

UN TELESCOPIO DE ÚLTIMA GENERACIÓN PARA EL OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS

Isabel Escudero Sanz y José M. Rodríguez Espinosa

Instituto de Astrofísica de Canarias

38200 La Laguna, Tenerife

INTRODUCCIÓN

La última generación de grandes telescopios se comenzó a construir a mitad de los años cuarenta siendo sus máximos exponentes el Telescopio Hale de Palomar (5 metros de diámetro) y el Telescopio de Crimea en la antigua Unión Soviética (6 metros de diámetro). Más modernamente los telescopios más grandes construidos han sido de alrededor de cuatro metros (Kitt Peak en Arizona, Cerro Tololo en Chile, el Telescopio Anglo-Australiano en Australia, el Canada-France-Hawaii en Hawaii, el ESO 3.6 m. también en Chile, y el WHT en La Palma). Estos telescopios más modernos supusieron un paso adelante respecto de sus predecesores mayores debido principalmente a la precisión de su mecánica y óptica, y a la introducción de sistemas electrónicos de control muy sofisticados. Pero esencialmente los telescopios construidos desde los años cuarenta hasta principios de los noventa han mantenido constante su apertura en torno a los 4 metros.

La capacidad de observar objetos astronómicos cada vez más débiles sin embargo no se ha detenido desde los años cuarenta como si lo ha hecho el tamaño de los telescopios. El advenimiento de detectores fotoeléctricos primero y de estado sólido más tarde ha hecho que la astronomía avanzase sin cesar descubriendo objetos y fenómenos nuevos, como los cúasares más lejanos, la composición química de galaxias muy distantes o la búsqueda de enanas marrones. Todo ello gracias a que la eficiencia cuántica de los detectores utilizados ha aumentado constantemente, hasta alcanzar a finales de los ochenta valores próximos al cien por cien (lo que equivale a detectar prácticamente todos los fotones que llegan al detector).

A partir de aquí es claro que cualquier nuevo avance ha de ir por un aumento de la capacidad colectora del telescopio (diámetro principalmente). A esto se unen los avances realizados en los últimos años en Astronomía Infrarroja, donde la observación está dominada por la radiación del fondo térmico, y los avances en la precisión con que se puede construir hoy día la óptica, tanto de los telescopios como de la instrumentación auxiliar,

que, por ejemplo mediante el uso de la llamada óptica adaptativa, permite alcanzar resoluciones espaciales muy por debajo del segundo de arco.

Es la combinación de estos ingredientes la que hace que la Astronomía se encuentre al borde de una nueva revolución. Y es esta misma combinación de ingredientes la que hace que la construcción de un moderno telescopio sea todo un reto científico y tecnológico. Dicho reto consiste:

1. En construir un espejo primario lo más grande posible tecnológicamente y financieramente hablando. Este límite tecnológico parece estar situado en la construcción de espejos monolíticos de 8 metros de diámetro. Existe un buen número de proyectos en marcha, algunos próximos a primera luz, para la construcción de telescopios de 8 metros. Alternativamente, se ha dado un paso decisivo en una dirección distinta, consistente en la fabricación de grandes espejos en forma de mosaico, es decir alineando con gran precisión un conjunto de segmentos de espejo menores. De este modo se ha construido el mayor telescopio hoy día existente, el Telescopio Keck de 10 metros de diámetro. Dicho telescopio lleva aproximadamente 2 años en funcionamiento y está produciendo resultados espectaculares.

2. En alcanzar tal precisión en las superficies ópticas del telescopio, así como las condiciones adecuadas de su entorno (mecánica, control térmico, cúpula, etc.), que la excelente visibilidad y estabilidad de imagen naturales que se dan en los modernos observatorios no sean degradadas ni por el telescopio ni por su entorno. Además de este requerimiento fundamental, la inclusión de técnicas de óptica adaptativa permitirá corregir

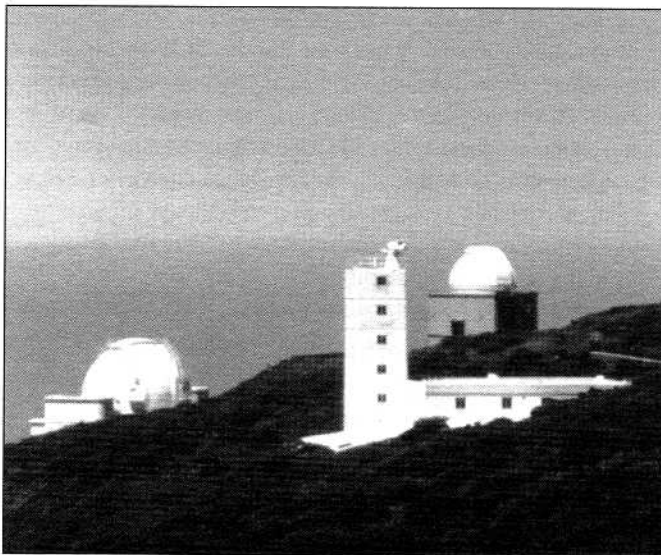


FIGURA 1. Vista parcial del Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma. Aparecen las cúpulas de los telescopios nocturnos Jacob Kaptein e Isaac Newton y del telescopio solar sueco.

