

INTRODUCCIÓN A LA ESPECTROSCOPIA

Leyendo entre Líneas_1



PRIMERO DE DOS ARTÍCULOS SOBRE ESPECTROSCOPIA: EN ÉSTE VEREMOS LAS NOCIONES BÁSICAS, Y EL SIGUIENTE MOSTRARA LAS APLICACIONES EN ASTRONOMÍA.

Por Montse Villar (IAA-CSIC)

¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL SOL? ¿HAY AGUJEROS NEGROS EN EL CENTRO DE LAS GALAXIAS? ¿Se está expandiendo el Universo? ¿Existen planetas alrededor de otras estrellas? ¿Qué moléculas existen en el espacio interestelar? Contestar a estas y muchas otras preguntas ha marcado hitos importantes en la historia de la ciencia. Y hemos hallado muchas de las respuestas gracias a la espectroscopía, una técnica que los científicos hemos utilizado en estudios astronómicos desde hace más de doscientos años.

La espectroscopia también ha empezado a ganar adeptos entre los astrónomos *amateur*: comprender la información cifrada en los espectros de los objetos astronómicos abre a los amantes del universo una infinidad de posibilidades para desarrollar estudios fascinantes y relativamente sencillos, que no pueden abordarse con la técnica de la imagen.

Con la pareja de artículos dedicados a la espectroscopía en astronomía que se publicarán en números consecutivos de la revista IAA, buscamos aportar las nociones básicas necesarias para que los lectores sean capaces de:

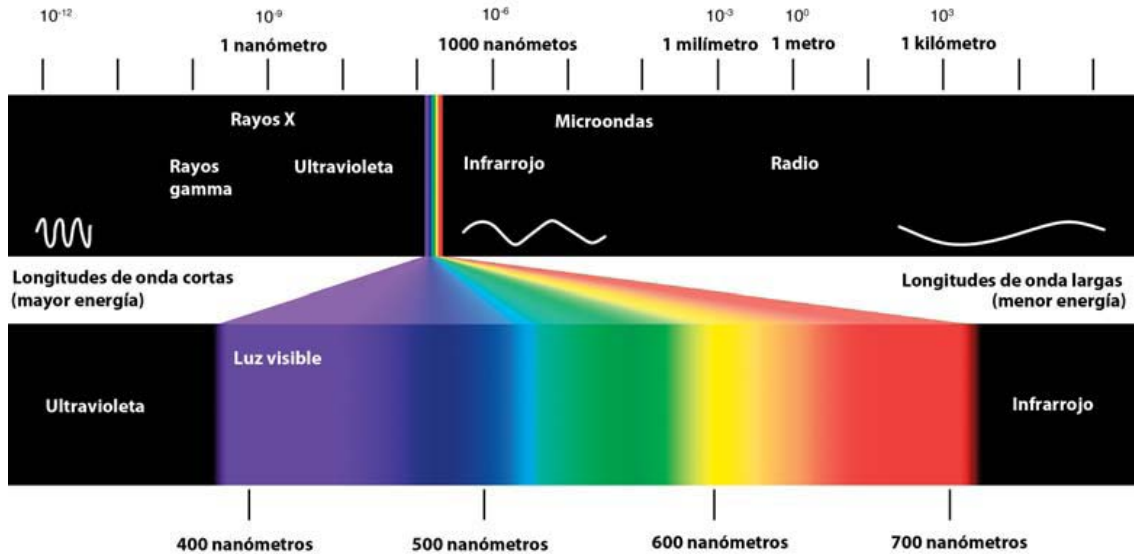
- 1) Identificar la naturaleza de los objetos astronómicos a partir de sus espectros y comprender el origen de las diferencias
- 2) Entender cómo se utilizan los espectros para investigar las propiedades físicas (temperatura, densidad) y cinemáticas (cómo se mueven), así como la composición química de los objetos astronómicos
- 3) Entender cómo se ha utilizado la técnica de la espectroscopia para dar respuesta a algunas preguntas de gran relevancia, como las mencionadas al principio de este artículo.

Pretendemos además mostrar cómo los experimentos de laboratorio y las leyes físicas que los explican permiten asimismo explicar las características básicas de los espectros de objetos astronómicos.

