

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE CIENCIAS



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE UN SISTEMA
PARA TELESCOPIO TIPO RITCHEY - CHRETIEN**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
F I S I C O
P R E S E N T A:

JOSE MANUEL SASIAN ALVARADO

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México

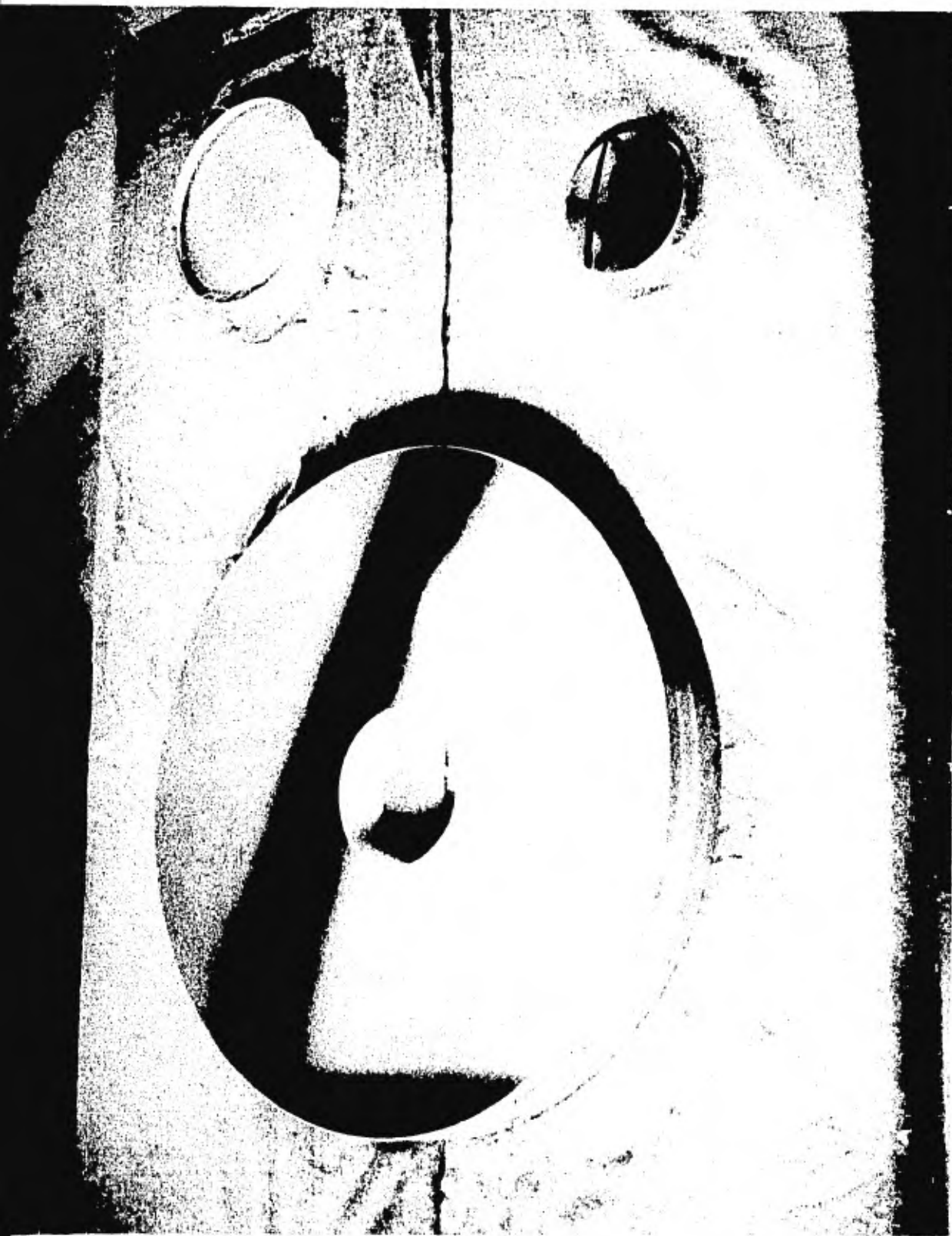


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



I N D I C E

AGRADECIMIENTOS	2
PROLOGO	3
INTRODUCCION	4
PARTE 1: DISEÑO	
Teoría General	6
Diseño Particular	26
PARTE 2: CONSTRUCCION	
Construcción de una superficie óptica	30
Construcción particular	43
Resultados	47
Conclusiones	55
APENDICE	57
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	62

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no hubiera sido posible realizarla sin el apoyo del Sr. Franco Pérez, quien me enseñó las técnicas de tallado de superficies ópticas; ni del Sr. Francisco Cobos, quien tuvo el interés de acercarme al campo de la óptica. De seo expresarles mi agradecimiento.

He recibido el apoyo y motivación del Dr. Robert Noble, director de esta tesis; muchas gracias. Quiero agradecer también al Dr. Rafael Pérez Pascual sus consejos tan atinados. Agradezco las sugerencias de los Dres. Claudio Firmani y Carlos Chavarría, así como los comentarios del M. en C. Manuel Moreno; ellos tuvieron la gentileza de revisar el manuscrito y formar el Jurado.

El Sr. Carlos Tejada me ayudó en la realización de algunas etapas de la construcción, y el Sr. Eduardo Gastélum hizo el trabajo de fotografía. Les doy las gracias. La Srita Juanita Orta tuvo la amabilidad de hacer el trabajo de mecanografía, motivo por el que le estoy agradecido.

Por último deseo agradecer al Instituto de Astronomía de la UNAM todas las facilidades que tuve para la realiza ción de esta tesis.

PROLOGO

Al terminar con esta tesis mi formación profesional me viene a la mente que cuando niño, me parecía cosa mágica la manera en que los científicos realizaban sus descubrimientos; también recuerdo que con una cajita, un espejo y una lupa quise hacer algo para ver mejor la luna, no pude.

Ahora, que ya se cual es la magia de los científicos y que he mirado la luna a través de un telescopio hecho por mi mismo, ¡Ya no soy un niño!

INTRODUCCION

La instrumentación en óptica es un campo que en nuestro país comienza a desarrollarse. La importancia que tiene es grande pues muchas de las disciplinas que tienen relevancia en el desarrollo del país requieren de su apoyo; ejemplo de ellas son la agricultura, la medicina, la ingeniería y la comunicación. Para citar algunos de los instrumentos ópticos que se emplean se mencionan los siguientes: polarímetros, cámaras fotográficas, microscopios, lámparas frías, teodolitos, láseres y proyectores; todos ellos se importan. A pesar de los esfuerzos que han hecho algunas personas e instituciones para remediar esta situación, la industria óptica mexicana es prácticamente inexistente. La tecnología en óptica no sólo aporta instrumentación sino que también enriquece con nuevos métodos a otras áreas del conocimiento, y es precisamente la ciencia de la física quien hace posible este desarrollo técnico.

Una de las disciplinas del conocimiento que debe formar parte del patrimonio cultural de todo pueblo y que ha estimulado el desarrollo de diversas tecnologías que han reportado frutos también en otras áreas, es la Astronomía; para impulsarla y difundirla en nuestro país hay un proyecto a nivel nacional que pretende instalar en cada Estado de la República un observatorio con un telescopio de mediano alcance y bajo costo destinado para fines tanto de educación como de investigación.

La construcción del sistema óptico para el telescopio destinado al Observatorio de la Universidad de Guanajuato constituye el trabajo de Tesis y el presente es un complemento que pretende mostrar la manera en que se diseña un sistema Ritchey-Chretien, así como dar una idea de su construcción. Para ello, se ha dividido en dos partes: diseño y construcción; en la primera se presentan los sistemas reflectores para telescopio más simples

haciendo un estudio somero de ellos, para más adelante mostrar como surge el sistema Ritchey-Chretien. Se termina esta parte con el diseño particular del sistema óptico para el telescopio mencionado. En la segunda parte se esboza como se construye una superficie óptica, se mencionan algunos de los métodos empleados para llevar a cabo las etapas más difíciles de fabricación del sistema construido y finalmente se muestran los resultados de las pruebas realizadas a este sistema junto con las conclusiones. Se presenta además un apéndice en donde se discute el Criterio de Rayleigh.

P A R T E I

DISEÑO

TEORIA GENERAL.

El diseño de un sistema óptico tiene como finalidad hacer posible la construcción de un instrumento que satisfaga las necesidades de un determinado campo del conocimiento, la guía para realizar este diseño la impone la aplicación específica a que se destinará el instrumento. El cometido de un telescopio es formar la imagen de un objeto distante con el fin de estudiarla mediante el equipo adicional con que está provisto, esto es: oculares, placas fotográficas, fotómetros, espectrógrafos, etc. Desde el punto de vista de la instrumentación un telescopio puede ser dividido en dos sistemas: el óptico que es el que forma la imagen, y el mecánico cuya función es soportar convenientemente al anterior, dirigirlo al lugar deseado de observación así como permitir acoplar el el equipo adicional.

Los sistemas ópticos pueden estar constituidos por lentes (Dióptricos), espejos (catóptricos), o bien por una combinación de los elementos anteriores (catadióptricos). En general las imágenes que forman sufren diferentes tipos de defectos, inherentes a la forma geométrica de las componentes del sistema y a la naturaleza ondulatoria de la luz, conocidos como aberraciones; las más importantes son: esfericidad, coma, astigmatismo, curvatura de campo, distorsión, cromática longitudinal y cromática lateral. En parte el objetivo del diseño óptico es disminuir o evitar estos defectos; la finalidad del instrumento y los recursos económicos disponibles permitirán decidir que aberraciones y cuánto se corregirán. El límite en la calidad de la imagen lo impone el fenómeno de difracción; él causa que en el mejor de los casos la imagen de un objeto puntual formada por un sistema

óptico, de abertura circular de diámetro D y distancia focal f , sea un disco iluminado por aproximadamente el 84% de la luz incidente, de radio $p = 1.22 \lambda f/D$, rodeado de un sistema de anillos concéntricos iluminados por el porcentaje de luz restante; λ es la longitud de onda de la luz utilizada. Esta imagen es conocida como el patrón de Airy y se ilustra en la figura 1. Una imagen extendida está constituida por un conjunto de imágenes de puntos sobre un objeto determinado, por lo que el estudio de estas últimas imágenes da información sobre la calidad de las imágenes extendidas. Desde

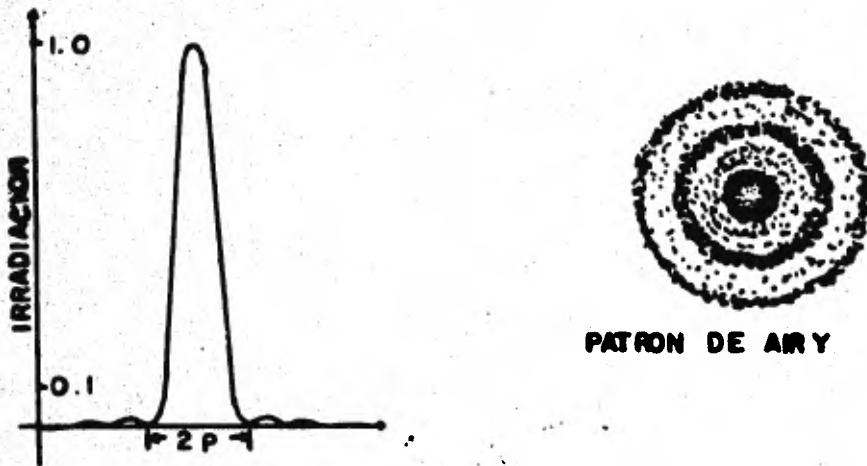


Fig. 1.

el punto de vista de la óptica geométrica, los rayos que forman la imagen de un objeto puntual situado en el eje óptico de una lente o espejo intersectan a tal eje en lugares diferentes cuando ellos inciden a diferentes distancias del mismo eje

Óptico. Véase figura 2.

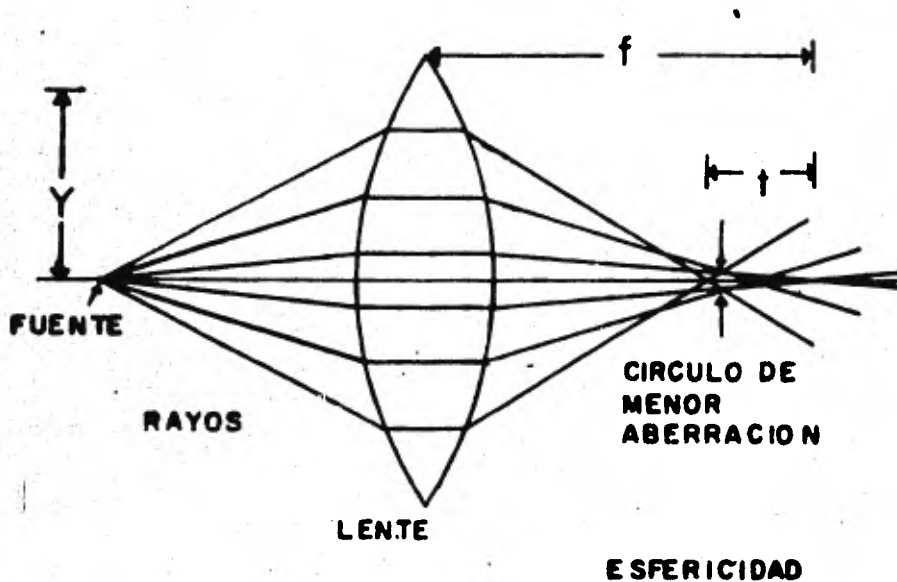


Fig. 2.

Este fenómeno, debido a la forma geométrica de las superficies ópticas que frecuentemente son esféricas por la facilidad de su construcción y no a las imperfecciones de su fabricación, se le llama aberración de esfericidad y puede ser definida como la variación del foco con la abertura.

Cuando en presencia de aberración de esfericidad la imagen de un objeto puntual es proyectada, se observa un disco luminoso rodeado de un halo cuyo diámetro depende de la posición de la pantalla en el eje óptico, al disco de menor radio así formado se le llama círculo de menor aberración. La aberración de esfericidad disminuye la nitidez y el contraste de la imagen de un objeto extendido, una medida de

ella es la distancia t que hay entre el punto de intersección con el eje del rayo axial y el punto de intersección del rayo extremo marginal. Si el camino óptico de cualquier rayo es el mismo para dos puntos conjugados de un sistema óptico, entonces éste no sufrirá esfericidad en tales puntos. En el caso de un espejo esférico de distancia focal f la cantidad t está dada en primera aproximación por la expresión³:

$$t = \frac{y^2}{8f} ,$$

donde y es la semiapertura, por lo que el radio del círculo de menor aberración es³:

$$r = \frac{y^3}{32f^2} .$$

Un casquete de paraboloides de revolución no sufre aberración de esfericidad en su foco.

Cuando un sistema óptico forma la imagen de un objeto que subtende un ángulo θ con su eje óptico, aparecen en la imagen las llamadas aberraciones fuera de eje, es decir: coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión. En presencia de coma la imagen de un objeto puntual tiene forma parecida a la de un cometa, de ahí el nombre de coma, este defecto se ilustra en la figura 3. Las dimensiones de la imagen dependen tanto del ángulo de oblicuidad θ como de la abertura relativa:

$$w = \frac{y}{f} .$$

Abbe fue el primero en reconocer que la coma se debe a la variación de la distancia focal con la abertura; de esta observación se desprende que un sistema corregido para esfericidad estará libre de coma, para un campo de imagen dado, si el tamaño de la imagen no varía con la abertura. Esta condición

es conocida como la condición del seno de Abbe⁴, de acuerdo con ella la superficie principal (el lugar geométrico de los puntos que resultan de la intersección de los rayos incidentes con la prolongación de los rayos emergentes) de un

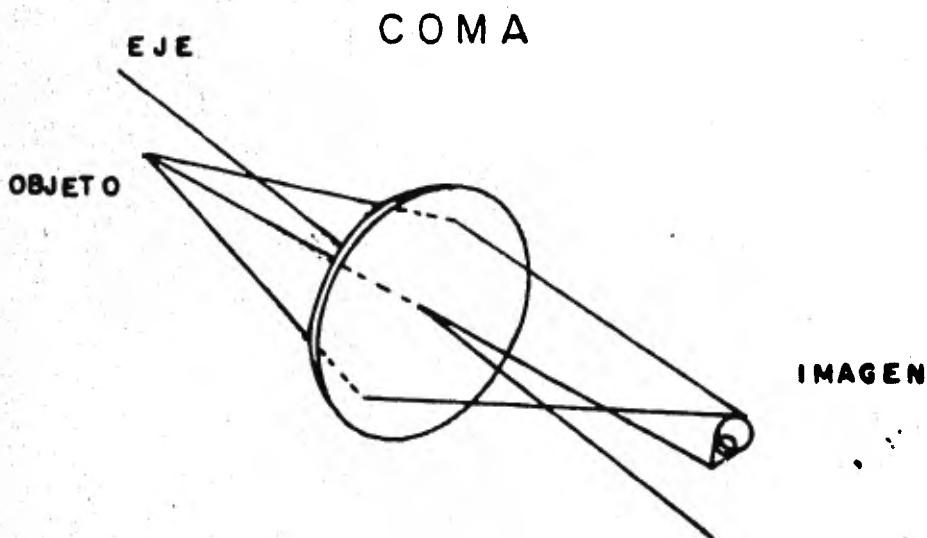


Fig. 3.

