

Mensajes en la luz de las estrellas

Color, temperatura, composición química y
movimiento de una estrella



Network for Astronomy School
Education - International
Astronomical Union



CRÉDITOS

Texto: Beatriz García y Ricardo Moreno

Diseño gráfico: Silvina Perez Álvarez

Editorial: Albedo Fulldome S.L. Barcelona, España, 2018

ISBN: 978-84-15771-67-8



Día Internacional
de la Luz

16 de Mayo



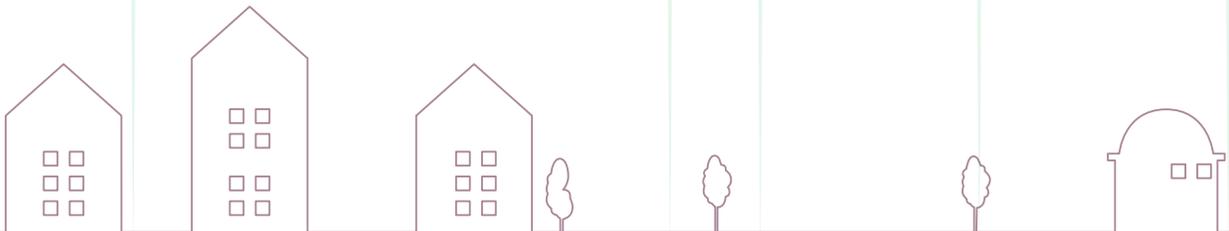
PRÓLOGO

La luz es esa maravillosa forma de energía que nos salva de la oscuridad y el aislamiento y nos revela la belleza de todo lo que existe. También transmite información sobre cada objeto que la irradia. Y, en el caso de los objetos en el cosmos que no podemos tocar o escuchar, proporciona datos que son esenciales para nuestra comprensión de las galaxias, las estrellas y los planetas. El color de una estrella nos dice cuán caliente está. Las longitudes de onda donde la luz está ausente pueden decirnos la composición de los elementos de un objeto. El grado en que las longitudes de onda de la luz se desplazan durante el movimiento es una señal de qué tan rápido puede estar alejándose de nosotros o acercándonos a nosotros.

Este libro describe las propiedades de la radiación electromagnética y cómo se produce en los átomos de una manera comprensible, da instrucciones simples sobre cómo hacer instrumentos que permitan medir sus propiedades y, lo principal, la presenta en un contexto astronómico donde la luz de las estrellas es una forma especial de comunicación que crea una armonía entre esas estrellas y nosotros los humanos que intentamos entenderlas como la fuente esencial de energía que mantiene la vida en la Tierra.

Este libro es excelente para explicar la luz de una manera simple pero correcta, le da al lector una apreciación de cuán importante es y cómo podemos entenderla mejor, como así también, a los objetos que la irradian.

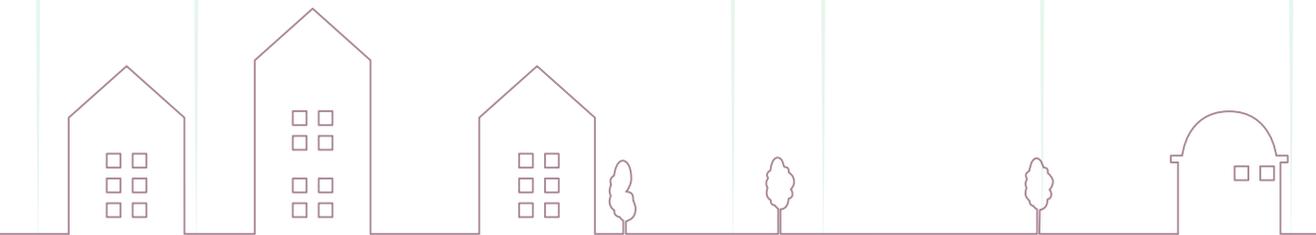
Robert Williams
Agosto 2018



INTRODUCCIÓN

La espectroscopía es una técnica poderosa que representa una ventana incomparable al conocimiento del cosmos. La huella digital de los elementos presentes en los espectros, han permitido establecer las abundancias químicas en el universo y entender parte de su evolución. En este texto proponemos una aproximación al estudio de la luz desde varias perspectivas, tanto históricas como de conocimiento de la estructura de la materia a partir del análisis espectroscópico de la energía electromagnética que producen las estrellas en los mecanismos de nucleosíntesis.

El libro incluye, además, experiencias sencillas que permiten comprender de qué manera se comporta la energía electromagnética en determinadas condiciones y cómo, esta radiación interactúa con la materia brindando valiosa información a los astrónomos.



EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las ondas electromagnéticas son una variación periódica de dos campos, el eléctrico y el magnético, que se transmite en el espacio sin necesidad de un medio material, como ocurre en el sonido.

La luz es un tipo de onda electromagnética, con una frecuencia f y una longitud de onda λ que puede ver el ojo humano. Pero hay muchas más ondas electromagnéticas, con otras frecuencias. El conjunto de todas esas ondas es lo que conocemos como espectro electromagnético, que se muestra en la Fig. 1, en orden creciente de frecuencias (y decreciente de λ). Aunque no hay límites claros, el espectro se suele dividir en regiones cuyas ondas tienen un comportamiento similar: radio, microondas, etc. En la figura se indican algunos objetos del tamaño de las longitudes de onda en esas regiones: edificios, insectos, átomos, etc.

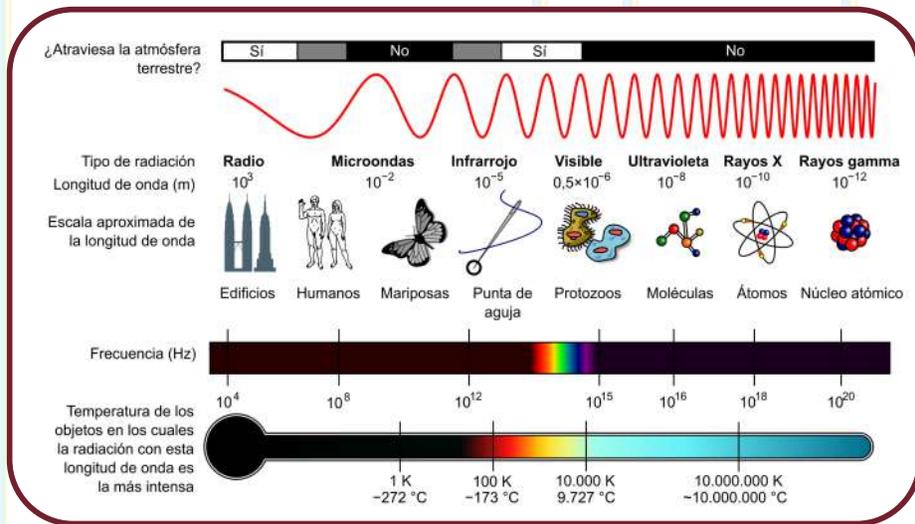
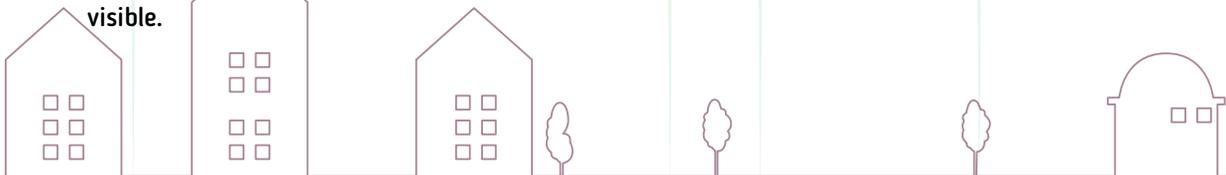


Fig. 1: El espectro electromagnético.

DETECCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

Nuestro ojo es un estupendo detector óptico con el que el ser humano ha nacido, pero que sólo es sensible a una pequeña región del espectro electromagnético: el que va desde el **rojo**, con longitud de onda de unos 750 nm, una frecuencia de $4 \cdot 10^{14}$ Hz y poca energía, pasando por el **naranja, amarillo, verde y azul**, hasta llegar al **violeta**, con longitud de onda más pequeña, de unos 400 nm, frecuencia más alta, casi $8 \cdot 10^{14}$ Hz y con la mayor energía dentro del espectro visible.



