

EVALUACIÓN ÓPTICA DE SISTEMAS ASTRONÓMICOS

ANA MANZANARES

El hecho de comprar un telescopio con unas determinadas especificaciones técnicas no significa que el mismo las cumpla. Lo mismo puede decirse de aquellos osados que lo fabrican por sí mismos. Los cálculos iniciales que determinan los aumentos, luminosidad o campo, pueden no ser reales en el dispositivo finalmente montado. Tanto si queremos utilizar nuestro telescopio como un instrumento de medida y conocer con precisión el estado en que está operando, como si hemos notado alguna deficiencia del funcionamiento en observación visual, se hace necesario estudiar y medir los parámetros que definen nuestro telescopio, así como los que se relacionan con la calidad de la imagen que obtenemos a la salida.

Existen numerosos tipos de test. Los que proponemos con mayor énfasis en este artículo son los más sencillos, aquellos que podemos realizar nosotros mismos con objetos cotidianos que podemos conseguir o fabricar fácilmente. Los test propuestos evalúan el telescopio completo (refractor o reflector), su funcionamiento global, pero no nos proporcionan información de cada elemento que compone el sistema.

PARÁMETROS DE UN TELESCOPIO

Denominamos parámetros del telescopio a aquellos indicadores que lo definen y en los que nos fijamos a la hora de comprar o fabricar. Los parámetros más usuales son: aumentos, luminosidad y campo angular.

AUMENTOS

Relación que existe entre el tamaño del objeto y el tamaño de la imagen ($\text{Aumentos} = \frac{\text{Tamaño Imagen}}{\text{Tamaño Objeto}}$).

Proponemos dos formas de comprobar los aumentos teóricos del telescopio: medida directa e indirecta, ambas a realizar con luz diurna.

La medida directa es cualitativa y se realiza utilizando el ojo como medidor. Para hacerla se dirige el telescopio hacia una regla vertical, con distancia conocida entre las divisiones (Figura 1a), situada a unos 100 metros aproximadamente. Se trata de superponer la imagen que se ve a través del telescopio con un ojo y la imagen que ve el otro ojo sin telescopio.

Una mejora del sistema incluye dos accesorios más: separador de haz (lámina plano paralela a 45°) y espejo plano

paralelo convencional (Figura 1b). El espejo dirige la imagen de la regla sin telescopio hacia el separador, donde se superponen las dos imágenes. Mirando al separador, podremos ver superpuestas ambas imágenes y medir la relación de tamaños para determinar los aumentos.

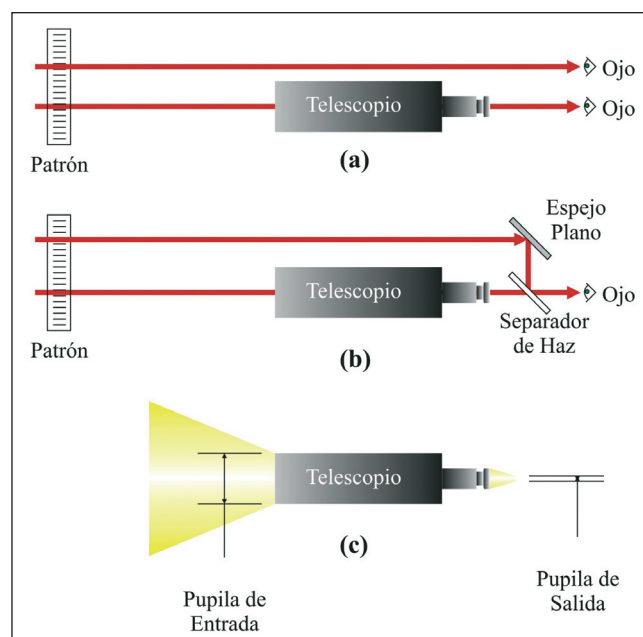


Figura 1. Medida de aumentos, a) y b) Medidas directas, c) Medida indirecta. (Excepto donde se indique, todas las imágenes son cortesía de la autora)

La medida indirecta es mucha más precisa. Para realizarla se coloca el telescopio en posición vertical con el objetivo hacia el Sol (Figura 1c). Conocido el diámetro de la pupila de entrada (el diámetro del objetivo), y suponiendo que se utiliza efectivamente todo el diámetro del objetivo, se coloca en la pupila de salida del ocular una pantalla con una escala graduada en décimas de milímetro ($\pm 0,10$ mm), que se utilizará para medir el diámetro de esta pupila. Los aumentos se determinarán mediante la división del diámetro de la pupila de entrada entre el diámetro de la pupila de salida.

LUMINOSIDAD

Viene dada por el diámetro de la pupila de salida del instrumento y, para observación visual, del área de la pupila ocular. La medida de la pupila de salida se realiza según se ha explicado en la medida indirecta de los aumentos (ver Figura 1c). Por otro lado, el diámetro de la pupila ocular (iris) varía de tamaño de acuerdo con la iluminación externa: rango fotópico (día brillante = 2 mm, día nublado = 4 mm) y rango escotópico (noche = 8 mm).

Dado que los telescopios astronómicos sólo se utilizan por la noche, esto implica que el telescopio a usar debe tener una pupila de salida de al menos 8 mm de diámetro, con el fin de que toda la imagen de salida del telescopio rellene nuestra pupila ocular.

