



FIGURA 1. El «Gran Refractor» del Observatorio Astronómico de Potsdam. (Cortesía H. Raab, CC BY-SA 4.0)

EL SENSOR DE FRENTE DE ONDA SHACK-HARTMANN

UNA INTERESANTE HERRAMIENTA CIENTÍFICA QUE ESTÁ
SALTANDO AL TERRENO DEL AFICIONADO EN ASTRONOMÍA.

TONY MARZOA

En artículos anteriores (*Astronomía* 255 a 258), hemos hablado de las aberraciones ópticas, así como de su impacto en nuestras observaciones astronómicas y actividad fotográfica, con lo que a los objetos del cosmos se refiere.

En este artículo introduciremos un tipo de dispositivos ampliamente utilizados por la comunidad científica, y que están empezando a irrumpir en el terreno del aficionado para la caracterización de estas aberraciones en nuestros telescopios, y nos centraremos en el más destacado de ellos: el sensor de frentes de onda Shack-Hartmann, o Hartmann-Shack.

UN PROBLEMA ASTRONÓMICO

Para conocer los orígenes del sensor de frente de onda Shack-Hartmann debemos viajar hasta Potsdam, Alemania, y trasladarnos a principios del siglo XX. En esta ciudad alemana, capital del estado federado de Brandeburgo, se encuentra ubicado un observatorio astronómico histórico con un telescopio refractor de grandes dimensiones, precisamente conocido como el «Gran Refractor» (*Große Refraktor*): un refractor doble con un objetivo de 80 cm de diámetro utilizado para astrofotografía, y otra lente de 50 cm de diámetro utilizada para observación visual. El telescopio, de montura ecuatorial, fue construido en 1899 por Repsold, y los objetivos se fabricaron en Jena por Schott; todo un ejemplo de la gloria industrial y técnica alemana de finales del XIX.

Sin embargo, el flamante Gran Refractor, que se construyó a propósito para mantener el liderazgo de la ciudad en el campo de la espectroscopia alemana del momento, resultó no ser capaz de ob-

tener imágenes astronómicas de calidad, y el personal del observatorio no lograba encontrar la raíz del problema. Preocupado por este hecho, el astrofísico (entonces catedrático) Johannes Hartmann (1865-1936), se puso a pensar en cómo desentrañar el problema del Große Refraktor. Se le ocurrió probar el estado de la óptica del telescopio, y para ello ideó una pantalla opaca en la que practicó una serie de agujeros (véase Figura 2 b). Esta pantalla, llamada máscara, se situó en la pupila de entrada (esto es, sobre uno de los objetivos) del telescopio y, seguidamente, se colocaron unas placas fotográficas en el foco del instrumento. La máscara de Hartmann deja pasar solo la luz a través de los orificios, de modo que únicamente algunos rayos atraviesan el telescopio y llegan a la placa de detección (fotográfica, en ese momento), situada en el plano focal, formando lo que se conoce como diagrama de puntos, o impactos. En condiciones ideales, esto es, sin ninguna alteración en las lentes y disponiendo de una óptica de alta calidad, Hartmann pensó que el diagrama de puntos estaría concentrado en la zona central de la placa, definiendo de forma precisa la posición del foco. Sin embargo, si la óptica no fuese de la calidad adecuada y presentase algunos defectos, el diagrama de puntos se dispersaría de dicha zona, mostrando un patrón que recordaría a la mancha de baja calidad que se obtenía en las observaciones con el Gran Refractor. Mediante esta simple técnica y económico dispositivo experimental, Hartmann realizó varias pruebas hasta dar con la raíz del problema: la lente principal del objetivo fotográfico (80 cm

de diámetro) no era de suficiente calidad. Una vez localizado el problema, el telescopio pudo ser reconfigurado para desarrollar su labor de investigación en todo su esplendor.

El llamado «test de Hartmann» se popularizó por su sencillez y efectividad, y fue utilizado a lo largo de los años en muchos observatorios astronómicos y laboratorios de óptica. De hecho, este dispositivo fue utilizado también para los test ópticos durante la construcción del telescopio Hale de 5,1 m de abertura, del Observatorio de Palomar, California (Figura 2 c).

Además, hoy en día se pueden encontrar en Internet muchos ejemplos de máscaras de Hartmann hechas por aficionados para conseguir determinar el foco de sus instrumentos.

