

## ESPECTROGRAFÍA CON WEBCAM

Francisco A. Violat Bordonau - [fviolat@yahoo.es](mailto:fviolat@yahoo.es)

Es posible iniciarse en el tema **espectroscopía** (si sólo estudiamos visualmente los espectros) o **espectrografía** (si los capturamos y mostramos en alguna superficie, como en una fotografía o un monitor) sin mucho esfuerzo ni tampoco grandes gastos: no se van a lograr resultados muy profesionales pero sí didácticos, sobre todo si lo que buscamos es iniciarnos (e iniciar a los demás) en este fascinante, divertido e interesante campo a medio camino de la Física Atómica y la Química.

La Espectroscopía es la rama de la Física dedicada al estudio, clasificación y análisis de los espectros; el espectro más típico y conocido por todos es el **arco iris**, originado por la descomposición de la luz blanca del sol al atravesar las diminutas gotitas de agua de la lluvia: en este caso vemos un semiarco con siete colores que son rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta, cada una de las diferentes longitudes de onda (colores puros) que el ojo puede distinguir. También se producen espectros cuando miramos un disco compacto (CD-ROM) y vemos "colorines" muy llamativos o incluso cuando la luz atraviesa un vaso de vidrio, formándose una mancha luminosa coloreada sobre un mantel blanco. Todos ellos son espectros: un espectro es, pues, una mancha de luz coloreada originada por la descomposición de la luz blanca en sus diferentes longitudes de onda individuales (colores) al atravesar un medio dispersor apropiado, que puede ser un prisma, una serie de rendijas paralelas (red de difracción o un disco compacto), un orificio pequeño, etc... El estudio de los espectros permite conocer la composición química de una sustancia determinada o saber si en un cuerpo existe un determinado elemento químico: por ejemplo hierro y sodio en la superficie solar, en un planeta o en cualquier estrella distante.

En el número 124 (marzo de 1995) de la conocida revista "Tribuna de Astronomía" publiqué mi primer trabajo sobre espectrografía, resultado de intensas investigaciones y observaciones desde mediados de 1994; al adquirir recientemente una webcam encontré el momento de mejorar, ampliar, actualizar estos trabajos y presentar nuevos resultados más avanzados y espectaculares. Para ello es fundamental emplear un **espectroscopio** que puede ser comprado (precio mínimo: 26.000 Ptas. los modelos más sencillos a base de prismas de la marca "Carl Zeiss") o construyendo uno con un prisma de vidrio óptico (no lo aconsejo por la baja calidad de los resultados, aunque si se dispone de un prisma se pueden intentar) o con una red de difracción; en el mercado es posible encontrar redes baratas bajo la apariencia de filtros fotográficos de "efectos especiales": un buen ejemplo es el filtro francés **Cosmos B40**, que se suele emplear bastante en la fotografía de bodas o comuniones pues ofrece una imagen del sujeto con pequeños espectros ("arco iris") en las luces brillantes capturadas en la toma; este filtro fotográfico (que cuesta unas 4.000 Ptas.) es realmente una red de difracción con un bajo número de líneas por mm, que permite tanto fotografiar escenas cotidianas (sin gran merma de su calidad) como descomponer la luz de cualquier fuente luminosa ofreciendo un pequeño espectro de primer orden (estrecho aunque luminoso), un espectro de segundo orden (mayor aunque más débil) y en fuentes de luz brillantes un espectro de tercer orden aún más débil aunque con amplitud y resolución algo mayor.

Para los no iniciados una **red de difracción** es una lámina de vidrio (o plástico en los modelos más asequibles) en la cual se han grabado con técnicas especiales (punta de diamante) gran número de líneas paralelas: cuando un haz de luz lo atraviesa una parte de ella no es afectada (orden 0), otra parte se dispersa sólo un poco (primer orden), otra parte se desvía bastante más (segundo orden), etc... de este modo aparece una imagen de la fuente luminosa original (orden 0), un espectro estrecho luminoso (orden 1), otro más ancho pero menos luminoso (orden 2), etc... Por lo general en los modelos sencillos el espectro de orden 3 se empieza a solapar con el de orden 2, de modo que pese a ser más amplio es ya menos válido en la zona violeta, que es la que se solapa con la roja del espectro de orden inferior. También es factible sustituir la red de difracción por un **CD-ROM**: en este caso basta mirar en él la luz reflejada por la fuente luminosa para que apreciemos un espectro bastante rudimentario, pero que todavía nos puede dar una ligera idea de las líneas o bandas que contiene; si el espectro obtenido no es demasiado nítido lo que podemos hacer es tapar la fuente luminosa con una

cartulina oscura dejando escapar sólo una fina rendija de luz: ahora las líneas aparecen más nítidas. Con este sencillo y barato dispositivo (cualquier CD-ROM sirve: tanto uno virgen como uno ya escrito) podemos comprobar que con algo de maña y cuidado llegamos a resolver el doblete amarillo del vapor de mercurio en un tubo fluorescente: ambas líneas están separadas por sólo 2.1 nanómetros.

Cualquier fuente de luz (por ejemplo una lámpara de bajo consumo) vista a través del filtro ofrece varias imágenes coloreadas que pueden ser adyacentes sin solución de continuidad (**espectro continuo**: por ejemplo la llama de una vela) o imágenes separadas por espacios vacíos en los cuales no hay emisión de luz: corresponden a cada una de las **líneas** y **bandas de emisión** de la fuente de luz (el que se produzcan líneas o bandas depende de si los que se excitan para producir luz son átomos -líneas- o moléculas -bandas- o incluso si la presión del gas es alta, pues en este caso las líneas se enchanchan hasta parecer bandas). Si a través de la red observamos una lámpara incandescente sólo veremos un espectro continuo homogéneo (es decir, todos los colores del arco iris sin que falte ninguno ni exista discontinuidad entre ellos): es el espectro continuo de emisión típico de las fuentes a altas temperaturas (llama de una vela, el Sol, cualquier estrella o una bombilla incandescente común y corriente). Sin embargo un fluorescente típico -que contiene vapor de mercurio- presenta además del espectro continuo (que es debido al fósforo que lo recubre interiormente) cuatro finas líneas de emisión de no demasiada intensidad (violeta, verde y dos amarillas muy juntas), de modo que el conjunto nos proporciona una luz fría de color luz blanca.

Para construir un **espectrógrafo** es preciso saber de qué partes está formado y cómo funciona cada una de ellas; vamos a verlo detenidamente.

En primer lugar tenemos la **rendija**, que tiene como misión mostrar nítidamente las líneas: de lo contrario éstas son borrones de color; lo mismo ocurre si la rendija es más ancha de 1-2 mm; puede hacerse con el filo de dos cuchillas nuevas encaradas dejando entre ellas una separación igual o inferior a 1 mm: cuanto más juntas estén más limpio (pero más débil, dado que penetrará menos luz) será el espectro obtenido y por el contrario cuanto más ancha más borrosas serán las líneas y bandas obtenidas. También puede fabricarse tan grande como se desee recortándola del fino metal -aluminio- de una lata de refrescos cualquiera: en este caso podremos emplear redes de difracción tan amplias como encontremos en el mercado, y no nos vemos obligados a fabricar rendijas de sólo 4 cm de longitud -la dimensión típica de una cuchilla de afeitar-.

