

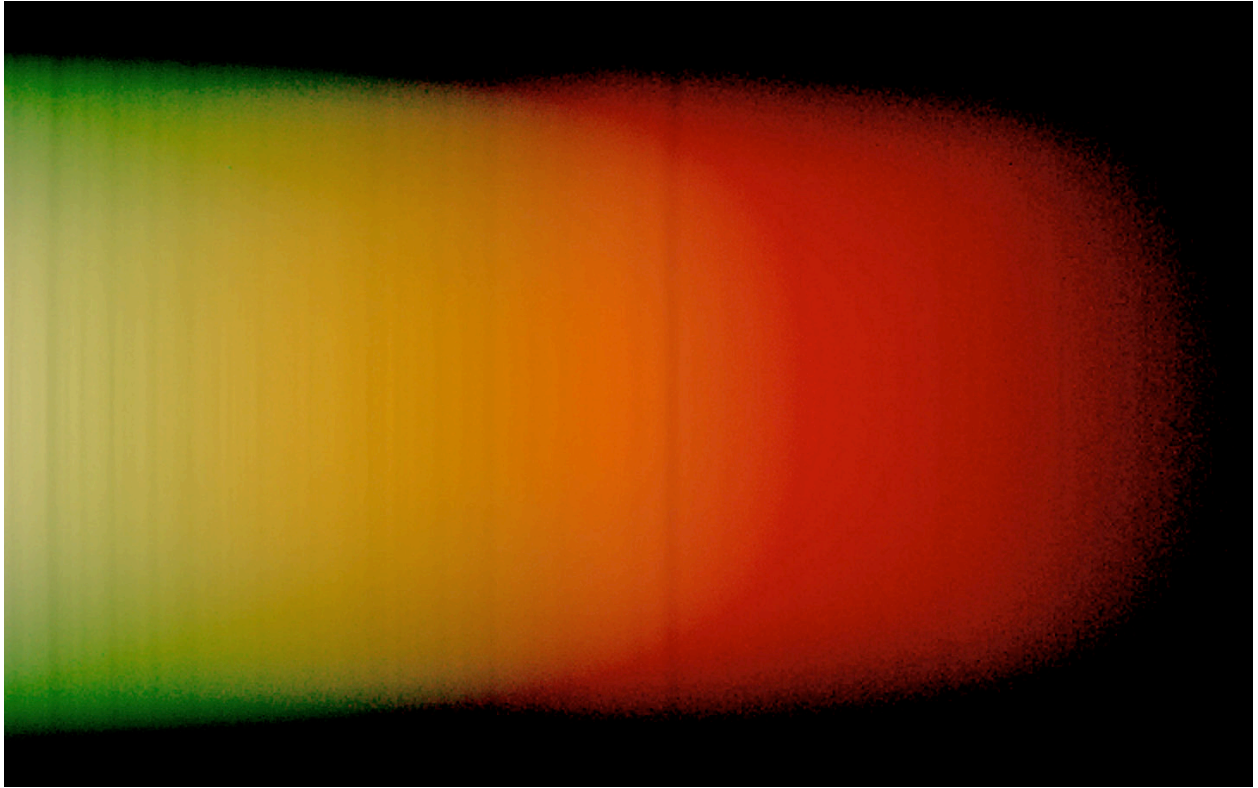
Espectroscopia estelar de bajo coste: las líneas de Fraunhofer



SOCIEDAD
ESPAÑOLA DE
ASTRONOMÍA

Artículo exclusivo
colaboración de la Sociedad
Española de Astronomía

El espectro de un astro, resultado de la descomposición de la luz que nos llega de él, nos da mucha información sobre su naturaleza y propiedades físicas. Es posible introducirse a la apasionante técnica de la espectroscopia con medios muy sencillos. Este artículo describe la observación de las líneas de Fraunhofer del espectro solar usando un espectroscopio de construcción casera pero con un resultado sorprendentemente detallado. **Josep Martí Ribas**



Casi todo lo que los astrónomos pueden analizar del Cosmos llega en forma de luz. La espectroscopia es la técnica mediante la cual descomponemos y registramos la emisión luminosa de los astros en todas sus longitudes de onda. El espectro de un cuerpo celeste nos da información sobre sus condiciones físicas, su composición química, su velocidad, y a veces incluso los campos magnéticos, entre otras de sus propiedades.

