

## Programa "ASOP" (Análisis de Sistemas Ópticos).

Enrique J. Campitelli.

Mariano G. Berisso. (subrutinas "EligeArchivo" y "Errores").

*La versión compilada de este programa no puede accederse desde un hipervínculo como las otras porque requiere una estructura de datos auxiliar. Es necesario descargarla de la web en una máquina particular, descomprimiendo el archivo "asop.exe", disponible en la página de contenidos <http://www.ecampitelli.com.ar/Castellano/contenido.htm>*

Debe ser creada una nueva carpeta. Llamarla "asop". Al ejecutar "unzipasop.exe", será requerido un lugar donde descomprimirla, mostrando "unzip to folder", y un espacio donde la carpeta puede ser elegida. Elegir la carpeta "asop", digitar "unzip" y el programa "asop.exe" estará listo en dicha carpeta.

Usa lo que fué visto en el capítulo 4 – Óptica Geométrica – para producir un diagrama de puntos policromático en aquellos lugares donde es mínima la dispersión rms de los rayos, en cada uno de tres colores definidos. Se trazan 1300 rayos en cada color sobre un sistema de hasta 50 superficies. Los segmentos en el fondo del diagrama son los diámetros de los discos de Airy.

También se muestran parámetros estadísticos y paraxiales relacionados con la imagen, datos sobre el sistema óptico, sobre los vidrios, y un dibujo del sistema. Sólo trata sistemas coaxiales con asféricos hasta orden 8. El programa requiere dos archivos: Uno de vidrios y otro de sistemas ópticos, y es fácil de operar. Hace uso intensivo del color como parámetro indicador, y se ha puesto énfasis en la simplicidad de las entradas y la claridad de las salidas.

Al comenzar aparecen tres opciones

**S**istema optico

**V**idrio

**A**rchivo

Con **S** se define un nuevo sistema, y *debe ser colocado al principio del nombre un número que indica cuantas superficies tiene. Con **V** se define un nuevo vidrio, y no debe ser colocado ningún número al principio del nombre.*

Con **A** se lee desde el archivo correspondiente un sistema o un vidrio, y el programa entregará uno u otro, dependiendo de como comience su nombre. Para entender su operación es mejor empezar el programa leyendo uno de los archivos incluidos y seguir las opciones, generalmente resaltadas en rojo.

Como las opciones son reemplazables, esto dice cómo introducir elementos nuevos.

Todo está explicado en la pantalla.

En el archivo de vidrios están todos los del catálogo de Schott, mas algunos especiales.

En el archivo de sistemas están todos los ejemplos dados en el texto, mas algunos especiales.

Tipeando varias veces "enter" puede finalizarse desde cualquier punto del programa.

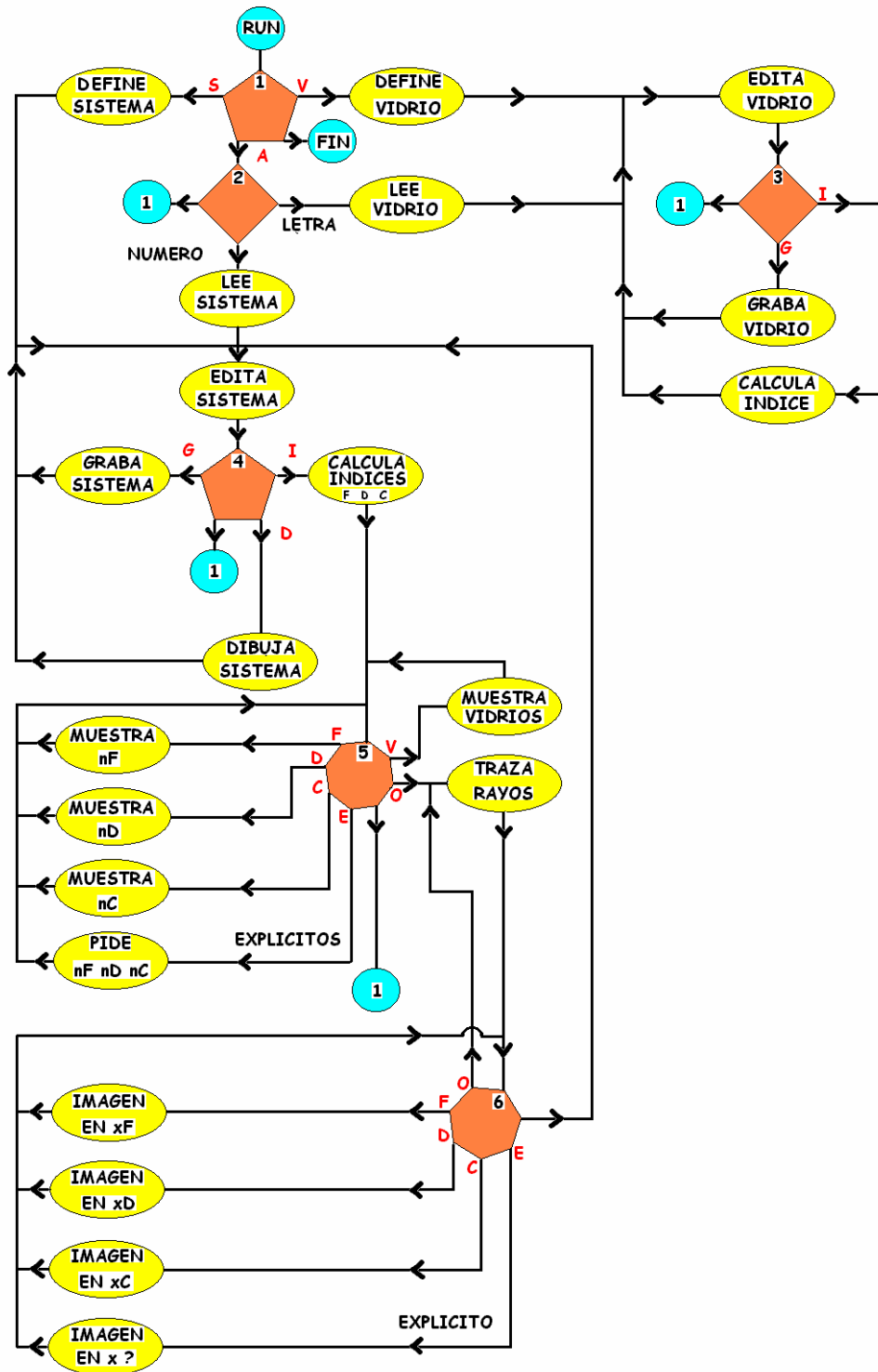
El programa da resultados correctos y está bien documentado y comentado, pero la técnica de programación es aún cruda.

Dado que es algo largo de imprimir el código fuente – y por ahora no es un ejemplo para programadores – se decidió no publicarlo, pero está disponible en [e\\_campitelli@hotmail.com](mailto:e_campitelli@hotmail.com) y [campitelli.enrique@gmail.com](mailto:campitelli.enrique@gmail.com), y está en proceso de mejorar su codificación. En su lugar va un diagrama de flujo. Los puntos de decisión en los polígonos rojos están indicados en la esquina superior derecha de la pantalla.

## Sistemas ópticos incluidos en el archivo

1	1-parabo	Espejo parabólico simple
2	11-ild80	Objetivo fotográfico de tipo Doble Gauss
3	2-burek	Telescopio Cassegrain de Casleo
4	2-lupach	Lupa simple para experimentos
5	2-rcleo	Telescopio Ritchey-Chretien de Casleo
6	3-aplacr	Doblete aplanático acromático
7	3-aplcem	Doblete aplanático cementado
8	3-appcem	Doblete aplanático apocromático cementado
9	3-mersch	Telescopio Mersenne – Schmidt
10	3-schmid	Cámara Schmidt
11	3-stand	Problema standard, simple pasaje
12	4-acro	Doblete acromático (a)
13	4-apoc	Doblete apocromático (b)
14	4-bowers	Cámara Bowers concéntrica
15	4-c14	Telescopio Celestron 14
16	4-maksig	Telescopio Maksutov de alta performance
17	5-bowac	Cámara Bowers concéntrica acromática
18	5-stand	Problema standard, doble pasaje
19	6-aplana	Secuencia de tres lentes aplanáticas
20	7-rowypa	Corrector Ross-Wynne para 2-burek
21	8-argus	Cámara Schmidt para Argus. Informe Casleo del 18/04/02
22	8-copy	Lente para microfilm
23	8-heliar	Objetivo aerofotográfico de alta definición
24	9-relay	Lente relay para Reosc y Casprof

# Diagrama de flujo de ASOP



## Ejercicios con ASOP

El propósito de estos ejercicios es comprender los conceptos ópticos y validar el programa ASOP. Como es un tema de óptica geométrica general, se tratan sistemas ópticos variados, no solo astronómicos.

Para entender mejor las figuras que siguen veremos la primer pantalla de resultados tal como se ve en el monitor.

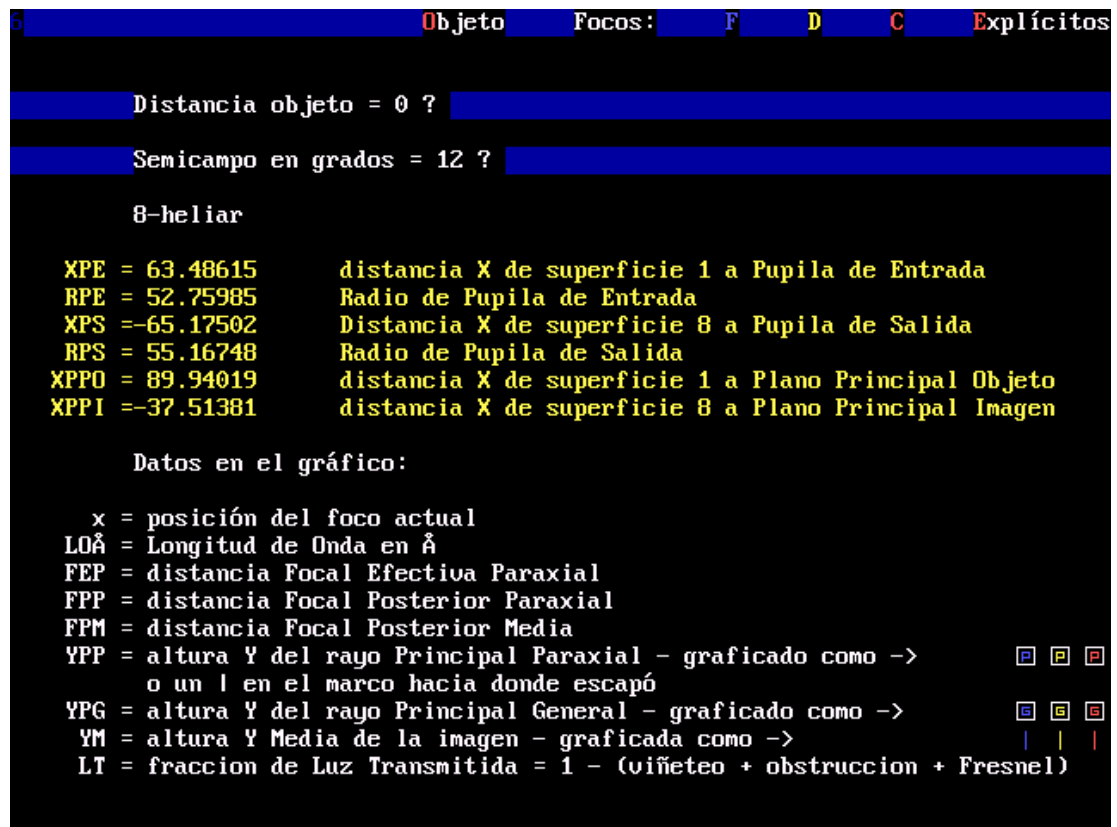


Fig 1. Pantalla previa al gráfico con los datos paraxiales en color medio (D) y explicaciones para el gráfico. El sistema óptico en curso será visto en un ejemplo posterior.

