

Aberraciones ópticas I: La aberración esférica

Iniciamos una serie de tres artículos sobre aberraciones ópticas y empezamos hablando de una de las más conocidas: la aberración esférica.

Antonio Marzoa Domínguez



Imagen de la galaxia M 100, tomada con el Telescopio Espacial Hubble antes (izquierda) y después de aplicar COSTAR para corregir la aberración esférica (derecha). (NASA)

2

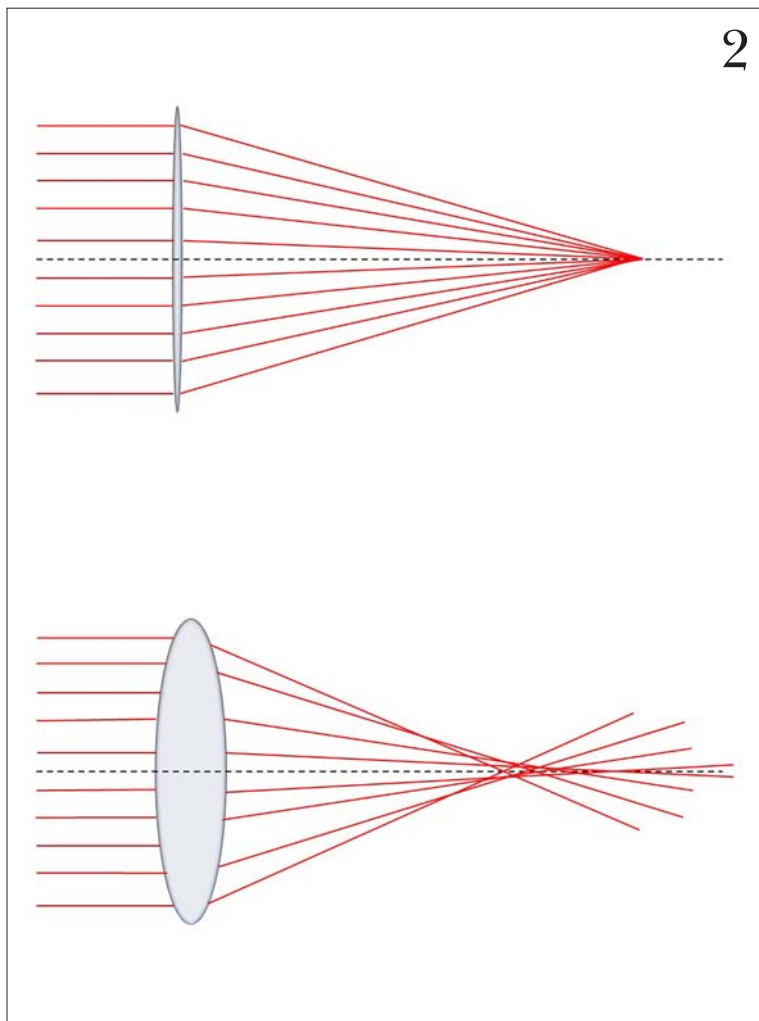


FIGURA 2. Lente perfecta (arriba) y lente real con aberración esférica (abajo). En el caso perfecto los rayos convergen en un solo punto, mientras que en el caso real los rayos que impactan en distintos puntos de la lente se unen (focalizan) en puntos distintos. La curva envolvente de estos rayos se denomina cáustica. (Excepto donde se indique, todas las imágenes son cortesía del autor)

FIGURA 3. Proceso de focalización en el eje óptico [cada imagen corresponde a un punto cercano al foco, el punto central es el foco]. Se puede apreciar la aberración esférica negativa en el proceso.

FIGURA 4. Cáusticas formadas por una copa de vino.