Si la pupila de salida del telescopio tiene un diámetro menor que la pupila ocular, el objeto observado a través del telescopio puede no aparecer tan brillante como cuando lo vemos con el ojo sin telescopio.

CAMPO ANGULAR DE VISIÓN

Para medir el campo angular de visión se utiliza el mismo sistema que el mostrado en la Figura 1a. El tipo de patrón que usaremos en este caso es un objeto horizontal escalado y calibrado en dimensiones angulares (Figura 2b) que colocaremos a 100 metros del objetivo del telescopio.

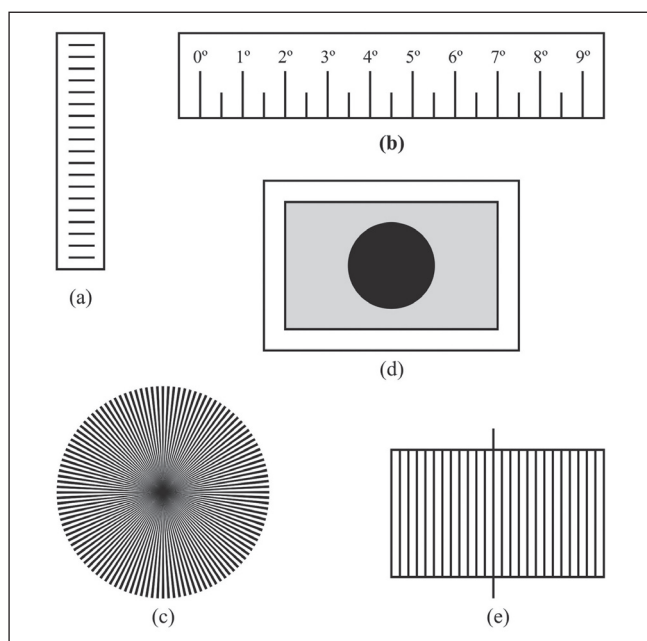


Figura 2. Tipos de patrones, a) Aumentos, b) Campo angular de visión, c) Astigmatismo, d) Luz parásita, e) Resolución.

El *campo de visión real* viene determinado por la distancia entre las posiciones en las que el diafragma ocular parece cortar la escala angular.

El *campo de visión aparente* se obtiene observando la posición en la que la imagen virtual del diafragma ocular parece cortar el campo abierto observado con el otro ojo. Anotando las dos posiciones donde esto ocurre, la separación angular de estas posiciones se mide por lectura directa de la escala.

La relación entre el campo angular aparente y el campo angular real nos da también una medida de los aumentos.

PARÁMETROS DE CALIDAD DE IMAGEN

Una vez que conocemos las especificaciones concretas de nuestro telescopio, es necesario estudiar la imagen de salida que nos proporciona. La calidad de esta imagen está limitada por diferentes efectos, entre los que destacamos: defectos de la óptica (aberraciones cromáticas y monocromáticas), luz parásita, descentrado, tensiones internas y poder de resolución del equipo.

ABERRACIONES CROMÁTICAS

Está presente en sistemas que contienen elementos refractores (lentes, prismas), donde la luz tiene que atravesar una cierta masa de vidrio. Dado que los vidrios tienen diferente índice de refracción dependiendo de la longitud de onda, esto implica que el telescopio tiene una focal diferente según cada longitud de onda.

En los telescopios refractores usuales, se usan objetivos acromáticos de dos lentes, diseñados para que el color rojo (656,27 nm) y el azul (486,13 nm) tengan el mismo foco (Figura 3), mientras que la focal para el verde (546,07 nm) estará más cerca de la lente. En los refractores apocro-

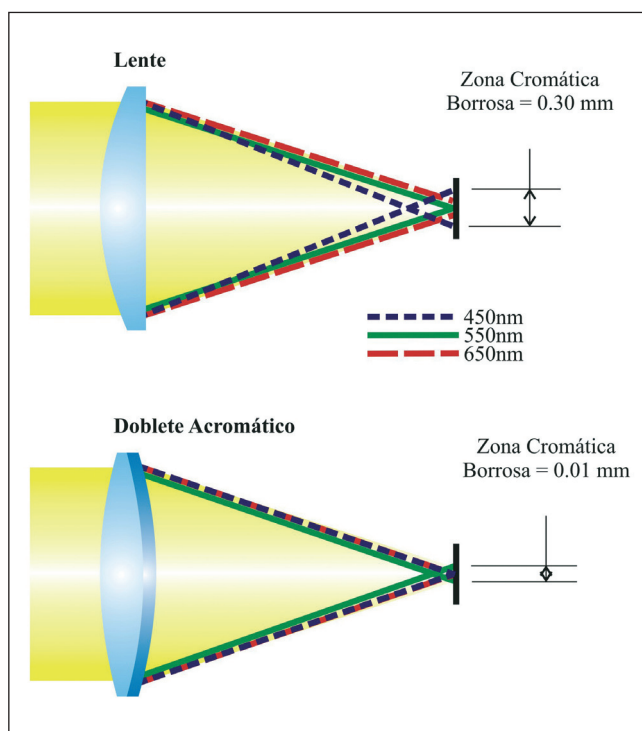


Figura 3. Aberración cromática.