En los casos en que no hay dispersión cromática, sea porque el sistema tiene sólo espejos o porque se examina en un solo color; los diagramas de puntos serán presentados en negro sobre fondo blanco, y cuando hay colores tal como se ven en el monitor.

### Determinación de la luz transmitida.

La cantidad  $LT$  que se imprime en el diagrama de puntos evalúa la fracción de luz transmitida en cada color, que es atenuada por tres causas: reflexiones de Fresnel en las superficies refringentes, obstrucción central y viñeteo. Para las dos últimas se hace un recuento de los rayos perdidos por no intersectar la superficie, y para la primera se usa la fórmula de Fresnel bajo incidencia normal. Como en la mayoría de los sistemas ópticos la luz incide con pequeños ángulos respecto de la normal a las superficies, ésta da resultados suficientemente buenos. La luz reflejada en una superficie no metálica es:

$$(1) \quad R = \left( \frac{n_i - n_r}{n_i + n_r} \right)^2$$

Donde  $i$  se refiere al medio incidente y  $r$  al refractado

Cuando hay varias superficies 1, 2, 3..., es  $LT = (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)...$

Pérdidas por reflexión de Fresnel:

Tomamos por ejemplo el sistema 4-apoc, doblete apocromático.

Usando la opción **Imagen**, aceptando las longitudes de onda pre-establecidas y usando luego las opciones **F, D, C** resultan las secuencias de índices:

Color	Superficie 1	Superficie 2	Superficie 3	Superficie 4
<b>F</b>	1.52499	1	1.66697	1
<b>D</b>	1.51899	1	1.65536	1
<b>C</b>	1.51653	1	1.65062	1

La expresión explícita de  $LT$  es, por ejemplo, para el color D:

$$(2) \quad LT = \left[ 1 - \left( \frac{1 - 1.51899}{1 + 1.51899} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{1.51899 - 1}{1.51899 + 1} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{1 - 1.65536}{1 + 1.65536} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{1.65536 - 1}{1.65536 + 1} \right)^2 \right]$$

$$= 0.8086$$

Las fracciones  $LT$  dadas por ASOP son, en los tres colores:

Color	$LT$
<b>F</b>	0.8045
<b>D</b>	0.8086
<b>C</b>	0.8103

La fracción en  $\lambda$  corta (**F**) es menor porque los índices son mayores.

Estos valores se obtienen si el ángulo de semicampo es cero, porque de otro modo puede haber pérdidas por viñeteo.

Pérdidas por viñeteo y obstrucción central:

Para este caso tomamos el telescopio Sahade del CAsLeo. (Del archivo: 2-rcleo)

La obstrucción está definida en el espejo primario. El radio claro es 1075 mm y el radio oscuro es 430 mm

Entonces la fracción  $LT$  para semicampo cero es:

$$(3) \quad LT = 1 - \left( \frac{430}{1075} \right)^2 = 0.84$$

Depende del cociente de las áreas, y consideramos que los espejos reflejan totalmente.

Aunque esto no es cierto, su reflectividad depende principalmente de factores prácticos no calculables. Con ASOP se obtienen valores que fluctúan aleatoriamente en varias corridas del programa. Esto se debe a que los rayos se trazan partiendo de una definición aleatoria de sus intersecciones sobre la pupila de entrada, y la cantidad de rayos perdidos no es necesariamente la misma siempre. Esto ocurre con todas las cantidades evaluadas estadísticamente sobre el conjunto de rayos, es decir, también la posición  $FPM$  del foco posterior medio y la altura media  $YM$  de la imagen. Para obtener un valor más aproximado hay que trazar más rayos o trazarlos varias veces sin reiniciar el programa y hacer un promedio. Si la matriz de puntos fuera regular, el dato sería numéricamente exacto pero ficticio. Los valores iniciales aleatorios se repiten al reiniciar el programa, de modo que los valores obtenidos también se repiten.

Si se elige altura del objeto (semicampo en grados) = 0, los valores de  $LT$  son: 0.8313, 0.8640, 0.8353, 0.8420, 0.8380, 0.8327, 0.8477. Promedio: 0.839

Para apreciar el aspecto de la obstrucción central es adecuado poner como foco Explícito  $x = 0$ ; esto grafica la distribución de rayos a distancia cero de la última superficie, es decir, sobre el espejo secundario.

Como está suficientemente lejos de la imagen, el haz es un cono truncado sin deformación y sólo se ve la parte no oscurecida. (Fig. 2). La extensión de esta "imagen" está indicada en el ángulo inferior izquierdo y es de 592 mm. Como el espejo secundario tiene un radio claro de 316 mm (diámetro 632 mm), el haz tiene todavía un margen y no se pierde luz.

Al tomar el ángulo de semicampo permitido de 0.25 grados la situación no cambia, pero si se toma un ángulo de 1 grado (mucho mayor del permitido), la pupila presenta una asimetría. La figura simétrica inicial se desplaza y desaparece sobre un contorno circular mayor. La interpretación de esto es que el haz cae parcialmente fuera del borde del secundario, o sea, hay viñeteo.(Fig. 3).

Esto se ve mas pronunciado con un ángulo de 2 grados (Fig. 4), y para 8 grados no pasa luz, o sea, el haz cae fuera del secundario. Los valores de  $LT$  van reflejando esta situación.

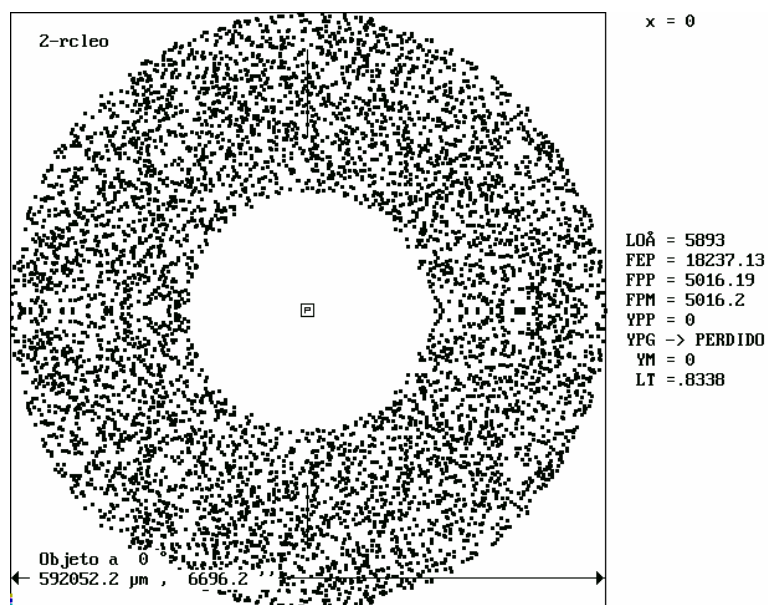
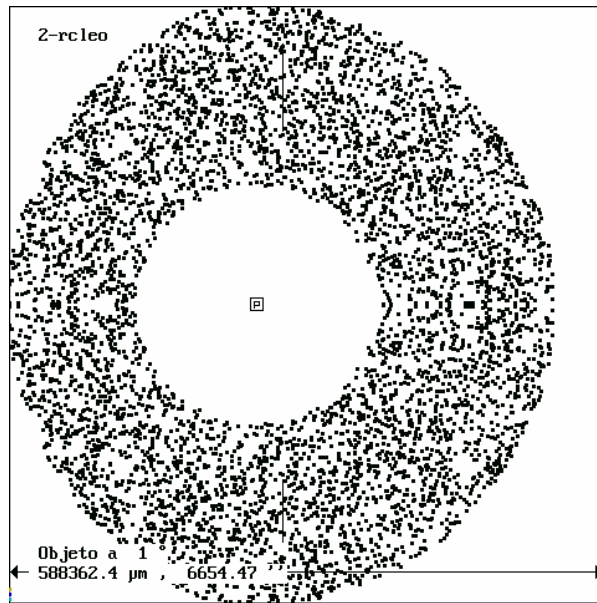


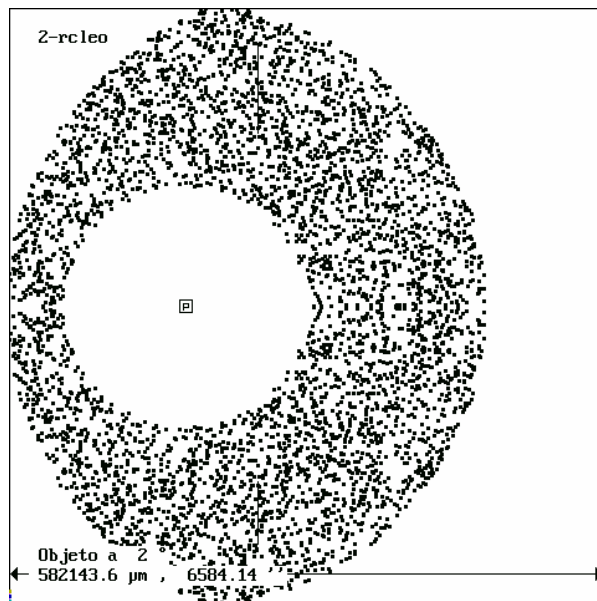
Fig. 2



x = 0

LOA = 5893  
 FEP = 18237.13  
 FPP = 5016.19  
 FPM = 4985.708  
 YPP = -70.71047  
 YPG -> PERDIDO  
 YM = -44.12387  
 LT = .7285

Fig. 3



x = 0

LOA = 5893  
 FEP = 18237.13  
 FPP = 5016.19  
 FPM = 4899.546  
 YPP = -141.464  
 YPG -> PERDIDO  
 YM = -71.20628  
 LT = .5838

Fig. 4

### Curvatura de campo

En el apunte se vió que estas dos aberraciones no afectan la nitidez de la imagen, sino el lugar donde se forma, de modo que no pueden apreciarse en el diagrama de puntos. Para evaluarlas hay que usar las cantidades que figuran a la derecha del diagrama.

Nuevamente usamos el telescopio del CAsLeo, donde se ven claramente. Al variar el ángulo de semicampo desde 0 a 0.25 grados, la distancia del foco posterior medio  $FPM$  varía desde 5016.195 mm a 5014.219 mm, y la altura media  $YM$  de la imagen va desde 0 a -79.557 mm (promediando 7 valores).

La imagen entonces se forma sobre una superficie curva, que será una esfera aproximada por un paraboloides si la aberración es de tercer orden, como es este caso por ser pequeños el campo y la apertura.

La diferencia de distancias focales es  $\delta FPM = -1.975$  mm y la ecuación de la curva es  $\delta FPM = YM^2 / 2 R$ , donde  $R$  es el radio de curvatura de la superficie focal.

Luego,  $R = -1602.358$  mm. El signo negativo indica que la concavidad da hacia donde viene la luz.

### Límite de difracción

Siguiendo con el mismo telescopio, vemos que en el ángulo inferior izquierdo del gráfico hay tres segmentos de color azul, amarillo y rojo. Estos son los diámetros de los discos de difracción de Airy, que son el aspecto que presenta la imagen si las aberraciones se anulan.

La expresión para el diámetro lineal del disco de Airy es:

$$d = 2.44 \lambda FEP / D$$

Donde  $D$  es el diámetro del diafragma de apertura, en este caso el del espejo primario. Tomamos un valor de  $\lambda$  medio, 5893 Å, (línea D).

Resulta  $d = 12 \mu\text{m}$ , que coincide dentro de las aproximaciones del caso, con la longitud del segmento en la escala del gráfico.