Los fundamentos básicos de la espectroscopia moderna fueron sentados a lo largo del siglo XIX gracias principalmente a los trabajos pioneros de los científicos alemanes Joseph von Fraunhofer (1787-1826), Gustaf Kirchhoff (1824-1887) y Robert Bunsen (1811-1899). Fue el primero de ellos, Fraunhofer, a

quien debemos la primera descripción detallada del espectro solar que contiene un gran número de líneas de absorción impresas sobre un continuo que se aproxima bastante a la emisión de un cuerpo negro a 6000 grados Kelvin. Aunque estas líneas de absorción fueron descubiertas previamente en 1802 por el inglés William Hyde Wollaston (1766-1828), el exquisito detalle de las observaciones de Fraunhofer publicadas doce años más tarde le hicieron merecedor de ser denominadas en su honor. En la bibliografía se incluyen las referencias históricas de estos trabajos pioneros accesibles hoy en formato digital. Algunas de las líneas de Fraunhofer más importantes conservan todavía su nomenclatura original mediante letras (A, B, C...), destacan-

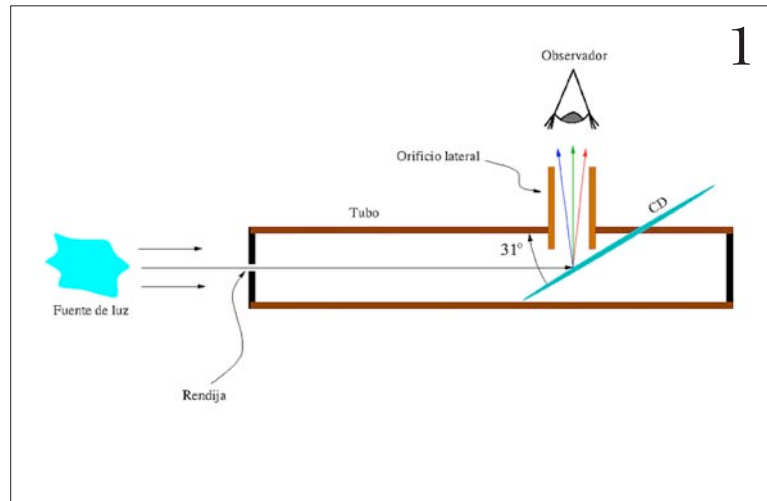
Imagen procesada de las líneas de Fraunhofer en la luz difusa solar tomada el 9 de abril de 2017 desde Jaén a menos de una hora de la puesta del Sol. Cámara Canon EOS 500D a 100 ISO. La exposición, contraste e intensidad de las capas RGB de la imagen se ha ajustado individualmente para una mejor representación. (Todas las imágenes son cortesía del autor)

do principalmente las líneas H y K del calcio ionizado. Hoy sabemos que todas ellas, presentes tanto en el espectro solar como en el de otras estrellas, no son más que la consecuencia natural de la estructura atómica de la materia regida por las leyes de la Mecánica Cuántica. Átomos y moléculas tienen sus niveles de energía cuantizados y solo emiten, o absorben, fotones cuya longitud de onda asociada corresponde a las diferencias de energía entre esos niveles. Por

ello, cualquier especie química presente en una atmósfera estelar dejará su huella de absorción, o en ocasiones de emisión, típica e inconfundible sobre el continuo espectral del astro. Gracias a esas marcas características en el espectro podremos inferir tanto la composición del astro como posiblemente otras de las diversas propiedades físicas que mencionábamos al principio. El libro de Kaler, listado en la bibliografía reciente adjunta, contiene una excelente introducción sobre cómo funciona todo este proceso detectivo en el mundo estelar.

La espectroscopia no se cuenta aún entre las técnicas extendidas entre los aficionados a la astronomía. Sin embargo, esta es una situación que está cambiando desde hace años y sin duda cambiará a más en el futuro. Las restantes referencias y enlaces actuales en la bibliografía son prueba fehaciente de ello. En este contexto, es posible introducirse a la espectroscopia astronómica con medios muy sencillos y con una inversión económica extremadamente modesta. Este artículo se expone la experiencia personal del autor en actividades de divulgación astronómica en las que los participantes pudieron contemplar directamente las líneas de Fraunhofer y las líneas de emisión de diversas lámparas domésticas usadas como fuentes de comparación. La experiencia es realmente gratificante y permite asomarnos a una de las etapas más fascinantes del desarrollo de la astrofísica moderna.

