

Del anteojo a la óptica adaptativa

Buena parte de lo que conocemos del universo se debe a lo que se aprecia a través de los telescopios, pero estos no siempre han tenido la misma forma, ni la misma precisión. Desde que por primera vez Galileo utilizara un anteojo en el siglo XVII este no ha dejado de evolucionar.

>> **Antonio Puerta Notario** / *Catedrático de Teoría de la Señal y Comunicaciones*

Cuando en Padua, hace ahora 400 años, Galileo dirigió hacia el cielo por primera vez un primitivo anteojo que él mismo había construido, protagonizó sin duda uno de los acontecimientos más trascendentales para el desarrollo de la ciencia moderna.



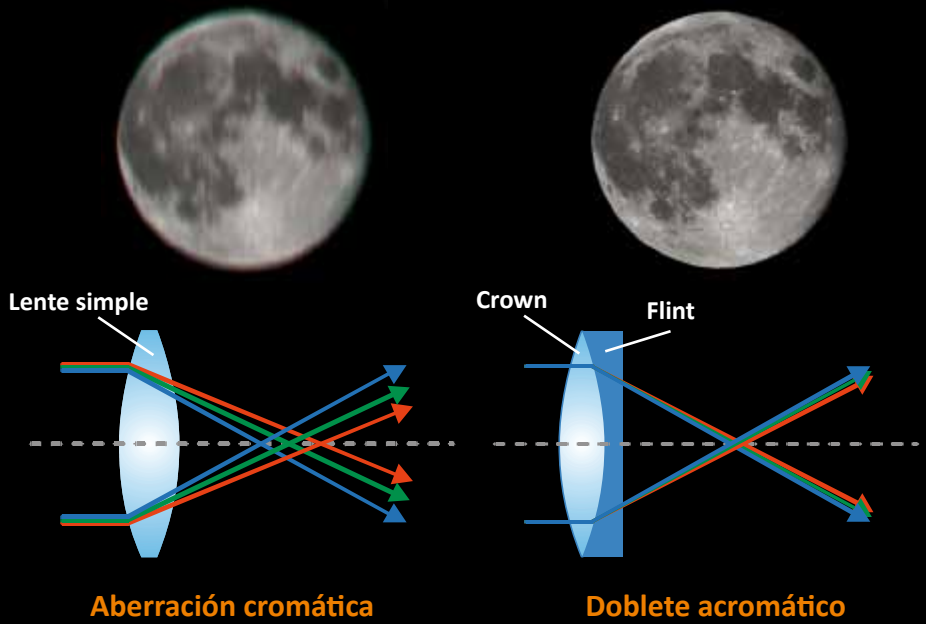
Observando la Luna con uno de esos primeros telescopios, y a pesar de sus escasas prestaciones, Galileo pudo quedar extasiado al comprobar que, tal como se venía sospechando, la Luna no parecía estar formada por ninguna clase de materia divina y, por lo tanto, perfecta, según sostenía la doctrina de inspiración aristotélica oficialmente establecida en aquel tiempo. Más bien, al contrario, pensó que por su aspecto -rico en detalles orográficos similares a los ya conocidos en nuestro mundo-, ese astro debería tener muy probablemente una composición y unas características parecidas a las de la Tierra.

Además de su conocido estudio sobre la Luna, Galileo realizó con instrumentos similares otros importantes descubrimientos como el de los cuatro satélites principales del planeta Júpiter y las fases de Venus, que dieron el respaldo experimental al conocimiento de la estructura del Sistema Solar basado en el modelo heliocéntrico de Copérnico.