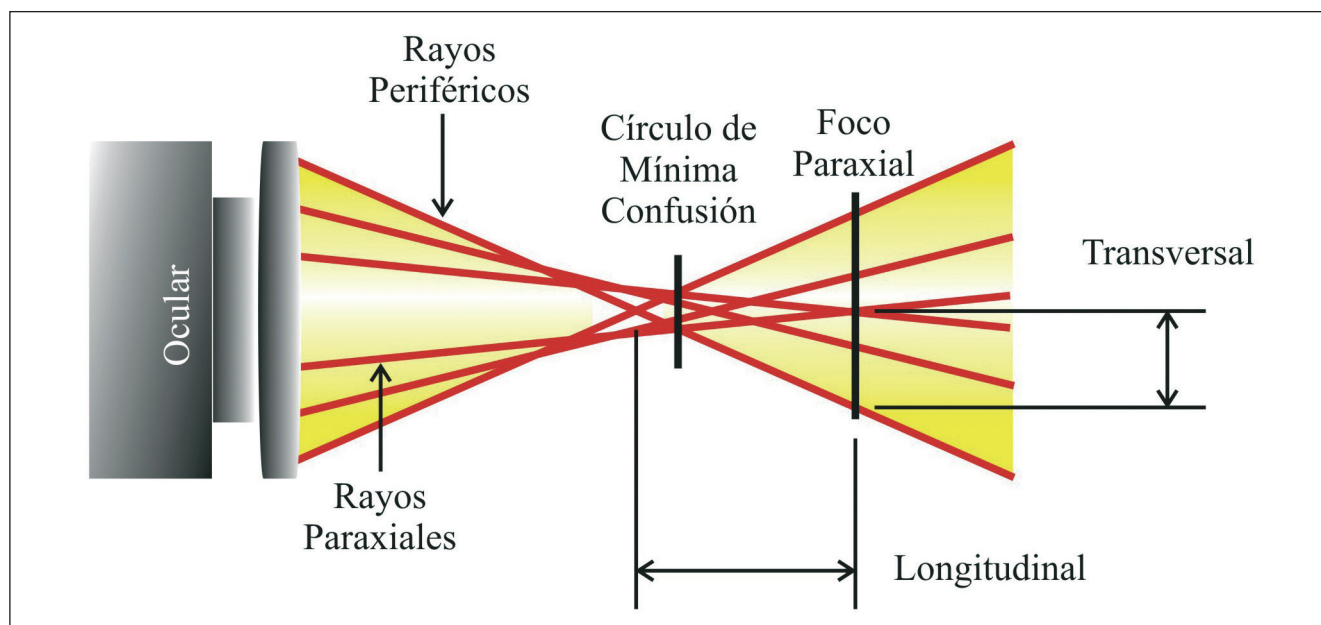


Figura 4. Aberración esférica.

máticos, la aberración cromática está corregida para tres longitudes de onda y en los súper-apocromáticos para cuatro. Los sistemas que sólo contienen espejos no tienen aberración cromática.

Para estudiar la aberración cromática de nuestro telescopio, conviene enfocar por la noche a una estrella lejana y observarla en el mejor foco que podamos encontrar. El telescopio puede presentar los siguientes tipos de aberraciones de color:

- Cromática Bajo-Corregida: en el mejor foco se observa un centro azul y un halo rojo.
- Cromática Sobre-Corregida: en el mejor foco se observa un centro rojo y un halo azul (Figura 3).
- Cromática Corregida: en el mejor foco se observa un centro sin rojo ni azul, porque enfocan en el mismo punto, pero puede mostrar un *espectro secundario*, o la diferencia en la distancia focal que tienen las longitudes de onda contenidas entre las dos longitudes de onda corregidas. Este tipo de aberración da lugar a una imagen con un centro verde-amarillo y un halo violeta.

ABERRACIONES MONOCROMÁTICAS

No dependen de la longitud de onda.

La *aberración esférica* es un defecto endémico en todas las ópticas que no usen superficies asféricas (p.e., parábolas) y se debe a que los rayos paralelos más cercanos al eje (paraxiales) enfocan en un punto diferente que los rayos más cercanos a los bordes (periféricos).

Existe un punto de diámetro mínimo llamado el *círculo de mínima confusión* o mejor foco, donde se realizan las medidas de aberración cromática que antes hemos explicado. Para estudiar la aberración esférica lo mejor es enfocar el telescopio a una estrella aproximadamente monocromática y usar el *Star-Test* que comentaremos más adelante.

La *aberración de coma* es causada porque los rayos oblicuos (no paralelos al eje óptico), que pasan a través de la óptica del telescopio no intersectan con el eje oblicuo en el mismo punto de la imagen.

Este efecto produce una imagen con forma de coma, en lugar de un punto circular (Figura 5). Es más pronunciado en los puntos más cercanos al borde del campo y es totalmente inaceptable si se presenta en el centro de la imagen. En los telescopios astronómicos la aberración de coma suele estar causada por la inclinación o descentrado de uno o varios componentes del objetivo. La forma de detectar aberración de coma es realizando un *star-test* al telescopio y la forma de medir el descentrado o inclinación es a través del test de centrado.