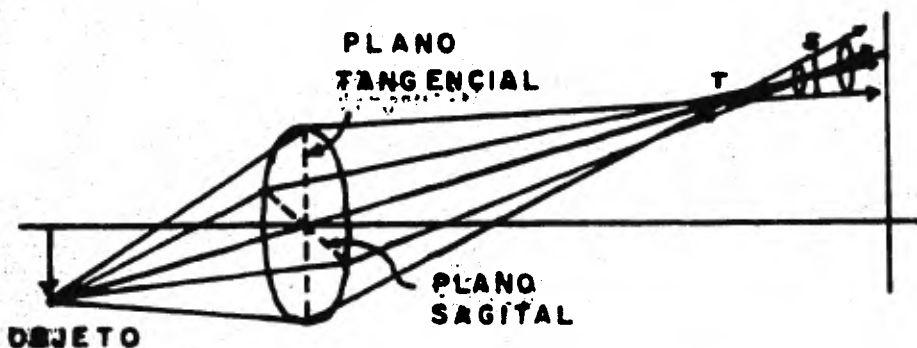
sistema libre de las aberraciones de esfericidad y coma es una esfera cuyo radio es la distancia focal efectiva F de la combinación. La distancia focal efectiva es la distancia que hay entre el foco del sistema y un punto de la superficie principal; cuando ésta es esférica tal distancia focal no varía con la abertura de modo que el tamaño de la imagen el cual es proporcional a F , permanecerá igual.

A la dimensión mayor de la imagen comática se le da

nombre de coma tangencial C_T y para un espejo parabólico, de abertura circular de diámetro D y distancia focal f , que forma la imagen de un objeto distante tiene un valor de ³:

$$C_T = 3/16 \frac{D^2}{F} \theta ,$$

en donde θ se expresa en radianes. La figura 4 ilustra la aberración de astigmatismo.



A STIGMATISMO

Fig. 4.

Al plano definido por el objeto puntual y el eje óptico se le conoce como plano tangencial y al plano también definido por el eje y que es perpendicular al tangencial se le llama sagital. Los rayos que emergen del objeto y que están sobre el plano tangencial hacen foco en el punto T mientras que los rayos sobre el plano sagital hacen foco en el

punto S; los rayos que caen sobre otros planos comprendidos por los planos tangencial y sagital hacen foco en posiciones intermedias entre los puntos focales T y S. Este comportamiento trae como consecuencia que al proyectar la luz en una pantalla en posiciones consecutivas a partir de uno de los puntos focales extremos se observe una imagen elipsoidal que se transforma en circular y ésta a su vez en una imagen elipsoidal girada 90° con respecto a la primera. A esta imagen circular también se le conoce como círculo de menor aberración y sus dimensiones dependen tanto del ángulo de oblicuidad θ como de la abertura relativa w .

Las imágenes sagital y tangencial hacen foco a medida que varía el ángulo θ en dos curvas parabólicas y la distancia que hay entre ellas es una medida del astigmatismo. En el caso de un espejo parabólico que forma la imagen de un objeto puntual distante el círculo de menor aberración tiene un diámetro de ³:

$$\delta = Fw\theta^2 = \frac{D}{2} \theta^2$$

Desde el punto de vista de la óptica geométrica las imágenes de objetos puntuales formadas por un sistema libre de las aberraciones de esfericidad, coma y astigmatismo, para un cierto par de puntos conjugados, son puntuales en el eje y fuera de él; es decir hay una correspondencia punto a punto entre la imagen y el objeto. Sin embargo el lugar geométrico de los puntos imagen de un objeto extendido no es en general un plano sino una curva llamada superficie de Petzval¹ que resulta de la fusión de las superficies focales sagital y tangencial del astigmatismo; dicha superficie para un campo pequeño de imagen puede considerarse esférica y su radio r_p depende de las características particulares de cada sistema. Este defecto conocido como curvatura de campo trae como consecuencia que la imagen no aparezca enfocada en toda su ex-

tensión cuando se proyecta en una superficie plana.

También ocurre en un sistema óptico que la amplificación lateral varíe en forma anómala con el ángulo de oblicuidad θ haciendo que las imágenes se deformen según se ilustra en la figura 5.

DISTORSION

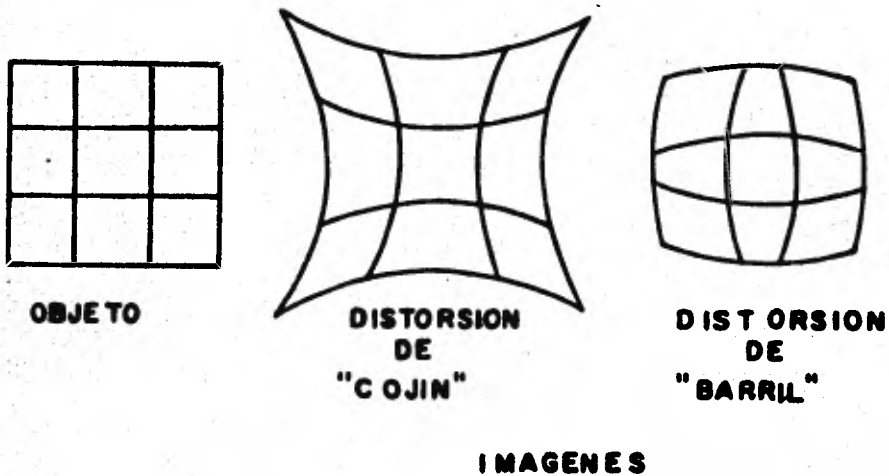


Fig. 5.

Esta aberración es conocida como distorsión y puede ser de "barril" o de "cojin".

En los sistema ópticos que tienen lentes como elementos constitutivos ocurre el fenómeno de la dispersión debido a la variación del índice de refracción con la longitud de onda de la luz. El resultado de esta variación es que el ángulo de refracción también varíe, originando que las imáge-

nes de tales sistemas se vean afectadas en dos maneras: en su posición y en su amplificación. Estos defectos son conocidos como las aberraciones cromáticas longitudinal y lateral respectivamente. Obsérvese que en los sistemas a reflexión, aquellos que sus elementos constitutivos son espejos, están libres de las aberraciones cromáticas ya que la ley de reflexión es la misma para cualquier longitud de onda.

Las aberraciones mencionadas pueden ser corregidas para un cierto campo de imagen de un sistema óptico empleado por ejemplo; superficies esféricas en las componentes, lentes de composición química diferente, diafragmas o bien introduciendo más componentes en el sistema.

El sistema óptico para telescopio más simple es un espejo esférico cóncavo, la imagen de una estrella formada por él sobre su eje óptico sólo se ve afectada por la aberración de esfericidad; si su razón f/D es un número grande (del orden de 10) el radio del círculo de menor aberración es comparable al radio del círculo de Airy, por lo que la imagen de la estrella será satisfactoria. En la medida en que tal razón disminuya el efecto de la aberración de esfericidad aumentará y será entonces conveniente usar un espejo parabólico cuya construcción es más laboriosa pero el cual no sufre este defecto en su foco. El telescopio de Newton emplea la idea precedente y utiliza un espejo plano adicional para dar acceso a la imagen. Véase figura 6. Gracias al conocimiento de las propiedades geométricas de las cónicas ha sido posible imaginar otras combinaciones a espejos para telescopios libres de esfericidad; ejemplo de ello son los sistemas Cassegrain y Gregoriano⁵, en los que el primer espejo (Primario) es un paraboloide y el espejo que da acceso al foco (Secundario) es en el primer caso un espejo hiperboloide y en el segundo un espejo elipsoidal; ambos secundarios proveen una amplificación extra en el tamaño de la imagen,

SISTEMA DE NEWTON

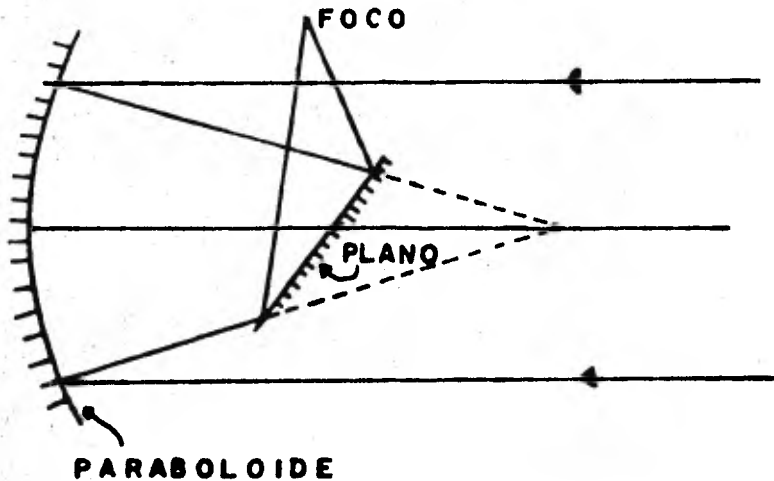


Fig. 6.

uno de sus focos debe coincidir con el foco del paraboloide mientras que en el otro foco se forma la imagen cuyo acceso es por la parte posterior del primario. Profesionalmente el sistema de Gregory no es empleado ya que involucra una montura de dimensiones mayores y un factor de amplificación también mayor para un primario dado. Sin embargo este sistema no invierte las imágenes.

La dificultad de construcción de las superficies de estas combinaciones es mayor al aumentar la abertura y en la medida en que éstas se apartan de superficies esféricas. El sistema Dall-Kirkham soslaya en parte esta dificultad empleando un secundario esférico convexo y un primario cóncavo cuya

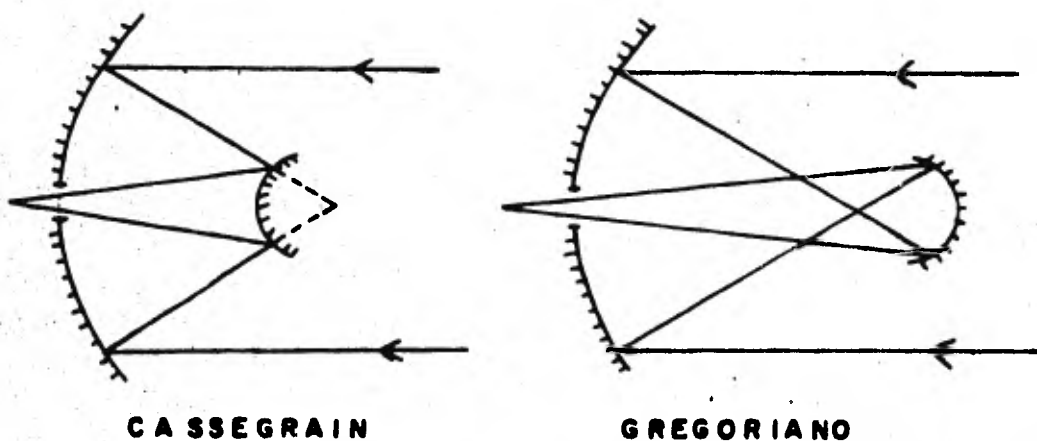


Fig. 7.

forma se acerca a la elipsoidal. Los sistemas anteriores, libres de esfericidad, forman imágenes aceptables fuera del eje cuando el objeto de observación no subtende un ángulo θ grande con respecto al eje del sistema; cuando no es así las imágenes empiezan a sufrir, en la medida que se alejan del eje, las aberraciones de coma, astigmatismo, distorsión y curvatura de campo.

El sistema Cassegrain tiene gran importancia para la astronomía pues además que ofrece la posibilidad de tener aberturas relativas diferentes mediante el uso de secundarios distintos, su diseño permite construir telescopios compactos; característica que resuelve varios problemas del diseño mecánico lo cual se traduce en un menor costo del telescopio. T. Jones⁶ ha mostrado que la superficie principal de este sistema es un paraboloides cuya distancia focal es la distancia

focal efectiva del sistema. Para ello ha considerado que si los rayos que han viajado en un sistema Cassegrain regresan por el camino en que viajaron de ida y se reflejan sobre la superficie principal ésta tiene que ser necesariamente un paraboloide para que los rayos puedan, después de reflejarse sobre el secundario, hacer un foco puntual. (vease figura 8).

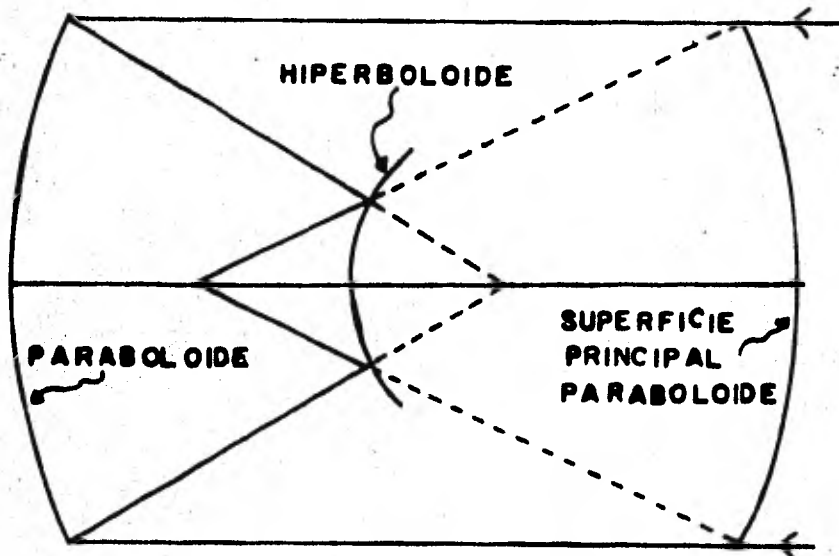


Fig. 8.

De lo anterior se desprende que dicho sistema es equivalente en cuanto a la aberración de coma a un sistema Newtoniano de la misma distancia focal efectiva. Meinel⁷ ha señalado que el astigmatismo de un sistema Cassegrain es igual al de un sistema Newtoniano de la misma distancia focal efectiva multiplicado por la amplificación que aporta el secundario. Es decir para un sistema Cassegrain:

$$C_T = \frac{3}{16} \theta \frac{D^2}{F} ; \quad \delta = \left(\frac{D}{2} \theta^2 \right) A = C_T \frac{8}{3} \theta \frac{F}{D} A$$

donde A es la amplificación debida al secundario y F la distancia focal efectiva. Como la cantidad

$$\frac{8}{3} A \frac{\theta F}{D} < 1$$

para campos de imagen pequeños se infiere que la coma en un sistema Cassegrain es la aberración que mas afecta la nitidez de la imagen. El astigmatismo es pequeño por lo que la superficie de mejor definición prácticamente coincide con la superficie de Petzval cuyo radio de curvatura r_p está dado por⁸:

$$\frac{1}{r_p} = - 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

R_1 y R_2 son los radios de curvaturas en el vértice del primario y del secundario.

El deseo de mejorar las imágenes astronómicas obtenidas en placas fotográficas dió como resultado un nuevo sistema llamado Ritchey-Chretien el cual resulta al modificar ligeramente las superficies del sistema Cassegrain de tal suerte que se corrija la aberración de coma y siga siendo nu la la aberración de esfericidad. La curvatura de campo de este sistema también esta dada con buena aproximación por la expresión anterior y a menudo se corrige con un sistema de lentes acromático que se coloca cerca del plano focal del sistema. La ventaja del sistema Cassegrain frente al sistema Ritchey-Chretien es que el foco de su primario puede usar se para formar una imagen. Un sistema libre de las aberraciones de esfericidad y coma se le llama aplanático.

