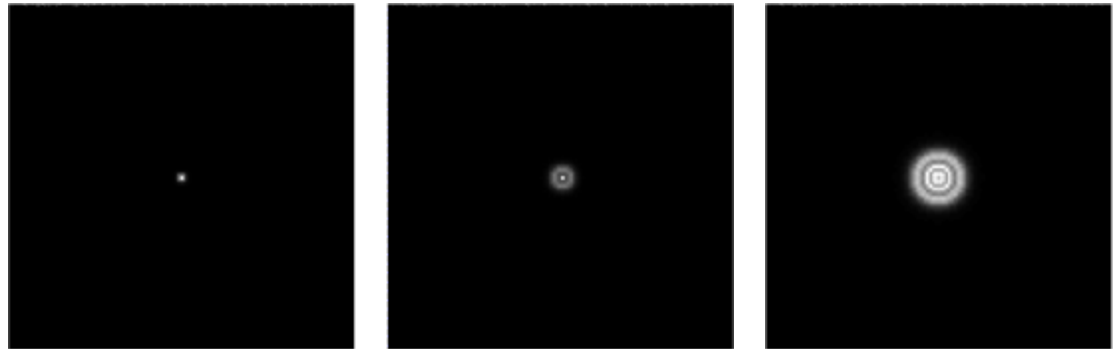
- La imagen se forma en una posición distinta de la correspondiente a la imagen Gaussiana



- Aunque no se suele considerar como “aberración”, es sin embargo, la causa más frecuente de degradación en los sistemas formadores de imagen
- Ejemplo: el ojo (miopía, hipermetropía, presbicia, etc)

Desenfoque

- Imagen de un punto con desenfoque creciente (si no hay otras aberraciones, es simétrico):



- Imagen extensa con los correspondientes desenfoques:

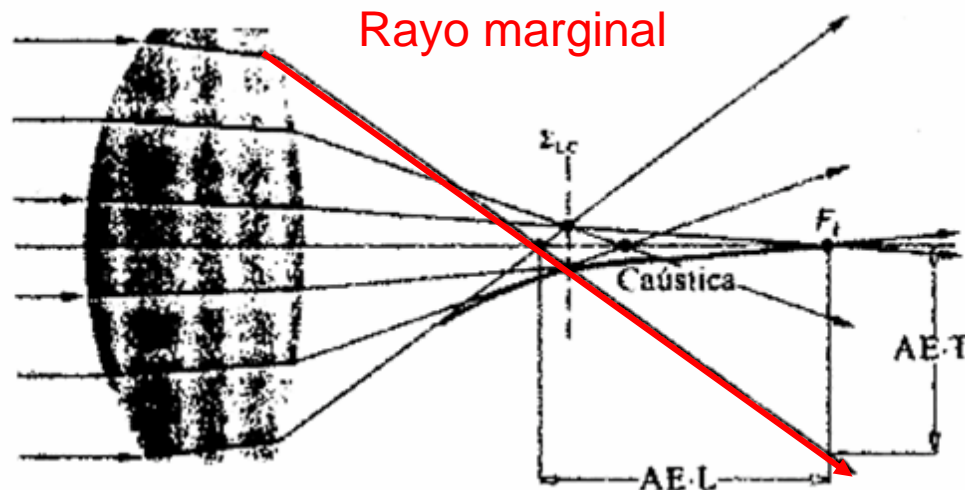


Aberración esférica

- Es la única que afecta a puntos situados en el eje
- Los rayos provenientes de un punto del eje que entran en la lente con ángulos grandes (fuera de la aproximación paraxial) no van al foco, sino cerca de él. Los rayos que inciden más hacia los bordes convergen más cerca (o más lejos) de la lente que los que entran por el eje
- La focal de los rayos periféricos (no paraxiales) depende de su altura
 - Para una lente convergente, la aberración esférica es positiva (focal anterior a la focal paraxial)
 - Para una lente divergente, es negativa (focal posterior a la paraxial)

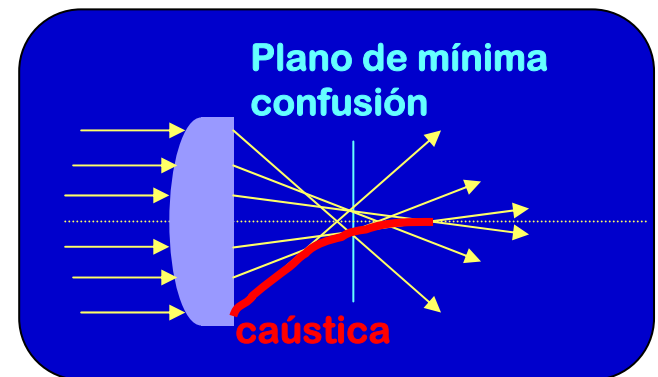
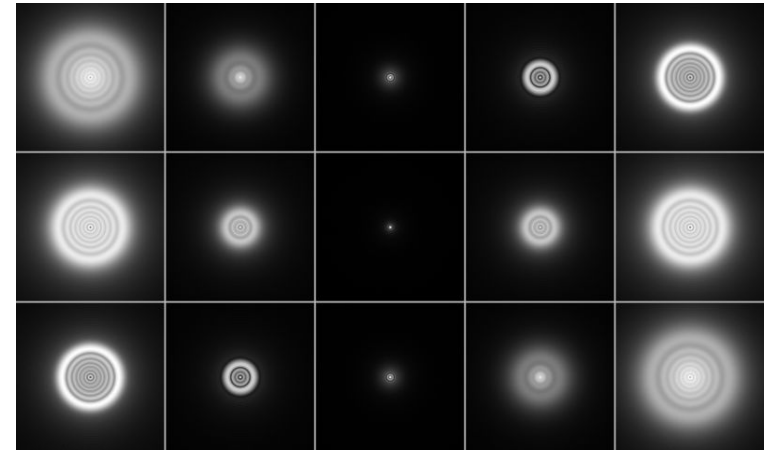
Aberración esférica

- Las imágenes de los rayos forman una línea sobre el eje cuya longitud se denomina **aberración esférica lateral: AEL**. También se define como la diferencia entre el foco del rayo marginal y el foco gaussiano
- El tamaño de la imagen en el foco paraxial se denomina **aberración esférica transversal: AET**. También se define como la distancia al eje del punto de incidencia del rayo marginal en el plano focal



