



Agrupación Astronómica de Madrid

Separata técnica número 1

Junio 2015

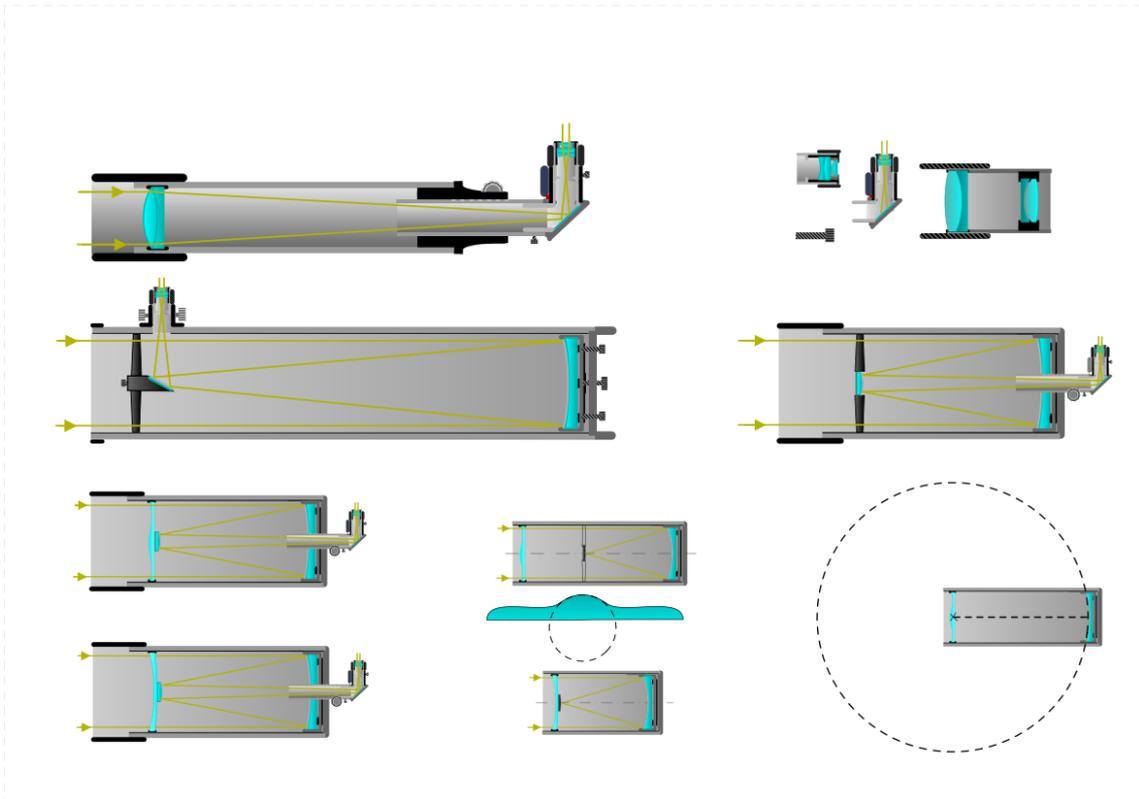
ST1/2015

Fundamentos de los telescopios para aficionados

Pedro Villamiel González

FUNDAMENTOS DE LOS TELESCOPIOS

PARA AFICIONADOS



Grupo de Cielo Profundo - Agrupación Astronómica de Madrid

2014 | Pedro Villamiel González

Introducción

De las reuniones que habitualmente mantenemos el Grupo de Cielo Profundo (2014) de la Agrupación Astronómica de Madrid surge la necesidad de elaborar un documento en el que reunir los términos y los fundamentos básicos necesarios para poder entender el funcionamiento del telescopio para aficionado, así como las relaciones entre dicho instrumento, la luz y el observador.

2

No he querido realizar un trabajo científico ni profesional, pues no era el propósito, sino simplemente un documento fácilmente digerible, enfocado a los aficionados a los que el “bicho” de la astronomía ya les ha picado y que queriendo entender el funcionamiento o el comportamiento de su telescopio para sacar el máximo provecho de sus sesiones de observación, se sienten desorientados cuando a la hora de buscar información se encuentran con conceptos contradictorios del mismo tema o también principios que se dan por sentados sin ninguna explicación adicional.

Referencias:

- Telescopios y Estrellas. Daniel Malacara y Juan Manuel Malacara.
- Calculadora de Oculares. Alejandro Barelli.
- Luz y Telescopio. Félix García Rosillo.
- Wikipedia y varias páginas web

Gracias a todo el Grupo de Cielo Profundo del año 2014 y sobre todo a Félix García Rosillo por la revisión del documento y por sus sugerencias. Y especial agradecimiento a M^a Sánchez Tomé que ha sido compañera indispensable en esta pequeña aventura.

Pedro Villamiel González Alcorcón a 1 de Febrero de 2015.

Índice

Óptica básica

- Misión de un telescopio.....pág. 5
- Luz – Refracción – Reflexión.....pág. 5 y 6
- Lentes – Formación de una imagen a través de una lente.....pág. 7
- Espejos – Formación de una imagen a través de un espejo.....pág. 8
- Como se forma una imagen en un telescopio.....pág. 9
- Parámetros principales de un telescopio.....pág. 10

Tipos de telescopios

- Telescopios refractores.....pág. 11
- Refractores acromáticos.....pág. 12
- Refractores apocromático.....pág. 13
- Tolerancias y materiales de las lentes.....pág. 14
- Telescopios reflectores.....pág. 15
- Espejos esféricos y espejos parabólicos.....pág. 16
- Tolerancias y materiales de los espejos.....pág. 17
- Telescopios catadióptricos.....pág. 19
- Cámara Schmidt y cámara Maksutov. Principio de funcionamiento.....pág. 19 y 20
- Terminología sobre los atributos de una imagen.....pág. 23 y 24

Valores de rendimiento

- Ajustes de un telescopio (la colimación, la alineación del ojo y el enfoque)...pág. 26 a 29
- Ganancia y captación de luz.....pág. 30
- Brillo de la imagen en un telescopio.....pág. 31
- Magnificación mínima.....pág. 32
- Magnitud estelar – Magnitud límite para un telescopio.....pág. 33 y 34

Aumento o magnificación.....pág. 35

Resolución

(la difracción, la turbulencia atmosférica (seeing) y parámetros de calidad)...pág. 36 a 42

Resolución de objetos extendidos tenues – Sensibilidad al contraste.....pág. 43 a 47

Pupila de salida.....pág. 48 a 50

Campo de visión FOV – (máximo MFOV, aparente AFOV y real TFOV).....pág. 51 a 53

Aberraciones de los telescopios

Aberración cromática (axial y lateral).....pág. 55 y 57

Aberración esférica.....pág. 57

Coma.....pág. 58

Astigmatismo.....pág. 59

Curvatura de campo.....pág. 59

Distorsión.....pág. 60

Oculares

Longitud focal de un ocular.....pág. 62

Relieve ocular (Eye Relief).....pag.62

Campo de visión de un ocular.....pág. 63

Aberraciones de los oculares.....pag.64

Diferentes diseños de oculares.....pág. 65 a 68

¿Qué telescopio es el más adecuado para observación?

o ¿qué telescopio me aconsejas?.....pág. 69 y 70

Óptica básica

Misión de un telescopio

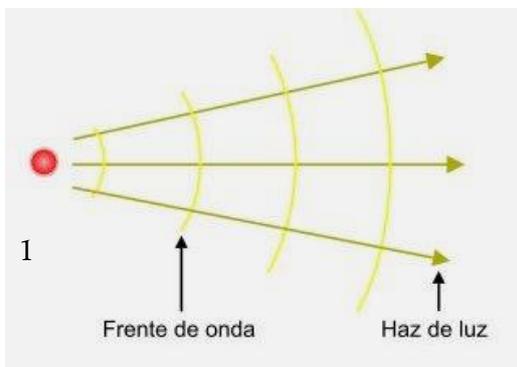
Un telescopio es un instrumento que, básicamente, pretenden recoger la mayor cantidad posible de energía en forma de **luz** emitida por un objeto situado más allá de la atmósfera y concentrarla, para así permitir la detección de imágenes que a simple vista son inapreciables. Para ello se vale de un sistema óptico principal, que puede ser de **lentes** o de **espejos**.

Y para comprender el funcionamiento del telescopio vamos a empezar con una breve introducción de cómo nos llega esa **luz** y su comportamiento en los componentes (lentes y espejos) más comunes utilizados en los sistemas ópticos, para así, en el siguiente capítulo, entender mejor el porqué de los diferentes diseños de telescopios.

Luz

La radiación de la **luz** a través del espacio se puede representar en dos formas (imagen 1):

- (1) Como **frentes de onda** que se expanden de forma concéntrica y radialmente desde la fuente de luz (análisis por óptica física).
- (2) Como imaginarios **rayos (o haces) de luz** perpendiculares a los frentes de onda que se extienden radialmente desde la fuente de luz e indican la dirección en la que cada parte del frente de onda se está moviendo (análisis por la óptica geométrica).



La longitud de onda (λ), de la luz es la distancia entre picos sucesivos en dos frentes de onda adyacentes.

La frecuencia (ν) de la luz, es el número de frentes de ondas que pasan por un punto fijo en un segundo.

Velocidad de la luz (c) es la relación entre la frecuencia y longitud de onda. Su valor en el vacío es $c = \nu \cdot \lambda = 299.792.458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 3 \times 10^8$ metros por segundo. $\lambda = c / \nu$.

Los parámetros básicos de los elementos ópticos que se describen en estas páginas son desarrollados en función de la óptica geométrica.

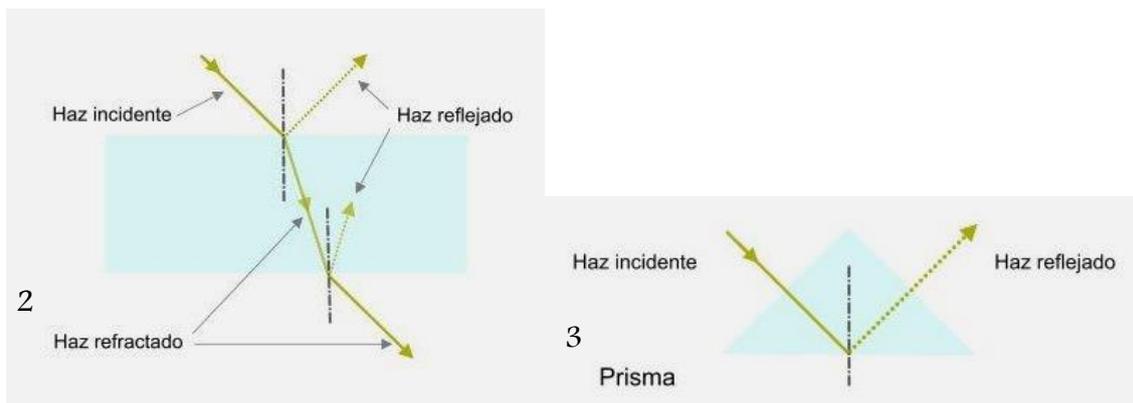
Refracción

Es el comportamiento de un haz de luz, al cambiar de dirección cuando incide sobre la superficie lisa de un material transparente de diferente densidad a la del medio que procede. Por ejemplo, cuando un haz de luz proveniente del aire incide sobre un cristal, da origen a otro refractado que sufre una desviación en su dirección al pasar al segundo medio (imagen 2).

Reflexión

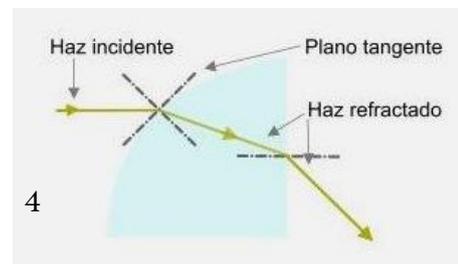
Es el comportamiento de la luz, consistente en cambiar de dirección cuando incide sobre un material liso y opaco (reflexivo) (imagen 2).

Tanto en la reflexión como en la refracción, cuando un haz de luz proveniente del aire incide sobre un espejo o una lente respectivamente, se originan dos haces de luz, uno reflejado y otro refractado (imagen 2). Mientras que en una lente se busca que el haz reflejado sea mínimo, en un espejo se trata de minimizar el haz refractado. El ángulo de incidencia del rayo de luz determina el porcentaje de este que se refleja o que se refracta.



Si un haz de luz incide sobre otro medio con un ángulo igual a cero ($\varphi = 0$) mantendrá su camino en el segundo medio, es decir, no se refractará, y por el contrario, cuando un haz de luz pasa a un medio con un índice de refracción menor, el haz es completamente reflejado (caso de un prisma, imagen 3)

En el caso particular de que la cara entre dos materiales no sea un plano (imagen 4) vale lo mismo tomando la normal al plano tangente en el punto.



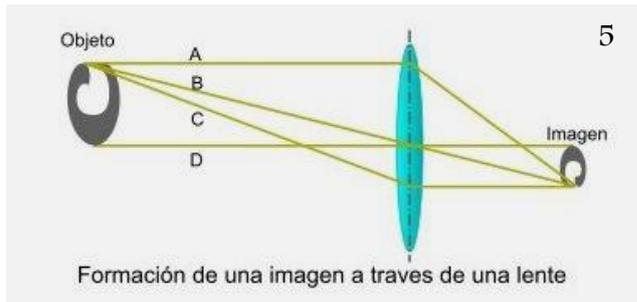
Los frentes de ondas de luz tienen una velocidad uniforme en el vacío (c). La luz también puede propagarse a través de diversos materiales transparentes, como el aire, el agua o el vidrio, pero cada material ralentiza la velocidad de la luz por un valor específico. La velocidad de la luz en el vacío (c) dividida por la velocidad de la luz en un material refractante (m) es el *índice de refracción* (n) del material: $n = c / m$.

Lentes

El vidrio es el material genérico que se usa para refractar la luz en los instrumentos astronómicos. Los vidrios son mezclas amorfas de sílice fundida (óxido de silicio, SiO_2) y óxidos de varios metales (incluyendo sodio, calcio, magnesio y aluminio) añadidos para mejorar la resistencia, la dureza y la durabilidad del vidrio. Estos compuestos suelen ser estables bajo cambios normales de temperatura, siendo su fabricación fácil y barata.

7

Así se forma una imagen a través de una lente



- 5
- A) Haz paralelo al eje óptico.
 - B) Haz principal que pasa por el centro de la lente
 - C) Haz oblicuo
 - D) Haz que coincide con el eje óptico.

En un sistema óptico, el haz luminoso está limitado en extensión lateral por una o más de las lentes del sistema que recibe el nombre de **pupila del sistema o pupila de entrada** (en los telescopios se suele conocer como la apertura).

La construcción de imágenes es muy sencilla si se utilizan los haces principales de luz.

Un haz de luz que salga de un punto en el objeto fuera del *eje óptico*⁽¹⁾ para llegar al mismo punto de la imagen correspondiente, pasando por el centro de la pupila del sistema, se llama **haz principal** (imagen 5). Obviamente, existe un haz principal para cada punto del objeto.

Haz paralelo (A). Haz paralelo al eje óptico que sale de la parte superior del objeto. Después de refractarse pasa por el *foco imagen*⁽²⁾.

Haz principal o radial (B). Haz que sale de la parte superior del objeto y está dirigido hacia el centro de la lente. Este rayo no se refracta y continúa en la misma dirección ya que el ángulo de incidencia es igual a cero.

Haz oblicuo o focal (C). Haz de luz que sale de la parte superior del objeto y pasa por el *foco objeto*⁽³⁾, con lo cual se refracta de manera que sale paralelo. Después de refractarse pasa por el foco imagen.

Importante: en todas las representaciones, los haces de luz parten desde la izquierda

¹ Eje óptico: línea imaginaria que pasa por el centro de un sistema óptico.

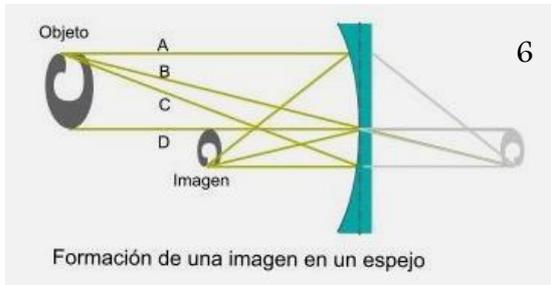
² Foco imagen: es el punto donde convergen los rayos que viajan paralelos al eje óptico después de pasar a través de la lente.

³ Foco objeto: es el punto donde convergerían los rayos que viajan paralelos al eje óptico del sistema cuando viajan desde el lado opuesto al que se sitúa el objeto y se encuentra en el mismo lado que el objeto.

Espejos

En un espejo solo hay una superficie óptica y los principios básicos son totalmente equivalentes a los de una lente.

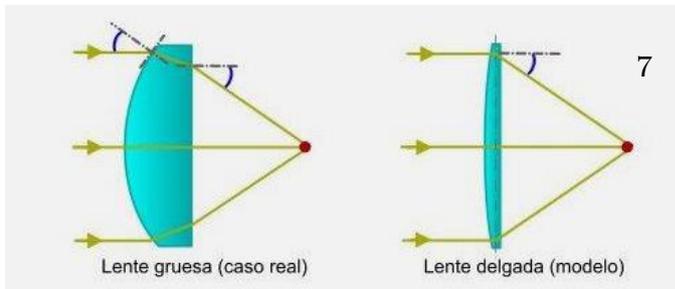
Formación de una imagen en un espejo



Al igual que en una lente, en la figura podemos apreciar cuatro haces de luz (A, B, C y D) que salen del objeto y después de reflejarse en el espejo forman una imagen (imagen 6).

8

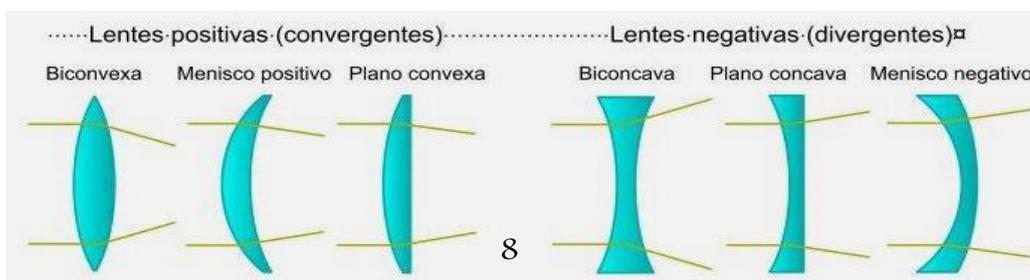
Caso de una lente típica y su correspondiente modelo



En la mayoría de las imágenes se muestran modelos de las lentes gruesas llamadas "lentes delgadas" (imagen 7). El análisis de la "lente delgada" es aplicable a cualquier lente donde su *longitud focal*⁽¹⁾ es mucho mayor que su espesor máximo. Este criterio es ambiguo y sólo sugiere que tan bien un objetivo real podría ser descrito por el modelo de lente delgada. Las lentes de gran angular o de focal corta (muy curvadas), como las de los oculares, no pueden ser analizadas de esta manera.

Distintos diseños de lentes

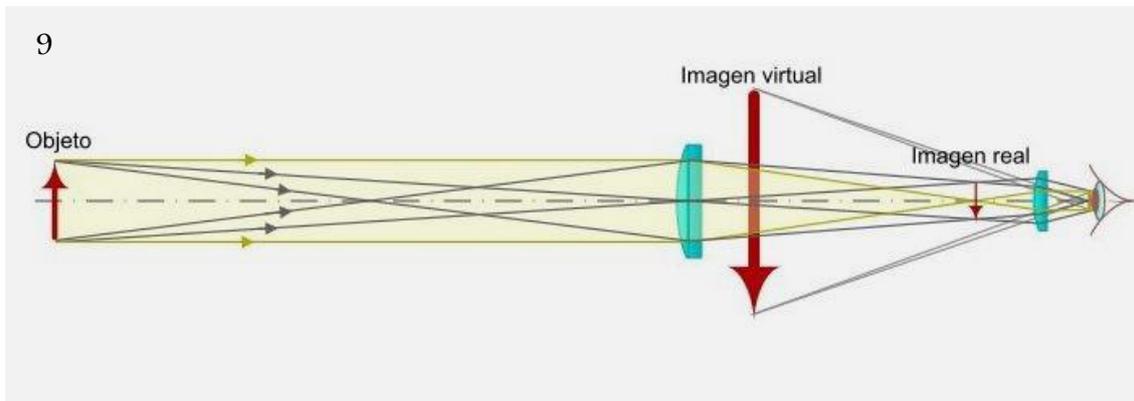
El diseño de las lentes puede variar dependiendo del efecto que queramos conseguir respecto a la dirección y la dispersión de la luz; en la imagen 8 se muestran los diseños más comunes y el trazo de los haces de luz.



¹Longitud focal. Distancia que recorren los rayos de luz después de incidir en una lente o espejo hasta que convergen.

Principio de funcionamiento del telescopio con ocular.

A continuación se muestra como se forma la imagen en un telescopio refractor.



Hay que tener en cuenta que el telescopio produce un haz de luz colimado exactamente igual que el haz colimado de luz que entra en él, excepto que tiene un diámetro mucho menor. La imagen 9 ilustra esta función de compresión como un haz colimado de **rayos axiales**, pero una compresión de haz idéntica y salida de haz colimado se produce en los rayos colimados derivados de cualquier punto fuera del eje.

Los **rayos axiales** (líneas amarillas y discontinua negra en el dibujo superior) son los que nos llegan, procedentes de un objeto, como un **haz colimado** paralelo al **eje óptico** y perpendicular a la pupila de entrada (equivalente a un frente de onda plana perpendicular al eje óptico y paralela a la pupila de entrada). **Estos rayos axiales colimados**, después de pasar por la lente, convergen en el *punto focal objetivo (o foco)*⁽¹⁾, en el que el eje óptico intersecta con el *plano focal*⁽²⁾, formando la *imagen real*, para posteriormente salir del ocular como un haz colimado comprimido y centrado en el eje óptico (imagen 9).

Rayos marginales son aquellos rayos axiales que definen el límite o borde de la apertura.

Los rayos oblicuos (líneas negras en el dibujo superior) son los rayos que no son paralelos al eje óptico y producen haces oblicuos a la salida del ocular.

La óptica paraxial se ocupa tanto de los rayos de luz paralelos al eje óptico como de los rayos cercanos al eje óptico del sistema óptico.

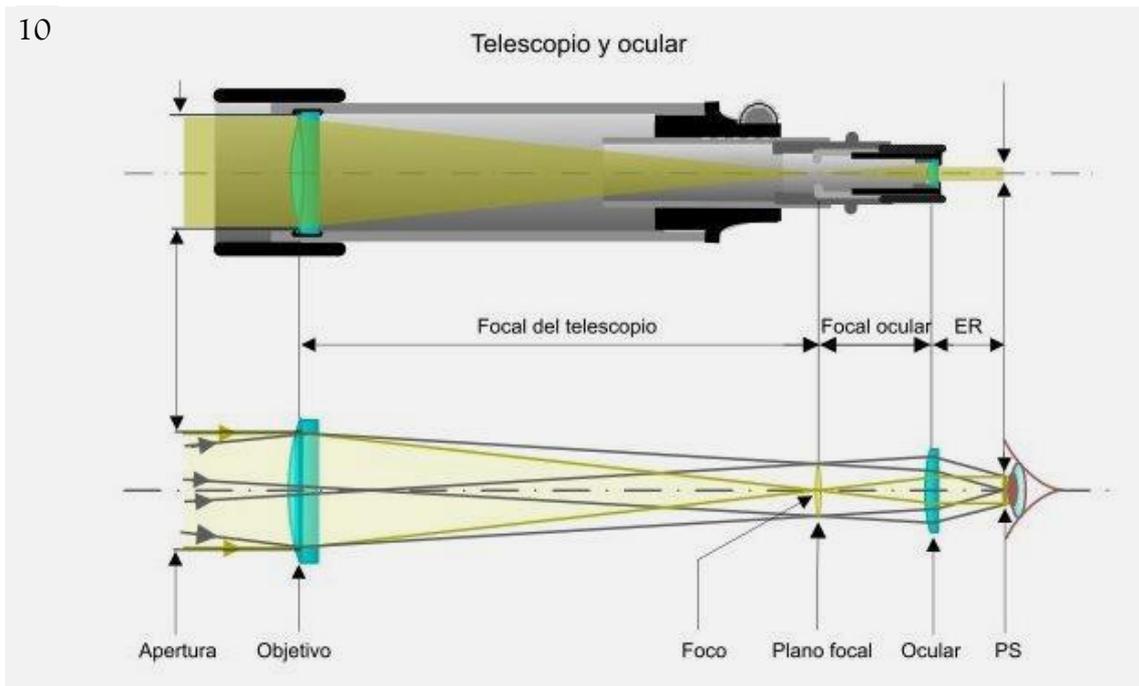
¹ Punto focal objetivo: es el punto, en el eje óptico, donde los rayos de luz paralelos procedentes de un objeto convergen después de pasar por el objetivo (lente o espejo) de un telescopio.