Cuando se toma una imagen con un instrumento óptico, muchas veces se puede apreciar cómo esta presenta un cierto «deterioro» o deformación con respecto a la imagen que veíamos con nuestros propios ojos. Estas «imperfecciones» de la imagen reciben el nombre general de aberraciones ópticas, que normalmente se distinguen en dos principales familias: aberraciones cromáticas (las cuáles están ligadas al material del sistema óptico) y aberraciones monocromáticas o geométricas (las cuáles se vincu-

lan con la forma de dicho sistema). De hecho, este segundo grupo se divide en dos subgrupos más: las aberraciones monocromáticas propiamente dichas (estas son la aberración esférica, coma y astigmatismo, que veremos en esta breve serie de artículos), que son las que deterioran la imagen, haciéndola confusa, y aquellas que deforman la imagen directamente (como ocurre con la curvatura de campo de Petzval y la distorsión).

Es conveniente mencionar aquí qué se entiende realmente por aberración. Si el sistema óptico

es perfecto y presenta una pupila circular, los rayos de luz que atraviesen dicho sistema formarán una superficie esférica perfecta. Si, por diversas razones, dicha superficie difiere de la forma esférica ideal, diremos que el frente de onda está aberrado. Dicha desviación (aberración) respecto al caso ideal se suele medir en micras o nanómetros, e incluso en longitudes de onda (es decir, si estudiamos el sistema con una fuente de luz en concreto, podemos referenciar la aberración a la longitud de onda concreta de dicha fuente). De hecho, en óptica instrumental y especialmente cuando se habla de la calidad de superficies ópticas, como en el caso de los espejos de los telescopios, se utiliza esta última unidad de medida, con lo que es conveniente para el aficionado familiarizarse con esta medida.

La mayoría de los sistemas ópticos que utilizamos están formados por un conjunto de lentes y/o espejos que, en general, por razones de fabricación, presentan geometría esférica. Es precisamente la «forma» de estos

3



4



componentes la que causa un fenómeno ampliamente conocido en el mundo de la imagen: la aberración esférica.

Consideremos una lente simple, convergente (como una lupa convencional) e ideal (esto significa que la lente tiene un grosor despreciable y que los rayos de luz que llegan a esta tienen ángulos pequeños; lo que habitualmente se conoce como aproximación paraxial). Si unos rayos de luz provenientes del infinito (es decir, desde una fuente luminosa muy lejana, tal como una estrella), y, por lo tanto, paralelos entre sí, lle-

gan a la lente, esta los unirá en un cierto punto (foco) a una distancia concreta de esta, lo que conocemos como distancia focal, sobre el eje óptico. De acuerdo con lo anteriormente establecido, el frente de onda generado por esta lente será una esfera perfecta que convergirá hasta un punto en el foco y luego empezará a divergir.

No obstante, si la lente tiene un cierto grosor, como ocurre en el caso de una lente real, los rayos que impacten a distintas «alturas» respecto al eje óptico de la lente, recorrerán distintas distancias en el interior de esta y, con-

secuentemente, interceptarán el eje óptico en distintos puntos, haciendo que el foco ya no sea un único punto sobre el eje, sino que se extienda en un rango concreto. Este mismo fenómeno ocurre también con los espejos esféricos, en que los rayos más alejados del centro del espejo acaban siendo concentrados en puntos alejados del foco. Por esta razón, para sistemas astronómicos reflectores solemos utilizar espejos parabólicos, que mandan todos los rayos a un solo punto (foco).

Cuando los rayos de luz más alejados del eje óptico intersec-



FIGURA 5. Ejemplo de aberración esférica causada por una lupa.