Para ello, antes de centrarnos en la aplicación de la espectroscopia en la astronomía, es necesario comprender una serie de conceptos sobre la naturaleza y comportamiento de la luz y de la materia, que abordamos en este primer artículo. Se mostrarán algunos ejemplos sencillos e ilustrativos.

¿QUÉ ES UN ESPECTRO?

Cuando la luz atraviesa un prisma se dispersa en radiación de diferentes colores: esto es un espectro. El arco iris es un ejemplo que todos hemos visto alguna vez – en este caso la atmósfera de la Tierra hace el papel del prisma que dispersa la luz solar-. El espectro de la luz, o espectro electromagnético, se extiende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma) a las más largas (radio). Nosotros únicamente detectamos la luz en el rango visible u óptico, del violeta al rojo, porque las células fotorreceptoras del ojo (conos y bastones) solo son sensibles a esta radiación. Somos ciegos, por tanto, a la radiación infrarroja, los rayos X, etc.

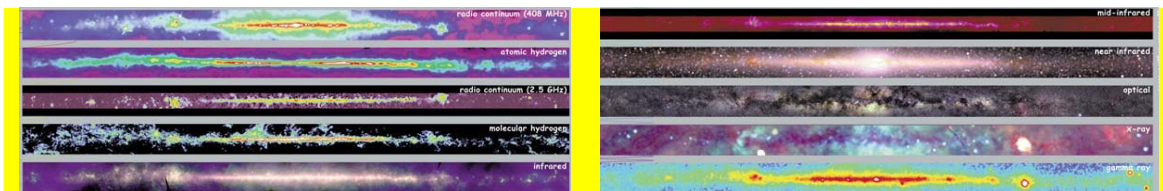


El espectro de la luz se extiende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma) a las más largas (radio). Nuestros ojos son sólo sensibles a la luz visible, desde el violeta al rojo.

La luz se comporta como una onda y, como tal, está caracterizada por su longitud de onda λ , que mide la distancia entre dos picos consecutivos de la misma. A cada color le corresponden longitudes de onda diferentes, como se aprecia en la imagen. La luz, además, tiene comportamiento de partícula. Las partículas de luz se llaman fotones y su energía depende de la λ según:

$$E = h c / \lambda$$

Donde h es una constante (constante de Planck) y c es la velocidad de la luz. Esta sencilla fórmula nos dice que cuanto más energética es la radiación menor es su longitud de onda. Por ejemplo, la luz ultravioleta tiene longitud de onda más cor-



Imágenes de la Vía Láctea a diferentes longitudes de onda. Dependiendo del rango espectral el aspecto es diferente, pues vemos distintos ingredientes de la Galaxia. Así, la imagen en infrarrojo muestra la distribución del polvo, mientras que en el óptico vemos estrellas y gas ionizado y en rayos X observamos objetos muy energéticos como supernovas y estrellas binarias de rayos X. Según qué fenómenos y objetos queramos investigar, seleccionaremos el rango espectral adecuado para las observaciones. Fuente: NASA.

ta que la amarilla. Es por tanto más energética y por ello más peligrosa. De ahí que debamos protegernos de sus efectos dañinos para la piel.

Multitud de procesos astrofísicos dan lugar a la emisión de radiación. El rango espectral en el que esta radiación es más intensa varía de unos escenarios a otros. Así, debemos decidir qué rango espectral es el más adecuado a la hora de elaborar una estrategia para el estudio observacional de determinados fenómenos y objetos astronómicos. Por ejemplo, las reacciones nucleares en el interior de estrellas como el Sol producen energía de la que una fracción importante emergerá de la atmósfera estelar en forma de radiación visible; los mecanismos de enfriamiento del polvo en las galaxias generan emisión que domina en el infrarrojo; los estallidos de supernovas producen una intensa emisión en rayos X; el hidrógeno neutro emite en radio, etc. Todo ello significa que el universo se revela con aspectos muy diferentes dependiendo de la longitud de onda en que lo observemos. Esto queda ilustrado en la imagen superior, donde se muestra un mosaico de imágenes de la Vía Láctea en diferentes rangos espectrales.