² Plano focal: Es un plano perpendicular al eje óptico que pasa por el foco y es donde se forma la imagen.

Parámetros principales de un telescopio

Existen diferentes diseños de telescopios que veremos en el capítulo siguiente, pero para mostrar de forma simple sus partes integrantes y sus parámetros principales, hemos elegido, el diseño de un refractor tipo Kepler, con un conjunto óptico objetivo-ocular. Las definiciones siguientes son extrapolables a los reflectores newtonianos y a los catadióptricos, solo hay que sustituir la lente del objetivo por un espejo y en algunos casos añadir una lámina correctora (lente fina colocada a la entrada algunos telescopios).

10



Ahora se describen brevemente algunos de los parámetros más importantes del telescopio (imagen 10).

Objetivo: Lente o espejo principal de un sistema óptico, que recolecta la luz proveniente de un objeto.

Ocular: Lente o grupo de lentes que amplían la imagen producida por el objetivo.

Apertura o diámetro (**A** o **D**): Diámetro del objetivo (espejo o lente principal) de un telescopio.

Foco: Punto donde convergen los rayos provenientes de un espejo o una lente.

Plano Focal: El área donde se forma la imagen, después de incidir en una lente o un espejo.

Longitud focal del telescopio (ft): Distancia entre el centro del objetivo y el foco

Relación focal (F o n°/f): Relación entre la distancia focal y la apertura $F = ft/A$.

Longitud focal del ocular (fo): Distancia entre el centro de la lente del ocular y su foco.

Pupila de salida (PS): Área efectiva, a la salida de un ocular, en donde se forma la imagen.

Relieve ocular (ER): Es la distancia entre el ocular y el punto donde se forma la PS.

Field stop (FS): Es la obstrucción de menor tamaño en el camino óptico de un telescopio, que limita el área de visión, y por lo general es el diámetro del barril del ocular (1,25", 2",...).

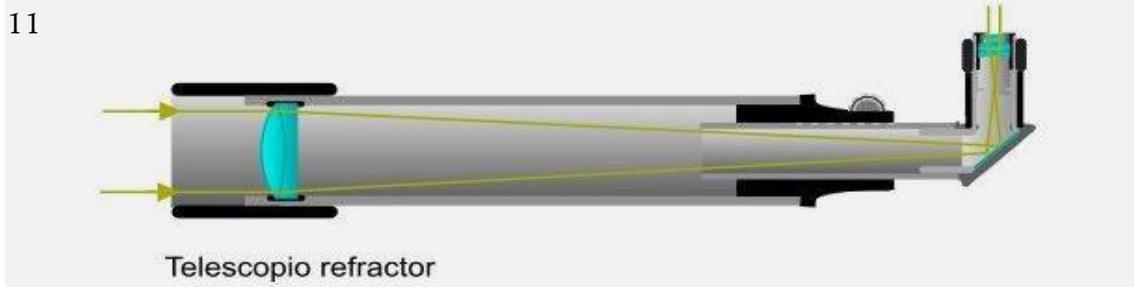
Tipos de telescopios

En esta sección se muestran los tres formatos ópticos más comunes que se encuentran en los telescopios astronómicos para aficionados y alguna de sus variaciones. Históricamente han ido evolucionando desde los primeros sistemas **refractores (dióptricos)** formados por una o varias lentes, a sistemas **reflectores (catóptricos)**, uno o más espejos, hasta los modernos sistemas **catadióptricos**, una combinación de espejos y lentes.

11

Telescopios refractores

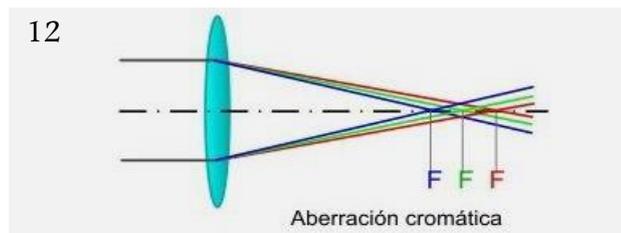
Refractores son aquellos telescopios formados por sistemas ópticos cuyos elementos principales son lentes convergentes que hacen formar una imagen situada en el infinito en un plano focal donde se colocan oculares y/u otros instrumentos (imagen 11). Son los primeros tipos de telescopios que aparecieron. Los objetivos pueden estar compuestos de uno a cuatro lentes o elementos, en donde cada uno posee curvaturas superficiales distintas y un tipo muy específico de vidrio con diferentes atributos de refracción y dispersión.



Los primeros refractores. Telescopio de Galileo y telescopio de Kepler

Los primeros objetivos constaban de una sola lente biconvexa que producía una imagen con **aberración cromática** severa, que es un defecto debido a la dispersión de las longitudes de onda de la luz al ser refractada (el vidrio, material principal de las lentes, tiene un índice de refracción distinto para cada color/longitud de onda, de tal forma que no proyecta toda la luz sobre un único plano focal, sino en un plano focal para cada color) (imagen12). En consecuencia al enfocar la imagen aparecen halos de color rojo o azul.

El diseño de los telescopios refractores está condicionado por este defecto, pues a mayor curvatura de la lente (y más corta la distancia focal), mayor es el ángulo de refracción del haz de luz y el efecto de esta aberración aumenta, por



lo que los primeros sistemas de este tipo se diseñaban con poca curvatura que los otorgaba una distancia focal extremadamente grande (o una relación focal muy alta).

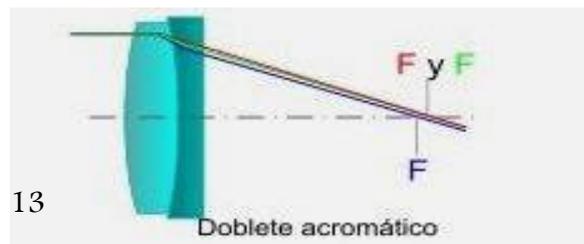
El telescopio que usó **Galileo** (1609) es uno de los más sencillos a nivel estructural. El objetivo es una lente convergente (convexa o plano convexa) y el ocular una lente cóncava (página 65). El ocular se colocaba antes de que el sistema hiciera foco y así conseguía ampliar la imagen. Un telescopio de este tipo apenas daba 30 aumentos y además tenía muchas aberraciones en la imagen. Su única ventaja es la de proporcionar una imagen no invertida.

El telescopio que utilizó **Kepler** es una configuración superior al de Galileo. Se sustituye la lente cóncava del ocular por una lente convexa (página 65). Este diseño permite que los rayos de luz salgan del ocular mucho más convergentes, esto es, que el observador tiene en el ocular un mayor campo de visión, pero la imagen está invertida.

-Refractor acromático

Los refractores acromáticos actuales tienen diseños en donde se ha tratado de reducir los severos defectos utilizando nuevos materiales y configuraciones de varios elementos.

El **diseño acromático** (imagen 13) fue introducido por Jon Dollond en el siglo XVII. Colocó dos lentes de distintos tipos de vidrio de baja dispersión (**crown y flint**) y con distintos índices de refracción (**el flint tiene un índice de refracción mayor que el crown**), logrando mitigar la dispersión de los colores gracias a la configuración de las distintas propiedades de cada uno de los elementos (más detalles en página 56). A pesar de la mejora, solo se consigue una imagen aceptable para el rojo y el verde, pero no para el azul. Las altas relaciones focales ya no eran tan necesarias.



13

Doblete acromático

Otros diseños de objetivos acromáticos posteriores.

Pierre Louis Guinand innovó métodos con cristal de roca, que inspiraron a **Joseph von Fraunhofer** para crear en 1824 un diseño doblete de 240 mm de diámetro, consistente en una primera lente biconvexa (crown) y una segunda de menisco (flint), separadas por un espacio de aire de 2 a 5 mm (imagen 14). Los distintos índices de refracción y las cuatro superficies de curvaturas desiguales proporcionan "múltiples niveles de ajuste", reduciendo de forma significativa las aberraciones y consiguiendo relaciones focales mucho más bajas (F10 a F28).

En 1840 **Steinheil** coloca el elemento "flint" delante y el elemento "crown" detrás, con el espacio de aire más estrecho (imagen 14). Las curvaturas de las lentes son más fuertes y proporciona una mejor corrección de las aberraciones, obteniendo relaciones focales de F6 hasta F20. Pero se usa rara vez debido a que el vidrio Flint es susceptible a la lixiviación por la humedad.



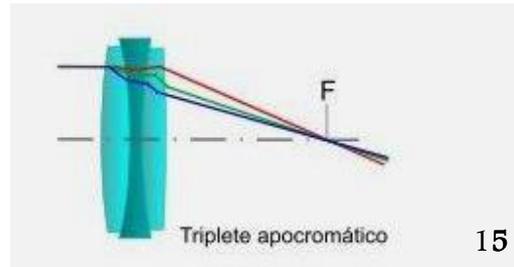
14

Diseño de Joseph von Fraunhofer

Diseño de Steinheil

-Refractor apocromático

Sistema superior al acromático, cuyo objetivo está compuesto de dos o tres elementos (dobletes o tripletes), e incluso más, cuyos modernos materiales proporcionan una corrección ideal del cromatismo (imagen 15).



15

13

En 1879 Abbe y Schott, fabricaron vidrios con el cristal natural de fluoruro de calcio (Fluorita) que tiene una muy baja dispersión luminosa, pero es muy frágil y presenta irregularidades, por lo que no es apropiado para su uso en telescopios.

El desarrollo actual del mercado de los apocromáticos se ha debido a la aparición de vidrios fluorados menos frágiles que la fluorita que son denominados vidrios **ED (Extra Baja Dispersión)** o **SD (Super amplia Dispersión)**. Estos avanzados materiales y nuevas combinaciones llegan a casi eliminar la aberración cromática. En estos casos cada casa comercial tiene sus propios diseños del grupo óptico principal (objetivo).

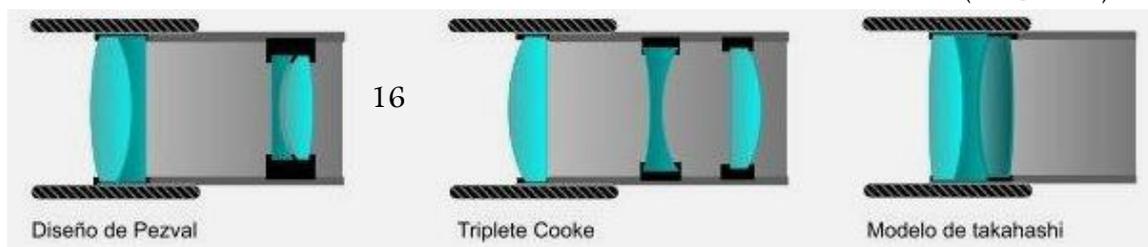
Algunos diseños de objetivos apocromáticos:

El objetivo **Petzval** fue desarrollado por el oculista Joseph Petzval en 1840; consta de dos dobletes acromáticos ampliamente espaciados, uno (por lo general el delantero) sin espacio entre las lentes y el otro con una cámara de aire. Originalmente diseñado para fotografía con una relación focal rápida (corta) ($< F4$), pues las emulsiones fotográficas de la época eran lentas. Los dobletes se podían optimizar para su uso telescópico al reducir la aberración cromática en una amplia área de visión (unos 5°). Recientemente fabricado por Tele Vue (imagen 16).

H. Dennis Taylor desarrolló y patentó la primera lente grande formato triplete con materiales apocromáticos en 1892, y este "**triplete Cooke**" es el ancestro de todos los apocromáticos modernos. Se compone de un doblete de lentes crown diseñado para que coincida estrechamente con la dispersión de un Flint negativo (imagen 16).

El refractor apocromático moderno es, en la mayoría de los casos, un objetivo triplete con espacios de aire, aceite o cementados, fabricado originalmente con un Crown de fluorita sintética y dos Flint de muy alta dispersión. Destaca el japonés O'hara que sobre todo con el vidrio FPL-53 ha conseguido un grado de dispersión prácticamente igual a la fluorita y es el material más empleado.

Los primeros modelos comerciales se debieron a la empresa **Takahashi** en 1972 (imagen 16).



16

Algunas consideraciones

La moderna definición de apocromático establece unos parámetros técnicos muy concretos: *Objetivo apocromático es el que tiene una corrección mínima de $\frac{1}{4}$ de onda en toda una amplia banda del espectro visible desde los 656 nm (rojo) hasta los 486 nm (azul). Además debe tener una corrección mínima de $\frac{1}{2}$ de onda en los 435 nm (violeta).* En resumen, se viene a establecer que la aberración cromática debe estar perfectamente corregidas para todos los colores primarios: rojo, verde y azul; y además también debe tener corregida la aberración esférica, que es un defecto producido por el diseño de sección esférica de las lentes.

14

A los refractores les afecta poco la turbulencia, rinden con facilidad cerca de su límite teórico y al no tener ninguna obstrucción en el camino óptico suelen presentar una imagen muy contrastada y nítida, pero su potencia está limitada por la poca abertura del objetivo (comparada con la de los reflectores y catadióptricos).

Por lo general los dobletes apocromáticos con vidrio ED de calidad ofrecen imágenes muy satisfactorias tanto en visual como en fotografía.

El material idóneo para conseguir una alta corrección cromática es la fluorita pero sus dificultades de fabricación han obligado a sustituirlo por vidrios de propiedades semejantes. El más próximo es el vidrio japonés O'hara FPL-53 que se incluye en los mejores telescopios actuales. También se pueden conseguir excelentes correcciones con un buen diseño y vidrio O'hara FPL-51.

Los telescopios refractores de relaciones focales cortas, hasta $f/6$, pueden ser aceptables en diámetros menores de 80 mm como telescopio de gran campo. Los de diámetro superior a 90 mm se recomiendan en relaciones de $f/7$ o más para una calidad APO real.

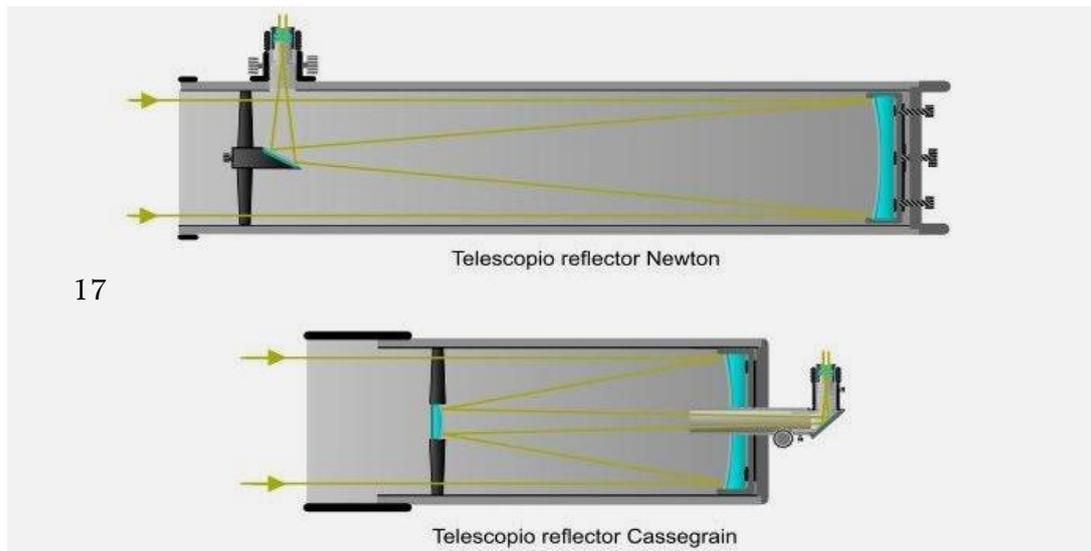
Los tripletes apocromáticos ofrecen calidad de Súper APO cuando el diseño es acertado.

La pérdida por transmisión de luz en los materiales de las lentes de calidad apenas es significativa.

Telescopios reflectores

Reflectores son aquellos telescopios formados por sistemas ópticos cuyos elementos principales son espejos curvos (de sección esférica o parabólica o hiperbólica) que hacen formar una imagen situada en el infinito en un plano focal. Estos diseños consisten en un espejo primario (el más grande) situado en el fondo del tubo que recoge y enfoca la luz y un espejo secundario para dirigir el haz de luz a un lugar en donde no se obstruya la abertura en el que se coloca un ocular u otro instrumento (imagen 17).

15



Los primeros reflectores.

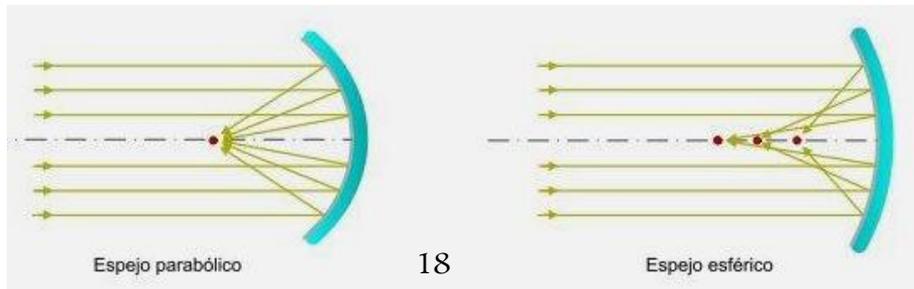
El diseño del telescopio reflector es también una concepción del siglo XVII, originario de tres fuentes diferentes: los diseños del "foco de fondo" de **Mersenne (1636)** y **Cassegrain (1672)** (que en realidad no se construyeron hasta el siglo 20) y el prototipo reflector "foco de lado" diseñado y construido por **Isaac Newton (1668)**. Se crearon para tratar de evitar las fuertes aberraciones cromáticas que producían las lentes de esa época.

Los primeros espejos se realizaban con una aleación de cobre y estaño que ofrecían superficies que se empañaban enseguida y además tenían bastantes pérdidas de luz. Posteriormente se avanzó a un baño de plata y celulosa, más eficaz, pero la plata además de reflejar el espectro visible también refleja el ultravioleta. Los espejos de hoy tienen su superficie reflectante creada por una deposición en vacío de una capa de aluminio.

La tecnología poco avanzada del pulido de los primeros espejos solo permitía curvaturas poco pronunciadas y como consecuencia relaciones focales muy altas. Muy importante fue la prueba del "filo de la navaja" que **Foucault** ideó en 1859, permitiendo a los espejos ser configurados como verdaderas superficies esféricas, obteniendo focales mucho más cortas. Relaciones focales más cortas, espejos de vidrio más ligeros y diseños ópticos plegados (Cassegrain, pág. 17) condujeron a partir del siglo XIX a formatos de tubos ópticos mucho más compactos.

Espejos esféricos y espejos parabólicos.

En un espejo **esférico-cóncavo** no todos los rayos de luz que se reflejan en su superficie coinciden en un mismo foco, por el contrario, en uno **parabólico-cóncavo** todos los rayos de luz, después de reflejarse, coinciden en un foco (imagen 18).



16

Cuando utilizamos una sección esférica muy próxima al eje óptico, esta es indistinguible de la superficie de la parábola, en consecuencia, su comportamiento es prácticamente igual.

También si la relación focal es grande (normalmente más de F7) ambos espejos se comportan de la misma manera. Pero si se quiere tener un telescopio con una relación focal baja, la única opción es que el espejo sea parabólico, con el inconveniente de que cuanto más baja sea la relación focal, más difícil es parabolizarlo.

Tolerancias y materiales de los espejos

Tanto los espejos como las lentes recogen las ondas de luz y deben transportarlas a través del sistema óptico. Cualquier defecto producido en esta onda por causa de los elementos del sistema se traduce en imperfecciones de la imagen.

Entre la forma ideal y la forma real del espejo o lente siempre habrá alguna diferencia. Para limitar esas diferencias se ha establecido cierta tolerancia relacionada con la longitud de onda de la luz (λ) teniendo en cuenta la alteración que sufre la imagen (estrella) con el grado de imperfección del espejo. El físico inglés John William Strutt (1842 - 1919) fijó para un espejo-objetivo, una tolerancia de **1/8 de longitud de onda ($\lambda/8$)** como máxima diferencia entre una superficie teórica ideal parabólica y la superficie real del espejo para que las alteraciones que sufre la onda de luz sean inapreciables en la imagen que recibimos (más detalles en la pág. 41).

Si deseamos tener una óptica de calidad, debemos de exigir que el objetivo, en especial si es un espejo, alcanza esta tolerancia mínima.

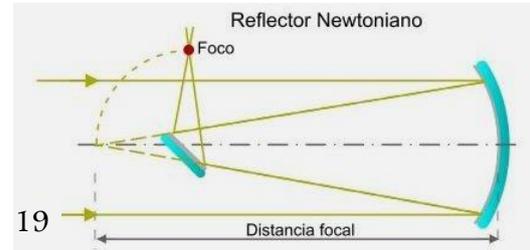
Hay que diferenciar entre lentes y espejos, en donde las lentes tienen tolerancias cuatro veces mayor y una degradación de $\lambda/4$ en la onda de luz ya se considera ideal.

El tipo de material con el que están fabricados los espejos no afecta a la calidad óptica de estos pero sí que los cambios de temperatura provocan una dilatación en el espejo que afecta a la calidad de las imágenes durante la fase de adaptación térmica. Dependiendo del material los espejos se dilatarán más o menos. Los materiales más comunes son el vidrio (es el que sufre más dilatación), el BK7 (dilatación moderada), el Pyrex, el Suprax (estos dos son vidrios de Borosilicatos y se dilatan la mitad que el BK7) y el Zerodur (el que mejor se comporta pero su precio es muy alto).

Modelos actuales de telescopios reflectores

- Reflector Newtoniano (1668)

El tubo óptico contiene en su fondo un espejo **principal esférico-cóncavo o parabólico-cóncavo**. Dentro del propio tubo se encuentra un espejo **secundario plano** que desvía el haz de luz en 90° y lo saca lateralmente del tubo a un lugar donde se encuentra el porta ocular. La elaboración de los espejos es mucho más sencilla que la de las lentes, permitiendo diseños de grandes aperturas a precios muy asequibles (imagen 19).

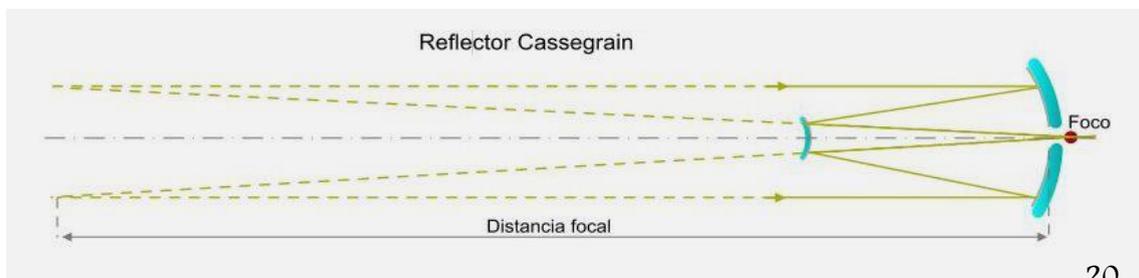


17

- Reflector Cassegrain (1672)

En este sistema reflector el espejo principal es **parabólico-cóncavo** y el secundario es **hiperbólico-convexo**. El secundario se sitúa sobre el eje enviando la imagen detrás del espejo primario, que, normalmente, tiene un orificio en el centro. Este diseño proporciona alta relación focal en un tubo corto, debido en gran medida al hiperboloide secundario que proporciona mayor poder divergente. Este formato fue el primer paso de los modernos catadióptricos.