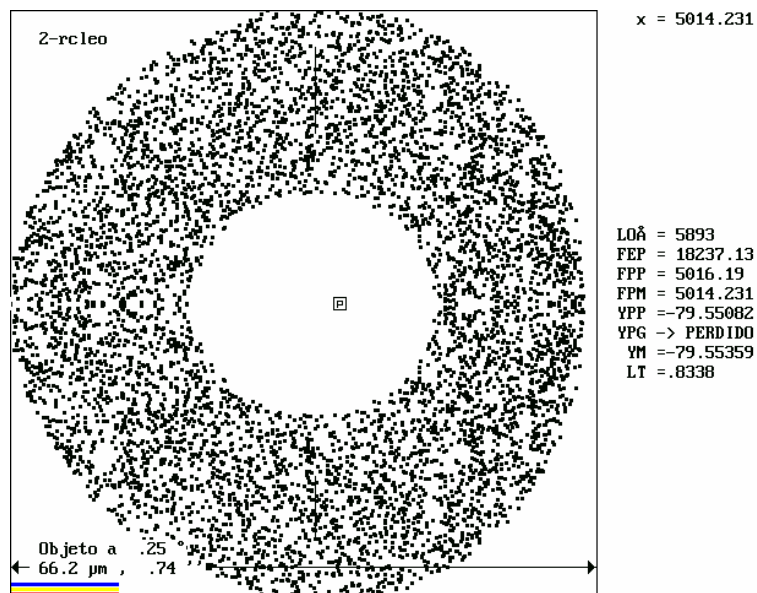


Fig. 5. Imagen en el borde del campo. Es la intermedia entre dos astigmáticas elongadas.



Cerrando el diafragma de un objetivo fotográfico.

El efecto de cerrar el diafragma es bien conocido: se disminuye la iluminación en la imagen, se aumenta la profundidad de campo y se mejora algo la definición. Veamos el último efecto.

El objetivo estudiado es el Heliar (Ref. 1, del archivo 8-heliar). El diafragma es la superficie 4. Inicialmente el radio claro del diafragma es 44.3 mm, y alcanza el borde de la lente. La Fig. 6 es la imagen con el diafragma abierto y en la Fig. 7 fué cerrado a 38 mm.

El efecto de esta ligera reducción es la eliminación del halo azul, pero el núcleo permanece igual. La cantidad de luz se reduce por un factor 0.73, que es la relación de las áreas, y las diferencias en  $LT$  son efectos de viñeteo.

La pérdida de luz al diafragmar es proporcional a la relación de las áreas. Esta no se muestra en  $LT$  porque el diafragma se define como el lugar por donde pasan todos los rayos.

No hay rayos perdidos en el diafragma.

Esta lente tiene muy buena definición y fué llevada hasta el límite, tanto en apertura como en campo. La degradación de la imagen con el campo es dejada como otro ejercicio.

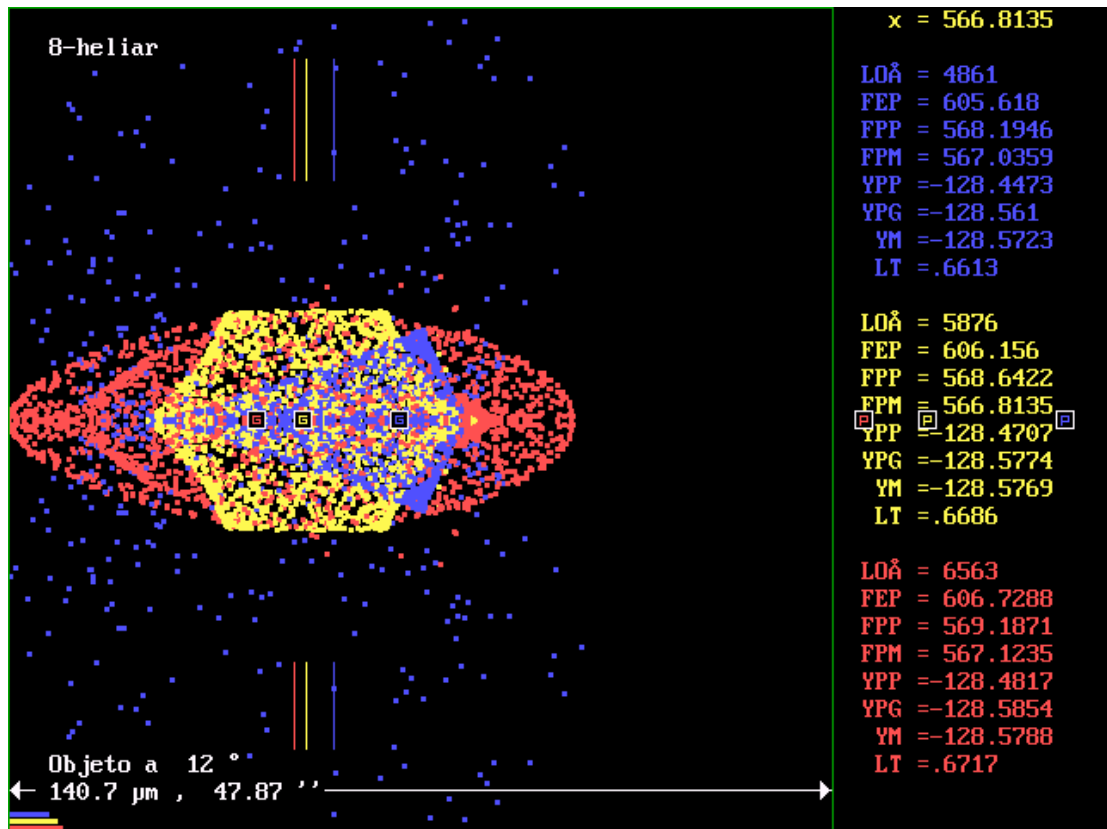


Fig. 6. 8-heliar con diafragma 44.3 mm

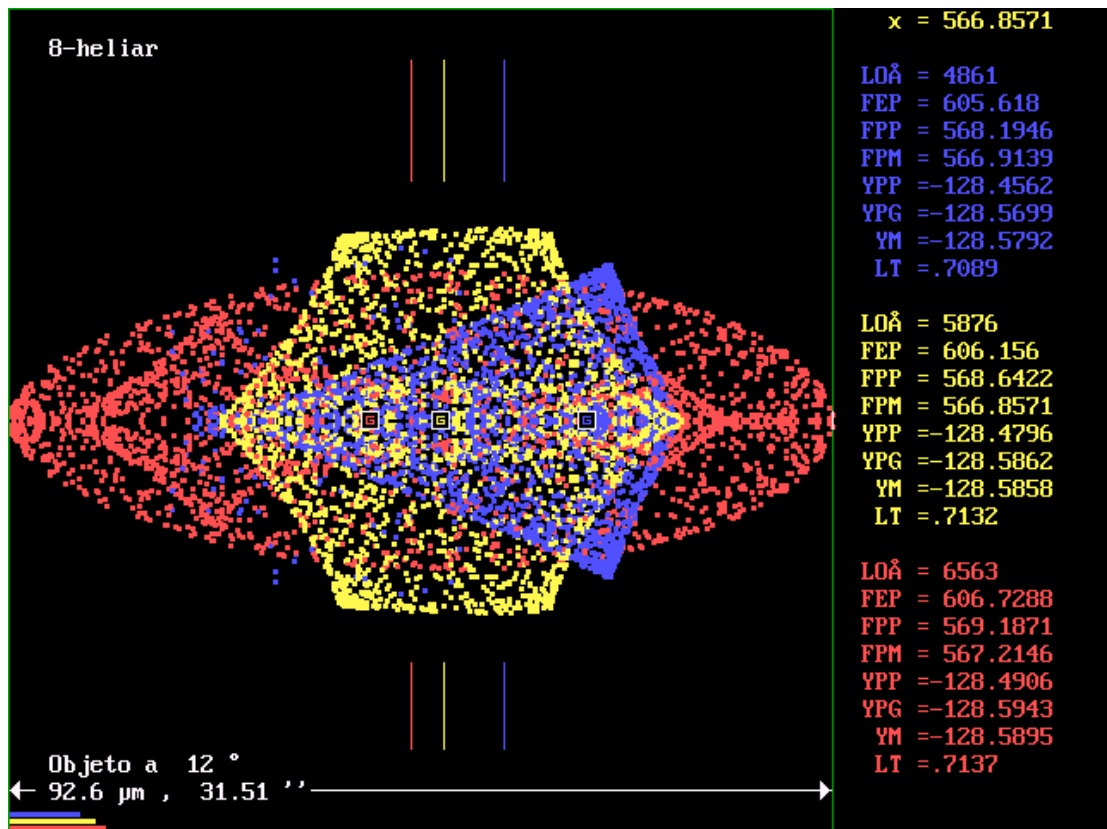


Fig.7. 8-helium con diafragma 38 mm

### Planos Principales

Con el mismo sistema óptico puede verse que es equivalente a una lente delgada en lo que respecta a posición de la imagen paraxial. Las distancias objeto e imagen son medidas desde los planos principales. Ellos son definidos por las cantidades (ver Fig. 1).

$XPPO$  = distancia desde superficie 1 al Plano Principal Objeto

$XPPI$  = distancia desde la última superficie al Plano Principal Imagen

La fórmula a aplicar en una lente delgada es

$$(4) \quad \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

Donde  $s'$  y  $s$  son las distancias imagen y objeto, respectivamente, al plano de la lente delgada. En un sistema complejo es

$$s' = X_{imagen} - XPPI$$

$$s = X_{objeto} - XPPO$$

Consideremos un objeto a distancia finita  $X_{objeto} = -1500$  y altura cero.

La distancia  $X_{imagen} = 942.1238$ , que es  $FPP$  para el color central.

De los datos previos en Fig. 1 se toma

$$XPPI = -37.51381$$

$$XPPO = 89.94019$$

Entonces

$$s = -1500 - 89.94019 = -1589.94019$$

$$s' = 942.1238 + 37.51381 = 979.63761$$

La distancia focal efectiva  $f$  es  $FEP = 606.1560$  para el color central y objeto en infinito. Esos valores cumplen exactamente con la ecuación (4), y también para cualquier otro par de conjugados.

Los planos principales y las pupilas están ilustrados en la Fig. 8.

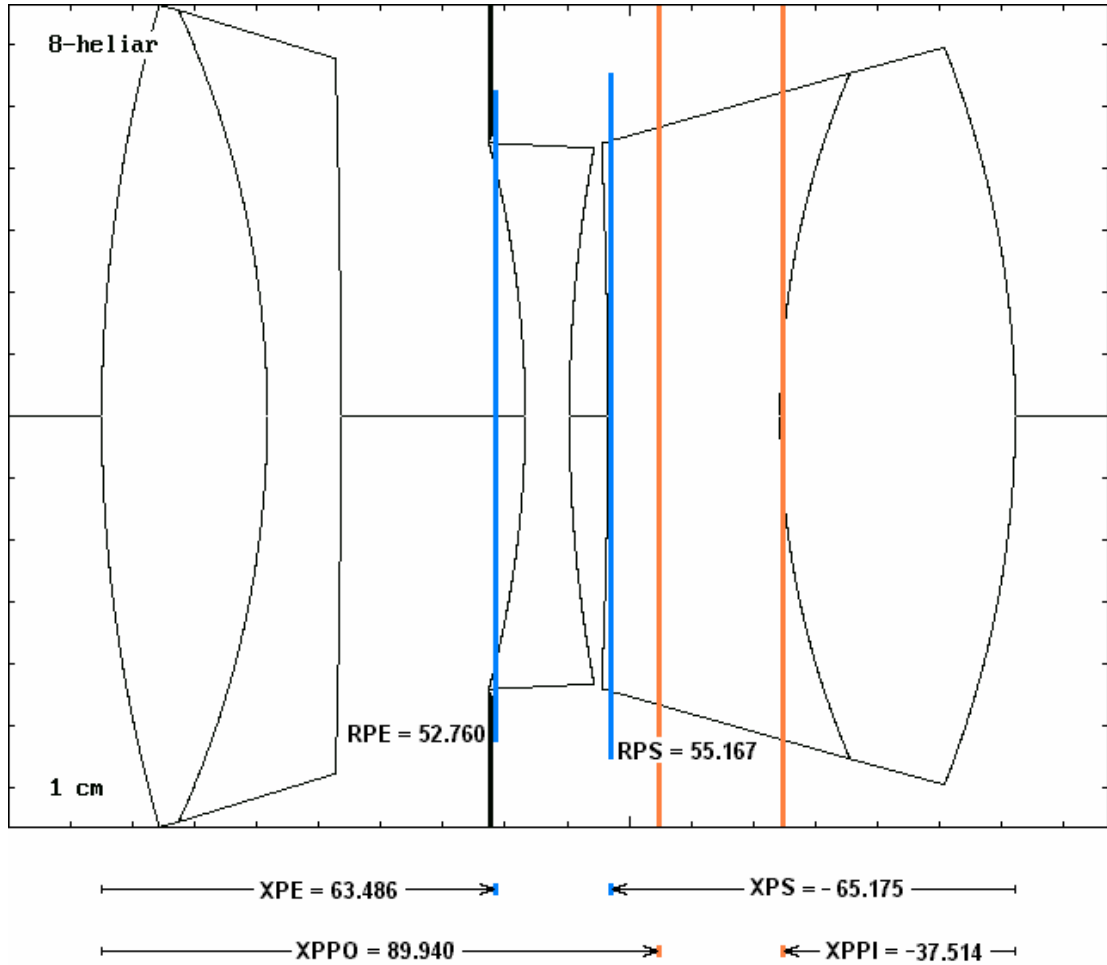


Fig. 8 Planos principales y pupilas de 8-helias

#### Espectro primario y secundario

Tomamos como ejemplo la lente acromática 4-acro.