Los instrumentos que construyó Galileo eran muy rudimentarios y aún se conservan dos de ellos completos en el Museo de la Historia de la Ciencia en Florencia. En el más grande de estos dos instrumentos, el objetivo, elemento principal de cualquier telescopio, es una lente plano-convexa de 37 mm de diámetro, dotada de un diafragma que deja una apertura útil de tan sólo 15 mm. De esta manera, aunque se conseguía paliar apreciablemente las aberraciones producidas por las lentes, muy toscamente talladas y pulidas

mediante los procedimientos de la época, también quedaba enormemente limitada la potencialidad del instrumento, que reside, precisamente, en esa apertura. No en vano, de ella depende la cantidad de luz que el instrumento capta procedente del





La misión del objetivo del telescopio consiste en formar una imagen reducida del objeto bajo observación, que se supone situado a mucha distancia

objeto observado y que, eventualmente, es canalizada hacia el receptor final, por ejemplo, el ojo humano.

A medida que se hizo posible fabricar lentes más refinadas y de mayor diámetro, y pudieron así construirse telescopios más potentes, se pusieron de manifiesto otras limitaciones. Entre ellas, la más significativa era la aberración cromática, debida a que las lentes simples refractan los rayos de luz dependiendo de su longitud de onda, es decir, de su color dominante.

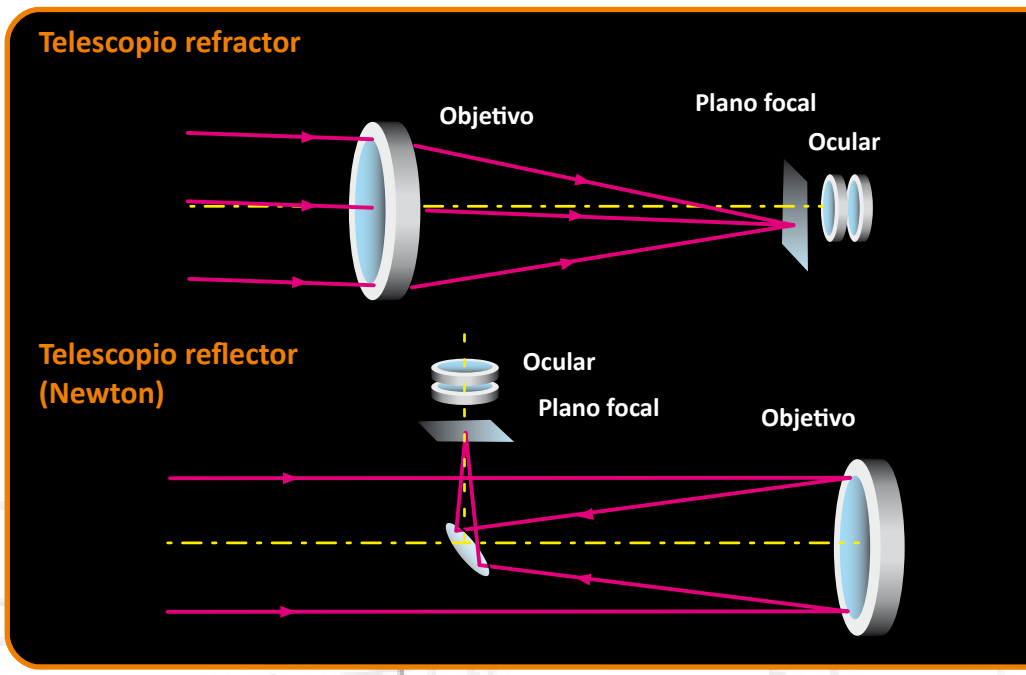
La misión del objetivo del telescopio consiste en formar una imagen reducida del objeto bajo observación, que se supone situado a una enorme distancia (en el infinito), sobre un plano denominado plano focal. Si el objetivo consiste en una lente simple, en realidad, formará una sucesión de imágenes en planos paralelos distintos, correspondientes a cada uno de los colores captados.

Como consecuencia, las imágenes observadas presentan una fuerte irrisación coloreada en los bordes, que se hace especialmente molesta y compromete muy seriamente la resolución del instrumento. Este problema no se resolvió de forma satisfactoria para los telescopios refractores (aquellos cuyo objetivo es una lente o conjunto de ellas) hasta la aparición, a

mediados del siglo XVIII, de los dobletes acromáticos, sistemas compuestos por dos lentes adosadas de vidrios de distinto índice de refracción (Flint y Crown), con lo que se consigue no sólo compensar eficazmente la aberración cromática sino que también, al disponer de un mayor número de grados de libertad, se pueden reducir otras aberraciones, especialmente la esférica, mejorándose sustancialmente la calidad de las imágenes conseguidas.