A continuación se deducirá en forma aproximada pe

ro suficiente la forma de las superficies del sistema Ritchey-Chretien. Dado que la superficie principal paraboloide del sistema Cassegrain no se aleja demasiado de la superficie principal esférica que requiere un sistema aplanático, se comprende que las superficies del sistema Ritchey-Chretien no se apartan en demasía de las superficies del sistema Cassegrain. Las superficies del sistema Ritchey-Chretien pueden ser representadas por las expresiones⁶:

$$x_1 = \frac{y_1^2}{2R_1} + P \frac{y_1^4}{(2R_1)^3} ; \quad x_2 = \frac{y_2^2}{2R_2} + \left[Q - \frac{4A}{(A-1)^2} \right] \frac{y_2^4}{(2R_2)^3}$$

Donde y_1 y y_2 son las intersecciones con las superficies de un rayo que viaja en el sistema, P y Q son dos coeficientes de deformación y R_1 y R_2 como antes. Vase figura 9. Las cantidades:

$$\Delta x_1 = P \frac{y_1^4}{(2R_1)^3} \quad \text{y} \quad \Delta x_2 = Q \frac{y_2^4}{(2R_2)^3}$$

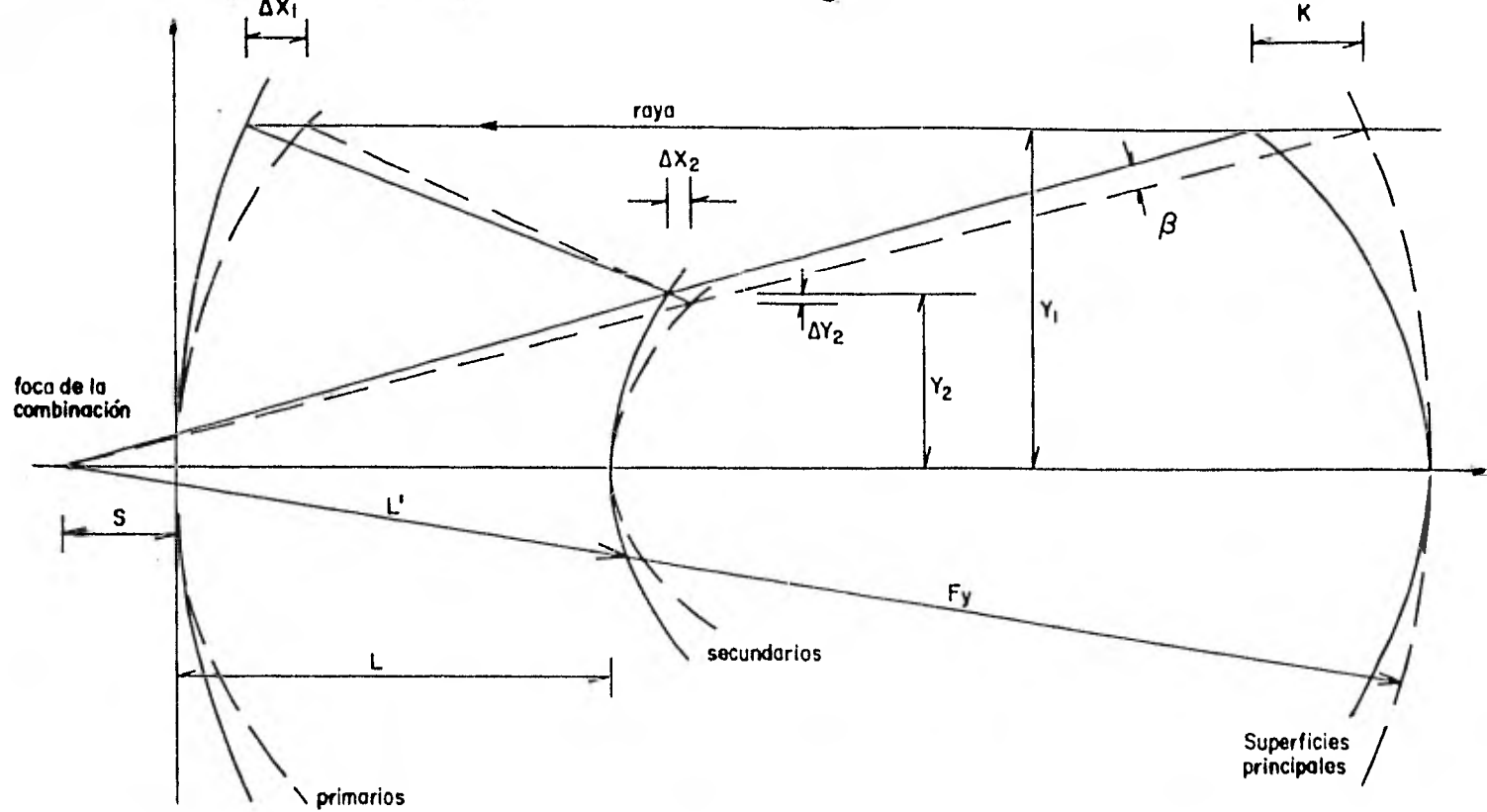
representan las desviaciones entre las superficies del sistema Ritchey-Chretien y las superficies del sistema Cassegrain; para ellos el camino óptico de cualquier rayo es el mismo, asegurando así la ausencia de esfericidad, por lo que en primera aproximación se debe cumplir la relación⁶ $\Delta x_1 = \Delta x_2$. Dado que en el sistema Cassegrain se cumple la relación:

$$y_1 / y_2 = \frac{D_1}{d_2} \left(1 - \frac{y_1^2}{4Af_1^2} \right)$$

se puede escribir la expresión:

$$P = Q \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 \left(\frac{d_2}{D_1} \right)^4$$

en donde D_1 es el diámetro del espejo primario, d_2 el diámetro del espejo secundario cuando el campo de imagen es nulo



Trayecta de un rayo a través de las sistemas Ritchey-Chretien y Cassegrain

Fig. 9

y

$$f_1 = \frac{R}{2}$$

es la distancia focal del primario. La figura 9 esquematiza tanto al sistema Cassegrain con líneas discontinuas, como al sistema Ritchey-Chretien con líneas continuas. En este último sistema la deformación del primario con respecto al primario del sistema Cassegrain causa que el rayo reflejado por él intersecte al espejo secundario a una altura $y_2 + \Delta y_2$, con lo cual la prolongación del rayo ya reflejado por el secundario intersecta al rayo incidente en un punto mas cercano al espejo primario y a una distancia K del punto de intersección del mismo rayo en el sistema Cassegrain.

La cantidad K debe ser, según la condición del seno, la diferencia de ordenadas entre un paraboloide de distancia focal F y una esfera de radio F, tangentes en el vértice del paraboloide. Se tiene entonces que el Sen β está dado con buena aproximación por la relación:

$$\text{Sen } \beta \approx \frac{y_1^3}{4F^3} = \frac{y_1 K}{F^2}$$

por otro lado se puede estimar que la razón $\Delta y_2/\Delta x_2$ es del orden de L (la distancia entre vértices), pues:

$$\Delta y_2 \approx \frac{-Py^3L}{R_1^3};$$

como se cumple la igualdad $F_y/L' = y_1/y_2$, para cualquier sistema de este tipo, entonces es posible dar otra estimación para Sen β , es decir:

$$\text{Sen } \beta \approx \frac{\Delta y_2}{L'} \approx \frac{Py^3}{FR_1^3} \cdot \frac{y_1}{y_2} L$$

en donde L' es la distancia que hay entre el foco de la com-

binación y el punto de intersección del rayo particular con la superficie del secundario.

Al igualar esta última expresión con la anterior se puede escribir lo siguiente:

$$P = - \frac{d_2}{D_1} \frac{2f_1}{LA^2}$$

e introduciendo esta expresión en la relación entre P y Q, se obtiene para Q la igualdad:

$$Q = \frac{+2A}{(1-A)^3 \left(1 - \frac{d_2}{D_1}\right)}$$

Los valores de estos coeficientes de deformación definen las expresiones para x_1 y x_2 las cuales representan, con buena aproximación, las superficies aplanáticas del Sistema Ritchey-Chretien. Para propósitos de fabricación es conveniente su poner que las superficies x_1 y x_2 son dos hiperboloides con constantes de conicidad:

$$K_1 = - \epsilon_1^2 = \frac{-2}{A^2 \left| \frac{D_1}{d_2} - 1 \right|} - 1$$

$$K_2 = - \epsilon_2^2 = \frac{-2A}{(-1+A)^3 \left(1 - \frac{d_2}{D_1}\right)} - \frac{4A}{(A-1)^2} - 1$$

Esta suposición es factible puesto que si el campo de imagen es pequeño tales superficies se confunden para los fines prácticos.

Las ecuaciones anteriores son equivalentes a las que presentó D. Malacara⁸ en su revisión a los diseños de los sistemas Cassegrain y Ritchey-Chretien, en donde ha seña

lado que es conveniente llevar el diseño en términos de los parámetros D_1 , F , f_1 , S e I , donde S es la distancia entre el plano focal de la combinación y el vértice del primario, e I es el diámetro lineal del campo de imagen deseado.

Las expresiones que relacionan las cantidades restantes de interés son:

$$A = \frac{F}{f_1}$$

$$L = \frac{F - S}{1 + A}$$

$$d_2 = \frac{D}{f_1} (f_1 - L)$$

$$R_2 = 2f_2 = \frac{2d_2}{D_1} \frac{F}{A-1} .$$

Puesto que se requiere un campo de imagen I , el diámetro del secundario debe ser:

$$D_2 = d_2 + I \frac{L}{F} ; \quad I = F \alpha .$$

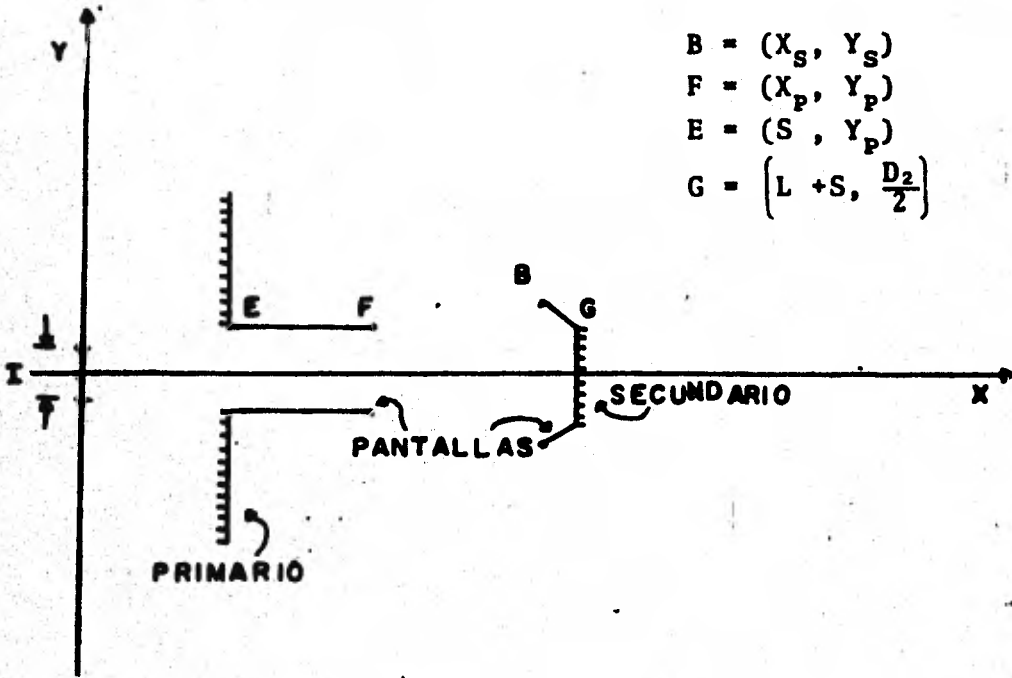
En donde α es el campo angular de imagen expresado en radianes.

El diámetro de la perforación central del primario está dada por la relación:

$$d = \left(\frac{D_1 - I}{L+S} \right) S + I$$

Los sistemas tipo Cassegrain deben estar provistos de un sistema de pantallas que eviten la incidencia directa de luz en el plano focal. A. Cornejo y D. Malacara⁹ han propuesto un diseño suponiendo que las superficies de los espejos son planas; en este diseño las posiciones de las pantallas quedan

definidas por las coordenadas de sus bordes, vease figura 10, dadas por las expresiones:



$$\begin{aligned}
 B &= (X_S, Y_S) \\
 F &= (X_P, Y_P) \\
 E &= (S, Y_P) \\
 G &= \left(L + S, \frac{D_2}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Fig. 10.

$$X_P = (S + L) \left\{ \frac{Y(f_1 + S) + \frac{f_1 I}{2F} S - \frac{I}{2} \cdot f_1}{\left[\frac{D_2 - I}{2} f_1 + \left(\frac{f_1 I}{2F} + Y \right) (S + L) \right]} \right\}$$

$$X_B = \frac{\left(-\frac{I}{2F} S + Y \right) L - \frac{D_1(L + S)}{2} + \frac{D_2 S}{2}}{\frac{D_2 - D_1}{2} - \frac{I}{2F} L}$$

$$Y_P = \left(\frac{D_2 - I}{2(S+L)} \right) X_P + \frac{I}{2}$$

$$Y_s = \frac{I}{2F} (X_s - S) + Y$$

En donde Y es un parámetro cuyo valor se encuentra al resolver la ecuación:

$$A_2 Y^2 + A_1 Y + A_0 = 0$$

$$A_2 = -D_1 (f_1 + F) (f_1 + S) + I f_1 \left(f_1 + S + \frac{f_1 S}{F} - F \right)$$

$$A_1 = \frac{D_1^2 (f_1 + S)^2}{2} + I^2 \frac{f_1^2}{2} \left[-3 + \frac{S}{F_1} + \left(1 + \frac{S}{F} \right) \left(\frac{f_1 S + F^2}{F(f_1 + S)} \right) \right]$$

$$- D_1 I f_1 - \left(\frac{f_1 S}{F} + \frac{S^2}{2F} + S - \frac{F}{2} + f_1 \right)$$

$$A_0 = \left(\frac{D_1^2 I (f_1 + S) f_1}{4} \right) \left(\frac{S}{F} + 1 \right) + \frac{D_1 I^2 f_1^2}{2} \left(\frac{3}{2} - \frac{S}{F} - \frac{S^2}{2F^2} \right)$$

Obsérvese que a mayor campo I mayor es la obstrucción central de luz en el primario debido a la pantalla del secundario.

La construcción de superficies esféricas frecuentemente se inicia con la fabricación de la esfera que permite generar con mayor facilidad, a partir de ella, la superficie esférica deseada. En el caso del hiperboloide para el primario de un sistema Ritchey-Chretien, se parte de una esfera de radio de curvatura:

$$R_{01} = R_1 - \frac{K_1 D_1^2}{8R_1};$$

ella intersecta al hiperboloide en su orilla por lo que disminuye el riesgo de que las zonas cercanas al borde resulten

defectuosas, dado que en este caso no se atacan durante la asferización. Véase figura 11. Es posible comenzar con una esfera de radio menor que aumente el riesgo anterior pero que con ella la cantidad de vidrio a quitar durante la asferización sea menor.

Para el hiperboloide del secundario la esfera con que se da comienzo debe tener un radio:

$$R_{02} = \frac{\left(\frac{D_2}{2}\right)^2 + X_2^2}{2X_2}$$

en donde X_2 se evalúa en $\frac{D_2}{2}$. Con esta esfera la cantidad de vidrio a quitar es mínima, ella intersecta al hiperboloide en su centro y en su orilla. Véase figura 12.

MATERIAL A QUITAR 

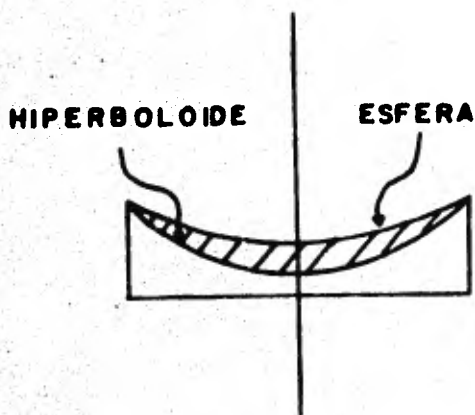


Fig. 11.

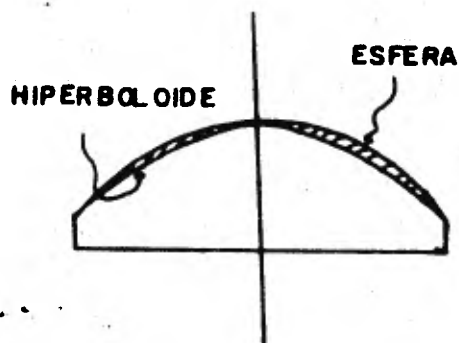


Fig. 12.

DISEÑO PARTICULAR.

La dimensión más importante en un telescopio es la abertura, su diámetro determina el poder de resolución y la cantidad de luz que el instrumento recolectará; ella está condicionada esencialmente en los telescopios profesionales por la aplicación a que se destinará el instrumento y por los recursos económicos disponibles.

En el caso presente se determinó que la abertura clara del primario fuese de 567 mm. y su distancia focal se eligió de 1300 mm, siendo por tanto la razón $f_1/D_1 = 2.29$; esta distancia focal relativamente corta disminuye las dimensiones del sistema mecánico con la consecuente disminución del costo del sistema total. El límite inferior en la distancia focal del primario lo impone la dificultad de construcción de la superficie, dificultad que crece rápidamente conforme la superficie es más esférica. El espesor del primario se eligió de 72 mm. haciendo por tanto la montura más ligera y subiendo su frecuencia natural de oscilación, cualidad deseable pues las vibraciones de baja frecuencia son las que más se tienen durante la observación. El peligro de tener un espesor pequeño en relación al diámetro del espejo es que éste puede flexionarse deteriorando la calidad de la imagen.

Por razones de compatibilidad con el equipo de apoyo disponible y de experiencia con los sistemas Ritchey-Chretien, la amplificación del secundario se escogió de tal manera que la razón F/D_1 de la combinación fuera 7.5. Obsérvese que una razón menor implicaría un secundario más grande dando una mayor obstrucción central de luz, o bien una razón f/D_1 menor del primario dificultaría mucho más la construcción del sistema. Por otro lado una razón mayor implicaría un campo de imagen menor así como aprovechar poco las ventajas del sistema Ritchey-Chretien, pues un sistema Cassegrain además

de tener poca coma a F/D grande permite emplear el foco del primario.

De acuerdo a las características del sistema mecánico y del equipo de apoyo se fijó el valor de $S = 500$ mm. El campo de imagen se eligió de 1° de acuerdo a la experiencia que se tiene en cuanto a la calidad de imagen que proveen este tipo de sistemas.