produzca un incremento de las aberraciones menor que 0.5 arc sec, un secundario $f/15$ y un $f/20$ podrían estar dentro de los límites del intercambio, pero no un $f/7$ y un $f/15$ o un $f/7$ y un $f/20$, al menos sin cambiar también el corrector. Es decir, sería preferible que el secundario visible no fuera tan rápido como un $f/7$ o el infrarrojo tan lento como un $f/15$.

UN SECUNDARIO ADAPTATIVO

El avance tecnológico que va a revolucionar la astronomía en un futuro cercano es la óptica adaptativa. Gracias a ella las imágenes de un telescopio terrestre no estarán limitadas por el «seeing» sino que se obtendrán imágenes más cercanas al límite de difracción del telescopio. Es una técnica de alta resolución espacial muy eficiente y que proporciona datos fáciles de interpretar. La contrapartida es que la óptica del telescopio y de su instrumentación debe ser de más calidad (las aberraciones sólo pueden causar desviaciones del frente de ondas perfecto del orden de $1/5$ o menores) para proporcionar imágenes mucho mejores.

Un sistema óptico adaptativo tiene un elemento (generalmente un espejo) que puede deformarse y compensar en tiempo real la distorsión del frente de ondas originada por el «seeing». Para ello es preciso calibrar las aberraciones de un frente de onda de referencia. Los dispositivos para análisis de frentes de onda de uso más extendido son de tipo Shack-Hartman (basado en el test de Hartman pero en lugar de subaperturas utiliza matrices de lentes).

Puesto que la atmósfera no es isótropa, la óptica adaptativa sólo puede corregir las imágenes en un campo restringido que se denomina ángulo isoplanático. Su valor depende de las condiciones atmosféricas y de la longitud de onda de la luz: es del orden de unos segundos de arco en el visible y aumenta a medida que nos adentramos en el infrarrojo hasta llegar a un minuto o un par de minutos a las 5 micras [5]. La anisotropía implica que el haz de referencia tiene que atravesar el mismo tramo de atmósfera que la luz del objeto que se quiere observar. Es decir, sólo puede utilizarse como referencia una estrella luminosa cercana. Como no siempre es posible encontrarla, se plantea el uso de una estrella artificial. El concepto en el que se basan es sencillo: la luz de un láser que apunta al objeto es reflejada por una capa muy alta de la atmósfera y recogida por el telescopio. Sin embargo conllevan problemas técnicos que hay que resolver: el láser debe ser potente pero de tamaño pequeño, si se lanza con el mismo telescopio con el que se observa puede producirse luz dispersada por los espejos (por partículas de polvo en su superficie) que reduce la relación señal/ruido, si se lanza con un telescopio distinto se reduce el ángulo isoplanático, siempre hay que tener cuidado de que el detector no vea la luz del láser dispersada por las capas bajas de la atmósfera, etc. El inconveniente de las estrellas artificiales es que con ellas se pierde la información de la inclinación del frente de ondas («tilt»).

Para el gran telescopio propuesto se baraja la posibilidad de que el elemento adaptativo sea el propio espejo secundario. La pregunta que queda en el aire es si este espejo puede ser uno de repuesto en lugar del original del telescopio. Podemos retomar el tema planteado al final de la sección anterior, pero esta vez para campos de visión mucho más pequeños (del orden del ángulo isoplanático) y utilizando la terminología de aberraciones