Sin embargo, en época muy próxima a los descubrimientos de Galileo, se abrió una importantísima línea alternativa para la construcción de telescopios. Consistía en sustituir los objetivos basados en lentes por espejos cóncavos, de figura inicialmente esférica, tallados sobre una aleación de cobre y estaño, que ya a principios del siglo XX fue reemplazada por vidrio metalizado.

La lente convergente que configura el objetivo de un telescopio refractor elemental concentra en su foco los rayos paralelos que proceden de una fuente puntual situada a distancia infinita, por ejemplo, de una estrella. Pues bien, un espejo cóncavo de forma parabólica (muy aproximada a un simple casquete esférico) realiza idéntica función. El problema es que, mientras que la imagen formada por la lente está al lado contrario del objeto, por lo que puede observarse cómodamente a través del correspondiente ocular, la que forma el espejo cóncavo está al mismo lado, lo que dificulta el acceso directo a ella. Este inconveniente se solventa mediante la introducción en el eje óptico de un pequeño espejo plano diagonal (espejo secundario) a 45°, para extraer lateralmente el plano focal. Esta estructura, propuesta y realizada por Newton en 1668 marca el nacimiento de los telescopios reflectores. Sin embargo, otra configuración surgida muy pocos años después, debida a Cassegrain, es la que con ciertas variantes adoptan la práctica totalidad de los telescopios modernos. En ella, el espejo secundario es hiperbólico en vez de plano, y se dispone de forma coaxial al primario, que lleva un orificio central para extraer el plano focal.





El matemático ruso Andréi Nikoláyevich Kolmogórov desarrolló un modelo fisico-matemático para las turbulencias atmosféricas. / Wikimedia Commons

>> Turbulencias y estrellas

Durante casi dos siglos compitieron los telescopios reflectores y refractores en la carrera por conseguir mayores diámetros, pero el progreso de los grandes refractores finalizó con el mayor telescopio de esta clase para uso científico que se ha construido, instalado en el observatorio de Yerkes de la Universidad de Chicago, con un objetivo de 1 metro de diámetro, y que se inauguró en 1897.

El específico peso del vidrio imposibilita mantener de forma estable la figura de grandes lentes con la precisión exigida (fracciones de micra). Sin embargo, en los telescopios reflectores, al poderse utilizar soportes distribuidos en el reverso de los espejos, estos han continuado aumentando en tamaño hasta alcanzar diámetros realmente colosales, de entre 8 y 11 metros, en los instrumentos actuales más modernos. El GTC, en la isla de La Palma, tiene un espejo primario segmentado, equivalente a 10,4 metros de diámetro.

Pero, superadas todas las barreras tecnológicas para conseguir esas enormes aperturas con precisión micrométrica, que han permitido detectar galaxias a distancias de miles de millones de años luz, el principal problema para la observación astronómica desde la Tierra es la presencia de la atmósfera, y muy especialmente las turbulencias que permanentemente, con mayor o menor intensidad, se forman en ella. Su efecto reduce drásticamente la resolución de los objetivos telescópicos, degradando de forma dramática las prestaciones alcanzables. Como consecuencia de este fenómeno, la luz procedente de las estrellas y galaxias, que puede haber estado viajando durante miles o millones de años sin alteración alguna antes de llegar a nosotros, sólo en las últimas 50 millonésimas de segundo, tiempo en el que atraviesa la atmósfera, sufre profundas alteraciones de naturaleza aleatoria, que ocasionan la pérdida de una gran cantidad de información.