FIGURA 6. Otro ejemplo de aberración esférica producida por una lente de aumento.

tan entre sí antes del foco paraxial, decimos que la lente presenta aberración esférica positiva, mientras que, si ocurre lo contrario, diremos que el sistema tiene aberración esférica negativa. Ese «esparcimiento» del foco es lo que comúnmente se conoce como aberración óptica longitudinal. Desde el punto de vista de la imagen, lo que acaba ocurriendo es que la cantidad de luz (o densidad de energía) se reparte fuera del foco, haciendo que la imagen pierda nitidez. Por ejemplo, el físico británico John William Strutt (comúnmente conocido como Lord Rayleigh y Premio Nobel de Física en el año 1904) estableció que una aberración esférica de tan solo un cuarto de longitud de onda ya supondría una pérdida del 20 % de la luz en el foco del sistema. De hecho, en sistemas que presentan aberración esférica, en los puntos cercanos al foco sobre el eje óptico aparecen halos en los que puede ir a parar hasta el 80 % de la energía luminosa de la imagen, perdiendo esta toda nitidez (se difuminan los detalles y se pierde contraste).

Por otra parte, si colocásemos una pantalla sobre el foco, veríamos como los rayos la alcanzarían a distintas alturas, a este hecho se lo conoce como aberración óptica transversal (o lateral) y es la responsable de las deformaciones en los límites de la imagen.

Para compensar la aberración esférica de un sistema óptico existen distintas soluciones. Un ejemplo sencillo y efectivo es el uso de

un diafragma para limitar los rayos de luz a la parte central de la lente o espejo, región en la cuál la aproximación paraxial funciona correctamente. No obstante, esta solución implica disminuir el número de rayos de luz y, por consiguiente, la cantidad de luz que formaría la imagen.

Otra opción es la de combinar distintas lentes que presenten aberraciones esféricas opuestas, de forma que entre ellas se vayan compensando.

Finalmente, en el caso de los espejos se tiende a utilizar espejos parabólicos, la solución habitual en sistemas astronómicos.

Por otra parte, existen otras soluciones basadas en usar superficies que presenten otras geometrías y que así compensen la aberración esférica. A este tipo de superficies se las conoce comúnmente como asféricas, aunque resuelven el problema para un par conjugado de puntos.

El problema de la aberración esférica se conoce desde los inicios de la óptica instrumental. Ya Diocles (ca 200 a.C.), que trabajaba con espejos ustorios parabólicos, postuló que sería posible fabricar una lente que lograra concentrar los rayos en un solo punto como lo hacían sus espejos. A lo largo de los años, se fueron mejorando las soluciones para lentes asféricas, mientras que, para el caso de los espejos, se trabajó con sistemas parabólicos, siendo esta la solución que hallamos en la mayoría de los telescopios reflectores comerciales. Desde la década de 1950 ya se vino trabajando en programas de trazado de rayos, los cuáles se basan en el control y manejo adecuado de los distintos parámetros físicos del sistema óptico a tratar (tales como

el material, su geometría, grosor, etc.) para compensar las distintas aberraciones (no solo la esférica). Esto ha llevado a que actualmente existan una multitud de sistemas estándar con el control de aberraciones bien definido, a pesar de que el problema del diseño óptico sigue siendo uno de los más complejos en ingeniería.

Finalmente, en el año 2018, los investigadores mexicanos Rafael Guillermo González Acuña y Héctor Alejandro Chaparro Romo, encontraron una solución para la aberración esférica en una lente. A esta solución se la conoce como ecuación de Acuña-Romo, que describe cómo debe ser la segunda superficie de una lente simple para compensar la aberración introducida por la primera superficie de esta.

Así pues, existen múltiples estrategias para la compensación de la aberración esférica, siendo el pulido de la superficie de forma asférica (para lentes) o parabólica (para espejos) la solución más habitual.

