

Sistema de proyección acoplado a un telescopio newtoniano para observaciones solares

SERGIO VÁZQUEZ MONTIEL* Y ALEJANDRO CORNEJO RODRÍGUEZ

*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Apartados postales 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., México*

Recibido el 3 de marzo de 1992; aceptado el 16 de noviembre de 1992

RESUMEN. Se diseña y construye un sistema óptico de proyección para acoplarlo a un telescopio newtoniano de 15 cm de diámetro y 120 cm de distancia focal, para hacer observaciones solares. Se dan los parámetros de diseño para la construcción de las placas patrón que se usaron en las pruebas ópticas durante la etapa de construcción del sistema de proyección para garantizar una calidad óptima del mismo.

ABSTRACT. For observing solar images, an optical projection system was designed and constructed to be coupled to a Newtonian telescope with a mirror with 15 cm in diameter and 120 cm of focal length. For the construction stage, reference plates were also designed and constructed for each optical surface of the projection system.

PACS: 42.78.Dg

1. INTRODUCCIÓN

El eclipse total de sol del 11 de julio de 1991, generó, entre otras cosas, la búsqueda de dispositivos que permitieran observar el fenómeno sin riesgos. Fue así como el INAOE se planteó la posibilidad de diseñar y construir un telescopio que pudiera usarse para observar el eclipse y que cumpliera con los siguientes requisitos: el telescopio debería ser barato, fácil de trasladar y seguro para los observadores. Además, el tamaño de la imagen debería permitir que un grupo de 6 a 8 personas pudieran observar simultáneamente la imagen del sol eclipsado.

Con estos criterios y dada la experiencia del INAOE en la construcción de telescopios newtonianos para aficionados [1], se decidió que el telescopio newtoniano de 15 cm de diámetro y distancia focal de 120 cm ($f/8$) era el adecuado para cumplir con lo solicitado. Las dimensiones, peso y tipo de montura lo hacen bastante portable, la calidad de imagen que se obtiene con el instrumento es aceptable, sobre todo tomando en cuenta la seguridad del observador, y su costo lo hace accesible desde el punto de vista económico.

En consecuencia, sólo faltaba buscar los mecanismos de seguridad y diseñar un sistema de proyección que cumpliera con los objetivos planteados. Por tal razón, en este trabajo se aborda lo relativo tanto al diseño y construcción de un sistema de proyección, como a la seguridad de los observadores. Como se iban a construir varios telescopios, fue necesario

*También en Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la BUAP, 4 sur 104, 72000 Puebla, Pue., México.

plantear una producción en serie para los oculares de proyección; por tanto, fue necesario diseñar y construir 2 placas patrón para las pruebas ópticas. Estos últimos diseños también están descritos en este trabajo.

2. DISEÑO DEL SISTEMA ÓPTICO DE PROYECCIÓN

En todo sistema de proyección, la amplificación, mayor que uno, se obtiene al hacer la distancia del segundo plano principal a la imagen (ℓ') mayor que la distancia del primer plano principal al objeto (ℓ); es decir,

$$|\ell'| > |\ell|. \tag{1}$$

Para nuestro caso, el objeto a proyectar es la imagen real formada por el objetivo del telescopio. De la óptica geométrica sabemos, por otra parte, que

$$\ell = f \left(\frac{1}{m} - 1 \right), \tag{2}$$

$$\ell' = f(1 - m), \tag{3}$$

$$m = \frac{\ell'}{\ell}, \tag{4}$$

donde f es la distancia focal y m la amplificación lateral. Por tanto, si $\ell = -f$, entonces $m = -\infty$ y no hay imagen real. En esta posición el sistema es afocal en el espacio imagen y es la configuración adecuada para uso visual. Si $\ell = -2f$, entonces $\ell' = 2f$ y $m = -1$. Así que, variando ℓ de $-2f$ a $-f$, obtenemos una variación de la amplificación de -1 a $-\infty$.