Primero evaluamos el espectro primario de la primera componente. Para aislarla, podemos definirla con la opción **S**istema óptico, o partiendo de 4-acro, redefiniéndola como 2-lente. Al comenzar el nombre con 2, se eliminan las superficies 3 y 4. La lente resultante tiene una distancia  $FPM$  de 526 mm en color F, de 532 mm en color D, y de 534.5 mm en color C.

La diferencia de distancias en los colores extremos es el espectro primario, y es de 8.5 mm. La expresión  $\delta f / f = 1 / v$  (ver texto), da 8.3 mm. Los valores de  $v$  y  $P$  están en la opción **V**idrios.

La lente no está acromatizada haciendo iguales sus *FPM* azul y rojo, sino haciendo iguales los halos (Fig. 9), que parece más conveniente.

El espectro secundario de la lente completa es, tomando el promedio de los dos *FPM*,  $\delta f_{sec} = 0.58$  mm, y con la expresión  $\delta f_{sec} / f = (P2 - P1) / (v_2 - v_1)$  da 0.6 mm.

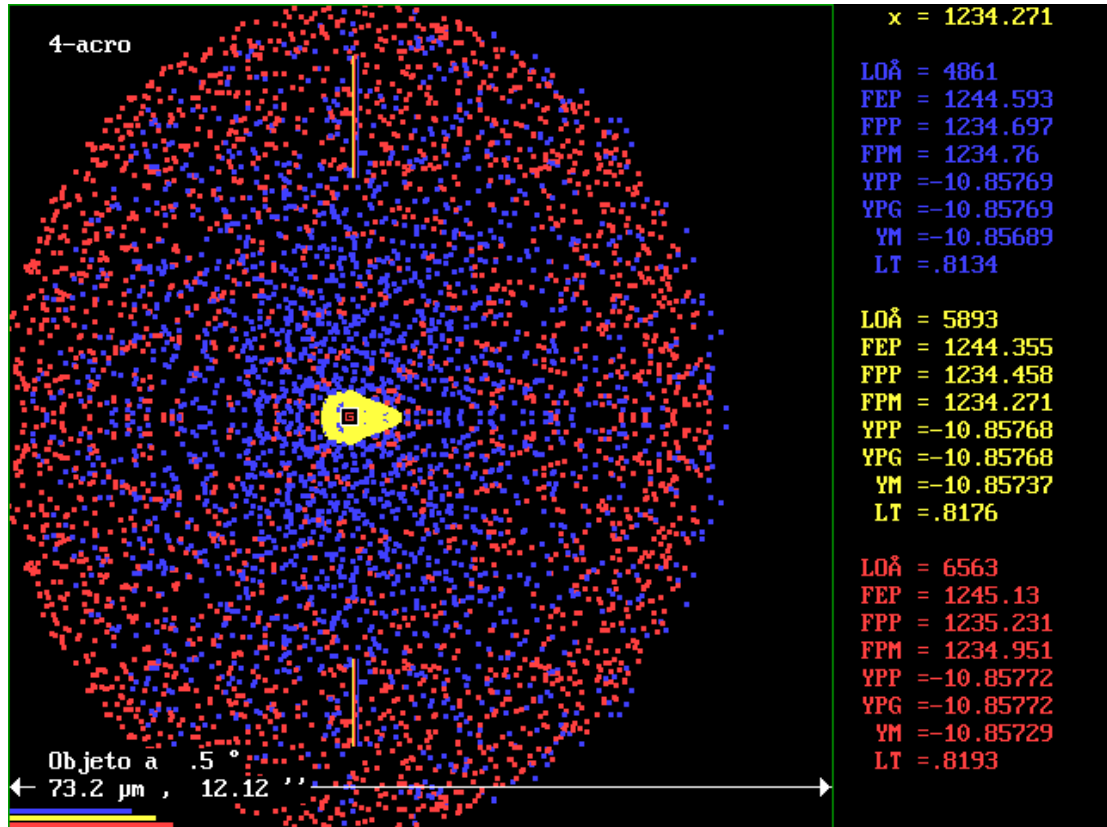


Fig. 9. Halos por espectro secundario en 4-acro. En el centro el foco D. Imagen extra-axial

Si alteramos la lente variando el último radio de curvatura hasta que coincidan los *FPM* azul y rojo, el radio resultante es  $R_4 = -1891$  mm. En este caso también es  $\delta f_{sec} = 0.6$

#### Doblete telescópico aplanático cementado.

Una lente acromática sólo requiere relaciones entre las diferencias de curvaturas de cada componente. Entonces quedarían libres dos curvaturas que permitirían cementar los dos vidrios y hacer plana la última cara.

El sistema 4-acro además de ser acromático es aplanático, esto significa que no tiene ni aberración esférica ni coma. Para lograr eso hay que dar valores a los cuatro radios de curvatura separadamente. La lente resultante se llama "lente de Fraunhofer", y se diseña con el programa G-SUM.

La posibilidad de cementarlo es de gran valor práctico, pues es más simple de fabricar, más robusto e insensible a desajustes por ser de una sola pieza, y no requiere tratamientos antirreflectantes en la cara interior.

Es posible llegar a un diseño aplanático cementado con el mismo par de vidrios comunes, pagando el precio de asferizar la última cara. Pero como la profundidad de asferización es pequeña, el sistema conserva el valor práctico.

Como la aberración cromática es la dominante, es ilustrativo ver la imagen en luz central monocromática para apreciar la aberración geométrica en ambos sistemas. También parece haberse mejorado la corrección cromática.

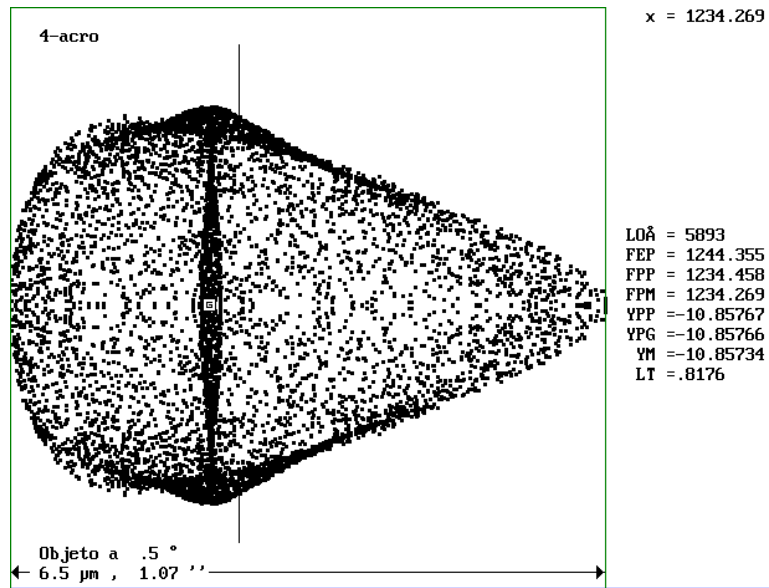


Fig 10. Imagen extra-axial monocromática de 4-acro

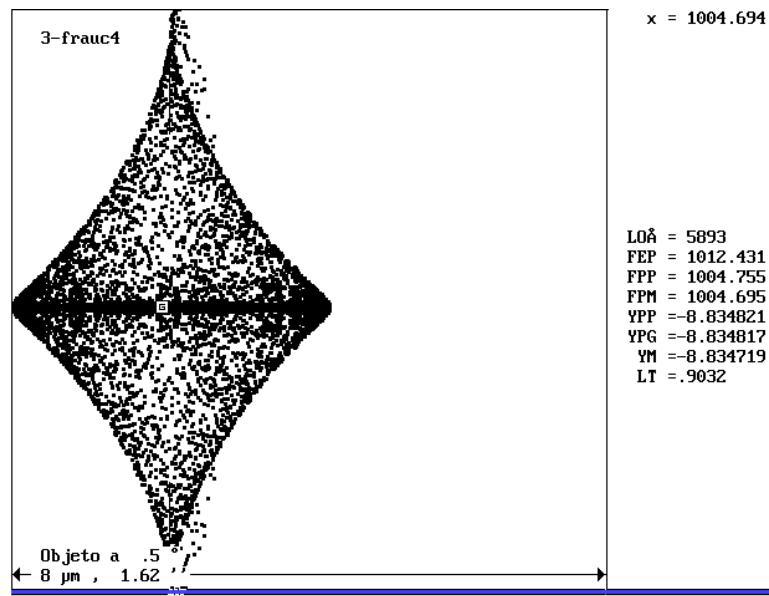


Fig 11. Imagen extra-axial monocromática de 3-aplcm

S	Radio Curv.	Radio Clr.	Osc.	Distancia	Vidrio	a,d
1	628.047	50.000	0.00	10.000	1 BK7	d
2	-359.725	50.000	0.00	6.500	F2	
3	-1366.530	50.000	0.00	0.000	1	a

Asféricos

S	Const. Cítrica	Asférico (4)	Asférico (6)	Asférico (8)
3	0.000	-1.31999E-10	0.00000E+00	0.00000E+00

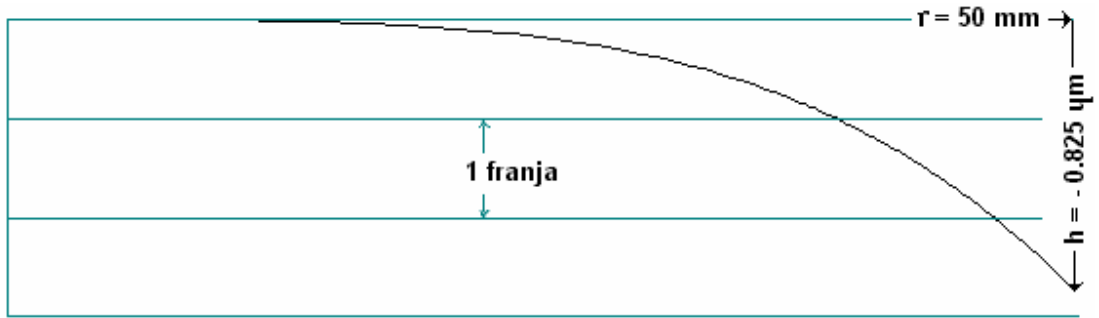


Fig 12 Asferización en la cara 3

La asferización es un borde rebajado que alcanza una profundidad menor que 1 micrón. Contrastado sobre una placa de prueba de esa curvatura son 2.8 franjas de luz de sodio, lo que es fácil de lograr.