Un ejemplo paradigmático de esta aberración y sus efectos lo encontramos, sin ir más lejos, precisamente en el campo de la astronomía. En el mes de abril del año 1990, poco después de que el Telescopio Espacial Hubble fuese puesto en órbita, se observó que las imágenes que tomaba eran de una calidad pésima. Resultó que en todas las imágenes siempre aparecía un halo de unos 1,5 segundos de arco donde iba a parar aproximadamente el 70 % de la luz que captaba el Hubble (y solo un 12 % llegaba al detector en los aproximadamente 0,1 segundos de arco esperados teóricamente; el resto de la energía radiante se distribuía más

allá del halo). El resultado era un desastre total. Los esfuerzos de los ingenieros de la NASA para reorientar el espejo secundario y conseguir «enfocar» las estrellas resultaron infructuosos. Incluso los trabajos de procesado de imagen de los ingenieros, que utilizaban los modelos simulados con anterioridad al lanzamiento para evaluar las posibilidades que brindaría el Hubble, eran incapaces de compensar la mala calidad de las imágenes del telescopio. Alguna cosa no predicha ni controlada en el diseño del instrumento ni en el análisis del procesado de imagen sucedía con el Hubble.

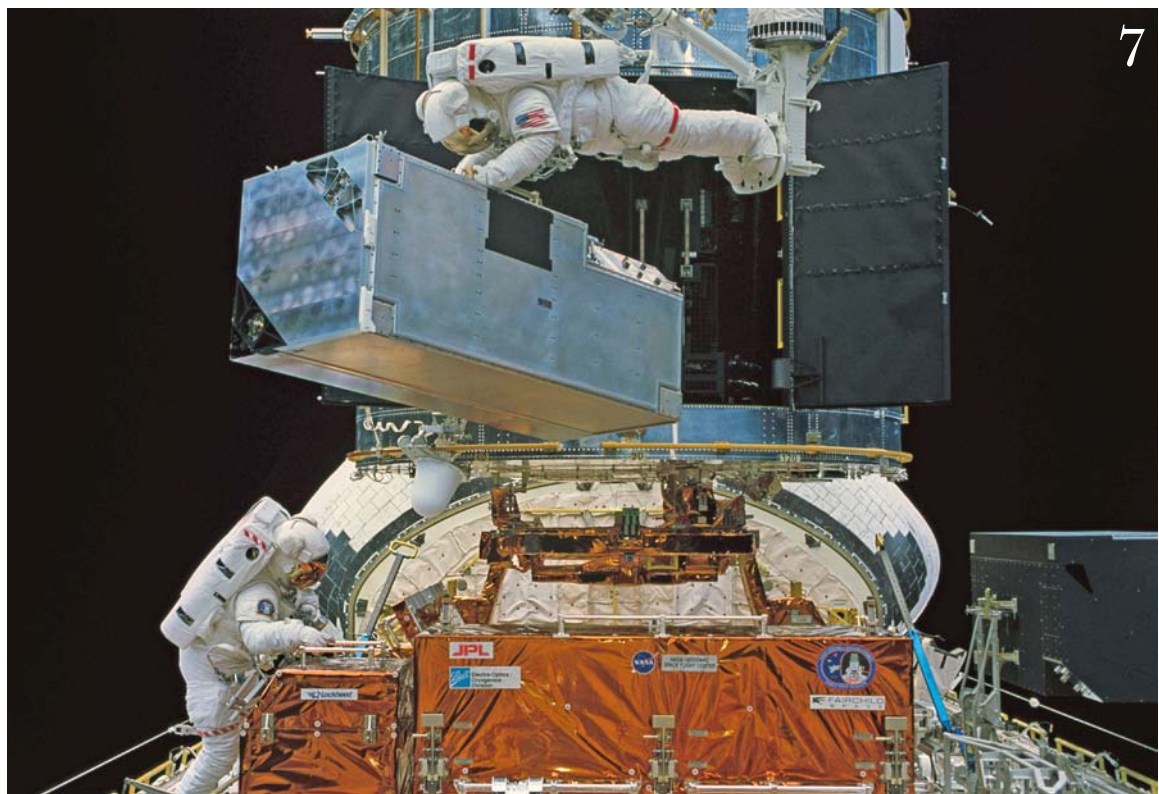
FIGURA 7. Instalación del instrumento COSTAR en el Telescopio Espacial Hubble para corregir la aberración esférica de su espejo primario. (NASA/ESA)

Posteriormente, los científicos de la NASA se dieron cuenta de que lo que sucedía era que el espejo primario del Hubble había sido pulido de forma incorrecta, generando así las imágenes emborronadas que se captaban en Tierra. Concretamente, resultó que la zona periférica del espejo primario era media longitud de onda más plana que lo que se esperaba en el diseño. Así, el telescopio de 1600 millones de dólares resultó ser miope, lo que supuso un desastre tanto desde la óptica económica como científica y técnica.