Del análisis anterior, es posible concluir que el ocular del telescopio puede usarse como sistema de proyección si se coloca en la posición adecuada para obtener la amplificación deseada. Obviamente, el diseño del ocular de proyección deberá hacerse bajo dichas consideraciones.

2.1. Diseño paraxial del ocular de proyección

Para determinar la amplificación del sistema de proyección es necesario conocer el diámetro lineal (D) de la imagen del sol. Sabiendo que el diámetro angular aparente medio (θ) del sol es de 32 minutos de arco, que el objetivo del telescopio tiene $f = 120$ cm y usando la expresión

$$D = \frac{\pi f \theta}{180^\circ}, \tag{5}$$

se obtiene que $D = 11.17$ mm.

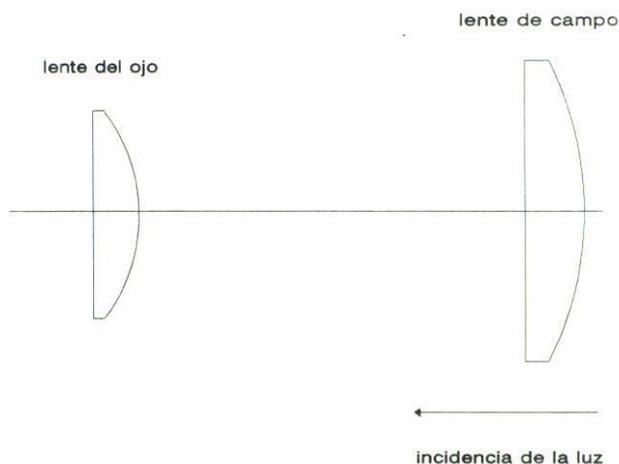


FIGURA 1. Ocular de tipo Huygens.

Considerando que 15 cm es un tamaño adecuado para el diámetro de la imagen del sol que se desea observar proyectada en la pantalla (de acuerdo con los objetivos planteados) y el valor de D , tenemos que el ocular deberá tener una amplificación

$$m = -13.429.$$

Por el tamaño de la imagen del sol que forma el objetivo del telescopio, la cantidad de energía que se concentra en los alrededores del ocular es muy grande. Por esto, se sugiere no usar componentes cementadas, ya que el calor puede dañarlas. Por tanto, los oculares más adecuados son los tipo Huygens y Ramsden [1,2]. Como el Huygens permite corregir totalmente la aberración cromática transversal y el Ramsden no, se decidió seleccionar al ocular Huygens como el tipo adecuado a nuestras necesidades (véase la Fig. 1). La distancia focal del sistema de proyección debería asegurar que las dimensiones de la estructura de la pantalla de observación, no afectarán al telescopio en su funcionamiento general, pero también se debería garantizar una adecuada corrección de las aberraciones. Después de hacer un análisis con diferentes valores de la distancia focal se encontró que el valor de la f que permitía alcanzar los objetivos antes mencionados es 25.4 mm.

Con las Ecs. (2) y (3) ya es posible calcular las posiciones del objeto y de la imagen a partir del conocimiento de la distancia focal, éstas son

$$\ell = -27.29 \text{ mm},$$

$$\ell' = 366.49 \text{ mm},$$

2.2. Determinación de parámetros estructurales del ocular

Una vez determinados ℓ , ℓ' , m y f , así como el tipo de ocular, se puede pasar a obtener los parámetros estructurales del ocular, como son los radios de curvatura y vidrio óptico a ser empleado, a partir de la calidad de la imagen dada por las aberraciones de tercer orden y la aberración cromática transversal.

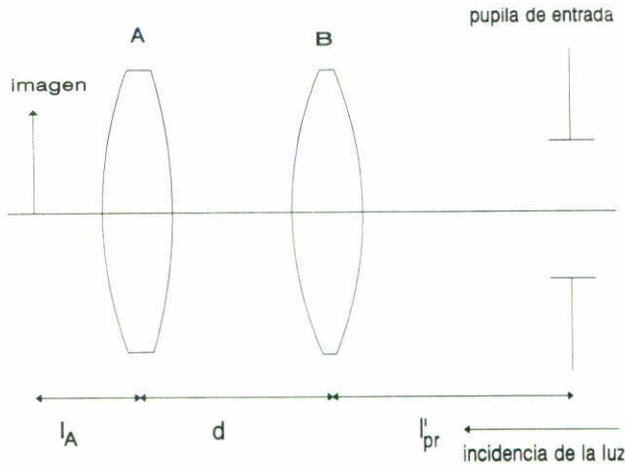


FIGURA 2. Sistema óptico de dos lentes simples y separadas.