Para este sistema el radio de la superficie de Petzval es aproximadamente $r_p \approx 1140$ mm. De modo que para un campo de imagen de 1° la distancia entre los planos donde se forman las imágenes del centro del campo y de la orilla es del orden de 0.6 mm, por lo que si se consideran dichas imágenes puntuales y se proyectan sobre un plano intermedio a los mencionados su tamaño g es del orden de $g \approx 0.04$ mm, esto es 5 veces el diámetro del disco de Airy. Véase figura 13.

$$g = \frac{D_1 (I)^2}{16 F r_p}$$

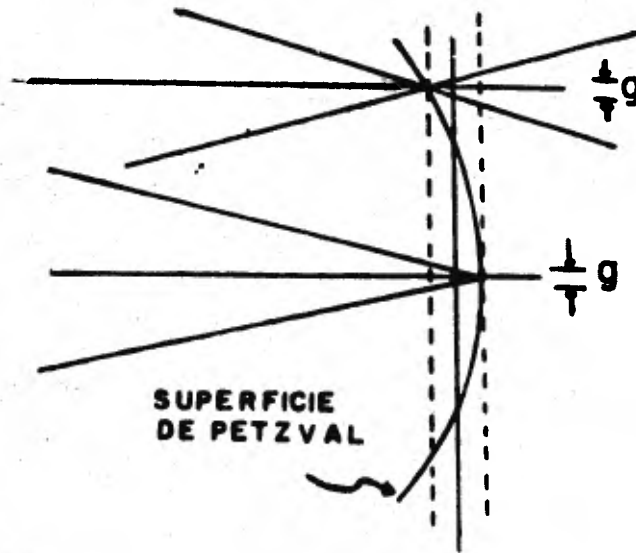


Fig. 13.

De lo anterior

- $D_1 = 567$
- $F = (7.5) D_1 = 4250$
- $A = 3.27$
- $L = 878$
- $d_2 = 184$
- $D_2 = 199$
- $R_2 = 1215$
- $R_1 = 2600$
- $d = 120$
- $I = 75$
- $K_1 = -1.09$
- $K_2 = -4.36$
- $X_P = 896$
- $Y_P = 78$
- $X_S = 1263$
- $Y_S = 124$
- $R_{01} = 2617$
- $R_{02} = 1224$

todas las dimensiones están en milímetros.

Para obtener un mayor provecho, a los sistemas con estas características se les provee de otro secundario el cual puede corregir la aberración de esfericidad pero no así la aberración de coma, debido a que la constante de conicidad del primario queda determinada por el primer secundario; en este caso se determinó que la relación focal del segundo secundario fuese:

$$\frac{F}{D_1} = 13.5$$

y el campo de imagen de $1/4^\circ$. La coma de este sistema no

crea muchos inconvenientes porque generalmente esta relación focal se utiliza para hacer fotometría en el centro del campo.

De acuerdo a lo precedente:

$$F = (13.5) D_1 = 7650$$

$$A = 5.88$$

$$L = 1039$$

$$d_2 = 114$$

$$D_2 = 119$$

$$R_2 = 630$$

$$I = 34$$

$$P = K_1 + 1 = -0.09$$

$$Q = P \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^3 \left(\frac{d_2}{D_1} \right)^4 = -0.78$$

$$K_2 = Q - \frac{4A}{(A-1)^2} - 1 = -2.76$$

$$X_p = 1046$$

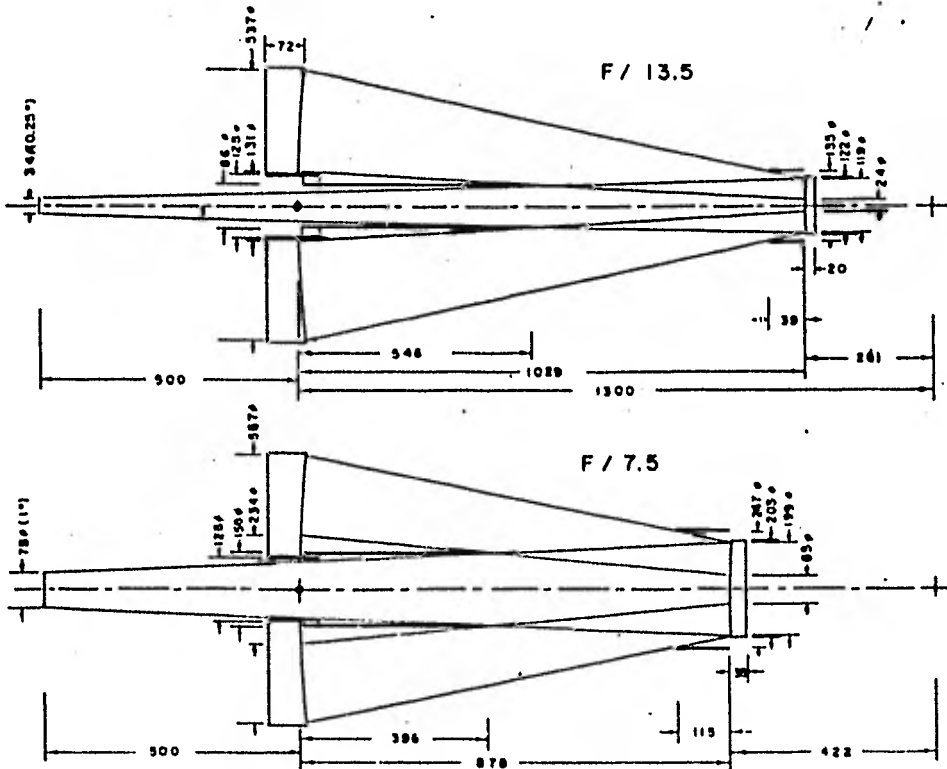
$$Y_p = 43$$

$$X_s = 1500$$

$$Y_s = 68$$

$$R_{02} = 634$$

En los dibujos siguientes aparecen esquematizados los sistemas anteriores así como sus elementos para los cuales aparece una gráfica que indica la diferencia que hay entre la superficie deseada y la esfera mencionada.



	F/13.5	F/7.5
LONGITUD FOCAL EQUIVALENTE	4200	7000
ESCALA	30	27
CAMPO UTA.	1°	19.5mm

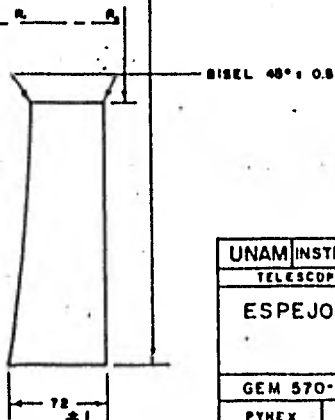
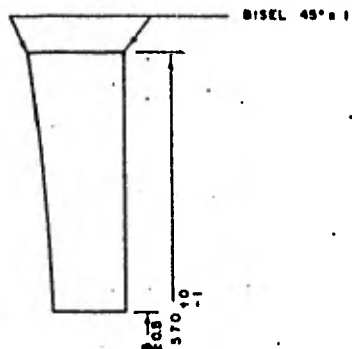
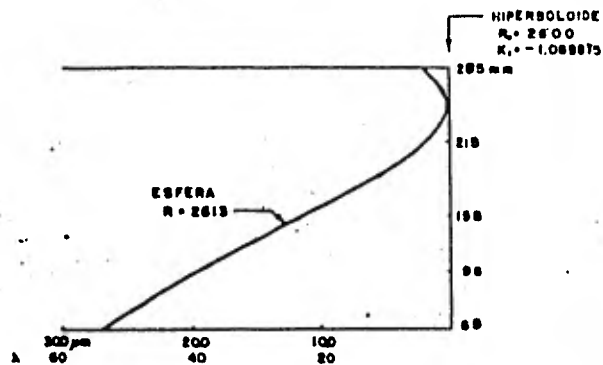
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPEJOS

	DIAMETRO	ESPEJO	PESO	RADIO DE CURVATURA	SUPERFICIE OPTICA	MATERIAL	
ESPEJO PRIMARIO	257 -170	F2	265	2000 -277	HIPERBOLA CONCAVA	PYREX	R ₁ = -100000
ESPEJO SECUNDARIO F2	110 -122	D0	25	2000	HIPERBOLA CONVEXA	PYREX	R ₂ = -27000
ESPEJO SECUNDARIO F/7.5	200 -207	D0	25	4200	ESFERICA CONVEXA	PYREX	R ₃ = -27000 BROWN BITCHES - CHARTER

UNAM INSTITUTO DE ASTRONOMIA			
TELESCOPIO GEM-750			
SISTEMA OPTICO Y CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS			
PROFESOR	DEF. GEM 570-0001	RA	GEM 570-0001
ESTUDIANTE	REV. GEM 500-01	224	REV. GEM 500-01
REVISIONES		ACOT MM	EDS 1:5

RADIO	CC	CM	TOL.	SUPERFICIE	FIGURA	PELICULA	ABER. CLARA
R ₁ HIPER.	✓			PULIDA 80-50	λ/10	ALUMINIO	567
R ₂	∞			ESMERILADA			

GEM 570-002

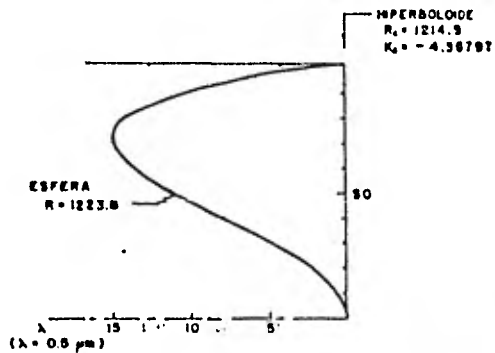


UNAM INSTITUTO DE ASTRONOMIA	
TELESCOPIO GEMINIS 570	
ESPEJO PRIMARIO	
GEM 570-002	SPACA 10020-2 1.2.75
PYHEX	5 ALUM 10 Feb 78
ACOT MM	ESC 1:2 5 ALUM 31.11.78

REVIZADO 3 MAR 81

RADIO	CC	CX	TKL	SUPERFICIE	FIGURA	PELICULA	ADER. CLANA
R ₁ HIPER		✓		PULIDA 80-50	λ/10	ALUMINIO	199
R ₂ 00				ESMERILADA			

GEM 570-003



HIPERBOLOIDE
R₁ = 1214.9
R₂ = -4.36797



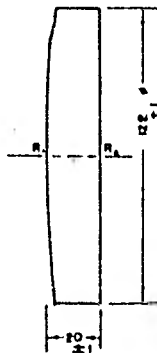
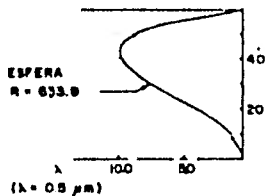
UNAM	INSTITUTO DE ASTRONOMIA		
TELESCOPIO GEMINI 570			
ESPEJO SECUNDARIO			
F / 7.5			
GEM 570-003	12/1	1/3	1/3
PYREX	0.005	0.005	0.005
ACOT MM	ESC 1:1	0.005	0.005

REVIZADO 9 MAR 61

RADIO	CC	CI	TOL	SUPERFICIE	FIGURA	PELICULA	ABER. CLARA
R ₁	HIPER		✓	PULIDA 80-50	λ/10	ALUMINIO	118
R ₂	OP			ESMERILADA			

GEM 570-004

HIPERBOLÓIDE
 $R_1 = 630.1$
 $K_1 = -2.76822$



UNAM INSTITUTO DE ASTRONOMIA	
TELESCOPIO GEMINIS 570	
ESPEJO SECUNDARIO	
F/13.5	
GEM 570-0D4	1978
PYREX	R. P. L. 14/11/78
ACOT MM	ESC 1:1

REVISADO 8 MAR 81

P A R T E I I

CONSTRUCCION

CONSTRUCCION DE UNA SUPERFICIE OPTICA.

Las técnicas y materiales a emplear en la generación de superficies ópticas están determinadas por la precisión que han de tener éstas; cuando desde el punto de vista teórico las imágenes formadas por el sistema diseñado son óptimas la precisión en las superficies queda impuesta por la calidad de imagen deseada. En base al conocimiento que se tiene acerca de la naturaleza ondulatoria de la luz y a las consecuencias que se derivan, en cuanto a que la imagen de un objeto puntual formado por un sistema ideal de abertura circular no es puntual sino el patrón de Airy, ha sido posible estimar cuánto afectan los defectos de fabricación de los componentes ópticos la calidad de la imagen e imponer un criterio de precisión para la fabricación. Este criterio lleva el nombre de Rayleigh (véase apéndice) y establece que si el error en el frente de onda esférico formado por un sistema óptico no es mayor que $1/4$ de la longitud de onda de la luz utilizada, el disco de Airy no se verá afectado sensiblemente, por lo que se podrá esperar que el sistema conserve su resolución original. La turbulencia atmosférica tiene como efecto deformar el frente de onda incidente sobre el objetivo, causando que en las mejores noches de los mejores lugares de observación la resolución de los telescopios se vea limitada a alrededor de $0.5''$. ($''$ representa segundo de arco). La dificultad de fabricación de los sistemas para telescopio de gran abertura junto con el límite de resolución impuesto por los fenómenos atmosféricos han dado otro criterio de precisión (Meinel¹⁰) para la fabricación de grandes objetivos; el cual establece que el 50% de la luz incidente debe ser

concentrada en un círculo situado en el foco cuyo diámetro subtienda un ángulo con respecto al vértice de la superficie principal del sistema de 0.3", el 80% dentro de 0.6" y el 100% dentro de 1.0".

Las longitudes de onda más usadas corresponden a la región visible; esto es, son del orden de 0.0005 mm. De ello se comprende que el material a emplear para la construcción de superficies ópticas debe ser térmica y mecánicamente estable en este orden de magnitud, y que las técnicas de fabricación deben permitir quitar cantidades de material y detectar estos cambios también en este orden de magnitud.

La fabricación de superficies ópticas para espejos de telescopio frecuentemente se realiza en discos de vidrio aunque en ocasiones se emplean metales u otros materiales. Por lo general el vidrio tiene un coeficiente de dilatación lineal pequeño y para convertirlo en espejo puede ser recubierto con una capa metálica de plata o aluminio mediante un proceso químico de reducción o bien a través de la evaporación del metal en vacío. La estabilidad mecánica se logra mediante la relación diámetro-espesor del espejo y por medio de la rigidez de su soporte.

Cuando dos superficies de extensión similar se frotan entre sí en todas direcciones y entre ellas hay un agente abrasivo la forma que tienden a tomar es la esférica, pues es la única que permite que las dos superficies hagan contacto en toda su extensión independientemente de su posición. De este hecho se desprende la técnica para la generación de superficies de gran precisión y por él se comprende que la forma esférica es la más fácil de obtener, razón por la que es deseable diseñar las componentes de los sistemas ópticos con superficies esféricas; sin embargo cuando el diseño lo exige y se tiene que fabricar una superficie asférica frecuen

temente el comienzo para ello es generar el casquete esférico que permite obtener la superficie esférica con mayor facilidad.

El tallado de una superficie óptica por el método de frotamiento envuelve cuatro etapas, a saber: generado, esmerilado, pulido y corrección; cada una de ellas constituye una aproximación que es cada vez más fina a la superficie teórica que se desea. Profesionalmente estas etapas se realizan con ayuda de máquinas, aunque es posible llevarlas a cabo manualmente cuando las piezas no son muy grandes.

En el generado se lleva al vidrio a la forma física adecuada; es decir, se dá el diámetro, espesor y curvaturas que especifica el diseño. Generalmente el vidrio para la fabricación de componentes ópticos se expende en discos pues esta forma facilita la generación de superficies dada la técnica empleada para ello, sin embargo cuando se obtiene en láminas se procede a recortar el disco; para ello hay varios métodos que van desde los rudimentarios que se llevan a cabo con herramientas fácilmente adquiribles hasta los modernos que utilizan tornos para vidrio.

Una vez que se cuenta con el disco de vidrio adecuado se procede a generar en primera aproximación en una de sus caras la superficie esférica que especifica el diseño, para ello ésta se frota contra la cara de otro disco similar llamado herramienta interponiendo entre ellos un agente abrasivo. Los movimientos de frotación son oscilatorios; mientras que la herramienta permanece estática el centro del disco que será el espejo realiza un movimiento de oscilación en zig-zag sobre el centro de la herramienta, variando poco a poco su dirección de oscilación de modo que vaya girando sobre el disco estático. La amplitud de oscilación es grande (alrededor de las $3/8$ partes del diámetro de la herramienta)

asi como los desplazamientos laterales. Con esta forma de proceder se consigue que la acción de desbaste sea mayor en el centro del espejo y en las zonas cercanas a la orilla de la herramienta. A medida que progresa el desbaste el disco superior se va haciendo cóncavo mientras que el otro convexo, la forma que toman en virtud de la gran amplitud de los movimientos de frotación es esférica; por lo que cuando el radio de curvatura, medido con un esferómetro en algunos puntos de la superficie del espejo, empieza a coincidir con el valor deseado se disminuye la amplitud del movimiento de oscilación para que la superficie se empareje y por tanto se aproxime más a la esfera requerida.