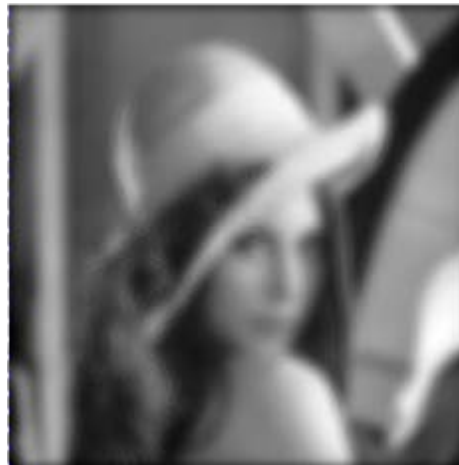
Aberración esférica

- Moviendo un plano perpendicular al eje óptico a lo largo de la línea de aberración esférica lateral, no encontraremos nunca un punto, sino manchas circulares de tamaño finito
- **Círculo de mínima confusión:** se obtiene en la intersección de la **caústica** (curva envolvente de los rayos refractados) con los rayos marginales. *Es la mejor imagen*, una mancha circular de determinado diámetro, que produce un efecto similar al desenfoque



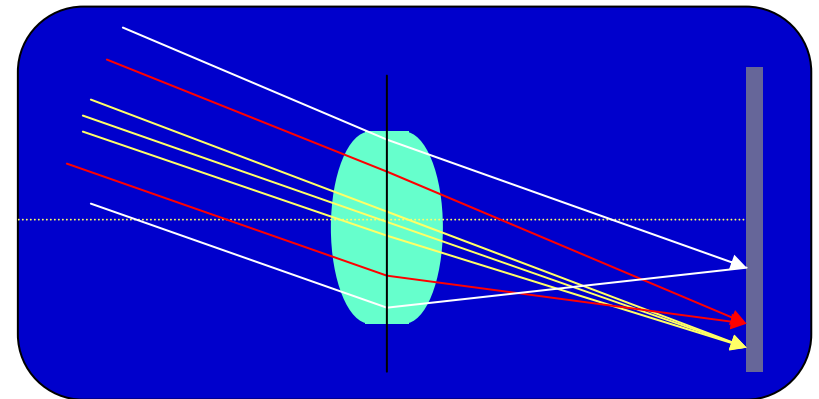
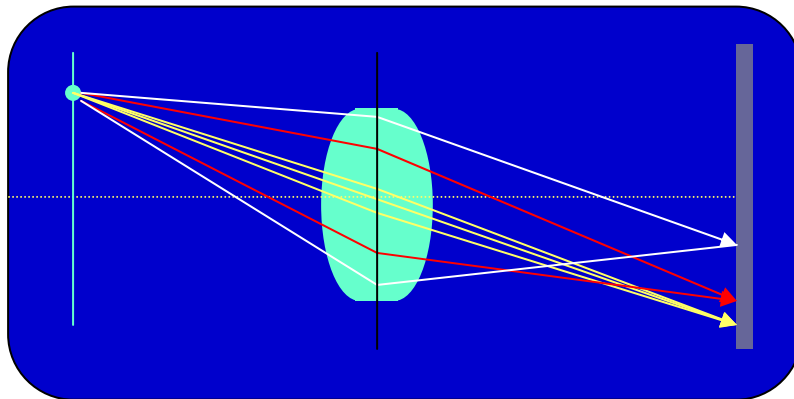
Aberración esférica

- La mejor forma de minimizar la aberración esférica es utilizar aperturas numéricas pequeñas para evitar rayos con ángulos altos
- Aunque se puede compensar (objetivos de fotografía asféricos), a veces es deseable que exista en cierto grado para suavizar las imágenes (objetivos 'flou')
- Ejemplo de imágenes con aberración esférica (en el plano de mínima confusión)

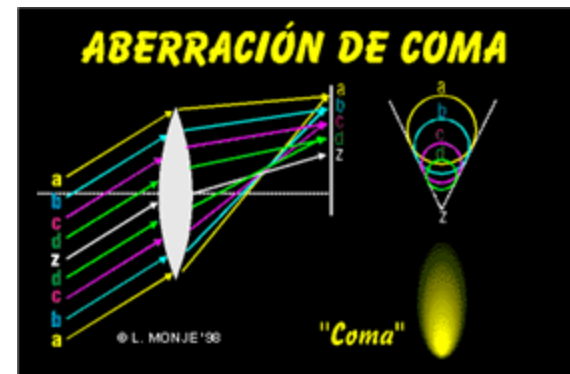


Coma

- Se origina por la dependencia del aumento lateral con la excentricidad del rayo, es decir, que rayos que entran a distinta altura focalizan en distintos puntos del plano imagen



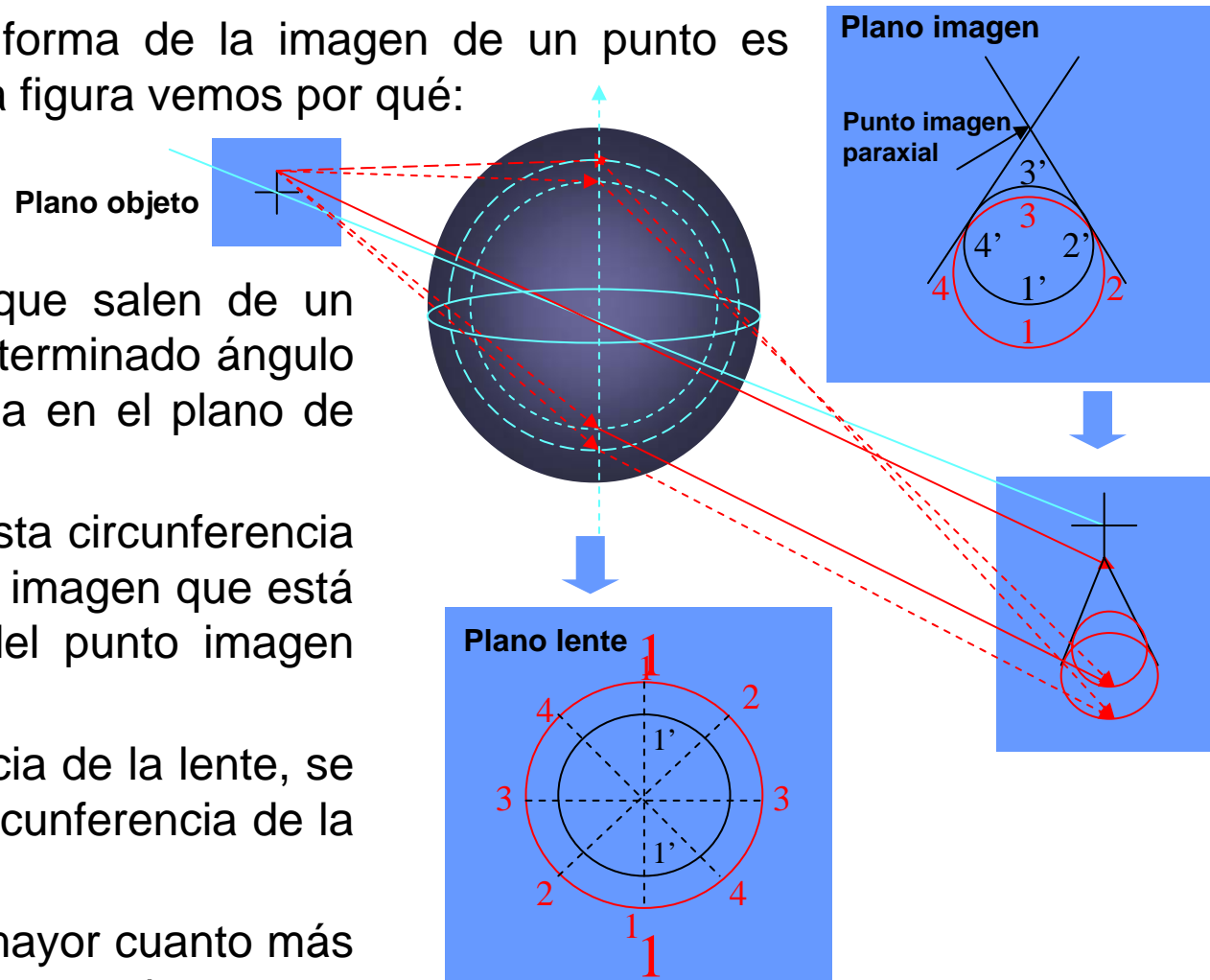
- Importante para:
 - Puntos fuera de eje
 - Objetos extensos
 - Sistemas descentrados
 - Aperturas grandes



