

## EFEMÉRIDES

### 1817. JOSEPH VON FRAUNHOFER. DETERMINACIÓN DEL PODER DE REFRACCIÓN Y DISPERSIÓN DEL COLOR DE DIFERENTES TIPOS DE VIDRIO, EN RELACIÓN CON EL PERFECCIONAMIENTO DE TELESCOPIOS ACROMÁTICOS

## INTRODUCCIÓN

En 1817, hace ahora doscientos años, fue publicado el artículo “*Bestimmung des Brechungs- und des Farben-Zerstreuungs - Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre*” (Determinación del poder de refracción y dispersión del color de diferentes tipos de vidrio, en relación con la mejora de los telescopios acromáticos). La publicación aparecía en *Annalen der Physik* [1] y consistía en una reedición ampliada de una versión previa, publicada dos años antes en las Memorias de la Real Academia de Ciencias en Múnich [2]. El autor del trabajo era Joseph von Fraunhofer, a veces considerado como el padre de la Óptica alemana y uno de los fundadores de la Espectroscopía como disciplina científica.

La figura de Joseph von Fraunhofer no estuvo exenta de críticas provenientes de la propia comunidad científica, debidas en buena medida al secretismo de una parte de su trabajo, el relacionado con la fabricación de prismas ópticos y lentes acromáticas. Pero la calidad excepcional que presentaban sus elementos ópticos llevó al estado de Baviera a convertirse en un referente mundial en la industria óptica.

Joseph von Fraunhofer (1787-1826) provenía de una familia artesanal con larga tradición de vidrieros en Straubing, Baviera. A la edad de once años quedó huérfano y en 1799 abandonó Straubing para mudarse con su nuevo maestro, Philipp Anton Weichselberger, fabricante de espejos y cristal decorativo en Múnich. Dos años más tarde, un accidente fortuito marcaría un cambio de rumbo en la vida de Fraunhofer. La casa de Weichselberger se derrumbó, resultando gravemente herida

su esposa, pero el aprendiz salió indemne del desastre. El propio príncipe Elector de Baviera, Maximiliano José IV (más tarde rey Maximiliano I de Baviera), acudió al lugar del suceso y, conmovido por la desgracia, se interesó por el bienestar del destino de Fraunhofer, ofreciéndole su apoyo para cuando lo necesitase. Su aprendizaje con Weichselberger continuó, pero además de instruirse en la fabricación de vidrio decorativo con su maestro, Fraunhofer comenzó a dedicar los domingos a estudiar con el óptico bávaro Joseph Niggel, del monasterio benedictino de Rott, Baviera, y pronto despertó su interés en el estudio de la teoría óptica y la práctica del vidrio óptico. La fuerte oposición de Weichselberger a que el joven estudiase llevó a Fraunhofer a buscar la ayuda ofrecida por Maximiliano José IV, gracias a la cual pudo comprar el acuerdo con su maestro y recibió la oferta de un puesto en el Instituto Óptico de la abadía de Benediktbeuern, puesto que aceptó, iniciando así su carrera como óptico a la edad de diecinueve años [3].

## CONTEXTO HISTÓRICO DE FRAUNHOFER

La historia de Fraunhofer se desarrolla en el marco de las guerras napoleónicas y la posterior ocupación francesa de Baviera a principios del siglo XIX. Tras la derrota de Austria en 1800 por parte de las fuerzas de Napoleón, Baviera, que hasta entonces había desempeñado un papel subordinado a Austria, establece una alianza con Francia, que se plasma también en aspectos científicos, no sólo políticos.

En 1801 Napoleón forma una *Comision des Routes* y le ordena que proporcione mapas topográficos precisos de su nuevo aliado, Baviera. El príncipe Elector Maximiliano José IV, recién ascendido al trono de Baviera, pone entonces en marcha el proyecto de colaboración franco-bávaro para la elaboración de tales mapas y se crea la Oficina Topográfica francesa en Baviera (*Bureau Topographique* de Múnich). Además de la transferencia tecnológica que supone esta colaboración, los nuevos y más precisos mapas permitirán más tarde al rey Maximiliano I basar su nuevo esquema de impuestos en la propiedad que poseían sus sujetos. Anticipándose a esta reforma, también es creada en 1801 una Oficina de Catastro en el *Bureau Topographique* de Múnich.