Años más tarde, a finales de la década de 1960, en plena Guerra Fría, los militares de las Fuerzas Aéreas Estadounidenses pidieron asesoramiento técnico al astrónomo del Jet Propulsion Laboratory de la NASA y del University of Arizona College of Optical Sciences (OSC), Aden B. Meinel (1922-2011) con un problema que les preocupaba mucho: la baja calidad de imagen de los telescopios terrestres para detectar satélites artificiales en órbita. Los militares pretendían poder detectar y hacer seguimiento de estos instrumentos, pero la turbulencia atmosférica (véase *Astronomía* 265-266) les impedía obtener imágenes de calidad para sus fines. Meinel sugirió utilizar un test de Hartmann para determinar las aberraciones atmosféricas durante las observaciones y, posteriormente, tratar de realizar alguna especie de procesado a partir de estas sobre la imagen para mejorar su calidad. Para

ello, propuso utilizar un separador de haz (*beamsplitter*) que permitiera, en paralelo, utilizar la máscara de Hartmann para la medida de la turbulencia, y la captura de la imagen del satélite. Meinel le pidió a su colega Roland Shack (1927-2019) que se encargase de verificar si esta técnica era viable o no.

Shack identificó rápidamente la principal limitación de la máscara de Hartmann para esta finalidad: el test de Hartmann proporcionaba muy pocos fotones (baja cantidad de luz) en el plano focal de las cámaras, lo que se combinaba con imágenes ya de por sí muy oscuras (capturar la escasa luz reflejada por los satélites), y con el hecho de tomar imágenes de objetos extensos (los satélites), lo que proporcionaba una mancha mayor sobre la placa (véase *Astronomía* 261 y *Astronomía* 275). Combinando esta idea con la de Meinel de colocar un beamsplitter en el camino óptico, por primera vez en la historia, se podría lograr tener una imagen y la medida de la aberración atmosférica al mismo tiempo. Este concepto es lo que ha llevado, entre otros muchos desarrollos tecnológicos, al desarrollo de la óptica adaptativa (véase *Astronomía* 265-266).

Pensando sobre esta limitación, a Shack se le ocurrió colocar lentes en cada uno de los orificios de la máscara de Hartmann, para que, de este modo, los rayos que entrasen por cada lente se concentrasen y, así, se tuviese mayor cantidad de fotones sobre la pantalla, lo que mejoraría la señal y medida de la aberración introducida por la atmosfera.

Seguidamente, Shack pensó que incluso podría suprimirse la propia pantalla de Hartmann: si se colocaba un número adecuado de

lentes, suficientemente juntas, podría llegar a aprovecharse toda la luz, o gran parte de ella, para el análisis. La idea, pues, fue la de reemplazar la máscara de Hartmann por un nuevo elemento: una matriz de microlentes (Figura 3 b).

En esa época ya existían fabricantes (principalmente en la industria de los semiconductores) que subministraban matrices de microlentes. No obstante, los dispositivos comerciales proporcionaban lentes con focales en el entorno de los 6 mm, con diámetros similares, y Shack había determinado que se necesitarían lentes unas seis veces inferiores (diámetro alrededor de 1 mm), con focales de entre 100 y 150 mm.

Con la solución en mente, y mediante la ayuda del, entonces estudiante del OSC, Ben C. Platt, Shack llevó a cabo una investigación laboriosa en la fabricación y desarrollo de matrices de microlentes, con muchas pruebas infructuosas. Finalmente, después de mucho trabajo, los investigadores del OSC obtuvieron varias «recetas» exitosas para la fabricación de matrices de microlentes que cumplieren con las especificaciones necesarias para la aplicación de las Fuerzas Aéreas estadounidenses. Había nacido el sensor de frente de onda Shack-Hartmann, o Hartmann-Shack, y la comunidad científica empezó a explorar y explotar las posibilidades de este dispositivo.

¿QUÉ ES UN FRENTE DE ONDA?

Supongamos que tenemos una onda electromagnética (luz) propagándose por un medio (por ejemplo, el aire). Podemos visualizar esta onda como un conjunto de rayos luminosos. Con esta imagen en nuestra mente, llama-

remos frente de onda al lugar del espacio en el que los rayos se encuentran en un mismo estado de vibración, esto es lo que en física denominamos estar en fase. El frente de onda es la superficie formada por la unión de estos puntos.