Para acromatizar un sistema óptico de dos lentes simples separadas (véase la Fig. 2) la separación entre las lentes se calcula, de acuerdo con Conrady [3], con la expresión general

$$d = \frac{f_A + f_B \left(\frac{V_B}{V_A}\right)}{1 + \frac{V_B}{V_A} + \frac{f_A}{\ell_A} - \frac{f_B V_B}{\ell'_{pr} V_A}}, \tag{6}$$

donde f_A y f_B son las distancias focales de las lentes, ℓ_A es la posición de la imagen final medida desde la lente A, ℓ'_{pr} es la distancia de la pupila de entrada a la lente B, V_A y V_B son los números de Abbe de los vidrios de las lentes A y B, respectivamente.

Obsérvese que si $V_A = V_B$ y $\ell_A = \ell'_{pr} = \infty$, entonces

$$d = \frac{f_A + f_B}{2}. \tag{7}$$

La Ec. (7) es la fórmula más conocida para acromatizar un sistema de dos lentes, pero sólo vale si las lentes son construidas con el mismo vidrio o si los vidrios tienen el mismo número de Abbe, la pupila de entrada está en el infinito y la imagen también está en el infinito. En cambio, la Ec. (6) permite acromatizar oculares para telescopios y/o microscopios de distintos tamaños, así como oculares para proyección o incluso para observadores con miopía o hipermetropía.

Para nuestro caso, ℓ'_{pr} será la distancia axial del objetivo a la lente de campo del ocular, ℓ_A la distancia de la imagen a la lente del ojo del ocular y $V_A = V_B$, ya que se usará el mismo vidrio en ambas lentes. Por tanto, la Ec. (6) quedará como

$$d = \frac{f_A + f_B}{2 + \frac{f_A}{\ell_A} - \frac{f_B}{\ell'_{pr}}}. \tag{8}$$

Adicionalmente, sabemos que la distancia focal de todo el ocular se calcula con [4]

$$f = \frac{f_A f_B}{f_A + f_B - d}. \tag{9}$$

De acuerdo con Conrady [4], un sistema positivo con esfericidad bajo-correctada tiene un mínimo de astigmatismo cuando la aberración de coma es cero. Por tanto, deberá encontrarse la posición de la pupila de salida que asegure el valor cero para la coma. Adicionalmente, tal valor para la coma es deseable en todo sistema óptico. Para encontrar la posición mencionada, se traza un rayo paraxial y uno marginal del haz axial y se aplica la condición del seno.

Una vez hallada la posición buscada, queda determinada ℓ'_{pr} y la razón de las distancias focales de las lentes. Es decir, se determina una K , tal que

$$f_B = K f_A. \quad (10)$$

Con las Ecs. (8), (9) y (10) se determinan d , f_A y f_B . Acoplando las ecuaciones mencionadas se encuentra

$$2(\ell'_{pr} - 2\ell_A) f_A^2 + [4\ell_A \ell'_{pr} - 3f(\ell'_{pr} - 2\ell_A)] f_A - 3f\ell_A \ell'_{pr} = 0, \quad (11)$$

resolviendo la ecuación se determina el valor de f_A y con (10) y (8) los valores de f_B y d . Para nuestro caso los valores son

$$f_A = 19.2659 \text{ mm},$$

$$f_B = 38.5319 \text{ mm},$$

$$d = 28.5713 \text{ mm}.$$

Como las lentes son plano-convexas, entonces los radios de curvatura son

$$r_{A1} = \text{infinito},$$

$$r_{A2} = 9.9566 \text{ mm},$$

$$r_{B1} = \text{infinito},$$

$$r_{B2} = 19.9133 \text{ mm}.$$

Utilizando el criterio de tener aberturas cercanas a la mitad de las distancias focales de las lentes, se proponen aberturas de 10 mm y 20 mm para la lente A y B , respectivamente y por tanto los espesores mínimos serán de 1.4 mm y 2.7 mm, respectivamente.