ESPECTROS CONTINUOS, DE LÍNEAS DE EMISIÓN Y DE ABSORCIÓN

A mediados del siglo XIX, Gustav Kirchhoff (físico) y Robert Bunsen (químico) realizaron experimentos de laboratorio consistentes en analizar el espectro emitido por fuentes y elementos diversos. Sus trabajos dieron lugar a tres leyes fundamentales que, como veremos, nos ayudarán a identificar la naturaleza de los objetos astronómicos a partir de sus espectros.

- 1) Un objeto sólido incandescente o un gas denso y caliente, sometido a muy alta presión, emite un espectro continuo de luz. Es decir, dentro de un rango espectral dado, emiten radiación en todas las longitudes de onda.
- 2) Un gas tenue y caliente emite un espectro de líneas brillantes (líneas de emisión). Es decir, emite luz tan solo a unas longitudes de onda determinadas. El espectro de líneas de emisión depende de la composición química del gas.
- 3) El espectro de una fuente de continuo observado a través de un gas más frío muestra líneas oscuras superpuestas (de absorción). El espectro de absorción es el inverso del espectro de emisión del gas (este emite y absorbe a las mismas longitudes de onda).

LA ESTRUCTURA INTERNA DEL ÁTOMO

Un cuerpo, por el hecho de tener cierta temperatura, emite un espectro continuo (primera ley de Kirchhoff). Cuanto más caliente está el cuerpo, más energética es la radiación que emite, es decir, menor es su longitud de onda. De ahí que cuando introducimos un pedazo de hierro en un horno veamos cómo se pone incandescente y pasa sucesivamente del rojo al azul y al blanco a medida que aumenta su temperatura.

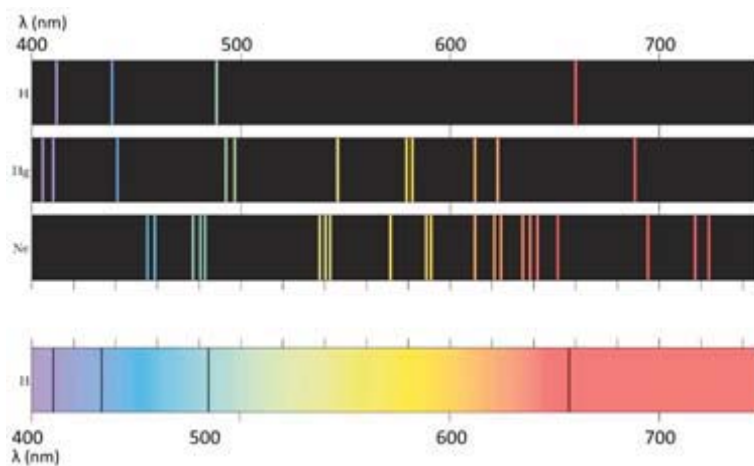
¿Cómo se producen los espectros de líneas de absorción y de emisión? La respuesta reside en la estructura subatómica de la materia: es la mecánica cuántica en acción. Los átomos están formados por el núcleo (protones y neutrones) y los electrones que orbitan a su alrededor. Los electrones no son libres de moverse de cualquier manera, sino que siguen órbitas fijas y a cada una de ellas le corresponde una energía determinada. Un electrón puede saltar entre órbitas absorbiendo o cediendo exactamente la energía correspondiente a la diferencia entre dichas órbitas.

En un gas tenue y caliente, diversos mecanismos (recombinaciones, colisiones con otros electrones libres...) hacen que los electrones ocupen órbitas de mayor energía. Un electrón excitado perderá el exceso de energía saltando a una órbita

inferior mediante la emisión de un fotón. Dicho fotón tiene una energía y por tanto una longitud de onda determinadas. De ahí que un gas tenue y caliente produzca un espectro de líneas de emisión (segunda ley de Kirchhoff-Bunsen). Cada línea es producida por la contribución de los fotones emitidos por los electrones que saltan entre dos órbitas determinadas de un elemento dado en el gas (por ejemplo, el oxígeno).

Si colocamos este gas delante de una fuente de radiación de espectro continuo, la multitud de fotones que ilumina el gas es ahora responsable de excitar los electrones a niveles superiores. Son por tanto absorbidos por los átomos e iones del gas, desapareciendo de esta manera del espectro continuo y dando lugar a las bandas oscuras (líneas de absorción) que se observan sobre él. Queda así explicada la tercera ley de Kirchhoff-Bunsen.