La *aberración de astigmatismo* es debida también a los rayos oblicuos. En este caso ocurre que los rayos que llegan oblicuos en un plano vertical (tangenciales) forman foco en el plano focal sagital (rojo) mientras que los rayos oblicuos que llegan en un plano horizontal (sagitales) enfocan en el plano focal tangencial (amarillo, ver figura 6).

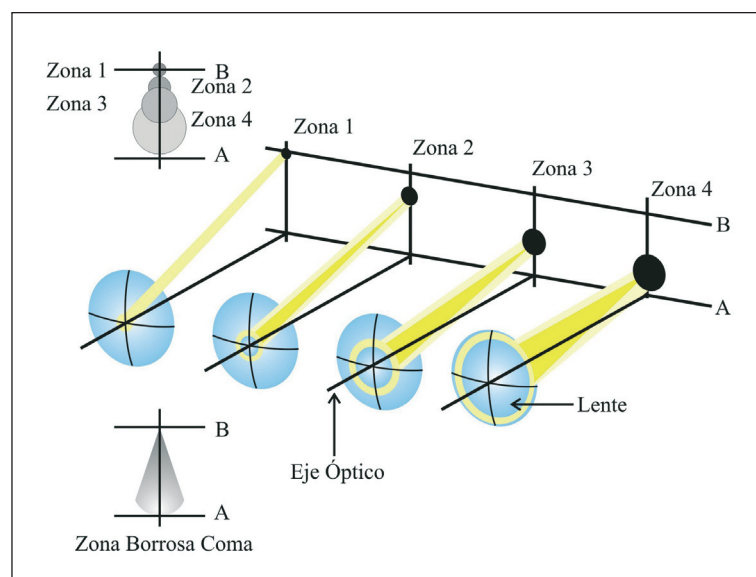


Figura 5. Aberración de coma.

Esto da lugar a que se formen dos líneas focales, con un círculo de mínima confusión (en negro) entre ambas. Las imágenes de salida del telescopio mostrarán manchas elípticas. Este defecto suele estar causado, como el coma, por inclinación y/o descentramiento de los elementos componentes del objetivo, aunque también puede estar debido a inhomogeneidades en los vidrios, así como defectos en la fabricación, cuando algún radio de curvatura en el eje horizontal es distinto del vertical.

LUZ PARÁSITA

La luz parásita o difusa afecta al funcionamiento de un telescopio disminuyendo el contraste de la imagen. No toda la luz que entra en un telescopio contribuye a la formación de la imagen, parte de ella es reflejada y dispersada en las paredes de un telescopio y puede no entrar en la pupila de salida del sistema.

En un telescopio terrestre en observación visual, este efecto es poco importante, ya que el tamaño de la pupila ocular es muy pequeño (de 2 a 4 mm) y es difícil que la luz parásita llegue a entrar dentro del ojo. Sin embargo, en un telescopio astronómico en observación visual, el tamaño de la pupila ocular es mucho mayor (8 mm) y la pérdida de contraste inhabilita al telescopio para apreciar objetos lejanos. Para estudiar este efecto se utiliza el test de luz difusa.

TENSIONES INTERNAS

Son las tensiones que soportan los elementos ópticos internos del conjunto telescópico. Ninguna de las partes del sistema debe mostrar tensiones, puesto que dañan el funcionamiento del objetivo, incluso produciendo dobles imágenes si la tensión es severa. Las tensiones suelen producirse al abrazar una lente demasiado ajustada en su alojamiento o un espejo de una forma irregular en su base. Para estudiar las tensiones del telescopio se utiliza un polaroscopio.

PODER DE RESOLUCIÓN

El poder de resolución es la capacidad del sistema para resolver detalles pequeños. Suele ser expresado como el ángulo que subtienden dos imágenes resueltas en el objetivo astronómico o como el objeto con el tamaño mínimo discernible a una distancia dada.

Como objetos suelen utilizarse estrellas lejanas que se comportan como fuentes puntuales y que, a través del telescopio, tienen una imagen en el foco que se denomina disco de Airy. En general, debido a los defectos que hemos comentado antes y a la difracción, la imagen de un objeto puntual no es otro punto igual, sino uno con mayor diámetro y una serie de anillos concéntricos. Por ello, si miramos dos objetos puntuales muy cercanos, es posible que se solapen y no lleguemos a verlos separados al mirar a través del telescopio. La distancia mínima que debe haber entre los dos objetos para verse separados es lo que llamamos poder de resolución del sistema. Existen numerosos criterios de resolución aplicables a muy diferentes casos.