El **elemento dispersor** de la luz puede ser un prisma óptico de buena calidad (que proporciona espectros de inferior calidad, salvo que utilicemos dos o tres de ellos unidos) o una **red de difracción** como el citado filtro fotográfico COSMOS B40 o incluso una auténtica red comercial: en el mercado podemos adquirir una de 570 líneas/mm por unas 5.000 Ptas. en la empresa PHYWE ESPAÑA, de Madrid (Tfno.: 91-6135155, Fax.: 91-6135062); a simple vista parece una simple diapositiva fotográfica prácticamente transparente aunque al mirar a través de ella cualquier fuente de luz -por ejemplo una lámpara de vapor de mercurio- nos ofrece un espectro rudimentario: aparecen así varias imágenes coloreadas adyacentes de la lámpara, cada una de las cuales corresponde a una línea simple, un doblete o incluso bandas de emisión; moviendo un poco el ojo podemos apreciar sin problemas el espectro de segundo orden.

Podemos construir un sencillo espectrógrafo con una caja de cartón o madera contrachapada de 30-40 mm de anchura, 30-40 de altura y 150-200 mm de longitud; en la parte delantera se instala la rendija y se fija con pegamento: podemos idear un sistema para ampliar/reducir la anchura de la rendija con un tornillo de paso fino y un resorte o bien dejar la rendija con una anchura fija, como yo siempre he hecho (1 mm de anchura o menos basta para obtener espectros con líneas nítidas). En el extremo opuesto a la rendija se instala la red de difracción y se fija al marco de madera o cartón; si empleamos el filtro fotográfico hemos de girar éste un cierto ángulo, tanto mayor cuanto mayor queramos que sea la dispersión conseguida: podemos montar el filtro sobre un soporte giratorio y calibrar su ángulo observando una fuente luminosa de espectro no continuo (no sirve una lámpara de incandescencia), por ejemplo una lámpara de bajo consumo (muy recomendable) o un fluorescente (menos recomendable, pero todavía válido): primero ponemos el filtro paralelo a nuestros ojos, luego miramos el espectro formado y

vamos girando el filtro hasta que el espectro aparezca ancho y nítido en su máxima calidad: en ese momento fijamos el filtro con pegamento (el blu-tack es ideal por su limpieza) para que no se mueva de posición. Si usamos una red de difracción comercial esta técnica no es precisa: basta con instalar la red paralela a los ojos para que mirando a través suyo y ladeando un poco la vista apreciemos el espectro de primer orden sin problemas o incluso el de segundo orden algo más débil: el de tercer orden sólo se aprecia en cuerpos brillantes y parcialmente solapado con el de segundo orden (el espectro ofrece el color violeta próximo a la rendija y el rojo más lejano de la misma).

Ahora no tenemos más que apuntar con el espectrógrafo una lámpara de bajo consumo, acercar la webcam, ajustar el control de brillo y contraste y el enfoque de la misma (a veces es preciso acercar mucho la webcam al espectrógrafo: de lo contrario la luz se debilita) hasta que en el monitor aparezcan las líneas: en ese momento ya tenemos el aparato listo para trabajar en sus primeras experiencias. No es difícil empezar a obtener espectrogramas: 3-4 minutos bastan para obtenerlos, aunque éstos deben grabarse en disco para procesarlos después (acentuar la ganancia, el contraste, el brillo, invertir los colores, ampliarlos a base de "estirarlos", etc...) y estudiarlos cómodamente. Muy útil es un "estiramiento" digital en sentido vertical, que nos convierte los "puntos gordos" en líneas, más fáciles de identificar, medir, comparar, etc... y que no altera en lo más mínimo el espectro original.

Dada la pequeña abertura de la rendija (ya que no hemos empleado ningún sistema óptico para recolectar luz) sólo podremos observar espectrogramas de cuerpos brillantes tales como lámparas de incandescencia (espectro continuo), lámpara de bajo consumo (espectro de emisión con líneas y bandas), fluorescente (espectro de emisión de líneas, por ejemplo las del mercurio), el Sol (espectro continuo con líneas de absorción), el fósforo de monitores de TV (espectro casi continuo, salvo en la parte roja donde el fósforo empleado presenta líneas de no emisión), la lámparita de argón que contiene la luz nocturna de los niños (o el pilotito de algunos pulsadores de la luz) y otros muchos con un poco de cuidado e imaginación. Aquellos que desde su casa puedan ver **tubos de descarga de gases** de los rótulos publicitarios comprobarán que éstos emiten líneas totalmente diferentes los unos a los otros: es debido a que unos utilizan helio, otros argón, otros vapor de mercurio o de sodio, etc... dependiendo del color que se desee emitir con el mismo.

Con un espectrógrafo casero basado en una red de difracción comercial (570 líneas/mm) el autor obtiene sin problemas **espectros de baja resolución** en de lámparas, fluorescentes, luces del alumbrado público (mercurio y sodio mayoritariamente) e incluso el solar de absorción: en este último caso la finura de las líneas y el excesivo brillo del continuo coloreado dificulta obtener resultados tan impactantes y rápidos como con lámparas domésticas, pero con un poco de cuidado y ajustando la ganancia, el contraste y el color de la webcam se pueden apreciar las líneas más intensas (oscuras en este caso): las del hidrógeno (en el violeta y el rojo), la del sodio (en el color amarillo: este doblete es difícil, salvo que el poder dispersor sea grande), así como algunas en el color rojo extremo debidas al hidrógeno y vapor de agua atmosférico.

No es fácil acoplar el espectrógrafo al ocular del telescopio, por lo cual tampoco es fácil observar espectros de cuerpos celestes tales como la Luna (un espectro similar al solar, ya que es simple luz solar reflejada), el de Venus o el de alguna brillante estrella... no obstante, cuidando el montaje y ajustando la ganancia de la webcam al máximo sería factible obtener, en principio, los espectros de las brillantes estrellas Sirio, Vega o Arturo con algunas de sus principales líneas espectrales. De momento no los he obtenido, aunque estoy en ello.

El espectro más espectacular es, sin duda, el de una lámpara doméstica de bajo consumo: visualmente la luz que emite tiene un tono agradable, cálido, entre blanca y crema; con la ayuda del espectrógrafo comprobamos que este fenómeno se produce porque la dos líneas de emisión más brillantes son verde y roja las cuales (por síntesis de color) dan amarillo; si añadimos una banda anaranjada (formada por una media docena de finas líneas muy apretadas) y un trío de líneas algo más débiles (una azul cielo, otra azul más oscuro y una violeta) podemos imaginar el resultado: blanco casi melocotón... El espectro obtenido por la webcam es muy pobre si lo comparamos con el que visualmente soy capaz de registrar: en la

mejor de mis imágenes digitales apenas si puedo contar 7-8 líneas en el espectro de segundo orden (a la izquierda del todo la rendija, en el centro el espectro de primer orden y a la derecha espectro de segundo orden con líneas y bandas) que es el más amplio y definido: una violeta, una añil, otra azul cielo, una verde muy intensa, una banda anaranjada débil (formada por varias líneas muy próximas mal resueltas) y una roja intensa; visualmente la verde se desdobra en dos, en la zona anaranjada aparecen hasta seis y en el color rojo no menos de cinco de diferentes brillos, anchuras y posiciones.