Para el caso de una onda propagándose desde el infinito (lo que corresponde a tener una distribución de rayos de luz paralelos o, como se suele decir en nuestro ámbito, colimados) lo que se obtiene en este caso es un frente de onda plano (como se ve en la Figura 4 a). Para el caso de puntos emisores de luz que se encuentran a distancias no demasiado grandes respecto al observador, los frentes de onda tendrán forma esférica (como se ve en el ejemplo de la Figura 4 b). En el caso de tener un sistema óptico (como, por ejemplo, una lente), el frente de onda será una esfera que tiende a converger en un punto (el foco).

Los frentes de onda, en general, pueden ser más complejos que los que hemos comentado en el párrafo anterior. Además, en general, los frentes de onda planos «ideales» no se encuentran en condiciones naturales. Como bien sabemos de artículos anteriores, tanto las imperfecciones geométricas (*Astronomía* 255, 256, 257, 261 y 275), como los materiales de las ópticas (*Astronomía* 258), así como la propia atmosfera (*Astronomía* 265-266) afectan a la calidad óptica. Esto está directamente relacionado con la calidad del frente de onda. Las aberraciones tales como esférica, coma o astigmatismo, introducen pequeñas perturbaciones sobre un frente de onda plano, haciendo que este tome una forma un tanto más compleja, con pequeñas ondulaciones, picos

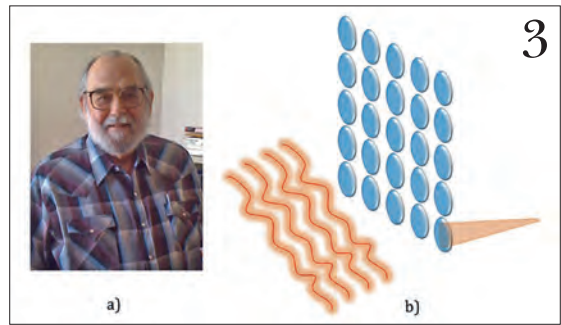
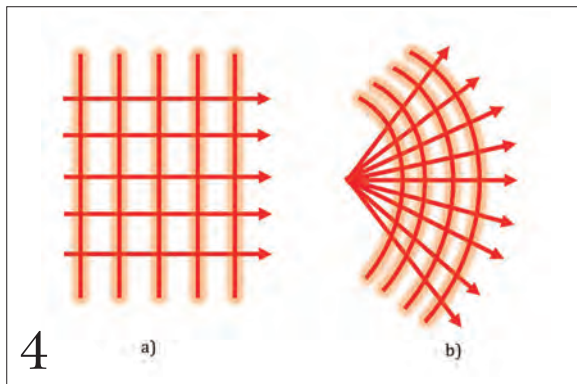
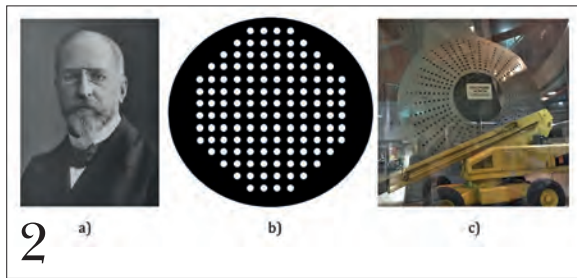


FIGURA 2. a) Johannes Hartmann (1865-1936). b) Ejemplo esquemático de una máscara de Hartmann. c) Detalle de la máscara de Hartmann del telescopio Hale, de 5,1 m de diámetro, del Observatorio de Palomar, en California. [Excepto donde se indique, todas las imágenes son cortesía del autor]

FIGURA 3. a) Roland Shack (1927-2019). b) Ejemplo esquemático de una matriz de microlentes sobre la que incide un haz aberrado. Se ilustra el proceso de focalización para una de las lentes.

FIGURA 4. Ejemplos de frente de onda: a) frente de onda plano, y b) frente de onda esférico divergente.

y valles, en lugar de ser un lienzo totalmente plano y uniforme. Estas desviaciones respecto al frente de onda ideal se pueden medir mediante los sensores de frente de onda, como el Shack-Hartmann, permitiendo así la identificación y cuantificación de las aberraciones presentes en el frente de onda generadas por el instrumento óptico o medio de propagación objeto de estudio.

PRINCIPIO Y FUNCIONAMIENTO DEL SH

Conociendo ahora la historia y bases del sensor de frente de onda Shack-Hartmann, así como el concepto de frente de onda, podemos hablar un poco más sobre el principio de funcionamiento de estos dispositivos.

Un sensor de frente de onda Shack-Hartmann moderno consta esencialmente de una matriz de microlentes y un detector (gene-

ralmente una cámara CCD), además de venir equipados, por lo que concierne a los equipos comerciales, con un software adecuado para el análisis del diagrama de impactos y su posterior procesado.