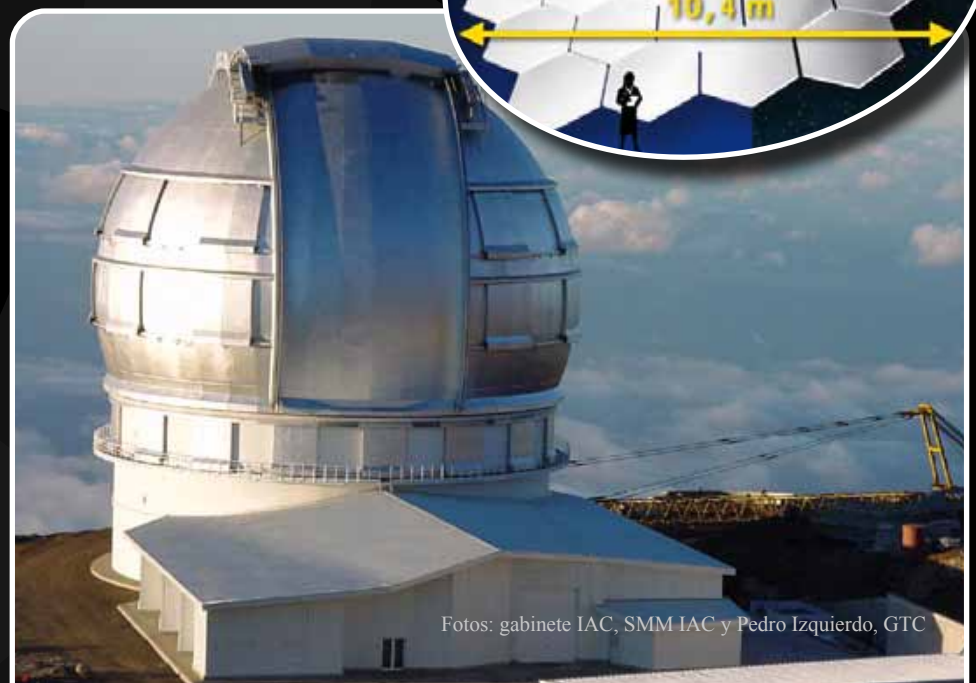
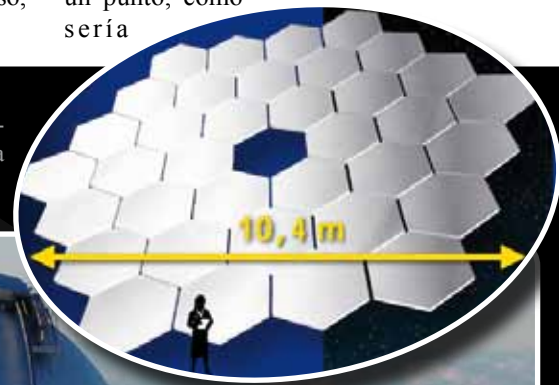
Según el modelo que desarrolló Kolmogórov hacia la mitad del siglo pasado, el régimen turbulento de la atmósfera está compuesto por un proceso continuo de generación de torbellinos, que se descomponen progresivamente en otros torbellinos cada vez de menor tamaño, hasta su desaparición total con disipación de energía. El tamaño de estos torbellinos puede fluctuar entre los centenares de metros y algunos milímetros, y las masas de aire que los forman están a temperaturas ligeramente distintas entre sí. Por lo tanto, como el índice de refracción del aire depende de su temperatura, los índices de refracción de los torbellinos colindantes presentan también, en correspondencia, valores con ligeras diferencias (de algunas partes por millón). De esta forma, y desde el punto de vista óptico, puede considerarse que cada torbellino se comporta como una lente individual, aunque de muy escasa potencia. Se entiende, sin embargo, que teniendo en cuenta la continua transformación de los torbellinos y su movimiento causado por el viento, el efecto global sobre cualquier haz de luz que se propague por esa atmósfera turbulenta pueda llegar a ser muy intenso, y de naturaleza compleja y aleatoria.