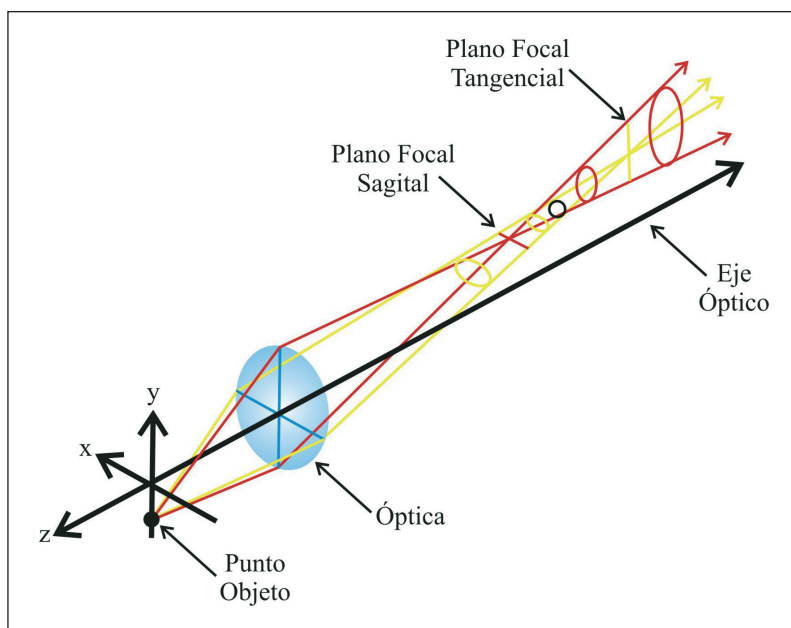


Figura 6. Aberración de astigmatismo.

El diámetro del disco de Airy depende de la longitud de onda usada al formar la imagen y del número #F del telescopio. Este número #F es la relación entre la focal del objetivo y su diámetro ($\#F = F/D$). De modo que, para una focal dada, cuanto mayor sea el diámetro del objetivo, menor será la mancha de Airy y mayor resolución tendrá nuestro sistema.

Uno de los criterios de resolución que más suele usarse es el criterio de Rayleigh, aplicable en el caso de dos fuentes puntuales incoherentes de igual intensidad en un sistema sin aberraciones. Según este criterio, dos imágenes se ven separadas y resueltas cuando la distancia entre sus centros es el radio del disco de Airy. Esto implica que el ángulo de resolución (θ) del telescopio será: $\theta = 1,22 \lambda/D$, donde λ es la longitud de onda y D el diámetro del objetivo. Por ejemplo, para un telescopio con poca apertura $D = 2,54$ cm, el ángulo de resolución es $\theta = 6,0$ segundos de arco, es decir, resuelve dos fuentes puntuales separadas 2,54 cm a 10.000 m. Sin embargo, si la apertura del telescopio es mayor $D = 25,4$ cm, el ángulo de resolución es de $\theta = 0,1$ segundos de arco, es decir, resuelve dos fuentes puntuales separadas 127 m a 336.000 km, que es casi la distancia de la Tierra a la Luna.

TESTS

A continuación expondremos una serie de pruebas que podemos hacer con nuestro telescopio a fin de estudiar los parámetros de calidad de la imagen que hemos mostrado en la sección anterior.

STAR-TEST

Es la prueba más empleada debido a su sencillez y a la gran cantidad de información cualitativa que proporciona. Para llevarlo a cabo, por la noche se observa una estrella con un ocular de moderada-alta potencia tanto en el punto de mejor enfoque (en foco), como en las imágenes que se forman a ambos lados de foco: un poco antes (dentro foco) y un poco después (fuera foco).

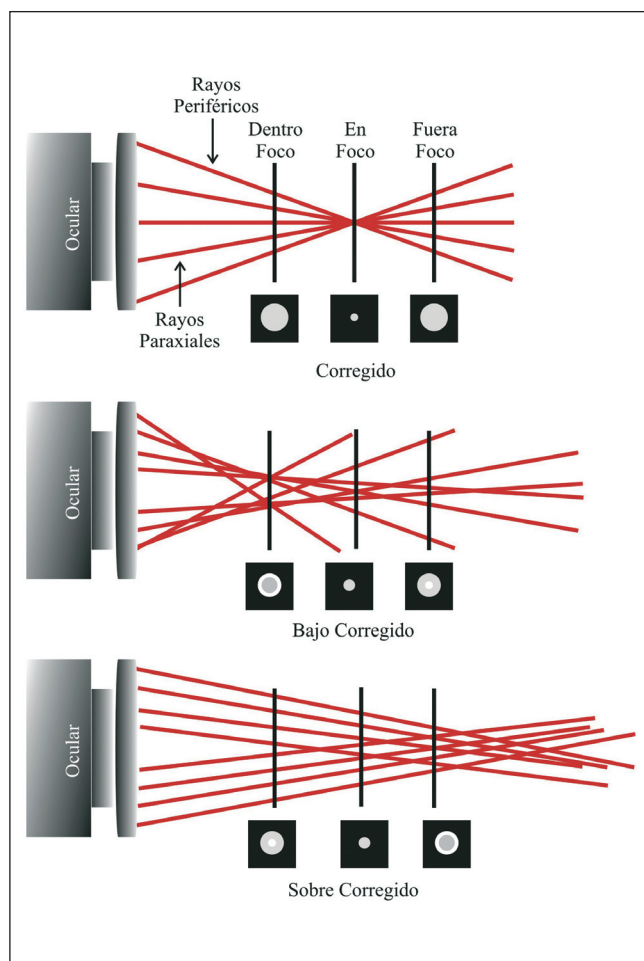


Figura 7. Star-test comprobando aberración esférica.