Por este motivo, y siendo imposible sustituir o modificar el espejo primario, en el año 1993 el transbordador espacial *Endeavour* llevó a un equipo de astronautas de la misión COSTAR

(módulo de Recambio Axial del Telescopio Espacial de Óptica Correctiva, por sus siglas en inglés) a instalar una cámara con óptica correctiva en el Hubble. La misión fue un éxito, y el resto de la historia ya la conocemos a través de las magníficas imágenes que, a sus treinta años, nos sigue brindando el Hubble.

Viendo el ejemplo del Hubble no cabe ninguna duda de la importancia que tiene el control de calidad óptica y compensación de las aberraciones. Este ejemplo paradigmático pone de manifiesto como la mala calidad del instrumento pone limitaciones al conocimiento científico. Los mismos inconvenientes han estado presentes a lo largo de toda la historia de la Ciencia. Uno no puede evitar pensar en, por



ejemplo, cómo Galileo observó las «orejas» o «asas» de Saturno, pero que, a causa de las limitaciones de su telescopio, no acababa de distinguir que se tratase de anillos. Lo mismo sucedió en el campo de la microscopía, donde los trabajos de Ernst Abbe acabaron trayendo una revolución científica y técnica sin precedentes. Hoy en día la ciencia sigue limitada por sus herramientas, que cada vez son y deben ser más precisas y eficientes. Y no solo en el ámbito científico, sino en la vida cotidiana. Vivimos inmersos en un mundo totalmente visual, cada vez queremos tomar mejores imágenes con nuestros equipos (cámaras fotográficas, smartphones, etc.) y ver mejor (los problemas y limitaciones de la visión humana son los mismos que

sufre cualquier otro sistema óptico). Ser capaz de conocer, distinguir, evaluar y corregir las aberraciones de un sistema concreto será, pues, de vital importancia. Especialmente para el aficionado que desee tomar buenas imágenes con su telescopio o disfrutar de una observación de calidad.

En los siguientes artículos analizaremos las aberraciones geométricas del coma y el astigmatismo, así como la aberración cromática. Estas tres alteraciones de la calidad óptica son de las más comunes en astronomía. (A)

BIBLIOGRAFÍA:

- E. Hecht, *Óptica*, Editorial Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000. ISBN 978-84-7829-025-3.
- R. G. González-Acuña, H. A.

Chaparro-Romo, «General formula for bi-aspheric singlet lens design free of spherical aberration», *Applied Optics* vol. 57, n.º. 31, 9341 (2018).

— www.cbsnews.com/news/an-ingenius-fix-for-hubbles-famous-by-flawed-vision

— J. H. Crocker, «Engineering the COSTAR», *Optics and Photonics News*, vol. 4, n.º 11 (1993).

Antonio Marzoa

Domínguez, Ingeniero en SENER Aeroespacial, profesor asociado del Departamento de Física de la Universitat Politècnica de Catalunya y miembro de COSMOS Mataró.



LIBROS, ÓPTICA
Y EQUIPAMIENTO

ÚLTIMAS
NOVEDADES



LAS ENTIDADES OSCURAS
Cristiano Galbiati
16,00€



PRISMÁTICO DIAMOND BACK
15x56 HD
VORTEX
425,00 €
OFERTA: 389,00 €



EMERALD GALAXY GREEN LASER
Z-Bolt
75,00 €