La luz procedente de una estrella puede modelarse como una sucesión de planos paralelos entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación, los frentes de onda, que se desplazan a la velocidad de 300.000 kilómetros por segundo (onda electromagnética). En este modelo, la distancia entre planos consecutivos sería igual a la longitud de onda de la luz recibida. El valor central en el espectro visible es de 0.55 micras, que suele utilizarse como referencia.

Según Kolmogórov, las turbulencias de la atmósfera están compuestas por torbellinos que, a modo de lentes, distorsionan la luz a su paso

Ignorando por el momento el posible efecto de la turbulencia, al recibir la luz de una estrella, el objetivo de un telescopio de pocos centímetros de apertura, pero supuestamente perfecto, forma en su plano focal una imagen que no es exactamente un punto, como sería

El espejo primario segmentado del Gran Telescopio de Canarias (GTC), en la isla de La Palma, mide 10,4 metros de diámetro.



Patrón de Airy compuesto por el disco central y los anillos de difracción. Así es la imagen telescópica con muy fuerte aumento de una estrella en condiciones ideales de observación. / Kai-Martin Knaak (Wikimedia Commons)



lo ideal. Realmente, y como consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz, la imagen que se forma de la estrella es un pequeño disco luminoso, denominado disco de Airy, acompañado de algunos anillos concéntricos de luminosidad mucho menor. El diámetro angular de la zona central y más luminosa de ese disco (intensidad superior al 50% del valor máximo) coincide de forma muy aproximada con el cociente entre la longitud de onda de la luz recibida y el diámetro del objetivo ($\theta = \lambda/D$).

Este resultado es fundamental en la óptica astronómica, ya que determina la máxima resolución, o poder separador, alcanzable por un telescopio. Se denomina también límite de difracción. Es decir, no pueden percibirse detalles con un ángulo subtendido inferior al diámetro del disco de Airy. De forma análoga, se trata también de la mínima distancia angular posible entre fuentes puntuales distintas, por ejemplo, estrellas dobles, para que puedan ser distinguidas individualmente como tales. Como se observa, a mayor diámetro mayor poder separador, al menos en teoría. De ahí que la potencialidad

de un telescopio realmente dependa del diámetro de su objetivo.

En la práctica, al aumentar el diámetro de la apertura considerada, el efecto de la turbulencia atmosférica se hace presente enseguida y el resultado teórico anterior deja de ser válido. Los frentes de onda, inicialmente planos, se distorsionan ondulándose de forma compleja por la acción acumulativa de los torbellinos. Esta distorsión provoca que la imagen que se produce en el plano focal del objetivo, además de desplazarse de forma errática, se ensancha considerablemente en promedio (se emborrona), variando además su forma y luminosidad con el tiempo. La consecuencia inmediata de este fenómeno, que se conoce como centelleo, es la drástica reducción de la resolución alcanzable.

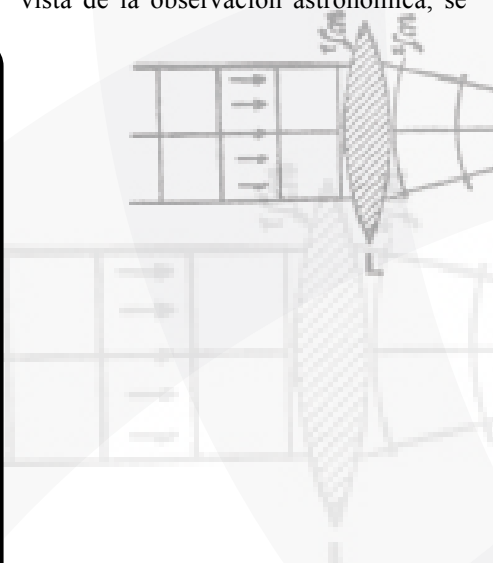
El efecto descrito es tanto más acusado cuanto mayor es el diámetro del objetivo, ya que será también más considerable la distorsión de los frentes de onda en la porción que de ellos capta el objetivo. De hecho, desde el punto de vista de la observación astronómica, se