En la Figura 7 podemos observar cómo se mediría la aberración esférica utilizando el *star-test*. En la parte *corregida* se muestra un sistema que no tiene aberración esférica y, por tanto, la imagen en el foco es un punto pequeño y luminoso, mientras que la imagen antes y después del foco será una imagen borrosa de mayor tamaño. Si el sistema está *bajo-corregido* de aberración esférica, la imagen mejor enfocada seguirá mostrando un punto luminoso (aunque de diámetro mayor que si estuviera bien corregida), la imagen desenfocada hacia el foco será un anillo con el centro borroso y la imagen desenfocada fuera del foco será un punto con un anillo borroso alrededor. Lo contrario ocurrirá en un sistema con aberración esférica *sobre-corregida*.

La Figura 8 muestra los resultados de aplicar el *star-test* a sistemas con otros tipos de aberraciones y defectos. En general, las imágenes que aparecen en foco, dentro y fuera, no muestran la presencia de sólo un defecto, sino que suelen mostrar varios tipos de aberraciones a la vez. Para poder discriminar y deducir qué defectos tiene nuestro telescopio es conveniente disponer de un telescopio de referencia o comparar entre varios para poder entrenar nuestra vista en el reconocimiento de la aberración. Para observadores menos entrenados, la Figura 8 proporciona una guía para establecer la naturaleza de las aberraciones que puede sufrir su sistema, en comparación con el resultado para un sistema perfecto (imagen inferior).

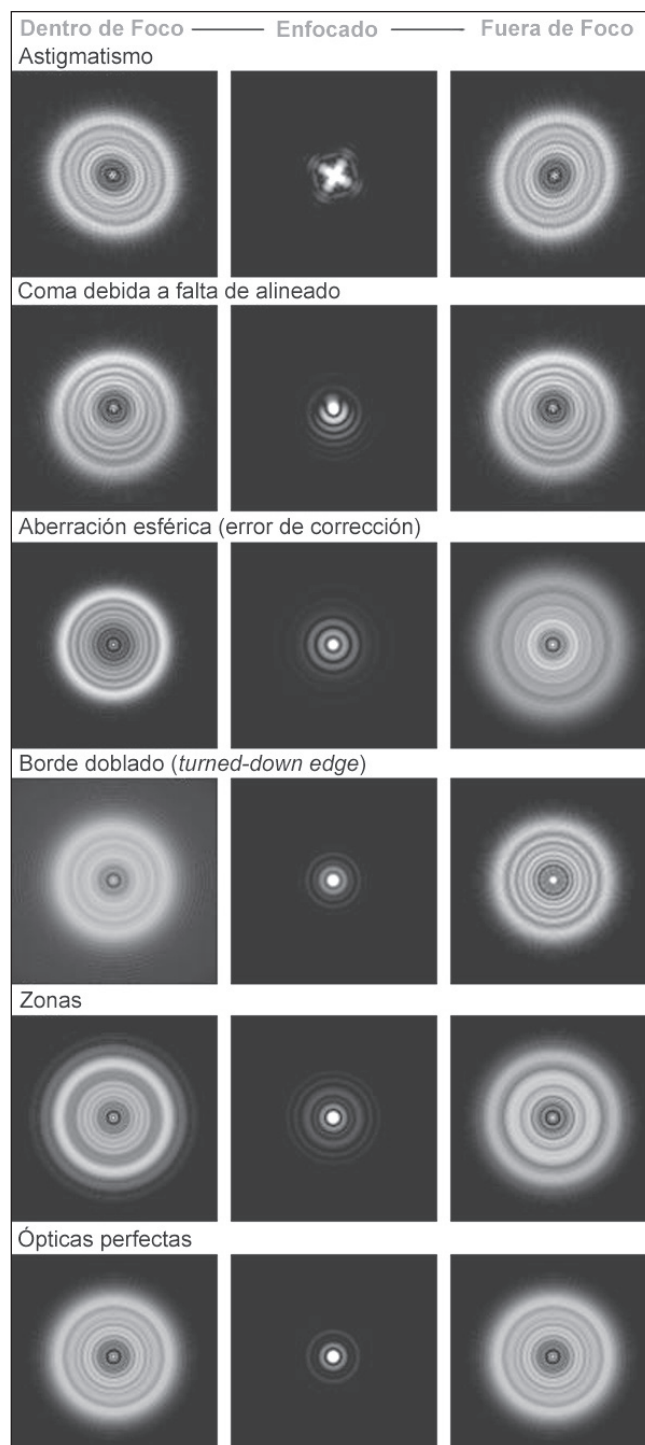


Figura 8. Resultados de Star-Test comprobando varias aberraciones y para sistema perfecto. (Adaptado y cortesía de Willmann-Bell Inc.)

TEST DE CENTRADO

Se utiliza para comprobar si el sistema tiene coma o astigmatismo causados porque el eje óptico del objetivo no es colineal con el eje mecánico del tubo. Para realizar el test de centrado se necesita el sistema que se muestra en la Figura 9.