TABLA I. Ocular de Proyección. Las medidas se dan en milímetros.

Radio de curvatura	Separación	Diámetro abertura	Material
plano	14.00 ± 0.2	3.39 ± 0.1	BK7
-10.00 ± 0.02	14.00 ± 0.2	24.11 ± 0.1	aire
plano	28.00 ± 0.2	6.77 ± 0.1	BK7
-20.00 ± 0.02	28.00 ± 0.2		

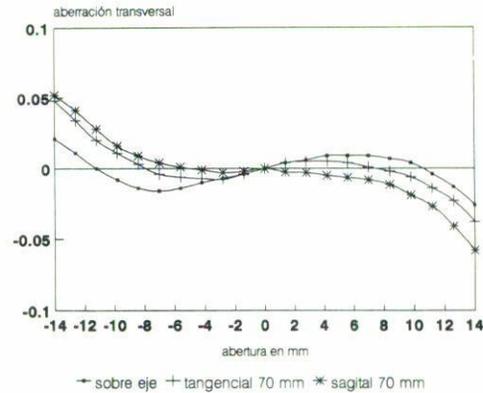


FIGURA 3. Aberración transversal, sagital y tangencial, del sistema óptico de proyección.

Calculados los parámetros estructurales, con criterios de tercer orden, el sistema se optimiza con el método de los mínimos cuadrados amortiguados, con pesos aditivos, obteniéndose el diseño definitivo. Los parámetros estructurales finales y sus tolerancias se dan en la Tabla I. La calidad de la imagen se evalúa a través de las curvas de aberración transversal y de la MTF. En la Fig. 3 se grafica la aberración transversal total sobre eje y a un campo de 70 mm, tanto en el plano sagital como en el tangencial, contra la abertura del sistema óptico. Nótese que el comportamiento de las aberraciones es similar para puntos sobre el eje y para puntos en los extremos del campo, y que en todos los casos se mantiene menor o igual a 0.06 mm, bastante tolerable para los objetivos del diseño. En la Fig. 4 se grafica la aberración transversal para tres longitudes de onda 486.1 nm, 587.6 nm y 656.3 nm con lo cual se observa el comportamiento cromático del sistema.

En la Fig. 5 se grafica el valor de la MTF contra la frecuencia dada en ciclos/mm, tanto sobre eje como a 70 mm de campo en los planos sagital y tangencial. Obsérvese que la respuesta del sistema óptico a las frecuencias es muy aceptable y la caída de las curvas es suave y sin oscilaciones.

3. CONSTRUCCIÓN DEL OCULAR DE PROYECCIÓN

Una vez que se tiene el diseño del sistema óptico se procede a la construcción del mismo. Para ello era necesario establecer un control de calidad de cada una de las componentes, que fuera preciso y rápido de efectuar. Por tanto, se seleccionó al interferómetro de Newton como el adecuado para las pruebas ópticas. Para las superficies planas se utilizó un plano óptico patrón y para las superficies convexas se utilizaron dos placas patrón que se diseñaron y construyeron también.