La focal de este sistema, y de sus variantes, equivale a la ampliación del cono de luz, producido por el espejo secundario, desde el punto focal hasta que el diámetro de dicho cono iguala el diámetro de apertura (imagen 20).



20

- Reflector Ritchey-Chrétien (1922)

El sistema Ritchey-Chrétien, el mismo que usa el Telescopio Espacial Hubble o el telescopio de 3.5 m en Calar Alto, es una variación del de Cassegrain con ambos espejos **hiperbólicos**, el **primario es cóncavo** y el **secundario convexo**. Su ventaja es que jugando con las curvaturas y tamaños de los espejos se puede conseguir mucho campo y pocas aberraciones.

Este diseño fue propuesto por Henri Chrétien, a raíz de los conceptos establecidos en 1905 por Karl Schwarzschild que eliminaron la aberración esférica y de coma de los diseños de reflectores anteriores. Proporciona imágenes de estrellas perfectamente redondas consideradas óptimas para el trabajo fotográfico y es el diseño dominante en telescopios de gran apertura. Actualmente es común su comercialización, aunque relativamente caro.

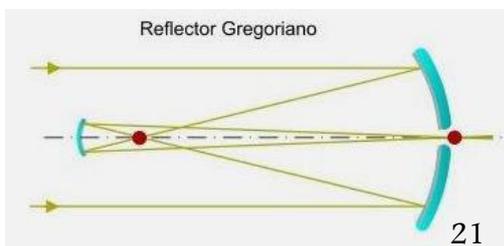
- Reflector Dall-Kirkham (1928)

Otra variante más del Cassegrain, inventada por dos astrónomos amateurs. Consta de un espejo **primario elíptico-cóncavo** con un espejo **secundario esférico-convexo**. Tiene la ventaja de que los espejos son fáciles de fabricar y tiene el problema de que al alejarse del eje óptico las aberraciones son grandes pero a altas relaciones focales ofrece buenas imágenes.

Actualmente hay bastantes casas que le comercializan.

- Gregoriano (1663)

Esta otra variación del Cassegrain, fue propuesta por primera vez, en la teoría, por Marin Mersenne en 1636, y luego de forma independiente por James Gregory. Usa un espejo **primario elipsoide-cóncavo** y un espejo **secundario parabólico cóncavo** dispuesto después de



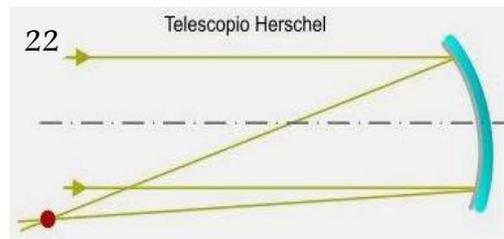
un 1^o plano focal (imagen 21). Aquí el tamaño del tubo es más largo, pero la imagen se invierte dos veces quedando finalmente recta, con lo que se usa mucho como objetivo fotográfico de alto nivel o para observaciones terrestres.

También se usa en observatorios profesionales.

Sistema con espejo secundario fuera del eje principal

- El telescopio de Herschel

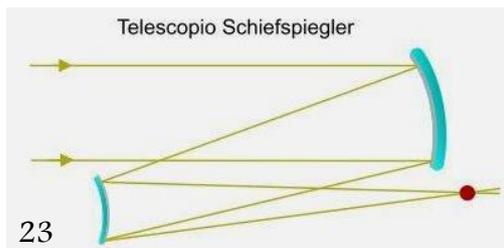
Herschel construyó uno de 49,5 pulgadas (126 cm) de diámetro en 1789. El espejo primario se inclina para desviar el haz de luz fuera del tubo. Aunque esto introduce aberraciones geométricas, Herschel emplea este diseño para evitar el uso de un espejo secundario que en ese tiempo se manchaba con rapidez y sólo alcanzaba un 60% de reflectividad (imagen 22).



- El Telescopio Schiefspiegler

También variante del Cassegrain, el telescopio Schiefspiegler (o "reflector oblicuo") utiliza dos **espejos esféricos**, el **primario cóncavo**, y el **secundario convexo**, pero inclinados para evitar que el espejo secundario proyecte una sombra en el primario (imagen 23). Sin embargo esto conduce a un aumento en coma y astigmatismo.

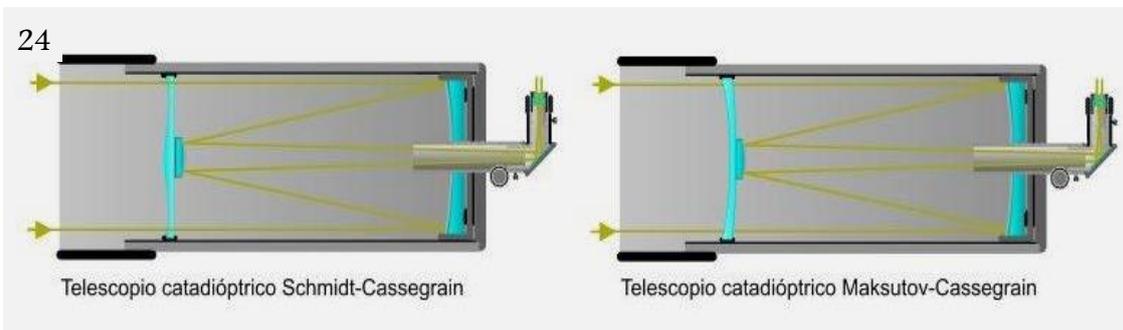
Estos defectos se vuelven manejables en altas relaciones focales. La mayoría de Schiefspiegler utilizan F15 o más largo, lo que tiende a restringir la observación de utilidad a la luna y los planetas.



Telescopios catadióptricos.

Un sistema catadióptico es aquel que tiene como elementos ópticos tanto lentes como espejos. Estos instrumentos se componen de un reflector formato newtoniano o Cassegrain al que se le añade uno o más elementos refractantes (lentes), de manera que el elemento reflectante o el refractivo puede corregir las aberraciones producidas por su contraparte. La lente, en este caso llamada **placa correctora**, está situada en el tope de la apertura (a la entrada del tubo – imagen 24); también puede tener un elemento compuesto (lentes y espejos) situado justo antes del foco primario. El propósito de las placas correctoras, en todos los casos, es mejorar la calidad fuera del eje óptico del telescopio, en particular la coma y la curvatura de campo y así poder bajar la relación focal y aumentar el ancho de campo.

Los dos más comunes son el Schmidt-Cassegrain y el Maksutov-Cassegrain (imagen 24).



Los sistemas catadióptricos tienen su origen en la **Cámara Schmidt** (imagen 25). Dicha cámara está formada por un espejo primario cóncavo de sección esférica y una placa correctora **asférica** (página 20) muy delgada situada en su **centro de curvatura** (página 20), logrando que el sistema completo tenga simetría alrededor del centro de curvatura. En realidad se trata de una cámara fotográfica cuya relación focal es muy baja (F4 o menor), otorgándole gran campo. Este sistema es uno de los más sencillos y efectivos que se han diseñado y construido hasta la fecha. Fue inventado en 1932 por Bernhard Schmidt.

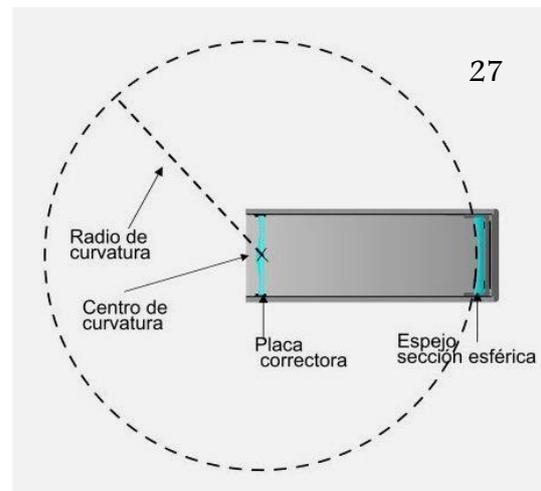
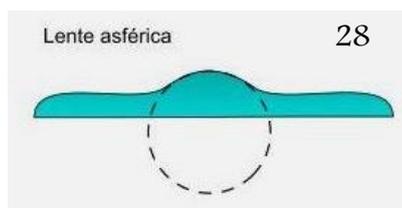
Una alternativa a la cámara de Schmidt fue propuesta en 1941 por **D. D. Maksutov**, en Moscú, que colocó una lente con forma de menisco (mucho más fácil de construir que la placa asférica de Schmidt) cerca del foco, con sus caras concéntricas con el espejo primario (imagen 26). El sistema es más compacto que el de Schmidt, por tener la placa correctora cerca del foco y la simetría alrededor del centro de curvatura es más completa, por lo que se pueden lograr campos más amplios, en cambio, la corrección de la aberración de esfericidad no es tan buena.



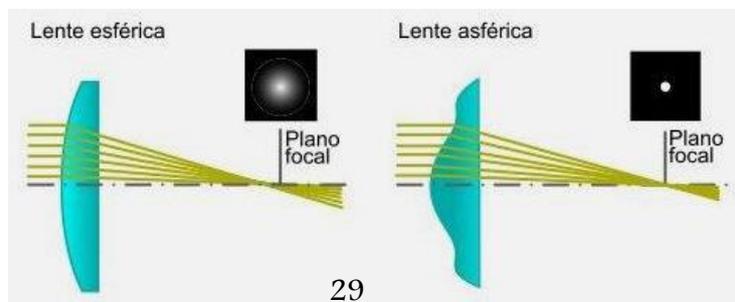
Principio de funcionamiento de la Cámara Schmidt.

Si se coloca un diafragma circular (pupila de entrada) en el **centro de curvatura** de un espejo esférico cóncavo (imagen 27), la imagen formada por un haz de rayos paralelos emitidos por un objeto puntual situado en el infinito será idéntica para cualquier dirección. La razón de esto es que el sistema completo tiene simetría alrededor del centro de curvatura. Debido a esta simetría, el sistema no tiene coma, ni astigmatismo ni distorsión. Como no hay aberraciones cromáticas, las únicas aberraciones que quedan son la de esfericidad y la de curvatura de campo. La aberración de esfericidad se puede eliminar sin perder la simetría si se coloca una placa (lente) muy delgada, con la forma adecuada (**asférica**), sobre el **centro de curvatura**. La placa es tan delgada que no introduce aberración cromática apreciable.

Una lente **asférica**, es una lente que en su forma contiene una porción de una esfera, aunque no sea estrictamente esférica (imagen 28).



En la imagen 29 podemos apreciar la diferencia en la corrección de la aberración de esfericidad entre una lente esférica y una lente asférica.

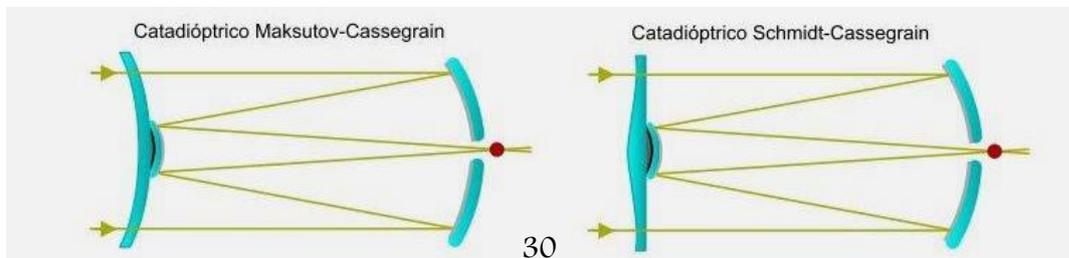


Ritchey-Chrétien frente a Schmidt y Maksutov

Ya dijimos que el sistema de Ritchey-Chrétien tiene corregidas las aberraciones de esfericidad y coma, pero permanecen tanto el astigmatismo como la curvatura de campo además de la dificultad y el coste para tallar y probar las superficies parabólicas e hiperbólicas, al contrario que los espejos esféricos de los sistemas de Schmidt-Cassegrain o de Maksutov-Cassegrain; y además, estos dos sistemas, aunque no cumplen estrictamente con los requisitos de Schmidt o de Maksutov, en los modelos de aberturas medianas y para aficionados, donde la placa correctora es relativamente sencilla de construir y apenas introduce aberración cromática, la calidad de la imagen es superior a los de tipo Ritchey-Chrétien.

Schmidt-Cassegrain y Maksutov-Cassegrain

Son los dos sistemas (imagen 30) más usados en los telescopios catadióptricos. Son modificaciones de los diseños de cámara Maksutov o Schmidt, con Maksutov dominando en las aberturas más pequeñas, incluyendo telescopios terrestres. Ambos tienen la ventaja de que la placa correctora cierra completamente el tubo óptico proporcionando protección contra el polvo para el espejo primario y un apoyo para el secundario, prescindiendo de las paletas que en otros sistemas son necesarias para sujetar el espejo secundario y que producen picos de difracción en imágenes de estrellas. La relativamente corta estructura hace que estos instrumentos tengan un peso ligero y sean fáciles de transportar, y a diferencia de los diseños de Newton no requieren escaleras o plataformas de observación cuando apuntamos al cenit con distancias focales grandes. El principal inconveniente es que el espejo puede tardar en aclimatarse 2 o más horas a la temperatura ambiente, debido a que el tubo cerrado inhibe las corrientes de convección que refrigeran las ópticas.

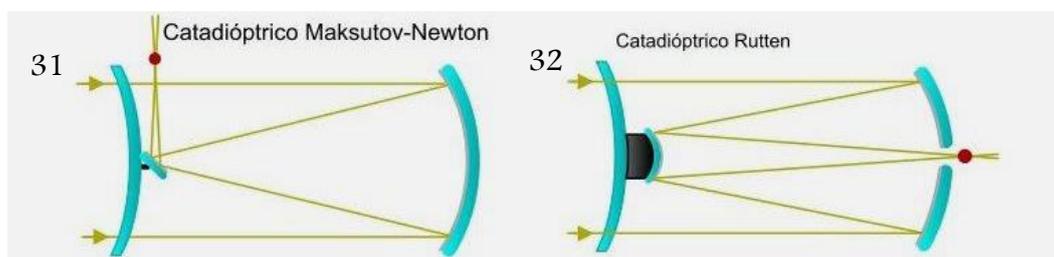


Maksutov-Newton

Es una interesante variante del sistema Newton (imagen 31). El espejo primario lleva un tallado esférico y en la entrada al tubo se coloca una lente de menisco, también con talla esférica, que corrige las aberraciones de coma y de esfericidad. El espejo secundario es plano y va sujeto al centro del menisco. No es muy conocido por los aficionados, pero comparándole con otros modelos destaca sobre todo por una alta resolución de la imagen en todo el espectro y además tanto en el eje óptico como en un campo amplio.

Rutten Maksutov-Cassegrain

También llamado Rumak o Sigler Maksutov, tiene un espejo secundario separado y montado en la parte posterior del corrector de menisco (imagen 32). Esto proporciona un grado extra de libertad en la corrección de las aberraciones al estar el secundario independiente de la placa. El esférico secundario se diseña para proporcionar un campo plano mucho más amplio que en el tradicional Maksutov, con menos coma fuera de eje.



Modelos catadióptricos con corrector sub-apertura

Todos sus elementos son esféricos y en lugar de disponer una placa correctora que cubra toda la apertura, utiliza un pequeño **corrector sub-apertura** en el lugar del espejo secundario, compuesto de una o varias lentes y un espejo, configurados para corregir la aberración de esfericidad. El diseño ahorra en material y "tiempo de enfriamiento" respecto a un corrector de apertura total. Pero tiene los inconvenientes de un tubo abierto y requiere un conjunto de cruceta para sostener el espejo secundario y el corrector, que afecta inevitablemente a la calidad de imagen. Asimismo, puesto que la luz pasa a través del corrector en dos ocasiones, el número de superficies involucradas se multiplica, por lo que es más complicado corregir ciertas aberraciones.

Argunov-Cassegrain

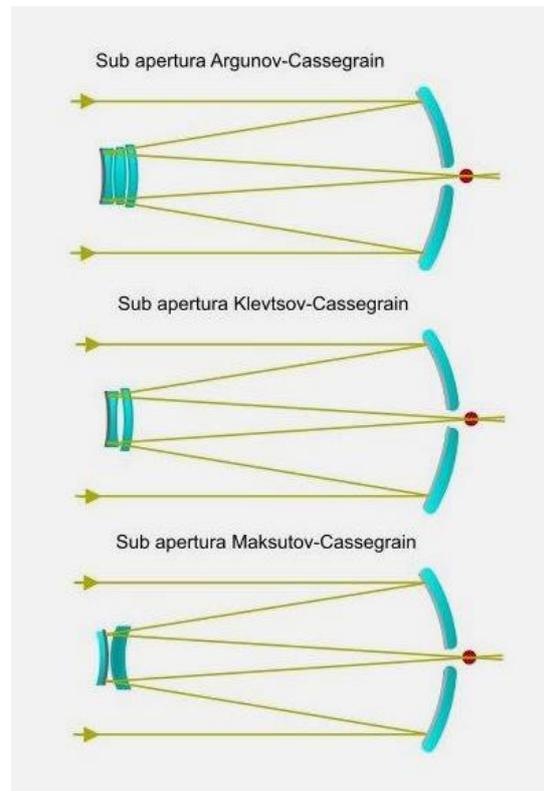
Diseñado en 1972 por P.P. Argunov. El espejo secundario del Cassegrain clásico se sustituye por un conjunto de tres elementos separados, dos lentes esféricas y un espejo Mangin⁽¹⁾.

Klevtsov-Cassegrain

Diseñado por G.I. Popov y Yuri A. Klevtsov. El espejo principal es esférico y en el secundario se coloca un sistema de una lente y un espejo Magin.

Maksutov-Cassegrain

Diseño de Dimitri Maksutov. En el lugar del espejo secundario monta un conjunto de lente menisco y un espejo convexo.



¹Espejo de Mangin. es un reflector de vidrio cóncavo con la superficie de plata en la parte posterior del cristal, por lo que la luz pasa dos veces a través de él. Las dos superficies poseen diferentes radios para corregir la aberración esférica del espejo. Fue creado por A. Mangin en 1876

Terminología sobre los atributos de una imagen óptica y el Star Test

Después del resumen sobre los distintos tipos de telescopios más usuales, me parece útil añadir dos puntos más relacionados con la imagen que nos proporciona un telescopio y que nos pueden ser de utilidad.

El primer punto es hacer referencia a un método para cualificar y cuantificar la calidad del sistema óptico de nuestro telescopio, conocido como **Star Test (Método de la Estrella)**. Este test es sencillo y está al alcance de cualquier aficionado, aunque es algo laborioso por lo que no lo explicaré en estas páginas; está elaborado por Harold Richard Suiter y lo describe de forma detallada en su libro *Star Testing Astronomical Telescopes*, pero también lo podemos encontrar en un resumen que elaboró Jesús R. Sánchez en esta dirección web:

http://astronomico.enfoque-creativo.com/pruebas/Startest_Mayo13.pdf

Ahora, en el segundo punto, se muestran los términos más frecuentes que empleamos sobre los atributos de la imagen: **imagen real**, **imagen virtual**, **imagen erecta**, **imagen invertida**, **imagen normal**, **imagen revertida**, **imagen ampliada**, **imagen tamaño real** e **imagen reducida**.

Una imagen óptica es una figura formada por el conjunto de puntos donde convergen los rayos que provienen de fuentes puntuales del objeto tras su interacción con el sistema óptico y puede ser real o virtual.

La **imagen real** es aquella que se forma cuando tras pasar por el sistema óptico, los rayos de luz son convergentes (imagen 33). Esta imagen no la podemos percibir directamente con nuestro sentido de la vista, pero puede registrarse colocando una pantalla u ocular en el lugar donde convergen los rayos.

La **imagen virtual** está formada por la **proyección de los rayos reflejados o refractados** en un espejo o una lente que los convergerá en un punto formando la imagen virtual (imagen 34).

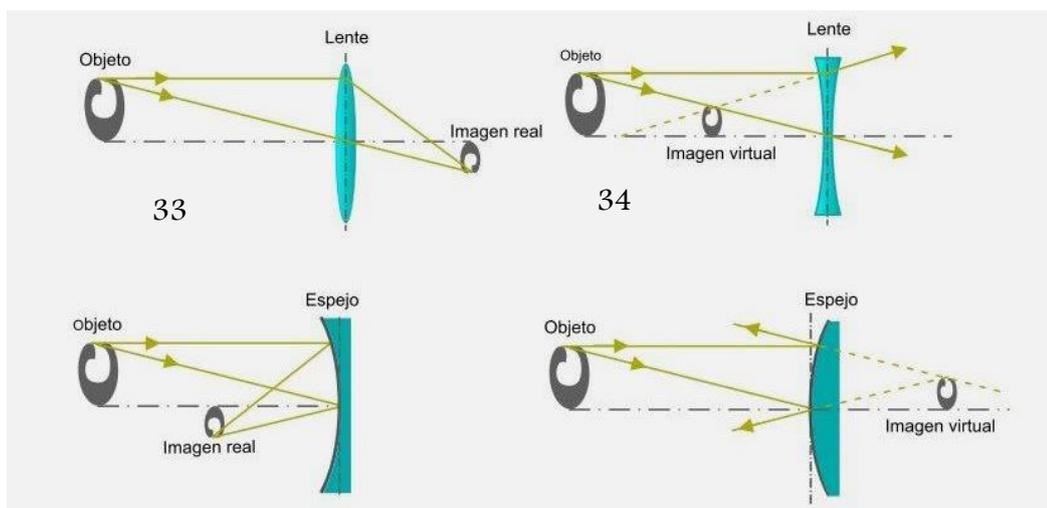


Imagen erecta es si está orientada verticalmente en la misma forma que el objeto.

Imagen invertida es si la imagen se invierte de arriba a abajo.

Imagen revertida es si la imagen se invierte de izquierda a derecha.

Imagen rotada es si la imagen se encuentra invertida y revertida al mismo tiempo.



Erecta, normal

- Ojo desnudo
- Reflector Gregoriano

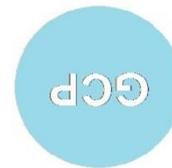


Invertida, normal



Erecta, revertida

- Reflector Cassegrain más espejo diagonal
- Refractor más espejo diagonal



Invertida, revertida (Rotada)

- Refractor
- Reflector Newtoniano
- Reflector Cassegrain

Por último, una **imagen puede ser ampliada, de tamaño real o reducida** en comparación con el tamaño físico del objeto o a la anchura angular del objeto tal como aparece a simple vista.

Valores de rendimiento

Ya dijimos al comienzo, que la misión de un telescopio es **recolectar** la mayor cantidad posible de luz emitida por un objeto situado en el espacio y **concentrarla**, para así permitir la detección de imágenes que a simple vista son inapreciables. Pero también queremos apreciar o **resolver** ⁽¹⁾ el mayor número de detalles en su estructura y en su forma con la mayor nitidez posible.

Nuestra capacidad para ver objetos que son pequeños o están a grandes distancias está limitada por la resolución angular de nuestro ojo, que puede variar de un minuto de arco a seis minutos de arco, en función del brillo y contraste de la imagen. Un telescopio puede darnos una imagen de un objeto lejano con una **resolución** de un segundo de arco. Para llegar a esta resolución es necesaria la función de **amplificación**, lo que significa que los detalles en segundos de arcos de la imagen se agrandan hasta que coincidan con la capacidad de resolución de nuestro ojo, que en circunstancias habituales la podemos ponderar en un minuto de arco. Esta imagen ampliada permanece suficientemente iluminada gracias al poder recolector de luz del telescopio.

El poder de captación de luz de un telescopio es directamente proporcional al tamaño de su apertura, es decir, a mayor superficie colectora de luz (área del objetivo del telescopio), mayor información recogida.

Pero según como gestionemos la capacidad de recolección y concentración de luz de nuestro telescopio obtendremos unos valores u otros, tanto de luminosidad como de resolución y como dependiendo del tipo de objetos (puntuales o extendidos) deberemos aplicar parámetros diferentes, pues por ejemplo, una estrella (objeto puntual) por más que la magnifiquemos siempre aparecerá como un punto, importando solo la apertura del objetivo. Sin embargo una galaxia (o cualquier otro objeto extendido) a más aumentos, mayor será el área de este objeto en el ocular y por lo tanto, su brillo se distribuirá por una zona mayor, bajando la luminosidad superficial, importando ahora tanto la abertura como la magnificación.