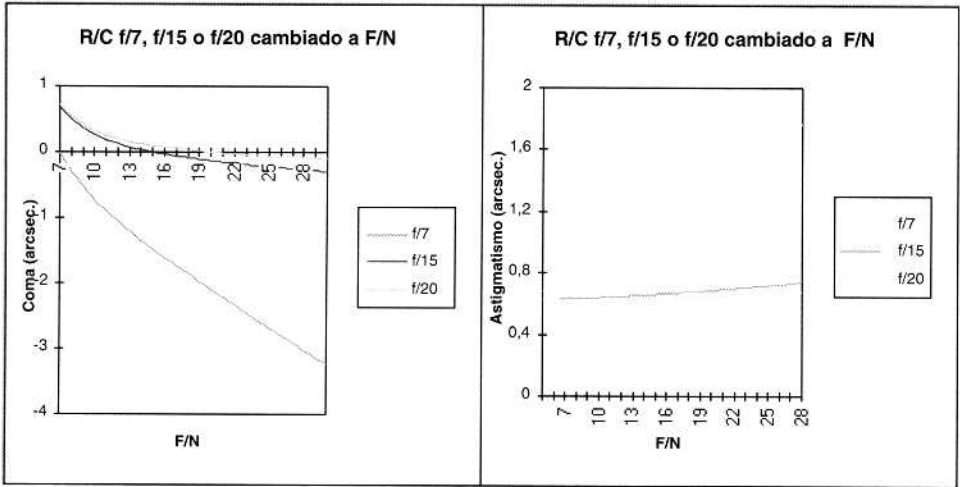


FIGURA 7. Aberraciones transversales de un telescopio de 10 m. y razón focal F/N obtenido al sustituir el espejo secundario de un Ritchey-Chretien. Se han considerado sólo tres ejemplos de Ritchey-Chretien de partida: f/7, f/15 y f/20. El primario es siempre un f/1.8. Se ha representado el coma y el astigmatismo sagitales medidos a un campo de 10 arc min en una superficie imagen de curvatura media. En todos los casos el foco secundario coincide con el vértice del espejo primario.

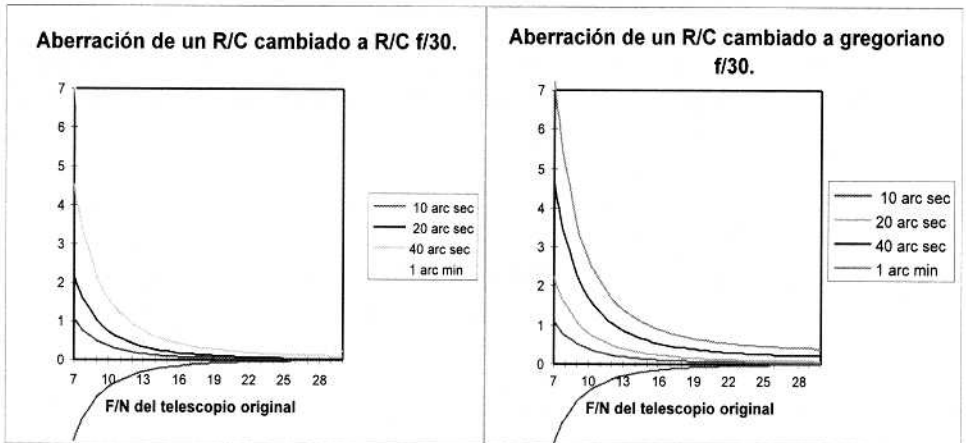


FIGURA 8. Aberración total de frente de onda correspondiente a un telescopio f/30 de 10 m. que se ha obtenido a partir de un Ritchey-Chretien de razón focal F/N al que se ha cambiado el espejo secundario, siempre se mantiene el espejo primario de partida (un f/1.8). Cada curva corresponde a un ángulo de campo diferente entre 1 arc min (las curvas superiores) y 10 arc sec (las curvas inferiores). En la gráfica de la derecha se representa el caso de un f/30 Ritchey-Chretien y en la de la izquierda el de un f/30 gregoriano. Para realizar el cálculo de la aberración de frente de onda total sólo se han incluido las contribuciones del coma y el astigmatismo de Seidel. En todas las configuraciones se considera que el foco secundario y el vértice del espejo primario coinciden.