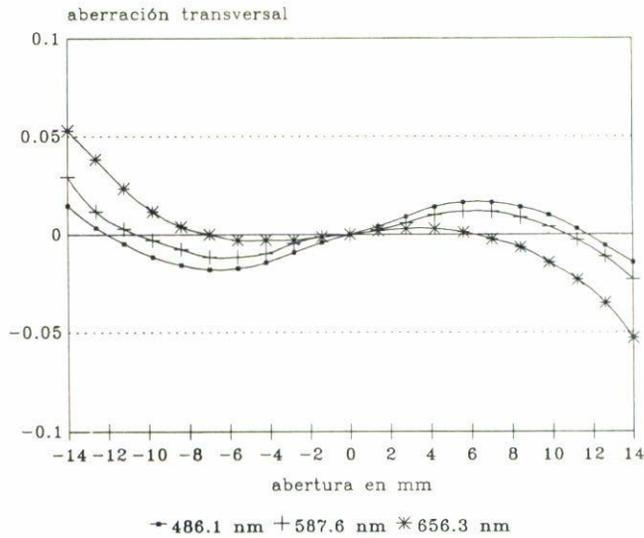


FIGURA 4. Aberración transversal en tres longitudes de onda.

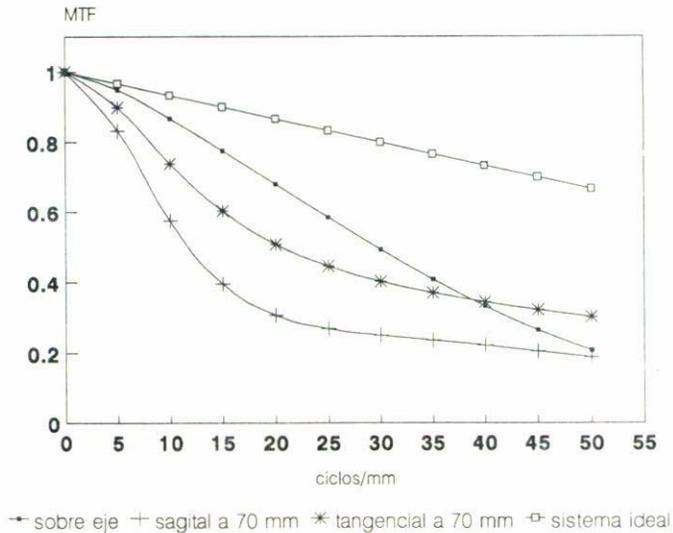


FIGURA 5. MTF, sagital y tangencial, del sistema óptico de proyección.

3.1. Diseño de las placas patrón

Dado que las lentes del ocular son plano-convexas, sólo se necesitan dos placas patrón, una por cada superficie convexa, éstas se diseñaron siguiendo los criterios dados por Murty [5]. Recordemos que una placa patrón tiene un radio de curvatura opuesto al que se desea. Como la observación debe hacerse de tal forma que la luz se refleje en las superficies casi perpendicularmente (véase Fig. 6) entonces el radio de curvatura de la superficie superior

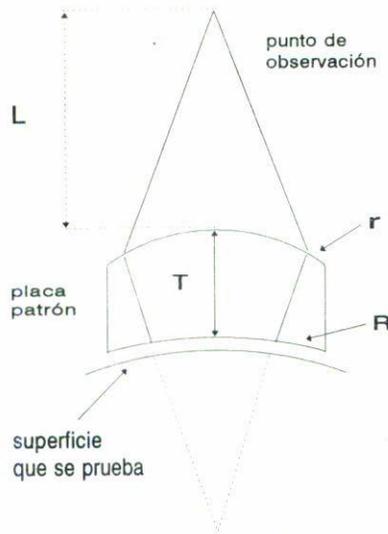


FIGURA 6. Arreglo para probar la calidad de las superficies con una placa patrón.

TABLA II. Placas Patrón. Las medidas se dan en milímetros.

	Radio de curvatura	Separación	Diámetro abertura	Material
primera placa	8.00 ± 0.01	15.80 ± 0.1	15.45 ± 0.1	BK7
	10.00 ± 0.01		15.80 ± 0.1	
segunda placa	15.86 ± 0.01	31.00 ± 0.1	35.00 ± 0.1	BK7
	20.00 ± 0.01		31.00 ± 0.1	

está dado por

$$r = \frac{(n - 1)(R + T)L}{nL + R + T}; \tag{12}$$

los parámetros de la Ec. (12) se muestran en la misma Fig. 6. Los parámetros estructurales finales de las placas patrón calculados se dan en la Tabla II. En la Fig. 7 se muestran a escala las placas patrón diseñadas para las pruebas del ocular de proyección.