Bajo estas premisas vamos a tratar de explicar de una forma sencilla como afectan los principales parámetros de los telescopios al comportamiento de la luz, y así tener una base principal para entender y sacar el máximo rendimiento a nuestro equipo.

¹ Resolución: es la capacidad de mostrar de forma individual la imagen de dos objetos puntuales que se encuentran muy juntos (más detalles en la páginas 35 y 36)

Ajustes de un telescopios

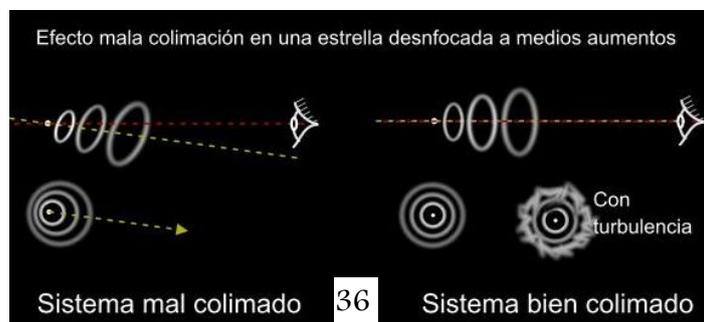
La colimación

Un sistema óptico está colimado cuando sus tres ejes ópticos (el del objetivo, el del ocular y el del ojo del observador) se alinean exactamente y coinciden. Es el primero de los dos ajustes críticos necesarios para obtener el máximo rendimiento de un telescopio, el segundo es el enfoque. La mala colimación surge cuando cualquiera de los tres ejes ópticos está fuera de alineación con los otros dos (imagen 35) y produce aberraciones en la imagen, restándole nitidez y resolución.



Podemos probar la colimación del telescopio con un ocular que nos dé muchos aumentos (al menos 25x por pulgada de apertura), y en una noche con muy buenas condiciones de visibilidad, apuntaremos a una estrella brillante y si al desenfocarla muy ligeramente vemos el disco de Airy (página 36) y alrededor de este una serie de anillos concéntricos (anillos de difracción), es que la colimación está correcta, pero si no aparece el disco de Airy o los anillos están descentrados necesitaremos colimar el sistema.

También con aumentos medios y una estrella brillante ligeramente desenfocada veremos una serie de anillos concéntricos y un puntito brillante en el centro de una zona más oscura central (imagen 36). Si el punto no está centrado del todo o si los anillos no fueran concéntricos nuestro telescopio necesitará ser colimado.



Por último, con un ocular que nos dé pocos aumentos y desenfocando mucho veremos un disco luminoso con la sombra circular del espejo secundario en su interior. Si la sombra aparece descentrada es que la colimación es incorrecta y habrá que colimar el telescopio.

El descolimado puede darse por un sinfín de motivos, que van desde golpes accidentales en el uso o transporte, hasta cambios de temperatura bruscos o simplemente poner el telescopio mirando 'para abajo'.

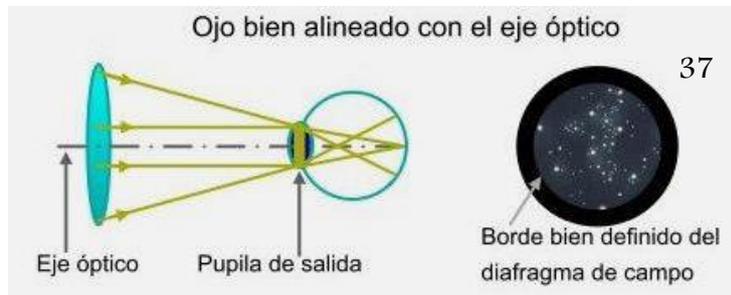
Es necesario colimar cualquier tipo de telescopio. Los refractores y catadióptricos traen sistemas robustos que se mantienen alineados durante años y su colimación puede resultar delicada, siendo recomendable la ayuda de alguien experimentado o un buen servicio técnico. En los telescopios reflectores es fácil y también aconsejable realizar la colimación antes de cada observación.

Los pasos específicos necesarios para la colimación varían con el diseño del telescopio y generalmente los fabricantes incluyen instrucciones para ello, además se pueden encontrar en la “red” innumerables tutoriales muy bien detallados.

La mala colimación en el ocular suele ser un problema más difícil de resolver, y que puede surgir debido a que el ocular está mal fabricado (un problema muy raro), o que el mecanismo de enfoque no se centra al eje óptico, o también que el mecanismo de sujeción en el tubo del enfocador no es simétrico. La colimación de un ocular la debe realizar el servicio técnico. También podemos encontrar problemas de alineación en los espejos de diagonales.

La alineación del ojo.

La posición correcta de la pupila del ojo alrededor de la *pupila de salida* (pág. 48) es una tercera fuente de error de colimación. En la alineación correcta del ojo (imagen de abajo), el iris del observador se coloca de modo que está en el mismo plano que la pupila de salida y se centra alrededor de él, pasando el eje óptico del sistema por el centro de la córnea del observador, la lente y la fovea de la retina.



El borde que limita el campo de visión en la imagen del ocular, llamado diafragma de campo, debe ser visible de forma nítida y contrastada alrededor de toda la circunferencia (imagen 37), y cualquier aberración óptica estará radialmente equilibrada, es decir, será de igual tamaño y de apariencia alrededor de todo el borde del campo.

Una incorrecta posición del ojo, ya sea en desalineación longitudinal (más alejado del plano de la pupila de salida) o mal alineamiento lateral, no alineado con el eje óptico del sistema produce desde malformación en la forma de las estrellas a un estrechamiento, "ojo de cerradura", del campo, o incluso puede provocar una sombra curvada que entraría en el campo de visión.

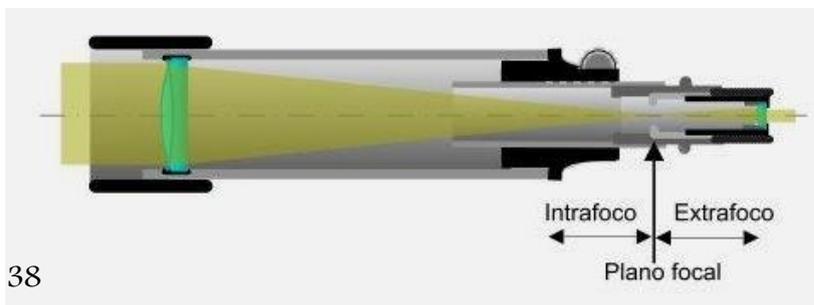
Mantener el ojo alineado con el eje del ocular es una cuestión de habilidad, que con la experiencia se consigue sin apenas darnos cuenta, pero una silla regulable en altura o una escalera con apoyo para los brazos facilitan enormemente esta tarea.

Siempre tenemos que evitar las tensiones musculares producidas por posturas inadecuadas a la hora de observar, pues causan mal alineamiento, fatiga y hasta dolencias.

Enfoque

El enfoque es el segundo de los dos ajustes críticos necesarios para obtener el máximo rendimiento óptico de un telescopio. Por diseño, tanto el objetivo como el ocular dan una superficie focal específica (el plano focal); el enfoque es el ajuste de la distancia a lo largo del eje óptico que trae las dos superficies focales en posición coincidente.

El área comprendida entre el objetivo y su plano focal se llama **intrafocal** o "dentro del foco" y cuando movemos el ocular y su plano focal se desplaza por esta zona, los rayos de luz se proyectan convergentes. Ahora, el área comprendida entre el plano focal del objetivo y el ocular se llama **extrafocal** o "fuera del foco" y cuando movemos el ocular y su plano focal se desplaza por esta zona, los rayos de luz se proyectan divergentes (imagen 38).



En un enfocador típico de piñón y cremallera (engranaje y línea dentada) o en un tipo Crayford (rodillo y cilindro), el ocular se ajusta mediante un par de botones en un eje transversal. La rotación de los botones para desplazar el ocular dentro o fuera es obvia por su movimiento visible. La rotación del botón de la mano derecha en sentido de las agujas del reloj mueve el ocular hacia el objetivo en el eje óptico, en la dirección intrafocal, y en sentido anti horario de rotación el ocular se mueve separándose del objetivo, es decir, en extrafocal.

Entonces si hacemos foco al mover el botón en sentido horario es que estábamos en zona extrafocal y si hacemos foco al mover el botón en sentido anti horario es que estábamos en zona intrafocal.

En algunos sistemas de Schmidt Cassegrain comerciales el enfoque es menos obvio, pues es el espejo primario oculto el que se mueve a través de un mando que sobresale en la parte trasera: moviendo el botón de enfoque hacia la derecha el espejo primario se distancia del espejo secundario, alejando el plano focal (del objetivo) del observador, entonces, un ocular que se encuentre en foco se "desplazará" en dirección extrafocal. Y al girar el mando de enfoque hacia la izquierda el espejo primario se moverá hacia el espejo secundario, moviendo la superficie focal hacia el observador, por lo que un ocular "en foco" se "moverá" en dirección intrafocal.

Entonces si hacemos foco al mover el botón hacia la derecha es que estábamos en zona intrafocal, y si hacemos foco al mover el botón hacia la izquierda es porque estábamos en zona extrafocal.

Proceso de enfoque óptimo

Es conveniente comenzar desde una posición extrafocal, donde el plano focal del ocular debe estar delante del plano focal del objetivo. La razón tiene que ver con la forma en que el ojo enfoca los rayos de luz que provienen de los objetos cercanos. Cuando observamos objetos distantes sus rayos de luz nos llegan casi paralelos, por lo que nuestro ojo se encuentra relajado y el cristalino mantiene una figura "casi aplanada" debido a la sujeción que ejercen los ligamentos que van anclados al músculo del iris. Para enfocar los objetos cercanos, el músculo contrae el iris de una manera que relaja la tensión en estos ligamentos y permite que el cristalino del ojo se abulte en una relación focal más corta. La edad endurece el cristalino (alrededor de 60 años de edad), reduciendo la capacidad elástica de la lente para responder a estos cambios en la tensión.

Cuando observamos una imagen desde una posición intrafocal, en la que los rayos progresan en divergentes, el ojo se encarga de ellos como lo haría de un objeto cerca de los ojos, y aprieta los músculos del iris en un intento de enfocar, esta tensión se mantiene incluso después de que la imagen haya sido enfocada. Por el contrario una imagen desde el área extrafocal es como si la observáramos a lo lejos. El ojo no puede dar cabida a la imagen más lejos que en un estado completamente relajado, y esto sigue siendo una vez que la imagen haya sido enfocada. Si llegamos más allá del enfoque correcto y pasamos en el lado intrafocal, conviene volver a la posición extrafocal y empezar de nuevo.

En los telescopios Schmidt Cassegrain (con perilla de ajuste) el proceso de enfoque recomendado es primero girar el botón de enfoque hacia la derecha para poner el ocular en un desenfoque extrafocal, a continuación, para llevar el ocular de nuevo al foco, ajuste girando a la izquierda el botón en la dirección intrafocal.

La capacidad de producir un enfoque nítido es parcialmente dependiente de la calidad óptica y colimación del instrumento y en parte depende de la cantidad de turbulencia atmosférica. Sin embargo, el "mejor" enfoque siempre va a producir la imagen visualmente más pequeña o la estrella más pequeña, y el borde más agudo en un disco planetario o un terminador lunar, cuando el objeto esté situado en el centro del campo de visión.

Resista la tentación de hacer ajustes continuamente, el enfoque debe ser cambiado por incrementos muy pequeños de manera que la calidad del nuevo enfoque pueda ser observado durante varios segundos.

Profundidad de foco

Es la distancia óptima por delante y por detrás del punto focal, dentro de la cual la calidad de imagen sigue siendo aceptablemente aguda. Los telescopios de relaciones focales cortas tienen menor profundidad de enfoque, siendo necesarios enfocadores muy precisos.

Ganancia y captación de luz – Brillo de la imagen en un telescopio

Nuestro ojo capta fotones que excitan procesos fisicoquímicos y generan señales que son enviadas y procesadas en el cerebro. El fotón es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluye los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible (espectro electromagnético), la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio.

*Realmente las imágenes que vemos son las interacciones de los fotones con las cosas y con nuestro ojo. Y nuestro cerebro percibe esas diferencias en **luminancia**, es decir, percibimos el **contraste** del objeto que brilla con respecto al resto del campo que observamos (la luminancia es una magnitud fotométrica que es el equivalente radiométrico a la radiancia).*

30

Luminancia de un telescopio

Los objetos (o la superficie de un objeto) emiten luz en todos los ángulos posibles por lo que a la hora de recogerlos cuanto más grande sea la superficie colectora, más luz y por tanto más información tendremos de un objeto. **Al igual que la pupila del ojo, el objetivo de un telescopio capta toda la luz que llega a su superficie, por lo que el poder de captación de luz, o de información, depende del tamaño del área del objetivo, es decir, a mayor apertura corresponde mayor cantidad de luz, o de información, recogida.**

En algunos sistemas hay que restar el área del espejo secundario, que evita que cierta luz llegue al espejo primario y así obtener la apertura efectiva.

Entonces la relación entre las áreas de dos objetivos es directamente proporcional al cuadrado de sus aperturas, y la proporción de luz capturada es igual al cuadrado de la relación de aperturas.

Ejemplo: así, en un objetivo de 400 mm de apertura frente a uno de 250 mm, ambas aperturas efectivas:

$$(400/250)^2 = 1,6^2 = 2,56 \text{ (la apertura de 400 mm recoge 2,56 veces más de luz).}$$

Pero cualquier sistema óptico tiene pérdidas de transmisión de luz, inherentes a las lentes y a los espejos. En general las lentes pierden alrededor de un 4% de luz debido a la reflexión de su superficie y a la absorción en el cristal. Esto en el mejor de los casos, pues en dobletes sin recubrimiento las pérdidas llegan hasta el 15%. En los espejos estas pérdidas oscilan entre el 2% y el 20% dependiendo del tipo y del estado del recubrimiento.

En resumen, el verdadero poder de colección de luz por un telescopio está dado por el producto de su área de apertura y el coeficiente de transmisión. En promedio la transmisión de la luz en los telescopios de aficionados de calidad media es aproximadamente del 80% y en los extremos se tienen sistemas de baja calidad con solo el 60% y de alta gama con un 95%.

El brillo de la imagen de un objeto puntual

El brillo de un objeto puntual, como una estrella, será siempre directamente proporcional al cuadrado de la abertura del telescopio (a mayor abertura, recogeremos más luz y podremos ver estrellas más débiles). En este caso el aumento no tiene ningún efecto, pues por mucho que aumentemos, una estrella siempre ocupará el mismo área (aparecerá como un punto). **Entonces la relación del brillo de un objeto puntual visto a través del telescopio y visto a simple vista está dada por el cuadrado de la relación del diámetro del objetivo y el diámetro de la pupila del ojo de esta manera.**

$$Bt / Bo = (Dt / Do)^2$$

Bt: brillo o luminancia del telescopio, Bo: brillo o luminancia del ojo.

Dt: diámetro del objetivo y Do: diámetro pupila del ojo.

Ejem.: $Bt/Bo = (200/6)^2 = 1090$ (Una abertura de 200mm recoge 1090 veces más luz que el ojo)

El brillo de la imagen de un objeto extendido

En este caso, el brillo de un objeto extendido es directamente proporcional al cuadrado de la abertura, pero también es inversamente proporcional al cuadrado de la amplificación. La razón es que al aumentar la amplificación, aumenta el diámetro de la imagen, y con ello el área sobre la cual se distribuye la energía luminosa captada por el telescopio, es decir a mayor abertura mayor captación de luz, pero también a mayor aumentos tendremos menor brillo. **Por lo tanto, la relación entre el brillo de la imagen de un objeto extendido a través del telescopio y a simple vista está dada por el cuadrado de la relación de sus aberturas, dividido entre el cuadrado de la amplificación del objeto, como sigue.**

$$Bt / Bo = (Dt / Do)^2 \times 1/M^2$$

Utilizando la relación $PS = Dt/M$ (página 50) y tomando $Do = Po$ encontramos que:

$$Bt / Bo = (PS / Po)^2 \quad (PS \text{ es diámetro de la pupila de salida y } Po \text{ es diámetro de la pupila del ojo}).$$

Y de la fórmula anterior deducimos que si con unos aumentos dados conseguimos una pupila de salida igual a la de nuestro ojo, la relación de brillo nos dará 1, es decir que el brillo del objeto será el mismo a través del telescopio que a simple vista, obteniendo así la máxima brillantez que nos puede dar un telescopio de un objeto extenso. A esta amplificación que produce el máximo brillo se la conoce como **Magnificación Mínima.**

Ejemplo de magnificación mínima para una abertura de 200mm y una pupila del ojo de 6mm:
Usando $PS = Dt / M$ podemos deducir: $M_{Min} = Dt / Po = 200/6 = 33,3$
PS (pupila de salida), Dt (diámetro del telescopio), M (aumentos), M_{Min} (aumentos mínimos)
Po (pupila del observador que suele tomarse de 6mm como referencia para un individuo tipo)
Tenemos $Bt / Bo = (Dt / Do)^2 \times 1/M^2$ y se comprueba que 33,3 corresponde a la magnificación que suministra el máximo brillo en el presente ejemplo $(200/6)^2 \times 1/33,3^2 = 1$

El resultado anterior es sumamente importante y de gran utilidad, pues nos dice que el brillo de un objeto extendido no podrá jamás aumentar por el uso de un telescopio, sino que en el mejor de los casos será la misma. Pero sí ganaremos en nitidez y resolución con aperturas mayores, pues la pérdida de brillo causada por el aumento la suplimos con una abertura mayor. Con un telescopio se tiene por tanto la posibilidad de a idéntico brillo conseguir una imagen aumentada, respecto al ojo desnudo o a un telescopio de menor apertura.

Con la **magnificación Mínima** un telescopio nos dará el **máximo flujo de la energía luminosa al ojo**, pues con un aumento menor la pupila de salida aumenta siendo mayor que la de nuestro ojo y solo podríamos aprovechar la porción igual a la pupila de nuestro ojo, el área restante de la pupila de salida se desaprovecharía. Y con un aumento mayor la relación entre el brillo del objeto a simple vista y a través del telescopio nos dará menos de uno.

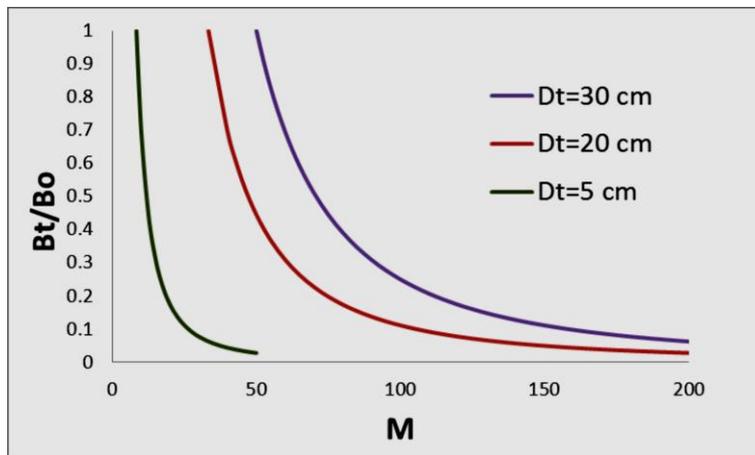


Diagrama de la relación del brillo del telescopio y el brillo del ojo con diferentes aperturas y aumentos (M) para un objeto extendido

Ejemplo: con una abertura de 30 cm y una magnificación de 50x tenemos que el brillo de un objeto extendido es igual que a ojo desnudo, pero sin embargo con 100x, tendremos un factor de 0,25 veces el brillo de dicho objeto observado a ojo. Es decir, que en determinadas circunstancias (cuando $M = M_{\text{min}}$) obtenemos el mismo brillo a ojo que con el telescopio, la diferencia es que con el telescopio el objeto le vemos aumentado (en este caso 50 veces).

Magnitud estelar – Magnitud límite

La magnitud es la unidad relativa relacionada con el brillo de un objeto (planeta, estrella, etc.), cuanto más bajo es el número más brillante es el objeto. La primera clasificación la realizaron Ptolomeo e Hiparco, dando a las estrellas más brillantes magnitud uno, mientras que las estrellas más débiles que se puedan observar a simple vista tendrían magnitud seis. En general desde los centros urbanos los objetos más débiles que pueden observarse a ojo desnudo rondan la magnitud 3, mientras que desde un lugar sin apenas contaminación lumínica podemos observar estrellas de magnitud 6,5.

En 1856 Norman Pogson, basándose en los trabajos de Herschel, estableció un sistema patrón en el que una estrella de cualquier magnitud es 2,512 veces más brillante que la estrella de la siguiente magnitud; por ejemplo, una estrella de magnitud 2 es 2,512 veces más brillante que una estrella de magnitud 3. La ventaja de esta escala de magnitudes es que coincide con el sistema de Tolomeo, y dado que 2,512 elevado a 5 es igual a 100, una estrella de magnitud 1 es exactamente 100 veces más brillante que una estrella de magnitud 6, que a su vez es 100 veces más brillante que una estrella de magnitud 11, y así sucesivamente.

Hoy se sabe que en la respuesta del ojo, según una ley psicofísica de Fechner, la sensación es proporcional al logaritmo de la excitación. Esto es así debido a que nuestros ojos son receptores no lineales. ¿Qué significa? que si estamos observando cúmulos con estrellas del mismo brillo y la cantidad de sus miembros varía siguiendo este patrón: 2, 4, 6, 8 ... y así, para nuestros ojos no va aumentando el brillo de forma constante, sino que cada vez nos dará la sensación de que el aumento de brillo es menor. La única manera de que apreciemos que el brillo aumenta de forma importante, es decir en saltos de magnitud, es que la cantidad de estrellas en los cúmulos varíe siguiendo el siguiente patrón: 3, 6, 16, 38, 98 ... y así. **A esta secuencia se la denomina exponencial, la primera es lineal.**

La diferencia de magnitud entre dos estrellas, que tienen una luminosidad B_1 y B_2 es:

$$B_1/B_2 = 2,512^{-(m_1-m_2)} \text{ y obtenemos } m_1 - m_2 = -2.5 \log (B_1/B_2)$$

El número 2,512 no es más que $(100)^{1/5}$, el factor de escala que encontró Pogson. El valor negativo indica que la magnitud de un cuerpo aumenta a medida que disminuye su brillo, al tomar logaritmos encontramos la expresión directa, que tiene una dependencia logarítmica del cociente de brillos, que es el resultado aproximado de la respuesta del ojo humano.

Normalmente para una estrella la ley se presenta de forma:

$$m - k = -2.512 \log B$$

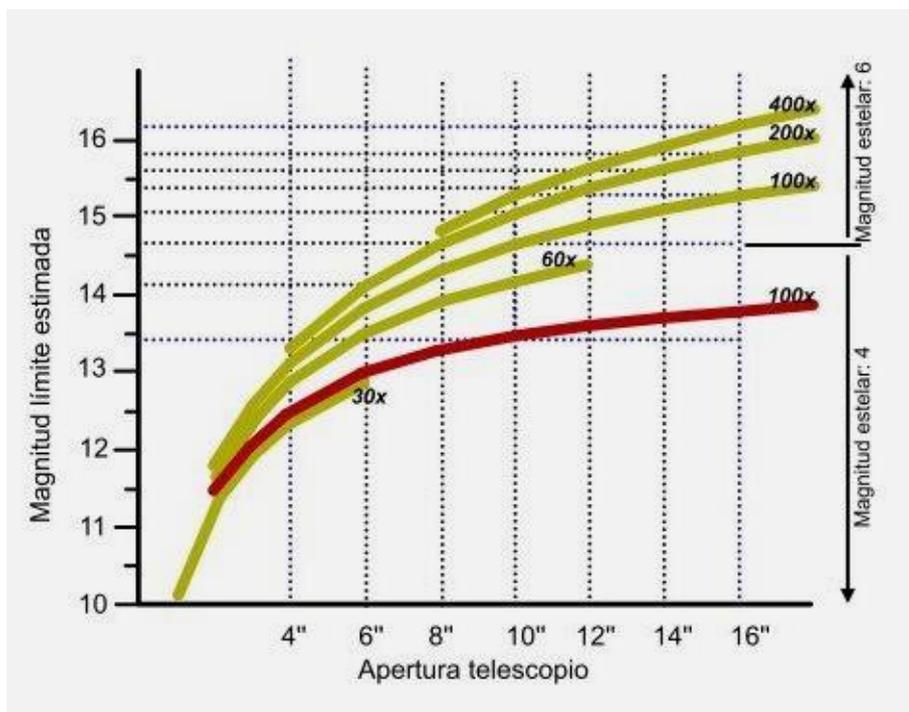
Donde k es una constante arbitraria que se ajusta para que la estrella Vega tenga magnitud cero. A esta magnitud se la denomina **magnitud bolométrica**, y corresponde a todo el espectro electromagnético no solo a la parte visible del espectro, como es el caso de la magnitud visual convencional.