Tomemos el caso de un frente de onda plano, sin ningún tipo de alteración ni aberraciones presentes en este. Al alcanzar este la matriz de microlentes del Shack-Hartmann, estas separan, *samplean*, el frente de onda en «trozos», de modo que, idealmente, cada fragmento del plano se proyectará sobre el plano focal de la matriz de microlentes en un único punto (véase Figura 5 a). En resumen: para un frente de onda plano, el diagrama de impactos sobre el detector corresponderá a una matriz de puntos ordenada, estando cada punto situado en el eje óptico y centro de cada lente.

Para el caso de un frente de onda con aberraciones, los impactos se desviarán de esta posición ideal, con lo que el diagrama ya no se corresponderá con la distribución de la matriz de microlentes (cómo se puede ver en la Figura 5 b). Mediante un procesado adecuado se pueden medir estos desplazamientos de la mancha de creada por cada microlente respecto de la posición ideal, y reconstruir el frente de onda aberrado.

Para esta reconstrucción es necesario utilizar una base matemática adecuada. Generalmente, se trabaja con los llamados polinomios de Zernike, un conjunto de funciones matemáticas desarrolladas por el Premio Nobel de Física Frits Zernike (1888-1966), que permiten reconstruir el frente de onda medido y asociar una magnitud, o «peso», a cada tipo de aberración. Es decir, permiten identificar el grado de cada

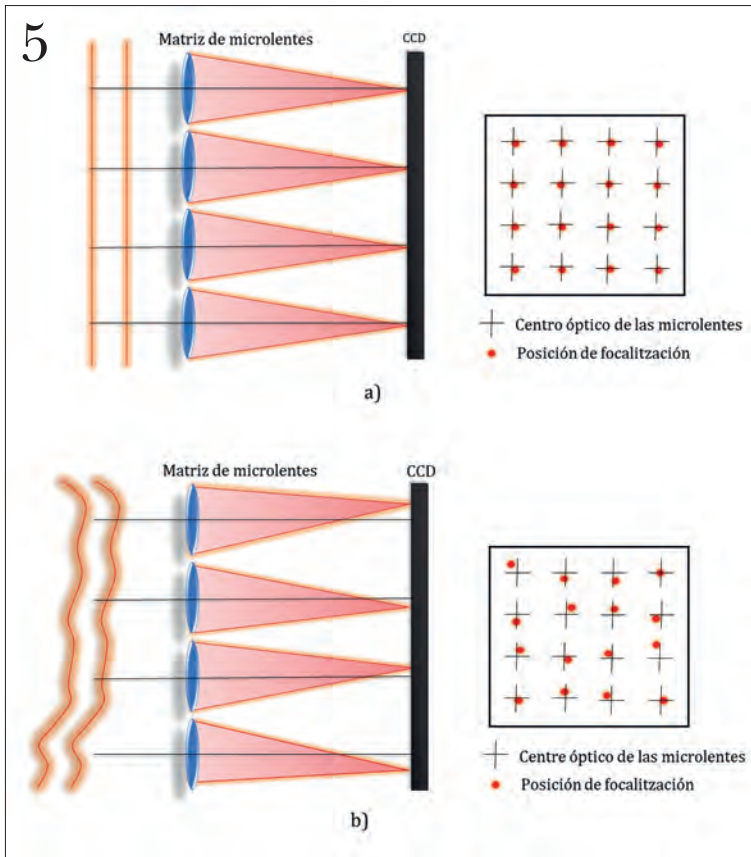


FIGURA 5. Esquema de medida del frente de onda mediante un sensor Shack-Hartmann para el caso de a) una onda plana, y b) una onda aberrada.

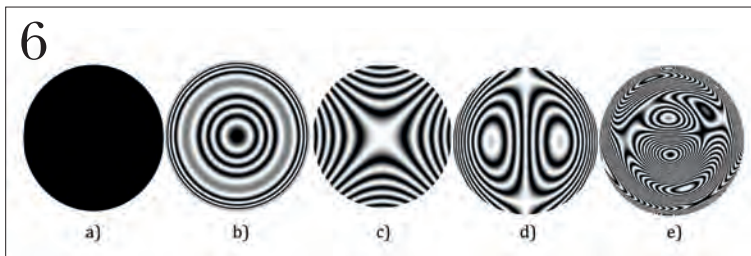


FIGURA 6. Representación del frente de onda mediante polinomios de Zernike para: a) un frente de onda plano (ideal), b) un frente de onda afectado únicamente por aberración esférica, c) un frente de onda con astigmatismo, d) una onda con afectación por coma, y e) un frente de onda complejo con distintos términos de aberración (de polinomios de Zernike).