Más allá del rojo y del violeta existen otras ondas no visibles al ojo humano, con una energía que nos da información de los procesos en los que son generadas. Para poder estudiarlas, solamente hay que tener el detector adecuado.

Por ejemplo en la Fig. 2 aparece el Sol en distintas longitudes de onda, la mayoría no visibles para nuestros ojos. Esas fotografías se han hecho con detectores especiales sensibles a esas longitudes de onda, y los colores son simulados, excepto en la imagen en el visible.

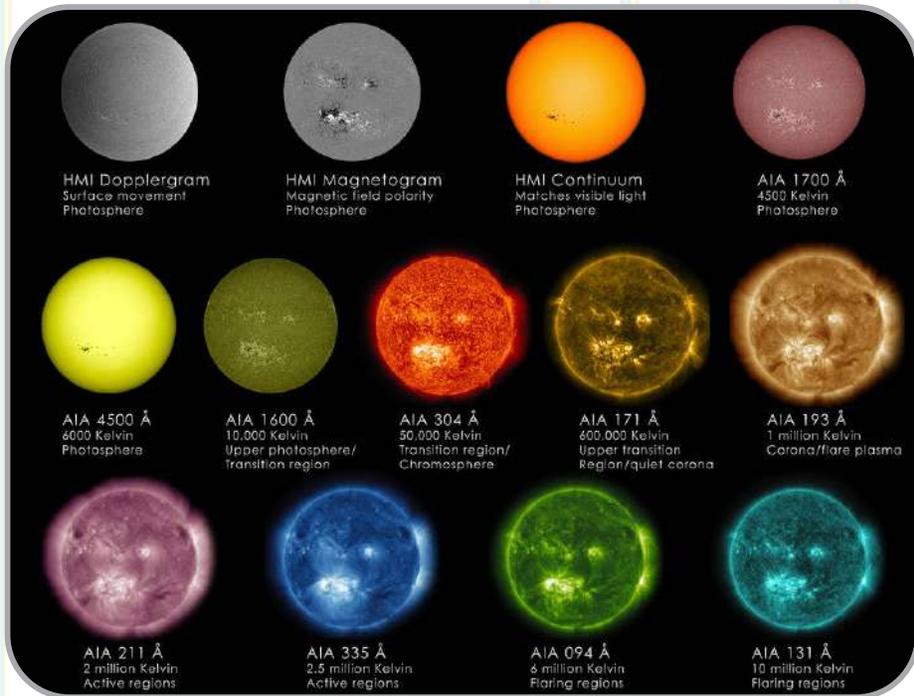


Fig. 2: El Sol en distintas longitudes de onda. Crédito: NASA/SDO/GSFC.

Las estrellas - el Sol es una de ellas - emiten en muchas longitudes de onda, también en el visible, por los violentos procesos que se producen en ellas, y por sus altas temperaturas. Pero en el Universo también hay materia mucho más fría, por ejemplo, nebulosas y nubes de material interestelar, que no emiten radiación visible, pero sí en longitudes de menos energía, como el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio, y podemos observarlas en esas longitudes de onda, si tenemos los detectores adecuados.

Estudiar el Universo en todas las regiones del espectro electromagnético, lo que los astrónomos denominan "observación multi-onda", nos permite tener una imagen mucho más precisa de su estructura, temperatura y energía, y poder hacer mejores modelos de su evolución.

En la Fig. 3 se muestra el centro de la Vía Láctea, nuestra galaxia, fotografiado por los telescopios espaciales Spitzer (en infrarrojo), Hubble (infrarrojo cercano al visible) y Chandra (en rayos X). En cada una de ellas se observan objetos y detalles que en otras longitudes de onda no se ven.

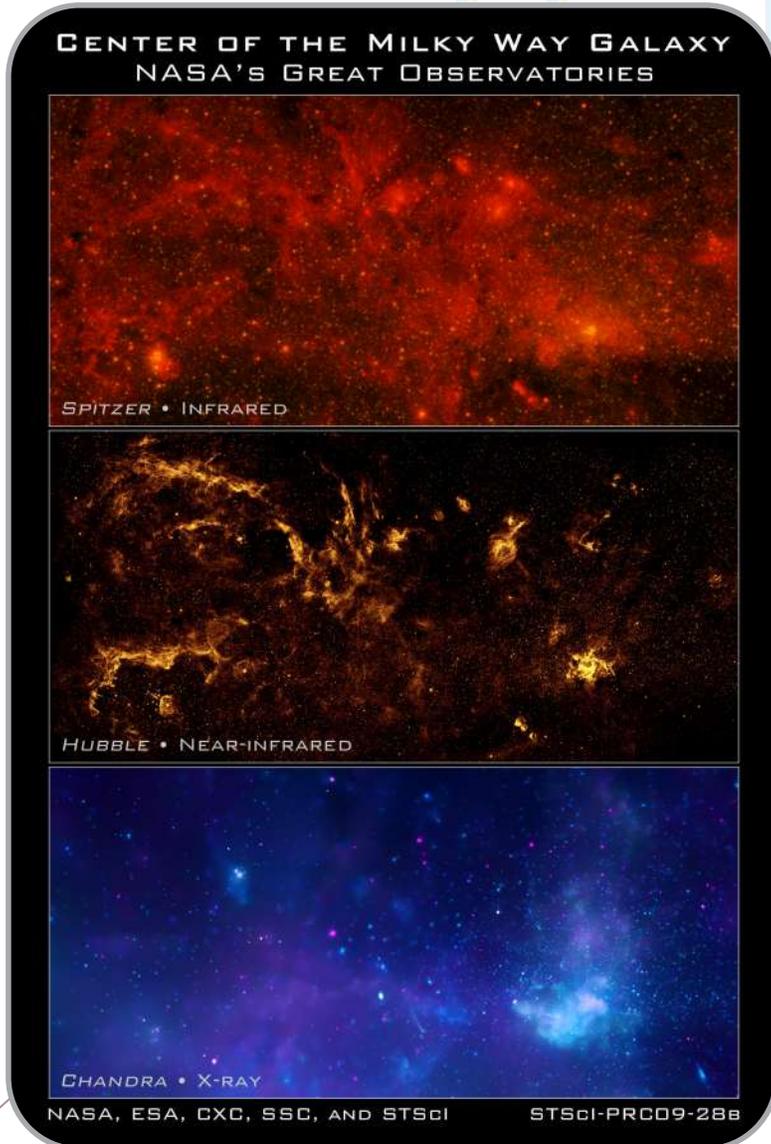


Fig.3.- Centro de nuestra Galaxia observado con cámaras sensibles al infrarrojo, visible y Rayos X.

DETECCIÓN DEL INFRARROJO CON UN TELÉFONO

Cuando hablamos de detectar radiación infrarroja seguro que pensamos en los visores nocturnos que se ven en las películas, que no están al alcance de cualquiera. Veamos un procedimiento más económico y fácil para detectar esa radiación.

Los mandos a distancia que utilizamos para encender el televisor o cualquier otro equipo electrónico tienen un diodo LED infrarrojo para comunicarse con el aparato. Cuando apretamos una tecla, nuestros ojos no ven que se encienda el LED, y sin embargo ha emitido radiación infrarroja.

La mayoría de las cámaras que llevan nuestros teléfonos tienen un chip sensible al infrarrojo cercano (el que está cercano al visible), que permite sacar fotos aunque haya poca iluminación.