La magnitud límite para un telescopio está dada por:

$$ML = 7.5 + 5 \log Dt \quad (Dt: \text{diámetro del telescopio en centímetros})$$

Si se considera una pupila de 6mm (como valor para Dt), según la fórmula anterior, la magnitud límite para el ojo se acercaría a 6,4 que coincide con lo que típicamente se puede observar en un buen cielo a simple vista. En realidad dicha fórmula es una aproximación bastante simplificada, que no toma en cuenta la pupila del observador, la transmitancia del telescopio y la calidad del cielo, sin embargo es una buena aproximación.

En el caso de los objetos extensos, por ejemplo nebulosas, la magnitud suele representar el brillo equivalente a como si el objeto estuviera concentrado en un punto, por lo que resulta frecuente que la magnitud presentada no se corresponda con la de una estrella cercana.



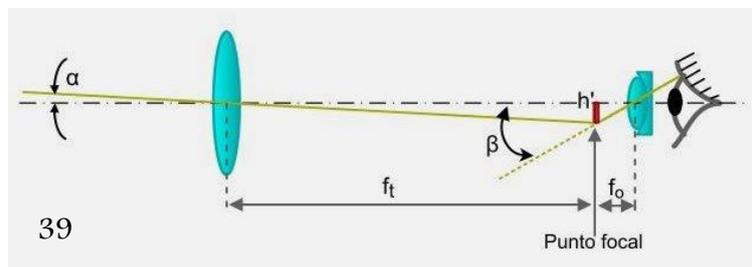
La gráfica muestra la magnitud límite estimada, según los cálculos de Bradley Schaefer (1990), a través de aperturas de 6" a 16" y 6 niveles de ampliación, bajo la condición de que las estrellas más débiles *se ven con visión indirecta*. Las predicciones asumen una pupila del ojo de 6,7 mm, una magnitud estelar a ojo desnudo de 6.0 y de 4.0, una transmisión del telescopio de 80% y la transmisión atmosférica de 70%. Los valores presentados se basan en 314 informes de observación de más de cuatro docenas de observadores. Los principales efectos que aparecen en el gráfico son que la magnitud límite aumenta con la apertura y con los aumentos (de 30x a 400x), pero que la progresión disminuye significativamente a medida que la apertura (Dt diámetro del telescopio) o la ampliación son muy altas.

Aumento o magnificación (potencia)

El aumento indica cuantas veces más grande se ve un objeto a través del telescopio que comparado a como se ve a ojo desnudo (a 50x, el objeto parecerá 50 veces más grande o, lo que es lo mismo, 50 veces más cerca).

Por lo tanto el aumento resulta del cociente del tamaño angular visto a través del telescopio y el tamaño angular visto a ojo desnudo.

En el caso de un telescopio se habla de magnificación angular y se define matemáticamente como el cociente entre los ángulos β y α , y los elementos fundamentales son el objetivo y el ocular: La imagen del objeto se forma en el punto focal del objetivo, esta imagen es ahora el "objetivo" para el ocular.



En la imagen 39 se ve que el tamaño h' de la imagen real de un objeto lejano creado por una lente convergente es tanto mayor cuanto mayor es su distancia focal (f_t).

Al formarse la imagen prácticamente en el plano focal, resulta:

$$h'/f_t = \text{tg}(\alpha) \text{ de donde } h = f_t \cdot \text{tg}(\alpha)$$

El ángulo α bajo el cual se ve el objeto a simple vista es en general sumamente pequeño.

Por lo que el aumento de un telescopio resulta ser:

$$M = \text{tg}(\beta) / \text{tg}(\alpha) = (h' / f_o) / (h' / f_t), \text{ y simplificando.}$$

$$M = f_t / f_o$$

Entonces la magnificación de un telescopio está dada por el cociente de las distancias focales del objetivo y del ocular.

Según lo que acabamos de ver, con un telescopio y un ocular adecuado podríamos conseguir todos los aumentos que quisiéramos y nos servirían para observar los más mínimos detalles de cualquier objeto; pero la capacidad de un telescopio de resolver detalles está limitada por varios factores que también limitan la magnificación. De resolución y de magnificaciones más adecuadas hablamos en el siguiente capítulo.

Resolución

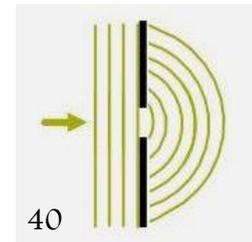
Se llama resolución (o poder separador) a la capacidad de un telescopio de mostrar de forma individual, bajo excelentes condiciones atmosféricas, la imagen de dos objetos puntuales que se encuentran muy juntos. Por ejemplo, cuando un telescopio tiene una resolución de 1 segundo de arco nos estamos refiriendo a que esa es la mínima separación que deben poseer dos objetos puntuales para ser apreciados de forma individual.

Podemos pensar que, en condiciones perfectas, la resolución solo estaría limitada por los aumentos que podamos extraer del telescopio, pero hay tres factores importantes que limitan la capacidad de resolución de un telescopio y que veremos a continuación:

la **difracción**, la **turbulencia atmosférica** y la **calidad del diseño óptico**.

La difracción

La luz es una onda electromagnética que cuando pasa por una abertura, produce un efecto llamado difracción: al limitar la extensión lateral de la onda con la apertura del tubo telescópico, la onda cambia su dirección de propagación cerca de los bordes, abriendo el haz un poco en forma de abanico (imagen 40). **Esta desviación es mayor cuanto menor sea la abertura.**



Aunque según la óptica geométrica o de rayos, la imagen sea perfectamente puntual, **debido a la difracción la imagen de una estrella será en realidad un pequeño disco**



luminoso, llamado disco de Airy, rodeado de unos anillos luminosos más débiles (imagen 41). A los espacios oscuros intermedios se les denomina “mínimos”.

El punto central de la imagen contiene el 84 por ciento de la luz, el primer anillo el 7 por ciento y el resto de la luz se distribuye entre los siguientes anillos.

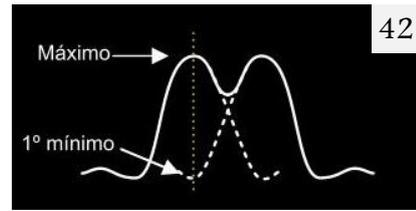
Pero también la aberración esférica (página 57), un enfoque defectuoso o la obstrucción central de algunos telescopios, sustraen luz del disco de Airy y lo añaden a los anillos acentuando el efecto de la difracción.

La difracción no se puede eliminar, en todo caso podemos minimizarle usando aberturas mayores, pero afortunadamente este efecto tiene una incidencia mínima comparado con otras aberraciones.

Debido a la difracción, en un telescopio perfecto sin aberraciones, lo más juntas que pueden estar un par de estrellas y aun distinguirlos como dos, está determinado por tres criterios: **criterio de Rayleigh**, **criterio de Sparrow** y **criterio de Dawes**.

- El criterio de Rayleigh

Podemos ver dos objetos puntuales de luz (de idéntica magnitud) perfectamente separados cuando sus máximos se encuentran a una distancia equivalente a la del primer mínimo, de tal forma que el máximo de luz de un objeto cae en el mínimo de luz del adyacente (imagen 42).



De acuerdo a la posición de los mínimos, el ángulo mínimo, en radianes, para que dos fuentes sean discernibles es:

$$\theta = 1,22 \lambda / D$$

donde θ es la resolución angular en nm, λ la longitud de onda de la luz en la que estamos observando y D el diámetro o apertura del telescopio en cm. El factor 1.22 (k) se deriva de un cálculo de la posición del primer anillo de oscuridad (o primer mínimo) rodeando el disco de Airy. Ahora, si el valor de la longitud de onda es $\lambda = 15.55 \times 10^{-5}$ cm y convertimos θ (radianes) a segundos de arco, llegamos a:

$$\theta = 13,8 / D$$

- El criterio de Sparrow

Dice que las estrellas podían estar un poco más juntas, de tal manera que la irradiancia de las dos estrellas, en la parte intermedia, fuera aproximadamente constante, es decir, con una gráfica plana al pasar de una estrella a otra. Y aplica un factor k de 0.94. Así, según el Criterio de Sparrow, la separación angular mínima en segundos de arco que podemos detectar entre dos estrellas está dada por:

$$\theta = 10,6 / D \quad (D \text{ es diámetro de abertura en cm})$$

- El criterio de Dawes.

Después de una cantidad muy grande de observaciones, W.R. Dawes encontró empírica e independientemente un resultado muy similar al de Sparrow, donde aplica un factor k de 1.025, y viene dado por:

$$\theta = 11,6 / D$$

Estos tres criterios son válidos para observación visual y con la condición de que las dos estrellas tengan la misma magnitud (imagen 43).



El Límite de Rayleigh es el más realista, mientras que el de Sparrow es el más optimista y el menos usado. El Límite de Dawes es un criterio intermedio y es el que más uso suele tener.

Factor de magnificación (Máxima magnificación de resolución y magnificación útil)

Para alcanzar el límite de Dawes se suele tomar, como máxima magnificación, el diámetro de la apertura, en mm, multiplicado por dos (2 D). Esto se remonta a la década de 1940 cuando Ally J. Thompson fijó el límite por difracción para fuentes puntuales en una **resolución máxima** que estaba entre los 240 y los 300 segundos de arco. Trasladando estos datos al límite de Dawes se llegó a la siguiente conclusión:

dado que $\theta = 11,6 / D$ y $M = \varphi / \theta$ (D es diámetro de apertura en cm)

Tenemos **Mmax = 2 x D** (para $\varphi = 240$ arc/seg) y **Mmax = 2.6 x D** (para $\varphi = 300$ arc/seg)

Pero pasado un cierto límite de aumentos, el tamaño de un elemento de imagen o "grano" puede ser tan grande que ya no aumenta la cantidad de detalle. Este límite se alcanza cuando el elemento de imagen es igual al diámetro angular que puede resolver el ojo humano, que está alrededor de un minuto de arco, pero al observar a través de un telescopio con alta amplificación, la pupila de salida frecuentemente es menor que la del ojo, por lo que **una resolución de dos minutos de arco es más realista**.

Ahora volvemos a tomar la formula anterior, pero con φ igual a 120 segundos de arco, y encontramos fácilmente que la **máxima amplificación útil para telescopios pequeños** limitados por difracción se alcanza aproximadamente cuando:

M = D · 10 (D en cm) o **M = D** (D en mm)

El valor de φ es un parámetro que depende del poder resolutivo del ojo y puede variar entre dos y cinco minutos de arco, dependiendo de cada persona. Por este motivo hemos visto valores diferentes en la Magnificación máxima que puede variar entre 1 y 2,6 veces el diámetro de la abertura en mm. Pero, como hemos dicho antes, el valor más generalista es el de una vez el diámetro de la abertura en mm.

Ya que la resolución depende en gran medida de la apertura (diámetro del telescopio), sería lógico pensar que si tenemos un telescopio con la suficiente apertura podríamos ver hasta las piedras más pequeñas de la Luna. Pues no, esto es imposible debido a que la atmósfera distorsiona las imágenes y aumenta el tamaño de los puntos o granos de luz, no dejando que la magnificación máxima de resolución supere los 250x ni en aperturas muy grandes, aunque en ocasiones excepcionales de condiciones atmosféricas se puede llegar a los 400x.

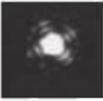
Turbulencia atmosférica - Seeing

La turbulencia de la atmósfera provoca un efecto, conocido como seeing, que incluso en noches claras y en el campo limita en torno a 1 segundo de arco (1 arc/seg) la resolución (esto viene a ser la separación de los faros de un coche vistos a 300km de distancia); en ciudades el límite puede llegar a cuatro o cinco segundos de arco, por lo que existe “un límite” para el Límite de Rayleigh, que está dado por el **nivel de seeing**.

Podemos imaginarnos la turbulencia atmosférica como capas o láminas de aire de distinta temperatura en continuo movimiento, con variaciones de una a otra en el índice de refracción que causan una degradación en la onda de la luz, que antes de entrar en la atmósfera es casi perfecta. Una consecuencia importante del seeing atmosférico es que aumenta el tamaño de las imágenes de las estrellas y además las desplaza constantemente de su posición, y con ello disminuye el poder de resolución. Esta es la razón del titileo de las estrellas y el problema es que en un mismo lugar un día puedes resolver 1 arc/seg y otro día no llegar a 2 arc/seg. Tanto la turbulencia atmosférica como otro efecto adicional que es la aberración cromática de la atmósfera se reducen cuanto mayor es la altura sobre el horizonte de los objetos que observamos.

Existen varias escalas para calificar el nivel de Seeing en la atmósfera pero la más usada por los observadores aficionados es la denominada escala de Antoniadi. La calificación se puede realizar a simple vista o con telescopio y contiene cinco niveles basándose en la apariencia de la estrella.

Tabla de la Escala de Antoniadi.

	Nivel	Calificación	Patrón de Airy	Resolución (arc/seg)	Lugar
	I	Perfecto	Visibilidad perfecta con muy pocas ondulaciones	0.5	Lugares de cielos privilegiados
	II	Excelente	Pequeñas ondulaciones con momentos de calma	1.0 a 2.0	Desiertos o mesetas
	III	Bueno	Visibilidad moderada con mayores ondulaciones	2.0 a 3.0	Zonas suburbanas
	IV	Regular	Pobre visibilidad con ondulaciones constantes	3.0 a 4.0	Zonas urbanas con poca población
	V	Malo	Muy pobre visibilidad, no se aprecian detalles	> 4.0	Centro ciudad

La mayor resolución que nos puede ofrecer un telescopio terrestre está limitada por el seeing y se puede lograr con un telescopio de 250 mm, pues para resolver 0,5 arc/seg necesitaríamos 250 aumentos (M. útil) para llevar el detalle a los 120 arc/seg que resuelve el ojo.

Una aproximación a la máxima magnificación con la que se pueden separar detalles que se puede alcanzar en el campo, con algo de seeing y humedad en el aire, estaría entre 150x y 180x, y en zonas urbanas estaría en unos entre 60x y 80x, siempre que de antemano el telescopio nos de esos aumentos sin pasar de la magnificación útil. Esto no evita que se puedan superar estos aumentos cuando la atmósfera lo permita, pero si no lo permite el cielo, al superar estos aumentos, aunque el detalle tenga mayor tamaño, las imágenes y sobre todo los detalles se van a ver borrosos.

Previsión del Seeing

A la hora de planificar una sesión de observación podemos consultar algunas páginas web que dan información sobre las corrientes de aire a distinta altura en la atmósfera. Los mapas más relevantes a tener en cuenta son los de 300mb, que ofrecen información sobre las capas más altas de la troposfera que es donde se originan gran parte de los fenómenos meteorológicos. Se sitúan entre los 8 km y los 10 km de altura. En estas capas se producen las corrientes de chorro que son fuertes vientos "encajonados" a modo de gran canal y que mantienen un fuerte contraste de temperaturas con las capas inferiores. Esos contrastes de densidad y velocidad son los causantes de las grandes turbulencias de altura que tanto afectan al nivel de seeing.

Si en el cielo vemos que las "estelas de condensación" producidas por los aviones persisten durante bastante tiempo podría significar que se acerca tiempo revuelto o tormentoso, pues el avión está atravesando una zona de aire húmedo. Pero si no se producen estelas o desaparecen con rapidez el pronóstico es de buen tiempo, pues quiere decir que la atmósfera está estable con tendencia a seco.

Lugares de observación

Por lo dicho anteriormente no se aconseja observar en lugares donde la orografía del terreno favorece el flujo ascendente o descendente del aire como por ejemplo en las hondonadas estrechas o en las laderas de las montañas. Lo mismo puede decirse de los terrenos húmedos que favorecen la formación de nieblas, o de fuentes de calor como por ejemplo suelos de hormigón que se han calentado con el Sol durante el día y por la noche producen rápidos movimientos ascendentes del aire. De lo anterior podemos deducir que los lugares más indicados para observar los debemos buscar en zonas moderadamente arboladas, con vegetación baja y, aunque de difícil acceso, los lugares ideales son ciertas regiones de montaña y el interior de grandes desiertos.

Hay que tener en cuenta que hemos hablado de turbulencia atmosférica estando el cielo claro y no de otros elementos posiblemente presentes en la atmósfera y que afectan a la transparencia del cielo, como pueden ser calimas, brumas, humedad y por supuesto contaminación lumínica.

Para valorar la oscuridad general del cielo tenemos **La escala de cielo nocturno de Bortle**, ideada por John E. Bortle en 2001. Ésta escala tiene 9 niveles, siendo el nivel 1 el de los cielos más oscuros existentes en la Tierra y el nivel 9 el del cielo visto desde el centro de una ciudad. La podemos ver en detalle en: http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_cielo_oscuro_de_Bortle.

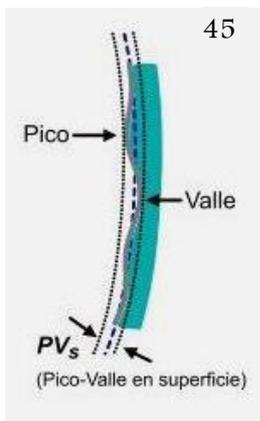
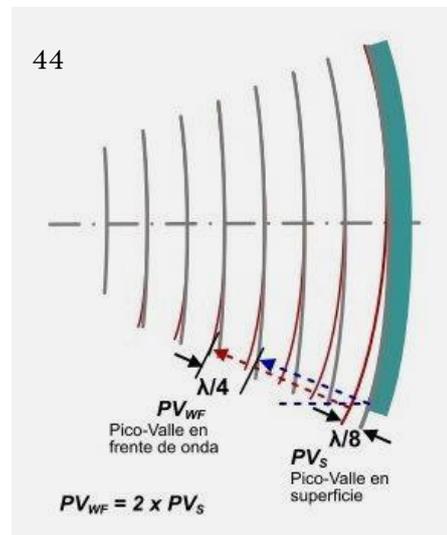
Parámetros de calidad de un telescopio

La calidad de diseño y de construcción de un sistema óptico también afectará notablemente a la capacidad de resolución y a la calidad, en general, de las imágenes que nos ofrecen, siendo poco nítidas y mal contrastadas las de una óptica de baja calidad.

Sólo a partir de una gama media-alta de telescopios para aficionados los fabricantes suelen incluir algún parámetro indicador del grado de calidad del sistema óptico.

El parámetro más frecuente, referido a la óptica, que solemos encontrar es el conocido como **“Regla de Rayleigh de $\lambda/4$ ”** (no confundir con “El Criterio o Límite de Rayleigh”). Esta regla nos dice que el sistema óptico de un telescopio limitado por difracción no producirá una degradación relevante en la onda de luz que genera, si dicha onda no se aparta de la teóricamente perfecta en más de $1/4$ (lo que se representa por $\lambda/4$).

Para los telescopios reflectores lo anterior se expresa como $PV_{WF} = \lambda/4$, (Pico-Valle en el frente de onda) que hace referencia al denominado “error Pico-Valle”, es decir, a la degradación que se produce en el frente de onda debido al valor existente entre la máxima depresión (valle) y la máxima elevación en la superficie de un espejo respecto a su curvatura ideal (imagen 44).



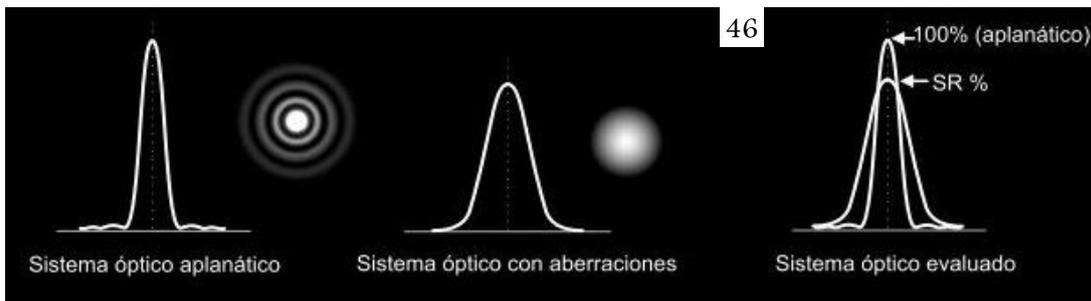
También lo podemos encontrar expresado como PV_S (Pico-Valle en la superficie del espejo) (imagen 45), que es la mitad ($PV_S \lambda/8$) del valor anterior, porque en este caso se mide en la superficie del espejo; y en el caso anterior ($PV_{wf} = \lambda/4$) al medirlo en el frente de onda se podría interpretar como como el camino de ida más el de vuelta.

Una superficie óptica con una tolerancia de hasta $\lambda/4$ resultaría aceptable y se le suele denominar de **difracción limitada**. Sin embargo no resultaría óptimo, y la calidad de las observaciones se vería algo mermada. El físico inglés John William Strutt (1842 - 1919) fijó para un espejo-objetivo, una tolerancia de **1/8 de onda ($\lambda/8$)** como máxima diferencia entre una superficie teórica ideal y la superficie real del espejo para que la degradación que sufre el frente de onda sea inapreciable en la imagen que recibimos.

Hay que señalar que en los telescopios reflectores la figura de difracción es alterada por la obstrucción central (espejo secundario), con lo que el contraste y la resolución de estos, resulta algo menor que la de los telescopios que no disponen de dicha obstrucción.

El método anterior indica la diferencia entre el máximo y el mínimo pero no indica la cantidad de aberración en toda la superficie. Tampoco especifica que longitud de onda se ha medido, por lo que un método más apropiado sería la llamada **Relación de Strehl (SR)** que pondera el error sobre toda su superficie. De todas formas como veremos en un cuadro resumen más abajo, el resultado de ambos métodos es muy similar.

La Relación de Strehl (SR) es un parámetro que indica la relación entre el valor observado de la PDF (función de dispersión del punto) y el que debería tener en una situación ideal, es decir en un sistema aplanático, libre de toda aberración esférica y de coma (imagen 46).



Considerando un sistema aplanático con un 100%, a un valor SR por debajo del 80% se le consideraría deficiente y a un valor por encima del 95 % se le consideraría como sistema óptico de muy buena calidad.

Tabla resumen de parámetros de calidad.

PV_{wf}	SR	Calidad del telescopio
$\lambda/2$	-	Pésima
$\lambda/4$	0,809 (80%)	Buena
$\lambda/6$	0,912 (91%)	Muy Buena
$\lambda/8$	0,950 (95%)	Excelente
$\lambda/10$	0,968 (96%)	Excelente ++
$\lambda/12$	0,978 (97%)	Superior
$\lambda/16$	0,987 (98%)	Superior +
$\lambda/20$	0,992 (99%)	Superior ++

En el caso de los refractores es raro ver este tipo de especificaciones, ya que su tratamiento es mucho más complejo, pero en el caso de los apocromáticos, actualmente se establecen unos parámetros técnicos muy concretos: *objetivo apocromático es el que tiene una corrección mínima de $\frac{1}{4}$ de onda en toda una amplia banda del espectro visible desde los 656 nm (rojo) hasta los 486 nm (azul). Además debe tener una corrección mínima de $\frac{1}{2}$ de onda en los 435 nm (violeta).* En resumen, se viene a establecer que la aberración cromática y la esférica deben estar perfectamente corregidas para todos los colores primarios: rojo, verde y azul.