Punto aplanático de una esfera.

En una esfera de índice  $n$  y radio  $R$  existe un punto interior cuya imagen es virtual y libre de aberración esférica y coma. La imagen axial es puntual, y hasta un rayo extremo normal al eje pasa por ese punto.

Tomando un diámetro de la esfera como eje, si el objeto se coloca a una distancia

(5)  $\frac{R}{n}$  del centro

La imagen virtual se forma a una distancia

(6)  $nR$  del centro

Esta es la definición de puntos conjugados aplanáticos.

Las consecuencias salen de la Fig. 13

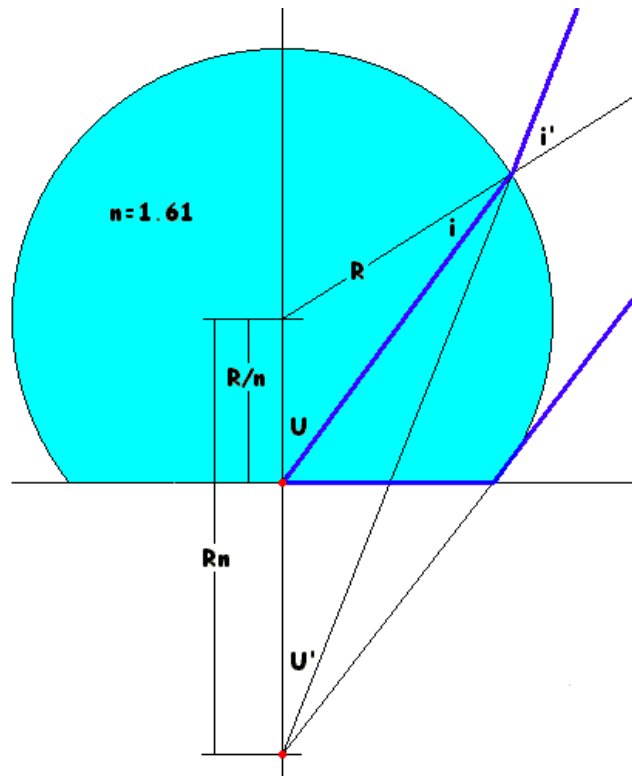


Fig. 13. Conjugados aplanáticos en una esfera

$$\frac{R}{n \operatorname{sen} i} = \frac{R}{\operatorname{sen} U}$$

$$\frac{R n}{\operatorname{sen} i'} = \frac{R}{\operatorname{sen} U'}$$

$$n \operatorname{sen} i = \operatorname{sen} i'$$

De esto resulta

$$i' = U$$

$$i = U'$$

También

$$n \operatorname{sen} U' = \operatorname{sen} U$$

Caso límite

$$U = 90^\circ \quad (\text{Normal al eje})$$

$$i' = 90^\circ \quad (\text{Tangente a la esfera})$$

Para poder colocar un objeto, la esfera está limitada por un plano, que es la primera superficie de una lente, y en el caso límite el rayo emerge del objeto en ese plano. Esta lente es hiper-hemisférica. Su espesor  $d_1$  es la distancia entre el objeto y la segunda superficie, de radio ahora llamado  $R_2$ , y es

$$d_1 = \left(1 + \frac{1}{n}\right) R_2$$

Sistema de lentes aplanáticas consecutivas.

Considerando la imagen virtual como objeto se puede volver a producir una refracción aplanática con una segunda lente. La primera superficie de esta lente es concéntrica con la imagen virtual de la anterior, de modo que no hay refracción en ella.

Como su radio de curvatura será mayor que  $R_2$ , se puede ponerla en contacto.

Luego es

$$(7) \quad R_3 = R_2 (1 + n)$$

La segunda superficie se determina como en el caso anterior,

$$(8) \quad R_4 = \frac{R_3 + D}{1 + \frac{1}{n}}$$

$R_4$  es el radio de una esfera maciza que tuviera como objeto a la imagen virtual cumpliendo las condiciones (5) y (6)

Las (7) y (8) son recursivas y se puede poner una serie de lentes que disminuirán la divergencia inicial del haz pero sin llegar nunca a volverlo paralelo.

Esta configuración es usada principalmente en los objetivos de microscopio de alta potencia. El poder resolvente de un microscopio depende del ángulo que acepta la primera lente del objetivo porque el objeto se asimila a una red de difracción donde los detalles finos difractan en ángulos grandes. En esta consideración está basada la teoría del microscopio de Abbe. Con varias lentes aplanáticas se logra llevar el haz inicial hasta una divergencia manejable por el resto del sistema, que se encargará de formar una imagen real y corregida.

Ejemplo: 6-aplana

Este sistema tiene 3 lentes aplanáticas consecutivas. El orden de dimensiones es el correspondiente a un objetivo de microscopio de gran potencia. Por aplicación de las Ecs. (3), (4) resultan los radios

$$R_3 = -2.035917, \quad R_4 = -1.595201, \quad R_5 = -4.163714, \quad R_6 = -2.907797$$

Para que en el cálculo no aparezca aberración además de los errores numéricos, los radios deben darse con esta precisión, por demás ficticia en la práctica.

Del mismo modo los demás parámetros (*dio* = distancia objeto)

$$n = 1.61015, \quad D = 0.55 \quad dio = -0.484427$$

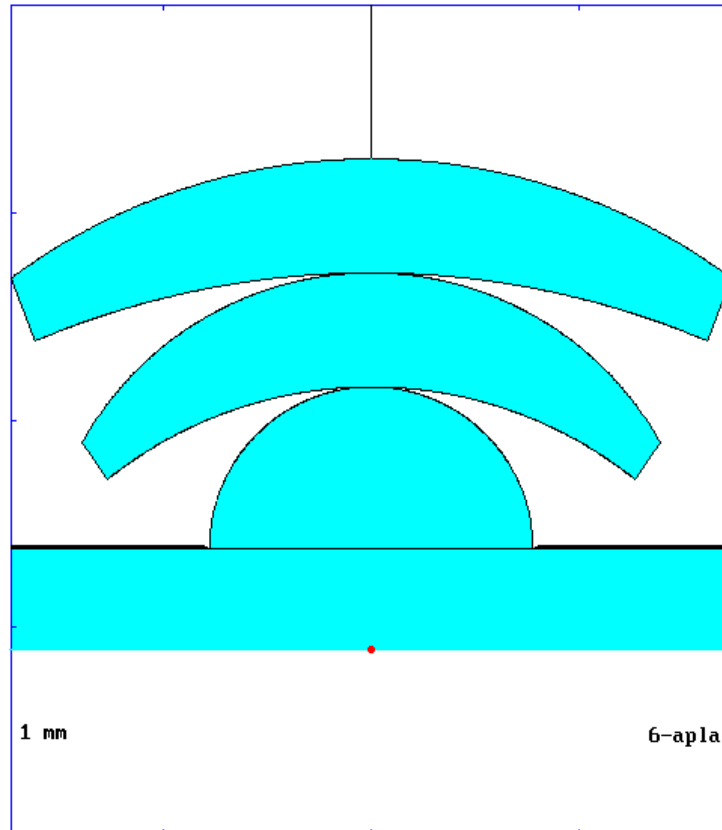


Fig 14. 6-aplana. Dibujo exacto.

En el programa no se puede representar una superficie hiper-hemisférica, y se tomó el objeto en inmersión en un medio de índice igual al de la lente.

El diafragma de apertura se tomó como la superficie plana frontal de la lente hemisférica, y los rayos que vendrían de la parte hiper-hemisférica no entran al sistema.

La prescripción completa mostrando sólo tres decimales es

S	Radio Curv.	Radio Clr.	Osc.	Distancia	Vidrio	a,d
					SK1	
1	0.000	0.780	0.00	0.780	SK1	d
2	-0.780	0.780	0.00	0.000	1	
3	-2.036	1.273	0.00	0.550	SK1	
4	-1.595	1.396	0.00	0.000	1	
5	-4.164	1.622	0.00	0.550	SK1	
6	-2.908	1.736	0.00	0.000	1	



En la Fig. 15 la imagen sólo se examina en 5893 Å que corresponde al índice usado. La aberración cromática es mucho mayor que la geométrica para pequeños apartamientos del eje.

La imagen axial muestra sólo las imprecisiones del cálculo y no es de interés.

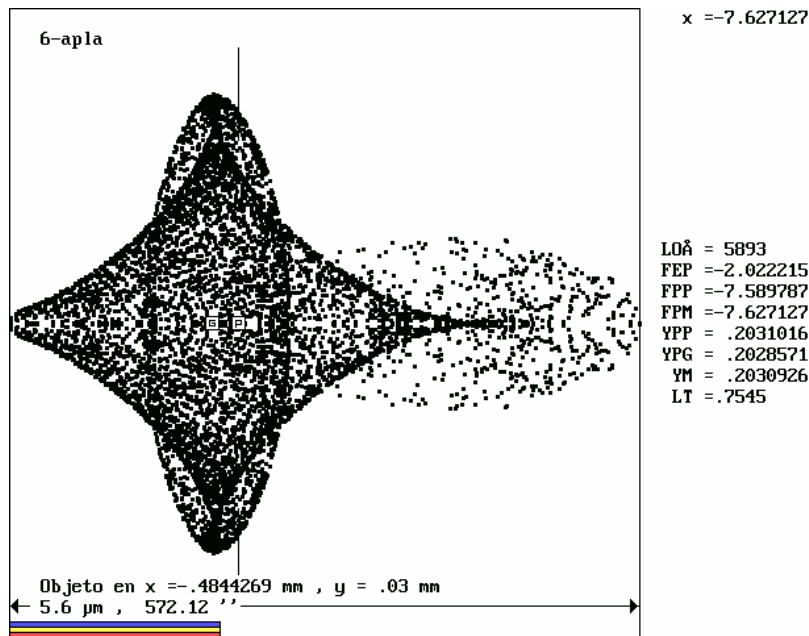


Fig.15 Imagen extra axial a 0.03 mm del eje.

#### Acromatización por superficie fantasma

Si un par de vidrios adecuados para producir acromatización tiene una longitud de onda para la que los índices son iguales, es decir, sus curvas de dispersión se cruzan, en esa longitud de onda hay solo un vidrio y la superficie aparecerá sutilmente a medida que el color cambie. Se puede tomar el color de coincidencia como el de diseño para la corrección de aberraciones geométricas y la corrección cromática dejarla a la superficie fantasma. Esta puede tener cualquier curvatura y no afecta la corrección geométrica, pero sí la cromática.

No son comunes los pares de vidrios que crucen sus curvas de dispersión. Para buscarlos en los catálogos se hizo el programa BUPAR. (Búsqueda de Pares) Un ejemplo de salida de este programa es la Fig. 16. Se detecta el cruce de las curvas, que pueden desplegarse en un gráfico para ver más detalles. Las partes de las curvas en rojo son valores extrapolados fuera de los límites que recomienda el catálogo Schott para su fórmula de interpolación, y es posible que los valores no correspondan a la realidad.

Cuanto más difieran los números de Abbe, mejor cumple su cometido el par.

Algunos ejemplos de pares son

SK14 - F5, SK16 - F9, SSK2 - F13, SK7 - BAF5, SK5 - LF2

Los puntos de cruce están todos muy cerca de la línea D, lo que es una ventaja para los sistemas de uso visual.

El par mejor de éstos es el SK16 - F9 con una diferencia de  $v$  de 22.2

Este método parece ideal para ser aplicado en la corrección de meniscos aplanáticos.

La corrección geométrica es muy buena en ellos pero el cromatismo es enorme si se hacen de un solo vidrio. Cualquier otra superficie perturba la aplanaticidad en el color de diseño. Entonces la superficie fantasma se encarga de arrear con los colores.