El proyecto iba a requerir una gran cantidad de instrumentos topográficos y taller de reparación de los mismos, motivo por el que se crea el *Mathematisch-mechanische Institut* en 1804, que habría de encargarse de proporcionar a la Oficina Topográfica los instrumentos matemáticos y astronómicos que fueran necesarios. El *Mathematisch-mechanische Institut* estaría financiado conjuntamente por la Real Academia de Ciencias de Múnich y la Oficina Topográfica y contaría con un Instituto Óptico propio.

Para poder llevar a cabo las tareas planteadas, el gobierno bávaro opta por el empleo de recursos monásticos, pues los monjes benedictinos poseían el conocimiento óptico más completo en Baviera durante el siglo XVIII y también poseían astrónomos, con conocimientos de instrumentación y de Geometría, de gran utilidad en este proyecto.

En 1805 es comprado un monasterio benedictino secularizado<sup>1</sup>, *Benediktbeuern*, situado al sur de Múnich, en las estribaciones de los Alpes bávaros. Con ello se pretende disponer de un espacio de trabajo propio para la fabricación de vidrio óptico e instrumentación óptica. Y para esta labor se buscan trabajadores cualificados en monasterios de Baviera y regiones cercanas, reconocidos por la producción de vidrio, y artesanos de gremios locales. Es en el monasterio de Benediktbeuern donde se establecería el Instituto Óptico y donde recalaría Fraunhofer en 1807.

## FRAUNHOFER Y EL INSTITUTO ÓPTICO

Fraunhofer inició su formación en Física, Óptica y Matemáticas en Múnich en 1806, de la mano de los encargados del proyecto de los mapas topográficos franco-bávaros, a quienes el príncipe Elector Maximiliano José IV encomendó su formación. En 1807 fue trasladado al Instituto Óptico en Benediktbeuern, donde de la mano del óptico Joseph Niggel, incorporado también al proyecto desde 1804 (y con quien Fraunhofer había estudiado los domingos entre 1801 y 1804), comenzó su aprendizaje en la producción de lentes acromáticas para los ins-

<sup>1</sup> La secularización bávara de 1803 desplazó el poder burocrático de la iglesia al estado, al igual que ocurrió en otros estados del Sacro Imperio Romano Germánico tras su derrota por parte de Napoleón. Como consecuencia de este proceso, monasterios y abadías perdieron sus medios de subsistencia al perder los territorios de los que dependían para obtener rentas y sostén económico. Muchos fueron abandonados, otros reutilizados, y sus monjes reagrupados o expulsados.



Figura 1. Fotografía de la histórica fábrica de vidrio del Instituto Óptico en Benediktbeuern, con las torres del monasterio como fondo. Fuente: Corporación Fraunhofer-Gesellschaft [4].

trumentos ópticos que requerían la Oficina Topográfica y la Oficina de Catastro.

Pronto destacó en sus habilidades manuales y en la aplicación de la Óptica Geométrica a la mejora de elementos ópticos (primeramente de espejos y después de lentes). En 1809 ya era asistente de Pierre L. Guinand, fabricante de relojes suizo que sustituyó a J. Niggel en la dirección de la producción de lentes acromáticas, y en 1814 Fraunhofer pasó a dirigir oficialmente dicha producción, aunque en la práctica ya lo hacía desde algunos años antes. Finalmente, a partir de 1818 Fraunhofer pasó a dirigir todas las secciones del Instituto Óptico.

## PRODUCCIÓN DE VIDRIO ÓPTICO PARA SISTEMAS ACROMÁTICOS

El llamado vidrio óptico es el tipo de vidrio que se emplea en la fabricación de lentes, prismas y otros elementos ópticos. Los vidrios ópticos no deben alterar el frente de la onda luminosa durante su propagación, por lo que deben ser altamente transparentes y homogéneos, libres de burbujas, inclusiones, tensiones, y presentar un alto grado de estabilidad física y química. Todo ello se consigue durante el proceso de fabricación, con un mezclado cuidadoso de sus componentes en fase líquida (a elevadas temperaturas), con selección de zonas válidas del vidrio, recocido de piezas,... Los índices de refracción del vidrio óptico se controlan con la composición del mismo y en la actualidad están normalizados. Existen dos tipos generales de vidrios ópticos: el vidrio *crowne*, que puede contener potasio o bario y presenta índices de refracción con valores comprendidos entre 1,51 y 1,54, y el vidrio *flint*, que contiene óxido de plomo y posee índices de refracción entre 1,58 y 1,72.