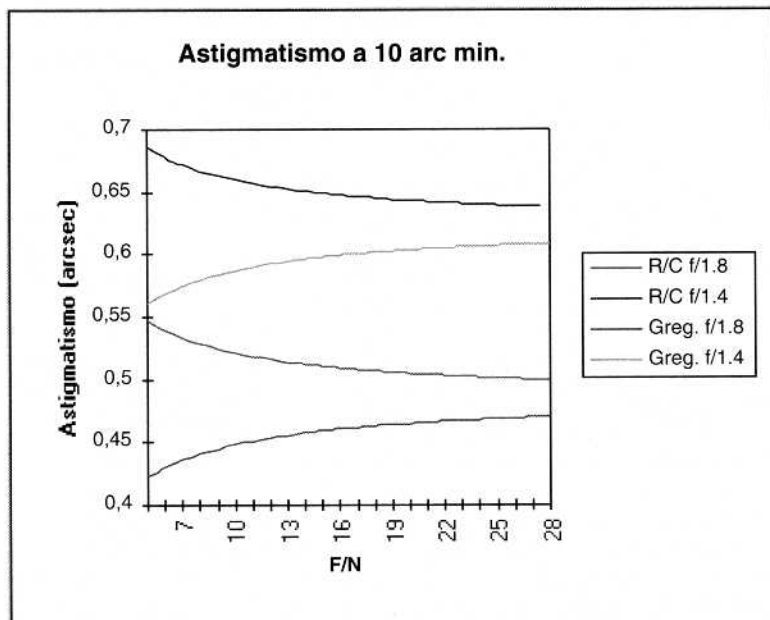


FIGURA 6. Astigmatismo de telescopios aplanáticos con primarios de 10 m y razón focal F/N medido a un campo de 10 arc min. Las curvas crecientes corresponden a configuraciones gregorianas y las decrecientes a Ritchey-Chretien. Se han considerado los casos de primarios f/1.4 y f/1.8, el astigmatismo es mayor para f/1.4. El cálculo se ha hecho para telescopios cuyo foco secundario coincide con el vértice del espejo primario.

Secundarios intercambiables

Para el futuro gran telescopio del ORM, se está planteando la posibilidad de tener dos espejos secundarios, uno para el infrarrojo y otro para el visible. Esta alternativa simplificaría los problemas derivados de buscar un compromiso entre las necesidades de la astronomía infrarroja y la visible. Cuando se cambia el secundario de un telescopio se alteran las aberraciones de modo que puede necesitarse cambiar también el corrector de campo. En particular, un sistema aplanático deja de serlo, y es precisamente el coma la aberración dominante en estos casos. Así puede verse en la figura 8 que contiene gráficas del coma y el astigmatismo que tendría un telescopio tipo Ritchey-Chretien² de una determinada razón focal (entre f/7 y f/30) y que se hubiera obtenido al sustituir en un Ritchey-Chretien de partida el secundario original (f/7, f/15 o f/20). Si para que dos secundarios sean intercambiables se toma como criterio que el cambio de secundario

² Se mantiene el nombre de Ritchey-Chretien para especificar que el secundario es convexo, aunque al cambiar el secundario la configuración deja de ser aplanática.

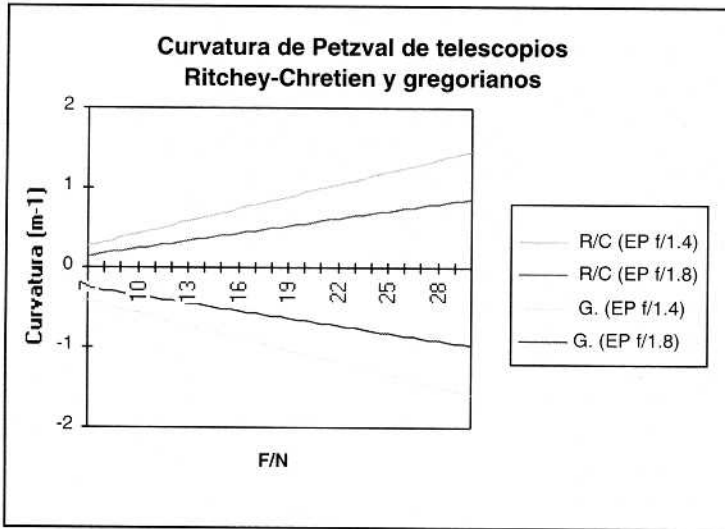


FIGURA 5. Curvatura de campo de telescopios de 10 m y razón focal F/N. Se han considerado telescopios de tipo Ritchey-Chretien (con curvatura positiva) y gregoriano (con curvatura negativa) que tienen espejos primarios f/1.4 y f/1.8, el caso de f/1.4 corresponde al de curvatura mayor en valor absoluto. Todos los telescopios tienen un foco secundario coincidente con el vértice del primario.

frente de ondas originada por la turbulencia atmosférica) cuando su diámetro es mayor que unos 15 cm. de diámetro en el visible y unos 500 cm. a las 10 micras. En un buen observatorio astronómico el «seeing» es con frecuencia es menor de 0.5 arc sec.