Como en esta acción de gran desbaste se necesita un abrasivo de grano grueso (alrededor de 0.1 mm. de diámetro promedio) las superficies de la herramienta y del espejo quedan con una gran cantidad de pequeños defectos cuya magnitud es un poco menor que la medida del abrasivo. Este acabado también queda cuando la generación se realiza en máquina. La etapa del esmerilado tiene un doble fin, primero: acercar la forma general de la superficie en fabricación a la esfera requerida con una precisión que ya es del orden que interesa obtener (del orden de las longitudes de onda de la luz), y segundo: disminuir considerablemente la magnitud de los pequeños defectos, pozos y fracturas, en la superficie. Para conseguir el primer fin se realizan movimientos de frotación similares a los mencionados pero cuya amplitud de oscilación es menor (alrededor de 1/4 parte del diámetro de la herramienta). Asi mismo se invierten los discos de cuando en cuando es decir, la herramienta ocupa el lugar del espejo y viceversa. Para conseguir el segundo fin se va cambiando la medida promedio del abrasivo por una más fina: 86, 39, 22 y 10 micras de diámetro promedio de los granos; hasta 5 ó 3 micras. El cambio de abrasivo se hace cuando la magnitud de los pequeños defectos es pareja en toda la superficie.

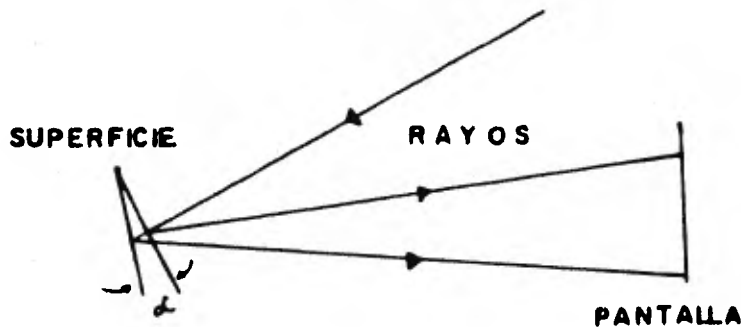
Hay varios tipos de abrasivos como por ejemplo, el carburo de silicio, el esmeril y el corindón; ellos mezclados con agua forman el ingrediente de abrasión. La manera de probar la superficie en estas etapas es mediante un esférómetro y por inspección visual; el objetivo de la prueba es asegurar un mismo radio de curvatura sobre toda la extensión de la superficie, y la carencia de rayones y accidentes sobre ella. Al comienzo del esmerilado y con el fin de evitar deformaciones posteriores en la superficie debidos a la liberación de esfuerzos internos, se práctica parcialmente la perforación central del primario que requieren los sistemas tipo Cassegrain, la cual es terminada al cabo de la etapa de corrección.

La acción de los abrasivos que es netamente de desbaste deja a la superficie translúcida mientras que el pulido, cuya naturaleza ha sido ampliamente discutida, tiene como finalidad hacer transparente la superficie cerrando completamente los pozos dejados por el último abrasivo fino. Para ello una de las caras de la herramienta se recubre con una capa de chapopote y brea a la que se le hace tomar la forma de la superficie a pulir mediante un prensado contra ella. A la superficie de chapopote se le practican canales en forma reticular con el fin de que el agente pulidor se distribuya uniformemente. Entre los diversos pulidores que hay se mencionan: el óxido de cerio, el óxido de titanio, la barnesita y el rojo (oxalato ferroso calcinado). Los movimientos comunicados al espejo y a la herramienta, así recubierta, son similares a los que se hacen durante el esmerilado. Estos movimientos pueden ser variados así como el tamaño de la herramienta con el objeto de atacar determinada zona de la superficie y dar de este modo la aproximación final a la forma deseada, lo que propiamente es ya la etapa de corrección.

Mientras que las etapas de generado, esmerilado y

pulido se llevan a cabo con relativa facilidad empleando métodos bien establecidos, la etapa de corrección es difícil - pues en ella se ajusta la superficie a la estrecha tolerancia impuesta por la teoría y la experiencia. El gran número de variables que intervienen en el pulido de una superficie causan que el procedimiento a seguir para su corrección sea prácticamente único.

Cuando una superficie empieza a pulirse es capaz de reflejar suficiente luz como para poder realizar una prueba óptica que permita controlar su forma. Las pruebas ópticas más sencillas, basadas en la aproximación geométrica del comportamiento de la luz, son: la de Foucault, Ronchi y la del alambre; consisten en formar la imagen de una fuente de luz puntual o de una fuente de luz en forma de rendija para estudiarla y compararla con la imagen teórica prevista, dando como resultado de la comparación el conocimiento de los defectos de la componente o sistema óptico bajo prueba. Mientras que los métodos mecánicos de prueba no son suficientemente precisos, las pruebas ópticas alcanzan la precisión necesaria debido a que se basan en el principio de la "palanca óptica": Un pequeño cambio en la posición angular de una superficie que refleja un haz de luz repercutirá en un gran cambio en el lugar de incidencia de este haz. Véase figura 14.



"PALANCA ÓPTICA"

La imagen formada por un espejo esférico cóncavo de una fuente de luz puntual colocada en su centro de curvatura se localiza precisamente en este lugar, pues los rayos de luz inciden perpendicularmente sobre la superficie dirigiéndose - después de la reflexión hacia el centro de curvatura, de acuerdo con lo que establece la ley de la reflexión.

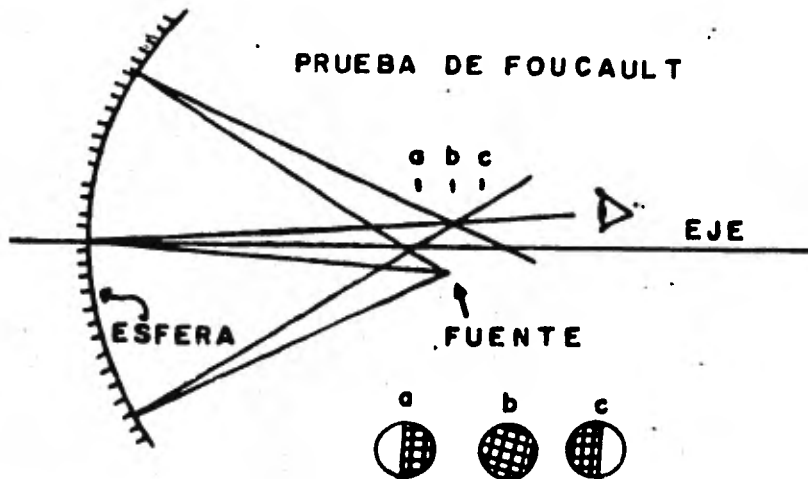


Fig. 15.

Desde el punto de vista de la óptica geométrica - tal imagen es puntual y es de esperar que si la fuente de luz se desplaza una pequeña distancia del centro de curvatura, la imagen puede considerarse todavía puntual y se localice, dada la simetría, a la misma distancia del centro de curvatura que la fuente de luz pero del otro lado del eje óptico, definido por los centros físico y de curvatura del espejo. Si los rayos que forman la imagen son interceptados por el filo de una navaja en las posiciones "a" (intrafocal), "b" (focal) y "c" (extrafocal), Véase dibujo (obsérvese que por la simetría de revolución de las superficies deseadas basta hacer su representación gráfica con una sección), se observa que en la posición "a" el espejo se oscurece por el lado que se introdujo la navaja, en la posición focal "b" se oscurece uniformemente todo el espejo y en la posición "c" se oscurece primero por el la-

do contrario al que se introdujo la navaja. Cuando la superficie tiene un defecto los rayos reflejados por él no pasarán por el punto focal de modo que al comenzar a interceptar los rayos con la navaja en el punto "b" el defecto se verá más iluminado o más oscuro que el resto de la superficie. Este procedimiento constituye la prueba de Foucault y puede ser usado para conocer los defectos de una superficie así como para encontrar con precisión la posición focal. Cuando se desea probar una superficie esférica cóncava aparece una complicación debido a que no todas las rectas normales a la superficie intersectan al eje óptico en el mismo punto, como es el caso de una esfera. Esta complicación se remedia calculando teóricamente las posiciones en donde deben intersectar al eje óptico las normales correspondientes a diferentes puntos sobre un diámetro de la superficie. Entonces mediante una pantalla que aisla pequeñas regiones centradas en estos puntos colocada sobre la superficie y la prueba de Foucault se determinan experimentalmente dichas posiciones; dando como resultado de la comparación de estos datos con los valores teóricos y los correspondientes a otros diámetros, una estimación del estado de la superficie en cuanto a su asfericidad. En el caso de una superficie hiperboloide las posiciones de las intersecciones de las normales están dadas por la relación:

$$z = R_0 - KZ(y) \approx R_0 - \frac{k}{2R_0} y^2 - \frac{K(K+1)}{8R_0^3} y^4,$$

en donde z es la distancia del vértice al punto de intersección sobre el eje de la recta normal a la superficie en el punto $(Z(y), Y)$, R_0 es el radio de curvatura en el vértice, K la constante de conicidad ($-\epsilon^2$) y $Z(y)$ la sagita de la superficie a la distancia " y " del eje. Véase figura 16.

Una variante del método anterior que también permite determinar el punto de intersección con el eje óptico de la recta normal a una superficie, es la prueba del alambre en

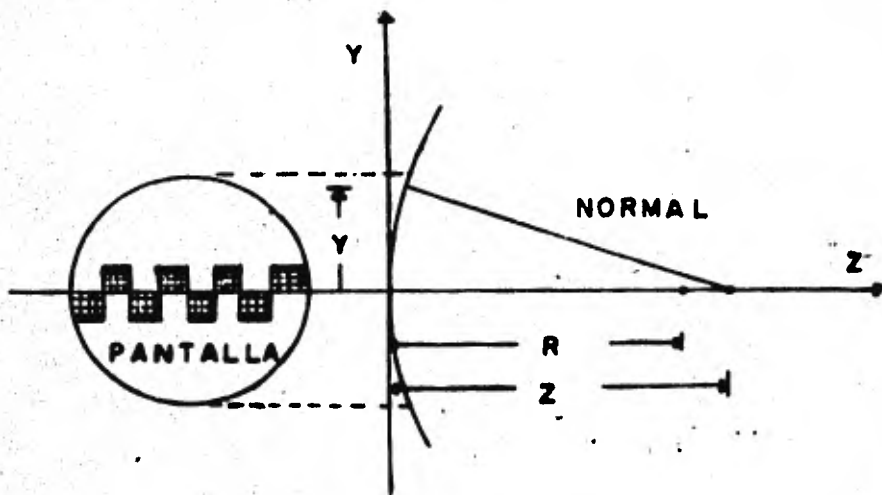


Fig. 16.

la que en vez de navaja se emplea un alambre cuya sombra en la superficie esférica bajo prueba, cuando se introduce adecuadamente en el haz de luz reflejado, es un anillo concéntrico a la superficie atravesado diametralmente por una banda. Véase figura 17.

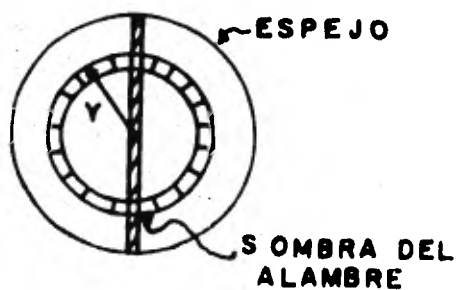


Fig. 17.

El radio "y" medio de este anillo varía según el grado de asféricidad y de acuerdo a la posición del alambre sobre el eje; esta posición es justamente el lugar de intersección de las normales, correspondientes a la distancia "y". Esta prueba se emplea en superficies esféricas con la ventaja de que los efectos de difracción son simétricos y dada su naturaleza la evaluación experimental resulta sencilla. Los métodos de prueba mencionados pueden llevarse a la práctica utilizando una fuente de luz en forma de rendija en vez de usar una fuente puntual. Con ello se gana luminosidad y la interpretación prácticamente no cambia.

Obsérvese que la imagen de un objeto extendido de dimensiones pequeñas situado cerca del centro de curvatura de un espejo esférico no sufre defectos apreciables por lo que se le puede considerar para los fines prácticos igual al objeto, de este hecho surge la prueba de Ronchi en la que como objeto se coloca una rejilla de líneas paralelas equidistantes cuya imagen es comparada con una rejilla similar. La comparación se lleva a efecto en virtud de las sombras de las líneas que se proyectan sobre la superficie bajo prueba, en virtud de la fuente de luz colocada atrás de la rejilla objeto. Así en el caso de un espejo esférico las sombras deben ser bandas equidistantes paralelas y cualquier desviación de éstas indica un defecto. Véase figura 18.

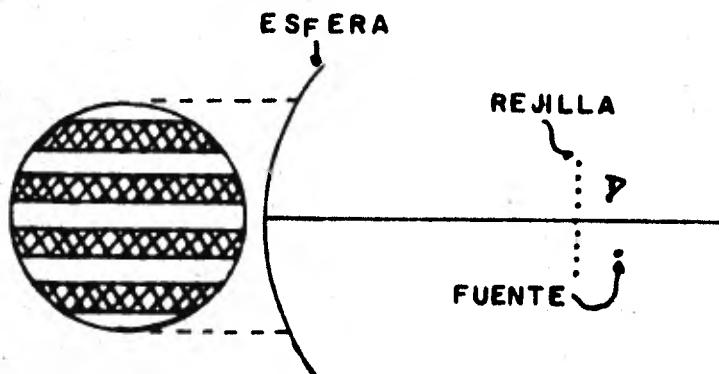


Fig. 18.

PRUEBA DE RONCHI

Las pruebas anteriores permiten probar superficies cóncavas debido a que estas son capaces de formar imágenes reales por sí solas, lo que no se puede decir para las superficies convexas por lo que para probarlas es necesario auxiliarse de otros espejos que permitan la formación de una imagen real. La prueba de Hindle para superficies hiperboloides convexas consiste en hacer coincidir uno de los focos del hiperboloide a probar con el centro de curvatura de una esfera, véase figura 19. Al colocar una fuente puntual en el otro foco del hiperboloide, los rayos después de reflejarse en él se dirigirán, gracias a la propiedad geométrica del hiperboloide, hacia la esfera como si emergieran de su centro de curvatura. Después de reflejarse los rayos sobre la esfera se dirigirán hacia su centro de curvatura que coincide con el foco del hiperboloide y finalmente en virtud de la propiedad mencionada serán proyectados en su foco, donde se localiza la

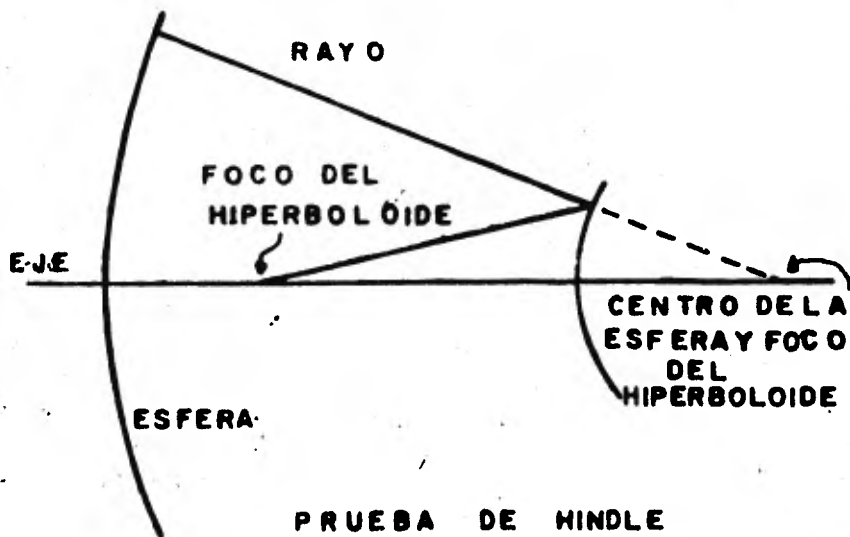


Fig. 19.

fuelle puntual. El resultado práctico de este comportamiento de los rayos análogo al de una esfera cuando se examina en su centro de curvatura es que la evaluación de un hiperboloide -

sea similar a la de una esfera en cuanto a lo que se debe observar en las pruebas mencionadas.

A las pruebas de esta naturaleza, es decir, aquellas en que se basan en el hecho de que la imagen de una fuente puntual es puntual, se les llama nulas. Estas son las más eficaces para probar superficies, pues cualquier defecto origina que los rayos que se reflejan en él no pasen por el punto focal en donde el efecto es detectado fácilmente. Esta detección de los errores no es fácil cuando se prueba un hiperboloide cóncavo dado que teóricamente no todos los rayos, después de la reflexión, deben de pasar por un mismo punto. cuando la iluminación es con una fuente puntual de luz en el eje. Sin embargo cuando un hiperboloide cóncavo no se aleja demasiado de un paraboloide es posible hacerle una prueba casi nula. Para ello se le ilumina con una fuente puntual desde el lugar que sería el foco del paraboloide; los rayos después de reflejarse en el hiperboloide emergerán casi paralelas y después de reflejarse 180° en virtud de un plano colocado para este fin, véase figura 20, incidirán nuevamente en el hiperboloide que los dirigirá hacia un foco casi puntual.