utiliza el denominado parámetro de Fried para describir las condiciones de visibilidad o *seeing* en una determinada situación. Puede interpretarse este parámetro como el diámetro máximo que puede tener el objetivo de un telescopio para que no se aprecie el efecto de la turbulencia. Por encima de ese valor, el aumento de diámetro va a seguir incrementando, lógicamente, la luminosidad, pero apenas se va a ganar en resolución. Si se tiene en cuenta que incluso en condiciones excepcionales, el parámetro de Fried para el espectro visible raramente supera los 20 cm, se entiende la enorme incidencia que tiene el fenómeno de la turbulencia atmosférica en la observación astronómica desde tierra. Precisamente, por manifestarse este efecto, incluso con aperturas bastante reducidas, su efecto fue descrito ya por Huygens en 1656 y tratado por Newton con bastante atención.

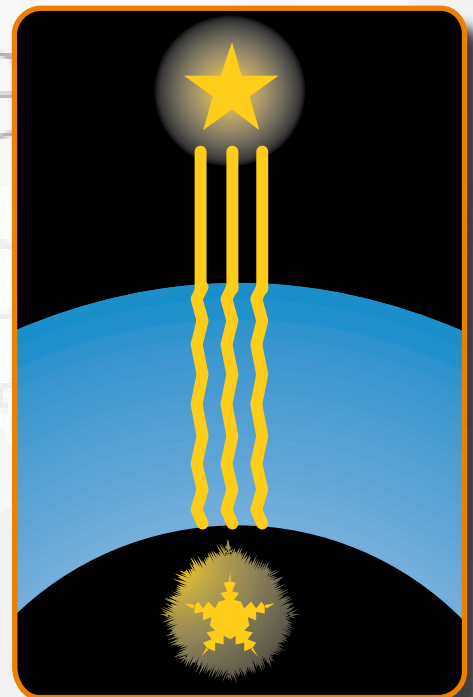
Se estima que el promedio de la resolución alcanzable en buenas condiciones de observación desde la superficie de la tierra está en torno a 1 segundo de arco, lo que equivale a poder distinguir detalles de 5 metros a una distancia de 1000 Km, Aún así, el progreso de la astronomía demanda mucha mayor resolución.

Afortunadamente, y dado el carácter aleatorio del efecto tratado, los límites anteriores suelen superarse considerablemente, pero durante intervalos muy cortos de tiempo (de fracciones de segundo), tal como se aprecia en la observación visual. Este hecho se ha aprovechado bastante recientemente para desarrollar técnicas basadas en el procesamiento de una secuencia de fotografías de corta exposición para, entre otras operaciones,

>>



Las imágenes de los astros que se obtienen desde la superficie terrestre quedan fuertemente deterioradas por efecto de las turbulencias atmosféricas.



detectar esos intervalos privilegiados. Sin embargo, estas técnicas solo son válidas para objetos muy luminosos como los planetas visibles a simple vista.

Obviamente, la superación radical de este problema se consiguió mediante los telescopios orbitales. Fue este el objetivo que impulsó su despliegue. Hubble, el más conocido, que tras la corrección ya en órbita de una inexplicable aberración esférica en el espejo principal de 2.4 m, alcanza una resolución superior a 0.1 segundos de arco y ha permitido, por ello, la obtención de espectaculares resultados.



Wikimedia Commons

Pero, sin duda, la empresa más audaz era plantear la posibilidad de cancelar desde los observatorios terrestres el efecto de la turbulencia atmosférica, y nada menos que corrigiendo en tiempo real y mediante dispositivos ópticos deformables, la distorsión de los frentes de onda. Esta propuesta, que es el fundamento de los actuales sistemas de óptica adaptativa fue presentada a principio de los años 50, casi como una elucubración de carácter futurista, que no se transformó en realidad hasta casi 30 años después. Tal como ha ocurrido en tantas otras ocasiones, una propuesta muy vanguardista tuvo que aguardar hasta que el nivel del desarrollo tecnológico hiciera posible su puesta en práctica.