Wollaston y Fraunhofer usaron prismas de vidrio para descomponer la luz en sus ob-



servaciones. Los astrónomos modernos utilizan herramientas algo más sofisticadas como son las redes de difracción. Se trata de superficies planas en las que se han grabado un gran número de líneas o surcos paralelos con los que interactúa el frente de ondas luminoso. Las redes de difracción pueden funcionar tanto por transmisión como por reflexión. En ambos casos el parámetro principal es el número de líneas por unidad de longitud. Al incidir un haz de luz sobre una red de difracción, cada longitud de onda se desviará un ángulo distinto formándose un espectro al igual que sucede con un prisma. No obstante, hay algunas diferencias debidas a la física del proceso en cuyos detalles no entraremos aquí. Solamente indicaremos que, en una red de difracción, las longitudes de onda correspondientes al azul son las que menos desviación sufren. Esto es justo al contrario de lo que sucede en un prisma. Otra particularidad importante es que las redes de difracción crean varios espectros a la vez. A estas réplicas espectra-

les se las conoce como «órdenes de difracción». Normalmente el espectro del primer orden es el que más se utiliza al ser más luminoso que el resto. En cambio con un prisma, solamente obtendríamos un único espectro.

Pero, ¿es fácil conseguir una red de difracción? ¿Podemos construir un espectroscopio con nuestros propios medios? La respuesta a ambas preguntas es afirmativa. De hecho, se trata de una actividad muy bien documentada y para la que existen numerosos recursos disponibles incluso en Internet (ver de nuevo referencias y enlaces en la bibliografía). Volviendo a la red de difracción, muchos lectores del artículo tienen seguro varias en su casa, puede que sin saberlo, y además de una calidad excelente. Un simple CD o un DVD virgen, de los que ya empiezan a ser obsoletos frente a otros dispositivos de almacenamiento de datos informáticos, proporcionan una excelente red de difracción para uso astronómico. Cada uno de ellos contiene unas 625 y 1350 líneas/mm, respectivamente. Pero para

FIGURA 1. Esquema del espectroscopio utilizando un CD como red de difracción. Con un DVD el diseño es el mismo pero con un ángulo de 16 grados.

FIGURA 2. Espectroscopio DVD con el que se han tomado los espectros incluidos en este artículo, montado sobre un trípode fotográfico. La forma circular del disco óptico insertado es visible bajo la envoltura de papel de aluminio que evita la entrada de luz. En la imagen de abajo se aprecia más en detalle la tapa del tubo con la hendidura en cuya cara posterior se han pegado las cuchillas de afeitador para formar la rendija.

conseguir que uno de estos discos ópticos funcione bien como una herramienta espectroscópica es conveniente discriminar bien la dirección de procedencia del haz luminoso que queremos descomponer. Aquí es donde se requiere algo de habilidad manual para construir el instrumento cuyo esquema se muestra en la Figura 1. Se trata de un auténtico espectroscopio que consta simplemente de tres elementos principales: i) una rendija para seleccionar la procedencia de la luz de entrada; ii) un tubo óptico; iii) una red de difracción.

La rendija debe tener apenas unas décimas de milímetro de separación y ser lo más geoméricamente perfecta. Se recomienda enfrentar los fillos de dos cuchillas de afeitador, o de una sola si la cortamos por la mitad con una tijeras para ahorrar. El tubo óptico puede hacerse con un simple tubo de cartón de los que se usan para el transporte de pósteres o mensajería. Suelen llevar tapas de plástico en los extremos. Las conservaremos y aprovecharemos mejor si son negras. Con una navaja, o un cúter, podemos rea-



lizar una hendidura en una de las tapas y pegar las cuchillas sobre la misma en su cara interior. Atención, esta es la etapa más peligrosa del proceso en la que debemos estar vigilantes si realizamos la experiencia con niños. Si disponemos de una lupa de aumento, conviene verificar el paralelismo de los fillos de nuestra rendija y ajustarlo si es necesario con pequeños movimientos antes de que se seque el pegamento utilizado. También puede ayudar a asegurar el paralelismo el introducir otra hoja de afeitador entre los fillos, o algo fino como un tarjeta de visita, para luego

ser retirada una vez endurecido el pegamento.