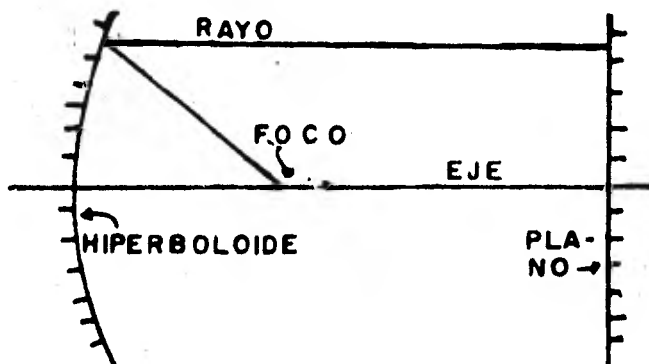


Fig. 20.

Para dar por terminadas las superficies de las componentes de un sistema óptico reflector para telescopio se requiere que ellas no presenten en forma considerable, bajo las pruebas visuales y ópticas, pequeños defectos como: rayo

nes, pozos, rugosidades, zonas anulares, etc; así mismo se requiere que el frente de onda formado por todas las superficies no se aleje de la tolerancia particular impuesta por el diseño y que desde el punto de vista geométrico la luz de un objeto puntual distante incidente sobre la abertura del sistema, sea concentrada en la forma que también especifica el diseño.

CONSTRUCCION PARTICULAR

El material empleado para la fabricación de los espejos del sistema diseñado fue vidrio pyrex; las etapas de generado, esmerilado y pulido no presentaron dificultades considerables en su realización que fue llevada con ayuda de máquinas y según los métodos que describen los textos señalados en las referencias y en la bibliografía.

La máquina utilizada para la realización de las tres últimas etapas de fabricación de las superficies consiste de una base circular que puede girar a diferentes velocidades en donde se coloca concéntricamente la pieza a trabajar. El movimiento de la herramienta es comunicado por el propio movimiento del espejo y por un vástago sujeto a un mecanismo que le transfiere un movimiento oscilatorio a lo largo de un segmento de circunferencia. La amplitud de este movimiento se puede variar a voluntad así como su posición media que puede ser algún punto a lo largo del radio de la superficie que se trabaja. Véase figura 21.

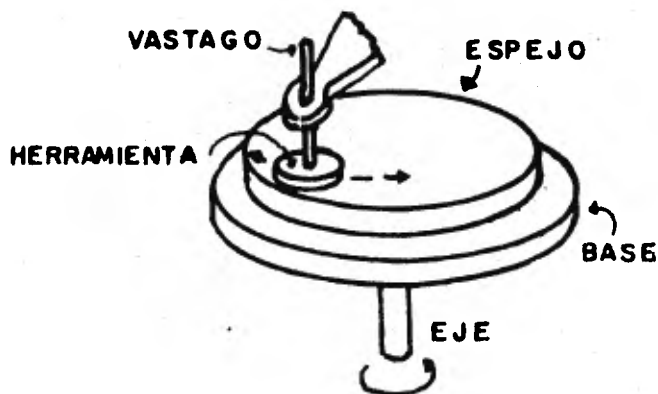


Fig. 21.

MAQUINA

Este mecanismo permite intercambiar fácilmente herramientas de tamaños distintos así como variar sus movimien

tos con el fin de atacar determinada región de la superficie.

Dado el poco espesor del primario en relación a su diámetro, para evitar durante la fabricación flexiones que introdujeran defectos no de revolución, fue necesario proveerle de un descanso uniforme sobre la base de la máquina y girarlo de cuando en cuando con respecto a la misma base. Los defectos asimétricos en la superficie son los más graves por el tiempo que lleva su corrección. Obsérvese que toda la teoría y las pruebas presuponen superficies de revolución.

El método para realizar la corrección lo sugirió la gráfica que indica la diferencia que hay entre el hiperboloide deseado y la esfera con que se comenzó, de acuerdo a ella se quitó con una herramienta pulidora mayor cantidad de vidrio a medida que se atacaban zonas más próximas al centro del espejo. Para ello en vez de emplear una herramienta grande que hubiera dificultado la asferización se usó una herramienta de 150 mm. de diámetro, cuyos movimientos de pequeña amplitud fueron teniendo mayor tiempo de acción a medida que su posición media se acercaba al centro del espejo; eran necesarios alrededor de siete pasos para cubrir de este modo de la orilla hasta el centro del espejo. Durante este procedimiento que fue repetido una y otra vez, variando las posiciones medias de oscilación de la herramienta para conseguir una superficie pareja, se escribió una lista de los efectos que produjeron sobre las diferentes zonas del espejo, los distintos movimientos comunicados a la herramienta, con el fin de que esta información sirviera para dar término a la corrección; para ello se emplearon las pruebas de Foucault, Ronchi y del alambre, las dos primeras dieron información de cuan tersa estaba la superficie y de defectos pequeños sobre ésta, mientras que la última fue usada para determinar el grado de asferización. Como una prueba complementaria en las últimas fases de la corrección se realizó una prueba casi nu

la, según se ha explicado, con ayuda de un plano de 310 mm. de diámetro; aunque esta prueba fue parcial, por el diámetro del primario, permitió observar defectos anulares invisibles con las pruebas anteriores cuando se efectuaron en el centro de curvatura de la superficie.

Las tres primeras etapas de fabricación del espejo primario se realizaron en aproximadamente un mes trabajando un promedio de cuatro horas diarias; mientras que la etapa de corrección se llevó el doble de este tiempo, el cual resultó largo debido a que la etapa del esmerilado se concluyó con una esfera en vez de haber acabado con una superficie más cercana a la deseada.

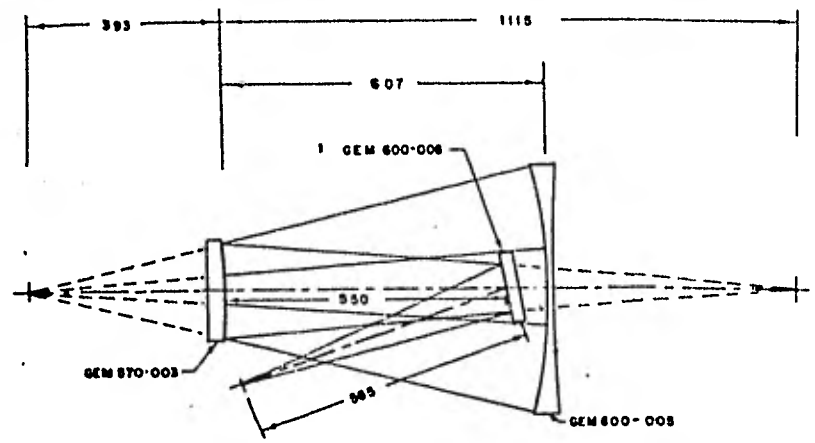
Los dibujos siguientes ilustran la disposición de los espejos para la prueba de Hindle de los secundarios F/13.5 y F/7.5. Para este último la etapa de corrección quedó pendiente; las distancias que hay entre los focos de un hiperboloide y su vértice están dadas por la expresión:

$$f^{\pm} = \frac{R}{e^2 - 1} (1 \pm e)$$

en donde e es la excentricidad y R el radio de curvatura en su vértice. Cuando la esfera que se emplea en la prueba de Hindle no tiene perforación central es necesario auxiliarse de un espejo plano que dé acceso al foco de prueba. La alineación de los espejos en esta prueba se realizó con ayuda de un laser.

Un divisor de haz permitió que el haz del laser fuera reflejado normalmente por el centro de la esfera de modo que fue posible volver a reflejar el haz normalmente por el vértice del espejo secundario con lo cual su eje y el radio central de la esfera quedaron colineales. Véase figura 22. Por último se colocó el plano auxiliar de tal manera que des-

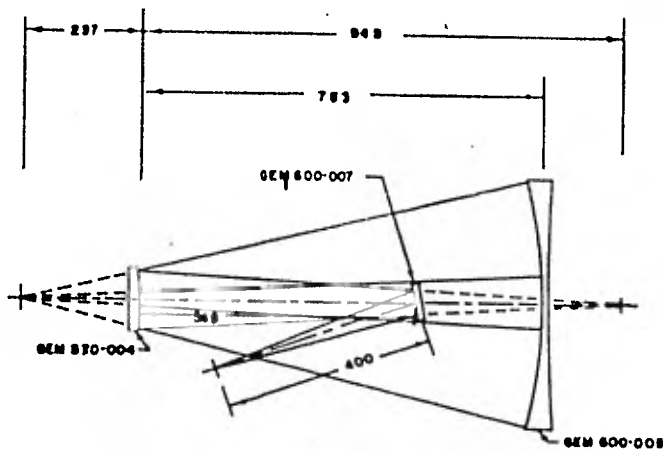
GEM 570-011



UNAM INSTITUTO DE ASTRONOMIA							
TELESCÓPIO GEMINIS 570							
PRUEBA DE HINDLE F/7.5							
GEM 570-011	<table border="1"> <tr> <td>APR 68</td> <td>27</td> </tr> <tr> <td>6 RLC</td> <td>15 Feb 78</td> </tr> <tr> <td>6 RLC</td> <td>15 Feb 78</td> </tr> </table>	APR 68	27	6 RLC	15 Feb 78	6 RLC	15 Feb 78
APR 68	27						
6 RLC	15 Feb 78						
6 RLC	15 Feb 78						
ACOT MM	ESC 1:5						

REVISADO 3 MAR 71

GEM 570-012



UNAM INSTITUTO DE ASTRONOMIA

PRUEBA DE
HINDLE F/13.5

GEM 570-012	1000	1000	1000
ACOT MM	ESC 1:8	10 Feb 78	21 Feb 78

REVISADO 28 FEB 81

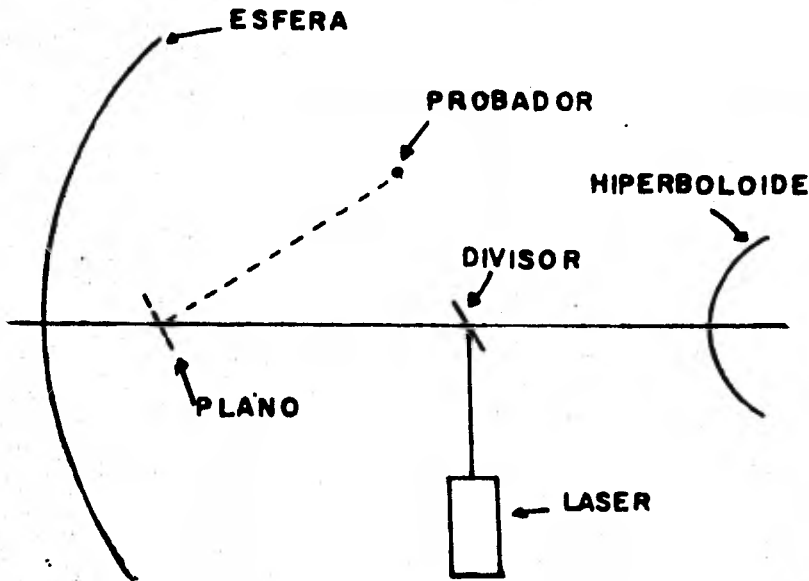


Fig. 22.

pués de reflejarse el haz del laser en él incidiera sobre el probador.

Como la cara posterior del secundario F/13.5 podía reflejar luz durante la prueba de Foucault y de Ronchi se observó un reflejo adicional, debido a esta cara, que permitió al centrarlo realizar una alineación más precisa.

Cuando se trabaja una superficie óptica las zonas cercanas a su orilla son las más difíciles de trabajar. Para facilitar la corrección del secundario F/13.5 se comenzó a trabajar con un diámetro de 150 mm. el cual se redujo al término de esta etapa a 122 mm.

De nuevo, la manera en que se llevó a cabo la corrección la sugirió la gráfica que indica la diferencia entre el hiperboloide deseado y la esfera con que se dió comienzo. El trabajo se hizo con herramientas de diámetros 18, 25 y 145 mm.; Las dos primeras se utilizaron para realizar la asferización mientras que la última se empleó de cuando en cuando para eliminar los defectos asimétricos que se generan cuando

se trabaja por un tiempo prolongado con herramientas tan pequeñas. En este caso se hacía girar rápidamente el secundario mientras que se sostenía concéntricamente sobre él la herramienta, que permanecía estática. Los movimientos realizados por las herramientas pequeñas fueron similares a los que se hicieron en la corrección del primario, excepto que en esta ocasión la región más desbastada fue la que indica la gráfica mencionada. La herramienta más pequeña se usó para trabajar las zonas cercanas a la orilla.

Las tres primeras etapas de fabricación de este secundario tomaron una semana trabajando un promedio de cuatro horas diarias mientras que la corrección se llevó tres veces este tiempo.

RESULTADOS.

A continuación se presentan los datos obtenidos con las pruebas de Foucault y del alambre mostrando la manera en que con ellas se determinó los perfiles del primario y secundario para algunas secciones, de acuerdo al método explicado por Texereau¹¹. Para determinar el perfil de la superficie del primario, ésta fue dividida en ocho zonas anulares de aproximadamente la misma área; para cada recta normal al punto medio de estas zonas se determinó teóricamente y experimentalmente con la prueba del alambre los puntos de intersección con el eje óptico. La distancia Δz entre el punto teórico y el punto experimental de cada zona permitió calcular la diferencia angular α :

$$\alpha = \frac{y(\Delta z + K)}{R_1^2} \quad (K \text{ es una constante de ajuste})$$

entre la tangente de la superficie teórica y la tangente a la superficie construida.

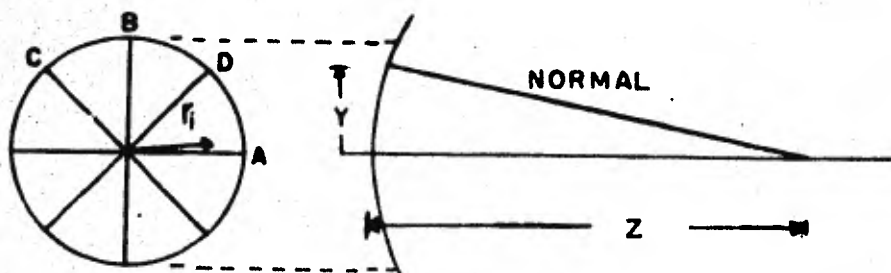
Al conocer las cantidades anteriores para cada zona

se hizo una integración gráfica que muestra la superficie construida con respecto a la teórica; para ello cada diferencia angular se multiplicó por el ancho A de la zona correspondiente, dando como resultado de estos productos las diferencias de ordenadas de los segmentos de recta que al unirlos por sus extremos, representan el perfil de la superficie.

Esta integración gráfica se hizo para cuatro direcciones diametrales diferentes A, B, C y D. La tabla siguiente sintetiza la información necesaria.

TABLA 1 PRIMARIO.

FIGURA 1 PARA TABLA 1



zona		1	2	3	4	5	6	7	8		
1	r_i (límites)	62.5	101.6	138.9	171.0	197.5	221.25	242.75	262.0	283.0	
2	A	39.1	37.3	32.1	26.5	23.8	21.5	19.3	21.0		
3	Y	82.5	120.75	157.0	185.0	210.0	232.5	253.0	271.0		
4	$\frac{YA}{R_1^2} \times 10^4$ (R=2600)	4.7	6.6	7.4	7.2	7.4	7.4	7.2	8.4		
5	$(z_1) - (z_1)$ Teórico	0	1.63	3.74	5.14	7.81	9.89	11.98	13.96		
6	$(z_1) - (z_1)$ medido	a	0	1.64	3.83	5.88	7.88	9.98	12.00	13.94	
		b	0	1.68	3.82	5.85	7.86	9.96	12.01	13.97	
		c	0	1.63	3.83	5.85	7.88	9.97	12.00	13.96	
		d	0	1.64	3.86	5.88	7.92	9.98	12.06	14.01	
7	$\Delta z + K$	$K_a=0.06$	a	+0.06	+0.05	-0.03	-0.08	-0.01	-0.03	+0.04	+0.08
		$K_b=0.06$	b	+0.06	+0.01	-0.02	-0.05	+0.01	-0.01	+0.03	+0.05
		$K_c=0.06$	c	+0.06	+0.06	-0.03	-0.05	-0.01	-0.02	+0.04	+0.06
		$K_d=0.08$	d	+0.08	+0.07	-0.04	-0.06	-0.03	-0.01	0.00	+0.03
		promedio		+0.06	+0.05	-0.03	-0.06	-0.01	-0.02	+0.03	+0.06
8	$4 \times 7 \times 10^4$	a	+0.28	+0.33	-0.22	-0.57	-0.07	-0.22	+0.29	+0.67	
		b	+0.28	+0.07	-0.14	-0.36	+0.07	-0.07	+0.21	+0.42	
		c	+0.28	+0.4	-0.22	-0.36	-0.07	-0.14	+0.29	+0.50	
		d	+0.37	+0.46	-0.29	-0.43	-0.22	-0.07	0.0	+0.25	
		promedio		+0.30	+0.32	-0.22	-0.43	-0.07	-0.13	+0.20	+0.46
9	$\frac{J}{P}$	+1.4	+1.6	-1.3	-3.0	-0.6	-1.3	2.0	4.0		

El primer renglón indica los límites de las zonas y el segundo su ancho "A". El tercero señala la ordenada "y" del punto que define la recta normal de cada zona, para la cual se determinó su punto de intersección con el eje "z". El cuarto renglón muestra el producto

$$\frac{YA}{R_I^2} \times 10^4.$$

El quinto señala la distancia entre el punto de intersección con el eje de la recta normal a cada zona y el punto de intersección con el eje de la recta normal a la primera zona, esto es: $z_1 - z_1$. El sexto renglón es equivalente al anterior pero con los datos finales determinados experimentalmente para cuatro diámetros diferentes A, B, C y D. Cada uno de estos es el promedio de cuatro mediciones hechas por dos observadores; la necesidad de llevar a cabo esta estadística responde a que los datos obtenidos con la prueba del alambre son de naturaleza estocástica. El séptimo renglón es la diferencia entre el quinto y los datos del sexto más una constante de ajuste, esto es: $\Delta z + K = z_{\text{teórico}} - z_{\text{medido}} + K$. El octavo es el producto de los renglones cuarto y séptimo; los factores son la diferencia angular "α" entre las tangentes de la superficie teórica y fabricada, y el ancho "A" de cada zona; por lo que el producto expresa la diferencia de ordenadas, en los límites de la zona, del segmento de recta que representa en ese lugar a la superficie.