Si apunto con el espectrógrafo a un led verde claro (el del propio monitor me sirve) compruebo que es un espectro continuo similar al de una lámpara de incandescencia, en el cual no hay líneas ni bandas de emisión: sólo un arco iris que va desde el violeta profundo (a la izquierda) hasta el rojo profundo (a la derecha) pasando por el añil, azul, verde, amarillo y naranja.

Sin embargo una lámpara naranja de alumbrado nocturno es otra cosa: dado que la luz corresponde al **vapor de sodio** (a alta presión) el espectrograma obtenido no es continuo, sino de emisión con líneas; aparecen así diferentes imágenes de la lámpara cada una de las cuales dibuja una línea de emisión; para comprobarlo monto delante del objetivo de la cámara la red de difracción y ajusto el enfoque a infinito, apuntando acto seguido a una de las farolas que veo desde casa situadas a unos 25-30 metros de distancia: compruebo que en el monitor aparecen claramente imágenes de la lámpara de color violeta, añil, azul, verde profundo, verde claro, amarillo, naranja y rojo además de un continuo algo más débil en la zona anaranjada y rojiza que no logro resolver; éstas son las 8-10 principales líneas de emisión de la lámpara de vapor de sodio, aunque son visualmente son bastante más. Curiosamente en la zona de emisión del vapor de sodio (amarillo) aparece una línea de absorción muy marcada, quizá debido a una auto-absorción...

Si ahora apunto a otra farola de luz blanco-verdosa, que corresponde el **vapor de mercurio**, compruebo que sólo aparecen tres imágenes nítidas de la bombilla: una verdosa-azulada, otra verde y otra roja (en realidad visualmente tanto la verde como la roja son dos imágenes muy próximas, lo cual indica que se trata de un doblete: dos líneas bastante cercanas casi fundidas) cuya luz conjunta sería blanca con ligeros tintes azulado-verdosos debido al desigual brillo de las líneas que lo componen; no aparecen bandas (supongo que debidas a la baja presión del gas) ni líneas en otros colores o, al menos con este sistema tan rudimentario, yo no las aprecio. Al apuntar a una lámpara más próxima (unos 25 m) veo e incluso resuelvo un fino doblete en el amarillo (cuyas líneas están separadas por 2.1 nm), a la vez que el número de líneas en el rojo aumenta (sin embargo el mercurio no emite en el rojo: probablemente se deban a algún tipo de fósforo empleado para enriquecer la zona roja de su espectro).

Cuando necesito obtener **espectrogramas de resolución media** tengo que utilizar ya el espectro de segundo orden: esto me proporciona imágenes con mayor resolución, un espectro más amplio pero, lamentablemente, bastante más débil; esta técnica sólo es aplicable en las lámparas que brillan bastante por estar próximas y no se puede utilizar en todas las lámparas de alumbrado nocturno visibles desde mi casa. Con esta montaje he podido comprobar que algunas líneas simples son en realidad dobletes, así como llegar a intuir algunas débiles líneas más que por su debilidad sólo son presuntas candidatas. Utilizando el espectro de segundo orden la luz solar -o incluso la del cielo, en zonas cercanas al sol- es capaz de ofrecerme 10-20 líneas oscuras sobre un continuo coloreado, a la vez que la línea del sodio queda resuelta si la anchura de la rendija no es elevada: en este caso puedo ver dos finísimas líneas muy juntas (en realidad una dista de la otra sólo 0.597 nm).

Para obtener **espectrograma de alta resolución** y buena calidad -siempre dentro de mis posibilidades- utilizo un **sistema óptico** que me amplifique la imagen del objeto luminoso a la vez que me captura más luz: en mi caso utilizo unos **gemelos de 8 aumentos** (cuyo objetivo mide 21 mm de diámetro: el tamaño justo para ser cubierto completamente por la red) instalado sólidamente sobre el tubo óptico del telescopio; éste me sirve de mero soporte sólido y no interviene para nada en el espectro; una vez fijados los gemelos sobre el tubo con **blu-tack** (especie de masilla sintética azul empleada para colgar de la pared carteles pequeños) instalo delante de uno de los objetivos la red de difracción y la aseguro también al tubo del telescopio con blu-tack; moviendo el telescopio apunto a la lámpara de sodio y enfoco ahora la misma con

el mando de enfoque de los gemelos hasta verla nítida. Al mover el conjunto óptico lentamente hacia el cenit (empleando la montura del telescopio) puedo estudiar el brillante espectro de primer orden sin problemas, con una buena resolución y limpieza; asegurando ahora la webcam al ocular de los gemelos (pegándolo con blu-tack al telescopio) capturo las líneas con toda facilidad.

Mis últimas experiencias están encaminadas a unir la webcam a los prismáticos primero y al telescopio después para apuntar a los astros más brillantes del firmamento (Luna, Venus, Arturo); lo mismo con un poco de suerte puedo mostrar en un artículo futuro las principales líneas de absorción de algunas estrellas o planetas. Espero que así sea y pronto pueda elaborar un nuevo artículo con espectaculares imágenes a todo color.

Por último, ¿cuál es el **poder resolutivo** del sistema?; en teoría este no debe ser muy elevado dado que no usamos una red demasiado profesional, el sistema óptico no es de primera calidad ni los ajustes en los elementos son finos. Podemos determinarlo de modo aproximado si observamos el espectro de una lámpara de vapor de mercurio: en ella aparecen 6 líneas muy definidas, de las cuales cuatro son dobletes; en efecto, en la zona violeta aparece un doblete (404.7 y 407.8 nm) separados por 3.1 nanómetros mientras que en la zona amarilla aparece otro doblete (577.0 y 579.1 nm) separados por sólo 2.1 nanómetros. Pues bien, incluso a simple vista (empleando el espectro de primer orden) aprecio claramente ambos dobletes; con la webcam es fácil resolverle empleando unos gemelos de 8 aumentos delante de los cuales instalo la red de difracción: puedo alcanzar así una resolución de **0.22 nm/pixel** en aquellas lámparas más cercanas. La "prueba de fuego" sería poder desdoblar el doblete del sodio (589.592 nm y 589.695 nm) cuyas líneas están separadas por sólo 0.103 nm; para ello necesito un montaje especial que me hago del siguiente modo: en un folio de papel fuerte pego una lámina de papel de aluminio y en ella recorto, con infinito cuidado, una rendija de 30 mm de longitud con una anchura de 1 mm. Ahora no tengo más que examinar la luz solar con la red disminuyendo la luz recibida al examinarla a través de la rendija: empleando el espectro de primer orden veo casi una docena de finas líneas y aprecio una "línea gorda" en la zona del doblete del sodio, mientras que ésta queda perfectamente resuelta (¡dos finas líneas muy pegaditas!) con el de segundo orden; el espectro solar me muestra una buena cantidad de finas líneas en la zona verde (debido al magnesio) así como el azul, sin olvidar una línea en la zona roja debida al hidrógeno.

En resumen: una incursión en el campo de la Física atómica y molecular que no necesita de grandes medios ni dispendios económicos elevados.