Cada elemento químico tiene una estructura de órbitas electrónicas única. Por ello su espectro es también único (imagen de la izquierda). Aquí está la clave de que podamos determinar la composición química de los objetos astronómicos, desde las atmósferas de planetas extrapolares hasta las galaxias más lejanas.



Cada elemento químico (como el hidrógeno, mercurio y neón en la figura) tiene un espectro único. La identificación de las líneas en los espectros de objetos astronómicos nos permitirá determinar su composición química. El patrón de líneas de un gas (véase el hidrógeno, H) es idéntico tanto en emisión (arriba) como en absorción (abajo).

COMO IDENTIFICAR LA NATURALEZA DE LOS OBJETOS A PARTIR DE SUS ESPECTROS

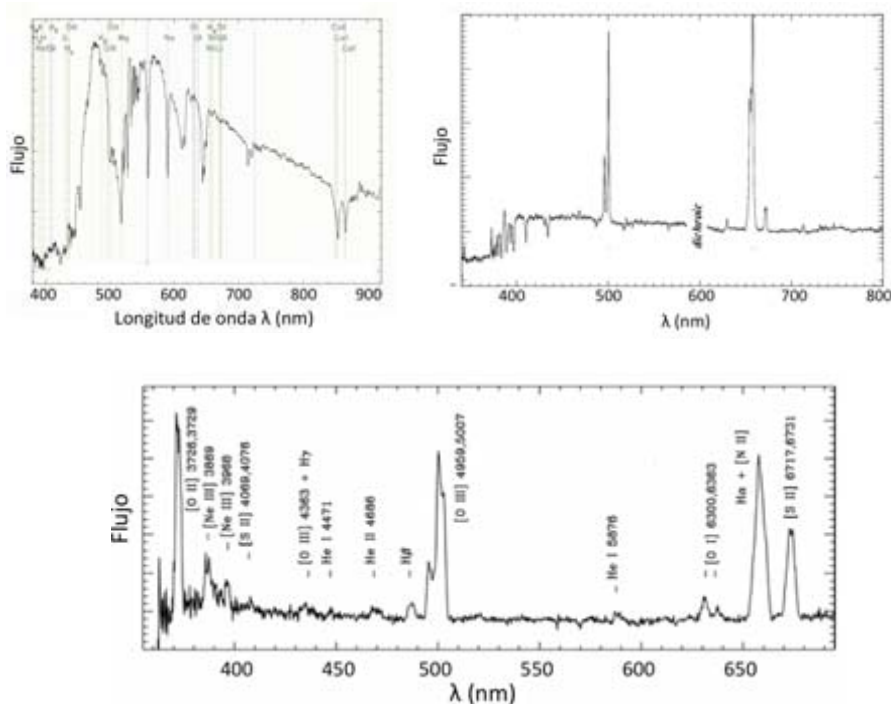
Con lo que hemos aprendido hasta ahora, podemos intentar ya identificar la naturaleza de los objetos astronómicos a partir de sus espectros. Veamos cómo:

1) Nebulosas. Como la de Orión, las nebulosas están formadas fundamentalmente por gas ionizado tenue y caliente. Por ello emiten un espectro de líneas de emisión (segunda ley de Kirchhoff-Bunsen).

2) Estrellas. La mayor parte de la radiación que observamos de las estrellas procede de la fotosfera. Las capas más profundas, densas y calientes, emiten un espectro continuo (primera ley de Kirchhoff-Bunsen). Al atravesar las capas más superficiales y frías se producen las líneas de absorción (tercera ley de Kirchhoff-Bunsen), conocidas como líneas de Fraunhofer en el caso del Sol. De ahí que las estrellas emitan un espectro continuo con líneas de absorción superpuestas.