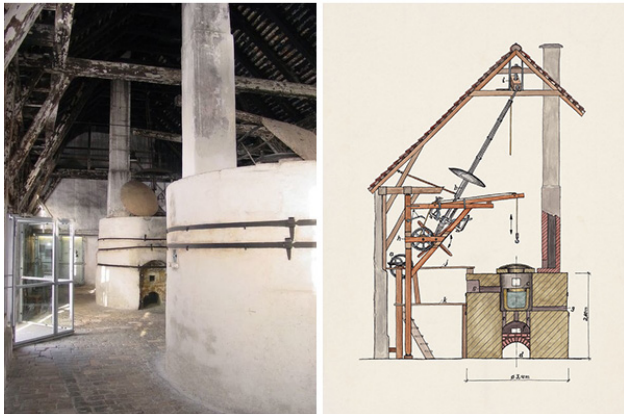


Figura 2. Detalles del interior de la fábrica de vidrio en Benediktbeuern. Imagen superior: vista del interior de la fábrica alrededor de 1900. Imagen inferior izquierda: fotografía de los dos grandes hornos de fundición en los que Fraunhofer producía sus vidrios ópticos. Cada horno estaba dedicado a un tipo de vidrio (uno para el vidrio flint y otro para el vidrio crown). Imagen inferior derecha: esquema del sistema mecánico de agitación del vidrio fundido que poseían los hornos. En la fábrica de vidrio hay en la actualidad un museo con una exposición en la que, además de los hornos, se muestran carteles, herramientas para trabajar el vidrio y el metal, instrumentos ópticos, etc. Fuente: Corporación Fraunhofer-Gesellschaft.

La caracterización y normalización de estos vidrios permite su empleo en la fabricación de sistemas acromáticos (elementos ópticos libres de aberración cromática<sup>2</sup>). Un par de vidrios ópticos es suficiente para crear un objetivo acromático (la segunda lente del doblete corrige la aberración cromática de la primera lente, constituyendo así un sistema acromático).

La primera gran contribución de Fraunhofer a la Óptica experimental fue precisamente su producción de vidrio óptico y su empleo en la construcción de lentes

<sup>2</sup> La aberración cromática es un tipo de distorsión óptica provocada por la imposibilidad de una lente para enfocar todos los colores en un único punto de convergencia.

acromáticas. En sus trabajos en el Instituto Óptico se centró inicialmente en la mejora de la calidad del vidrio. Desarrolló un cuidadoso proceso de fabricación, empleando recetas y procedimientos específicos, que aunque nunca fueron publicados, si pudieron conocerse parcialmente casi cien años más tarde y dejan patentes su gran ingenio y habilidad como maestro vidriero. Modificación de materias primas, procesos de fundición mejorados, estandarización del procesamiento del vidrio acabado,... son algunas de las mejoras decisivas que introdujo en la producción de vidrio.

Pero el esmerado proceso de fabricación de su vidrio óptico requería una técnica precisa y replicable de caracterización del mismo. Y es en la búsqueda de esta técnica donde Fraunhofer vuelve a deslumbrar con su ingenio.

## EL EXPERIMENTO DE LAS SEIS LÁMPARAS Y EL EMPLEO DE LA LUZ SOLAR

El diseño de lentes acromáticas requería el conocimiento del comportamiento óptico del vidrio que se utilizase. En particular, se precisaba saber en qué medida se refractarían los diferentes colores que componen el espectro visible, o lo que es igual, conocer el valor del índice de refracción del vidrio para cada rayo de color.

Pero la medición precisa de la refracción de los colores presentaba una dificultad importante. Hasta la época de Fraunhofer los colores sólo habían sido observados como una banda espectral continua, con una cierta anchura y con bordes difusos, aun cuando la luz se hiciera pasar a través de filtros de color, como intentó inicialmente el propio Fraunhofer. También intentó usar llamas de colores, obtenidas por la combustión de alcohol y azufre, y fue entonces cuando notó que en el espectro destacaba una línea anaranjada brillante (que más tarde se descubrió que en realidad se trataba de un par de líneas muy próximas, el denominado doblete amarillo del sodio o líneas D).