FIGURA 7. Montaje para la medida del frente de onda generado por un catalejo de ca 1800: (1) doblete acromático que genera un haz colimado para iluminar al (2) catalejo -cuya lente inversora se encuentra separada en este caso (3)-, para luego capturar el frente de onda con un detector Shack-Hartmann comercial (4).

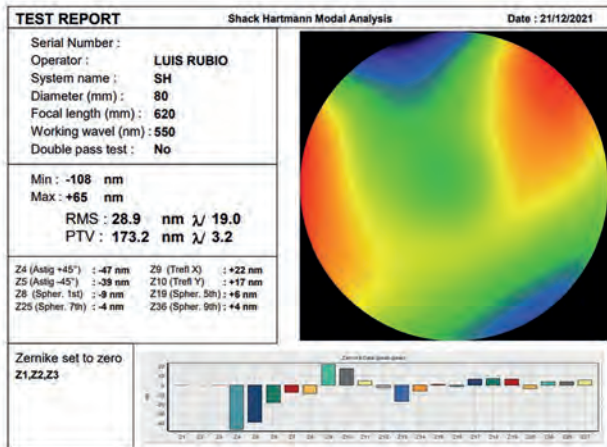
tipo de aberración presente en el frente de onda medido; por ejemplo, medir el grado de coma o de astigmatismo, o la inclinación del frente (*tip-tilt*), entre muchas otras (Figura 6).

APLICACIONES

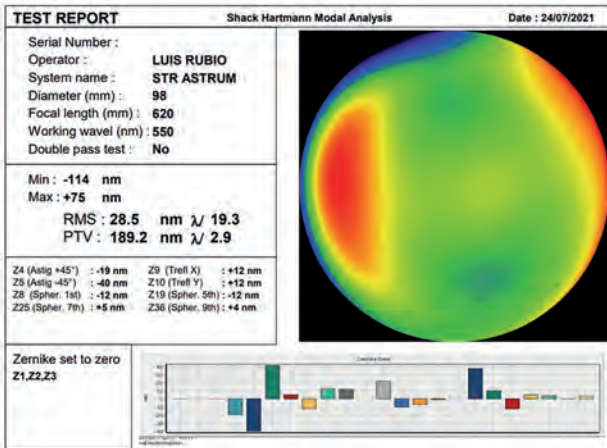
El sensor de frente de onda Shack-Hartmann se utiliza ampliamente hoy en día para el estudio de las aberraciones oculares, la caracterización de la turbulencia at-

mosférica o las aberraciones introducidas por los componentes ópticos de instrumentos como telescopios y microscopios, entre otras. Para poder medir el frente de onda es necesario montar sobre un banco óptico el instrumento a analizar, así como tener un sistema de iluminación adecuado (esto es, una fuente de luz y un sistema óptico que la dirija hacia el instrumento bajo análisis) y un sistema óptico auxiliar, si es necesario para mandar de forma adecuada el frente de onda generado por el aparato hacia la pupila de entrada del Shack-Hartmann (cómo se muestra en la fotografía de la Figura 7).

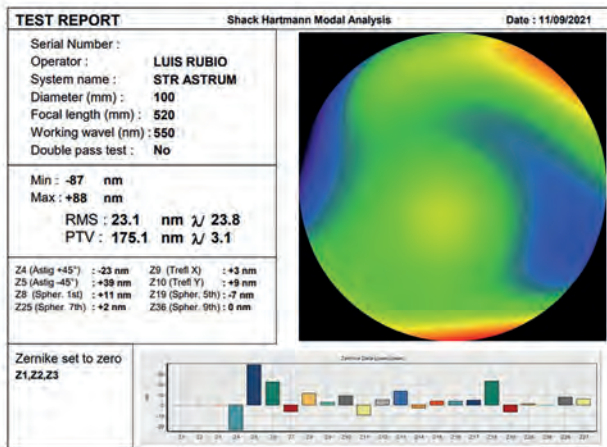
Actualmente este tipo de equipos están alcanzando niveles de comercialización muy elevados, no solo en laboratorios de investigación especializados, sino también en observatorios, talleres optomecánicos e incluso a nivel más amateur. En la Figura 8 podemos ver dos ejemplos de informe de análisis de telescopios de aficionado mediante uno de estos dis-



a)



b)



c)