Coma

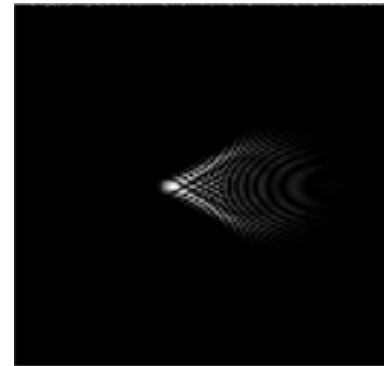
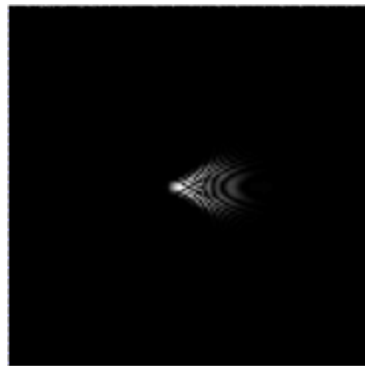
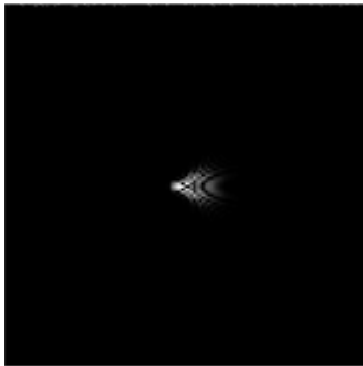
Se llama así porque la forma de la imagen de un punto es similar a un cometa. En la figura vemos por qué:

- Cada cono de rayos que salen de un punto origen con un determinado ángulo barre una circunferencia en el plano de la lente.
- Los rayos imagen de ésta circunferencia forman otra en el plano imagen que está desplazada respecto del punto imagen paraxial.
- Al barrer la circunferencia de la lente, se recorre dos veces la circunferencia de la imagen
- El desplazamiento es mayor cuanto más alejado del eje está el punto origen



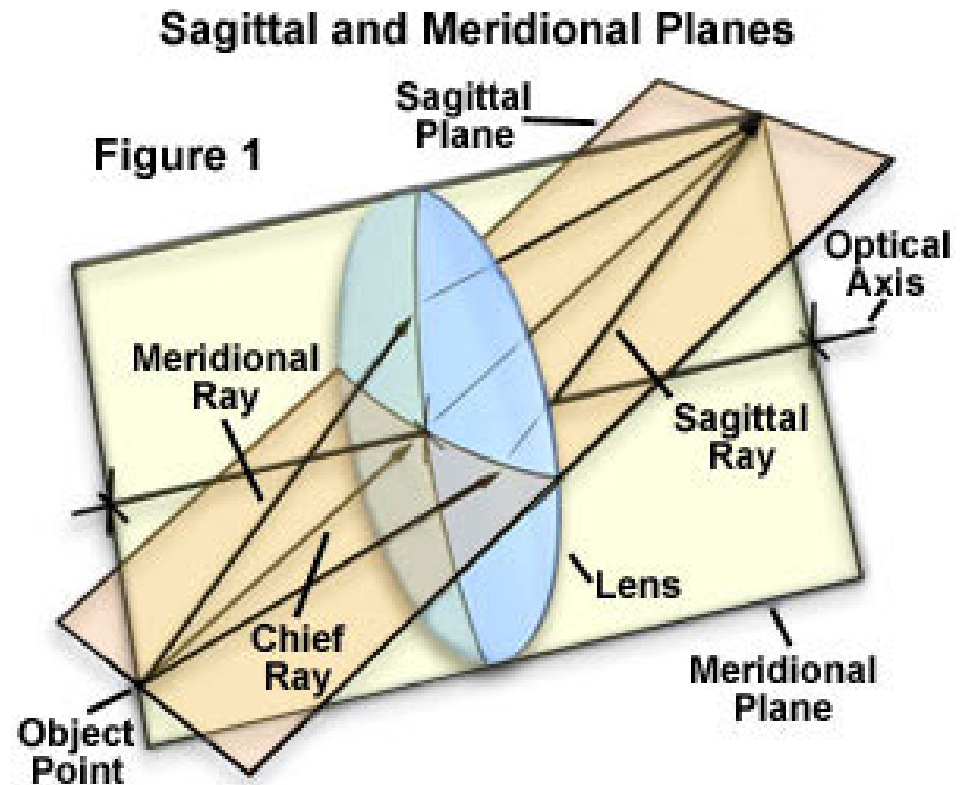
Coma

- Debido a su forma, el coma produce una degradación de la imagen muy desagradable como muestra el ejemplo
- En fotografía, hay objetivos corregidos de coma y esférica que se denominan: aplanáticos