Fraunhofer quiso entonces observar la luz de las llamas refractada en un prisma, utilizando para su observación un instrumento de topografía (teodolito) destinado a la medida de ángulos. Tras diversas modificaciones del montaje experimental inicial para que todos los rayos incidiesen con el mismo ángulo, para conseguir una resolución elevada y para poder capturar todos los colores en una misma observación, acabó construyendo el montaje esquematizado en la Figura 3. El montaje esta-

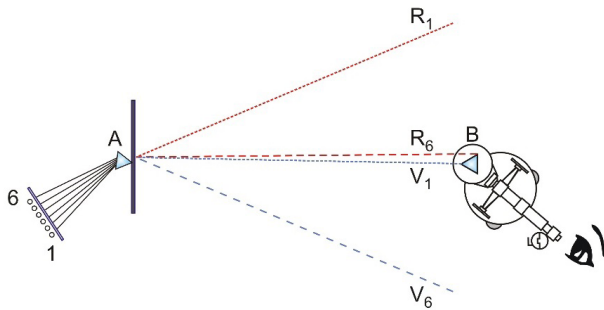


Figura 3. Esquema del montaje del experimento de las seis lámparas. Las lámparas (1 a 6) se colocan tras un obturador con 6 aberturas estrechas, una para cada lámpara, de manera que los haces de luz que emiten éstas incidan sobre el prisma A con diferentes ángulos. La dispersión cromática producida por este prisma, tras pasar a través de una rendija que limita la sección del haz, se dirige hacia el observador, pero también con diferentes ángulos para cada lámpara. Las distancias entre todos los elementos se ajustan de manera que el prisma B reciba sólo los rayos violetas de la lámpara 1, sólo los rojos de la lámpara 6 y el resto de colores intermedios repartidos entre las lámparas 2 a 5 (en el montaje original de Fraunhofer, la distancia entre el obturador de las lámparas y el prisma A era de 4,2 m y la distancia entre la rendija a la salida de A y el prisma B era de aproximadamente 225 m. De este modo, los rayos que incidían en el segundo prisma eran prácticamente paralelos). Los rayos que alcanzan el prisma B son entonces refractados en sus caras en diferente medida, pudiéndose precisar con el teodolito los ángulos de dispersión de cada color, lo que permite la deducción de los índices de refracción del vidrio para dichos colores.

ba basado en empleo de dos prismas y seis lámparas, de las que el teodolito de observación tomaba sólo una zona del espectro, distinta para cada lámpara, y permitía medir la dispersión de cada color observado.

Motivado por las observaciones de los espectros de las lámparas de llama, Fraunhofer decidió también observar la luz del Sol, para ver si presentaba igualmente líneas brillantes. Pero en lugar de ello, en su observación descubrió multitud de líneas oscuras (contó hasta 574 líneas oscuras), de distintos grosores, que mantenían sus posiciones en el espectro aun cambiando las condiciones de observación. Esto le llevó a pensar que no se trataba de un error experimental, sino de algo inherente a la propia luz solar.

Con gran acierto e inteligencia, Fraunhofer consideró entonces que las líneas oscuras podían ser utilizadas como técnica de calibración para producir las lentes acromáticas. Este método, que sí lo hizo público, fue otra de sus grandes contribuciones a la Óptica experimental. El empleo del espectro solar como una rejilla natural, usando las líneas oscuras como marcadores de límites, le permitió medir índices de refracción con porciones del espectro enormemente estrechas. De este modo pudo ob-

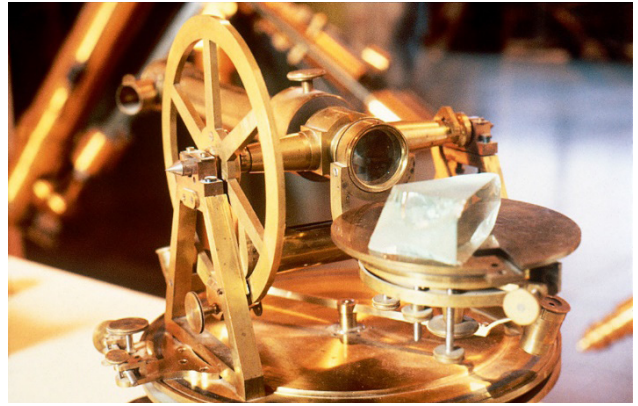


Figura 4. Espectrómetro de prisma del taller de Fraunhofer. Básicamente, consiste en un teodolito modificado, al que se ha añadido una pequeña meseta para la colocación y orientación del prisma de vidrio, el elemento que produce la dispersión cromática de la luz analizada. El dispositivo permite la medición de los ángulos de refracción que sufre cada color al atravesar el prisma, lo que a su vez permite la deducción del índice de refracción de su vidrio para dichos colores. Fuente: Corporación Fraunhofer-Gesellschaft.

tener decenas de tablas de índices correspondientes a distintos colores, para diferentes sustancias, composiciones de vidrios y combinaciones de éstos, con una precisión hasta la sexta cifra decimal.