FIGURA 8. Ejemplos de informe análisis de objetivos de telescopios refractores mediante un sensor de onda Shack-Hartmann (solo se muestra una parte de la información, relativa en este caso a los coeficientes de Zernike). En el primer caso (a), tenemos el análisis del doblete acromático FPL53 de 80 mm f/7,5 de un telescopio Sky-Watcher ED80; mientras que en el segundo caso (b) se ha analizado un triplete FPL53 espaciado por aire, de 98 mm de apertura f/6,3 de un telescopio FLT 98 de la marca William Optics. Finalmente, se presenta el análisis (c) de cuadruplete de 100 mm f/5,8 de un telescopio TS 100Q. Se pueden observar diferencias interesantes en la forma del frente de onda, que se correlacionan con una mayor o menor relevancia de los distintos términos de Zernike para cada uno de los casos. Estos análisis se han llevado a cabo por parte de Luis Rubio, de STR Astrum (www.str-astrum.com), mediante el equipamiento disponible en sus instalaciones.

positivos. La información que se obtiene de estos análisis queda sintetizada con la representación gráfica del frente de onda, así como la de las distintas contribuciones de los polinomios de Zernike (es decir, el «peso» de cada «tipo de aberración» que tiene el instrumento analizado). Estos análisis permiten determinar las principales contribuciones en cuanto al deterioro de la calidad de imagen de nuestro telescopio, lo que nos puede ayudar a identificar las causas de estas aberraciones y buscar posibles soluciones para nuestro equipo. La Figura 8 muestra tres ejemplos de resultados utilizando un Shack-Hartmann. Mediante esta técnica no solo se puede extraer la información correspondiente a los coeficientes de Zernike, sino también la relativa a otras magnitudes de interés para el aficionado, tales como el análisis de la desviación respecto al límite de difracción de nuestro instrumento

y la pérdida de luz que esto conlleva. Un análisis exhaustivo de este tipo nos puede ayudar a conocer con mayor profundidad a nuestro equipo, y a mejorarlo o llegar a explotar todo su potencial.

Existen hoy en día muchos dispositivos comerciales, así como talleres y compañías que están empezando a ofrecer estos servicios de análisis de calidad óptica mediante el estudio del frente de onda (sirva de ejemplo la Figura 8), no solo con instrumentos tipo Shack-Hartmann, sino también mediante otras técnicas interferométricas, lo que sin lugar a duda es una aportación de valor para el aficionado, y una ocasión única para conocer más a nuestros queridos instrumentos, compañeros de viaje y observaciones en esta pasión y aventura que es descubrir el cosmos. (A)

BIBLIOGRAFÍA

—E. Hecht, *Óptica*, Editorial Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000.

—M. Born y E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th (expanded) edition, Cambridge University Press, 2016.

—S. Vallmitjana, A. Marzoa, S. Bosch, E. Acosta, «Pruebas con técnicas para el análisis de frentes de onda. Aplicaciones concretas y estudio comparativo», *Óptica Pura y Aplicada* 50(4): doi.org/10.7149/OPA.50.4.49022 (2017).

—A. Marzoa, S. Vallmitjana, S. Bosch, «Medida del frente de onda en sistemas formadores de imagen comparando un interferómetro de difracción por punto y un sensor de frentes de onda Shack-Hartmann», *Óptica Pura y Aplicada* 51(2): doi.org/10.7149/OPA.51.2.50027 (2018).

—A. Marzoa, S. Vallmitjana, «Análisis de la calidad de imagen de un objetivo de microscopio antiguo mediante un sensor de frente de onda Shack-Hartmann: un experimento de interés educativo», *Óptica Pura y Aplicada* 54(2): [dx.doi.org/10.7149/OPA.54.2.51062](https://doi.org/10.7149/OPA.54.2.51062) (2021).



Antonio Marzoa Domínguez. Físico, ingeniero en SENER Aeroespacial, profesor asociado del Departament de Física de la Universitat Politècnica de Catalunya y miembro de COSMOS Mataró.

Taller especializado al servicio del astrónomo

Informes interferométricos de control de calidad óptica
Colimación óptica
Reparación y mantenimiento de monturas
Mantenimiento de observatorios
Impresión 3D

Oferta de lanzamiento
25% de descuento en tu informe
de calidad óptica*

STR Astrum
www.str-astrum.com
WhatsApp: 609715482