## LÁMPARA DE VAPOR DE SODIO

En mayo y junio del 2000 he estudiado a fondo las lámparas de alumbrado de vapor de sodio y mercurio; la técnica básica que empleo está descrita en otro artículo anterior (publicado a mediados de junio del 2000), de modo que no me entretengo en indicarla y la doy por supuesta. Después de obtener abundantes espectrogramas (unos a baja resolución, otros con media y algunos con bastante alta resolución) he llegado a nuevas (julio del 2000) e interesantes conclusiones que plasmo aquí, algunas de ellas verdaderamente curiosas.

En otro artículo HTM anterior (**Espectroscopía I**) hablé en profundidad de cómo se podía construir un **espectrógrafo digital** a bajo precio, técnica que resumo brevemente: el mío está construido con una **red de difracción** (por ejemplo con el filtro fotográfico **COSMOS B40** o incluso una auténtica red comercial: en el mercado podemos adquirir una de 570 líneas/mm por unas 5.000 Ptas. en la empresa PHYWE ESPAÑA, de Madrid, Tfno.: 91-6135155, Fax.: 91-6135062) la cual instalo y fijo delante de la webcam. Cuando apunto con este montaje a una lámpara de bajo consumo, ajusto el control de brillo, el contraste y el enfoque logro que en el monitor aparezcan las líneas más brillantes de emisión o absorción; en ese momento ya tenemos el aparato listo para trabajar en sus primeras experiencias. Tal y como he comprobado no es difícil empezar a obtener espectrogramas: 3-4 minutos bastan aunque éstos deben grabarse en disco para procesarlos después (acentuar la ganancia, el contraste, el brillo,

invertir los colores, ampliarlos, etc...) y estudiarlos cómodamente. Muy útil es un "estiramiento" digital en sentido vertical, que nos convierte los "puntos gordos" (originados por la imagen de la bombilla, cuando la lámpara está lejana) en líneas, más fáciles de identificar, medir, comparar, etc... y que no altera en lo más mínimo el espectro original.

¿Cómo puede un átomo producir una línea espectral muy nítida?: porque emite (o absorbe) energía de una frecuencia **nu** muy determinada; de este modo si un átomo es excitado por un **cuanto** de la energía adecuada puede que uno de sus electrones exteriores -los de las órbitas internas no participan en este juego- tome la energía y salte a un nivel superior, en donde se mantendrá unos instantes; como este **estado excitado** no es natural en el átomo, el electrón tenderá a retornar a su **nivel usual de energía** emitiendo un fotón que se lleve esta energía excesiva: se produce la emisión de luz. Un espectroscopio registrará esta emisión como una fina línea luminosa coloreada, con una posición en el espectro -longitud de onda- muy determinada y siempre la misma: esta longitud de onda se mide en **nanómetros** (nm) que equivale a 10 **Ångströms**, la unidad que se empleaba antiguamente: así una línea que tuviese una longitud de onda de 5150 Å en el sistema antiguo equivale ahora a 515.0 nm. Otro modo de medir y cuantificar este salto es preguntarnos qué energía necesita el átomo para emitir este fotón: esta energía se puede medir en **electrónvoltios**, abreviada **eV**, equivalente a  $1.602 \times 10^{-19}$  J. Según este modelo un átomo como el hidrógeno emite ciertas líneas con una posición bien marcada, pero nunca en posiciones intermedias debido a que los saltos ocurren de unos niveles de energía a otros, pero no existen niveles intermedios (la energía está **cuantificada**); así cada línea espectral corresponde a un salto de nivel: como existen variados niveles energéticos, el átomo emite diferentes líneas, tantas más cuantos más niveles existan (algunas son invisibles, por ocurrir en zonas del espectro electromagnético indetectables por el ojo: la zona ultravioleta o la infrarroja, por ejemplo). En un gas excitado (bien por calor o por electricidad) los átomos emiten fotones, cada uno de ellos correspondiente a los diferentes saltos entre niveles; un gas no excitado puede absorber fácilmente estos mismos fotones desapareciendo, por tanto, estas líneas espectrales: se produce un **espectro de absorción** que será inverso (negativo) al de emisión.

Con este espectrógrafo casero basado en una red de difracción comercial el autor obtiene sin problemas **espectros de baja resolución** de lámparas de alumbrado nocturno, fáciles de conseguir (gratis en realidad: lo que ya es más difícil, casi imposible, es comprar una lámpara de vapor de sodio... al menos en Cáceres no es factible y el Ayuntamiento no es muy dado a venderlas o indicar dónde las adquiere...) y baratas de mantener, dado que en realidad están toda la noche encendidas ofreciendo el espectro en cualquier momento de la madrugada.

La luz naranja emitida por ciertas lámparas (existente en casi todas las ciudades) corresponde al **vapor de sodio**: el espectrograma obtenido no es un **espectro continuo**, (como el de las fuentes incandescentes, el Sol y las bombillas normales) sino que es un **espectro de emisión** con líneas y un continuo en la parte roja; al apuntar con el espectrógrafo digital a una de estas lámparas (en realidad cada farola contiene 2: de este modo puedo comparar, dos a dos, los espectrogramas y descubrir cosas interesantes en ellos o incluso comprobar si esa débil línea existe realmente o no) aparecen así diferentes imágenes de la lámpara cada una de las cuales dibuja una **línea de emisión**. Para obtener estos espectrogramas a baja resolución instalo delante del objetivo de la cámara la red de difracción y ajusto el enfoque a infinito, apuntando acto seguido a una de las farolas que veo desde casa: aparece entonces un **espectro de primer orden** que capturo con la webcam enfocando con ella en la zona de líneas coloreadas; compruebo que en el monitor aparecen claramente imágenes de la lámpara de color violeta, añil, azul, verde profundo, verde claro, amarillo, naranja y rojo además de un continuo algo más débil en la zona roja que no logro resolver; éstas son las 8-10 principales líneas de emisión de la lámpara de vapor de sodio, aunque visualmente son algunas más. Curiosamente en la zona típica de emisión del vapor de sodio (amarillo) aparece una **línea de absorción** muy marcada que, en teoría, no debería existir...

Cuando necesito obtener **espectrogramas de resolución media** tengo que utilizar ya el **espectro de segundo orden**, que capturo moviendo ligeramente el cabezal de la webcam y enfocándole: este espectro me proporciona imágenes con mayor resolución pero, lamentablemente, bastante más débiles; por ello esta técnica sólo es aplicable en las lámparas que brillan bastante (es decir, que están próximas) y no se puede utilizar en todas las lámparas

de alumbrado nocturno visibles desde mi casa. Con esta técnica he podido comprobar que algunas **líneas simples** son en realidad **dobletes**, así como llegar a intuir algunas débiles líneas más que por su escaso brillo sólo son presuntas candidatas. He comprobado que cuanto más próxima están las farolas mayor longitud (número de pixels en el monitor), brillo y resolución se obtiene en el espectrograma final, de modo que es deseable emplear lámparas cercanas.