El renglón noveno muestra los valores de la aberración transversal de cada zona en el plano focal de la combinación con respecto al radio del disco de Airy, considerando un secundario perfecto.

La aberración transversal "J" es la distancia, medida perpendicularmente al eje, que hay entre el punto que se considera el foco del sistema y el lugar por donde pasa

el rayo desviado, debido al defecto de una zona particular, véase figura 23.

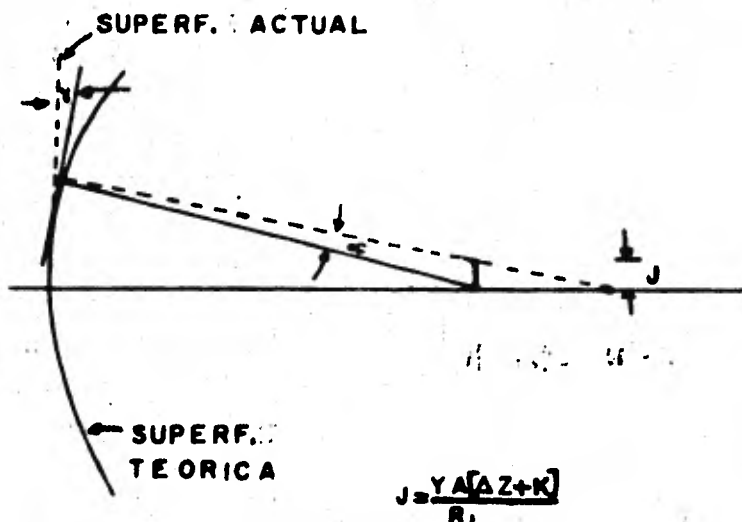


Fig. 23.

Para determinar el perfil del secundario se procedió en forma similar. La tabla 2 muestra los datos correspondientes a este espejo, para el cual se usaron cuatro zonas y se obtuvieron los datos de dos diámetros a y b. Se empleó la prueba de Foucault en combinación con una pantalla, pues como la prueba de Hindle es nula la prueba del alambre no puede ser usada. Los datos experimentales son el promedio de dos observaciones hechas por un observador. Hasta el renglón número 8 los datos son análogos a los de la tabla 1. El renglón noveno es la diferencia angular

$$\Omega = \frac{Y(\Delta f^+ + K)}{4(f^+)^2}$$

de cada zona. El último renglón muestra las aberraciones transversales de cada zona con respecto al radio del disco de Airy, considerando los errores del secundario. Para ello se ha empleado la expresión:

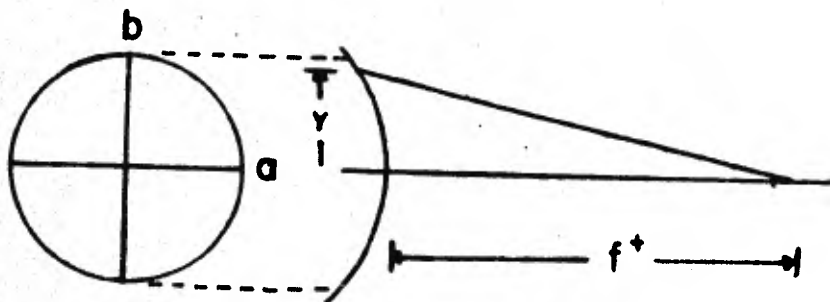
$$J \approx (L + S) \left(2\alpha \frac{D_1}{d_2} + 2\Omega \right)$$

que indica que los errores del secundario son menos importantes, desde el punto de vista geométrico, por el factor $\frac{d_1}{D_2}$; se asignó para este cálculo, la desviación angular Ω de la primera zona del secundario para las desviaciones angulares α de las dos primeras zonas del primario, la segunda para la tercera y cuarta, la tercera para la quinta y sexta, y la cuarta para la séptima y octava.

De las gráficas que aparecen a continuación las cuatro primeras representan el semiperfil del espejo primario para los diámetros indicados. Una línea horizontal indica la superficie ideal. La quinta es el promedio de las anteriores mientras que la sexta y séptima corresponden al semiperfil del secundario para dos diámetros diferentes. La octava es el promedio de estas últimas dos. Obsérvese que la escala horizontal para las gráficas del secundario es $\frac{D_1}{d_2}$. La novena es la suma de las ordenadas de la quinta y de la octava.

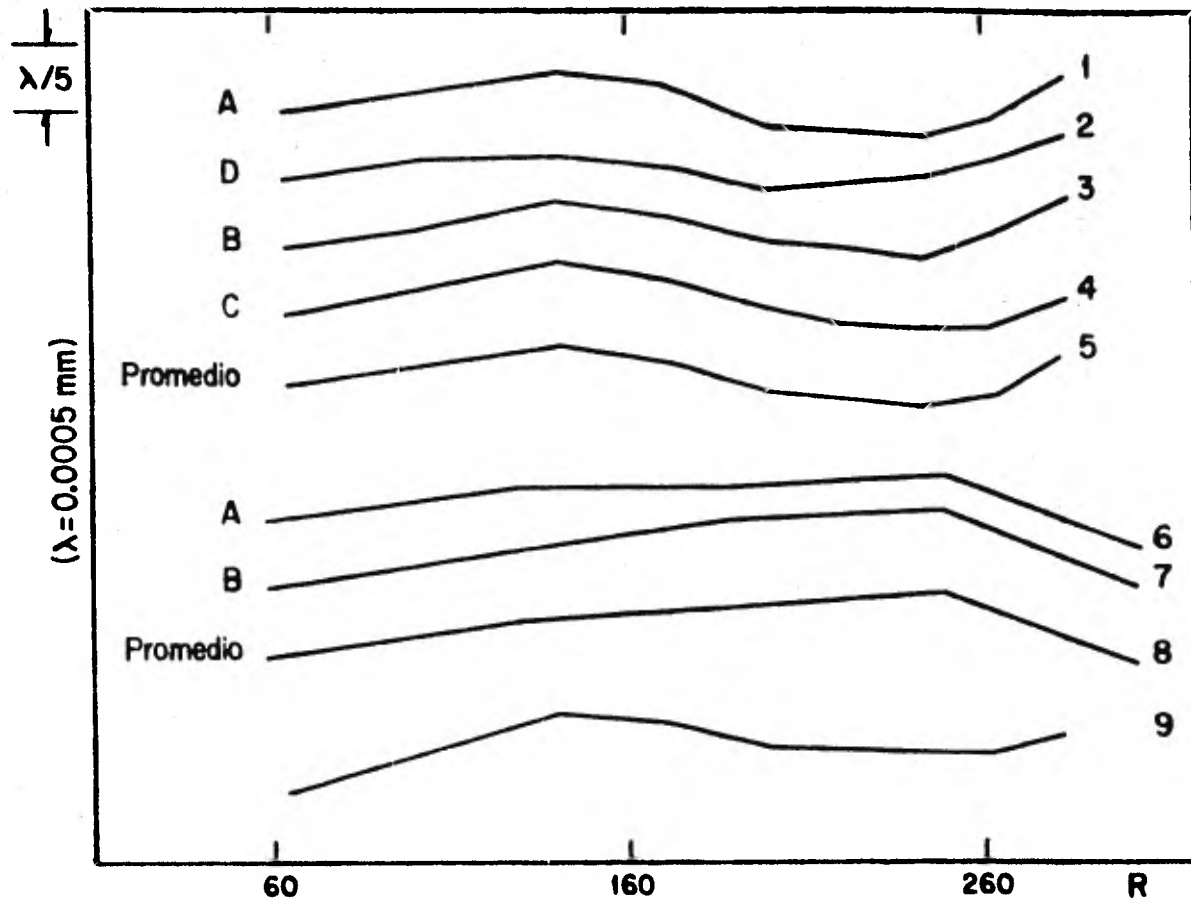
TABLA 2

FIGURA PARA TABLA 2



	zona		1	2	3	4				
1	límites		11.5	26	38	50	61			
2	Y		18	32	44	55				
3	A		14.5	12	12	11				
4	$\frac{YA}{2F^2} \times 10^4$		1.5	2.1	2.9	3.3				
	(f+=949)									
5	$\frac{f_i^+ - f_i^-}{2}$		0	0	0	0				
	Tórico									
6	$\frac{f_i^+ - f_i^-}{2}$	a	0	0.33	0.28	0.65				
	medido	b	0	0.15	0.25	0.71				
7	$\Delta f^+ + K$	a	0.33	0	0.05	-0.32				
	$K_a = .33$	b	0.36	0.21	0.11	-0.35				
	$K_b = .36$ promedio		0.34	0.10	0.08	-0.33				
8	$4 \times 7 \times 10^4$	a	0.49	0	0.14	-1.05				
		b	0.54	0.44	0.32	-1.15				
		promedio	0.51	0.22	0.23	-1.10				
9	$\Omega \times 10^6$		0.85	0.4	0.5	-2.5				
			1	2	3	4	5	6	7	8
10	$\frac{J}{P}$		+1.7	+1.9	-1.1	-2.8	-0.4	-1.1	+1.0	+3.0

Las gráficas que ilustran los semiperfiles de los espejos muestran que las máximas desviaciones de las superficies fabricadas a las superficies ideales son del orden de $\lambda/5$ ($\lambda = 0.0005$ mm). Las gráficas correspondientes al espejo primario indican que la asimetría del espejo no es considerable ya que la máxima diferencia entre estas gráficas es del orden



22

de $\lambda/10$. El mismo comentario se hace para el espejo secundario. La gráfica novena que representa burdamente las imperfecciones del sistema total, indica que las máximas desviaciones del frente de onda formado por el sistema del frente de onda esférico óptimo, son del orden de $\lambda/5$ en el 87.5% de la superficie y de $\frac{2\lambda}{5}$ en el 100% de la superficie; es decir, por ser un sistema catóptrico son el doble de las imperfecciones de la gráfica que representa al sistema total.

Del renglón noveno de la tabla 1 se estima, geométricamente, que con un secundario perfecto el 50% de la luz incidente sería concentrada en un disco de diámetro angular de 0.6", el 75% en 0.9", el 87.5% en 1.3" y el 100% en 1.8"; y del renglón décimo de la tabla 2 se estima que en el sistema construido a $F/13.5$ el 50% de la luz incidente será concentrado en un disco de diámetro angular de 0.5", el 75% en 0.85" y el 100% en 1.3" en comparación a un sistema ideal en el que el 84% se concentra en 0.44" el 91% en 0.82" y el 94% en 1.2". En esta comparación se ha supuesto que no hay obstrucción central, que la luz incidente proviene de una fuente puntual en el infinito, y que la imagen se forma en el eje óptico.

En relación a los pequeños defectos en las superficies el examen visual directo y las pruebas ópticas realizadas, mostraron una cantidad despreciable de rayones y pozos. Se observó en el primario una superficie tersa libre de defectos menores. En el secundario una superficie no tan tersa, debido al uso de herramientas de diámetro chico; se estimó que la magnitud de estas irregularidades menores en la superficie del secundario es de orden menor al que interesa.

CONCLUSIONES

El sistema Ritchey-Chretien provee la mejor imagen de entre los sistemas tipo Cassegrain. La etapa difícil en la construcción de una superficie óptica es la corrección; - como las superficies de los sistemas Cassegrain y Ritchey-Chretien no difieren mucho, se tiene prácticamente la misma dificultad en su corrección por lo que es conveniente construir sistemas tipo Ritchey-Chretien; siempre y cuando no se piense usar el foco primario o se disponga de un corrector - para este foco.

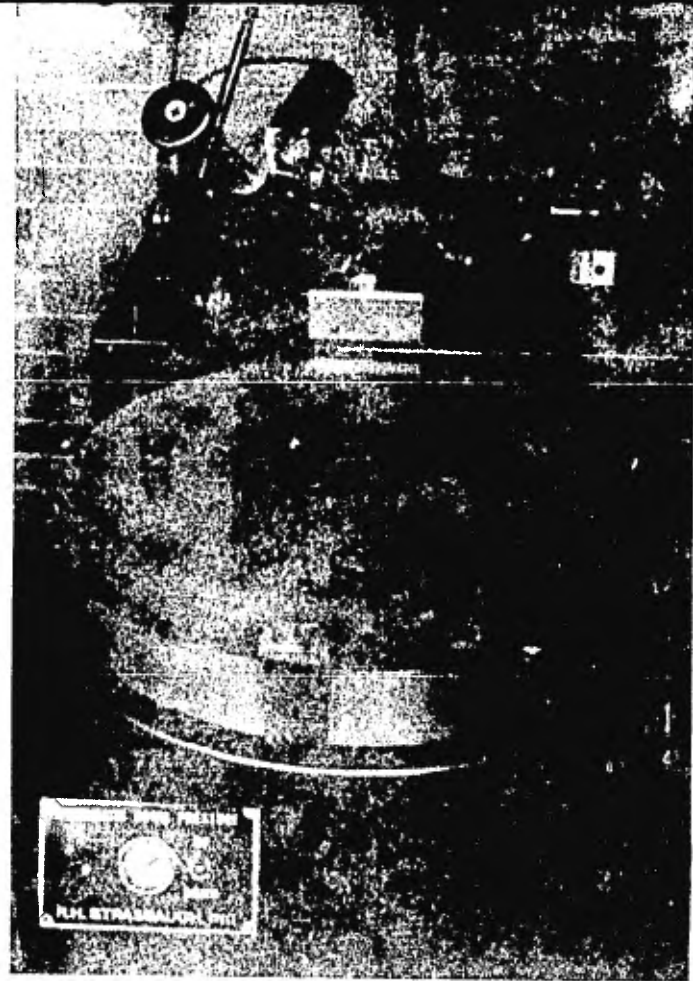
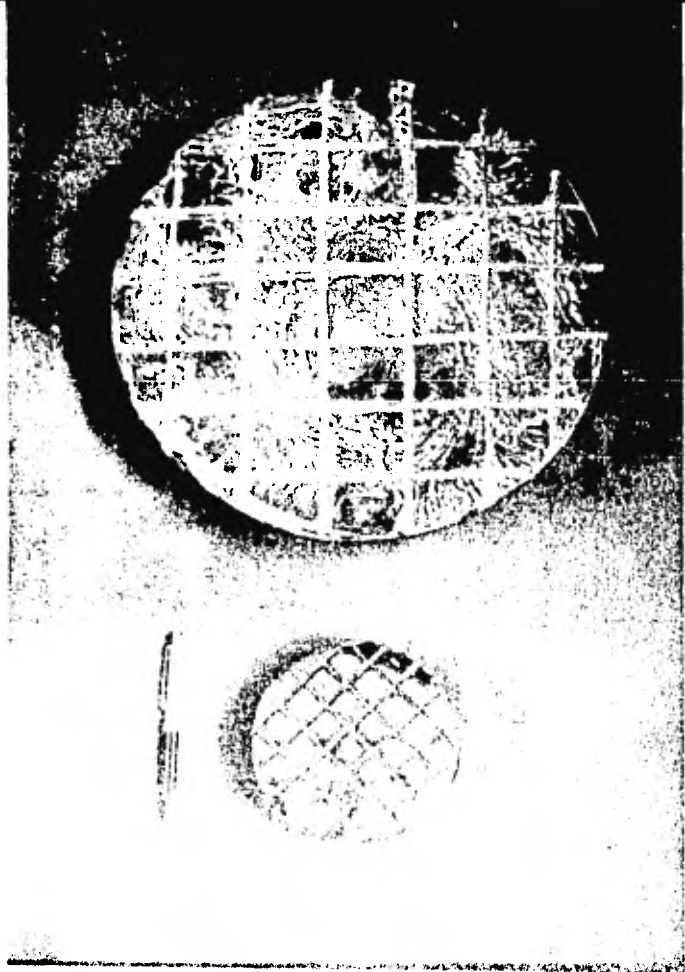
Además de la abertura, un parámetro importante del sistema óptico de un telescopio es su resolución. En base - al análisis anterior se estima que la resolución del sistema construido cuando opere a $F/13.5$ será de $0.5''$ en comparación a la resolución teórica de $0.22''$. Esta estimación se apoya en el hecho de que tanto el frente de onda como la distribución de luz en el foco del sistema, prácticamente satisfacen los criterios de Rayleigh y de Meinel.