Resolución de objetos tenues – sensibilidad al contraste

Cuando hablamos de resolución, lo asociamos con la capacidad de separar estrellas dobles o cúmulos. Pero resolver los detalles de un objeto es también poder distinguir entre dos detalles adyacentes significativos (brazos espirales de algunas galaxias, líneas oscuras de ciertas nebulosas...). Por ejemplo, si observamos por un telescopio una camiseta de gruesas rayas blancas y negras y no somos capaces de resolver esas rayas a lo sumo veremos una camiseta grisácea. Marcándonos la atmósfera un límite en la resolución, una apertura muy grande no nos garantiza que podamos llegar a separar las rayas de la susodicha camiseta, pero sí que con una apertura mayor tendremos más información y seremos capaces de distinguir si lo que vemos es una camiseta o un pantalón.

Solemos afirmar que las nebulosas o galaxias débiles se ven mejor en bajas potencias, porque tienen la mejor relación de brillo. Técnicamente esto es cierto y es, sobre todo, válido para la fotografía. El ojo, sin embargo, opera de una forma más compleja.

En luz tenue, la retina compara señales de las áreas adyacentes. Una tenue fuente cubriendo solamente un área pequeña (tal como una pequeña galaxia en el ocular) puede ser totalmente invisible en un nivel consciente. Pero está siendo grabada en la retina, como ha sido evidenciado por el hecho de que galaxias más grandes con el mismo bajo brillo superficial, son fácilmente visibles. En efecto, cuando los bastones ven un trazo de luz dudoso, consultan a otros bastones adyacentes si están viendo lo mismo. Si la respuesta es afirmativa, la señal pasa por el nervio óptico al cerebro. Si es negativa, la señal se descarta.

Según los trabajos que veremos ahora, al magnificar una imagen la energía luminosa de su superficie se reparte por un área mayor y en consecuencia su brillo superficial será menor, pero esto pasa tanto en el objeto como en el fondo, por lo que se sigue manteniendo el nivel de contraste, lo que significa que “no pierde visibilidad”.

Al fin y al cabo nuestro cerebro percibe las imágenes como diferencias de brillo, es decir, diferencia los objetos por contraste y además es más sensible cuanto más grande es el objeto. Por lo que la disminución de brillo no afecta a la detección de objetos débiles al magnificarlos. Pero ojo, si el objeto se magnifica demasiado, la luz se extiende sobre un área muy grande y se puede volver invisible.

Entonces tenemos que encontrar la magnificación más eficiente para poder observar objetos muy tenues y también acceder a detalles dentro de estos objetos.

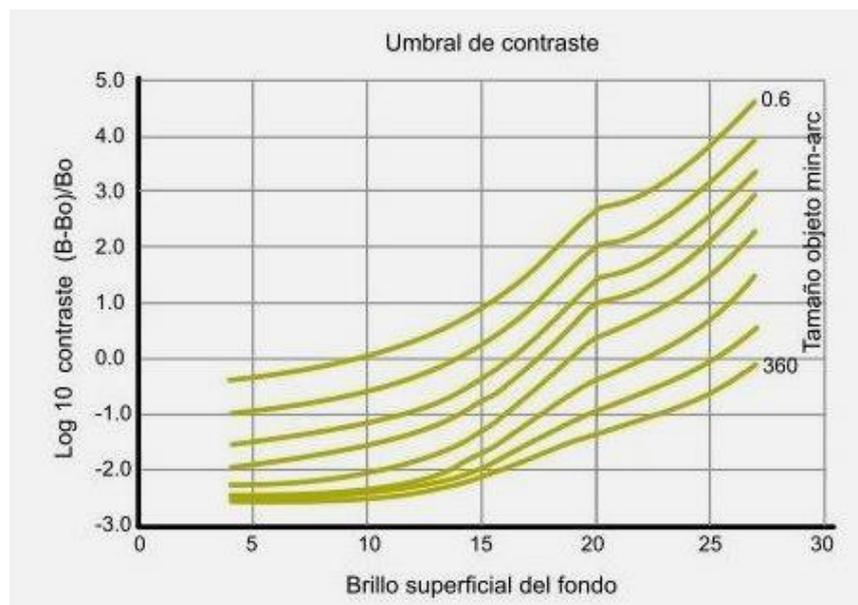
En la resolución de objetos extendidos tenues, la referencia para los aficionados a la astronomía es el libro de Roger N. Clark "Visual Astronomy of the Deep Sky" basado en los datos de un estudio realizado por Blackwell, en la segunda guerra mundial sobre la capacidad de las personas para apreciar detalles en condiciones de oscuridad. Clark elabora algunos cálculos muy complejos para encontrar la magnificación del telescopio que permite resolver mejor un objeto, dada la apertura del telescopio, el brillo del fondo del cielo, el tamaño del objeto y el contraste contra el fondo.

Algunas de los aspectos del trabajo de Clark no son compartidas por muchos otros observadores, entre los que después de debatir bastante aún no coinciden.

A continuación voy a tratar de hacer un resumen de las conclusiones más importantes del trabajo de Clark y después expondré algunas de las opiniones más interesantes de algún reputado observador que no se muestra de acuerdo con todo el trabajo de Clark.

Conclusiones de Clark.

Versión de la Tabla VIII
de Blackwell (1946).

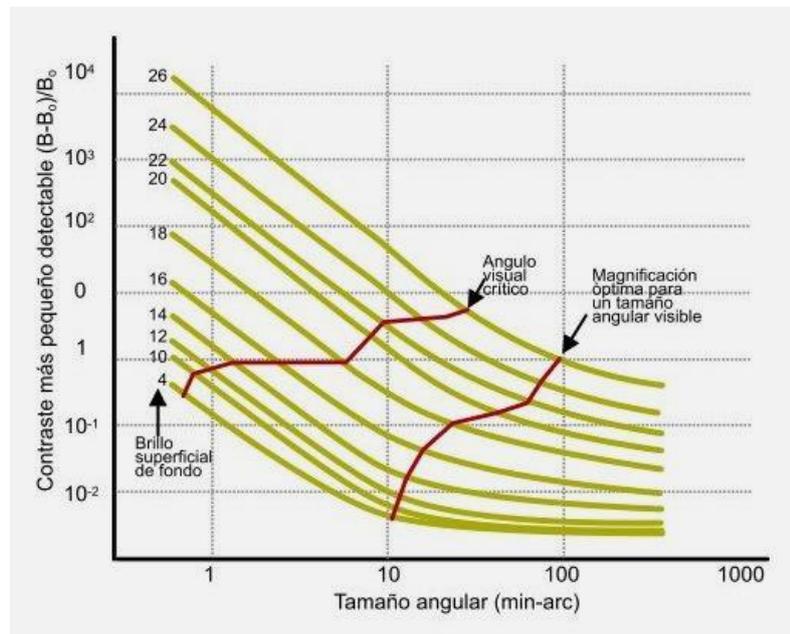


Gráfica.

*El contraste mínimo necesario para detectar un objeto de un tamaño angular dado se muestra en función del brillo de la superficie de fondo. **Cuanto mayor tamaño aparente tenga un objeto, más fácil es de detectar.** Para los pequeños objetos brillantes sobre un fondo brillante, un contraste menor de 0,01 es suficiente para la detección. Pero contra un fondo de cielo nocturno muy tenue (más débil que 25 magnitudes por segundo de arco al cuadrado), a través de un telescopio un objeto grande puede necesitar un contraste de casi 1,0 y un objeto pequeño más de 100 para ser detectado. (Notar que en la gráfica aparecen los logaritmos en base 10 de los contrastes)*

“Visual Astronomy of the Deep Sky”

El más pequeño contraste necesario para detectar objetos de varios tamaños en diferentes brillos de fondos.



45

Este gráfico es el más importante en el libro y el que más desacuerdos causa. Se trata de los mismos datos que los de la gráfica de la página anterior, a excepción de que la capacidad de detección de contraste se representa frente a tamaño angular para diversos brillos superficiales de fondo.

Cuando un objeto se magnifica en un telescopio, el contraste entre el objeto y el fondo no cambia, ya que ambos, con la magnificación, disminuyen su brillo por igual. Sin embargo, el objeto se hace más grande. Por lo tanto, se mueve horizontalmente en la tabla, correspondiente al aumento de la ampliación.

Al comenzar con bajo aumento en el lado izquierdo, los contornos en el brillo de fondo de la superficie trazan líneas rectas diagonales. Estas rectas se cruzan cada una en un punto con la línea del ángulo visual crítico. Objetos más pequeños que este valor aparecen como fuentes puntuales (el detalle más pequeño que puede ser distinguido). Cuando uno se mueve a la derecha de la línea del ángulo visual crítico, el brillo superficial detectable más débil disminuye más rápido que el brillo de la superficie del fondo. De este modo, los objetos más débiles - o detalles dentro de los objetos - se pueden ver cuando se incrementa la ampliación. Esto es cierto sólo hasta que se alcanza el "ángulo visual de ampliación óptima". A partir de entonces, un aumento mayor disminuye el umbral de detección más rápido que el brillo de la superficie. Un objeto débil es más visible cuando se aumenta desde este ángulo. Derivado de datos de la Tabla VIII de Blackwell (1946).

Si un objeto está en el umbral de detección y es menor que el ángulo óptimo, más ampliación hará que sea más fácil de ver. Cuando el objeto se amplía más allá del ángulo óptimo, su brillo superficial disminuye más rápido que el umbral de detección de contraste del ojo, y el objeto será más difícil de detectar. Recuerde que incluso para un objeto algo por encima del umbral de detección, mayor aumento puede resaltar los detalles dentro del objeto que son menores que el ángulo óptimo con un aumento inferior.

Resumen

*En los estudios existe una tendencia general al alza de aumentar el tamaño angular aparente con la disminución de brillo de la superficie. Es también claro que el ángulo visual de amplificación óptimo (OMVA por sus siglas en inglés) para objetos **muy débiles** es del orden de 0,5 a 1,5 grados (puede ser de más de 100 minutos de arco en el extremo débil).*

Por lo tanto, la estrategia de observación para detectar objetos de cielo profundo, o detalle dentro de los objetos, es magnificar hasta que parezcan unos 100 minutos de arco de tamaño.

Para buscar todos los detalles en un objeto, usar una amplia gama de aumentos, desde muy baja a muy alta, examinando todo el objeto con cada ampliación. Por ejemplo. 35x, 50x, 80x, 120x, 180x, 270x, 405x (factor de aumento de 1,5 y dentro de los límites de cada telescopio).

Un método sencillo para comprobar la OMVA es observar y tener de referencia objetos reales de cielo profundo. Un ejemplo sería M57, La nebulosa del Anillo en Lyra. Tiene un diámetro de 1 minuto de arco y su disco central, más tenue que el anillo, mide 3/4 del diámetro.

Utilizar los aumentos teóricos más óptimos no quiere decir que la imagen que recibimos sea la más nítida o la más agradable, ni tampoco que siempre podamos distinguir esos detalles que buscamos, solamente son valores indicados para "tratar "de resolverlos, probando así la capacidad de detección del equipo y la nuestra en las diferentes condiciones ambientales que se nos puedan dar.

Opinión de Mel Bartels

Grandes pupilas de salida resultan en la mejor capacidad de detectar objetos en una amplia gama de tamaños aparentes. Cuando la pupila de salida se reduce, la capacidad de detectar objetos desciende y se concentra en tamaños aparentes de alrededor de un grado.

Opinión de Nils Olof Carlin

Los resultados de Nils no se ajustan exactamente con los de Clark. "La óptima ampliación de detección " que encontró fue bastante menor que la de Clark, y no tan bien definida.

Para hacerlo simpleEl mensaje esencial de los resultados de Nils se puede resumir en una regla de oro: "Para detectar un objeto débil, puede aumentar la ampliación hasta que el cielo sea tan oscuro que tenga dificultad para distinguir el diafragma de campo (borde oscuro en la imagen del ocular que limita el campo de visión), o hasta que el objeto adquiriera un tamaño aparente de 1 grado, lo que ocurra primero".

Estrategias de observación de tres afamados observadores.

(Basadas en la pupila de salida).

Richard Berry.

- 5-7 mm PS. Más rico campo de observación
- 3-5 mm PS. Mejor para cielo profundo
- 1-2mm PS. Mejor para detalles (cúmulos globulares, nebulosas planetarias, luna y planetas)

47

Stephen O'Meara.

Utiliza un refractor de 4" con potencias bajas, medias y altas, y se toma su tiempo estudiando el objeto con cada aumento.

- 4.4 mm PS
- 1.4 mm PS
- 0.96 mm PS

Mel Bartels

Aprovecha los oculares de gran angular disponibles en la actualidad, pues le gusta ver los objetos rodeados de un amplio campo.

- 5-6 mm PS Para la escala más grande de objetos
- 3-4 mm PS Para la escala media de objetos
- 1-2 mm PS Para objetos a pequeña escala

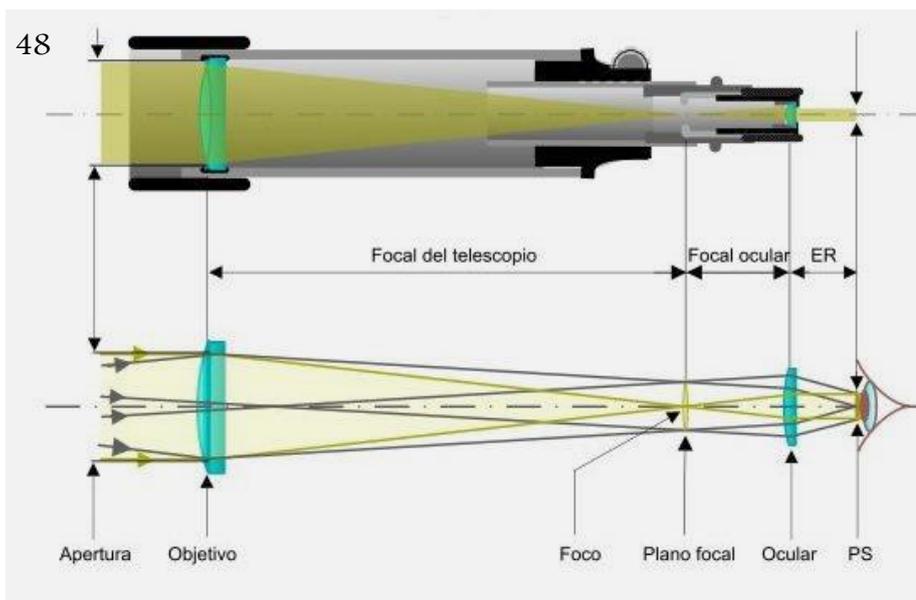
Por último, en condiciones de visibilidad malas limitar aumentos a 200-300 o 2-3 mm de PS

Como regla general, para cada objeto es conveniente utilizar la mayor gama de aumentos de que dispongamos dedicando un tiempo adecuado en cada visión.

Pupila de Salida (PS)

El valor de “Pupila de salida” (PS) ha aparecido varias veces a lo largo de los capítulos de este libro; en la página 10 ya se describe de forma breve, en la página 31 vemos como al conseguir, con nuestro equipo de telescopio-ocular, una Pupila de Salida igual a la de nuestro ojo obtenemos la mejor relación de luminosidad; y en la página anterior hemos visto como algunos afamados observadores la utilizan como principal valor a tener en cuenta a la hora de observar objetos de cielo profundo.

El concepto de “pupila de salida” se refiere al área efectiva, del haz de luz que sale por el ocular, en donde se forma la imagen que será capturada por la pupila del observador. Su medida es el diámetro de dicha área en mm. En la práctica es el pequeño círculo luminoso que se aprecia en el ocular cuando lo enfocamos a un objeto luminoso (imagen 47). La PS se forma fuera del ocular y a la distancia entre esta y el plano del ocular se le conoce como **Eye Relief (ER)** o **relieve ocular** (imagen 48).



Importancia de conocer la pupila de salida (PS)

En “La brillantez de un objeto extendido” (página 31) explicamos de manera detallada como, con unos aumentos dados, al conseguir una pupila de salida igual a la de nuestro ojo, la relación de brillo con respecto a nuestro ojo nos da idealmente 1, es decir que el brillo del objeto será el mismo a través del telescopio que a simple vista, obteniendo así la máxima brillantez que nos puede dar un telescopio de un objeto extenso.

Si al mismo telescopio le aplicamos menos aumentos y la PS que conseguimos es mayor que la de nuestro ojo, se producirá una pérdida de captación de luminosidad por parte del observador, puesto que el ojo solo recogerá la luz equivalente al tamaño de su pupila.

Ahora, si aumentamos la magnificación hasta conseguir pupilas de salidas menores a la de nuestro ojo estaremos bajando también la “luminosidad del objeto” y por tanto recibimos menos información de él. Pero si queremos resolver objetos pequeños o detalles de estos, por lo general, habrá que ir magnificando hasta conseguir, como tope, pupilas de salida de 1 o 2 mm.

Por debajo de 1mm de PS (PS=1mm equivale en aumentos al diámetro de apertura en mm.) en la mayoría de los telescopios las imágenes empiezan a perder nitidez y la capacidad del cerebro para procesar imágenes depende de que las mismas estén lo más limpias y nítidas posibles, por eso vimos como en la estrategias de afamados observadores no suelen bajar de 1mm de PS en las observaciones. Esto no quiere decir que en ciertas ocasiones sí se pueda bajar de este valor.

Podríamos decir que el máximo aumento recomendable para resolver objetos extensos pequeños o detalles dentro de los objetos es el aumento menor que te permita resolver dichos objetos o detalles.

Aunque con los aumentos baja el brillo que percibimos de un objeto extenso, la capacidad de detección por nuestro ojo sigue igual, pues, como explicamos en “Detección de objetos extensos-sensibilidad al contraste”, el nivel de contraste se mantiene y además también el cerebro detecta mejor los objetos más grandes.

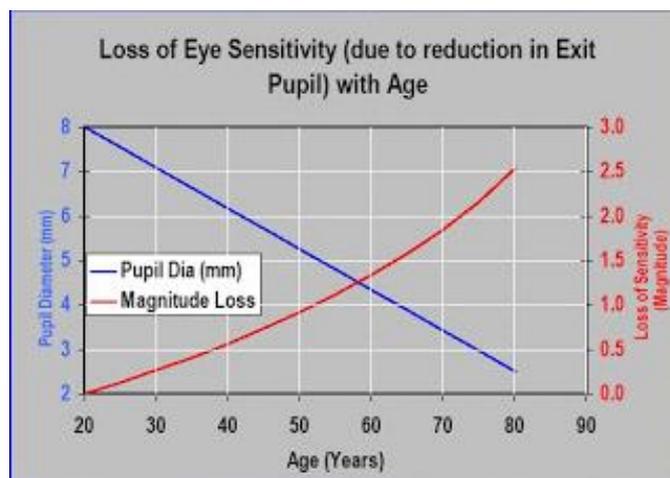
Pupila del Observador (PO)

En la oscuridad es cuando la pupila del ojo humano alcanza su mayor tamaño, con un valor general de unos 6 o 7 mm de diámetro. Este valor varía con cada persona, siendo la edad el factor que más determina la capacidad de dilatación de la pupila. Para un observador típico, el diámetro de la pupila vendrá determinada por la siguiente formula:

$$PO = 8,1 - (0,04 \times \text{edad})$$

Gráfico:

Disminución del diámetro de la pupila con respecto a la edad (línea azul) y la pérdida en magnitudes (en rojo), Maidenhead Astronomical Society.



Cálculo de PS para un binocular y para un ocular

En unos binoculares

Viene dado por sus mismas especificaciones como el coeficiente entre la apertura en milímetros y la magnificación.

$$PS = A / M$$

PS es pupila de salida en mm, A es apertura en mm y M es magnificación.

50

En el caso de un ocular

La PS dependerá de la relación Telescopio-ocular que estemos utilizando, pues cada ocular determina una magnificación respecto al telescopio.

Partiendo de la formula anterior ($PS = A/M$), por semejanza de triángulos resulta que:

$$A / (ft + fo) = PS / fo$$

Lo que implica que:

$$PS = A \times fo / (ft + fo)$$

Pero si ft es mucho mayor que fo, resulta:

$$PS = A \times fo / ft = A / M$$

Para un telescopio es más frecuente utilizar la siguiente formula, que deriva de la anterior y de $F = ft/A$:

$$PS = fo / F$$

PS es pupila de salida en mm, fo es focal del ocular en mm y F es la relación focal del telescopio.

PS y oculares:

- PS entre 2 y 6 mm ($M = \text{entre } A/2 \text{ y } A/6$) Vistas de buena calidad con casi cualquier ocular.
- PS igual a 1 mm ($M = A$) Vistas de calidad aceptable, aún con oculares de calidad media.
- PS igual a 0.5 mm ($M = 2 \times A$) Para una calidad aceptable se requieren equipos y oculares de muy buena calidad.

Nota:

En los tubos con obstrucción central, como los reflectores y los catadióptricos, una pupila de salida mucho mayor que la del ojo puede producir que estemos observando la obstrucción central; a este efecto se le denomina **Blackout**.

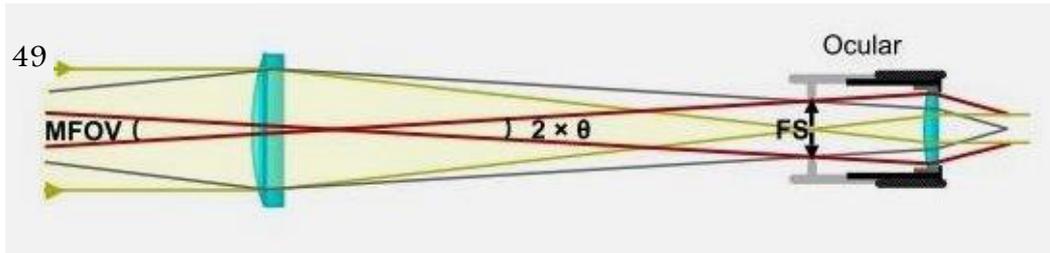
Campo de Visión – FOV

En astronomía, el campo de visión (FOV acrónimo de Field of View) es el tamaño o diámetro angular del área del cielo que se puede observar a través del telescopio y comúnmente lo medimos en grados o minutos de arco.

Campo máximo de visión – MFOV

El MFOV nos indica el máximo campo de visión que puede recoger un telescopio con independencia del ocular que podamos utilizar.

51



Como se puede apreciar en la imagen 49, el campo de visión está limitado por el “Field Stop” (FS), que suele ser la obstrucción de menor tamaño en el camino óptico de un telescopio y por lo general se encuentra en el barril del ocular. Todos los demás rayos de luz que entren por la apertura del telescopio y no sean recogidos por el FS quedan descartados. Por tanto el MFOV está relacionado con el FS y con la distancia focal del telescopio (ft). Por lo que podemos deducir que:

$$\text{MFOV} = 2 \times \theta$$

Como $\tan\theta = (\text{FS}/2)/\text{ft}$ tenemos:

$$\text{MFOV} = 2 \times \arctan(\text{FS}/2/\text{ft}) = 2 \times \arctan(\text{FS}/2 \times \text{ft}) \text{ en radianes}$$

MFOV ($\theta \times 2$) resulta ser el cociente entre el FS del telescopio y su distancia focal:

$$\text{MFOV} = \text{FS}/\text{ft} \text{ (en radianes)}$$

Para calcular en grados el MFOV con los dos tamaños de FS de los enfocadores más utilizados aplicaremos las siguientes constantes:

$$\text{FS para enfocadores de } 1,25'' : \mathbf{K1} = 31.75 \times (180/\pi) = \mathbf{1819 \text{ mm}}$$

$$\text{FS para enfocadores de } 2'' : \mathbf{K2} = 50.80 \times (180/\pi) = \mathbf{2910 \text{ mm}}$$

$$\text{MFOV} = \mathbf{K1}/\text{ft} \text{ (en } ^\circ \text{ para enfocadores de } 1,25'' \text{ y con ft en mm)}$$

$$\text{MFOV} = \mathbf{K2}/\text{ft} \text{ (en } ^\circ \text{ para enfocadores de } 2'' \text{ y con ft en mm).}$$

Hay que tener en cuenta que el FS, finalmente depende del tamaño del barril del ocular que utilizemos, pues es común acoplar oculares de 1,25'' en enfocadores de 2''. Además los barriles de los oculares llevan un anillo interior que limita el tamaño del campo y se proyecta para que aparezca como un círculo (diafragma de campo) delimitando el espacio cuando miramos a través del ocular y que también suele servir de FS.