Para obtener **espectrograma de alta resolución** y buena calidad -siempre dentro de mis posibilidades- utilizo un **sistema óptico** que me amplifique la imagen del objeto luminoso a la vez que me captura más luz: en mi caso utilizo unos **gemelos de 8 aumentos** (cuyo objetivo mide 21 mm de diámetro: el tamaño justo para ser cubierto completamente por la red) instalado sólidamente sobre el tubo óptico del telescopio; éste me sirve de mero soporte sólido y no interviene para nada en el espectro; una vez fijados los gemelos sobre el tubo con **blu-tack** (especie de masilla sintética azul muy empleada en oficinas) instalo delante de uno de los objetivos la red de difracción y la aseguro también al tubo del telescopio con blu-tack; moviendo el telescopio apunto a la lámpara de sodio y enfoco ahora la misma con el mando de enfoque de los gemelos hasta verla nítida. Al mover el conjunto óptico lentamente hacia el cenit (empleando la montura del telescopio) puedo estudiar el brillante espectro de primer orden sin problemas, con una buena resolución y limpieza; asegurando ahora la webcam al ocular de los gemelos (pegándolo con blu-tack al telescopio) capturo las líneas con toda facilidad. El sistema óptico es tan luminoso (Foto 1) que la webcam puede ver sin problemas las líneas que antes, pese a emplear el espectro de segundo orden, no llegaba ni a imaginar por su debilidad: de este modo en la zona amarilla del espectro aparece una mancha amarillo-anaranjada sobre la cual, nítida y muy oscura, aparece una línea que debería corresponder al conocidísimo **doblete del sodio** (589,592 nm y 588,995 nm, visible incluso en el espectro solar), mientras que la línea que antes apenas si podía adivinar en la parte roja del espectro ahora destaca en toda su brillantez; incluso es posible adivinar un doblete no muy cerrado en la zona amarilla que no corresponde al sodio. Si muevo un poco más los gemelos y apunto al **espectro de segundo orden** compruebo asombrado que las líneas continúan viéndose perfectamente mientras que la resolución es doble, aunque ahora aparecen algo más oscuras que antes: el doblete amarillo se aprecia perfectamente con líneas finamente separadas.

Con este sistema es facilísimo obtener rutinariamente espectros de estas lámparas de vapor de sodio y mercurio, y eso es lo que he estado haciendo durante todo el mes de junio y parte de julio: ha sido una suerte que cada farola contenga dos lámparas, pues de este modo es fácil comprobar que los dos son idénticos, aunque no siempre (pero ese tema lo dejo para más tarde). Un espectrograma normal muestra la zona violeta del espectro a la izquierda, quedando la roja a la derecha: la resolución es tan elevada (podemos hablar cómodamente de **0,22 nanómetros/pixel** si empleamos el espectro de primer orden) que las líneas aparecen claramente definidas, cada una con una intensidad, coloración y posición muy claras. Sólo las líneas más débiles no llegan a quedar plasmadas con facilidad, necesitando aumentar el brillo, el contraste o la ganancia de la webcam (en este caso las líneas más brillantes aparecen engrosadas, saturadas y con los colores falseados). Como es natural cada una de las líneas queda representada por una imagen de la lámpara, en la cual es factible ver -si no está sobreexpuesta- el filamento interno (más brillante) así como la envoltura de vidrio o la parte interna -reflector- de la misma.

El espectro de esta lámpara de vapor de sodio muestra en la zona violeta 2 líneas evidentes y 1 añil (con buenas imágenes las dos violetas son en realidad dos dobletes y una línea simple cada una mientras que la añil es otro doblete), una azul cielo, otra verde-azulada, una amplia zona oscura sin líneas, otra línea verde oscura, una brillantísima línea verde esmeralda, un doblete amarillo, una brillante mancha amarillenta-anaranjada dividida en dos por una línea muy oscura (que corresponde en realidad al doblete de emisión del sodio, **doblete de absorción** en este caso) y luego un continuo rojizo en el cual aparece una única línea roja... en total llego a contar 11-12 líneas de emisión y 1 de absorción. Mis imágenes parecen apuntar a que algunas de ellas son dobletes muy cerrados (sobre todo las añiles y violetas), aunque no puedo asegurarlo todavía.

Curioso ha sido comprobar, al comparar espectros (Foto 2) que una lámpara aparentemente idéntica a las demás emite algunas -pocas- líneas diferentes que podíamos llamar **líneas**

**anómalas:** pude comprobar con el espectrograma en la mano que esa lámpara -no sé por qué motivo- presenta una brillante línea en el verde y otra en el violeta lejano que las demás no ofrecen; cuando superpongo el espectro de ambas lámparas y le resto uno al otro me quedo con la diferencia: una intensa línea verde y otra violeta brillante... Si estudio con buena resolución la zona de la línea verde compruebo que todas las lámparas -salvo la "rara"- presentan en la misma posición un doblete débil de la misma intensidad, pero que sin embargo la lámpara "rara" muestra una de las líneas del doblete más brillante, mientras que la otra línea simplemente no existe o se ha debilitado mucho. ¿A qué puede ser debido? Misterio por el momento; lo que sí es cierto es que después de un completo análisis he comprobado que estas dos líneas brillantes (pertenecientes al mercurio, como comprobé mucho más tarde el calibrar correctamente la escala) no son más que "reforzamientos" de líneas existentes en otras lámparas, más intensas y marcadas que las de las demás; he comprobado que cuando al caer la tarde ambas lámparas se encienden la "rara" presenta una luz más blanca, color que creo justificado por una línea violeta y otra verde las cuales tienden a "azulear" la luz de la misma. (Posteriormente he comprobado que este fenómeno sólo se repite a intervalos aleatorios... ¿Depende de la temperatura, de la presión, del tiempo que lleve conectada?, ¿es cíclico?... todavía me queda mucho por aprender).

¿Cómo es posible que la lámpara de vapor de sodio emita tantas líneas?: la respuesta no es fácil; en principio el vapor de sodio emite una brillante línea amarilla (en realidad un doblete cerrado) que corresponde a la **transición de niveles 3p a 3s** en los 589,6 y 589,0 nm; otro doblete aparece en la **transición 5s a 3p** en la zona de los 616,1 y 615,4 nm (luz roja anaranjada), otro más en la **transición 4d a 3p** en los 568,8 y 568,3 nm (verde esmeralda), otro doblete en la transición **6s a 3p** en los 515,4 y 514,9 nm (verde-azulado), otro doblete más en la **transición 5d a 3p** de los 498,3 y 497,9 nm (azul cielo) y el último doblete en la **transición 6d a 3p** en los 466,9 y 466,5 nm (añil). Todas estas transiciones se deben a que contiene 11 electrones que se disponen del siguiente modo: 2 en el **orbital s** de la primera **capa K** (que corresponde al **nivel fundamental**), 8 en la segunda **capa L** (repartidos del siguiente modo: 2 en el **orbital s** y 6 en el **orbital p**) y el último electrón (**electrón de valencia**) queda solo en el **orbital s** de la tercera **capa M**. Los 10 primeros electrones no intervienen para nada en el espectro, dado que están dentro de **capas saturadas**; es la excitación/desexcitación de este único electrón la que origina, por subida y caída a cualquiera de los niveles inferiores (o incluso el nivel fundamental) las diferentes líneas espectrales, cada una de las cuales contiene una energía (color o longitud de onda) muy determinada. Podemos comprobar que todas estas líneas son, en realidad, dobletes y que la separación entre líneas dentro del doblete es de 0.7-0.4 nm como mucho: esto es debido a que el electrón puede poseer un spin de +1/2 o -1/2 y que la diferente orientación de éste causa la ligera diferencia de energía entre las líneas del doblete.