Las aberraciones de telescopios aplanáticos de dos espejos con las dimensiones típicas de grandes telescopios, superan el valor del «seeing» para ángulos de campo moderados y hay que corregirlas (ya sea con correctores de campo o a través de la instrumentación) o reducir el campo de visión. Esto queda de manifiesto en las figuras 3 y 4, en las que se representan las aberraciones de orden inferior de varios telescopios Ritchey-Chretien y gregorianos aplanáticos con razones focales entre f/7 y f/30. Las aberraciones que afectan al frente de onda quedan bastante bien representadas por las aberraciones de primer orden o de Seidel (o las aberraciones de rayos correspondientes representadas en la figura 6) porque, en el rango de diseños aplanáticos considerados, los órdenes superiores son pequeños. No sucede lo mismo con las aberraciones que afectan a la posición de la imagen, en parte porque la curvatura de Petzval no es una buena representación de la curvatura de campo en presencia de astigmatismo, pero también por el efecto de los órdenes superiores en telescopios lentos (f/20 o más). De los sistemas aquí considerados, el sistema con aberraciones menores es un gregoriano con primario lento y secundario rápido, precisamente la que tiene un tubo más largo. En otras palabras, lo que es preferible desde el punto de vista óptico es lo menos aconsejable desde el punto de vista mecánico y económico.

visión en el foco secundario, que tradicionalmente es mayor en este último. La posición del diafragma de apertura y el campo de visión (en general del orden de las decenas de minutos de arco) afectan al tamaño del secundario pero de un modo mucho menos trascendente que las razones focales del telescopio y del primario y el tipo de configuración. En la figura 4 se ha representado el diámetro del secundario en función de la razón focal del telescopio para configuraciones de tipo Cassegrain y gregoriana. Puede apreciarse como es mucho más grande para estas últimas. Un secundario infrarrojo no debe tener un diámetro mayor a 1 m., si es adaptativo esta medida puede ser ya demasiado grande. De los casos considerados en la figura 4, los telescopios más rápidos posibles que tienen secundarios de 1 m. corresponden a un Ritchey-Chretien $f/17$ y a un gregoriano $f/20$, ambos con diafragma de apertura en el secundario y primario $f/1.4$.

Las aberraciones

La mayor parte de los telescopios de última generación (primarios de más de 8 m.) son de tipo Ritchey-Chretien o gregoriano aplanático: presentan la ventaja de tener campos de visión corregidos mayores que los de tipo Cassegrain o Newton —por la corrección del coma además de la aberración esférica— y no necesitan una lente correctora tan grande como el espejo primario —sería el caso de un Schmidt o un Maksutov— que no podría fabricarse. Un telescopio terrestre tradicional está limitado por el «seeing» (distorsión del

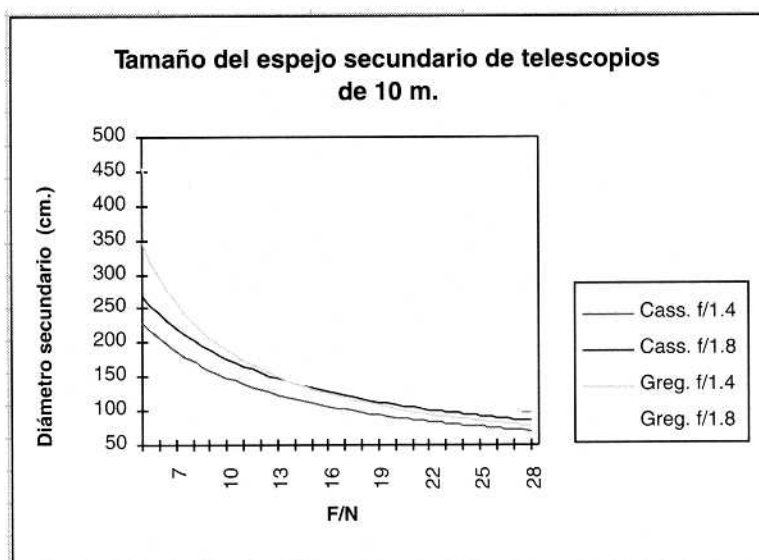


FIGURA 4. Diámetro del espejo secundario de telescopios con primarios de 10 m. Se representan telescopios de configuración Cassegrain (las dos curvas inferiores) y gregoriana con primarios $f/1.4$ (correspondientes a los secundarios menores) y $f/1.8$. Se consideran sólo diseños cuyo foco secundario coincide con el vértice del espejo primario.

hacerla lo más pequeña posible se recurre a diversas medidas como acortar la longitud del tubo. En la figura 3 puede verse cómo depende este parámetro de la razón focal¹ del telescopio y del tipo de configuración para varios valores de la razón focal del primario. Los telescopios más cortos corresponden a Ritchey-Chretien con primarios y secundarios rápidos, los más largos a gregorianos con primarios y secundarios lentos.