Disponer de este método y de su depurada técnica de fabricación de vidrio le permitió el perfeccionamiento de su vidrio óptico y el control sobre los índices de refracción que necesitaba para conseguir la eliminación de las aberraciones cromáticas de sus lentes. Fraunhofer ahora podía determinar la combinación de medios que corregía la aberración cromática para los colores extremos del espectro (rojo y violeta) y además podía comprobar experimentalmente la eficacia de sus lentes.



Figura 5. Joseph von Fraunhofer, en el centro, mostrando el funcionamiento de su espectrómetro a los encargados del proyecto de los mapas topográficos franco-bávaros. Fuente: Corporación Fraunhofer-Gesellschaft.

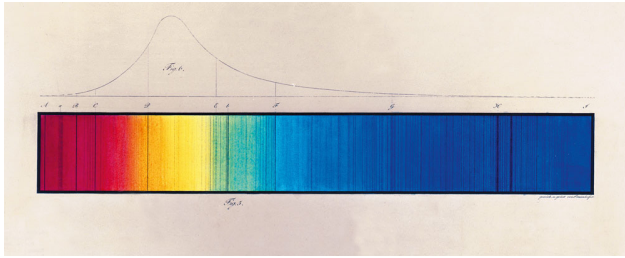


Figura 6. Esquema de las líneas negras del espectro solar, descubiertas en 1814 por Fraunhofer. El científico asignó a las bandas principales las letras de la A a la K y a las más delgadas otras letras. Utilizó estas líneas para determinar el índice de refracción de sus vidrios con enorme precisión (en su artículo de 1817 presenta tablas con índices de refracción obtenidos con las líneas B, C, D, E, F, G y H, las que consideró más gruesas y nítidas). Posteriormente, en 1859, Robert W. Bunsen y Gustav Kirchhof descubrieron que cada elemento químico tenía asociado un conjunto de líneas espectrales e interpretaron las bandas oscuras en el espectro solar como líneas causadas por los elementos de las capas más externas del Sol al absorber la luz procedente de su interior. La absorción de una determinada longitud de onda da lugar a la observación de un área negra en la escala de colores en ese punto. La línea D del espectro de Fraunhofer se corresponde con el doblete amarillo del sodio; las líneas C, F y G se corresponderían con las líneas alfa, beta y gamma del espectro del átomo de hidrógeno; las líneas A y B estarían asociadas al oxígeno molecular (estas líneas también las producen las moléculas de  $O_2$  de la atmósfera terrestre al absorber la luz procedente del Sol). Fuente: Corporación Fraunhofer-Gesellschaft.

## EL LEGADO DE FRAUNHOFER

El éxito de Fraunhofer es un claro ejemplo del papel que pueden desempeñar las habilidades en la Física y en la Sociedad. Fraunhofer era un gran artesano óptico y produjo las mejores lentes acromáticas y prismas del mundo. Hasta 1800 Gran Bretaña había sido el principal proveedor de lentes ópticas del continente, pero el bloqueo continental impuesto por Napoleón en 1806 les impidió mantener dicho suministro. Este hecho, unido a la calidad excepcional de las lentes de Fraunhofer, condujo consecuentemente al surgimiento de la tecnología óptica de Baviera, que pronto pasó de ser un estado agrícola a líder en avances tecnológicos y científicos.

Las lentes acromáticas y los instrumentos de Fraunhofer se distribuyeron y usaron en toda Europa. A Fraunhofer le visitaron en el Instituto Óptico en Benediktbeuern importantes científicos y políticos de la época. Su avanzado conocimiento del comportamiento refractivo de los distintos tipos de vidrio y su dominio de las técnicas de producción de lentes acromáticas le permitieron diseñar telescopios inusualmente grandes, surgiendo así una nueva generación de refractores astronómicos. Algunos descubrimientos importantes en



Figura 7. Telescopio refractor de 9 pulgadas (Deutsches Museum, Múnich), construido conforme al diseño de Fraunhofer. Fuente: Corporación Fraunhofer-Gesellschaft.

Astronomía deben en parte su éxito a la alta calidad y elevada precisión de los instrumentos de Fraunhofer. Por ejemplo, la primera medición con éxito de un paralaje estelar la realizó Friedrich W. Bessel para la estrella Cygni 61, en 1838, usando un heliómetro basado en un refractor de 9 pulgadas diseñado por Fraunhofer. Igualmente, el astrónomo Johann Gottfried Galle descubrió el planeta Neptuno en 1846 empleando un refractor Fraunhofer de 9 pulgadas.