Astigmatismo

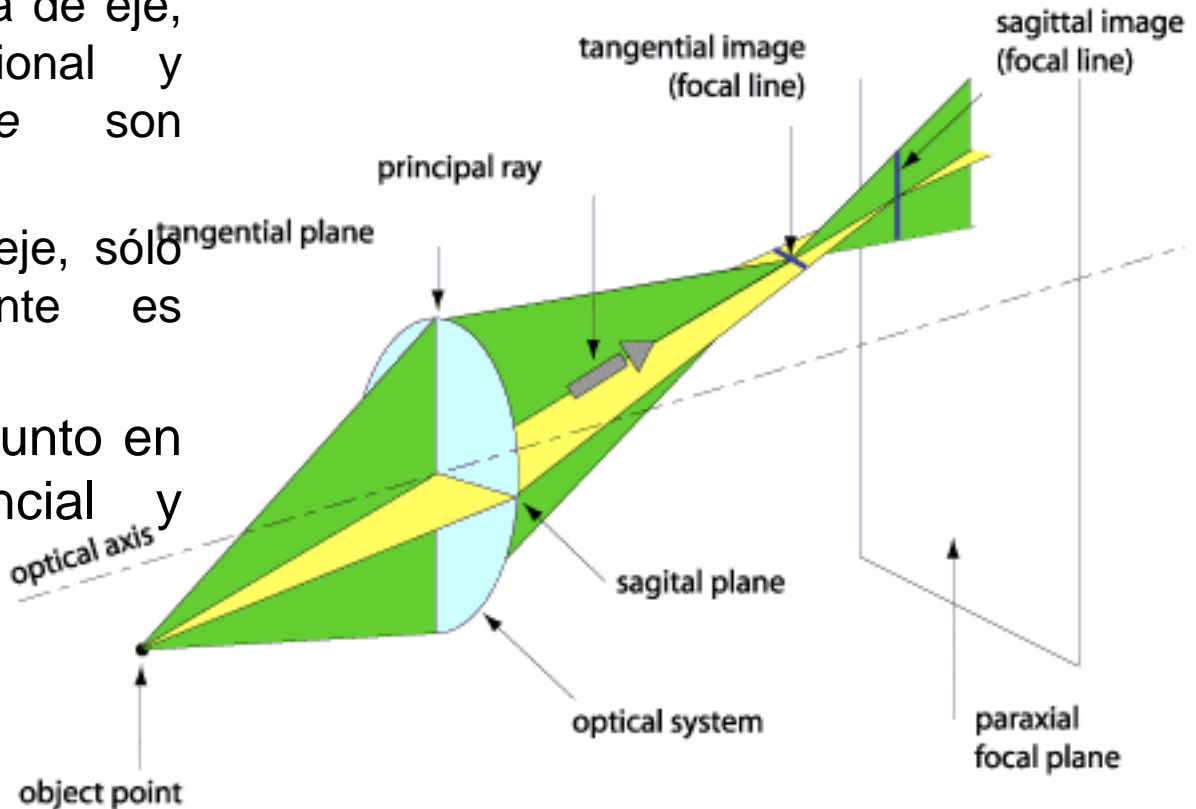
- En puntos fuera del eje, el cono de rayos incidente es asimétrico
- El plano de máxima asimetría llamado **plano meridional** (o tangencial) contiene el eje y el rayo principal
- El plano perpendicular a éste que contiene al rayo principal se llama **plano sagital**



- Si la lente no es simétrica, también hay astigmatismo para puntos en el eje

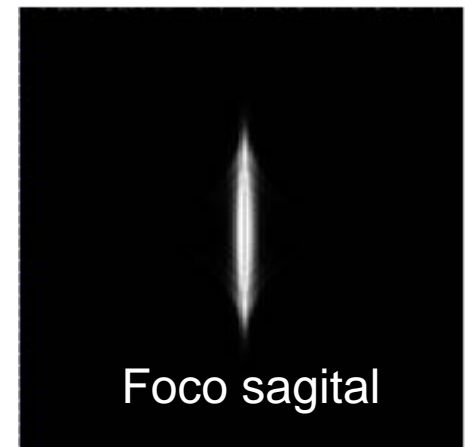
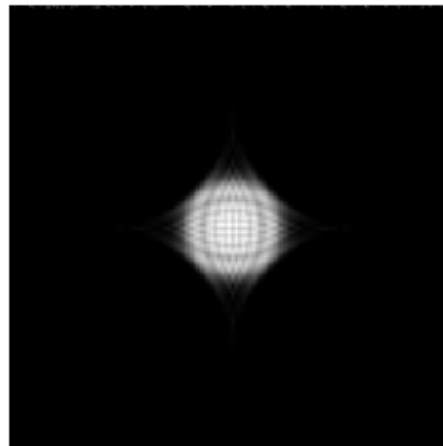
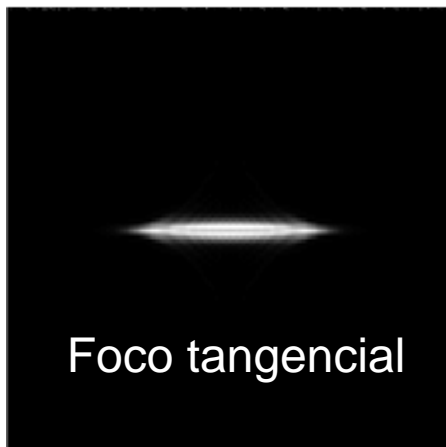
Astigmatismo

- Los rayos que entran por uno u otro plano focalizan en distintos puntos, es decir, el foco tangencial y el sagital son distintos
 - Para puntos fuera de eje, el foco meridional y sagital *siempre* son distintos
 - Para puntos en eje, sólo cuando la lente es *asimétrica*
- La imagen de un punto en los focos tangencial y sagital es una línea



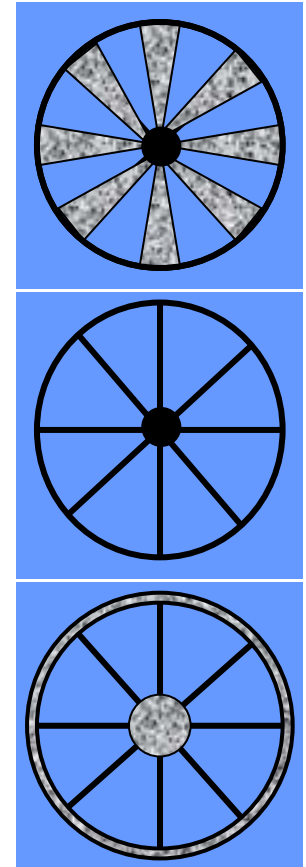
Astigmatismo

- El astigmatismo se define como la distancia entre el foco meridional y el sagital. Depende de:
 - La focal de la lente
 - El ángulo de los rayos
 - La distancia al eje
- La mejor imagen se obtiene para una posición entre ambos focos y se denomina **círculo de mínima confusión**