El tamaño del espejo secundario afecta a la estructura mecánica del telescopio y a la radiometría del sistema óptico. Las técnicas observacionales típicas de la astronomía infrarroja requieren telescopios con espejos secundarios pequeños y lentos. Lo mismo sucede si el secundario es adaptativo. En ambos casos, el secundario debe coincidir con el diafragma de apertura del sistema, bien para evitar que la emisión térmica de la estructura sea vista por el detector, bien para no reducir el ángulo isoplanático. Un telescopio para el visible no necesita un secundario pequeño ni lento y la ubicación del diafragma de apertura no es tan crítica, aunque es preferible que esté en el primario para reducir las pérdidas de luz. Otra diferencia entre un telescopio infrarrojo y uno visible es su campo de

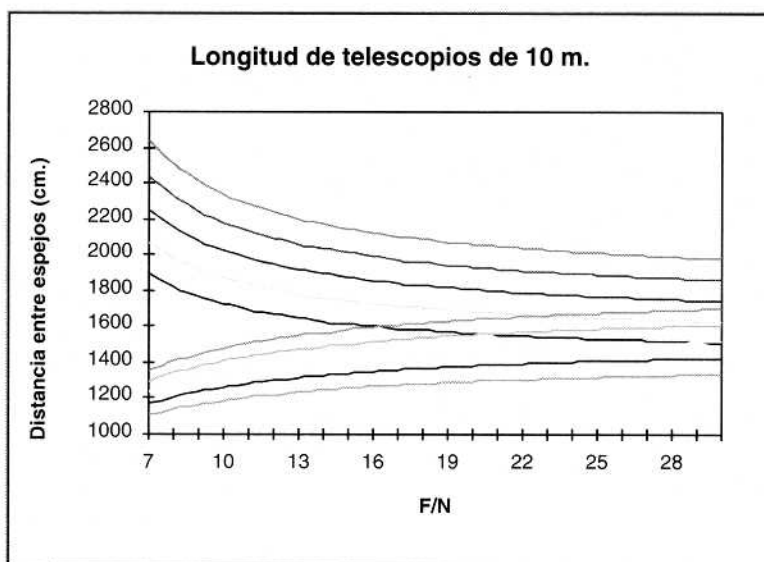


FIGURA 3. Longitud de un telescopio con primario de 10 m. en función de la razón focal (F/N). Las curvas crecientes corresponden a telescopios Cassegrain y las decrecientes a gregorianos, ambos grupos con primarios (de abajo a arriba) con razones focales $f/1.4$, $f/1.5$, $f/1.6$, $f/1.7$ y $f/1.8$. Se consideran sólo diseños cuyo foco secundario coincide con el vértice del espejo primario.

1 La razón focal aquí hace referencia al cociente entre la longitud focal y el diámetro de la pupila de entrada (F/N en las gráficas). Es, por tanto, el inverso de la apertura relativa o la mitad del inverso de la apertura numérica. Así se dirá que un sistema óptico es rápido cuando su razón focal es pequeña (su apertura numérica es grande) y lento cuando sucede lo contrario.

Integración de los segmentos en el telescopio, alineado y puesta en fase

El espejo primario está realmente acabado sólo cuando los segmentos se integran en el telescopio y se ajustan los arneses de sus soportes. Primero se coloca cada segmento en su celda acoplado a ésta el soporte individual, la celda correspondiente ha sido previamente situada en la estructura de soporte del primario con la ayuda de teodolitos.

Se procede entonces al alineado y puesta en fase de los segmentos utilizando el PCS («phasing camera system», un instrumento especialmente diseñado para ello, [3] y la luz de una estrella. El PCS está instalado en uno de los focos Cassegrain $f/15$ del telescopio y se basa en el mismo principio que los test de Hartman (el análisis de las figuras de difracción formadas por subaperturas que se colocan en el diafragma de apertura, o en una imagen del mismo). Tiene distintos modos de operación en los que se usan varias máscaras con patrones de subaperturas diferentes. En el modo inclinación pasivo se miden las inclinaciones de los segmentos para alinear el primario actuando cada uno de ellos como una subapertura. El modo de puesta en fase permite medir las diferencias de fase entre los frentes de onda reflejados por segmentos contiguos usando subaperturas en su intersección.

El PCS también permite ajustar los arneses del soporte de los segmentos y alinear y enfocar el secundario, para lo cual está dotada de otros dos modos de operación —los llamados modos de espaciados fino y ultrafino— en los que se analizan las aberraciones de las imágenes de una estrella. Ambos requieren máscaras con varias subaperturas por cada segmento.

En los segmentos de Keck I se han alcanzado errores de superficie de 40 nm rms aproximadamente y pueden ponerse en fase con una precisión de unos 30 nm, pero se espera que ambas cifras sean mejoradas.