3) Galaxias. Cuando observamos una galaxia nos llega la radiación integrada de muchas estrellas. Por ello, su espectro es continuo con multitud de líneas de

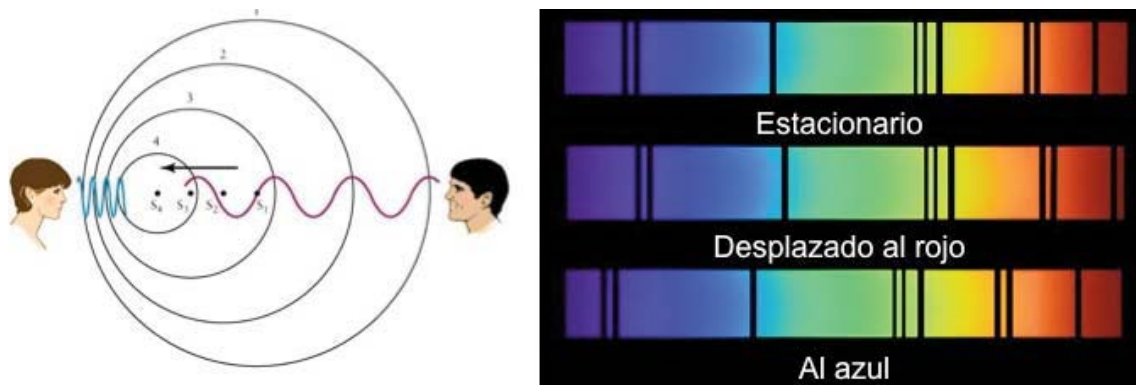
absorción superpuestas. Si la galaxia contiene cantidades importantes de gas tenue y caliente, su espectro mostrará además líneas de emisión.



Arriba vemos los espectros ópticos de tres objetos astronómicos. El formato, diferente al mostrado en las figuras anteriores, es el que suele utilizarse en estudios astronómicos y representa el flujo (cantidad de energía) emitido para cada longitud de onda. ¿A qué tipo de objeto creéis que corresponde cada espectro?

EL EFECTO DOPPLER

El sonido emitido por un tren es más agudo cuando se acerca a nosotros que cuando se aleja. Este fenómeno se conoce como efecto Doppler y afecta tanto a las ondas del sonido como de la luz. El tono de un sonido depende de la longitud de onda. Cuando el tren se acerca a nosotros los picos de onda se acercan, es decir, la onda "se comprime" y esto resulta en un sonido más agudo. Cuando el tren se aleja ocurre lo contrario, la longitud de onda aumenta y el sonido es más grave. De manera equivalente, el color que percibimos de una fuente luminosa depende de su movimiento respecto a nosotros. Si se acerca, la longitud de onda será menor que en reposo y su espectro se desplazará hacia el azul. Cuando la fuente se aleja, el espectro se desplazará al rojo. El efecto Doppler es la base de muchos estudios as-



trofísicos -nos basamos en él para caracterizar los movimientos de las astros. Permitted, por ejemplo, descubrir a principios del siglo XX que el universo se está expandiendo, tras observarse que los espectros de la mayoría de las galaxias están desplazados al rojo -por tanto, se alejan unas de otras.

Si una fuente de luz se mueve respecto al observador con una componente de velocidad v a lo largo de la línea de visión, su espectro experimentará un desplazamiento $\Delta\lambda$ que, para cada longitud de onda viene dado por:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \times v / c$$

donde c es la velocidad de la luz (300 000 km/s) y λ_0 es la longitud de onda del espectro estacionario. Veamos un ejemplo. La longitud de onda de la línea de hidrógeno H α en el laboratorio es 656.3 nanómetros. Cuando tomamos un espectro de la galaxia Messier 87, detectamos H α a 659.2 nm. ¿Se acerca o se aleja de nosotros esta galaxia? ¿A qué velocidad?

Los desplazamientos en longitud de onda en el espectro de los objetos astronómicos nos permiten reconstruir el movimiento de los mismos. Como veremos en el próximo artículo, el efecto Doppler nos permite, por ejemplo, buscar planetas extrasolares a partir de los desplazamientos que experimenta el espectro de la estrella que orbitan.



En los conceptos e ideas presentados aquí se hallan las claves para abordar un sinfín de cuestiones fundamentales para nuestra comprensión del universo mediante la técnica de la espectroscopia. Esta nos ayuda a encontrar las estrellas más viejas de nuestra galaxia, a averiguar si una galaxia contiene un agujero negro en su núcleo, a caracterizar la composición química de las galaxias más lejanas... En el próximo artículo veremos algunas de estas aplicaciones prácticas.

Montse VILLAR (IAA-CSIC)

Este artículo aparece en el número 35, octubre 2011, de la revista Información y Actualidad Astronómica, del Instituto de Astrofísica de Andalucía.