El descubrimiento de las líneas brillantes en los espectros de las llamas (más tarde llamadas *líneas de emisión*) y el de las líneas oscuras en el espectro solar (también llamadas *líneas de absorción* o *de Fraunhofer*) resultó igualmente trascendental para el nacimiento posterior de la Espectrometría, técnica de análisis de la composición de la materia que revolucionó la Ciencia del siglo XX. Esta disciplina científica ha resultado particularmente importante para la Astronomía y la exploración espacial, pues nuestro conocimiento del Universo se obtiene del análisis de la luz emitida por los cuerpos celestes (el empleo de técnicas espectroscópicas permite deducir la composición química y la temperatura de la atmósfera de gas de las estrellas, la velocidad a la que se mueven, etc.).

A pesar de la relevancia que han tenido las contribuciones de Fraunhofer, no siempre contó con el reconocimiento de la comunidad científica. El secretismo que mantenía sobre su producción de vidrio óptico y lentes acromáticas era a menudo criticado por los científicos de

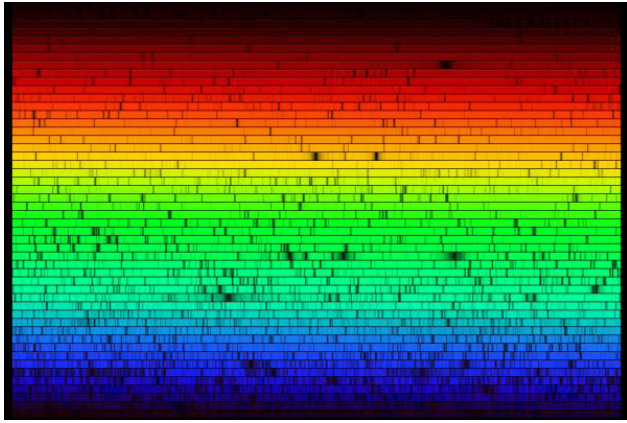


Figura 8. Fotografía en alta resolución del espectro solar (fragmentado en varias porciones o “renglones” de unos 6 nanómetros de anchura en valores de longitud de onda), en el que pueden distinguirse multitud de líneas negras de absorción o de Fraunhofer. Las dos líneas negras más destacadas de la zona amarillo-naranja son las que constituyen el denominado doblete amarillo del sodio o líneas D (la línea  $D_1$  corresponde a una longitud de onda de 589,592 nm y la  $D_2$  de 588,995 nm). Fuente: N.A. Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF.

la época. Su trabajo tras las paredes protectoras del monasterio de Benediktbeuern reflejaba el trabajo de los monjes. Pero, en cierto modo, el secreto estaba justificado, pues el Instituto Óptico, aunque se había creado inicialmente como una institución estatal, se transformó en una empresa comercial y en apenas dos décadas desde su creación se convirtió en proveedor de equipos ópticos a escala mundial. Fraunhofer, no obstante, sí decidió publicar su método para la calibración de lentes acromáticas, los experimentos que le permitieron tal calibración y el descubrimiento de las líneas oscuras del espectro solar (aunque quizá fuese en un intento de ganarse el reconocimiento de los científicos). En ocasiones se ha dicho de Fraunhofer que simplemente era un artesano talentoso. E incluso se ha llegado a criticar el hecho de

que se le permitiese acceder a la Academia de Ciencias de Baviera cuando Fraunhofer nunca asistió a una universidad.

En la actualidad, el reconocimiento del mérito de Fraunhofer como científico, inventor y emprendedor es incuestionable; valga como muestra esta efeméride del artículo en el que dejó plasmados sus trabajos en el Instituto Óptico en Benediktbeuern, donde desarrolló su talento e ingenio entre 1807 y 1819.

## REFERENCIAS

- [1] Fraunhofer J (1817). Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre. *Annalen der Physik* 56, 264–313.
- [2] Fraunhofer J (1814-1815). Bestimmung des Brechungs- und des Farben-Zerstreuungs - Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre. *Denkschriften der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu München* 5, 193–226.
- [3] Jackson MW (2000). Spectrum of belief: Joseph von Fraunhofer and the craft of precision optics. USA: MIT Press.
- [4] Joseph von Fraunhofer. Recursos multimedia de la Corporación Fraunhofer-Gesellschaft. <https://www.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer/profil-struktur/geschichte-fraunhofer/joseph-von-fraunhofer.html>.

Juan Pedro Sánchez Fernández  
Dpto. de Física Interdisciplinar