LA CONFIGURACIÓN ÓPTICA DEL TELESCOPIO

La selección de la configuración óptica de un telescopio se lleva a cabo atendiendo a los requerimientos impuestos por la astronomía que va a realizarse con él y atendiendo a criterios no sólo de tipo óptico sino también económico, mecánico, etc. Con frecuencia, los de más peso en el caso de telescopios de gran diámetro son los económicos. Las consideraciones ópticas relacionadas con la corrección de aberraciones son importantes a la hora de optar por un tipo de configuración (Newton, Cassegrain, gregoriano, etc.), pero no lo son tanto para decidir las dimensiones físicas (parámetros como la longitud focal, los radios de curvatura de los espejos, el tamaño del secundario, etc.). En esta sección se exponen brevemente algunos de los factores que se están revisando en el proyecto. Se han considerado únicamente telescopios con primarios de 10 m. como el Keck I. Para los cálculos de aberraciones realizados en este trabajo se ha seguido el tratamiento expuesto por Schroeder [4].

Las dimensiones físicas

Uno de los elementos que más encarece el precio de un telescopio es su cúpula. Para

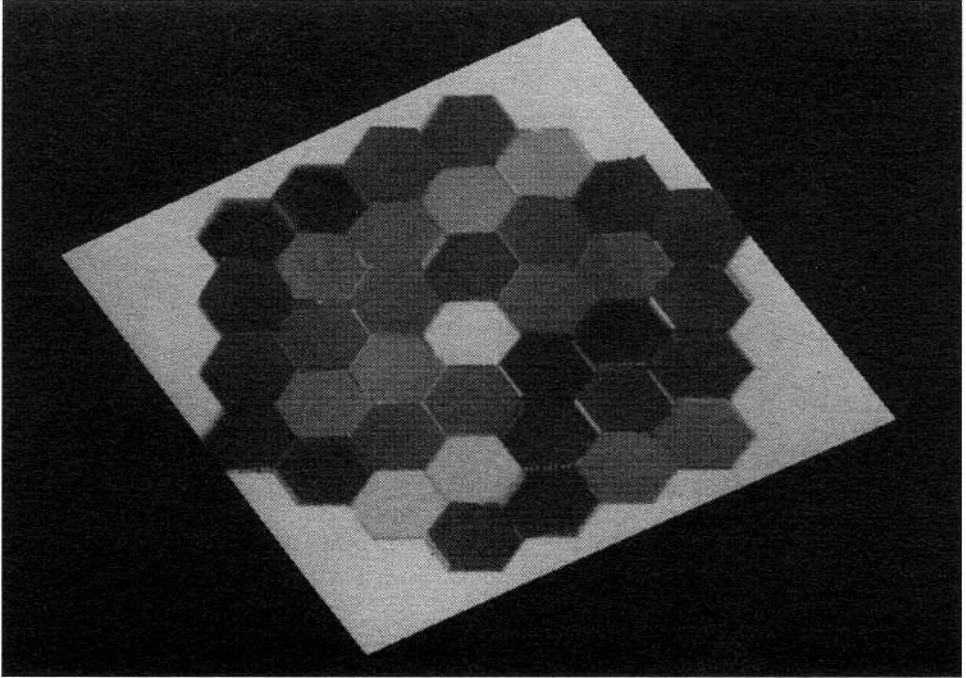


FIGURA 2. Esquema de un espejo segmentado de 36 componentes hexagonales. Las diferencias en los tonos de gris de los segmentos reflejan que no están en fase ni alineados.

segmento para darle la forma geométrica adecuada y se practican una serie de hendiduras en su cara posterior donde se alojan y pegan los elementos de conexión con un soporte mecánico individual. El acabado de la superficie de los segmentos se termina con la técnica denominada pulido con cañón de iones. Con ella se reducen los errores de superficie de frecuencia media y baja. Finalmente, se fija cada segmento a su soporte individual al que se le colocan unos arneses que al ser ajustados (en el propio telescopio) dan y mantienen la forma óptima de la superficie del segmento. Estos arneses eliminan los errores de baja frecuencia remanentes.

Durante la fabricación, los segmentos se someten a controles que garantizan el producto en cada etapa y proporcionan los datos de partida para la siguiente. Con un perfilómetro y una buena esfera de referencia se mide el radio de curvatura del segmento mientras se realiza el pulido bajo tensión. El segmento pulido y liberado del soporte se coloca en una torre especialmente diseñada y construida para estudiar la superficie óptica en configuración de autocolimación. Allí se establecen las referencias para el proceso de corte con la ayuda de un interferómetro (para Keck se usó uno de desplazamiento de fase y configuración Twyman-Green). Este mismo equipo es utilizado para realizar una caracterización de la superficie de los hexágonos ya cortados que sirve de datos de entrada para el pulido con haz de iones. Además, esta torre y el mismo interferómetro permiten evaluar el perfil final de los segmentos.

incluso algunas de las perturbaciones introducidas por la atmósfera en el frente de onda, posibilitando la observación en condiciones próximas al límite de difracción del telescopio.

y 3. En optimizar el telescopio para la observación infrarroja. En efecto, puesto que para longitudes de onda superiores a 2.5 micras el ruido dominante es el ruido fotónico debido principalmente a la emisión térmica del telescopio, la eficiencia observacional aumenta con la cuarta potencia del diámetro del telescopio, o lo que es igual, el tiempo necesario para realizar una observación dada con un telescopio de 8 metros es 16 veces menor que el tiempo requerido para la misma observación con un telescopio de 4 metros. De aquí la importancia de reducir al máximo la emisividad térmica del telescopio.