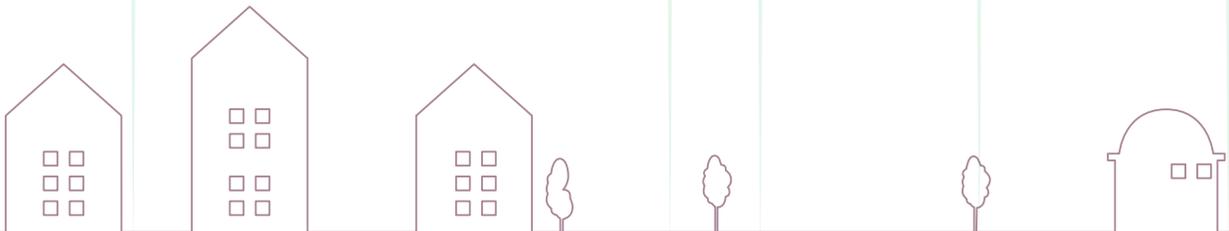


Fig. 4: Control remoto apagado y encendido.

Si miramos el control remoto con nuestros ojos de manera directa, no advertiremos ninguna diferencia entre encendido y apagado, pero la cámara de nuestro teléfono sí capta la diferencia (Fig. 4).

PRODUCCIÓN DE ESPECTROS: LEYES DE KIRCHHOFF Y BUNSEN

Cualquier objeto, por ejemplo un trozo de metal, si se le calienta lo suficiente, emite luz. Un gas también puede emitir luz al calentarlo, como ocurre en una llama. Incluso podemos producir luz poniendo gas entre dos placas con una fuerte diferencia de potencial eléctrico, como se hace en una bombilla fluorescente. La luz emitida en cada caso no es la misma, contiene mucha información del objeto que la ha producido. Su estudio constituye la Espectroscopía.



Que la luz se puede descomponer al atravesar un prisma o una lente, en un conjunto característico de colores, se conocía ya desde el siglo X. En esa época el sabio árabe Alhazen relacionó el arco iris con las gotas de agua suspendidas en la atmósfera y la luz solar. En el siglo XVII Newton y Huygens estudiaron el espectro continuo de la luz del Sol al atravesar un prisma. El alemán Joseph von Fraunhofer inventó en 1814 un instrumento, que llamó espectroscopio, con el que analizó la luz solar y descubrió en ella hasta 570 líneas oscuras fijas que aún hoy llevan su nombre (Fig. 5).

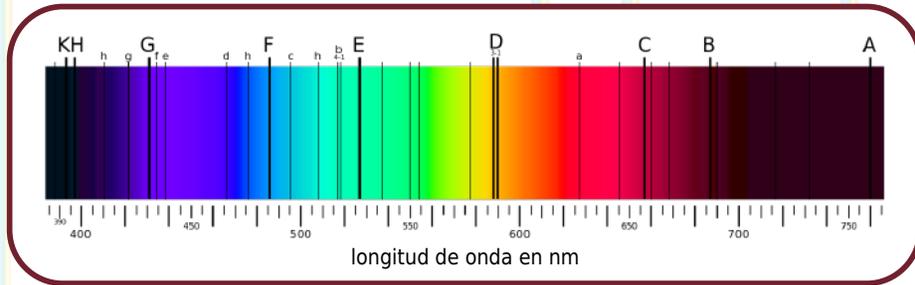


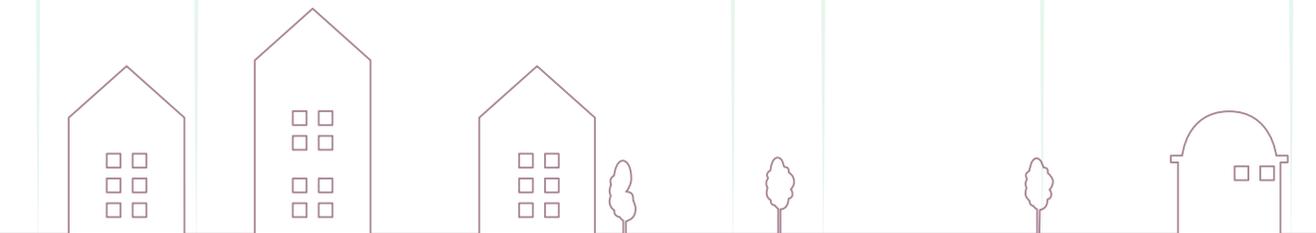
Fig. 5: Líneas de Fraunhofer.



Pero fueron Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen (Fig. 6), a mediados del siglo XIX, los que analizaron la luz de las llamas que producen diversos elementos químicos al arder, y observaron líneas de colores propias de cada elemento químico.

Un día, estando trabajando en la localidad alemana de Hamburgo, se produjo un incendio a varios kilómetros. Utilizaron el espectroscopio para analizar las llamas que se veían a lo lejos, y descubrieron una doble raya amarilla igual a la que habían observado al quemar sodio en su laboratorio. Resultó que el edificio que ardía era una fábrica de salazones, con abundantes depósitos de cloruro sódico.

Fig. 6: Kirchhoff y Bunsen.



Si podían detectar sodio en las llamas de un incendio, se propusieron estudiar las “llamas” del Sol, para ver su composición. Lo que observaron fue un espectro continuo con unas rayas negras. Al analizarlo se dieron cuenta de que la doble línea brillante amarilla del espectro del sodio estaba en la misma posición que la doble línea oscura del espectro del Sol que Fraunhofer había descubierto en 1814, y que había llamado “línea D”. Kirchoff y Bunsen lo interpretaron correctamente diciendo que los gases más fríos de la atmósfera solar atrapaban líneas de la luz del Sol, las mismas líneas del espectro que emitían cuando ese mismo gas era calentado. De esta forma si el espectro del Sol tenía la línea oscura D en la zona amarilla, esto significaba que la luz del Sol pasaba por sodio en estado gaseoso en su camino a la Tierra. Habían descubierto que el sodio se encontraba en la propia atmósfera del Sol, sin necesidad de ir allí. De la misma forma detectaron otros elementos químicos en la atmósfera del Sol.

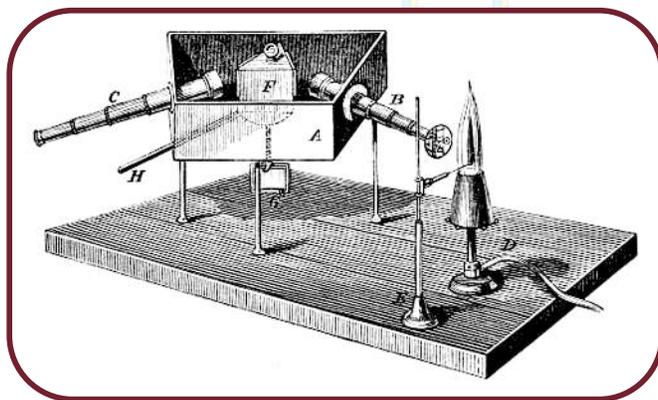


Fig. 7: Espectroscopio de Kirchoff y Bunsen.

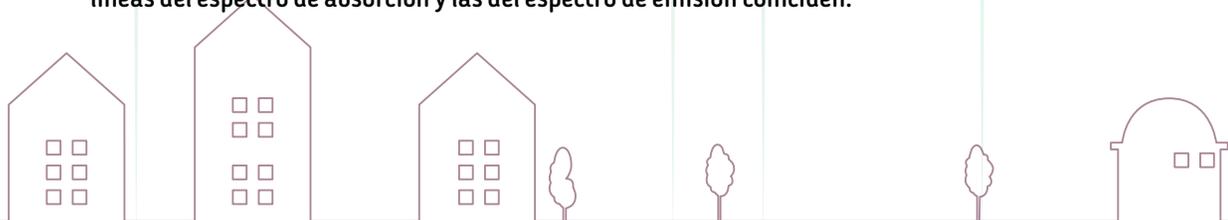
LAS TRES LEYES DE LA ESPECTROSCOPIA

Kirchoff y Bunsen propusieron tres leyes en las que se basa todavía hoy la espectroscopía (Fig. 8):

Ley 1: Un objeto sólido incandescente emite un espectro continuo de luz, en todas las longitudes de onda. Un líquido o un gas muy denso y caliente se comporta igual.

Ley 2: Un gas tenue, al calentarlo, emite luz tan solo en ciertas longitudes de onda, produciendo un espectro de emisión que depende de la composición química del gas.