Campo aparente de visión – AFOV

El equivalente para oculares al campo máximo del telescopio es el “campo aparente” (AFOV). Este valor es fijo y aunque se puede calcular, ya viene indicado en cada ocular por el fabricante e indica el diámetro angular mayor, medido en grados, del área del cielo que se puede llegar a observar a través de un ocular.

Los diseños modernos de oculares vienen con campos aparentes muy amplios, sobre todo los de barril de 2”, llegando a valores de 82° y 110°, doblando a los modelos anteriores mucho menos complejos. Estos campos amplios nos dan imágenes con sensación de inmersión del objeto en el espacio. La única pega es que estos sofisticados diseños son mucho más caros que los diseños de oculares más sencillos.

Para calcular el máximo AFOV de un ocular, se procede de la misma manera que en el caso del objetivo del telescopio.

Máximo AFOV (en °) = $K1/fo$ (K1: 1819 mm para oculares de 1,25”)

Máximo AFOV (en °) = $K2/fo$ (K2: 2910 mm para oculares de 2”)

Campo real de visión – TFOV

El campo real de visión (TFOV) es el área real del cielo que nos muestra el ocular en conjunto con el telescopio. Se puede calcular de la siguiente manera:

TFOV (en °) = $(fo/ft) \times AFOV$ y simplificando tenemos:

TFOV (en °) = AFOV / M

M: magnificación, fo: focal del ocular, ft: focal del telescopio

En los telescopios refractores y en los reflectores el Field Stop suele coincidir con el diámetro del enfocador, sin embargo en algunos catadióptricos (como los Schmidt-Cassegrain y los Maksutov-Cassegrain) la obstrucción más pequeña la suelen producir unos baffles en el interior del tubo. Por este motivo, algunas veces los resultados obtenidos a partir del Field Stop pueden diferir de la realidad, sin embargo estos resultados suelen ser muy aproximados.

Tiempo de transito

También podemos medir el campo real de un conjunto ocular-telescopio de una forma práctica en el campo. Si la tierra tarda 24h en completar un giro sobre su eje (360°) sabemos que una estrella situada en el ecuador celeste “recorre” un ángulo de 15° en una hora; por lo que un sencillo cálculo nos daría que una estrella recorre 15 segundos de arco en un segundo de tiempo.

Formula:

$$\text{Campo real (TFOV)} = 15(\text{arc/seg}) \times t$$

t: tiempo en segundos que tarda en cruzar diametralmente el ocular

Ejemplo:

Si elegimos una estrella situada en el ecuador celeste, o muy próximo a este, como por ejemplo Alnilan (una de las Tres Marías del Cinturón de Orión) y cronometramos el tiempo que tarda en cruzar diametralmente el campo del ocular con el telescopio inmóvil (por ejemplo 120 segundos), y luego multiplicamos esos segundos de tiempo por los 15 segundos de arco, obtendremos el campo real de ese conjunto ocular-telescopio.

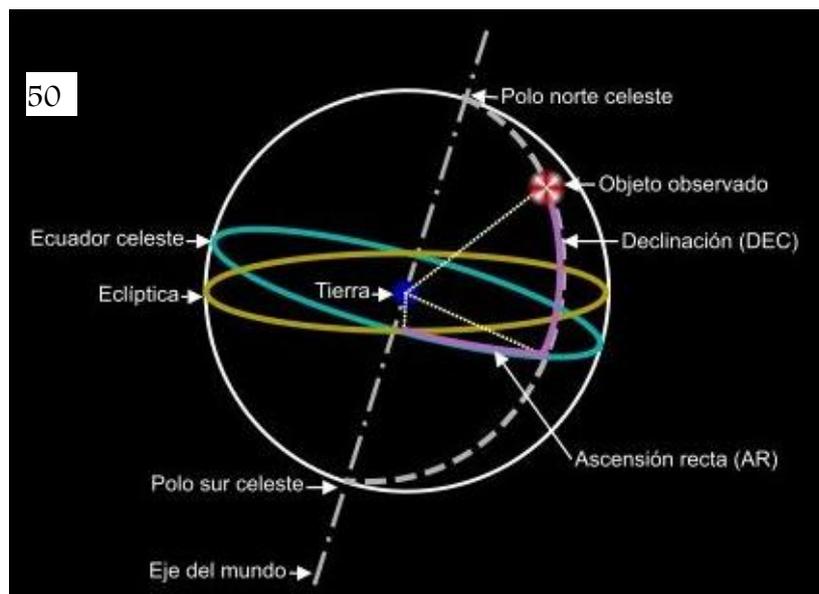
$$\text{TFOV} = 15(\text{arc/seg}) \times 120(\text{segundos}) = 1800 \text{ arc/seg} = 30 \text{ arc/min.}$$

El campo real que nos daría el ocular-telescopio del ejemplo será de 30 minutos de arco.

Ahora, si la estrella que elegimos está alejada del ecuador celeste, tenemos que añadir a la formula anterior su declinación (Dec), es decir, su distancia angular al polo celeste.

$$\text{TFOV} = 15(\text{seg/arc}) \times t \times \text{coseno}(\text{Dec}) \quad \text{Dec es la declinación de la estrella}$$

En astronomía la declinación (Dec) es el ángulo que forma un astro con el ecuador celeste (imagen 50).



Aberraciones de los telescopios

Las aberraciones son distorsiones producidas en las imágenes que limitan la resolución y la calidad de estas. Pueden ser debidas a la propia naturaleza de la luz (como la difracción), también pueden deberse al paso de la luz por la atmósfera (refracción por capas de distinta temperatura) y las más notables, a las que dedicamos este capítulo, que son las relacionadas con errores en la geometría del diseño y las inherentes a la clase de material óptico.

54

Podemos clasificar las aberraciones ópticas de los telescopios de la siguiente manera:

Aberración cromática longitudinal

Aberración cromática lateral

Aberración esférica

Coma

Astigmatismo

Curvatura de campo

Distorsión

Las dos primeras se consideran **cromáticas** y las demás **monocromáticas o geométricas**.

- Las **aberraciones cromáticas** solo pueden darse si el objeto es blanco o está formado por la mezcla de varios colores, y solo aparecen en equipos que contienen lentes.
- Las **aberraciones monocromáticas o geométricas** son aquellas en las que el punto imagen está distorsionado o su posición no corresponde al lugar correcto. Pueden aparecer con cualquier color, incluso si es un color puro, y se dan en cualquier tipo de telescopio.

Estas, a su vez, las podemos dividir en dos:

Cuando el punto imagen se encuentra en la posición correcta pero está distorsionado (esférica, coma y astigmatismo) se le llama **aberración de punto**.

Y cuando el punto imagen es un punto, pero no se encuentra en la posición correcta (curvatura de campo y distorsión) se la conoce como **aberración de forma**.

En los telescopios pobremente diseñados y de materiales modestos las aberraciones suponen una importante limitación, pero esto no tiene por qué ocurrir en telescopios modernos, diseñados y contruidos por buenos profesionales.

Aberración cromática

La aberración cromática es una distorsión provocada por la imposibilidad de una lente para enfocar todos los colores en un único punto de convergencia.

Esto se debe a que cada longitud de onda (cada color) está afectada por un índice de refracción diferente, y después de atravesar una lente, los colores que forman una imagen, no coincidirán en el mismo plano focal.

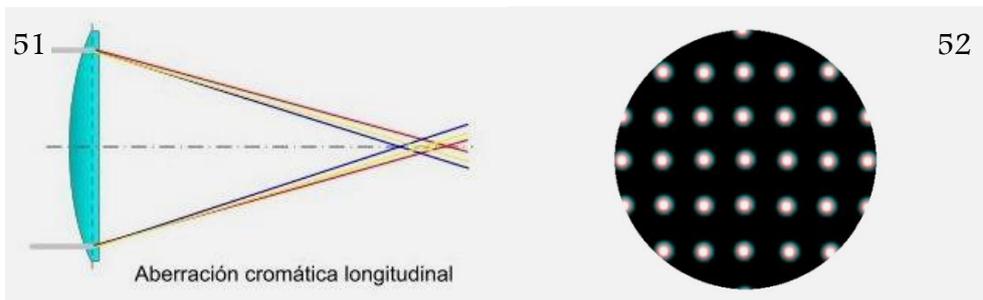
55

Podemos diferenciar dos tipos de aberración cromática:

- Aberración cromática axial o longitudinal.

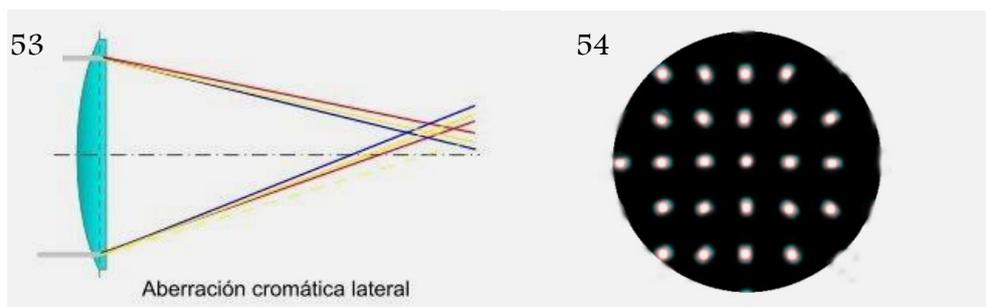
Se manifiesta como un defecto de enfoque, debido a que cada color converge en un plano diferente. La luz azul tiene una longitud de onda más corta que la luz roja y se desvía (refracta) más, de manera que el color azul forma el foco más cercano a la lente que el color rojo (imagen 51). De esta forma, si focalizamos la imagen en el punto focal del azul se verá un halo rojo, y viceversa. Si hacemos foco en el punto intermedio veremos una imagen con halos de los dos colores (imagen 52), a este punto se le denomina círculo de mínima confusión o foco óptimo y es en donde la imagen está más enfocada.

Este defecto afecta de forma similar en todo el campo.



- Aberración cromática lateral o de aumento.

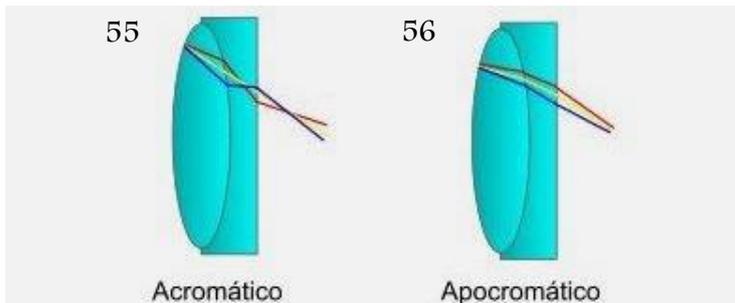
Es debida a defectos de ampliación, ya que los diferentes colores fuera del eje óptico se dispersan de forma diferente (imagen 53), produciendo un efecto parecido a la coma, que se hará más evidente cuanto más nos alejamos del eje óptico (imagen 54).



Los dos tipos anteriores de aberraciones se pueden dar conjuntamente o por separado.

Actualmente las aberraciones cromáticas se tratan de corregir combinando diferentes tipos de vidrios. Así nacieron los primeros telescopios **Refractores Acromáticos (ACRO)**, compuestos por un par de lentes (imagen 55), una convergente de poca densidad y por tanto de bajo grado de dispersión de la luz, conocida como **Crown** y otra divergente de mayor densidad y por consiguiente con mayor grado de dispersión, conocida como **Flint**. Estas dos lentes, también llamado “doblete”, deben tener aberraciones cromáticas exactamente opuestas a fin de que se anulen mutuamente. Las combinaciones pueden ser muy variadas pero las más comunes se basan en una pareja de lentes compuesta por las señaladas anteriormente en contacto o bien separadas por aire. Con esta combinación se mejora la aberración cromática sin necesidad de configuraciones con relaciones focales altas.

Los telescopios **Refractores Apocromáticos (APO)** en esencia son sistemas acromáticos mejorados (imagen 56), sobre todo en el empleo de vidrios que casi anulan el cromatismo, como pueden ser los denominados “Fluor Crown”(los más utilizados), ED (“Extra-low Dispersión”) o SD (“Super-wide Dispersión”).



La diferencia principal entre un ACRO y un APO es el nivel de corrección en las aberraciones y no el número de lentes que forman el objetivo.

Además de los telescopios refractores hay otros modelos que también incluyen lentes, como pueden ser los Schmidt-Cassegrain o los Maksutov-Cassegrain. Son lentes muy finas denominadas lentes correctoras y la aberración cromática apenas tiene relevancia.

Sin entrar en más detalles de óptica, es sabido que al aumentar la distancia focal la aberración cromática disminuye, por lo que antes de conocerse los vidrios de baja dispersión, la manera de reducir este defecto era aumentando la distancia focal, por eso los primeros telescopios refractores podían llegar a medir más de 15 metros.

A la hora de establecer un parámetro que permita evaluar si un cierto telescopio es susceptible de mostrar o no esta aberración, se considera que tal aberración se hace apenas apreciable en observación visual si la **relación focal** es superior a $0.122 \times A$ (A: apertura en milímetros).

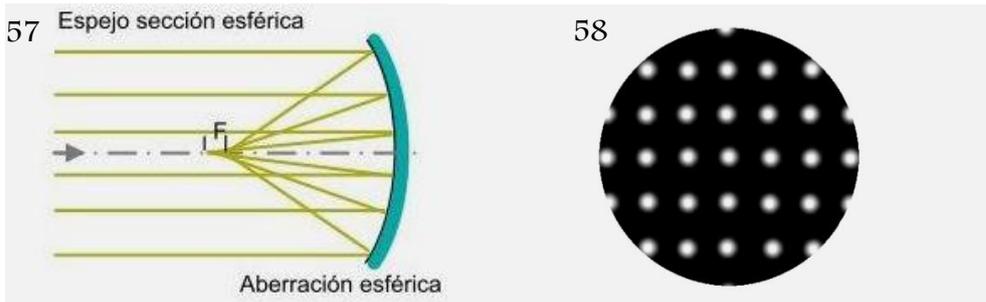
En los espejos, al no cambiar la luz de medio con diferente densidad (solo es reflejada) no tienen por qué sufrir de aberración cromática.

Aberración esférica

La aberración esférica es un defecto de los espejos y las lentes de sección esférica, en el que los rayos de luz paralelos al eje óptico que inciden en estas superficies hacen foco en distintos puntos en función de la altura de incidencia, o dicho de otra forma, a medida que los rayos de luz se van alejando más del eje óptico forman foco más cerca del espejo (imagen 57). Los telescopios de relación focal baja son más susceptibles de padecer este defecto.

El efecto óptico sería que todas las estrellas del campo se verían difusas (imagen 58).

57



Al igual que ocurre con la aberración cromática, el punto intermedio de enfoque, donde es menor este defecto, se conoce como círculo de mínima confusión o foco óptico.

En los espejos de sección parabólica esta aberración no ocurre, ya que todos los rayos incidentes harán foco en un solo punto, “el foco de la parábola”.

El motivo por el que algunos fabricantes siguen construyendo espejos esféricos es por su simplicidad respecto a uno parabólico y la forma en la que minimizan dicho defecto es otorgándoles una relación focal alta.

Según la Fórmula de Ceder, por encima de una relación focal dada, la aberración esférica es inapreciable.

$$ft^3 = 3.49 \times A^4 \quad (\text{ft es focal del telescopio y } A \text{ es apertura, ambas en mm})$$

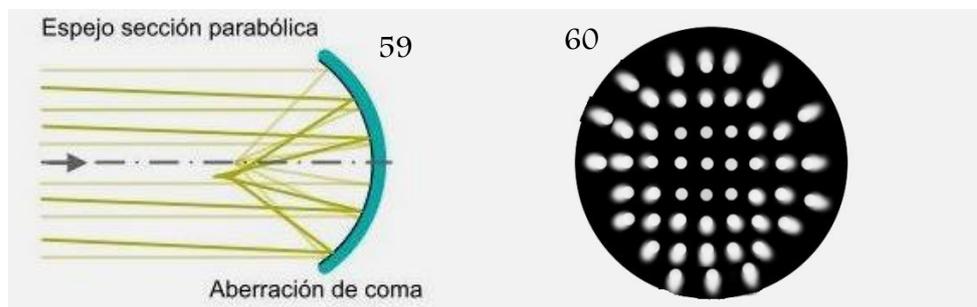
Valores más frecuentes:	Apertura (pulgadas)	Relación focal
	4.5	7.35
	6	8.10
	10	9.61
	12	10.21

Los sistemas totalmente corregidos de esta aberración se les denominan **“asféricos”**.

Coma

La aberración de coma es una propiedad inherente de los telescopios que usan espejos parabólicos, aunque puede aparecer en cualquier otro espejo o lente.

La luz de una fuente puntual en el centro del campo se enfoca perfectamente en el punto focal del espejo. Sin embargo, cuando la fuente de luz no procede del centro del campo, las diferentes partes del espejo no reflejan la luz hacia el mismo punto (imagen 59), de tal forma que se superponen distintas imágenes del mismo objeto, cada una de forma anular y de mayor tamaño. Esto da como resultado un punto de luz que no está centrado, tomando el aspecto de “pequeños cometas” cuyo vértice apunta siempre al centro del campo. A más desplazamiento del centro, más notorio es este efecto (imagen 60).



Una relación focal alta también es menos susceptible de padecer esta aberración.

Los sistemas ópticos en los que apenas es apreciable el coma y la aberración esférica son llamados **aplanáticos**.

Algunos sistemas aplanáticos:

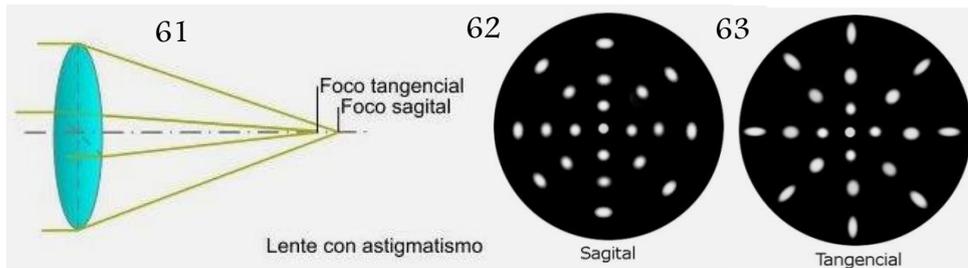
- Reflector Richey – Chrétien (pág. 57)
- Catadióptrico Schmidt – Cassegrain (pág. 20)
- Catadióptrico Maksutov – Cassegrain (pág. 20)

Astigmatismo

Aunque dispongamos de un sistema aplanático, los objetos alejados del eje óptico también pueden sufrir otra aberración conocida como **Astigmatismo**.

Consiste en una variación del punto de foco dependiendo de si tomamos los rayos por un plano tangencial o por un plano sagital, de tal forma que enfocando la componente tangencial, no se puede enfocar la sagital y viceversa (imagen 61). El punto intermedio de enfoque donde es menor este defecto se conoce como círculo de mínima confusión o foco óptico.

59



El motivo es que la lente no posee la misma curvatura en todos los *planos axiales*¹.

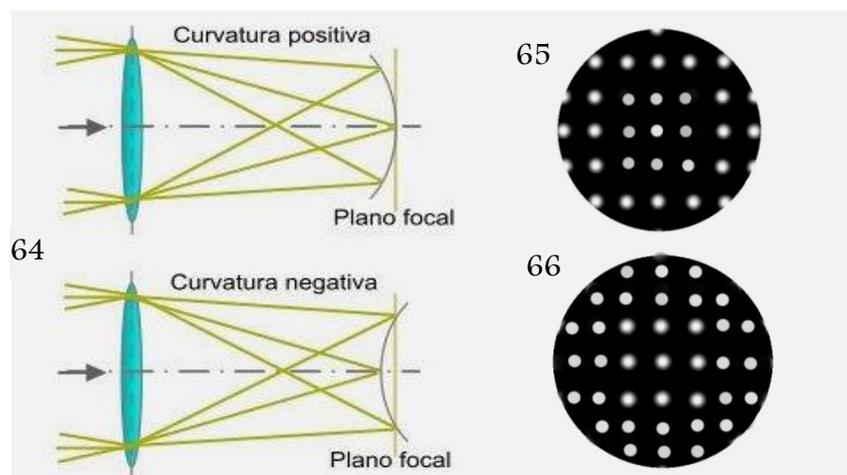
El efecto es que la imagen es clara y nítida en el centro de la imagen y desenfocada cuanto más lejos se encuentra el objeto del eje óptico. Si la imagen que observamos está formada por estrellas, estas aparecerán alargadas en dirección circular (sagital) o radial (tangencial) dependiendo de la superficie focal elegida (imágenes 62 y 63 respectivamente).

Curvatura de campo

En esta aberración el punto imagen no tiene distorsión, se ve como un punto, pero debido a imperfecciones en el diseño de la óptica, no se encuentra en la posición correcta.

El resultado es que el plano focal, que forman los rayos de luz después de incidir en la óptica, no es plano, sino una superficie curva (imagen 64). Esto se traduce en la imposibilidad de enfocar todo el campo: si enfocamos el centro del campo la periferia queda desenfocada (plano focal positivo

- imagen 65) y si enfocamos la periferia el centro queda desenfocado (plano focal negativo - imagen 66).



¹Planos axiales son los relativos a una estructura en particular, y son perpendiculares al eje longitudinal de dicha estructura.

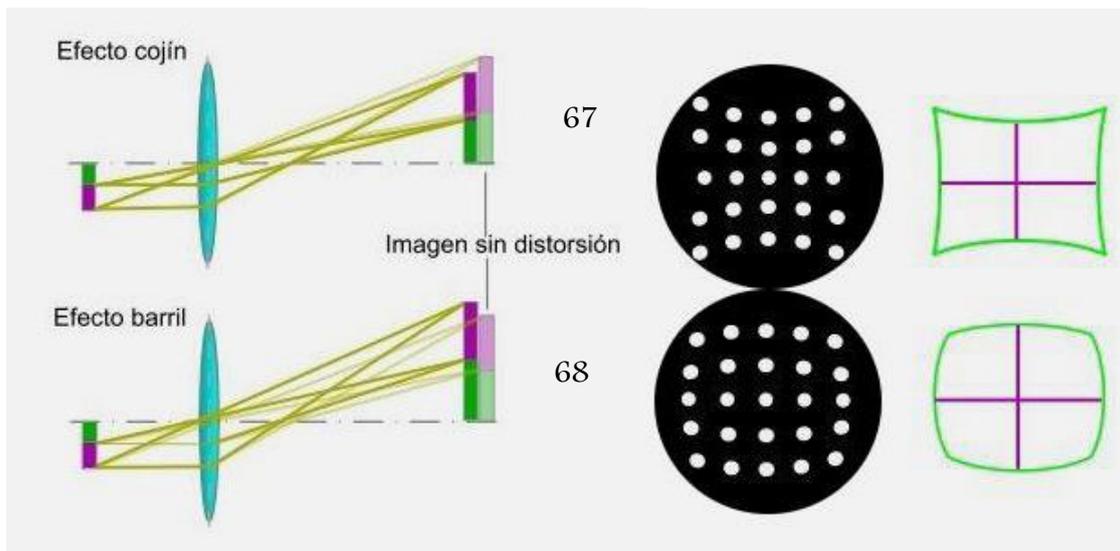
Distorsión

Esta aberración ocurre cuando el punto imagen se encuentra desviado de su posición correcta en una dirección perpendicular al eje óptico.

Entonces la imagen mantiene la definición y la nitidez, pero se deforma aumentando o disminuyendo la escala al acercarnos a los bordes.

Cuando el efecto es de reducción se le conoce como **“distorsión de cojín”** (imagen 67) y cuando es de aumento se le conoce como **“distorsión de barril”** (imagen 68).

60



Algunas consideraciones.

En la aproximación paraxial, donde solo se tienen en cuenta los rayos *paraxiales*¹ los sistemas ópticos se comportan de forma estigmática para cualquier punto en el espacio, es decir, son capaces de formar imágenes perfectas de cualquier punto objeto. Sin embargo, en los sistemas reales, las aperturas toman valores que distan mucho de satisfacer la aproximación paraxial. Así, a medida que las aperturas crecen y los haces de luz aumentan su tamaño, la imagen obtenida comienza a presentar defectos (aberraciones). En los telescopios de relaciones focales altas conseguimos reducir el tamaño del haz de luz, minimizando, de esta forma, los posibles defectos que conllevan las aperturas grandes. Este es el motivo por el que, como hemos visto anteriormente, casi todas las aberraciones quedan apenas apreciables con una relación focal alta.