¿Por qué cada transición tiene un color determinado?: porque se efectúa desde niveles de diferente energía; por ejemplo el salto del nivel 3p a 3s posee más energía que el salto del nivel 5s a 3p, dado que el primero emite fotones amarillos mientras que el segundo los emite rojos (de la fórmula  $E = h \times \nu$  deducimos que los fotones rojos poseen menos energía que los amarillos, los verdes o los violetas). Para que se realice un salto o un descenso entre estos niveles se necesita la energía apropiada.

¿Cómo se explica la línea de absorción en la zona amarilla del espectro, línea que en una lámpara de laboratorio es de emisión?: es fácil de deducir: cualquier lámpara de gases empleada en un laboratorio posee una presión interna muy reducida (cerca de 0,02 atmósferas) mientras que la bombilla de vapor de sodio presenta una presión de 1,5 atmósferas, como he averiguado recientemente. En ambos casos los átomos del sodio son excitados por la electricidad, pero en el primer caso al existir tan pocos átomos que colisionen en el interior en la lámpara (recordemos que la presión es muy baja, y que la presión no es más que la colisión de partículas contra las paredes del recipiente) los átomos pueden excitarse y emitir luz amarilla al desexcitarse, pudiendo escapar estos fotones de la lámpara sin ser absorbidos por otros átomos; por el contrario en el interior de la lámpara del alumbrado nocturno la presión es 75 veces superior (hay, por tanto, muchísimos átomos y el recorrido libre medio antes de colisionar con otro átomo es muy corto) por lo cual es muy difícil que un fotón recién emitido llegue a salir de la lámpara: lo más normal es que nada más emitirse choque contra otro átomo no excitado y sea absorbido casi al instante (este fenómeno se denomina **auto-absorción**).

Esto explica la línea de absorción en la radiación más típica del sodio: la del color amarillo. Ahora bien, mis espectrogramas muestran que ambos lados de la zona amarilla en donde no hay emisión sí aparecen sendas zonas de brillante color amarillo y naranja; ¿por qué es esto así?: la respuesta radica en que al chocar los átomos violenta y frecuentemente unos contra otros es posible que el átomo emita con un poco más de energía adicional sobre la que ya tiene habitualmente, por lo cual la longitud de onda de la línea será algo más anaranjada o algo menos amarilla, dependiendo de la energía del choque. Al no ser exactamente igual esta energía a la de la línea amarilla estos fotones no pueden ser absorbidos (su energía es diferente), con lo cual escapan y aparecen sendas zonas brillantes a ambos lados de la zona oscura: es cuestión de estadística de partículas y de la energía media de colisión.

¿Cuál es el **poder resolutivo** del sistema?; en teoría no debe ser muy elevado dado que no usamos una red demasiado profesional (sólo son 570 líneas/mm), el sistema óptico no es de primera calidad (sería mejor emplear unos prismáticos o incluso un telescopio como objetivo óptico) ni los ajustes en los elementos son finos. La resolución **R** de una red puede calcularse a partir de la fórmula  **$R = 1 : (N \cdot m)$**  en donde **N** es el número de líneas/mm y **m** el orden del espectro empleado; mis cálculos indican que para el espectro de primer orden mi red tiene entonces:  $R = 1 : 570$  de donde  **$R = 0.0017543$** . Si empleo el espectro de segundo orden esta resolución queda:  $R = 1 : (570 \times 2)$  de donde  **$R = 0.000877$** . Bien pero, ¿qué dobletes podemos resolver, ¿desdoblaremos el del mercurio? Para saber cuál es la separación de un doblete determinado aplicamos la fórmula  **$S = D \cdot I$**  en donde **D** es la diferencia de posición de las líneas y **I** la posición del mayor de ellos; de este modo si tenemos que el doblete del mercurio presenta líneas a 579.1 y 577.0 nm, operando tenemos:  $S = (579.1 - 577.0) : 579$  de donde  $S = 0.0036$ ; como el poder resolutivo de la red es inferior ( $0.0036 > 0.0017543$ ), quedará perfectamente resuelto incluso con el espectro de primer orden. Sin embargo el doblete del sodio no es tan fácil, pues tenemos una línea a 589.59 y la otra a 589.00 nm, con lo cual la separación es:  $S = 0.001001$  y esto nos indica que no se puede resolver con el espectro de primer orden ( $0.001001 < 0.0017543$ ), pero sí con el de segundo orden ( $0.001001 > 0.000877$ ).

Mis cálculos indican que, empleando el espectro de primer orden, mi red debe proporcionar un poder resolutivo teórico de **1.0367 nm** mientras que si empleo el espectro de segundo orden este poder sube a los **0.518 nm**: suficiente para resolver el doblete del sodio (líneas separadas 0,597 nm: de hecho al estudiar el espectro solar con el primer orden el doblete del sodio se aprecia como una "línea gorda"); al consultar obra de óptica compruebo que para resolver el doblete del sodio es preciso emplear, al menos, una red de 500 líneas/mm trabajando con el espectro de segundo orden (o bien una red de 1.000 líneas/mm si se utiliza el de primer orden.) Necesitaba verificarlo en la práctica: observando visualmente el espectro de primer orden de la lámpara de vapor de mercurio (a través de los gemelos de 8 aumentos) llegué a resolver sin problemas su doblete amarillo (577.0 nm y 579.1 nm): podía separar 2.1 nm con facilidad e incluso hubiese vista líneas separadas por la mitad de esta distancia (1.05 nm) y bastante más si hubiese trabajado con el de segundo orden; mis cálculos y la observación cuadraban muy bien. Cuando mucho más tarde logré calibrar la escala y ponerla a prueba con el doblete amarillo del mercurio comprobé que mi monitor me ofrecía una resolución práctica de **0.218 nm/pixel**: en mis imágenes se puede apreciar bastante claramente el doblete (2.1 nm) separado por 10 pixels, mientras que el doblete del sodio (0.597 nm) no llega a desdoblarse al estar representado sólo por 3 pixels; probablemente empleando el espectro de segundo orden pueda resolverlo. El que la escala en el monitor sea inferior al poder resolutivo (0.218 nm/pixel < 1.0367 nm) no quiere decir que resuelva mejor, sino que una misma longitud queda representada por más pixels en el monitor y, por tanto, es más cómodo de visionar y medir con respecto a una escala; si en vez de disponer de 10 pixels para separar las líneas del mercurio hubiese tenido sólo 3 me hubiese visto apurado para desdoblarla o medirla, ya que bastaría tener un poco borroso el espectrograma (o ligeramente sobreexposto) para que ambas se fundiesen en una sola. Con la escala actual (para el espectro de primer orden) el poder resolutivo teórico queda cubierto por 5 pixels.