>> La óptica adaptativa

Los sistemas de óptica adaptativa representan actualmente la solución para compensar eficazmente los efectos de las turbulencias atmosféricas en la observación astronómica desde la superficie terrestre. El elemento principal de un sistema de óptica adaptativa es el dispositivo corrector de frentes de onda. Consiste en un espejo que va cambiando de forma, ondulándose de manera opuesta a la distorsión de los frentes de onda que llegan procedentes del objeto a observar. De esta manera, en la luz reflejada en la superficie de ese espejo queda cancelada la distorsión inicial. Se trata de un proceso de extraordinaria complejidad, ya que las distorsiones a compensar varían con el tiempo y requieren en ocasiones cientos de adaptaciones automáticas por segundo. Además, la superficie de este dispositivo corrector se debe adaptar a formas muy diversas y en el rango de las fracciones de micra, como corresponde a las longitudes de onda de la luz a tratar.

En su versión más clásica, este dispositivo consiste en una lámina reflectora en cuyo reverso se dispone un conjunto de actuadores de pistón que se polarizan eléctricamente (piezoeléctricos) y que, con desplazamientos nanométricos, inducen la forma deseada para la superficie de la lámina. Este elemento corrector constituye en algunas realizaciones el espejo secundario del telescopio, asumiendo la doble función. Este es el sistema adoptado, por ejemplo, en el Gran Telescopio Binocular (en Arizona), que incorpora espejos secundarios de casi 1 metro de diámetro y 672 actuadores. Más recientemente, al disponerse de tecnología MEMS (Micro Electric Mechanical System), que permite la realización de espejos deformables en miniatura, con miles de actuadores integrados y de más fácil control, se tiende a realizar sistemas completos y más complejos de corrección adaptativa independientes de la óptica del telescopio, pero adosados a él.

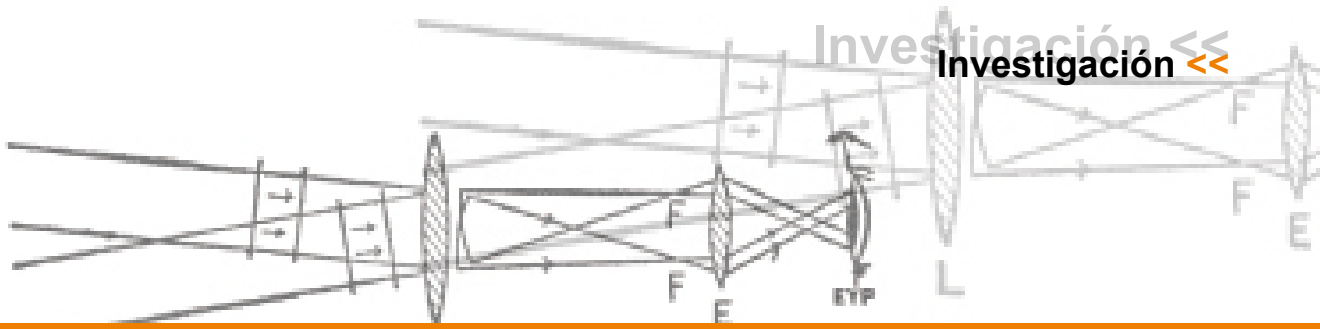
Un sistema de óptica adaptativa necesita medir en algún plano la distorsión de los frentes de onda de la luz, para que

sea posible generar las señales de control que gobiernan los actuadores del corrector. Esta función la realiza el denominado sensor de frentes de onda, segundo elemento fundamental en el sistema. Hay varias alternativas en la realización de este dispositivo. La más utilizada es el sensor de Shack-Hartmann, consistente en un panel formado por cientos de pequeñas lentes convergentes yuxtapuestas, que fragmentan los frentes de onda a evaluar. La desviación de la imagen de un objeto puntual de referencia respecto al eje óptico de cada una de las lentes es un indicador de la inclinación local del frente de onda y, por lo tanto, es también la información de partida para evaluar la distorsión del frente en todo el plano.