Ley 3: Si la luz de un objeto sólido incandescente atraviesa un gas más frío, el espectro es continuo con unas líneas oscuras superpuestas, que se llama espectro de absorción. En un mismo gas, las líneas del espectro de absorción y las del espectro de emisión coinciden.



Estas leyes se pueden aplicar a la luz que nos llega de las estrellas. Estos objetos celestes están hechos de gas a mucha presión y temperatura, que lo hace estar en un cuarto estado de la materia llamado plasma. El interior de la estrella es muy denso, y se comporta como un sólido que emite luz de acuerdo con la primera Ley, con un espectro continuo. Las capas externas están a menor presión y temperatura, y en la zona más externa se comporta como un gas tenue mucho más frío que el interior: en el caso del Sol está a sólo 5780 grados Kelvin, frente a los varios millones de grados del núcleo. Por tanto, según la tercera Ley, los gases más externos atrapan líneas de absorción. Estudiando el espectro de la luz que nos llega de la estrella, podemos deducir la composición de los gases de la atmósfera.

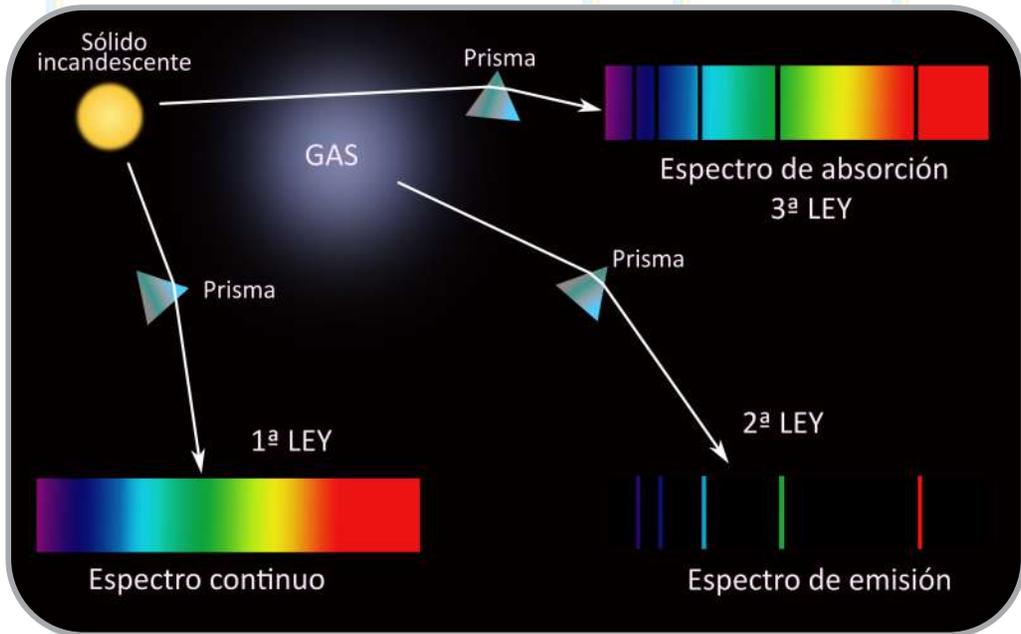


Fig. 8: Leyes de la espectroscopía. Tipos de espectros.

PERO, ¿POR QUÉ HAY ESAS LÍNEAS?

La explicación de las líneas espectrales vino de la mano de la Mecánica Cuántica. En 1913 Niels Bohr propuso un modelo para el átomo, con orbitales que tenían niveles de energía cuantizados, como en pisos. Esto significaba que los electrones podían saltar de un orbital a otro emitiendo o absorbiendo una cantidad de energía fija que dependía de los orbitales, pero no podían quedarse a medias. Con cada salto cuantizado, se emitía o absorbía un fotón de energía $h \cdot f$ (h es una constante llamada de Planck, $6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s, y f es la frecuencia del fotón).

Si la energía estaba cuantizada, la f también. Cada línea del espectro era producida por un salto entre orbitales (Fig. 9): si era a un orbital más externo absorbían un fotón, y si caía a un orbital más interior, con menos energía, emitía un fotón. Esos saltos posibles son propios de cada elemento químico.

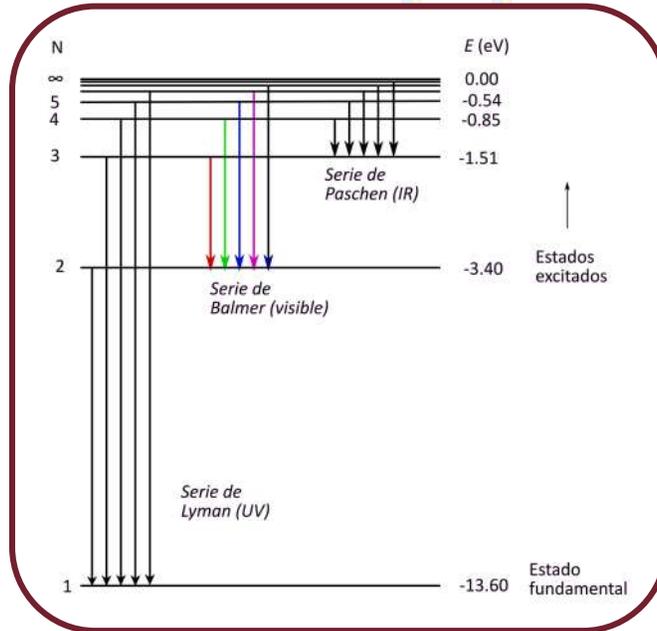


Fig. 9: Niveles de energía del átomo de Hidrógeno, con algunas transiciones que producen las líneas espectrales.

CONSTRUCCIÓN DE UN ESPECTROSCOPIO CON UN CD

Vamos a ver cómo construir un aparato sencillo con el que poder descomponer la luz de una fuente luminosa, como una bombilla o una vela, e incluso medir las longitudes de onda de los colores que se ven.

Si la bombilla es con filamento (halógena) el espectro es continuo, formado por todos los colores. Si la bombilla contiene gas (tubos fluorescentes, bombillas de bajo consumo y de farolas de alumbrado público) la luz contiene sólo unos colores determinados. Para separar los colores de la luz, necesitamos un prisma o una red de difracción. En este caso vamos a servirnos de la red de difracción que forman las líneas que hay en un CD.



El CD debe ser plateado por la cara que no se graba, es decir, no debe estar impreso, ni ser blanco o de otro color. Con unas tijeras fuertes cortamos de forma radial un trozo. Hay que desprender la capa metálica del CD. Para ello podemos servirnos de cinta adhesiva, rayando previamente la superficie (Fig. 10).



Fig. 10: Retirando la capa metálica del CD con cinta adhesiva.

Para construir el espectroscopio, debemos hacer una fotocopia en papel de la plantilla de la Fig. 13, y recortarla, incluyendo la ventana en forma de trapecio. La escala graduada NO hay que recortarla. Hacemos una rendija fina en la raya cercana a la escala graduada, y armamos la caja dejando la parte negra en el interior (Fig. 11), y pegando las solapas. En el hueco dejado por el trapecio, pegamos el trozo de CD que hemos preparado, que debe ser algo mayor que la ventanita (Fig. 12).



Fig. 11: Recortar y armar el espectroscopio, dejando la parte negra por dentro.



Fig. 12: Hay que pegar el trozo de CD en la ventana por donde se mira.