El sistema es un tubo que se encaja con el ocular del telescopio por la parte izquierda y en cuyo interior se encuentra, de izquierda a derecha, un patrón anular con un punto en el

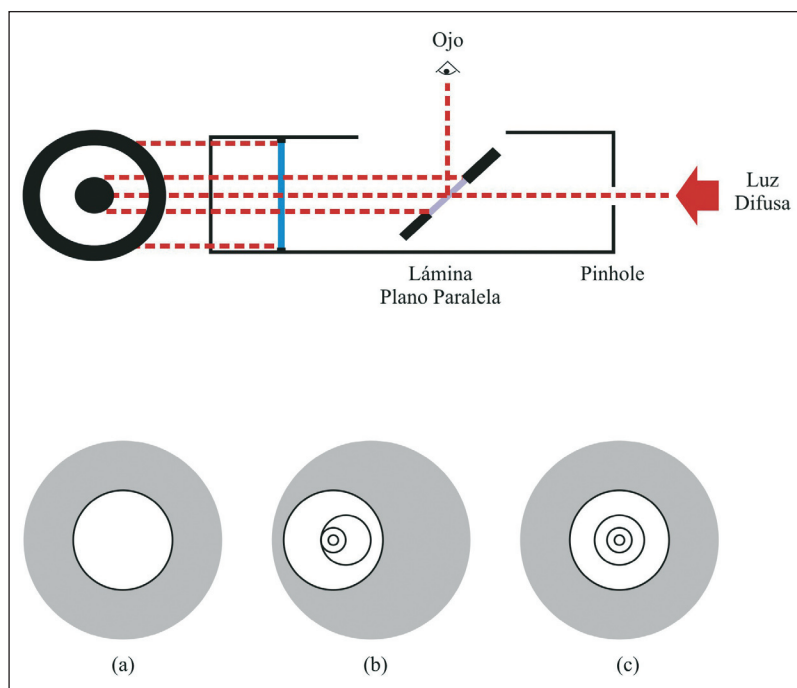


Figura 9. Test de centrado.

centro, una lámina plano paralela a 45°, y un agujero de diámetro muy pequeño (*pinhole*) por el que hacemos pasar luz blanca difusa. Iluminando el sistema con luz difusa, imágenes virtuales de la placa iluminada (en forma de un anillo de luz)

se reflejarán en las superficies del objetivo al otro extremo del tubo.

Dado que los radios de curvatura del objetivo, ya sea refractor o reflector, suelen ser muy grandes, la imagen reflejada de esta superficie tiene el mismo tamaño que el objeto. Podemos observar entonces sobre la superficie del objetivo varias estructuras: a) caso de un objetivo centrado con una única superficie, b) un objetivo con varias superficies inclinadas y descentradas, y c) objetivo con varias superficies centrado.

Para estudiar si el sistema tiene astigmatismo también puede utilizarse un patrón (véase Figura 2c) en una disposición como la mostrada en la Figura 1. Si nuestro sistema padece astigmatismo, en algún punto cercano al mejor enfoque (círculo de mínima confusión) se enfocarán mejor unas líneas con una cierta inclinación y en otro punto se enfocarán mejor las líneas perpendiculares.

TEST DE LUZ PARÁSITA

Con luz diurna, se dirige el telescopio, en una configuración similar a la Figura 1a, hacia una pantalla, como la que se muestra en la Figura 2d. Esta pantalla está construida colocando un papel

vegetal (que actúa de difusor) sobre un marco de madera y poniendo en su centro un círculo negro de material opaco.

El diámetro del círculo negro (y) y la distancia de colocación (s) respecto al telescopio debe ser tal que la pupila de

Escuela de Verano de Astronomía y Astrofísica para profesores

Organizan:

Círculo Astronómico Mediterráneo
de la Caja de Ahorros del Mediterráneo
CEFIRE Benidorm

Colabora:

Sociedad Española de Astronomía

DEL 4 AL 8 DE JULIO DE 2005

INSCRIPCIONES: En el CEFIRE de Benidorm. C./ Moscú, s/n.
03503 Benidorm, antes del 22 de mayo de 2005.

Fax: 966 806 016. **Por web:**

<http://intercentres.cult.gva.es/cefire/03402231/astrofísica.htm>



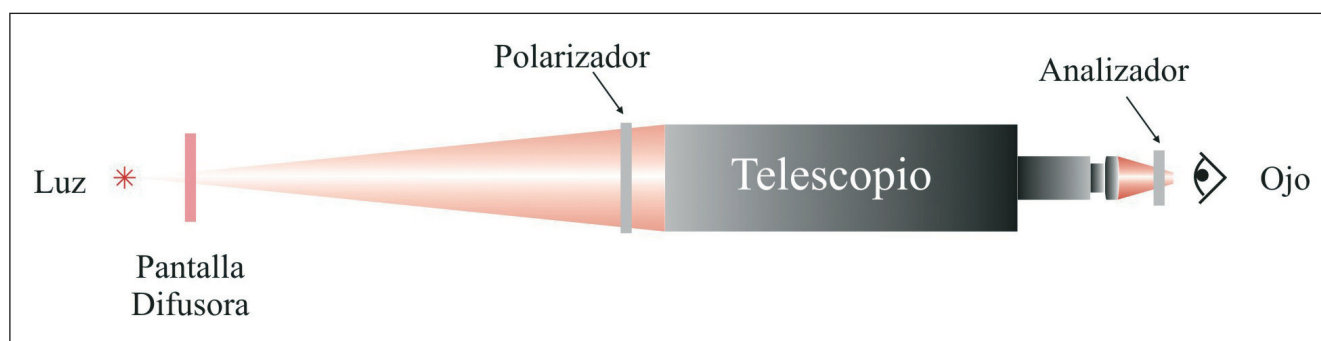


Figura 10. Test de tensiones.