4. PANTALLA DE PROYECCIÓN

La estructura que se propone para la pantalla donde se proyectará la imagen del sol, está esquematizada en la Fig. 8, es totalmente cerrada para evitar que los usuarios, por error o por curiosidad, puedan observar directamente a través del ocular. Antes de cerrar la estructura se recomienda esmerilar las caras interiores para evitar imágenes fantasmas sobre la pantalla. Las medidas se dan en centímetros, se requieren 2 componentes A, 2

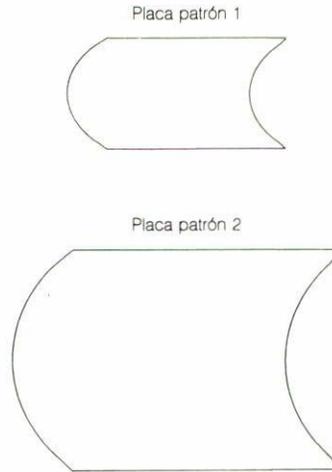


FIGURA 7. Placas patrón usadas para las pruebas ópticas de las superficies convexas del sistema óptico de proyección.

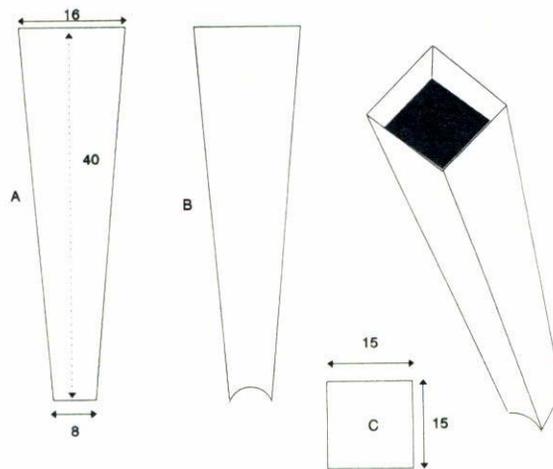


FIGURA 8. Componentes de la estructura para la pantalla donde se observa el disco solar.

componentes *B* y una componente *C*, el material empleado es acrílico. La componente *C* es la pantalla donde se observará el disco solar, es de acrílico-cristal esmerilado con un abrasivo de $5 \mu\text{m}$ sólo en la cara interior. En la Fig. 9 se muestra una fotografía del telescopio con la estructura de la pantalla montada.

5. CONCLUSIONES

El telescopio newtoniano junto con el ocular de proyección y la pantalla de observación del disco solar, cumplen con todas las metas propuestas. El telescopio pesa 15.5 kg, la montura se arma y desarma con facilidad, la imagen tiene un diámetro de 15 cm, suficiente para ser observada por 6 u 8 personas simultáneamente. La calidad de la imagen es



FIGURA 9. Fotografía de un telescopio newtoniano ($f/8$) con la estructura de la pantalla de observación montada.

excelente, la pantalla es completamente segura para el observador, y su costo de venta fue de \$1'300,000.00.

Quitando la estructura de la pantalla y cambiando de ocular (el de proyección por uno de observación visual), el telescopio puede usarse para observaciones nocturnas, en su forma de telescopio astronómico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Salvador Quechol, Luisa Tecualt, Rosalia Tecualt e Irma Tecualt, técnicos del taller de óptica del INAOE, por su colaboración en la construcción de las componentes ópticas y armado de los telescopios.

REFERENCIAS

1. S. Vázquez-Montiel y A. Cornejo Rodríguez, "Diseño y construcción de un telescopio para aficionados", Reporte Técnico No. 121, INAOE, México (1991).
2. A.E. Conrady, *Applied Optics and Optical Design*, parte uno, Dover Publications Inc., New York (1957) p. 480.
3. *Ibid.*, p. 363.
4. *Ibid.*, p. 483.
5. M.V.R.K. Murty, *Optical Shop Testing*, Chapter 1, John Wiley and Sons, New York (1978).