Los primeros sistemas de óptica adaptativa se desarrollaron en el marco de las aplicaciones militares de la Guerra Fría entre los años 1970 y 1980

El tercer y último elemento del sistema es el bloque reconstructor, encargado de generar las señales que gobiernan los actuadores del corrector a partir de la información generada por el sensor de los frentes de onda. Pero los sistemas actuales trabajan normalmente en bucle cerrado. Esto implica que la evaluación de los frentes de onda se haga tras la corrección, y no sobre la luz que llega, buscando minimizar la distorsión de los frentes resultantes. El bloque reconstructor calcula mediante algoritmos adecuados la deformación óptima a inducir sobre el dispositivo corrector para conseguir este objetivo, lo que debe hacerse, además, cientos de veces por segundo.

Los primeros sistemas de óptica adaptativa se desarrollaron en el marco de aplicaciones militares, en plena Guerra Fría (años 70-80). Primero para la captación de imágenes de satélites y, más



tarde, en relación con la llamada Guerra de las Galaxias, para concentrar potentes haces de Láser a través de la atmósfera. La desclasificación de todas las materias implicadas a principio de los años 90 y el consiguiente acceso a su conocimiento por parte de la comunidad astronómica ha supuesto una auténtica revolución en este ámbito durante las últimas dos décadas. Este proceso prosigue en la actualidad con el desarrollo incesante de nuevas técnicas. Por ejemplo, para ampliar el reducido campo visual que se consigue, que es una de las limitaciones más significativas de los sistemas actuales.

Hoy día los sistemas de óptica adaptativa son una realidad consolidada, pero también se encuentran en un proceso de evolución permanente. Una gran parte de los telescopios de los observatorios más importantes del mundo están dotados de sistemas de este tipo, y la óptica adaptativa se está aplicando también en otros ámbitos distintos a la observación astronómica, tales como la oftalmología, especialmente en la obtención de imágenes de la retina, o en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas para la transmisión de gran capacidad.

Gracias a esta tecnología, la resolución de los telescopios se ha podido acercar a su límite de difracción (resolución teórica) desde observatorios terrestres. Ello implica multiplicar casi por 100 el poder separador de los grandes telescopios. Debe tenerse en cuenta, además, que la mejora en resolución implica de forma implícita una ganancia en contraste, al concentrarse la luz captada con mayor precisión. De ello se han beneficiado también muy notablemente la espectroscopía y la astrometría. Todo ello ha permitido obtener resultados realmente impresionantes y de gran valor científico. Por ejemplo, la detección directa de exoplanetas, es decir, planetas que orbitan en torno a otras estrellas distintas al Sol, o la investigación sobre objetos extragalácticos lejanos, de luminosidad extremadamente débil.

Finalmente, la incorporación de la óptica adaptativa a los telescopios ha hecho posible el desarrollo de la interferometría de larga base en las bandas ópticas, técnica reservada hasta hace pocos años a frecuencias de radio. Con estos sistemas, en los que dos o más telescopios trabajan en sincronía, haciendo interferir en un foco

La óptica adaptativa se utiliza en telescopios y también en áreas como la oftalmología y los sistemas de comunicaciones de gran capacidad de transmisión

común los haces de luz procedentes de cada uno de ellos, se están consiguiendo resoluciones de tan sólo algunos milisegundos de arco. La consecución de estos valores representa realmente un avance extraordinario, ya que corresponderían a aperturas con un diámetro similar a las distancias entre los telescopios acoplados, del orden de los 100 metros.

Los mecanismos de óptica adaptativa siguen evolucionando intensamente hacia la ampliación de sus prestaciones. Quedan todavía importantes retos tecnológicos por superar, pero no cabe duda de que estos sistemas han supuesto una enorme mejora en las técnicas de observación astronómica, sin precedentes desde la propia aparición del telescopio, y están impulsando, por consiguiente, un espectacular avance en nuestro conocimiento del Universo. ●

Diagrama de un telescopio dotado de un sistema de óptica adaptativa