El programa BUPAR debe estar junto a ASOP para usar el mismo archivo de vidrios

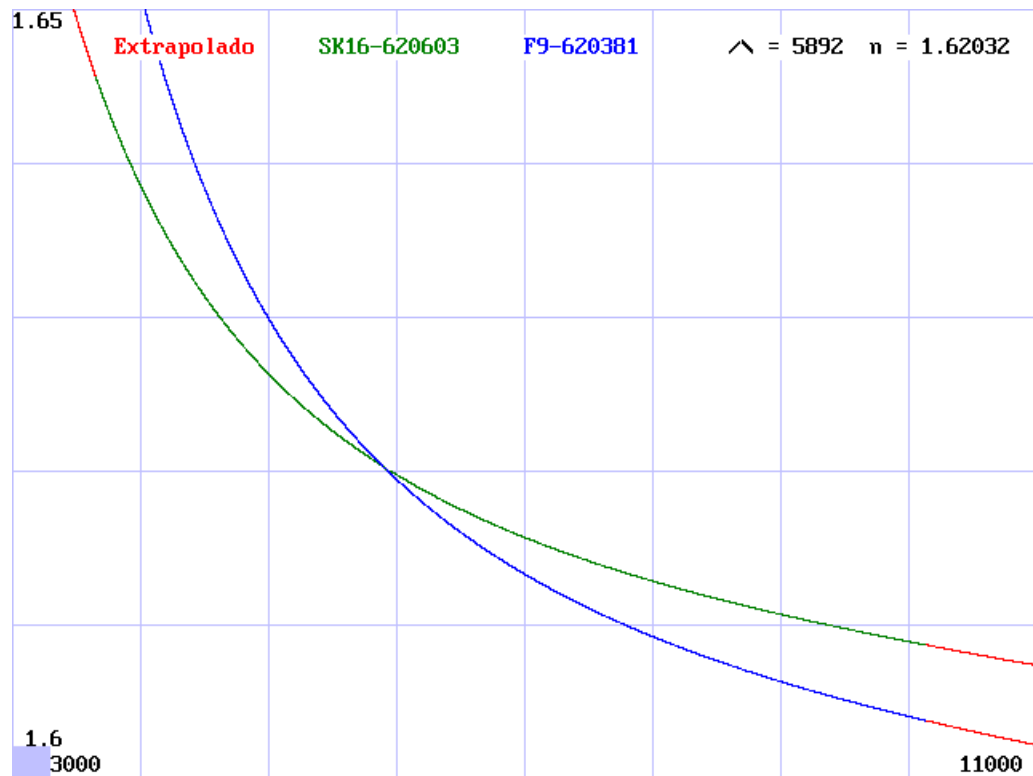


Fig 16. Búsqueda de coincidencias

Usando el par mencionado se diseñó un menisco aplanático y se trató de acromatizarlo. La  $\lambda$  de coincidencia es 5892 Å.

Cumpliendo con las condiciones de aplanaticidad vistas antes, se optimizó a mano respecto de curvatura de la superficie, espesores y orden de los vidrios. (Sistema 3-aplacr).

El resultado es afortunado porque la superficie fantasma es plana o tan cercana a eso que puede tomarse así. (Fig. 17). El orden de los vidrios es primero el F9, y los espesores tienen que dar una suma constante. La prescripción es (mostrando 3 decimales).

S	Radio Curv.	Radio Clr. Osc.	Distancia	Vidrio	a,d
1	-1.500	1.000	0.00	1 F9	d
2	0.000	1.000	0.00	SK16	
3	-1.360	1.000	0.00	1	

La extensión de la imagen axial policromática es  $1.3 \mu$ .

Invertiendo los vidrios es  $46.5 \mu$

Con SK16 solo es  $17.3 \mu$

Con F9 solo es  $27.9 \mu$

La imagen en el color central es, por supuesto, puntual dentro de los errores de cálculo.

Las aberraciones geométricas (sólo astigmatismo) y cromáticas son de la misma magnitud a una distancia de  $0.07 \text{ mm}$  del eje. (Fig. 18)

Es casi limitada por difracción hasta  $0.1 \text{ mm}$ .

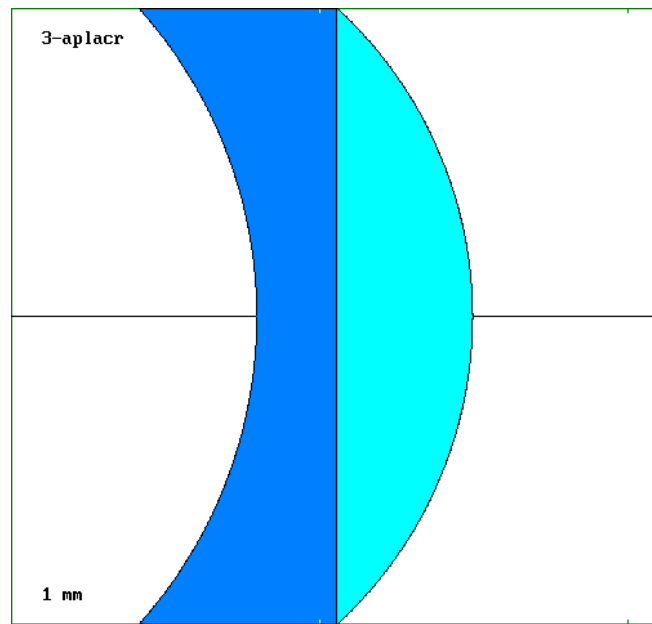


Fig. 17. Sistema aplanático acromatizado por superficie fantasma

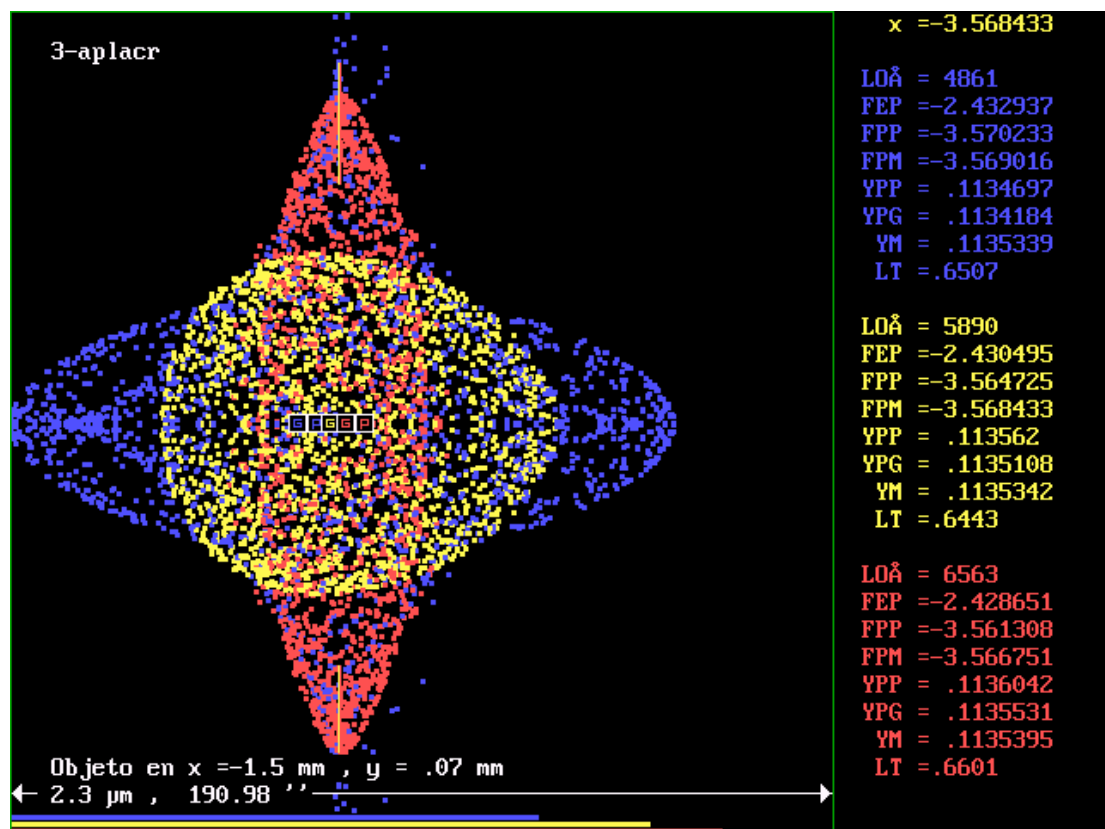


Fig. 18. Imagen extra-axial policromática

Sistema Bowers acromático

El sistema concéntrico de Bowers (4-bowers) es muy prometedor para lograr un gran campo libre de aberraciones geométricas, y fué diseñado para el extremo azul del espectro debido a su aplicación fotográfica, pero el cromatismo es tan grande que lo inutiliza.

El uso de una superficie fantasma puede mejorar la situación porque la concentricidad se sigue manteniendo para el color central, pero ahora para usar el par de vidrios SK16 – F9 la  $\lambda$  central debe ser 5892 A. y el intervalo espectral usual **F-D-C**

El sistema 5-bowac tiene una superficie más, la número 3 que trae al F9, pero al principio para ajustar los parámetros de corrección monocromática esta superficie no existe.

El método es variar  $R_2$  y  $R_4$  en color D manteniendo la concentricidad.

Hecho esto se varía  $R_3$  hasta minimizar el cromatismo.

Si se permutan los vidrios se puede llegar a algo similar con otro valor de  $R_3$ .

Para campo cero las imágenes monocromática y policromática son iguales y cercanas al límite de difracción, pero las imágenes extra-axiales sufren de cromatismo lateral.

S	Radio Curv.	Radio Clr.	Osc.	Distancia	Vidrio	a,d
1	0.000	200.000	0.00	713.000	1	d
2	-713.000	235.000	0.00	30.000	SK16	
3	-794.600	235.000	0.00	30.700	F9	
4	-773.700	235.000	0.00	1692.300	1	
5	-2466.000	310.000	0.00	0.000	-1	