Lo siguiente es insertar la red de difracción. Para ello debemos realizar un corte preciso con una sierra del tubo de cartón para deslizar el disco óptico a través de él. En la Figura 1 el ángulo de corte se ha elegido de 31 grados de acuerdo con las ecuaciones que rigen el fenómeno de la difracción. Este valor permite que la longitud de onda correspondiente al verde emerja perpendicularmente al eje del tubo óptico para el espectro de primer orden producido por un CD. Evidentemente, deberemos practicar un orificio lateral en el tubo de cartón a través del cual poder observar este espectro emergente. Una apertura circular de unos dos o tres centímetros de diámetro será suficiente. Un tubo de plástico insertado y sobresaliendo un poco de esta apertura, a modo de visor lateral, nos permitirá luego colocar mejor el ojo para la observación. Con un poco de ensayo y error, podremos ajustar la longitud de este tubo lateral de modo que solo el espectro de primer orden sea visible. Para lograr algo más de resolución espectral, existe la opción de emplear un DVD y el ángulo requerido pasa a ser entonces de 16 grados. El corte adecuado de la hendidura con este ángulo es bastante más difícil, por lo que lo es más recomendable empezar con un CD. En cualquier caso, conviene marcar muy bien sobre el tubo la trayectoria del corte antes de empezar a seccionarlo. Se recomienda usar una sierra de calar o de cortar metal para un resultado lo más preciso posible.



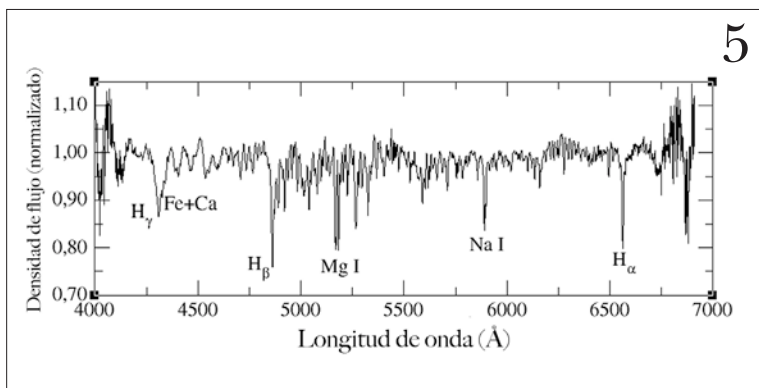
3

FIGURA 3. Espectro de una lámpara fluorescente moderna observado con el espectrógrafo casero descrito en este artículo como paso previo para ajustar la correcta alineación de la rendija.



4

FIGURA 4. Imagen directa sin procesar de las líneas de Fraunhofer en la luz difusa solar tomada el 20 de abril de 2017 desde Jaén. Cámara Canon EOS 500D a 100 ISO y 60 segundos de exposición usando un espectrógrafo basado en DVD. Se aprecia la sobreexposición en la región azul-violeta y la subexposición en la zona roja. La exposición en la zona verde es la más adecuada.



5

FIGURA 5. Corte horizontal de la imagen de cabecera en página 32 que proporciona la representación del espectro solar en el formato intensidad frente a longitud de onda donde se han identificado las principales líneas de absorción, correspondientes a las regiones de H β , el triplete del magnesio y el doblete del sodio con diversas líneas adicionales identificadas.

Al deslizar el disco óptico en el cilindro de cartón recién cortado, obtendremos como intersección una elipse. Podemos señalar su perímetro con un rotulador y recortar después el disco sobrante siguiendo el contorno elíptico para que no sobresalga del tubo. El disco se puede contar con unas tijeras, aunque no sin algo de esfuerzo. Otra opción es dejar el disco entero si no nos importa mucho la estética del instrumento.

Tras realizar los cortes del tubo, no podremos evitar después que se cuele algo de luz a través de la hendidura. Una solución para ello es envolver toda la zona de corte, teniendo el disco introducido, con papel de aluminio y asegurarlo bien con cinta adhesiva. Ya solo nos quedan algunos aditamentos finales, como haber pintado antes el interior del tubo de negro mate para evitar reflexiones internas y pegar una tuerca en la base

del tubo por si queremos instalar nuestro flamante espectroscopio sobre un trípode fotográfico. En la Figura 2 se muestran algunas fotografías de un espectroscopio terminado construido por el autor siguiendo estas indicaciones. El tubo del visor lateral, donde se situaría el ojo, se ha realizado con un simple envase de yogur líquido recortado. ¡El coste de todos los materiales no fue más allá de unos tres euros! Raramente un aparato científico puede salir tan barato (trípode aparte).