Para analizar en profundidad el espectro, calibrar su escala e identificar adecuadamente todas y cada unas de las líneas (y el elemento que las producía) debía empezar por suponer que las principales líneas serían producidas por el sodio: de este modo la línea de absorción en el amarillo, la línea roja y la línea verde situadas alrededor de este claro jalón me podrían servir como referencia; cuando consulté el espectro teórico del sodio comprobé que tanto la verde,

como la de absorción amarilla y a roja parecían estar en los lugares esperados: ya tenía situadas las tres primeras líneas del sodio. Este elemento produce, además, otra intensa línea en la zona azul cielo y una más en el añil: las dos aparecían intensas en mis espectrogramas. Pese a todo necesitaba crear y calibrar una escala (Foto 1) en la cual pudiese medir, con la mayor precisión, la longitud de onda de las líneas y comprobar si eran o no las que suponía; para ello situé el origen de mi escala en la línea roja del sodio (616.1 nm) y el final de la misma en la línea verde (568.8 nm): conté los pixels que había entre ellas (217) y dividí la diferencia de longitud de onda (47.3 nm) entre este número de pixels; la escala resultante sería entonces de 0.2179723502 nm/pixel. Acto seguido prolongué la escala hasta abarcar el extremo violeta y contando los pixels hice marcas mayores a intervalos de 100 pixels: me servirían para tener una escala aproximada; acto seguido dividí toda la escala a intervalos de 20 pixels para poder conocer con la mayor precisión la posición de todas las líneas. Finalmente moví toda la escala hasta que una de las marcas mayores (que rotulé como 568.8 nm) quedó exactamente sobre la línea verde del sodio: a partir de ella calcularía el resto de las marcas sabiendo que 100 pixels eran 21.797 nm y que 20 pixels equivalían a 4.359 nm; de este modo la primera marca del color rojo extremo empezaba en los 612.39 nm mientras que la última marca, en el violeta, terminaba en los 416.22 nm: mis espectrogramas tenían estos límites extremos.

Empleando las marcas mayores como jalón, y las pequeñas como referencia fina, fui midiendo todas y cada unas de las líneas del espectrograma: en ocasiones fue preciso afinar en la medición y contar, uno a uno, los pixels; con este sistema podía estimar la posición de cada línea con centésimas de nanómetro si era preciso; pero todavía era necesario comprobar que mi escala estaba perfecta y no era una simple quimera: para ello medí las líneas que rodeaban a la amarilla -de absorción- obteniendo las siguientes longitudes de onda:

<b>posición (nm)</b>	<b>546.3</b>	<b>568.8</b>	<b>577.7</b>	<b>579.9</b>	<b>589.5</b>	<b>616.1</b>
<b>color</b>	verde	verde	amarillo	amarillo	amarillo	rojo

Y las comparé acto seguido con las conocidas del vapor de sodio, obteniendo el siguiente resultado:

<b>posición (nm)</b>	<b>546.3</b>	<b>568.8</b>	<b>577.7</b>	<b>579.9</b>	<b>589.5</b>	<b>616.1</b>
<b>color</b>	verde	verde	amarillo	amarillo	amarillo	rojo
<b>sodio</b>		568.8			589.6	616.1

De esas 6 líneas (dos de ellas un doblete amarillo bastante cerrado) 3 parecían pertenecer al sodio con un error de 0.3-0.1 nm: parecía que mi escala estaba bien calibrada; sin embargo era posible (aunque no deseable) que al extender mi calibración fuera de esta zona existiese un error, y que éste fuese creciendo conforme me separaba de la zona conocida en dirección al color violeta. Dado que el sodio emite dos líneas más, una en el color azul (498.3 nm) y otra en el violeta (466.9 nm), extendí mi escala hasta esta zona; al hacer las pertinentes mediciones obtuve una nueva tabla con más líneas bien medidas:

<b>posición (nm)</b>	<b>467.4</b>	<b>498.6</b>	<b>546.3</b>	<b>568.8</b>	<b>577.7</b>	<b>579.9</b>	<b>589.5</b>	<b>616.1</b>
<b>color</b>	añil	azul	verde	verde	amarillo	amarillo	amarillo	rojo
<b>sodio</b>	466.9	498.3		568.8			589.6	616.1

La tabla me indicaba que había medido todas las líneas del sodio con un error máximo de 0.5 nm (en la zona violeta) mientras que el resto de las líneas presentaban un error máximo de 0.3-0.1 nm. Conclusión provisional: la lámpara contiene vapor de sodio. Segunda conclusión provisional: existe otro elemento químico que produce también líneas. Era preciso comprobar este punto e identificar, si era posible, ese elemento químico. Haciendo suposiciones razoné así: dado que el vapor de mercurio se emplea en fluorescentes y otras lámparas de alumbrado nocturno (cuyo color es blanco con ligeros tonos azul-verdosos), ¿por qué no suponer que al sodio le han añadido algo de vapor de mercurio para "azulear" su luz naranja? Tenía que comprobarlo con pruebas de peso. Al estudiar la bibliografía sobre el vapor de mercurio comprobé que este elemento emite dos líneas violetas (405 y 435.6 nm), una verde (546.1 nm)

y finalmente un curioso doblete amarillo (579.1 y 577.0 nm); al medir nuevas líneas y comprobar estos números con mi tabla obtuve estos datos:

<b>mis valores</b>	<b>436.7</b>	<b>467.4</b>	<b>498.6</b>	<b>546.3</b>	<b>568.8</b>	<b>577.7</b>	<b>579.9</b>	<b>589.5</b>	<b>616.1</b>
<b>color</b>	violeta	añil	azul	verde	verde	amarillo	amarillo	amarillo	rojo
<b>sodio</b>		466.9	498.3		568.8			589.6	616.1
<b>mercurio</b>	435.83			546.07		576.96	579.07		

Tercera conclusión preliminar: las principales líneas espectrales capturadas son compatibles con el modelo "vapor de sodio+vapor de mercurio" dentro de un error máximo de 0.87 nm (Foto 2), diferencia que incluso puede provenir de un mal calibrado o una mala medición en la posición.

Sin embargo pese a que 9 líneas están identificadas con claridad todavía me quedan algunas más en la zona violeta, añil y verde que no logro casar con ninguno de estos elementos, y que pudieran provenir de algún tipo de fósforo (recordemos que en las lámparas de vapor de mercurio se añade un **luminóforo** que produce varias líneas en la parte roja del espectro con la intención de blanquear su luz) o gas (helio, neón, etc...) que no puedo identificar adecuadamente. El conjunto completo de líneas medidas por mi presentan estos colores y longitudes de onda aproximadas:

<b>Color</b>	violeta	violeta	violeta	añil	añil	añil	azul	verde	verde	verde	amarilla	amarilla	amarilla	roja
<b>Nm</b>	<b>436*</b>	<b>441.29</b>	<b>451.5</b>	<b>455.0</b>	<b>467</b>	<b>475.5</b>	<b>498</b>	<b>515.4</b>	<b>546*</b>	<b>568</b>	<b>577</b>	<b>579</b>	<b>589</b>	<b>616</b>
<b>Origen</b>	Hg	¿?	¿?	¿?	Na	¿?	Na	¿?	Hg	Na	Hg	Hg	Na	Na

He marcado con (\*) aquellas líneas anómalas o reforzadas en el espectrograma de algunas lámparas y con (¿?) las 5 que no logro identificar de ninguna manera. ¿Cómo puedo saber a qué elemento químico pertenecen?: sólo haciendo suposiciones y comprobando después, laboriosamente, sus línea al carecer de bibliografía sobre ellos; sólo si se trata de un elemento químico (o compuesto molecular conocido) tendría posibilidades de identificarlo.