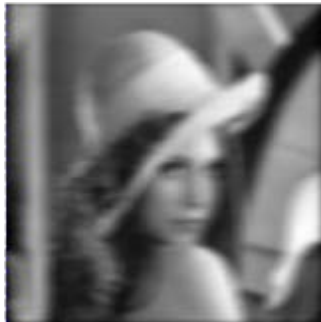
Astigmatismo

- La consecuencia del astigmatismo NO es que veamos las imágenes alargadas o ensanchadas, sino que no podemos enfocar simultáneamente líneas verticales y horizontales
- Es un defecto muy común en el ojo y que se corrige con lentes cilíndricas. Se diagnostica con un test similar a la “rueda” para determinar la dirección de asimetría
- Los objetivos fotográficos con el astigmatismo corregido se llaman anastigmáticos



Astigmatismo

- Imágenes en el f. tangencial donde los detalles verticales aparecen desenfocados, en el sagital donde las horizontales están desenfocadas y la mejor imagen para el círc. de mínima confusión



Foco tangencial

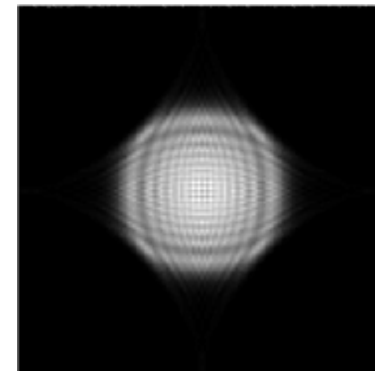
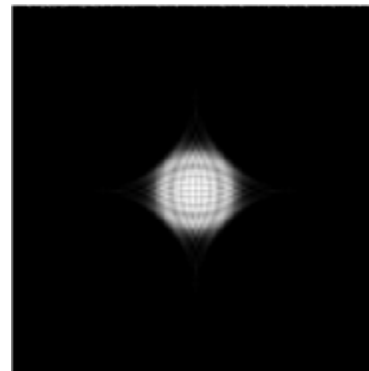


Circ. min. conf.



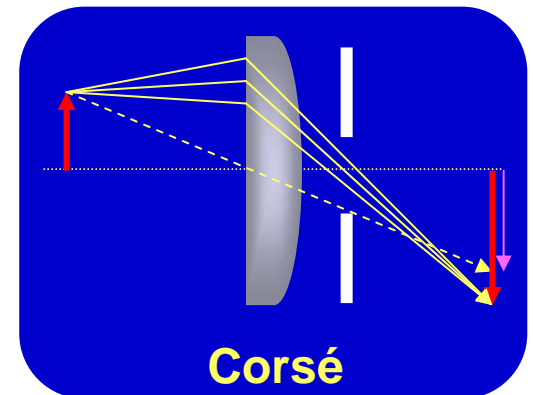
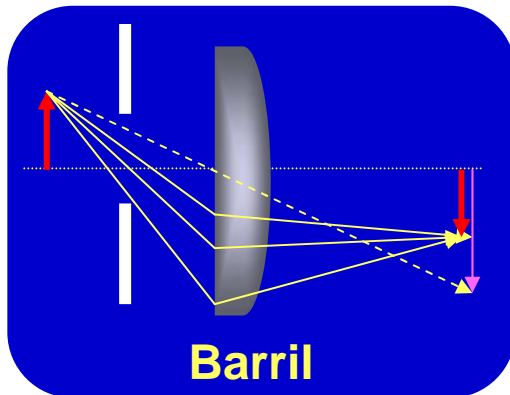
Foco sagital

- Imágenes de un punto en el círculo de mínima confusión para astigmatismo creciente



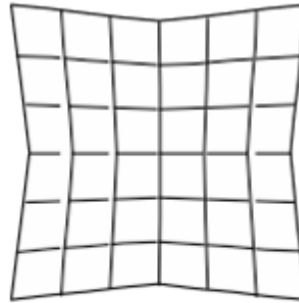
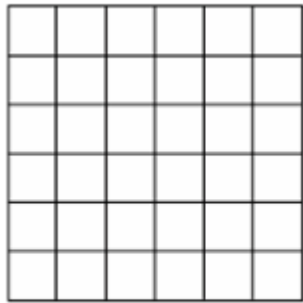
Distorsión

- La distorsión es una aberración de forma. A un punto objeto, le corresponden un punto en la imagen
- Se origina cuando el aumento lateral es función de la altura del objeto
- Puede ser **positiva** (corsé): mayor aumento para puntos más alejados del eje o **negativa** (barril): menor aumento al acercarnos al eje

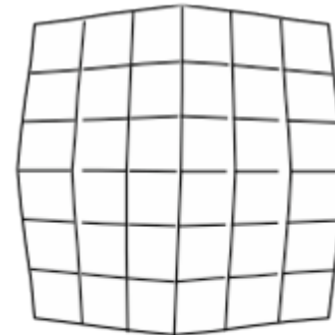


Distorsión

- La distorsión se manifiesta en la forma del objeto, afectando particularmente a los bordes:



distorsión
corsé



distorsión
barril

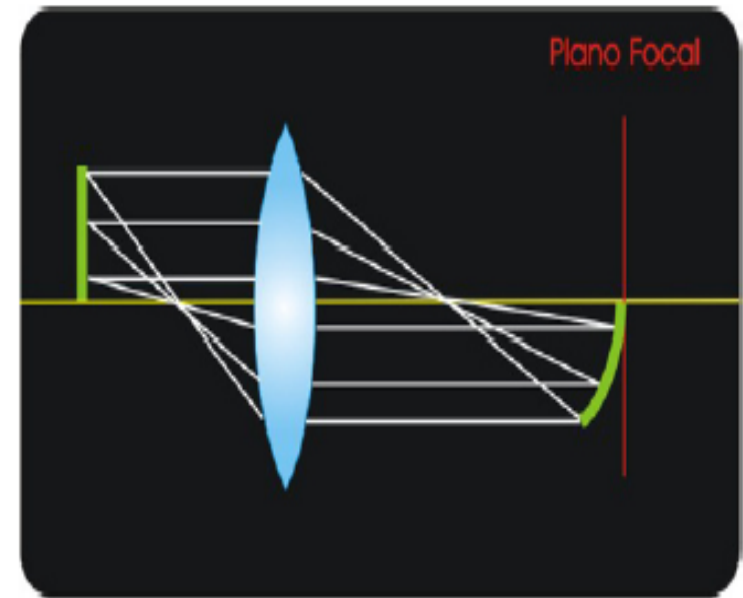
Distorsión

- La distorsión de barril es muy importante en objetivos gran angular y objetivos de ojo de pez que se utilizan en fotografía para fotografiar campos muy amplios (60° - 180°) en espacios reducidos
- Los objetivos corregidos de distorsión se llaman ortóscopicos