Con este instrumento estamos en condiciones de emular visualmente las experiencias de Fraunhofer. Sin embargo, antes es aconsejable practicarle algunos ajustes para asegurarnos que la rendija se ha orientado paralelamente a la dirección de las líneas de nuestra red de difracción. Para ello nada mejor

que dirigir el espectroscopio hacia alguna de las luces fluorescentes que seguro están presentes en todas las casas. Podremos ver entonces un bosque de líneas de emisión rojas, verdes y azules que nuestro ojo aprecia combinadas como una aparente luz blanca (ver Figura 3). Girando levemente la tapa de plástico del tubo donde antes pegamos las cuchillas de afeitarse, hemos de lograr que las líneas espectrales producidas por los gases incandescentes en el interior de la lámpara se vean perfectamente perpendiculares a la dirección de dispersión espectral. De hecho, lo que estaremos viendo no son más que imágenes de nuestra rendija en distintas longitudes de onda. De paso también podemos dirigir nuestro instrumento a una lámpara de incandescencia, o una linterna de ledes, y comprobar que obtenemos un bonito espectro continuo desde el rojo hasta el violeta.

Una vez rotado correctamente el ángulo de la rendija, no nos queda más que verificar por nosotros mismos la existencia de las líneas de Fraunhofer. Es importante saber **que no necesitamos ni debemos dirigir nuestro instrumento al Sol directamente** para lograrlo. ¡Ello podría ser muy peligroso para la vista incluso con el flujo luminoso que atraviesa una rendija tan estrecha! Para apreciar las líneas del insigne físico alemán basta con dirigir el espectroscopio al cielo, lejos del Sol, y mirar a través del visor. Se recomienda además ubicarse en un entorno sombrío para evitar deslumbramientos. Solamente la rendija de nuestro espectroscopio debe estar di-

rigida y expuesta hacia el cielo. Observando atentamente, lo que estaremos viendo es el espectro de la luz solar difundida por la atmósfera terrestre mediante el mecanismo de dispersión de Rayleigh. Y esta luz difusa contiene también las líneas de Fraunhofer del espectro solar que le da origen. Si nos fijamos bien, veremos algunas de las líneas más claras como son H β en la zona verde del espectro y la línea del sodio en la zona naranja (F y D según la notación de Fraunhofer).

Cuando se realizan este tipo de observaciones con público para divulgación, toda esta variedad de espectros fácilmente visibles dan pie a hablar y discutir sobre la constitución de la materia, el comportamiento de los átomos y el método científico en general. Incluso bajo un cielo nublado, el espectroscopio sigue haciendo posible la visión de las líneas de Fraunhofer en la luz difundida por la atmósfera y las nubes. Combinadas con la observación de espectros de lámparas, el autor ha encontrado en ellas un auténtico plan B durante algunos talleres de observación del Sol que han sido frustrados sea por una meteorología inclemente, o por la ausencia completa de manchas solares como corresponde al mínimo de actividad solar en el que estamos entrando. También podemos recurrir a las líneas de Fraunhofer como objetivo de observación en noches de Luna llena. Por supuesto, entonces sí debemos apuntar el espectroscopio directamente a nuestro satélite lo cual no conlleva ningún peligro para la vista. Siendo su luz debida a la reflexión de

luz solar, el espectro lunar guarda una gran similitud con el de nuestra estrella más cercana.

Finalmente, ¿por qué no considerar la idea de convertir nuestro espectroscopio en espectrógrafo combinándolo con una cámara fotográfica que ya tengamos? A diferencia de la fotografía astronómica convencional, aquí no tendremos necesidad de preocuparnos por disponer de una montura que asegure el seguimiento. El espectro de Fraunhofer está presente en toda la esfera celeste y podemos utilizar un simple trípode totalmente inmóvil (excepto con la Luna llena antes mencionada). La cámara deberá estar alineada con la apertura lateral del tubo, por ejemplo sostenida también con un segundo trípode fijo. Es muy probable que entre luz parásita a través del espacio entre el objetivo de la cámara y el espectroscopio. Para ello, una vez alineado y montado el conjunto lo podemos recubrir con una tela oscura que deje solo expuesta a la luz la rendija exterior. Mediante algunas pruebas con distintas sensibilidades y tiempos de exposición, el registro fotográfico de las líneas de Fraunhofer o del espectro de diversas lámparas estará a nuestro alcance.