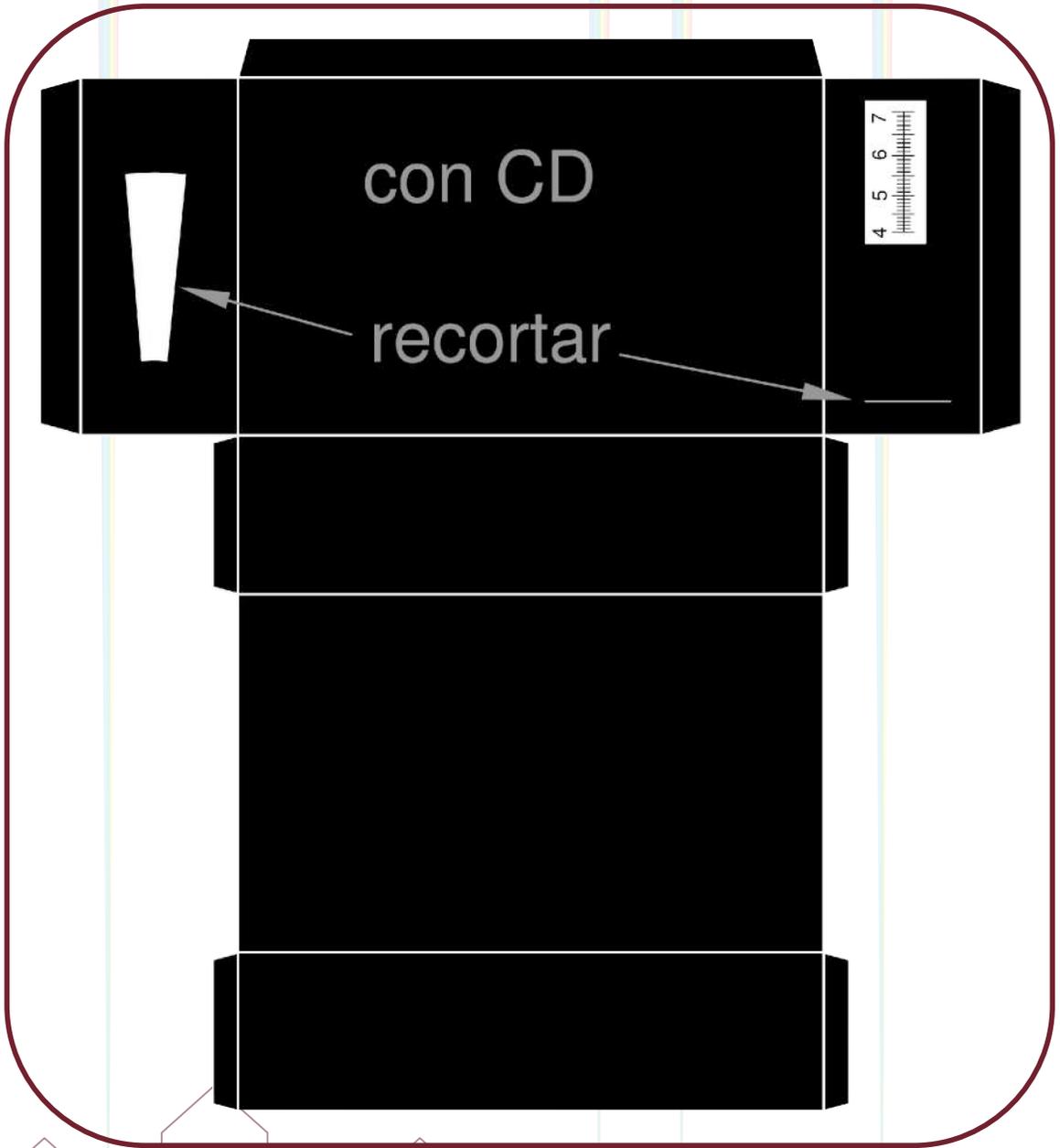


Fig. 13: Plantilla para el espectroscopio con CD.



Ahora situémonos en una habitación a oscuras, con sólo una lámpara encendida. Tomamos el espectroscopio y miramos a través de la ventanita que tiene el trozo de CD, dirigiendo la rendija de la caja a la lámpara. Desplazamos la rendija hacia la izquierda, (por tanto ya no alineada con la lámpara), hasta que veamos claramente sobre la escala unos colores. Son las líneas de emisión de los gases que contienen la bombilla. La escala está graduada en cientos de nanómetros, es decir, la marca 5 indica 500 nm ($500 \cdot 10^{-9}$ m). Cuanto más fina sea la rendija, con mayor precisión podremos medir la longitud de onda de las rayas.

Con bombillas de bajo consumo y con tubos fluorescentes, el espectro es de líneas, con una verde especialmente intensa (del mercurio). Con bombillas LED el espectro es casi continuo, aunque hay algunas zonas que faltan. Se pueden mirar las farolas de las calles, tanto las naranjas (de sodio, con una intensa línea doble amarilla) como las blancas (de vapor de mercurio). Las bombillas incandescentes tradicionales y halógenas, ofrecen un espectro continuo, pero si tienen un regulador de potencia se puede ver que cuando iluminan muy poco, apenas tiene azules. Algunos ejemplos se pueden ver en la Fig. 14.

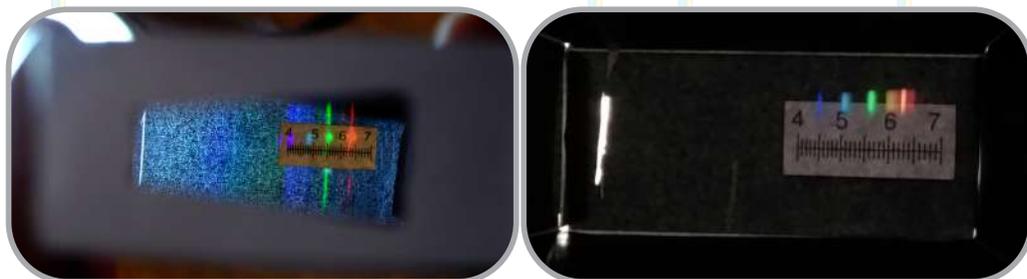


Fig. 14: Espectros de líneas de emisión de una lámpara fluorescente. Se ven las líneas del espectro y se puede medir sus longitudes de onda.



Fig. 15: Experiencia con docentes en Colombia (izquierda) y en Nicaragua (derecha).

CONSTRUCCIÓN DE UN ESPECTROSCOPIO CON UN DVD

Los DVD tienen más densidad de líneas que los CD (en el CD hay 650 líneas/mm, y en el DVD el doble, 1300 líneas/mm). Si usamos un DVD como red de difracción, los colores se separarán más, y la precisión en las medidas será mayor. Pero debemos usar otra plantilla, la de la Fig. 18.

En los DVD hay dos capas de plástico, una metalizada y otra no, que es la que usaremos. Para separarlas no es necesario la cinta adhesiva como en el CD, basta doblar un poco el trozo cortado, y se separan fácilmente, como se ve en la Fig. 16.



Fig. 16: Doblando el trozo de DVD se separa la parte plateada de la que se usa de red.

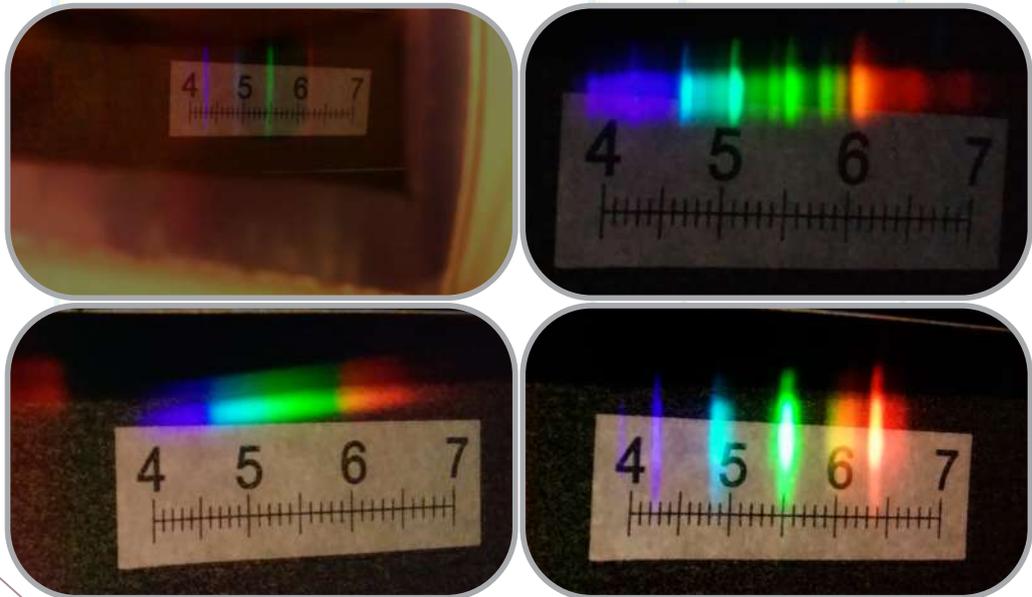


Fig. 17: Espectros de varias bombillas de farolas de la calle, con el espectroscopio de DVD.