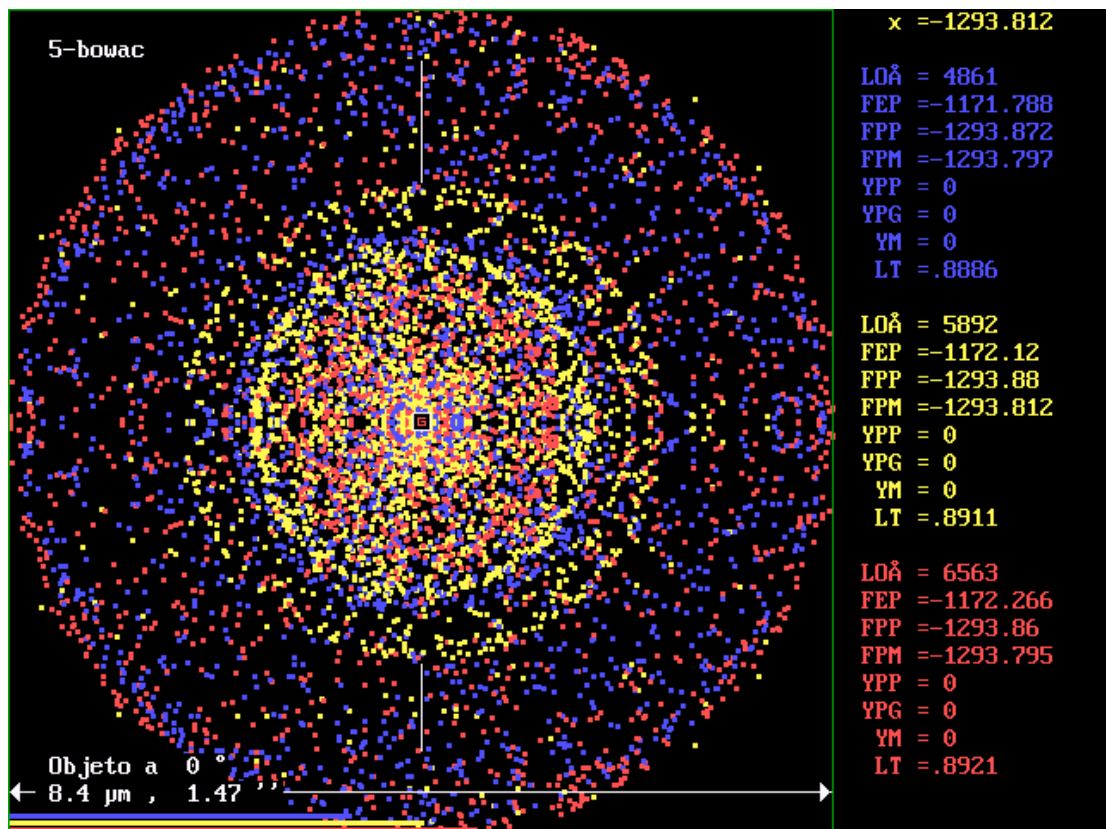


Fig. 19. 5-bowac. Imagen axial

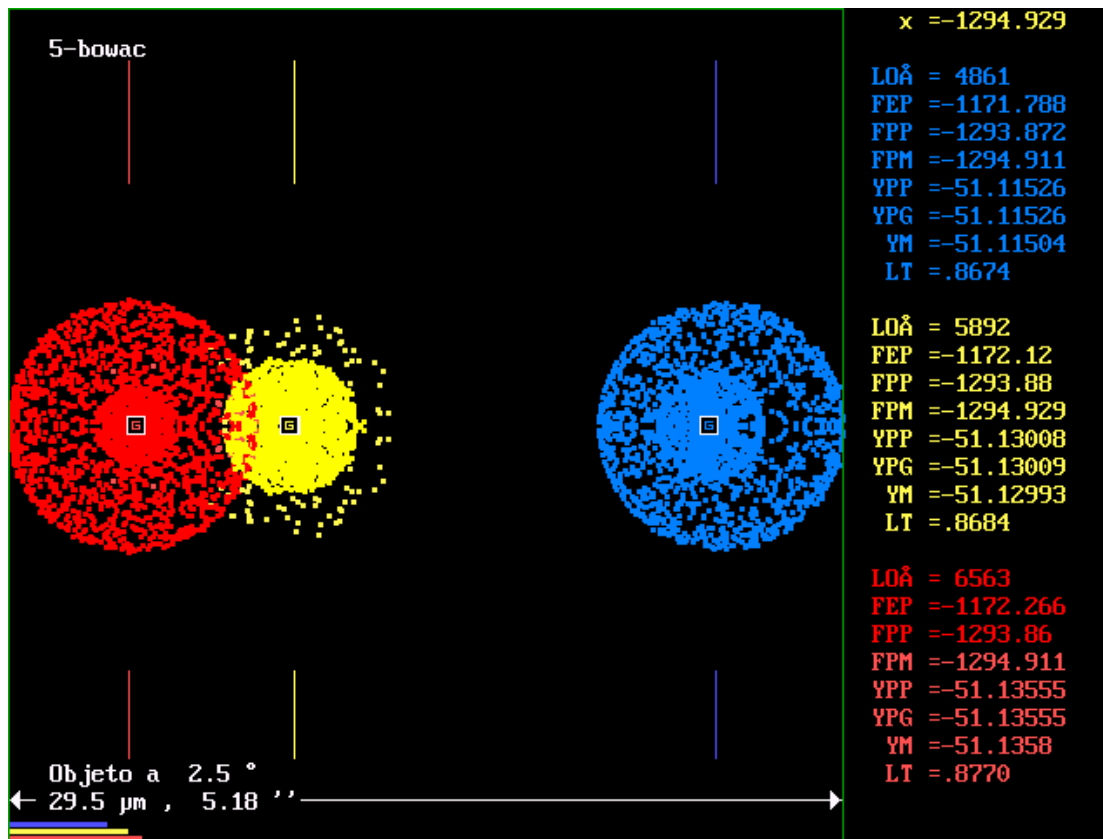


Fig 20. 5-bowac. Imagen a 2.5 grados

La acromatización se puede apreciar poniendo las dos componentes del mismo vidrio, las imágenes monocromáticas siguen corregidas pero están muy separadas axialmente.

Este tipo de sistemas puede llevarse a grandes campos y aperturas introduciendo correctores adicionales

#### Uso masivo de asféricos

Veremos ahora cómo se pueden usar asféricos de orden superior para corregir el sistema óptico de un gran telescopio. Este telescopio no se ha hecho aún, pero es posible que sea un candidato a un telescopio de próxima generación. Hay mucha literatura al respecto y el diseño este fué suministrado por el Dr. Jingqan Cheng, (Ref. 2) uno de los que contribuyen al proyecto, durante una visita a la Argentina. El nombre genérico es telescopio Mersenne-Schmidt. La siguiente es su prescripción. (Sistema 3-Mersch)

S	Radio Curv.	Radio Clr.	Osc.	Distancia	Vidrio	a,d
1	-16000.000	2500.000	1600.00	-3826.056	1	ad
2	-8135.749	1468.000	0.00	7826.260	1	a
3	-8000.000	2236.000	0.00	0.000	-1	a

#### Asféricos

S	Const. Cítrica	Asférico (4)	Asférico (6)	Asférico (8)
1	-1.000	0.00000E+00	-6.71398E-23	-1.67188E-30
2	0.000	-6.43105E-14	-1.35043E-20	-6.68874E-28
3	0.000	-5.03860E-15	-4.23422E-22	6.67396E-32

Es un sistema de tres espejos, el primario es de 5 metros de diámetro y se destaca por una gran obstrucción central para poder admitir un gran campo. Mediante un sistema complejo de asféricos de orden superior se logra mantener una imagen altamente corregida hasta  $2.5^\circ$  grados de semicampo, una performance similar a una cámara Schmidt, pero sólo con espejos. El único inconveniente puede ser la degradación de la imagen de difracción por la obstrucción central.

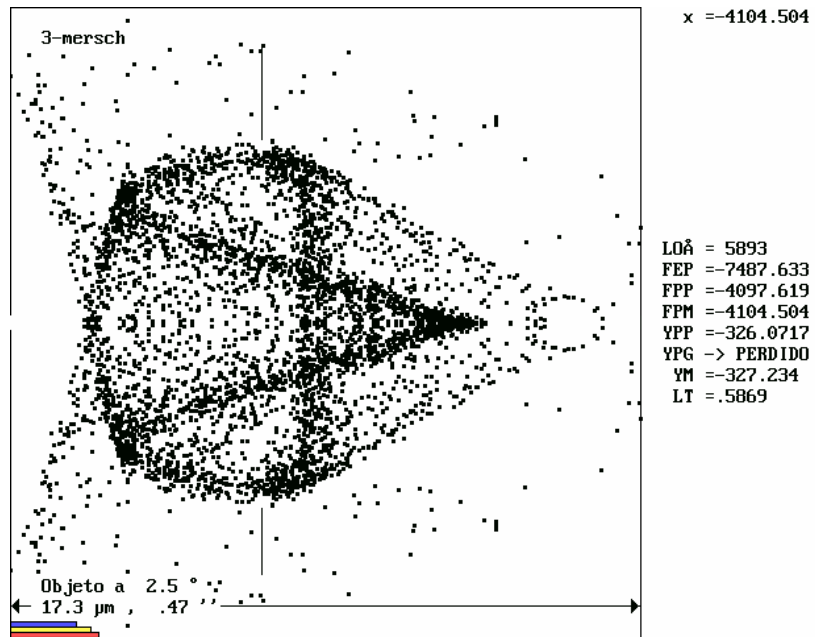


Fig 21

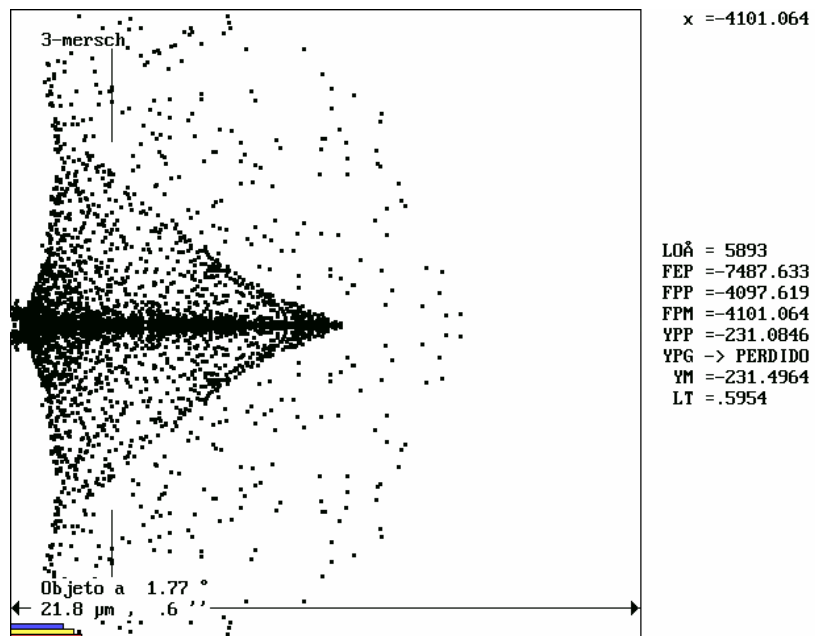


Fig. 22

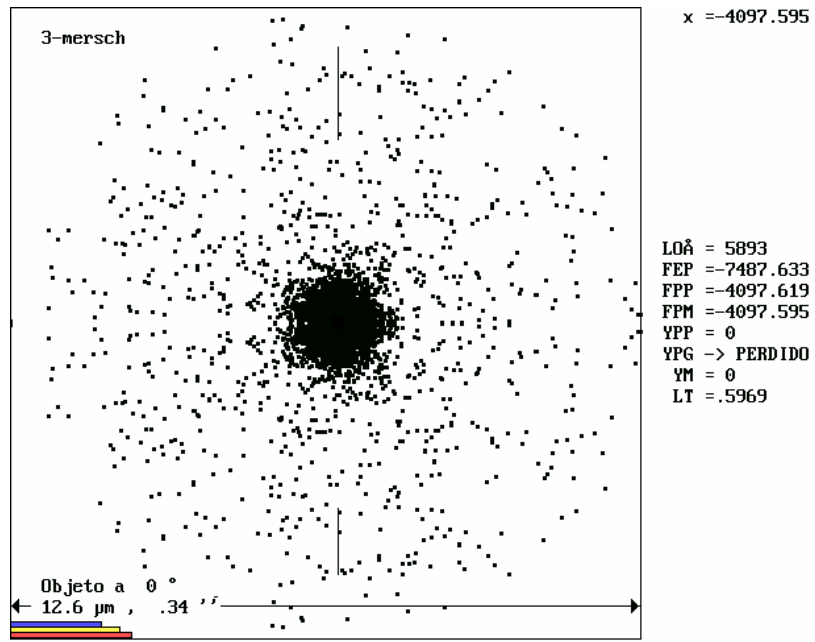


Fig. 23

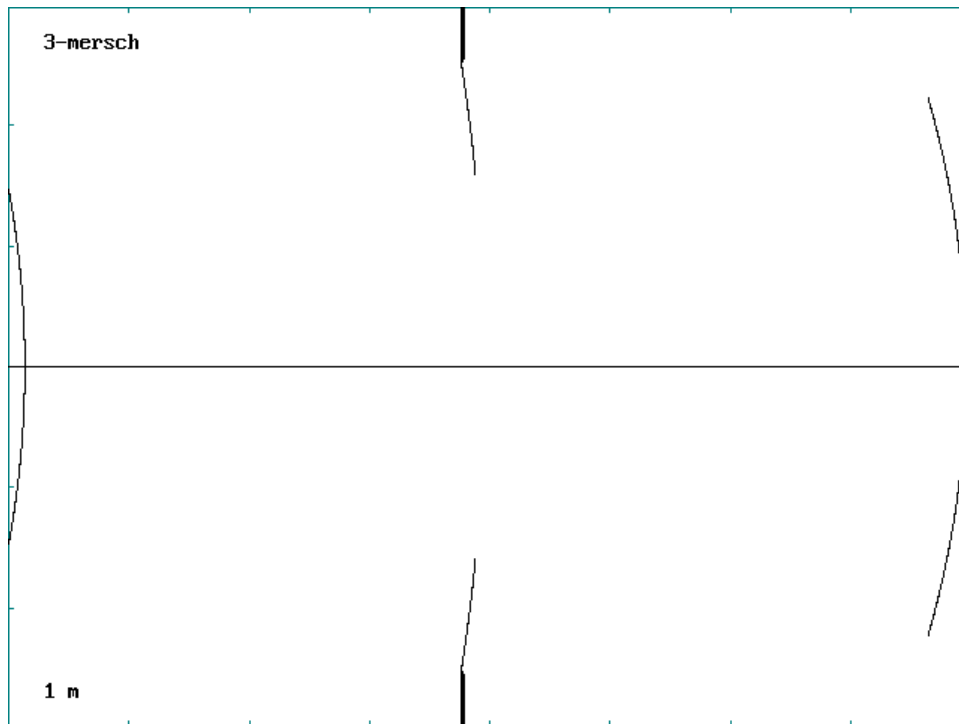


Fig. 24. Perfil de 3-mersch

Algo más accesible

Los ejemplos anteriores tratan sistemas ópticos simulados. Para una mejor idea de cómo la simulación reproduce la realidad, veremos un sistema muy simple que permite verificar experimentalmente los resultados si apelar a instrumentos especiales. Es una lupa comprada en una juguetería. (También es china !)