La Figura 4 muestra lo que se puede llegar a apreciar con estos medios tan sencillos. Se obtuvo usando el espectroscopio de la Figura 2 en combinación con una cámara digital Canon EOS 500D configurada a baja sensibilidad (100 ISO) y montando un objetivo de 28 mm. Los tiempos de exposición ensayados variaron entre un segundo y algunos minutos. La zona

azul del espectro de la solar difundida por la atmósfera es mucho más luminosa que la zona roja. Recordemos aquí que la dispersión de Rayleigh tiene una dependencia con el inverso de la potencia cuarta de la longitud de onda. Por eso el cielo diurno lo vemos de color azul. No obstante, la luz dispersada por la atmósfera también incluye longitudes de onda mayores, como las correspondientes al verde y rojo, si bien en menor proporción.

Esta predominancia de la región azul-violeta dificulta en parte obtener imágenes no saturadas de todo el espectro, salvo que se combinen tomas con distinta exposición. Si se conocen las técnicas básicas en fotografía astronómica, podemos ir algo más allá y corregir además las imágenes de los efectos causados por la corriente de oscuridad (*dark*) y la falta de uniformidad del campo (*flat field*). En la imagen de cabecera de este artículo en página 32 se muestran el resultado de alguno de estos ensayos más sofisticados en los que se han registrado y procesado separadamente las capas roja, verde y azul de la imagen RGB que registra la cámara. El espectro de la luz solar difusa de la imagen que abre este artículo se tomó en condiciones no muy buenas, con nubes y apenas una hora antes del crepúsculo. Aún así, muestra una riqueza de líneas de Fraunhofer muy apreciable, con casi un centenar.

Tomando de la literatura científica como referencia las longitudes de onda de las líneas más prominentes (doblete del sodio, H β , Fe...) y el píxel donde se

ubicar, es perfectamente posible calibrar la longitud de onda de todo el espectro y extraerlo en un formato de flujo luminoso frente a longitud de onda. El autor acometió esta última etapa utilizando un software profesional de astronomía (IRAF), pero sin duda es también factible con medios más sencillos.

De este modo se ha obtenido la gráfica normalizada de la Figura 5 donde aparecen identificadas las principales líneas de una estrella de tipo espectral G como es el Sol. Ampliando la figura sorprende la clara separación del doblete del sodio cuyas dos componentes están separadas por ¡solo 6 ångströms! (un ångström = 1 Å = equivale a 10⁻⁸ cm). La zona de H β resulta espectacular al ser ampliada y aparecer a su lado numerosas líneas del hierro. El triplete del magnesio, entre 5170-5185 Å, también se puede apreciar claramente resuelto por nuestro humilde instrumento. Con tiempos de exposición elevados podemos registrar mejor la zona roja de espectro y detectar la línea de absorción de H α debida al hidrógeno, así como bandas de absorción que empiezan a verse hacia 6277 Å debidas a la atmósfera de la Tierra. Recrearse en la identificación de las líneas es una experiencia tan gratificante como cuando aprendemos a identificar las constelaciones del cielo y poco a poco se van tornando como viejas amigas.

Ojalá que este artículo despierte la curiosidad por una de las técnicas de observación más importantes de la astronomía en cuya práctica es posible iniciarse con medios mucho más humildes de lo que cabría esperar.

Descomponer la luz de los astros ha sido hasta ahora, y seguirá siendo durante mucho tiempo, la principal clave para entender los procesos físicos que en ellos ocurren. Empezar disfrutando del espectro solar es un magnífico primer paso y lo podemos dar con un coste mínimo. (A)

Referencias históricas

- William Hyde Wollaston, *A Method of Examining Refractive and Dispersive Powers, by Prismatic Reflection*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1802, Vol. 92, pág. 365-380.
- Joseph Fraunhofer, *Bestimmung des Brechungs- und des Farben-Zerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernrohre*, Denkschriften der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu München, 1814-1815, Vol. 5, pág. 193-226.

Referencias y enlaces actuales de utilidad

- Kaler, J. B., *Stars and their spectra*, 1989, Cambridge University Press.
- Harrison, K. M., *Astronomical Spectroscopy for Amateurs*, 2011, Springer.
- Randell, D. A., *The CD Spectroscope*, Practical Amateur Spectroscopy, 2002, Tonkin, S. F. (Ed.), The Patrick Moore's Practical Astronomy Series.
- www.exploratorium.edu/snacks/cd-spectroscope
- www.stargazing.net/david/spectroscopy/screwdrivercdromspectroscope.html
- www.inpharmix.com/jps/CD_spectro.html
- www.skyandtelescope.com/get-involved/pro-am-collaboration/the-revival-of-amateur-spectroscopy



Josep Martí Ribas, es catedrático en el área de astronomía y astrofísica en la Universidad de Jaén.