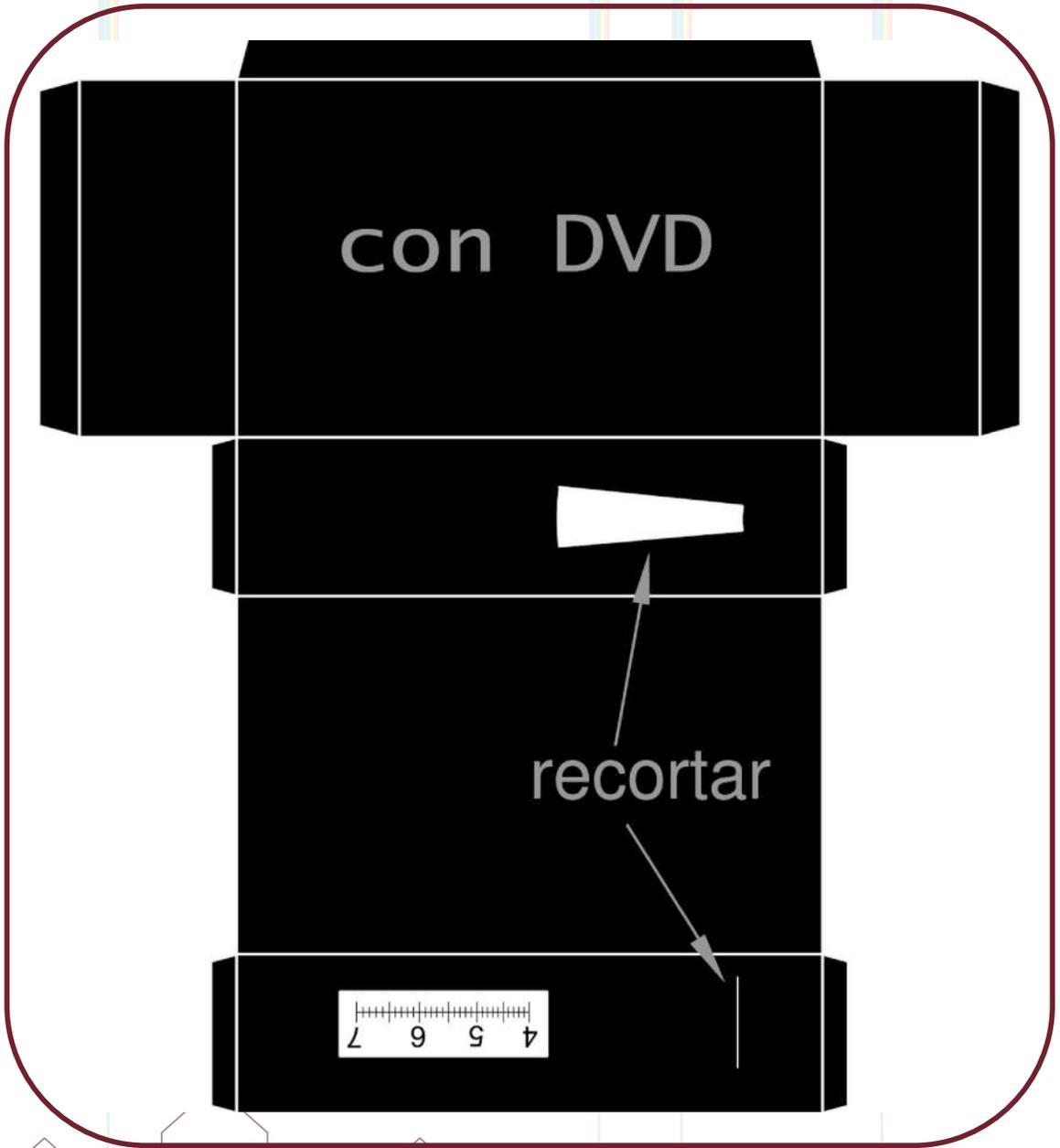


Fig. 18: Plantilla para usar con un DVD.



CONSTRUCCIÓN DE UN ESPECTROSCOPIO MÁS SENCILLO

Se puede hacer un espectroscopio más sencillo, sin escala y por lo tanto sin poder medir las longitudes de onda, con una caja de cartón pequeña, por ejemplo de medicinas, de un libro, etc. En una de las caras por donde se abre, se hace una rendija fina en el centro, y en la cara opuesta se recorta una ventana (Fig. 19). Se pega el trozo de CD o de DVD en la ventana. Se vuelve a cerrar la caja y se mira a través de la ventana, dirigiendo la rendija hacia una fuente de luz. A derecha e izquierda se debe ver el espectro de colores (Fig. 20). Si no se ve, hay que mover la caja hacia la izquierda o derecha, hasta que aparezca el espectro.



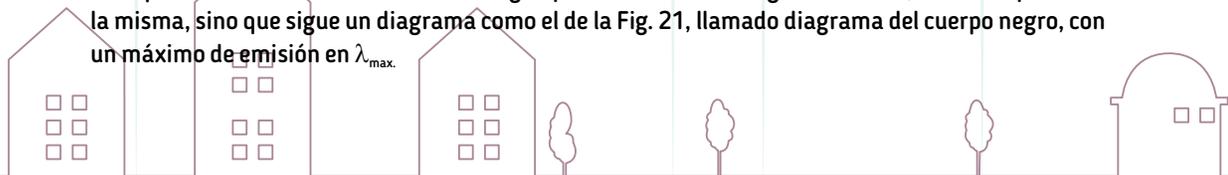
Fig. 19: Espectroscopio con una caja de medicinas y un trozo de CD. Es más sencillo pero no podremos medir longitudes de onda.



Fig. 20: Ejemplo de espectro con una caja de medicamento.

LEY DE WIEN

Hemos visto que un sólido suficientemente caliente produce luz en todas las longitudes de onda, con un espectro continuo. Si medimos la energía que emite en cada longitud de onda, veremos que no es la misma, sino que sigue un diagrama como el de la Fig. 21, llamado diagrama del cuerpo negro, con un máximo de emisión en λ_{max} .



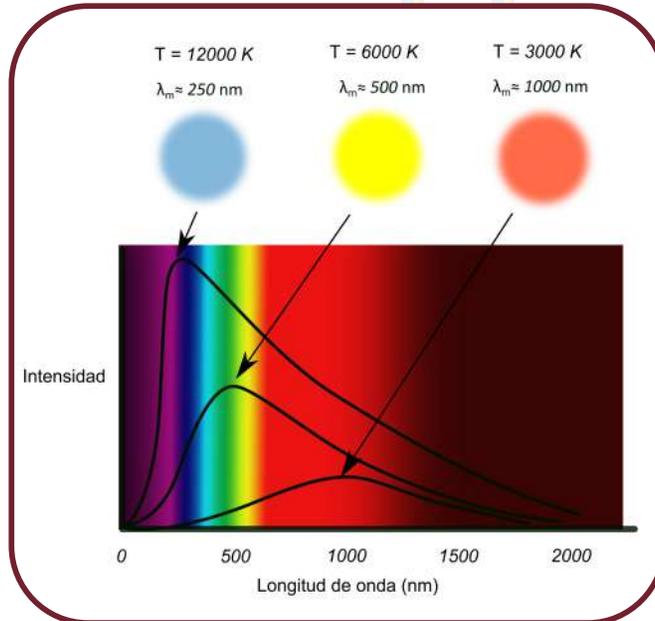


Fig. 21: Curva de cuerpo negro y su relación con la temperatura.