Falta terminar el secundario $F/7.5$ y poner en operación al sistema, cuando esto ocurra va a ser interesante - realizar las pruebas prácticas de resolución y comparar con lo previsto.

La realización de este proyecto no sólo motivó el aprendizaje de conocimientos teóricos y prácticos sino que también causó la construcción de parte del equipo para su prueba.

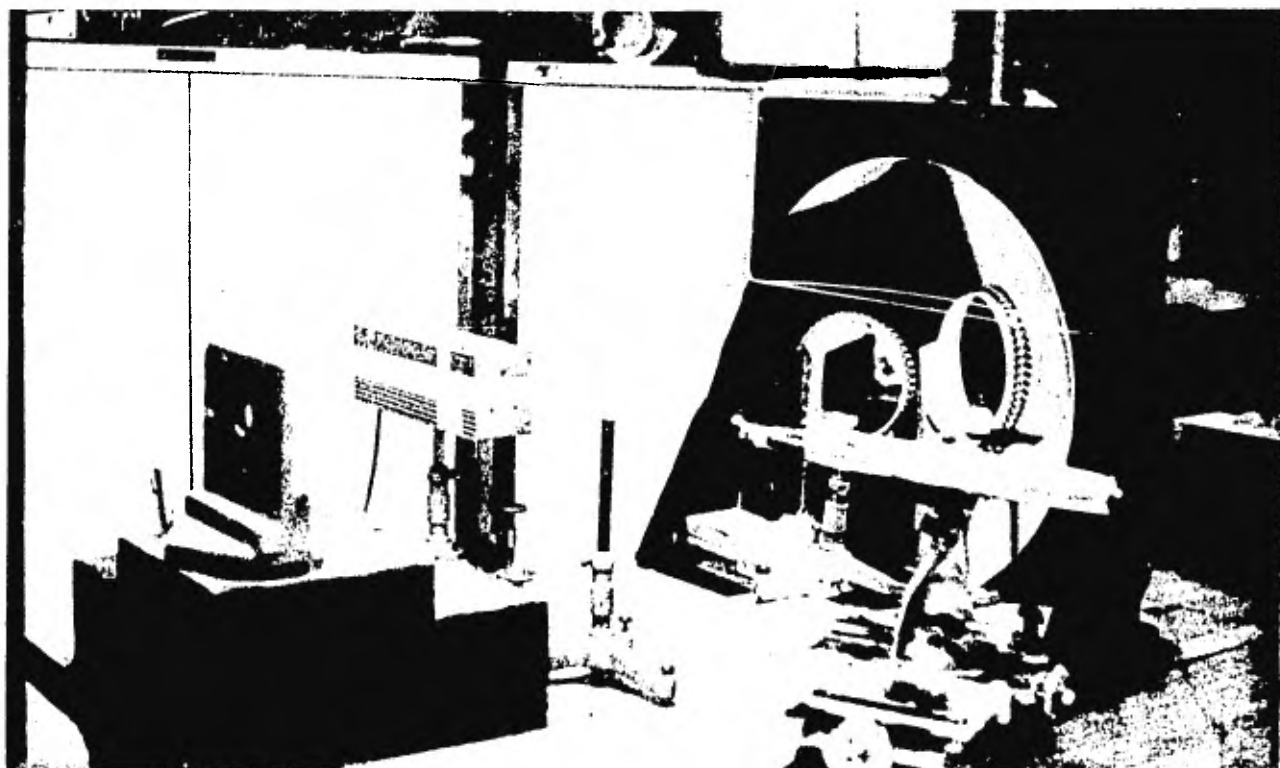
COMENTARIOS A LAS FOTOGRAFIAS
(Por orden de aparición de las mismas)

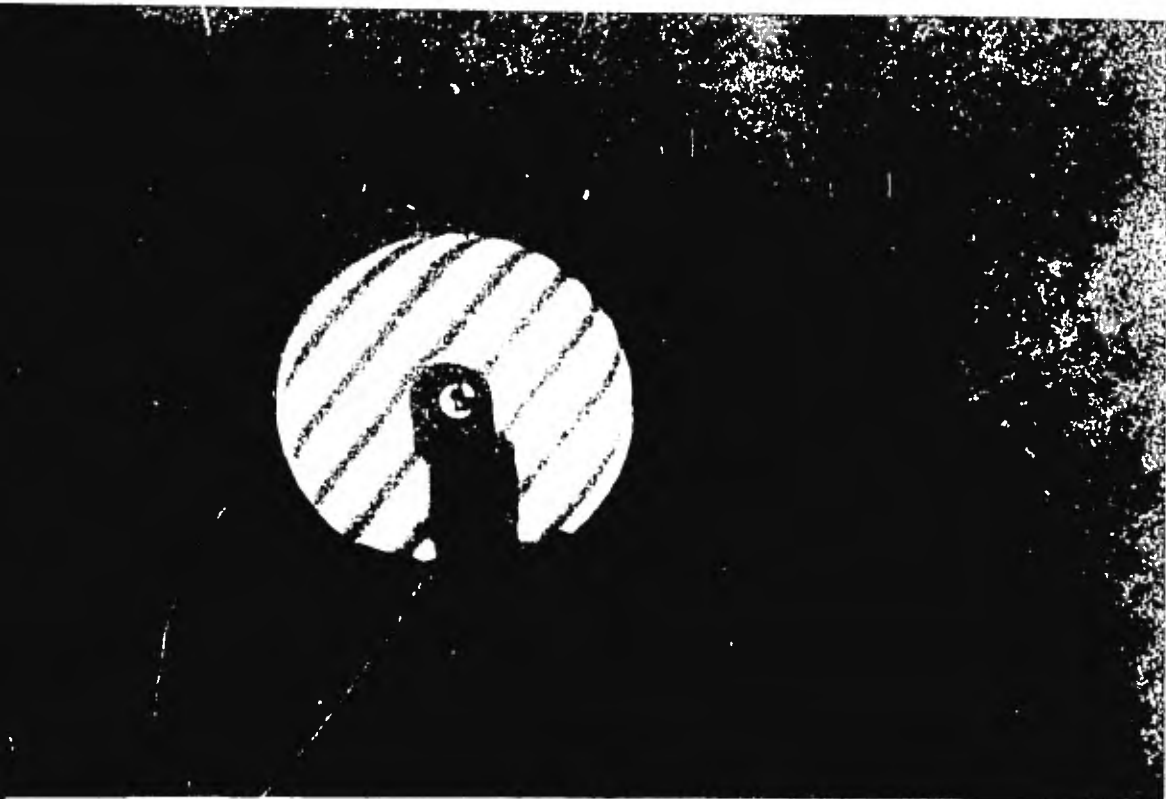
1. El primario montado en la máquina descrita anteriormente .
2. Las herramientas pulidoras del primario
3. Prueba de Ronchi del primario efectuada en su centro de curvatura.
4. Prueba de Alambre del primario efectuada en su centro de curvatura. La sombra anular central es debida a la perforación. La sombra diametral horizontal, corresponde a una tira de madera en la que se colocaron clavos que indican las distancias "Y". La sombra diametral superior es un hilo de seguridad.
5. Prueba parcial de Ronchi (casi nula) del primario.
6. El secundario F/13.5, su base y herramientas pulidoras.
7. Disposición de los elementos para la prueba de Hindle.
8. Prueba de Foucault del secundario F/13.5
9. Prueba de Ronchi del secundario F/13.5
10. El secundario F/13.5 con la pantalla auxiliar para determinar su perfil.







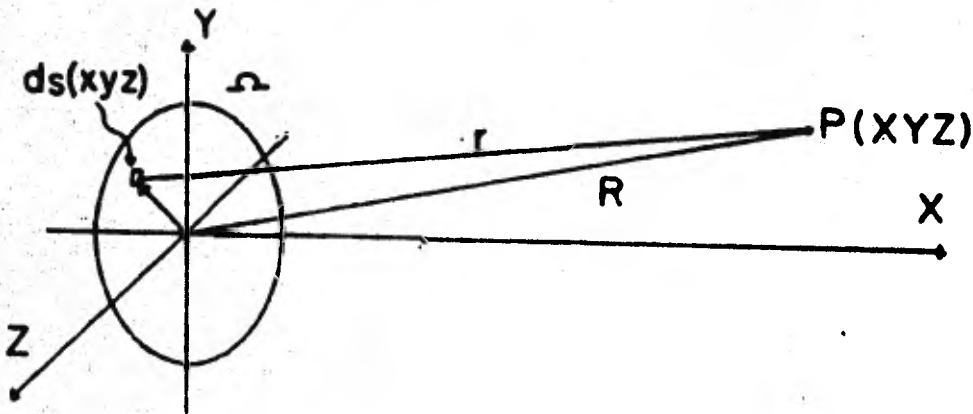




APENDICE

La necesidad de tener una norma de precisión en la fabricación de superficies ópticas ha dado como resultado la formulación de algunos criterios que van de acuerdo a la calidad de imagen deseada; entre ellos el criterio de Rayleigh establece que el error de fase empieza a ser decididamente perjudicial en la formación del patrón de Airy, cuando el frente de onda formado por un objetivo se desvía por más de $\lambda/4$ del frente de onda ideal esférico; en particular el error en la fase puede ser originado por los defectos de fabricación de las superficies ópticas.

A continuación se muestra el análisis de donde surge el criterio de Rayleigh; para ello se deducirá la formación del patrón de Airy, en este caso se trata de difracción de Fraunhofer por una abertura circular.



Sea Ω la abertura circular de diámetro $2a$ y sea $\{$ una onda monocromática plana que incide en la abertura. Se desea calcular la irradiación $I(p)$ en un punto $p(x,y,z)$ distante. De acuerdo al principio de Huygens-Fresnel, cada diferencial de área dS del frente de onda en la abertura puede ser pensada como formada por fuentes puntuales coherentes; como λ es mucho mayor que el diámetro de dS todas las contribuciones en P de dS llegarán en fase e interferirán constructivamente. Si E_A es el poder radiante por unidad de área entonces la perturbación óptica en P debida a dS es expresada por

$$dE = \frac{E_A}{r} e^{i(\omega t - Kr)} dS$$

(véase referencia 2) de modo que la contribución total de la abertura es:

$$E = \iint_{\text{abertura}} \frac{E_A}{r} e^{i(\omega t - Kr)} dS$$

como $a \ll R$, $r \approx R \left[1 - \frac{Yy + Zz}{R^2} \right]$

se puede escribir:

$$E = \frac{E_A e^{i(\omega t - KR)}}{R} \iint_{\text{abertura}} e^{iK(Yy + Zz)/R} dS$$

cambiando a coordenadas polares

$$z = \rho \cos \phi \quad y = \rho \sin \phi$$

$$Z = q \cos \phi \quad Y = q \sin \phi$$

Se tiene que

$$E = \frac{E_A e^{i(\omega t - KR)}}{R} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(K\rho q/R) \cos(\phi - \phi)} \rho d\rho d\phi$$

Dado que hay simetría axial la solución deberá ser independiente de ϕ , en particular se puede resolver esta ecuación para $\phi = 0$. Usando las propiedades de la función de Bessel se obtiene:

$$E = \frac{E_A e^{i(\omega t - KR)}}{R} 2\pi a^2 (R/Ka) J_1(Ka/R)$$

en donde J_1 es la función de Bessel de orden 1. Finalmente la irradiación en P es:

$$I(p) = \frac{1}{2} EE^*$$

$$I(p) = \frac{2E_A^2 \pi^2 a^4}{R^2} \left[\frac{J_1(Ka/R)}{Ka/R} \right]^2$$

de la ecuación anterior se obtiene la gráfica de la irradiación en el patrón de Airy, la cual se ilustra en la fig. 1.

El primer efecto de una superficie óptica es alterar la fase de la onda que incide; el cambio de fase puede ser representado por la función

$$x = A + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + E\rho^4 + \dots$$

usando la nomenclatura precedente.

El coeficiente A indica un cambio constante en la fase de todo el frente de onda por lo que no tiene trascendencia; en particular interesan los errores con simetría axial por lo que $B=D=0$. C debe ser también nulo de lo contrario habría un cambio en la posición focal. Esta afirmación se desprende del hecho de que la curvatura de una superficie es inversamente proporcional a la segunda derivada. Por tanto el término más importante en el cambio de fase es: $E\rho^4$, el cual representa un error con simetría de revolución que va cambiando suavemente en toda la superficie óptica.

Introduciendo este nuevo elemento en la fase de la onda incidente se encuentra que el disturbio óptico en P esta dado por la ecuación:

$$E = \frac{E_A e^{i(\omega t - KR)}}{R} \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{iK\rho q \left| \cos \phi + \frac{R}{\rho q} E\rho^4 \right|} \rho \, d\rho \, d\phi$$

En particular si P es el punto axial, $Y = Z = 0$ o bien $q = 0$ se tiene:

$$E = \frac{E_A e^{i(\omega t - KR)}}{R} \int_0^a e^{+iKE\rho^4} \rho \, d\rho$$

de modo que con una abertura de radio unidad la irradiación en dicho punto es:

$$I = \frac{E_A^2 \pi^2}{2R^2} \left\{ \left[2 \int_0^1 \cos(KE\rho^4) \rho \, d\rho \right]^2 + \left[2 \int_0^1 \text{sen}(KE\rho^4) \rho \, d\rho \right]^2 \right\}$$

naturalmente si no hay cambio de fase debido a una imperfección $E = 0$ y se obtiene para la irradiación del punto axial.

$$I = \frac{E_A^2 \pi^2}{2R^2}$$

En el caso de que el cambio de fase extremo sea de $\lambda/8 = E$ se encuentra para la irradiación de dicho punto:

$$I = \frac{E_A^2 \pi^2}{2R^2} (0.9464)$$

Cuando $E = \lambda/4$ se tiene que: $I = \frac{E_A^2 \pi^2}{2R^2} (0.8003)$

y en el caso $E = \lambda/2$ se tiene que: $I = \frac{E_A^2 \pi^2}{2R^2} (0.3947)$

De la comparación anterior y de un estudio similar para abertura rectangular con defectos asimétricos ($D \neq 0$) Rayleigh¹² concluyó que un error de $\lambda/4$ en la fase empieza a ser decididamente perjudicial, pues la irradiación en el punto central del disco de Airy se reduce a aproximadamente al 80%.

Obsérvese que el error considerado es muy particular y que el análisis no da información de cual es el cambio total en el patrón de Airy. Conrady¹³ prosiguió el análisis precedente y encontró que a través de todo el disco central del patrón de Airy el porcentaje de pérdida en la irradiación se mantiene en aproximadamente el 20%, cuando el error en la fase es de $\lambda/4$, por lo que la definición en la imagen difícilmente se ve afectada. Así mismo encontró que la luz perdida por el disco central es transferida en una penumbra que bien alcanza el segundo anillo, la cual causa pérdida de contraste en la imagen de un objeto extendido.

Un análisis de los defectos locales y no suavemente extendidos sería valioso. A. Couder¹⁴ ha reportado que pequeños defectos pueden llegar a tener consecuencias graves por su pendiente o periodicidad. Horne¹⁵ ha hecho una clasificación de las imperfecciones que puede tener una fuente de onda.

Un criterio más satisfactorio que combina la regla de Rayleigh con el requisito de que las aberraciones transversales sean menores que el radio del disco de Airy, ha sido formulado por A. Danjon y A. Couder³.

REFERENCIAS

1. Modern Optical Engineering
Warren J. Smith
Mc Graw-Hill Book Company 1966
2. Optics
E. Hecht and A. Zajac
Addison-Wesley Publishing Company, 1974
3. Lunettes et télescopes
A. Danjon et A. Couder
Editions de la Revue D'Optique Théorique et Instrumentale
Paris, 1935
4. Lens Design Fundamentals
Rudolf Kingslake
Academic Press, 1972
5. The History of the Telescope
Henry C. King
Dover Publications, 1979
6. Jones, R.T., J.O.S.A., 44, 630; 1954
7. Meinel, A.B. Telescopes; Chicago Press, 1960.
8. D. Malacara, "Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya", 4, 27, 64; 1965.
9. A. Cornejo y D. Malacara, "Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya", 4, 30, 246; 1968.
10. Meinel, A.B.
Technical Report 1; Optical Sciences, The University of
Arizona, 1965.

11. J. Texereau
How to Make a Telescope
The Natural History Library, 1963.
12. Lord Rayleigh
Scientific Papers, 1, 415.
13. A. Conrady. Monthly Notices, Roy. Astron. Soc. 79, 575, 1919.
14. A. Couder. L'A., 50, February, 1936.
15. Optical Production Technology
D.F. Horne.
A. Hilger London, 1972.

BIBLIOGRAFIA

Amateur Telescope Making; I, II and III
Albert G. Ingalls, Editor
Scientific American, 1935.

Master Optical Techniques
A.S. De Vany
Wiley-Interscience, 1981

Optical Shop Testing
Edited by D. Malacara
Wiley-Interscience, 1978