El IAC propone construir un telescopio [1] en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) —en la isla de La Palma— que responderá a estos retos, para lo cual invitamos muy especialmente a la comunidad óptica a participar en alguno de los múltiples aspectos de interés que conlleva la consecución de esta tarea.

En las secciones que siguen se presentan brevemente las características ópticas más significativas del futuro telescopio para La Palma: su primario segmentado, su configuración óptica y su secundario adaptativo.

PRIMARIO SEGMENTADO

Una de las mayores dificultades a la que se enfrentan los proyectos de grandes telescopios es el peso de sus espejos primarios y su deformación por la acción de la gravedad. Los espejos segmentados ofrecen una vía de solución a este problema que será la adoptada para el gran telescopio del ORM. Estos espejos constan de varios elementos, cada uno de ellos está fabricado sobre un bloque pequeño que puede ser más delgado y se deforma menos que uno grande. Tienen la desventaja de que es necesario integrar (alinear y poner en fase) los componentes para formar un único espejo y su estado debe ser controlado continuamente.

Esta tecnología ya ha sido probada en el telescopio Keck I, un 10 m. que el Instituto de Caltech y la Universidad de California han construido en el observatorio de Mauna Kea, Hawaii. Tiene 36 segmentos en forma de hexágonos irregulares. A continuación se describe el proceso seguido en la construcción del espejo primario del Keck I y que se seguiría, al menos sus líneas generales, en el telescopio para La Palma.

Fabricación de los segmentos

Cada segmento se fabrica a partir de un sustrato de Zerodur de forma circular. Los bloques se someten a un proceso de pulido bajo tensión [2]. Éste es un método para producción de superficies esféricas en el que se pule un bloque sujeto por un soporte especial que permite deformarlo. Las fuerzas de deformación aplicadas se calculan para que la relajación del bloque al ser liberado induzca en la superficie —pulida como una esfera— la forma esférica deseada. En esta etapa se fija el radio de curvatura y se eliminan los errores de alta frecuencia espacial de la superficie. A continuación se corta cada

de frente de onda (en lugar de aberraciones transversales). De modo similar a lo realizado allí, se ha calculado la aberración de frente de onda en un telescopio $f/30$ —valor adecuado para un secundario adaptativo— de tipo Ritchey-Chretien o gregoriano (que ya no son aplanáticos) obtenidos a partir de un Ritchey-Chretien más rápido —entre $f/7$ y $f/30$, que corresponderían a secundarios pasivos visibles o infrarrojos—. Se han considerado solamente las contribuciones del coma y el astigmatismo de Seidel. Los resultados se presentan en la gráfica 7 para varios ángulos de campo. Esta gráfica pone de manifiesto que errores menores que 1 micra ($1/5$ para luz de 5 micras) sólo pueden obtenerse cuando se parte de telescopios que son bastante lentos (más que un $f/15$).

AGRADECIMIENTOS

Debemos nuestro agradecimiento a varias personas han prestado su ayuda durante la elaboración del presente artículo, en especial a N. Devaney y C.D. Bello Figueroa que colaboraron en la elaboración de alguno de los gráficos.

BIBLIOGRAFÍA

1. J.M. RODRÍGUEZ ESPINOSA: «Un telescopio de nueva tecnología para la astronomía española». *Revista Española de Física* **9** (2), 1995.
2. T. MAST, J. NELSON: «The Fabrication of Large Optical Surfaces Using a Combination of Polishing and Mirror Bending». S.P.I.E. Proceedings, *Advanced Technology Optical Telescopes IV*, vol. 1.236, 1990.
3. G. CHANAN, T. MAST, J. NELSON, P. WIZINOWICH, B. SCHAEFER: «The W.M.Keck Telescope Phasing Camera System». S.P.I.E. Proceedings, *Instrumentation in Astronomy*, vol. 2.198, 1994.
4. D.J. SCHROEDER: *Astronomical Optics*. Academic Press, 1987.
5. N. DEVANEY: *Comunicación privada*.