Supongamos que tenemos una bombilla de filamento con un regulador de luz, y un fotómetro con un conjunto de filtros con los que podamos medir la energía en cada longitud de onda. Empezamos con el filamento muy poco iluminado, y vemos que el máximo de emisión está en el rojo. Si vamos aumentando la temperatura del filamento, el máximo se desplazará hasta el amarillo, luego al verde, al azul e incluso más allá del visible, cada vez con longitudes de onda menores. Wien comprobó que el producto de la temperatura T y de esa λ_{\max} era constante e igual a $2,897 \cdot 10^{-3}$, constante que lleva su nombre:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Por ejemplo, el Sol emite su máxima energía en la región del verde con una $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm} = 500 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. Con la ley de Wien podemos deducir que su temperatura superficial es $T = 5794 \text{ K}$. El color amarillento del Sol sale de la combinación de todas las frecuencias en las que emite. Otras estrellas emiten más en el rojo lo que significa que su temperatura superficial es menor. Y otras emiten la mayor parte de su energía en el azul o incluso más allá lo que significa que son muy calientes y el color que sale es blanco azulado.

¿Y POR QUÉ NO HAY ESTRELLAS VERDES?

Hay estrellas rojas, amarillas, naranjas y azules, pero no verdes. ¿Por qué?

Pensemos en una estrella con poca temperatura superficial, por ejemplo 3000 K. Como se ve en la Fig. 21, habrá mucha radiación roja, y poca del resto de colores visibles, así que la veremos de ese color. Si aumentamos la temperatura, habrá también radiación naranja y amarilla. La suma de esos tres colores da a la estrella un tono rojo-amarillento. Si aumentamos más la temperatura, emite también en verde. Este color, al mezclarse con el rojo, da amarillo (ver Fig. 22), por lo que la estrella se sigue viendo amarilla. Con más temperatura, la estrella emite también en azul, y la suma del amarillo, verde y azul da blanco, por tanto el color de la estrella será blanco, llegando a un blanco-azulado si la temperatura es muy alta.

¿Y la estrella verde? Nunca se ve, porque este color está en medio del espectro visible, y una estrella que emita su máxima radiación en este color, siempre emitirá también en rojo y en azul, cuya suma da amarillo o blanco.

Podemos reproducir el color de las estrellas utilizando tres linternas. La experiencia funciona mejor si se quita el espejo parabólico que tienen las linternas junto a la bombilla, y se pone un tubo de cartulina negra. Al final del tubo hay que poner un filtro de papel transparente de color azul en una, verde en otra y rojo en la tercera.

Empecemos encendiendo sólo la linterna roja. Sería la luz de una estrella de baja temperatura. Encendamos la linterna verde y mezclamos las dos luces: nos da amarillo. Serían las estrellas de temperatura media, que se ven de un color que va del naranja al amarillo. Si encendemos la linterna azul y mezclamos su luz con las anteriores, nos da blanca, que sería el color de una estrella de temperatura alta. Si la temperatura aumentara, habría más intensidad del azul, y la estrella pasa a ser blanco-azulada.

Puedes aumentar o disminuir la intensidad de un color alejando esa linterna de la pantalla.

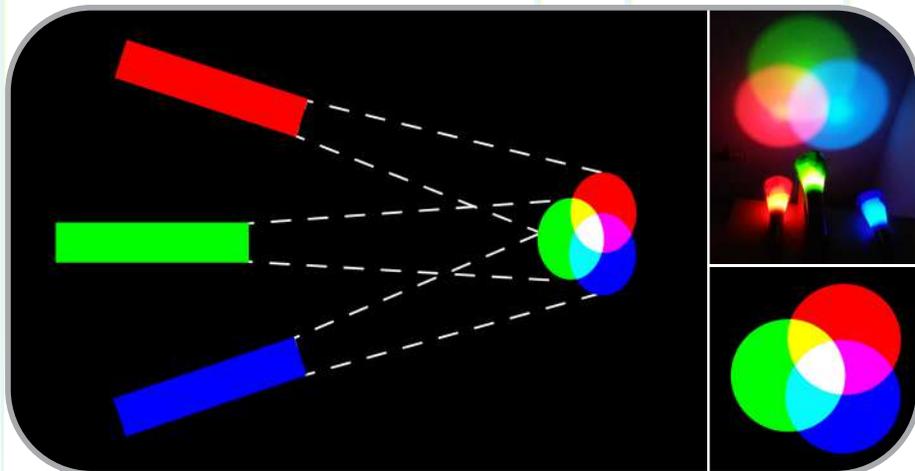


Fig. 22: Con tres linternas de colores se pueden simular el color de las estrellas.

LOS ESPECTROS ESTELARES Y LA CLASIFICACIÓN ESPECTRAL

A principios del Siglo XX un grupo de astrónomas que trabajaban en la Universidad de Harvard, sentó las bases de la clasificación espectral que seguimos usando en nuestros días.

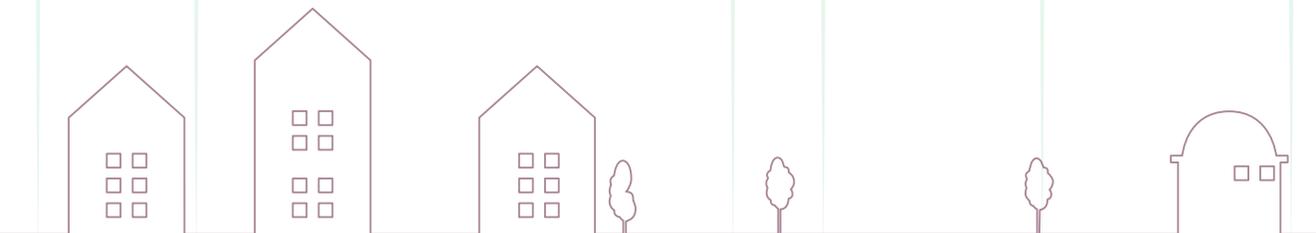
Estas astrónomas, lideradas por Annie Cannon, encontraron una relación entre los colores de las estrellas, su temperatura superficial y sus espectros. Pusieron a las estrellas en determinados grupos de similar color, temperaturas y espectros, a los que llamaron O, B, A, F, G, K, M. Las estrellas de mayor temperatura son las del tipo O, azuladas, y las de menor temperatura son las M, rojizas.

TIPO	COLOR	TEMPERATURA °C	EJEMPLO
O		30.000	Zeta Puppis
B		20.000	Rigel
A		10.000	Vega
F		7.000	Canopus
G		6.000	Sol
K		4.000	Aldebaran
M		3.000	Betelgeuse

CLASES ESPECTRALES ESTELARES BÁSICAS

Fig. 23: Tipos de estrellas, con sus colores y temperaturas.

Posteriormente cada uno de estos tipos de estrellas se subdividió. En la Fig. 24 es posible ver los espectros de los tipos de estrellas, correlacionados con las temperaturas superficiales. También se observan las líneas espectrales características de cada tipo, que representan elementos químicos en las atmósferas de los objetos. La clasificación espectral es uno de los grandes logros de la Astrofísica.