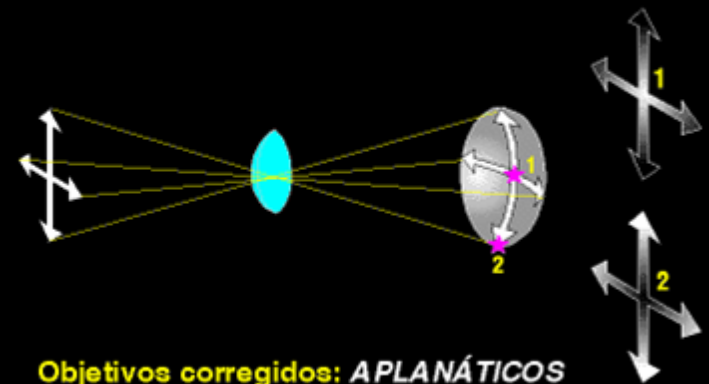


Curvatura de campo

- La imagen de un plano, es realmente una superficie esférica llamada superficie de Petzval
- El sentido de esta curvatura dependerá de si la lente por la que pasa es positiva o negativa
- En fotografía, se soluciona en algunos casos curvando la película en la cámara en el mismo sentido que el plano focal o con objetivos aplanáticos
- Los objetivos macro (para objetos pequeños a corta distancia) son los que mejor corrigen esta aberración

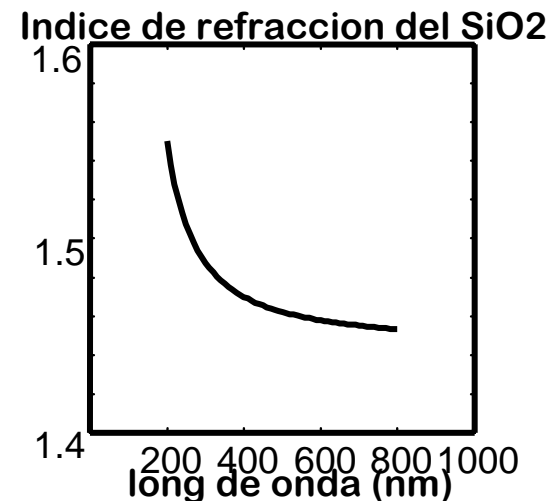
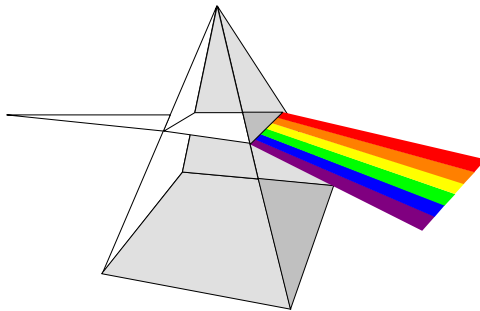


ABERRACIÓN DE CURVATURA



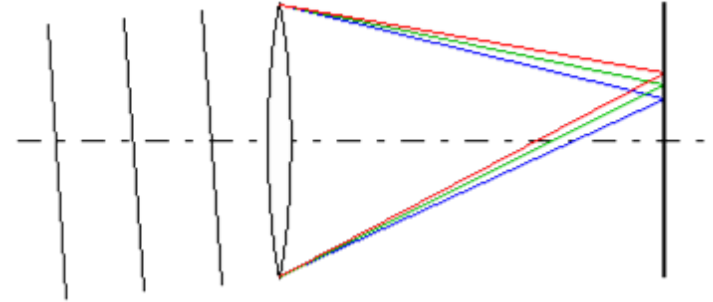
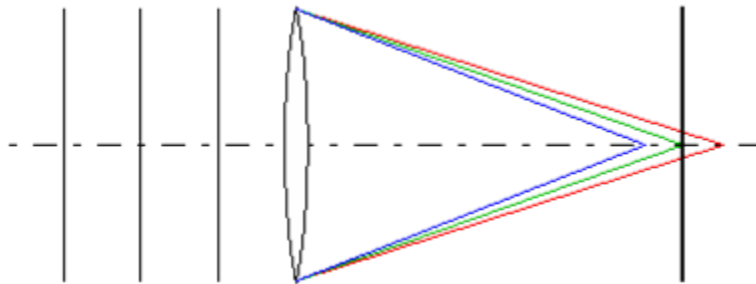
Aberración cromática

- Se debe a la variación del índice de refracción con λ
- Como consecuencia, el foco y los aumentos dependen de λ
- Para el vidrio, $n(\lambda)$ decrece con λ en el visible, así que la focal aumenta con λ
- Su efecto es que cualquier lente simple se comporta como un prisma descomponiendo la luz en sus colores primarios y formando un pequeño espectro alrededor del foco de la lente



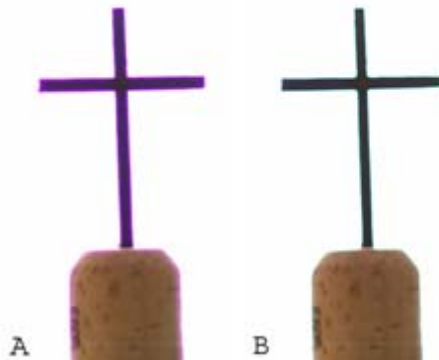
Aberración cromática

- Se distinguen dos tipos de aberración cromática:
 - **Axial:** Diferencia de foco para dos longitudes de onda
 - **Lateral:** Diferentes aumentos para distintas longitudes de onda



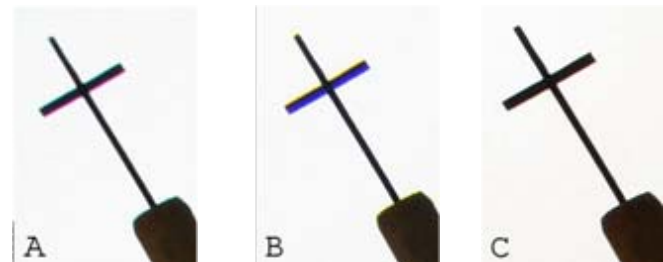
Axial: Halo en toda la imagen

- A) Con autofocus: enfocada al "verde" muestra halo violeta
- B) Ligeramente desenfocada: halo verde



Lateral: No se ve halo en la dirección radial, sólo en la tangencial

- A) Halos verde y violeta (lo más común)
- B) Halo amarillo y azul
- C) Lente bastante corregida