También, en la aproximación paraxial, los espejos esféricos tienen las mismas propiedades de focalización que los parabólicos y las mismas propiedades de formación de imagen que los espejos elípticos.

¹ Los rayos paraxiales son aquellos próximos al eje óptico.

Oculares

Un ocular es un dispositivo óptico compuesto por varias lentes, que forma la imagen que ve el observador y cuya principal finalidad es proporcionar la ampliación de las imágenes en diferentes instrumentos (telescopios, microscopios, binoculares...). Los podemos diferenciar según sus diseños ópticos y por la distancia focal que posee cada uno, y que hace variar la ampliación al unirlos a un telescopio.

61

Las lentes o grupos de lentes las podemos clasificar en dos grupos:

- **Lente de campo** (lente más cercana al plano focal).
- **Lente del ojo**, o lente ocular (lente más cercana al ojo).

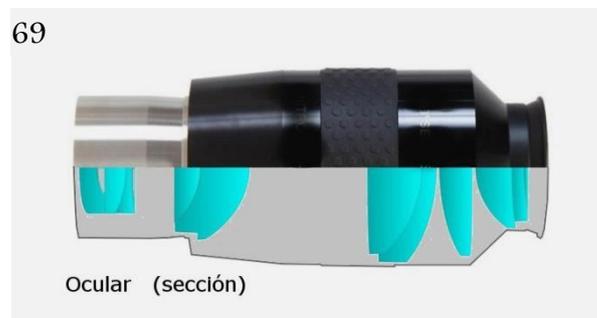
El grupo de lentes o “elementos” van dentro de un “barril” (imagen 69), del que el extremo más delgado (“cañón”), que es de metal, encaja en el porta ocular del telescopio, cerca del plano focal del objetivo. Este porta ocular se desplaza sobre su eje para hacer coincidir el plano imagen del telescopio con el plano objeto del ocular y así obtener a través del ocular la imagen nítida.

Las medidas estándares más usuales del “cañón” que encaja en el porta ocular, son de 1,25 pulgadas (31,8 mm.) y 2 pulgadas (50,8 mm) de diámetro, siendo la principal diferencia entre los dos que los de 2” permiten dotar al ocular de campos aparentes (AFOV) más amplios y una lente del ojo de mayor tamaño (página 52).

El cañón viene fabricado con una rosca interna para poder montar filtros.

Las superficies interiores del barril deben estar ennegrecidas para minimizar la luz dispersa.

A continuación vamos a mostrar las principales características particulares de los oculares para telescopios, las aberraciones más comunes que pueden afectarlos y los diferentes diseños más conocidos entre los aficionados.

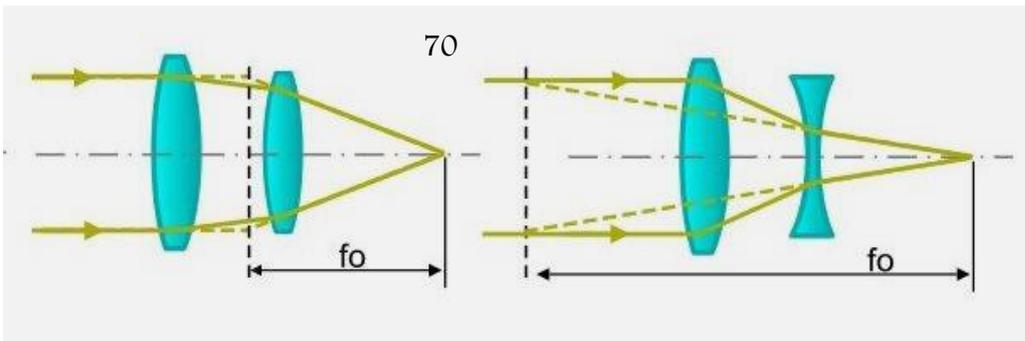


La longitud focal

La longitud focal de un ocular (**fo**) es la distancia entre el centro de la lente del ocular y su foco. Es decir, la distancia que hay desde el punto en el que los rayos colimados que llegan a la lente se desvían hasta que convergen en un punto llamado foco (página 10). Se mide en milímetros y dependiendo de este valor podemos obtener diferentes aumentos de un telescopio aplicando la siguiente formula (más detalles en la página 35):

$M = ft / fo$ M: magnificación, ft: distancia focal del telescopio, fo: distancia focal del ocular

Actualmente los oculares están compuestos de varias lentes por lo que la luz se desvía varias veces. Entonces la distancia focal no se mide a partir del centro de una lente. Sin entrar en más conceptos ópticos y por comodidad podemos marcar un “punto principal de imagen de refracción” en donde se juntan las líneas imaginarias de proyección de los rayos incidentes con las líneas imaginarias de proyección en retroceso de los rayos refractados (imagen 70), y desde este “punto principal” hasta donde los rayos de luz convergen haciendo foco, se le considera la distancia focal.

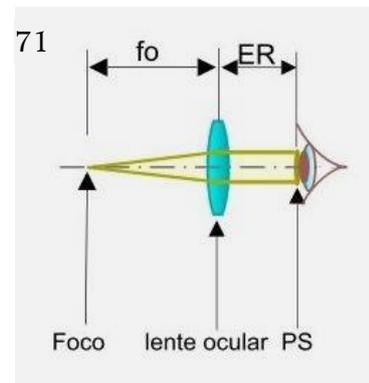


Esta forma vale igual para la lente compuesta de un objetivo.

El relieve ocular (Eye Relief).

El relieve ocular o Eye Relief (**ER**), es la distancia desde el ocular a la cual debemos situar el ojo para ver de forma nítida la imagen (imagen 71). Esta distancia se mide desde la superficie exterior de la lente que se encuentra frente al ojo, y debe alojar cómodamente las distintas partes del ojo, además de un posible antejo (gafas). Un observador con gafas necesitará al menos 18 mm y sin ellas con 8 mm será suficiente. Si el “relieve ocular” es demasiado pequeño podemos rozar la lente al parpadear, e incluso tocarla con la córnea, y un exceso puede dificultar la colocación idónea de nuestro ojo.

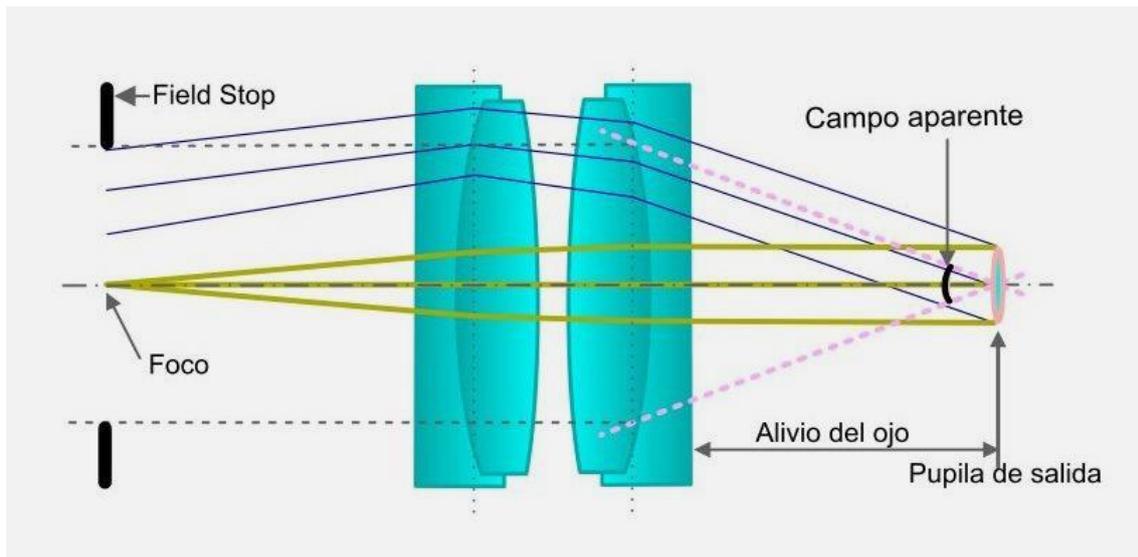
Los fabricantes suelen incluir este dato en las especificaciones de cada ocular, siendo los de distancia focal larga los que ofrecen “alivios” amplios, y los de corta, los que ofrecen “alivios” estrechos. Su valor suele variar entre 2mm y 20 mm dependiendo del diseño.



El campo de visión (FOV - Field of vision)

Describe el área, en tamaño angular, que puede verse cuando se mira a través del ocular. Esta área varía según la ampliación lograda con la combinación ocular-telescopio. Debido a los efectos de esta variable, solemos emplear dos términos distintos de campo de visión: el **campo de visión aparente (AFOV)**, que es el equivalente al campo máximo de visión (MFOV) para telescopios y viene dado por el fabricante, y el **campo de visión real (TFOV)**, que es el área del cielo que nos muestra el ocular cuando está unido al telescopio, y que se obtiene dividiendo el campo aparente entre los aumentos ($TFOV = AFOV/M$), como ya se explicó en la página 52.

En los oculares el límite del área de cielo que vemos, lo determina un diafragma rígido o un anillo biselado situado en el interior del tubo ocular, llamado **diafragma de campo** y que en muchos casos coincide con el Field Stop, es decir la abertura más pequeña en el camino óptico de los haces de luz. Se encuentra donde se forma el plano focal y proporciona, tanto un límite nítido para el campo de visión como una máscara para minimizar ciertas aberraciones ópticas muy acentuadas en el borde de las lentes. Este anillo puede estar situado fuera o dentro del grupo de lentes, dependiendo del diseño del ocular.



Aberraciones de los oculares

En un capítulo anterior ya hablamos de las posibles aberraciones ópticas que afectan a los distintos diseños de telescopios, y ahora nos ocuparemos de las que afectan a los oculares, que en esencia son las mismas pero con alguna particularidad, por lo que aconsejo repasar dicho capítulo anterior (páginas 54 a 60), ya que al estar explicadas en detalle, ahora las veremos solo por encima.

La mayoría de los modernos oculares, compuestos de grupos de lentes complejos, traen bastante corregidas las posibles aberraciones que los puedan afectar. Sin embargo en los oculares más antiguos o de producción mediocre estos defectos son bastante evidentes. Vamos a enumerar las aberraciones más comunes que se pueden producir.

Cromática (longitudinal y lateral)

Los oculares de gama media a alta traen muy bien corregida la aberración cromática longitudinal en todo el campo y la lateral hasta el medio, pero hacia los bordes puede que en algunos sí se aprecie.

Para identificarla debemos probar el ocular en un telescopio reflector, para descartar que sea un problema del telescopio, apuntando a una estrella muy brillante y que se encuentre a la mayor altura posible. Si aparecen halos de color a un lado de la estrella es que el ocular padece de aberración cromática lateral.

Esférica

Esta aberración es característica de los espejos de sección esférica y aunque puede aparecer en los oculares su efecto es despreciable y más en los oculares actuales, diseñados para eliminarla casi por completo.

Coma

Este defecto es característico de los espejos parabólicos y es muy raro que aparezca en un ocular.

Astigmatismo

Es de las más difíciles de identificar, pues el diseño de cada ocular nos puede mostrar unos síntomas distintos, como que las estrellas alejadas del centro del campo aparezcan como cruces, líneas, cuadrados, etc...; incluso puede hacerse pasar por coma. Si aparece en tu equipo de telescopio-ocular, para descartar que sea el ocular pruébalo en otro telescopio y compara las diferencias.

Diseños de oculares

Cada fabricante suele tener sus propios diseños de oculares, que suelen ser variantes de unos modelos principales. Con el tiempo la tecnología ha avanzado de forma notable y ha permitido desarrollar a precios razonables oculares de altas prestaciones con un mínimo de aberraciones; pero ojo, todavía existen en el mercado oculares fabricados de forma mediocre, por lo que es conveniente adquirir estos instrumentos en tiendas especializadas y de confianza.

Casi todos los oculares llevan inscrita su distancia focal en mm. junto a una inicial que informa del tipo del diseño óptico al que pertenece: **H** = Huygens, **R** = Ramsden, **K** = Kellner, **P** = Plöss, **O** = Ortoscópico, **E** = Erfle, **N** = Nagler

A continuación describimos, por orden cronológico, los principales diseños de oculares.

Ocular de Galileo

Galileo Galilei utilizó en 1609 un ocular compuesto por una lente sencilla cóncava (negativa) colocada antes del foco del objetivo de su telescopio refractor. Tiene la ventaja de ofrecer una imagen erecta, pero en contra muy poco aumento. Los defectos de este ocular eran dramáticos.

Ocular de lente convexa

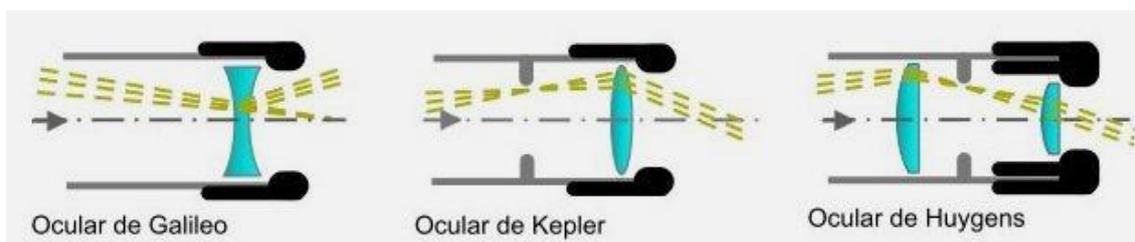
En 1611 Johannes Kepler propuso un ocular de lente sencilla convexa (positiva) colocada tras del foco del objetivo, con el objeto de obtener más campo de visión y un aumento mayor. Esta disposición permitió también poder colocar un micrómetro para tomar medidas de la imagen obtenida. Aunque mejoró algo, aún seguía mostrando mucha aberración.

Ocular Huygens

Christian Huygens creó, hacia 1660, un ocular compuesto de dos lentes plano-convexa (lente del ojo y lente de campo) separadas por aire y con los lados planos orientados hacia el ojo, quedando el plano focal entre las dos lentes.

En los anteriores diseños la gran distancia focal producía un alivio del ojo muy largo y por tanto un campo reducido. Al añadir otra lente convergente cerca del plano focal logró ampliar el campo, acercando la pupila al ocular, y además el espacio de aire entre las dos lentes minimizaba la aberración cromática lateral.

Este diseño ha quedado obsoleto, pues en los actuales telescopios de relaciones focales relativamente bajas sufre de un relieve ocular muy reducido, además de una alta distorsión de la imagen, un campo aparente reducido (unos 40°) y una alta aberración cromática.



Ocular Ramsden

El astrónomo y científico Jesse Ramsden ideó un ocular en 1782 compuesto de dos lentes plano convexas con la misma curvatura y longitudes focales similares, en las que las caras curvas se miran con el fin de dejar el plano focal del objetivo fuera y así poder acoplar un micrómetro. La distancia entre lentes puede variar para buscar un equilibrio entre la aberración cromática en valores bajos y la separación suficiente, de la lente de campo, al plano focal del objetivo en valores altos para incluir el micrómetro.

Este diseño es mejor que el de Huygens, pero no llega al nivel de los de hoy en día.

Ocular Kellner

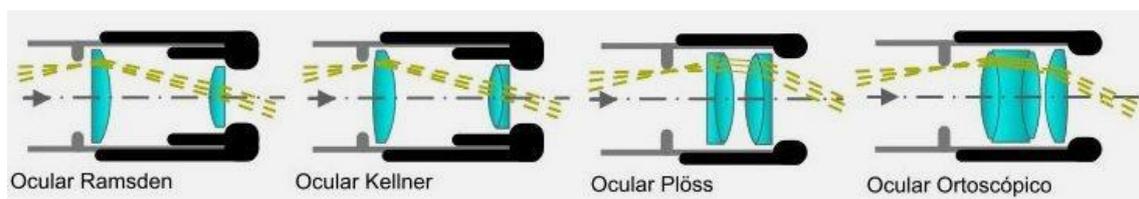
Carl Kellner diseñó en 1849 el primer ocular acromático moderno, sustituyendo la lente del ojo, plano convexa, por un doblete acromático con su componente negativo hacia fuera, para corregir la aberración cromática. Este modelo es barato, consiguiendo buenas imágenes de bajas a medianas potencias. De prestaciones superiores a los anteriores es una buena opción para telescopios con una relación focal superior a F6. El campo aparente es de 40° a 50°.

Ocular Plöss

Generalmente este ocular está compuesto por dos dobletes que pueden ser idénticos. La aberración cromática en este diseño es casi despreciable. Fue creado por Georg Simon Plöss en 1860 y consiguió un campo aparente superior a los 50°. Su principal desventaja es el corto relieve ocular, que no supera el 70 % de su longitud focal. Debido a la necesidad de una muy buena adaptación de las lentes convexas y cóncavas, este ocular tiene un elevado costo de fabricación, por lo que podemos encontrar diferencias notables entre distintas marcas que fabrican este diseño de forma mediocre y otras de fabricación esmerada.

Ocular Ortoscópico

Los oculares de Huygens y de Ramsden logran un campo amplio con una lente del ojo relativamente pequeña, pero a costa de un relieve ocular muy corto. Ernst Abbe en 1880 elaboró un diseño compuesto de cuatro elementos: una lente del ojo plano convexa y un triplete acromático cementado con una lente cóncava-cóncava en el centro y dos lentes convexas-convexas a los lados. Este juego da una imagen muy buena y un buen alivio del ojo. El campo de visión aparente no supera los 45° pero debido a su bajo grado de distorsión se le sigue considerando ideal en la observación planetaria, de estrellas binarias y lunar.



Ocular König

En 1915 el óptico alemán Albert König simplificó el diseño ortoscópico de Abbe eliminando una lente pero consiguiendo un notable mayor aumento con un alivio ocular superior y un campo aparente de 50° . El diseño consta de un doblete cóncavo-convexo y una lente plano-convexa casi tocándose y con todas las superficies convexas muy marcadas.

Las versiones modernas utilizan vidrios mejorados y pueden añadir más lentes en diferentes combinaciones, llegando a conseguir campos de hasta 70° .

67

Ocular Erfle

Este diseño está compuesto por dos dobletes acromáticos y una lente convexa en el centro. Una variante une otra lente cóncava a la convexa del centro. Fue creado por Heinrich Erfle en 1921 como una mejora del diseño Plössl para lograr campos más amplios (unos 60°). Los de focales cortas sufren de astigmatismo fuerte, pero con focales superiores a 20 mm son aceptables e incluso excelentes los de focal de 40 mm. Las lentes del ojo son amplias y su relieve ocular largo, resultando muy cómodo su uso. Actualmente es muy difícil encontrarlos, pero muchos de los actuales oculares de gran campo se basan en el concepto de los Erfle.

Ocular Nagler

Creado por Albert Nagler en 1979 para obtener un campo ultra amplio (82° de campo aparente) con un cómodo relieve ocular de 12 mm. También aprovecha la última tecnología para conseguir unas mínimas aberraciones. Para lograr sus altas prestaciones utiliza vidrios de alta calidad con diseños de hasta ocho elementos en cuatro o cinco grupos. Por ahora hay cinco diseños similares: Nagler, Nagler tipo 2, Nagler tipo 4, Nagler tipo 5 y Nagler tipo 6.

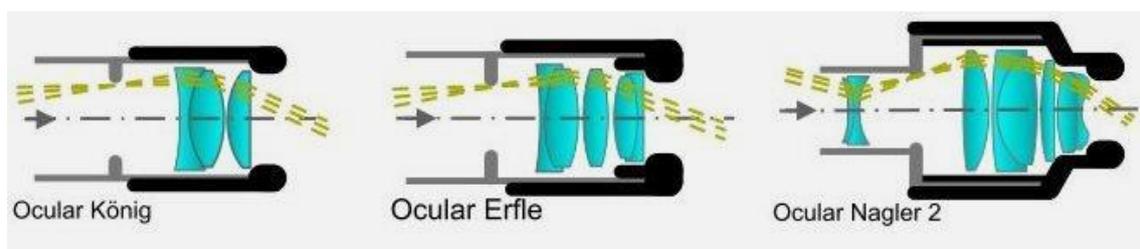
La idea del diseño es sencilla: la lente de campo es un doblete negativo (primera cara cóncava), lo que aumenta la magnificación, y muy separados de esta, varios grupos positivos (primera cara convexa) que se combinan para tener una longitud focal larga.

El peso de todo este conjunto supera los 500g, que fácilmente pueden desequilibrar algunos telescopios. Otra desventaja es su elevado precio.

Otros diseños derivados del Nagler:

El ocular **Ethos** es un diseño mejorado del Nagler con el que han logrado un campo aparente de 100° - 110° , desarrollado por Paul Dellechiaie.

El ocular **Delos** es un diseño Ethos modificado con menos campo aparente (72°) pero con un alivio del ojo de 20 mm.



¿Qué telescopio es el más adecuado para observación?, o ¿qué telescopio me aconsejas?

Aunque por cualquier telescopio puedes llegar a ver cualquier tipo de objeto, la verdad es que no hay un equipo específico que se sirva para ver de forma adecuada todas las clases de objetos, es más, para cada tipo de objeto le viene bien un telescopio de características distintas. Respecto a la segunda pregunta, yo daría un consejo a los que empiezan a introducirse en este “mundillo”, y es que antes de comprar algo, salgan con grupos de aficionados en los que podrán conocer diferentes sistemas ópticos y así valorar por sí mismo cual le puede venir mejor.

Como hemos visto a lo largo del libro son muchos los factores que debemos tener en cuenta a la hora de elegir un telescopio, haciéndose casi imposible realizar un sencillo resumen con conclusiones generales.

Luego, también la experiencia nos muestra como la realidad no se ajusta muchas veces a la teórica.

Aún con todo lo anterior y basándome en mi experiencia personal, me atrevo a destacar, los que para mí, son los tres factores imprescindibles que debemos cumplir para obtener los mejores resultados.

- Un cielo de muy buena calidad.
- Una perfecta adaptación a la oscuridad.
- Una óptica de excelente calidad.

La diferencia de observar cuando se reúnen estos tres factores, independientemente del diseño óptico, a cuando alguno de ellos falla es de, por ejemplo, poder apreciar detalles en nebulosas (como brazos espirales y carriles de polvo en galaxias, a estructuras complejas y colores en nebulosas de emisión y planetarias) a solo ver una mancha grisácea, o de ver detalles nítidos en las superficies de planetas, a no verlos.

En lo referente al diseño de telescopio más apropiado y también de forma muy simplificada, yo elijo diferentes aperturas (siempre de la mejor calidad óptica que me pueda permitir) en relación al tipo de objeto que quiero observar, dividiendo en tres grupos principales los objetos.

- Objetos pequeños o detalles pequeños dentro de los objetos.

Elijo un reflector de gran apertura para obtener el mayor aumento útil posible (pág. 38) que me permita resolver tamaños angulares pequeños. Por ejemplo con reflector de una apertura de 16 pulgadas ya llegaría hasta los 400x.

Cuando el objeto es luminoso no me importa la pupila de salida que resulte, pero si el objeto es tenue trato de buscar el mínimo aumento con el que resolver los detalles para así al mismo tiempo obtener la mayor pupila de salida posible.

- Objetos muy grandes o campos muy amplios.

Cuando el objeto es muy grande (mayor de 1°) o quiero una imagen de un amplio campo que me dé la sensación de inmersión del objeto en el espacio, elijo un refractor APO con una apertura de 4 o 5 pulgadas que con el ocular adecuado puedo llegar a obtener campos aparentes de hasta 3° .

- Todos los demás objetos.

Ahora solo miro la comodidad: un telescopio sencillo y rápido de montar (y desmontar), y que me permita mantener una postura cómoda a la hora de observar. Para mí un dobson con una apertura de 8 o 10 pulgadas es ideal.

No es común tener tres telescopios y tampoco quiero decir que halla que tenerlos. Un buen consejo es salir, siempre que se pueda, en grupo y compartir equipos, además de entrañables veladas en buena compañía.

Salir a observar siempre que podáis y la experiencia será vuestra mejor consejera. Con este libro solo he pretendido mostrar los principios básicos necesarios para no empezar a ciegas.

Pedro Villamiel González.

Alorcón 1 de febrero de 2015