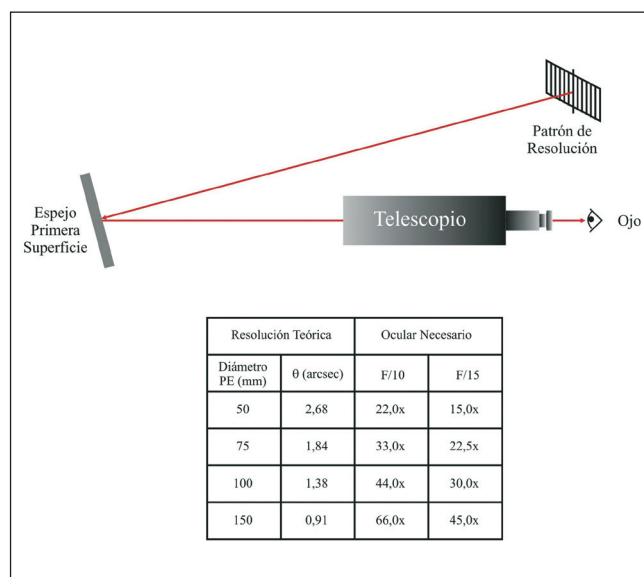


Figura 11. Test de resolución.

salida esté cubierta totalmente por la imagen de la mancha circular. Como conocemos los aumentos de nuestro telescopio (M), el tamaño de su pupila de salida (y') y su distancia del ocular (s'), podemos conocer los parámetros del círculo negro a colocar: tamaño $y = M \cdot y'$; y distancia $s = M \cdot s'$. Como que la pupila de salida está tapada por la imagen del círculo, cualquier otra luz que se observe mirando por el telescopio será luz parásita.

Los efectos de la luz parásita pueden eliminarse utilizando tubos con baffles interiores (superficies escalonadas) y colocando diafragmas en el interior del tubo.

TEST DE TENSIONES

También se suele llamar *polaroscopio*. Hay que examinar el telescopio, completamente montado, con luz polarizada. Para ello se utiliza una luz difusa (puede ser el Sol si en lugar de mirar por el telescopio para ver las tensiones, la imagen se proyecta sobre una pantalla o se utiliza una cámara), y dos polarizadores lineales, muy fáciles y económicos de conseguir (Figura 10) con sus ejes cruzados.

Cuando hay tensiones, éstas aparecen en forma de manchas de luz en un campo que debería ser uniformemente oscuro.

MEDIDA DE RESOLUCIÓN

Para determinar el valor numérico de la resolución del telescopio, dirigimos el instrumento hacia un patrón (Figura 2e)

con rayas blancas y oscuras (red), iluminado por detrás, y lo rotamos en torno a un eje paralelo a las líneas hasta que la red deje de ser visible (Figura 11).

Utilizando un espejo de primera superficie duplicamos la distancia al objeto y podemos sujetarlo y girarlo nosotros mismos para hacer la medida. La distancia de separación entre las líneas de la red ha de ser conocida. Para un tamaño de pantalla de 90 x 60 cm, y una distancia telescopio-espejo de 100 m, el ancho de línea es de 5 mm aproximadamente. Es posible que un objeto de este tamaño no ocupe todo el campo del telescopio, pero no es importante puesto que este test sólo se hace en el centro del campo. Si no disponemos de 100 m para hacer la medida, podemos usar una red de 15 x 15 cm a 25 m y con un ancho de línea de 1 mm aproximadamente.

Primero se coloca el patrón de frente al espejo, y se gira hasta que dejamos de resolver ocularmente las líneas del patrón. La resolución es el intervalo angular desde que vemos el patrón de frente hasta que la resolución cesa y se calcula como la distancia de separación entre las líneas multiplicado por el coseno del ángulo que se ha movido la red.

Una mejora del test incluye un diafragma en el objetivo del telescopio, de forma que el poder de resolución del mismo pueda ser medido para diferentes aberturas. Un aspecto importante de esta prueba es la elección del ocular apropiado (Figura 11), puesto que es necesario para hacer visible al ojo el menor intervalo de resolución dado por el objetivo.

Existen muchos otros test (Foucault, Schlieren, Hartmann, etc.) que nos dan información sobre estos mismos parámetros y sobre muchos otros (frente de ondas, variaciones del índice de refracción, MTF, etc.) en los que no hemos entrado en este artículo y que sin duda requieren una mayor inversión material. **A**

BIBLIOGRAFÍA

- Johnson, B. K., *Optics and Optical Instruments*, Dover Publications Inc., 1960.
- Suiter, H. R., *Star Testing Astronomical Telescopes*, Willmann-Bell Inc., 2003.
- Geary, J. M., *Introduction to Optical Testing*, SPIE Press, Vol. TT15, 1993.

Para contactar: anamanzanares@greenlightsl.com