Fig 25. La lente y los elementos para definirla según la prescripción de abajo. A falta de un refractómetro se asumió que el vidrio es un BK7. (Sistema 2-lupach)

**Lupa china para experimentar con la imagen**

La distancia objeto es aproximadamente el doble de la focal

Y la altura objeto da una imagen bastante curiosa para demostraciones

S	Radio Curv.	Radio Clr.	Osc.	Distancia	Vidrio	a,d
1	270.800	50.000	0.00	12.000	BK7	d
2	-270.800	50.000	0.00	0.000	1	

En la Fig. 26 se ve el dispositivo experimental, por demás simple. La fuente puntual de luz blanca se realizó mediante una bolilla de acero iluminada por una linterna.





Fig 26. Dispositivo experimental.

En la Fig 27 están, además del diagrama, las coordenadas del objeto e imagen, y la dimensión de la imagen.

La imagen de  $\approx 8$  mm de largo es suficientemente grande como para fotografiarla sin microscopio y apreciar los detalles geométricos y cromáticos. Por la misma razón la difracción es despreciable y el modelo de rayos es bien válido. Comparar con el ejemplo anterior.

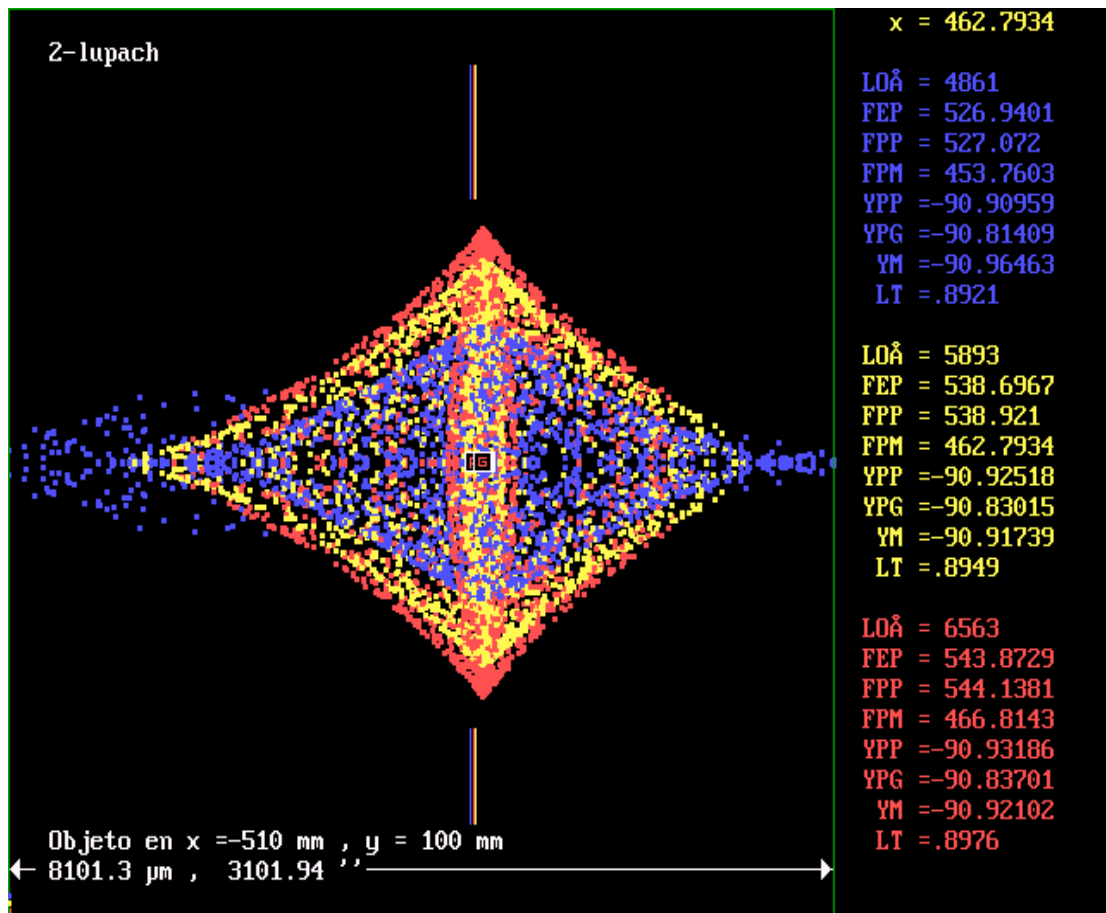


Fig. 27 Imagen simulada

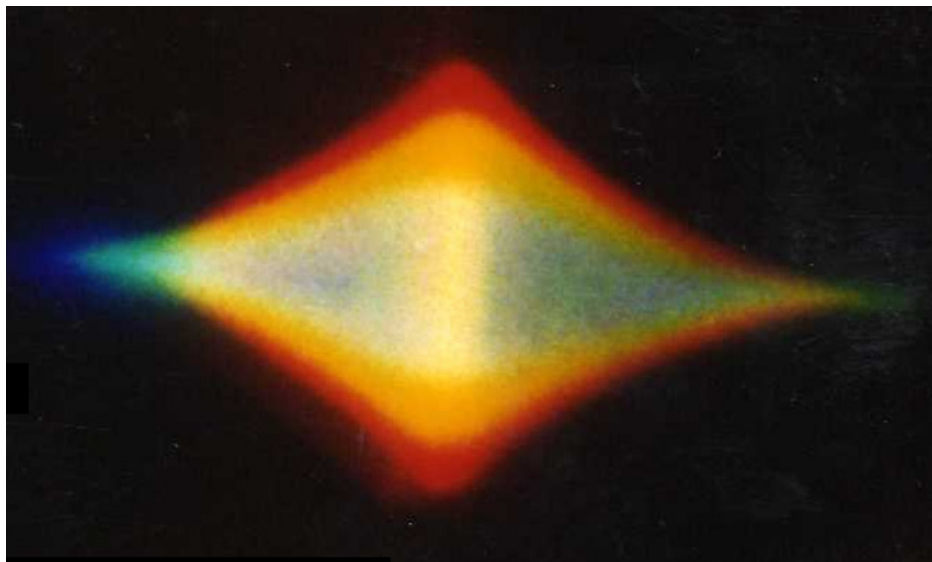


Fig. 28. Imagen real

Pueden discernirse las franjas rojas y amarillas inferior y superior. La columna amarilla central con débiles bordes rojos. La débil nube azul al costado izquierdo y una insinuación de azul al costado derecho. El ligeramente más oscuro lado derecho de la imagen central azulada.

Todos estos detalles fueron obtenidos con el crudo equipo mostrado.

Una mejor aproximación sería usar un banco óptico de precisión y un programa que incluya efectos de difracción.

#### Utilidades adicionales del programa

Una vez ingresado el sistema ( 8-helios en este caso ) y seleccionadas las  $\lambda$  en las que se lo examinará, se continúa hacia la evaluación de la imagen eligiendo **Objeto** en la barra de opciones.

Con la opción **Vidrios** se obtiene lo siguiente:

Vidrio	Valores en:			Å
	4861	5876	6563	
	Número de Abbe	Dispersión parcial		
SK51	60.28	.69611		
SK11	60.76	.69504		
LF2	40.92	.70416		
SK11	60.76	.69504		
SK51	60.28	.69611		

También, con las opciones **F**, **D**, **C** se puede sustituir en la columna de los vidrios los índices en esas  $\lambda$ .

Objeto		Vidrios			Indices:			F		D		C		Explícitos	
S	Radio Curv.	Radio Clr.	Osc.	Distancia			Vidrio		a,d						
1	240.354	66.280	0.00	26.670			1		1.61777						
2	-156.981	65.449	0.00	11.879			1		1.56101						
3	-1913.832	57.690	0.00	29.709			1								
4	-168.375	44.316	0.00	7.135			1		1.58495		d				
5	236.282	43.318	0.00	6.207			1								
6	-919.823	43.831	0.00	27.750			1		1.56101						
7	141.292	55.409	0.00	37.903			1		1.61777						
8	-160.249	59.335	0.00	0.000			1								

Con la opción **Explícitos** se puede asignar un índice arbitrario explícitamente a cada vidrio, sin que haya sido originado por la fórmula de interpolación.

Si se estudia un vidrio, ( BK7 en este caso ) además del índice en cualquier  $\lambda$  pueden verse los otros datos que figuran en el catálogo

BK7-517642

preferido

Coefficiente de dilatación entre -30°C y 70°C en $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	= 7.1
Coefficiente de dilatación entre 20°C y 300°C en $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	= 8.3
Temperatura de distensión en °C	= 559
Temperatura de ablandamiento en °C	= 719
Calor específico isobárico en $\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$	= .858
Conductividad térmica en $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	= 1.114
Densidad en $\text{g}/\text{cm}^3$	= 2.51
Módulo de Young en $10^{-3} \text{ N}/\text{mm}^2$	= 81
Relación de Poisson	= .208
Dureza Knoop	= 520
Clase de contenido de burbujas (de 0 a 3)	= 0
Clase de resistencia climática (de 1 a 4)	= 2
Clase de resistencia al teñido (de 0 a 5)	= 0
Clase de resistencia a ácidos (de 1 a 4 o de 51 a 53)	= 1
Clase de resistencia a los álcalis (de 1 a 4)	= 2
Transmitancia interna en 4000 Å sobre 5 mm	= .998
Transmitancia interna en 4000 Å sobre 25 mm	= .991
Precio estimado respecto del BK7	= 1

BK7-517642

Coefficientes de la fórmula de interpolación de Schott

$$A_0 = 2.271893$$

$$A_1 = -1.010808\text{E-}02$$

$$A_2 = 1.059251\text{E-}02$$

$$A_3 = 2.081696\text{E-}04$$

$$A_4 = -7.647253\text{E-}06$$

$$A_5 = 4.924099\text{E-}07$$

Una vez evaluada la imagen aparece una barra de opciones similar, donde en lugar de índices están los focos **F**, **D**, **C**. Y con la opción **E** explícito se puede asignar plano arbitrario explícitamente a la imagen, sin que haya sido originado por la fórmula de mínima dispersión RMS. Esto fue usado en el ejemplo de telescopio del Casleo

Referencias.

1 – Lens design for a 609.6 mm, f / 6, 30° field objective. Berlyn Brixner. Applied Optics, Vol. 5, N 12, Diciembre de 1966, Pág. 1948.

2 – Jingqan Cheng y Ming Liang. SPIE Proceedings. Febrero de 1990.