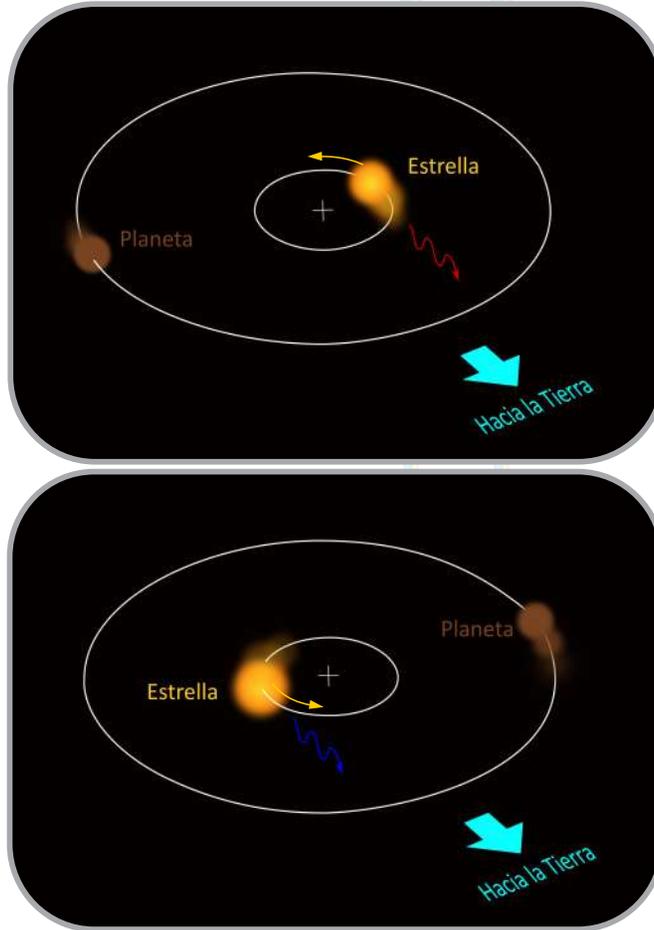
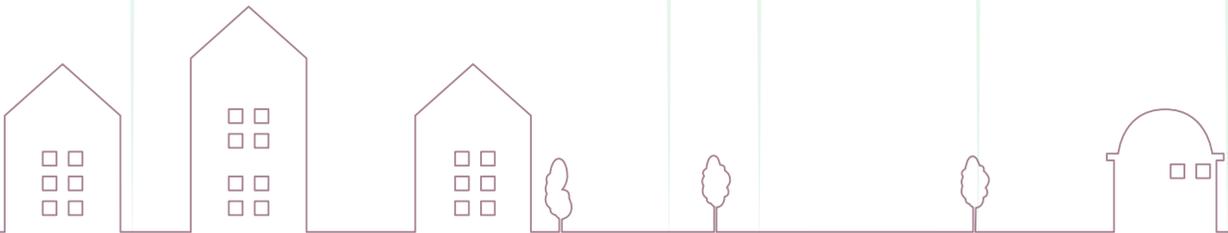


Fig. 25: Efecto Doppler en una estrella con planeta.

La mayoría de los planetas extrasolares conocidos se han descubierto gracias al efecto Doppler (Fig. 25). Se trata de planetas muy grandes y oscuros, no observables directamente, pero detectables al ver que la luz de la estrella compañera tiene un desplazamiento alternante hacia el rojo y hacia el azul.



CONCLUSIÓN

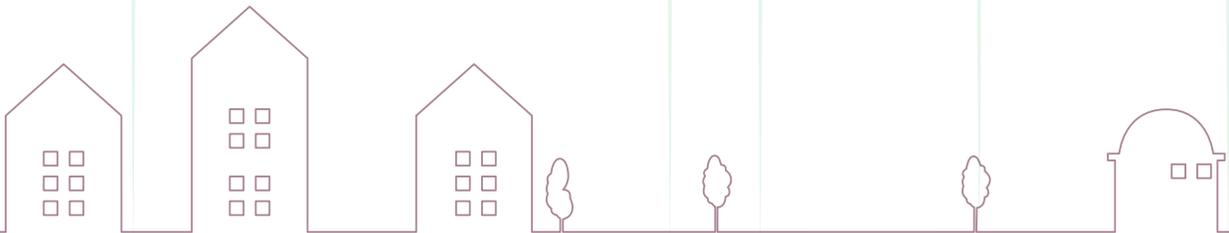
Las estrellas están a distancias enormes, pero hemos visto que para saber cómo son y qué ocurre en ellas no es necesario ir hasta allí. En la luz que nos envían hay un mensaje que contiene mucha información si se sabe leer adecuadamente.

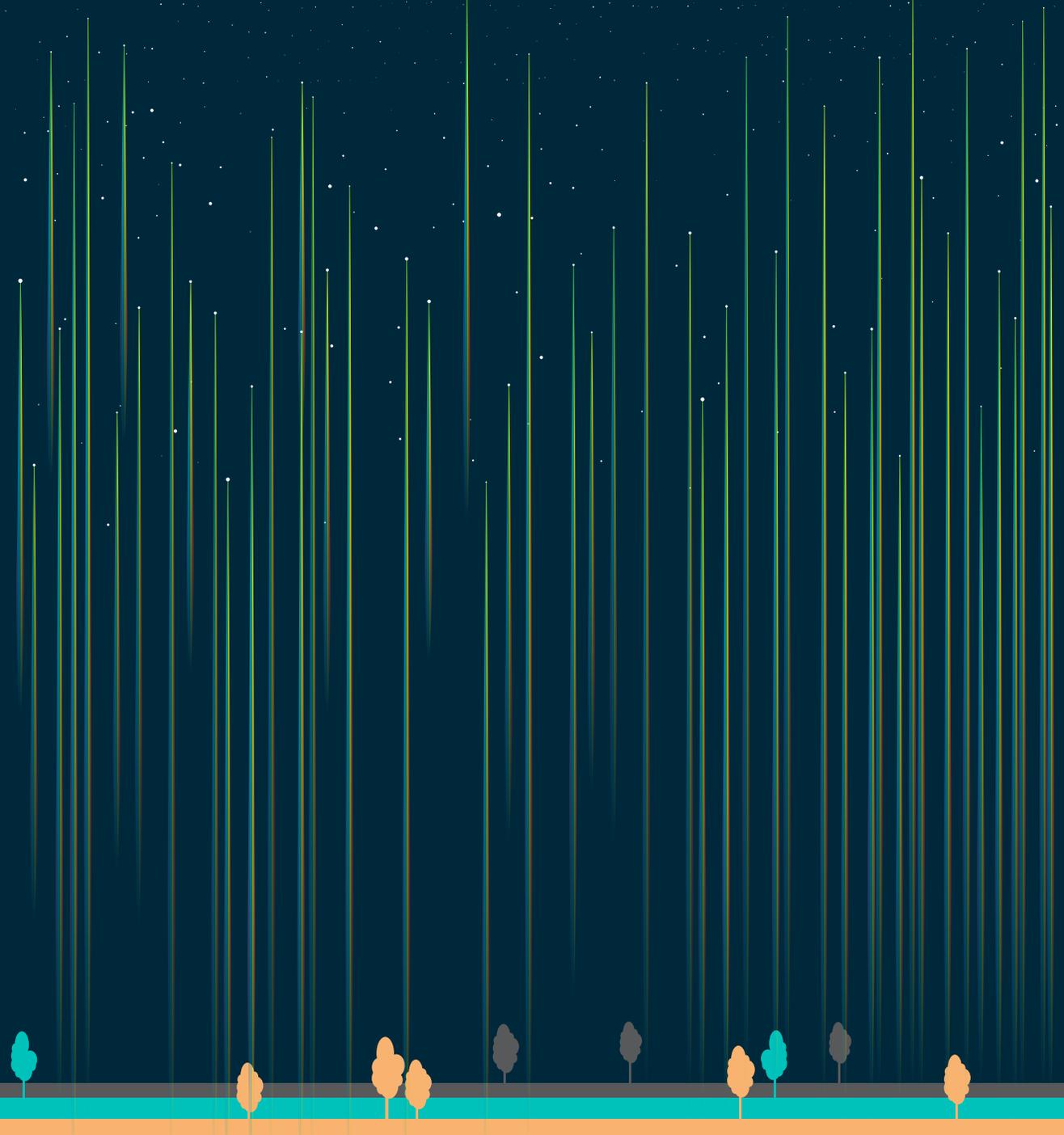
Analizando el espectro de la luz de una estrella, podemos saber de qué están hechas, su temperatura superficial, o incluso si tienen grandes planetas a su alrededor. Aplicando otras leyes físicas, los astrónomos también deducen muchas otras cosas: el radio de la estrella, su evolución en el tiempo, qué procesos están sufriendo, etc.

En esta publicación, además de explicar los fundamentos de los espectros, hemos reproducido a pequeña escala y con materiales sencillos algunos de esos trabajos de los profesionales de la Astronomía, que pueden servir para la enseñanza de esta ciencia.

BIBLIOGRAFÍA

- 14 pasos hacia el Universo. NASE. Ed. Antares, Barcelona 2018.





Network for Astronomy School
Education - International
Astronomical Union