Aberración cromática

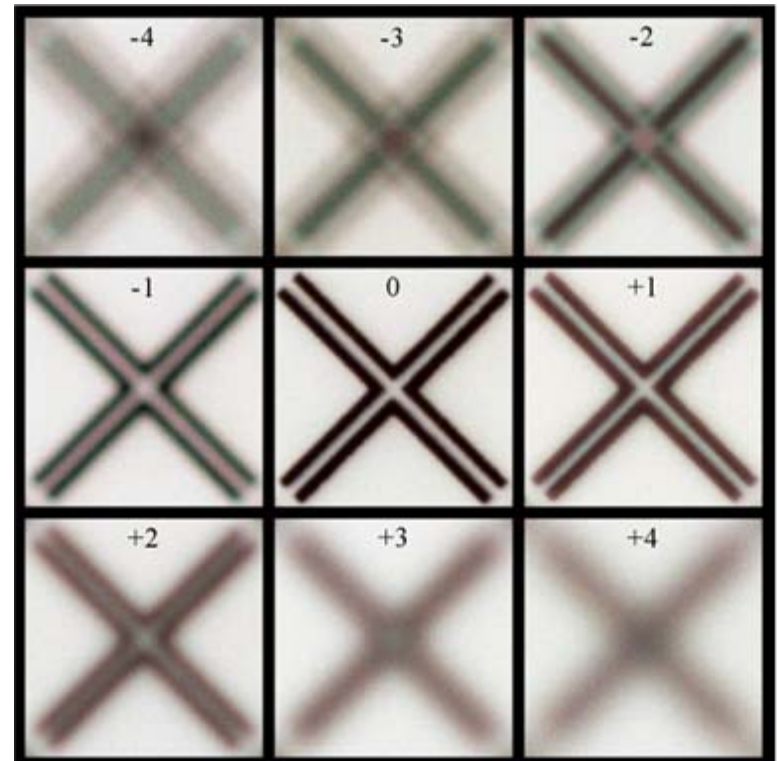
- Los dos tipos de aberración cromática producen “bordes coloreados” pero tienen propiedades diferentes:
 - La axial:
 - Produce halo coloreado alrededor de todo el objeto
 - Ocurre en cualquier posición de la imagen
 - Mejora al disminuir la apertura
 - El halo para un objeto enfocado tiene sólo un color
 - La lateral:
 - Sólo afecta detalles tangenciales
 - No aparece en el centro de la imagen, y aumenta hacia las esquinas
 - No disminuye al reducir la apertura
 - Se manifiesta más en zonas desenfocadas de la imagen

Aberración cromática



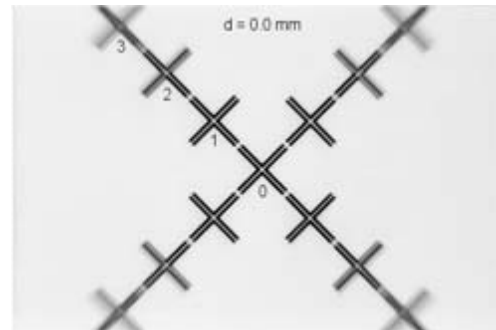
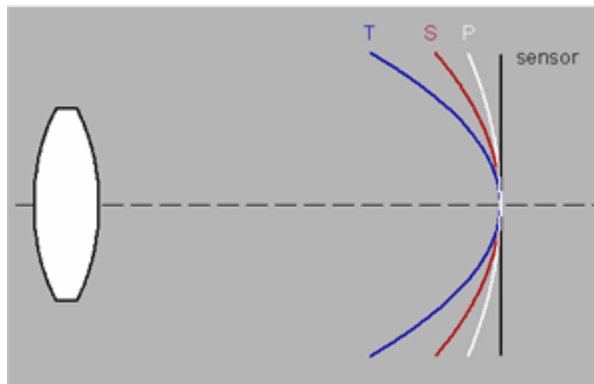
Combinación de aberraciones

- Generalmente, las aberraciones no aparecen de una en una sino varias simultáneamente, particularmente cuando trabajamos fuera del eje con aperturas grandes (ángulos grandes) y con algo de desenfoque, lo que agrava su influencia en la calidad de imagen
- Esferocromatismo: combinación de aberración esférica y cromática lateral:
 - En el centro, la imagen de una cruz en foco
 - Desenfoque secuencial a ambos lados del foco, desplazando la cámara de su posición en-foco en intervalos de 1mm

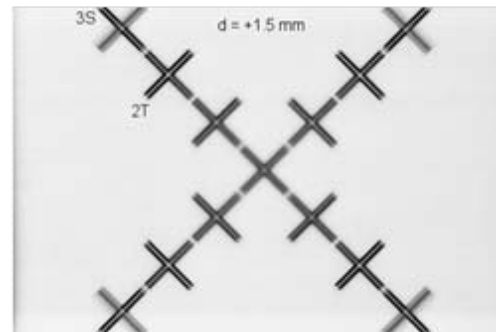


Combinación de aberraciones

- Como combinación de la curvatura de imagen y el astigmatismo, tenemos que en una lente real las superficies focales sagital y tangencial son curvas. Por tanto, no hay astigmatismo en el centro de la imagen y éste aumenta hacia los bordes



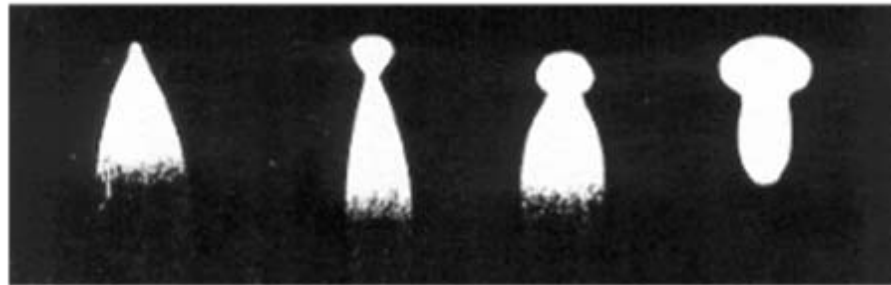
- Con el centro de la imagen enfocado, los bordes están desenfocados (más los detalles tangenciales)



- Al desenfocar, empeora el centro y mejoran los bordes

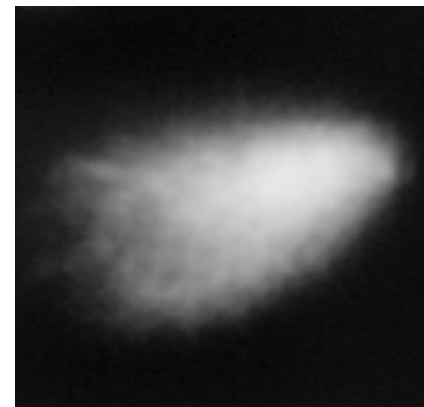
Combinación de aberraciones

- Además de las aberraciones de Seidel (tercer orden) hay:
 - Aberraciones de orden superior: corresponden al 17%. Introdúcen sus propios tipos de defectos, como la aberración esférica oblicua, la coma elíptica, etc
 - Aberraciones irregulares o no geométricas debidas a asimetrías que no se pueden formalizar matemáticamente
- Estas aberraciones son muy variables y difíciles de modelar, medir y corregir