Puestos a especular a la ligera podríamos suponer que la lámpara contiene hidrógeno: sin embargo sus líneas espectrales son roja (656.3 nm), azul (486.1 nm) y violeta (434.0 nm) y ninguna de ellas aparece, salvo que aceptemos un intolerable error de 2.7 nm en esta última línea...: el hidrógeno no es el elemento buscado. El helio emite nada menos que 5 líneas en el intervalo capturado por mi webcam, pero la naranja (587.56 nm) dista 1.94 de la que yo mido, la azul (501.57 nm) dista 2.97 nm, la añil (492.19 nm) nada menos que 6.41 nm, la violeta (471.31 nm) otros 3.91 nm y la última del violeta (447.15 nm) se separa 10.45 nm de las que yo mido: tampoco es el helio. Puedo analizar las líneas espectrales de varias moléculas ionizadas a ver qué ocurre: miro el C<sub>2</sub> y compruebo que su emisión ocurre en los 473.7, 516.5 y 563.5 nm: comparadas con las mías encuentro una diferencia de 1.8, 1.1 y 4.5 nm: el error es excesivo y puedo descartarle también; el CO<sup>+</sup> emite una línea en los 550.2 nm y ésta tampoco aparece: descartado; el H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> emite una línea en los 619.8 nm y salvo que admita un error de 3.7 nm tampoco aparece: descartado; el magnesio presenta un doblete en los 517.3 y 518.4 nm que parece coincidir con una de las líneas desconocidas con una diferencia de 1.9 y 3 nm respectivamente: haciendo la vista gorda podría suponer que es el magnesio el que origina esa línea, pero dado que este doblete presenta sus líneas separadas por nada menos que 1.1 nm y esta resolución la alcanzo (sin ver para nada dos líneas, sino una muy nítida) tengo que descartarle de inmediato. Sé que en los laboratorios de física se emplean las lámparas de xenón para demostrar el **efecto fotoeléctrico**, dado que emite abundantes radiaciones ultravioletas y violetas: ¿puede ser xenón el tercer elemento incluido en la lámpara de sodio? Es posible pero no puedo comprobarlo en la práctica al desconocer la posición de las líneas de emisión de este gas. Sin embargo me queda una última posibilidad: que sea debida a algún tipo de fósforo; examinando durante el día las lámparas (los prismáticos me servían perfectamente) comprobé que aparecen blancas al estar recubiertas internamente de alguna sustancia; es posible, por tanto, que alguna de estas líneas se origine por fluorescencia de cierto tipo de fósforo: en este caso quizá el propio mercurio provoque esta fluorescencia por la emisión de líneas ultravioletas.

En un montaje de varios espectrogramas de la misma lámpara (Foto 1 y 2) se puede observar que en ciertas ocasiones las líneas del mercurio aparecen intensas, pero en otras ocasiones estas líneas apenas si destacan; sin embargo en otras lámparas (no en las anteriores) se pueden estudiar siempre estas líneas, a la vez que el doblete amarillo del mercurio es muy nítido: como contrapartida no aparece la línea de absorción del sodio, pero sí una brillante línea amarilla en su lugar (¿quizá el doblete de emisión?); esto me hace pensar que la presión en su interior es menor, dado que no se produce auto-absorción, o bien que contiene una cantidad mayor de vapor de mercurio y menor de vapor de sodio. También es posible que unas bombillas sean más nuevas que otras, por lo cual ambos vapores aparecen claramente y sólo con el paso del tiempo el sodio muestra auto-absorción, a la vez que el mercurio refuerza sus líneas sólo esporádicamente (por ejemplo cuando se enfría). O incluso cabe la posibilidad que la proporción de gases (o su presión interna) sea diferente; esta cuestión la dejo de momento.

Puedo determinar la energía de estos fotones sin problema empleando la fórmula:  $E = 1240 \text{ eV nm} : \lambda$  en donde  $\lambda$  es la longitud de onda (en nanómetros) de las diferentes líneas espectrales. Con ella puedo elaborar una tabla orientativa que nos dé idea de la energía de cada línea:

<b>Nm</b>	<b>436</b>	<b>441</b>	<b>451</b>	<b>455</b>	<b>467</b>	<b>475</b>	<b>498</b>	<b>515</b>	<b>546</b>	<b>568</b>	<b>577</b>	<b>579</b>	<b>589</b>	<b>616</b>
<b>eV</b>	2.84	2.81	2.75	2.72	2.65	2.61	2.49	2.40	2.27	2.18	2.15	2.14	2.10	2.01

Como puede verse su energía está entre los 2.84 y los 2.01 eV como límites (el espectro visual contiene fotones con energías de 3.1 a 1.65 eV en sus extremos violeta y rojo -400 nm y 750 nm respectivamente-). El análisis de las líneas desconocidas indican que 4 de ellas son energéticas (zona violeta y añil) mientras que la última (zona verde) poseen una energía algo menos elevada pero todavía notoria.

Casi 20 días después de iniciados estos trabajos asistí por casualidad al encendido de la lámpara: comprobé asombrado que la misma empezó a brillar con luz blanco-azulada en vez del amarillo del sodio, y sólo después de uno-dos minutos su luz empezó a amarillear poco a poco; me asaltó una idea "luminosa": la lámpara comienza a brillar por la excitación del vapor del mercurio y luego, sólo más tarde, el sodio empieza a ser activado a medida que se calienta, se evapora o se excita... De modo que a la siguiente tarde con la red en la mano comprobé este hecho: nada más conectarse la lámpara aparecen las típicas e inconfundibles líneas del mercurio (violeta, verde y el doblete amarillo), las cuales dan origen conjuntamente a una luz blanco-azulada; poco a poco comienzan a aparecer las líneas del sodio hasta que éstas ganan intensidad y el espectro termina por ser el capturado por mí. Intenté capturar con la webcam una secuencia de imágenes en las que se apreciase claramente este hecho, pero toda la secuencia ocurre en un tiempo inferior a los 3 minutos de modo que sólo con mucha habilidad y después de varios intentos infructuosos lo conseguí: en mis imágenes (Foto 4) se ve al principio la emisión típica del mercurio (línea verde y amarilla), luego la aparición de la línea violeta, más tarde comienza a emitir el verde y el amarillo del sodio -a la vez que se refuerzan las del mercurio- hasta que, finalmente, tanto el mercurio como el sodio brillan en todo su esplendor; el último en parecer es el continuo rojo.

Todos los esfuerzos por identificar los principales elementos componentes se habrían reducido con asistir al encendido... esto indica indefectiblemente que primero se excita el mercurio y luego el sodio, hasta que finalmente ambos emiten energía luminosa conjunta.

Aunque sigo trabajando en la obtención de espectrogramas de mayor calidad y en la determinación exacta de las longitudes de onda de todas las líneas, aquí termina por el momento el análisis de las lámparas de vapor de sodio.

**Francisco A. Violat Bordonau**

Asesores Astronómicos Cacereños

[violat@olanet.net](mailto:violat@olanet.net)

[fviolat@yahoo.es](mailto:fviolat@yahoo.es)