Combinación de aberraciones

- En el ojo humano, aparecen todo tipo de aberraciones (desenfoque, astigmatismo, coma, curvatura de campo, aberraciones irregulares, etc) ya que en muchas ocasiones trabaja con apertura grande (pupila)
 - Algunas se compensan de forma natural (curvatura con la propia de la retina, cromática por la escasez de fotorreceptores S)
 - Otras apenas afectan por el menor muestreo de fotorreceptores fuera de la fovea
 - Las importantes se corrigen (desenfoque y astigmatismo) mediante lentes o cirugía

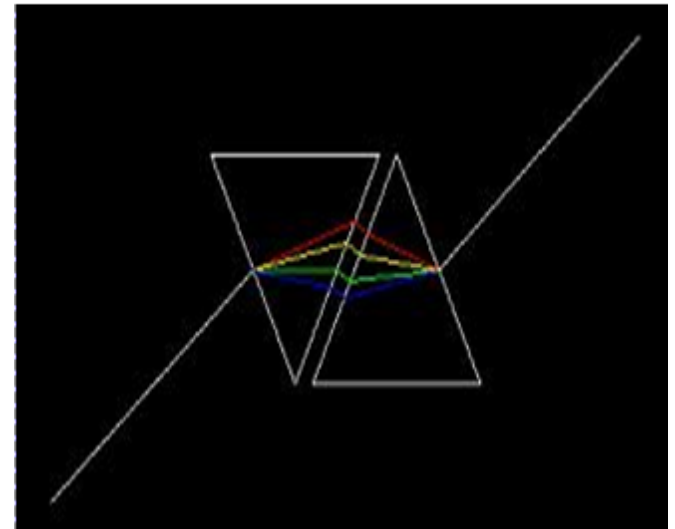


Corrección de aberraciones

- Desde el modelo de la **óptica geométrica** el método más simple para la corrección o compensación de las aberraciones es la reducción de la apertura de forma que se evitan los rayos periféricos (ángulos grandes). Este fue el método que propuso R. Hooke para mejorar el microscopio de Janssen
- Otro método más sofisticado es la combinación de varias lentes que compensen la aberración como en el caso de la aberración cromática. El primero que lo propuso fue Chester More Hall en 1735 aunque fue patentado 20 años después por George Bass y aplicado al telescopio por John Dollan y algo más tarde, en microscopios. El problema de la aberración esférica fue resuelto por Joseph Jackson Lister en 1830
- Para corregir varias aberraciones de forma conjunta es necesario incluir más superficies refractoras. Para diseñar un sistema óptico hay que definir las figuras de mérito y optimizar los parámetros, hoy en día por computación masiva

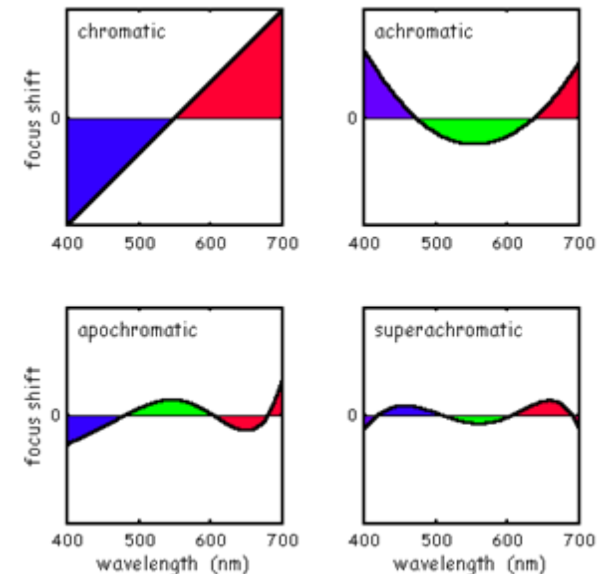
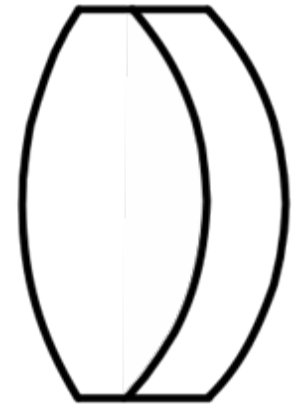
Corrección de aberraciones

- La corrección de la aberración cromática se basa en el método propuesto por Newton: si colocamos dos prismas uno junto a otro, pero invertidos, la descomposición que realiza el primero de ellos es reconstruida por el segundo y volvemos a obtener luz blanca
- Con los vidrios que se encuentran en el mercado, sólo es posible corregir la lente para una zona del espectro visible centrada en el verde, donde el ojo humano presenta el máximo de sensibilidad. Sin embargo, los extremos del espectro visible (azul y rojo) no están completamente corregidos



Corrección de aberraciones

- El **doblete acromático** es el sistema óptico más sencillo capaz de corregir la aberración cromática. Está formado por dos lentes: una lente convergente doble convexa formada con un vidrio de índice bajo (vidrio crown), cementado con una lente cóncava-convexa de un vidrio de índice mayor (vidrio flint). La dispersión cromática de la primera lente es compensada con la segunda, al menos para dos longitudes de onda. Optimizando se puede conseguir que las focales del resto de longitudes de onda se encuentren situadas en un espacio de longitud un 0.01% de la focal nominal
- Los objetivos que corrigen también hasta el rojo, se conocen como apocromáticos. Son necesarios con teleobjetivos y en astro-fotografía



Corrección de aberraciones

- En 1877, E. Abbe vió que incluso si todas las aberraciones se pudieran compensar, hay un límite impuesto por la propia naturaleza de la luz: la difracción, que al contrario que las aberraciones, es más importante para aperturas pequeñas
- De la **teoría ondulatoria** de la luz surge una nueva forma de modelar las aberraciones de forma conjunta con la difracción mediante desviaciones de los frentes de onda (Polinomios de Zernike)
- Desde este punto de vista, la corrección de aberraciones se hace mediante métodos de compensación del frente de ondas que pueden ser incluso adaptativos:
 - Astrofísica: Telescopio Hubbel (es necesario compensar la aberración introducida por la atmósfera mediante un sistema de espejos controlados de forma mecánica)
 - Óptica fisiológica: en este caso las técnicas de óptica adaptativa requieren medir y compensar en tiempo real las aberraciones del ojo humano principalmente con el objetivo de estudiar el fondo de ojo